

AValiação Experimental e Numérica da Resistência de Vigas com Secções em Ω Enformadas a Frio Furadas

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION OF THE RESISTANCE OF BEAMS WITH COLD-FORMED HOLED Ω SECTIONS

N. Lopes¹, P. Vila Real¹, A. Reis¹, F. Arrais¹

¹ LABEST - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro



RESUMO

Neste trabalho analisou-se a resistência de madres metálicas furadas com secções em Ω enformadas a frio. São apresentados ensaios experimentais realizados a secções com diferentes dimensões e correspondentes a diferentes esquemas estruturais. Foram consideradas diferentes condições de apoio, diferentes sentidos de aplicação das cargas (ascendente ou descendente) e a sobreposição dos perfis para o aumento da resistência e da rigidez das vigas. Estes ensaios são representativos de uma solução construtiva real tendo o estudo sido solicitado pela empresa que fabrica os perfis. Para cada tipo de ensaio experimental foi realizada uma análise numérica comparativa, com recurso ao programa de elementos finitos SAFIR, através de análise geométrica e materialmente não linear incluindo imperfeições.

ABSTRACT

In this work it was analysed the resistance of cold-formed steel purlins with holed Ω cross-sections. Experimental tests carried out with different Ω cross-sections are presented, with different dimensions, corresponding to several structural frames. Different support conditions, different loading directions (ascendant and descendant) and the overlap of the cold-formed profiles to increase their strength and stiffness were considered. These tests are representative of real construction solutions and the study was requested by the company that produces the profiles. For each frame test, a numerical analysis of the experimental tests was performed using the finite element program SAFIR with a geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included (GMNIA).

1. INTRODUÇÃO

Os perfis em aço enformados a frio podem ser utilizados em diversas tipologias de edifícios existentes (Dubina et al., 2012). Estes perfis são cada vez mais utilizados devido à sua leveza e capacidade para vencer grandes vãos, sendo caracterizados por

terem secções transversais esbeltas com possibilidade de ocorrência de vários modos de encurvadura como os de local, distorcional ou lateral (CEN, 2006a).

A Empresa Constálica S.A., solicitou ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro um estudo tendo em vista

a avaliação do desempenho estrutural de perfis enformados a frio do tipo MadreMax.

A MadreMax é um elemento estrutural em aço enformado a frio, cuja principal característica é a possibilidade de sobreposição de modo a aumentar a sua resistência e rigidez, sendo a solidarização facilitada pela furação existente ao longo do elemento.

Estas madres são fabricadas em aço S320GD. Foram consideradas neste estudo 4 tipos de secções MMax 50x1.5, 100x1.5; 200x1.5 e 250x2.0 (Constálica, 2012). Na Fig.1 ilustram-se de forma esquemática as secções transversais com e sem furos.

Na Tabela 1 apresentam-se as principais dimensões e os momentos de inércia das diferentes secções transversais, considerando a furação.

Esta forma das secções transversais e respetivas dimensões foram desenvolvidas e escolhidas com o intuito de tornar possível a referida sobreposição por encaixe entre secções da mesma tipologia. Adicionalmente, este tipo de madres possui, para algumas secções, momentos de inércia no seu eixo forte (y-y) e no seu eixo fraco (z-z) da mesma ordem de grandeza (Tabela 1), o que possibilita uma boa distribuição de rigidez nas duas direções. Para além disso, apresentam uma relação peso/resistência bastante boa, permitindo um aligeiramento de toda a superestrutura envolvente.

Os furos são espaçados de 50 mm ao longo do comprimento do perfil (ver Fig. 4 a Fig. 8), permitindo a construção de estrutu-

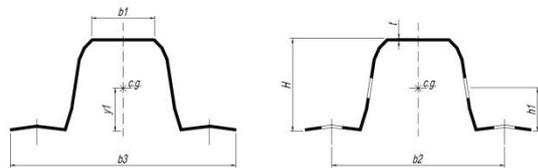


Fig. 1 – Secções das madres de acordo com o sistema MadreMax.

