

AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE VIGAS COM SECÇÕES EM ÓMEGA (Ω) ENFORMADAS A FRIO DE PAREDES ESBELTAS FURADAS

Flávio Arrais^{1*}, André Reis¹, Nuno Lopes¹ e Paulo Vila Real¹

1: RISCO - Riscos e Sustentabilidade na CONstrução
Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro
e-mail: arrais.f@ua.pt

Palavras-chave: Perfis Enformados a Frio, Vigas, Aço, Modelação Numérica, Eurocódigo 3

Resumo. *As vigas metálicas com secções de paredes esbeltas enformadas a frio são correntes em edifícios devido à sua leveza e capacidade de vencer grandes vãos. As paredes destes perfis são caracterizadas por serem mais suscetíveis à ocorrência de fenómenos de instabilidade, como a encurvadura local e distorcional, para além da encurvadura lateral, comum em vigas quer em secções compactas ou esbeltas. As secções transversais analisadas neste trabalho são comercializadas pela empresa Constálica, SA com a designação MadreMax e apresentam a possibilidade de sobreposição. Este trabalho apresenta a modelação numérica de vigas lateralmente restringidas com secções em ómega furadas, baseada em ensaios experimentais das mesmas quando sujeitas a cargas ascendentes (sentido contrário ao da gravidade como na ação de vento). Foram realizados cinco ensaios experimentais de resistência à flexão em quatro pontos, para cada um dos seis tipos de secções transversais, seguindo os procedimentos propostos na Parte 1-3 do Eurocódigo 3. São apresentadas as simulações numéricas desses ensaios realizadas com recurso ao programa de elementos finitos SAFIR. É apresentada uma descrição dos modelos numéricos que incluíram análise não linear com a consideração de imperfeições iniciais onde se aplicaram elementos finitos de casca. Os resultados da análise numérica são comparados com os obtidos nos ensaios experimentais e com as cargas últimas fornecidas pelas formulações de cálculo da Parte 1-3 do Eurocódigo 3.*

1. INTRODUÇÃO

Os perfis em aço enformados a frio podem ser utilizados em diversas tipologias de edifícios existentes. Estes perfis são muito utilizados devido à sua leveza e capacidade para vencer grandes vãos, sendo estes caracterizados por terem secções transversais esbeltas com a possibilidade da ocorrência de encurvadura local, distorcional ou lateral [1].

Foi solicitado por parte da Empresa Constálica S.A. um estudo ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro com o objectivo de avaliar a resistência da secção à flexão de vigas simplesmente apoiadas, restringidas lateralmente, com recurso a

perfis enformados a frio do tipo MadreMax.

A MadreMax é um elemento estrutural destinado à aplicação em estruturas de aço, cuja principal característica é a possibilidade de sobreposição, mediante acoplagem sucessiva, sendo a imobilização e rigidez asseguradas pelos pontos de furação que, existindo ao longo do elemento, permitem uma justaposição variável. Existem 6 tipos de secções [2]: MMax 50x1.5, 100x1.5; 150x1.5, 200x1.5, 250x2.0 e 250x2.5. Neste estudo serão analisadas todas as secções apresentadas. Na Figura 1 é possível visualizar o esquema das madres de acordo com o sistema MadreMax.

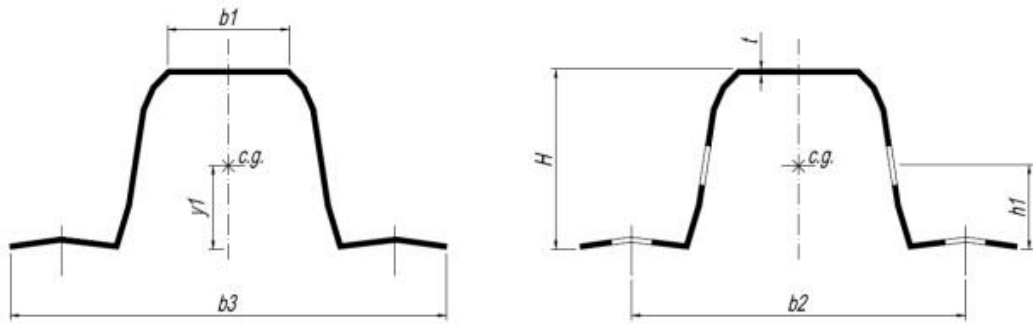


Figura 1. Secções das madres de acordo com o sistema MadreMax.