Tabela 1 – Propriedades geométricas das madres.

MMax	H (mm)	b ₂ (mm)	t (mm)	I _y (mm ⁴)	I _z (mm ⁴)
50x1.5	54,0	100	1,5	144900	366700
100x1.5	100,0	100	1,5	609900	436900
200x1.5	188,6	200	1,5	3698500	3067400
250x2.0	225,9	250	2,0	7669200	7213400

ras por módulos e possibilitando uma grande variedade e flexibilidade de soluções. Outro exemplo da flexibilidade obtida é o possível cruzamento de elementos com a mesma ou diferente secção. A furação dos banzos inferiores permite a ligação direta entre madres ortogonais a pórticos e outras peças a ligar. A furação das almas permite a fácil colocação de contraventamentos de banzo inferior das vigas dos pórticos principais, evitando assim a ocorrência de encurvadura lateral. Em suma, este sistema de madres dispensa, na maioria dos casos, tirantes, patilhas e vigas treliçadas de suspensão de fachada.

Com vista a uma melhor compreensão do comportamento mecânico destes perfis, quando utilizados como madres de cobertura, foram realizados ensaios experimentais de forma a determinar a carga última dos perfis MadreMax, para diferentes condições representativas de aplicações reais. Cada ensaio experimental foi também modelado numericamente. Detalhes destas modelações são apresentados nos pontos seguintes deste trabalho. No final é feita uma discussão dos resultados enumerando-se as principais conclusões.

2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados 20 ensaios experimentais a vigas correspondentes a diferentes esquemas estruturais, variando-se as condições de apoio, o sentido de aplicação de carga (ascendente ou descendente), o vão e a secção transversal (Tabela 2). A sobreposição das madres, para aumento da resistência e da rigidez do elemento estrutural, foi também considerada. Por cada esquema estrutural realizaram-se 2 ensaios, sendo que, quando se obtinham cargas últimas muito diferentes em ambos os ensaios, realizava-se um terceiro ensaio de comprovação (como sucedeu no Esquema E). Para o Esquema A só se realizou 1 ensaio por se tratar de um vão e secção pequenos e pouco comuns. Este teve como principal objetivo servir de verificação aos procedimentos de ensaio. Como anteriormente referido estes esquemas de ensaio são representativos de soluções construtivas reais no que diz respeito ao elemento a ensaiar, bem como aos acessórios utilizados (pórtico de reação,

apoios e acessórios utilizados para a aplicação das cargas). Em cada ensaio, a madre encontrava-se aparafusada a perfis tubulares curtos, que por sua vez estavam aparafusados ao pórtico de reação. Os ensaios seguiram as disposições da EN 1993-1-3 (CEN, 2006).

Foram aplicadas cargas ascendentes e descendentes, como ilustrado na Fig. 2, que podem resultar respetivamente da ação do vento e de cargas de gravidade. A aplicação de cargas foi efetuada a partir de um atuador distribuindo-se, por intermédio de um perfil I, a carga em dois pontos de aplicação. As duas cargas resultantes são aplicadas à madre com recurso a cantoneiras e a uma peça auxiliar de madeira, que distribui a carga por uma área maior da madre de forma a evitar a ocorrência de fenómenos de encurvadura local. Para alguns ensaios, foram também utilizados varões roscados para a aplicação das cargas ascendentes, de forma a diminuir ao mínimo o grau de restrição à ocorrência de encurvadura lateral.



Fig. 2 – Sentido de aplicação de cargas.