Na Tabela 1 encontram-se as propriedades geométricas das diferentes madres analisadas neste estudo.

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
150x1.5	145.5	150	1.5	1685600	1333000
200x1.5	188.6	200	1.5	3698500	3067400
250x2.0	225.9	250	2.0	7669200	7213400
250x2.5	279.2	250	2.5	17842800	13538700

Tabela 1. Propriedades geométricas das madres do tipo MadreMax.

A forma das secções transversais apresentada e respetivas dimensões foram desenvolvidas e escolhidas com o objetivo 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 Figura 3), permitindo a construção de estruturas 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 no 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 o intuito de compreender melhor o comportamento mecânico destes perfis, quando utilizados como madres de cobertura, foi realizada uma série de ensaios experimentais de forma a determinar a resistência da secção à flexão dos perfis MadreMax. Cada ensaio experimental foi modelado numericamente, utilizando para o efeito o programa de elementos finitos SAFIR [3]. Devido à elevada esbelteza das secções recorreu-se a elementos finitos de casca. Nos capítulos seguintes do presente trabalho serão apresentados detalhes dos ensaios experimentais e das respectivas modelações. No final será realizada uma discussão dos resultados obtidos, assim como a apresentação das principais conclusões.

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo será feita uma breve descrição dos ensaios experimentais realizados.

Foram realizados cinco testes experimentais para cada uma das secções transversais apresentadas no ponto anterior (Tabela 1), num total de 30 ensaios. Os referidos ensaios correspondem a vigas simplesmente apoiadas restringidas lateralmente considerando espaçamentos que preveniam também a ocorrência de encurvadura distorcional, sem qualquer sobreposição de elementos, sujeitas a duas cargas concentradas ascendentes. Estes elementos foram aparafusados a perfis tubulares curtos, recorrendo a parafusos M10 de classe 8.8, que por sua vez foram aparafusados ao pórtico de reação por intermédio de perfis I.

Foram aplicadas cargas ascendentes, como ilustrado na Figura 2, que podem resultar da ação do vento, sendo que este sentido mobiliza a menor resistência das secções em análise. A aplicação de cargas foi efetuada a partir de um atuador hidráulico distribuindo-se, por intermédio de um perfil I, a carga em dois pontos de aplicação. As duas cargas resultantes foram aplicadas à madre com recurso a chapas em contacto com os banzos inferiores da madre.

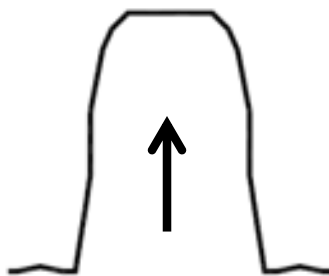


Figura 2. Sentido ascendente de aplicação de cargas.

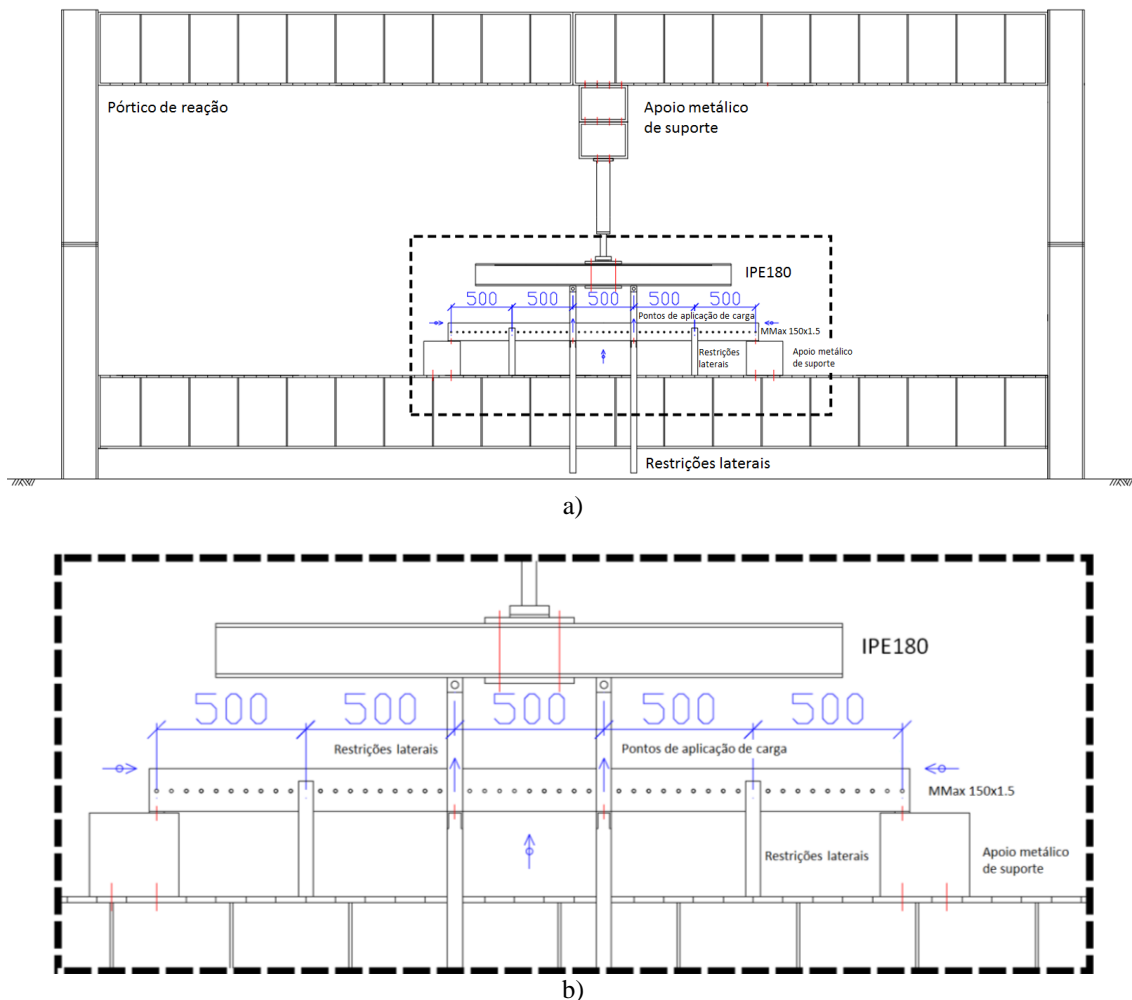
Os ensaios foram realizados através de controlo do deslocamento, sendo que a velocidade do deslocamento imposta no atuador foi de 0.02 mm/seg.

Os deslocamentos fornecidos pela célula de carga do atuador foram considerados na análise, aplicando-se também transdutores de deslocamentos (LVDT), localizados a meio vão da viga de forma a efetuar a medição dos deslocamentos verticais e na região dos apoios para efetuar a medição dos deslocamentos horizontais do banzo superior. Através destes últimos registos é possível avaliar a rotação ocorrida nos apoios.

Antes do ensaio, a aplicação das cargas e apoios foi realizada de modo a que esta esteja o mais alinhada possível com o eixo do perfil para evitar a introdução de quaisquer tipos de excentricidades no sistema estrutural.

O comprimento dos elementos a ensaiar corresponde a pelo menos 15 vezes a sua maior dimensão transversal, conforme estabelecido na secção A.3.4 do Anexo A da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [4].

Na Figura 3 é apresentado um esquema de ensaio realizado, correspondente ao modelo MMax 150x1.5.





c)

Figura 3. Esquema estrutural de ensaio do modelo MMax 150x1.5: a) geral, b) previsto, c) realizado.