De acordo com o que ocorre na prática, junto aos encastramentos foram colocadas sobreposições com madre do mesmo tipo da madre ensaiada, sendo o comprimento de sobreposição diferente de ensaio para ensaio. Na viga contínua de 2 vãos a sobreposição foi efetuada no apoio intermédio. Foram utilizadas duas linhas de parafusos na zona de sobreposição das madres utilizando parafusos do tipo M10 de Classe 8.8. O ganho de resistência obtido com a sobreposição de madres justifica-se pelo facto dos maiores momentos se situarem nos apoios, ou seja na zona da sobreposição, sendo que esta aumenta para o dobro o valor da resistência da secção transversal. O aumento de inércia provocado pela sobreposição faz também aumentar os momentos nos apoios e diminuir os momentos no vão, contribuindo também para o acréscimo da resistência da madre. No

esquema de ensaio com a madre encastrada num apoio e simplesmente apoiada no outro (Esquema D) foi também colocada uma sobreposição de 1950 mm a uma distância de 950 mm do apoio simples.

Os ensaios foram realizados através de controlo do deslocamento, sendo que a velocidade do deslocamento imposta no atuador foi de 0,02 mm/seg. Os deslocamentos fornecidos pela célula de carga dos atuadores foram considerados na análise, existindo casos em que também foram usados transdutores de deslocamentos (LVDT) para aferir a torção da madre e a abertura das abas. Durante o ensaio a aplicação das cargas e apoios foi a mais alinhada possível com o eixo do perfil, de modo a não introduzir excentricidades.

Na Tabela 2 apresentam-se as características de cada esquema estrutural testado, nomeadamente no que diz respeito ao sistema estrutural utilizado, ao sentido de aplicação da carga (Asc. – carga ascendente; Desc. – carga descendente) e à existência ou não de sobreposição de perfis MadreMax. Na Fig. 3 apresentam-se os diagramas de momento fletor para os diferentes esquemas estruturais de ensaio e na Fig. 4 mostra-se uma imagem do ensaio correspondente à viga duplamente encastrada com sobreposição de madres nas extremidades (esquema de ensaio C).

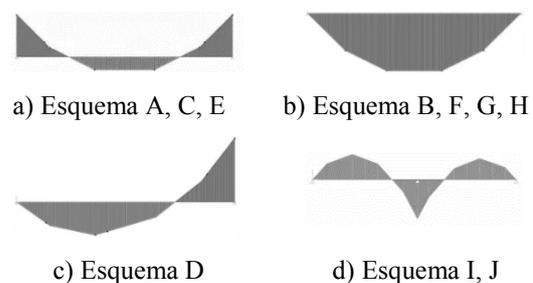
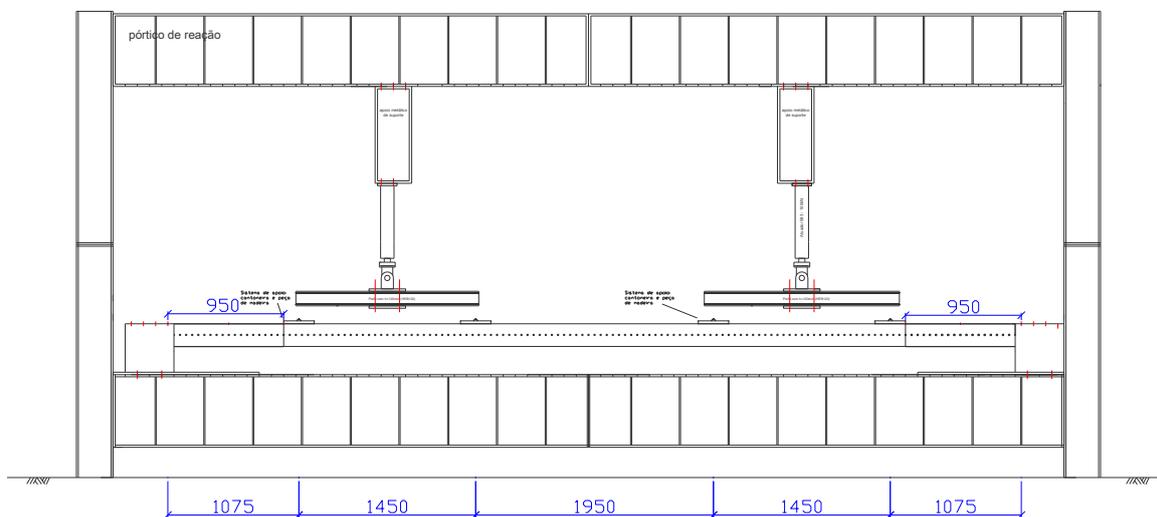


Fig. 3 – Diagrama de momento fletor para os diferentes esquemas estruturais de ensaio.

Da Fig. 5 à Fig. 8 apresentam-se diferentes pormenores dos ensaios experimentais, como a execução dos apoios e a aplicação de cargas. No esquema de ensaio H a madre foi restringida a meio vão, de forma a evitar a encurvadura lateral, usando-se para isso o dispositivo apresentado na Fig. 6 que permitia a ocorrência de deslocamentos verticais mas impedia os desloca-

Tabela 2 – Resumo dos ensaios experimentais.

Esquema estrutural	Ensaio	Madre	Sistema estrutural	Carga	Vão (m)	Sobreposição
A	1	MMax 50X1.5	Duplamente encastrada	Asc.	3,3	Sim
B	15 e 16	MMax 250X2.0	Simplemente apoiada	Asc.	7,5	Não
C	10 e 11	MMax 250X2.0	Duplamente encastrada	Asc.	7,0	Sim
D	8 e 9	MMax 250X2.0	Encastrada num apoio e simplesmente apoiada no outro	Asc.	7,0	Sim
E	12, 13 e 14	MMax 200X1.5	Duplamente encastrada	Asc.	7,0	Sim
F	17 e 18	MMax 200X1.5	Simplemente apoiada	Asc.	7,5	Não
G	19 e 20	MMax 250X2.0	Simplemente apoiada	Desc.	7,5	Não
H	21 e 22	MMax 200X1.5	Simplemente apoiada	Desc.	7,5	Não
I	23 e 24	MMax 100X1.5	Viga contínua de 2 vãos	Asc.	3,5+3,3	Não
J	25 e 26	MMax 100X1.5	Viga contínua de 2 vãos	Asc.	3,5+3,3	Sim



a) previsto



b) realizado

Fig. 4 – Esquema estrutural de ensaio C.

mentos horizontais. Na Fig. 7 apresenta-se a aplicação de cargas e na Fig. 8 os vários transdutores de deslocamento (LVDT) utilizados para analisar a abertura das abas da madre e o deslocamento vertical a meio vão durante o ensaio.



a) ligação da madre ao perfil tubular



b) encastramento



c) apoio simples

Fig. 5 – Execução dos apoios.

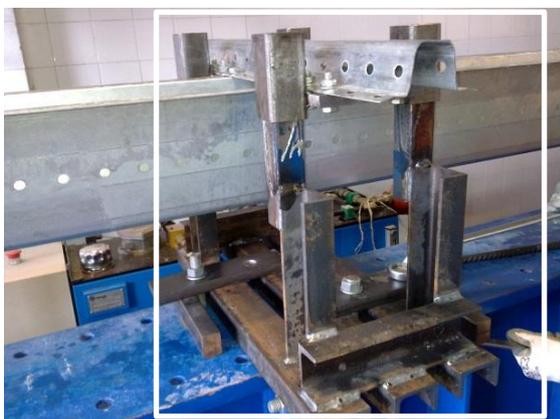
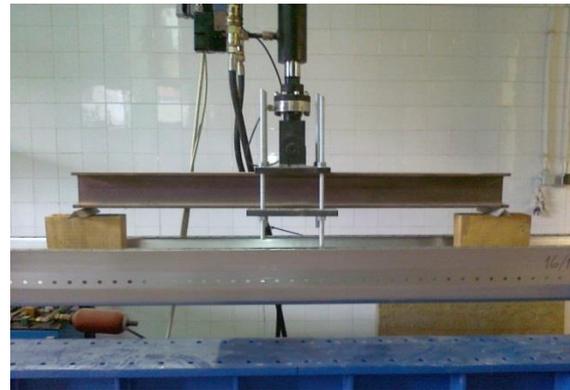


Fig. 6 – Restrição a meio vão usada no esquema de ensaio H.



a) cargas ascendentes (madre invertida)



b) cargas ascendentes (varões roscados)



c) cargas descendentes

Fig. 7 – Pormenores de aplicação de cargas.