A Figura 4 apresenta os diferentes pormenores do ensaio experimental, desde a montagem dos apoios e dos transdutores de deslocamentos (LVTD) até à aplicação das cargas e das restrições laterais.



a)



b)

Figura 4. Pormenores do esquema de montagem: a) aplicação de cargas e transdutor de deslocamento (vertical) a meio vão do elemento, b) esquema de apoio e transdutor de deslocamento (horizontal) nas extremidades.

3. MODELOS NUMÉRICOS

Neste capítulo será feita a descrição detalhada dos modelos numéricos criados para simular os ensaios experimentais realizados.

Conforme referido anteriormente, as simulações numéricas foram realizadas recorrendo ao programa de elementos finitos SAFIR. Por serem secções de elevada esbelteza, optou-se por recorrer a elementos finitos de casca quadrangulares de 4 nós.

Na Figura 5 apresenta-se um dos modelos numéricos criados, correspondente ao modelo MMax 150x1.5. Os detalhes do mesmo modelo numérico encontram-se presentes na Figura 6.

Na zona das abas (Figura 6), onde é feita a ligação aos apoios, optou-se por aumentar a espessura de forma a prevenir a ocorrência de fenómenos localizados que se encontram impedidos durante o ensaio com as secções tubulares em aço. Também nos apoios foram aplicadas restrições, correspondentes ao tipo de apoio em questão, na zona onde se colocaram os parafusos no ensaio experimental.

O carregamento do elemento, correspondente à carga aplicada pelo atuador, foi simulado através da imposição de deslocamentos até ao colapso.

Ao longo do elemento também é possível visualizar as restrições impostas nas abas de forma a impedir fenómenos de encurvadura lateral (Figura 6).

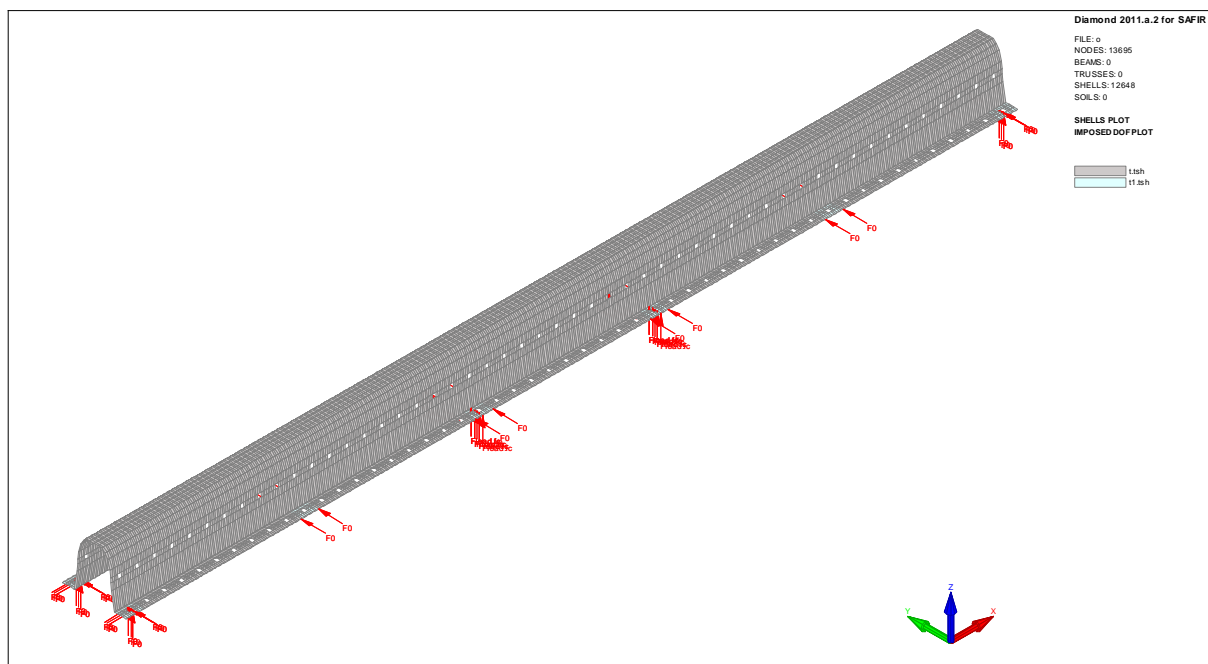


Figura 5. Modelo numérico correspondente ao modelo MMax 150x1.5.