Fig. 8 – Transdutores de deslocamentos usados no esquema de ensaio C.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS EN- SAIOS

Neste ponto será feita uma descrição genérica dos modelos numéricos criados de acordo com os ensaios experimentais realizados.

As simulações numéricas foram realizadas com o programa de elementos finitos SAFIR (Franssen, 2005). Devido à elevada esbelteza das secções recorreu-se a elementos finitos de casca quadrangulares de 4 nós.

A Fig. 9 mostra uma vista global de um dos modelos numéricos criados (esquema C). Na zona de aplicação de cargas foi bloqueado o grau de liberdade correspondente ao deslocamento lateral, para simular o contacto e restrição fornecidos pelo sistema de aplicações de cargas. A Fig. 10 está representada a modelação dos apoios considerados no esquema C.

Para simplificação do modelo foi considerada o dobro da espessura nas zonas de sobreposição, considerando assim contacto perfeito entre perfis. Adicionalmente nas abas que proporcionam as ligações aos apoios optou-se por aumentar mais a espessura para prevenir a ocorrência de fenómenos localizados que se encontravam impedidos durante o ensaio com as secções tubulares em aço.

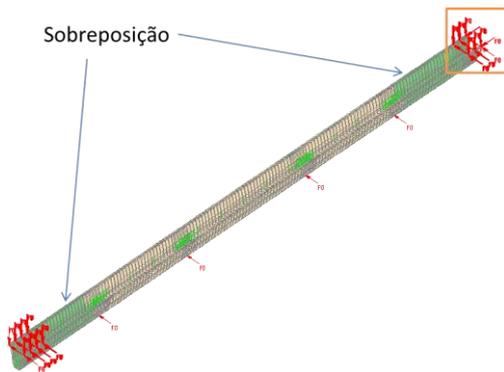


Fig. 9 – Modelo numérico do esquema C.

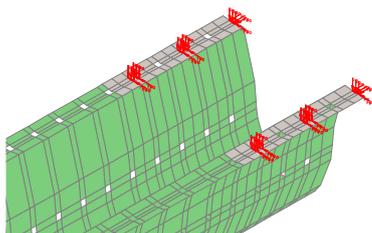


Fig. 10 – Encastramento do esquema C.

Nos apoios foram aplicadas restrições na zona onde se colocaram os parafusos no ensaio experimental. A título de exemplo apresenta-se na Fig. 11 a modelação de mais um dos apoios (neste caso apoio simples) aplicados nos diferentes esquemas de ensaio.

Os diferentes tipos de carga existentes foram considerados nestes modelos. O peso próprio, constante ao longo do ensaio, foi representado por cargas pontuais igualmente espaçadas ao longo da madre e as cargas aplicadas pelos atuadores foram simuladas por carregamentos linearmente crescentes até ao colapso, com a distribuição efetuada no ensaio. A Fig. 12 representa a distribuição atribuída para o carregamento pelas peças auxiliares de madeira.

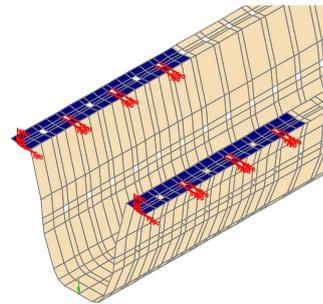


Fig. 11 – Apoio simples.