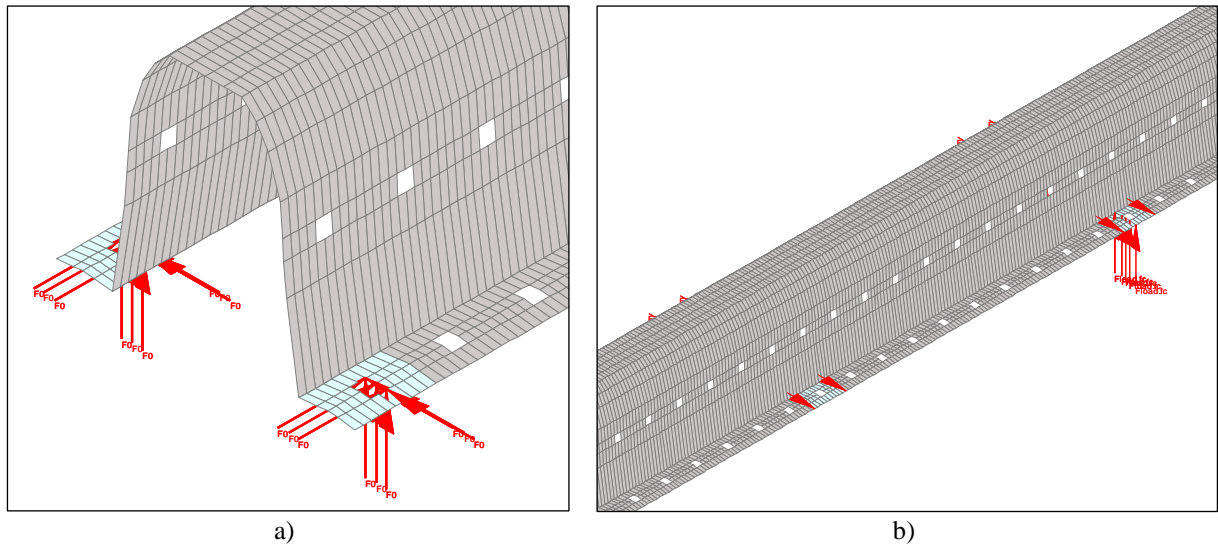
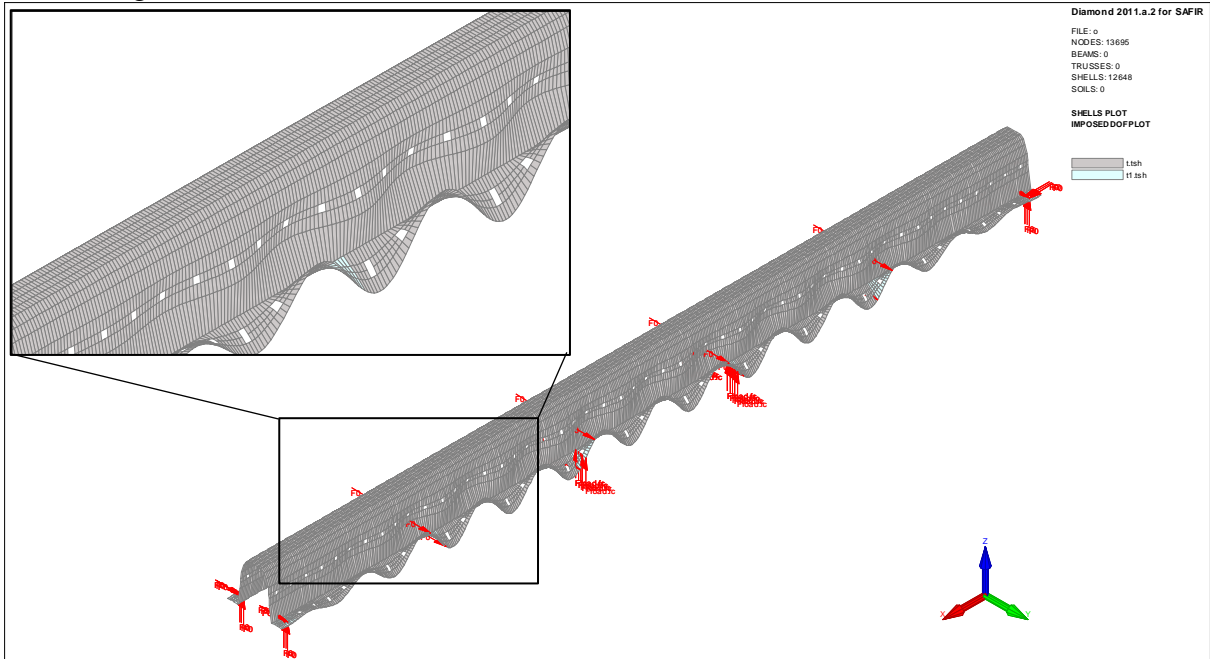