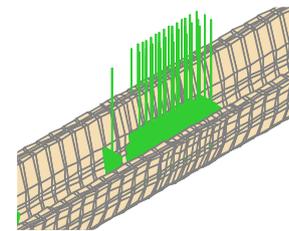


Fig. 12 – Esquema de aplicação das cargas.

Nos modelos foram também introduzidas imperfeições geométricas, correspondentes a um desvio lateral do eixo do elemento com uma forma sinusoidal e amplitude máxima de $L/1000$.

Construídos os modelos numéricos procedeu-se à análise dos mesmos com o programa SAFIR (Franssen, 2005), extraído da análise os resultados dos deslocamentos e respetivas forças nas zonas de aplicação dos LVDT's e atuadores.

As propriedades materiais consideradas, nomeadamente a tensão de cedência, f_y , e o

Módulo de Elasticidade, E , foram as obtidas em ensaios de tração realizados a provetes extraídos das amostras de ensaio. Foi considerada uma lei constitutiva bi-linear, elástica e perfeitamente plástica como proposto no Eurocódigo 3 (CEN, 2006b).

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Devido à limitação de espaço no presente trabalho, não se descrevem em pormenor os resultados de todos os ensaios. Apresenta-se neste ponto com maior detalhe apenas os resultados do esquema de ensaio C.

Na Fig. 13 encontram-se os resultados das medições efetuadas com os transdutores de deslocamentos.

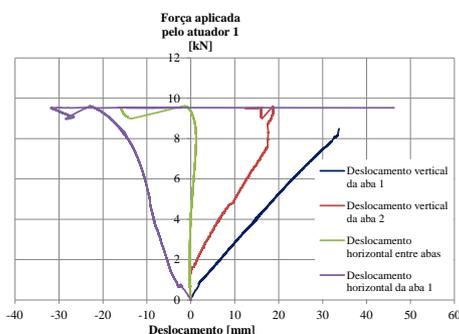


Fig. 13 – Gráfico dos deslocamentos medidos pelos LVDT

No gráfico da Fig. 13 pode observar-se a existência de uma rotação da madre em torno do seu eixo. Aos 8 kN de força há um diferencial no deslocamento vertical das abas da madre de aproximadamente 15 mm. A curva do deslocamento horizontal da aba 1 também comprova esta situação. Quanto ao deslocamento horizontal entre abas, verifica-se que este foi praticamente nulo até à ocorrência do colapso.

Observou-se neste ensaio a ocorrência de encurvadura local. Após a descarga e finalização do ensaio, verificou-se que houve uma recuperação quase completa da posição inicial da madre.

Na Fig. 14a pode-se observar o aparecimento de um vinco na secção, representativo da ocorrência de encurvadura local. Na Fig. 14b é perceptível a influência deste vinco no comportamento global da madre.



a)



b)

Fig. 14 – Fenómenos de encurvadura observados

No ensaio experimental, a carga última antes da ocorrência do fenómeno de encurvadura local foi de, aproximadamente, 10,3 kN. No modelo numérico a carga última atingiu os 10,5 kN, o que corresponde a uma diferença inferior a 2% em relação ao modelo experimental. Conforme se verifica no gráfico da Fig. 15 a rigidez obtida numericamente apresenta ligeiras diferenças em relação à obtida na análise experimental. O que se pode dever à modelação das ligações aparafusadas através de restrições completas a graus de liberdade, quer aos apoios quer ainda à madre de sobreposição.

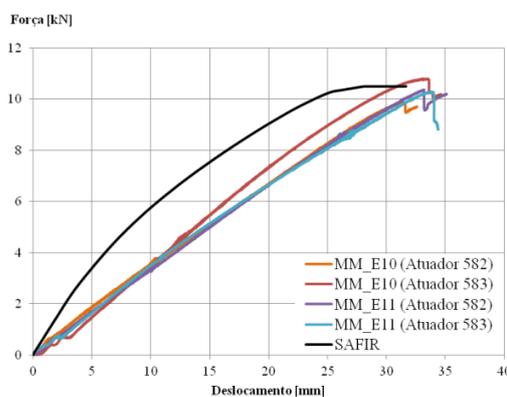


Fig. 15 – Gráfico força-deslocamento dos ensaios 10 e 11 do esquema de ensaio C

No ensaio experimental, os dois atuadores tiveram um percurso semelhante ao longo do mesmo. No instante em que ocorreu o fenómeno de encurvadura, os valores da força aplicada pelos atuadores baixaram consideravelmente.

Na Fig. 16 compara-se a deformada obtida numericamente com a do respetivo ensaio experimental.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados experimentais e numéricos obtidos. Os valores relativos aos ensaios experimentais correspondem à média aritmética dos valores obtidos nos ensaios realizados para cada esquema de ensaio. Pode constatar-se que em alguns ensaios existem diferenças não desprezáveis que podem ter sido devidas à incorreta consideração das reais condições de apoio, da sobreposição, das propriedades mecânicas, das cargas aplicadas ou das imperfeições geométricas e materiais. Embora existam diferenças, conclui-se que será possível a utilização de simulações numéricas para, através de estudos paramé-

Tabela 3 – Resumo dos resultados.

Esquema estrutural	Experimental Carga última (kN)	Numérico Carga última (kN)	Dif. (%)
A	8,4	6,0	28,6
B	3,7	4,1	10,8
C	10,3	10,5	1,9
D	6,4	6,6	3,1
E	5,7	5,5	3,5
F	1,6	1,9	18,8
G	11,5	10,4	9,6
H	1,9	2,1	10,5
I	13,3	13,2	0,7
J	10,8	14,6	35,2

tricos, obter curvas de encurvadura lateral e resistências das secções transversais considerando a ocorrência de fenómenos de encurvadura local.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma campanha de 20 ensaios experimentais a madres do tipo MadreMax (Constálica, 2012), com o objetivo de determinação da carga última destes perfis para diferentes condições de apoio e carregamento. Para além disso, modelaram-se numericamente todos os ensaios experimentais realizados.

Tendo em conta a variabilidade de todos os parâmetros associados aos perfis analisados, desde os fenómenos de instabilidade (local e global) à sobreposição aplicada nas zonas dos apoios e a meio vão, que influencia tanto a resistência como a rigidez dos elementos, considera-se que se obteve uma boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos.

AGRADECIMENTOS

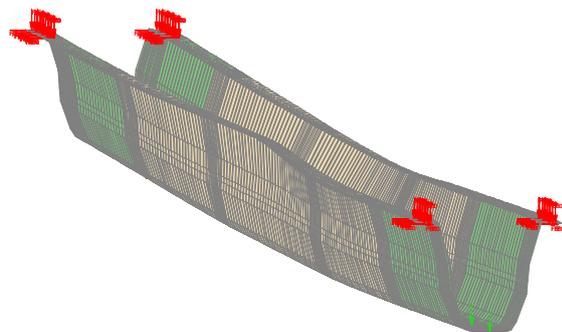
Os autores agradecem à Empresa Constálica S.A. pelo material fornecido para a realização dos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

CEN, European Committee for Standardisation, 2006a. EN 1993-1-3, Eurocode 3: Design of



a) Ensaio experimental



b) Simulação numérica

Fig. 16 – Instante de colapso

- Steel Structures - Part 1-3: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation, 2006b. EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated structural elements. Brussels, Belgium.
- Constálica 2012. Catálogo MadreMax - Building the structures of the future.
- Dubina, D.; Ungureanu, V.; Landolfo, R. 2012. *"Design of Cold-formed Steel Structures. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3: Design of Cold-formed Steel Structures"*: ECCS - European Convention for Constructional Steelwork.
- Franssen, J.-M., 2005. SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire", Engineering Journal, A.I.S.C., Vol. 42, No. 3, p. 143-158.