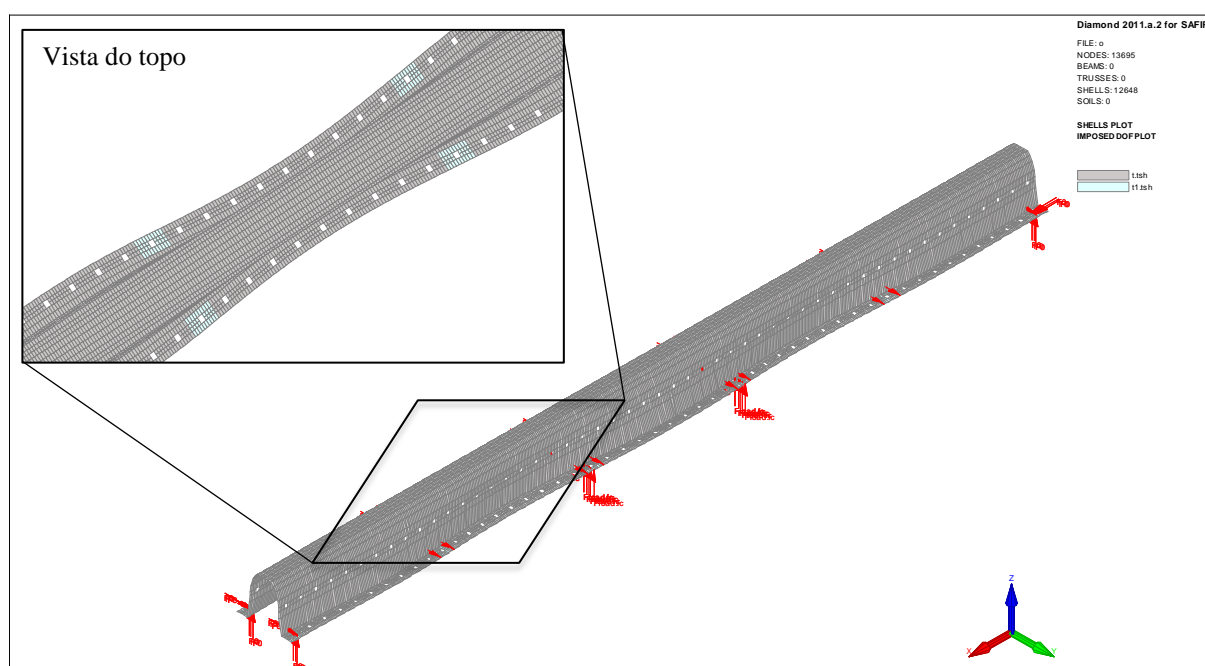


Figura 6. Pormenores do modelo numérico a) na região dos apoios e b) ao longo do elemento.

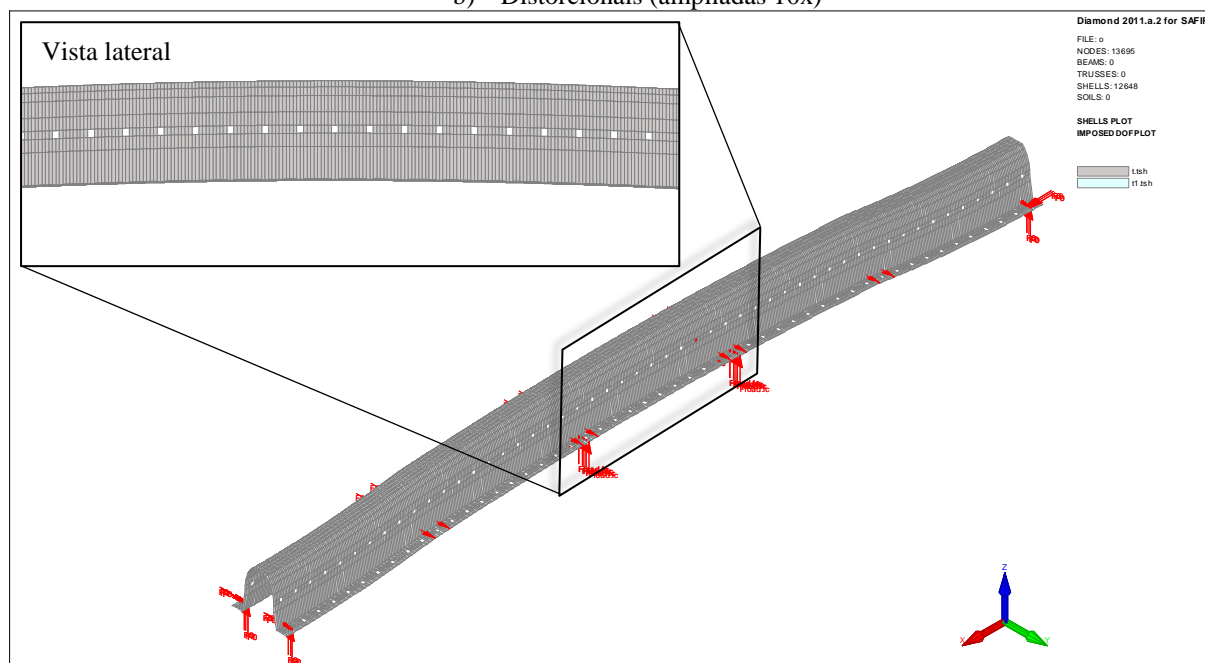
Nos modelos foram também introduzidas imperfeições geométricas, correspondentes aos modos de encurvadura locais, distorcionais e globais. As formas dos modos de instabilidade local, distorcional e global foram obtidas com o recurso ao programa de faixas finitas CUFSM [5], utilizadas para definir as imperfeições geométricas iniciais dos modelos em estudo (Figura 7).



a) Locais (ampliadas 10x)



b) Distorcionais (ampliadas 10x)



c) Globais (ampliadas 25x)

Figura 7. Imperfeições geométricas isoladas ampliadas do elemento.

A Tabela 2 apresenta a amplitude máxima dos modos de encurvadura aplicados nos modelos numéricos onde b representa o comprimento da alma da secção transversal e L o comprimento da viga em causa. Os valores inscritos na Tabela 2 correspondem, de acordo

com o Anexo C da Parte 1-5 do EC3 [6], a 80% das tolerâncias geométricas de fabrico descritas na norma EN 1090-2 [7].

Local	Distorcional	Global
$0.8 \times \frac{b}{100}$	$0.8 \times \frac{b}{100}$	$0.8 \times \frac{L}{750}$

Tabela 2. Amplitude máxima das imperfeições geométricas.

De acordo com a Parte 1-5 do EC3 [6], foi introduzida uma combinação das enunciadas imperfeições geométricas, escolhendo para o efeito uma imperfeição de base à qual se adicionaram as restantes imperfeições com os seus valores reduzidos para 70% do seu valor total.

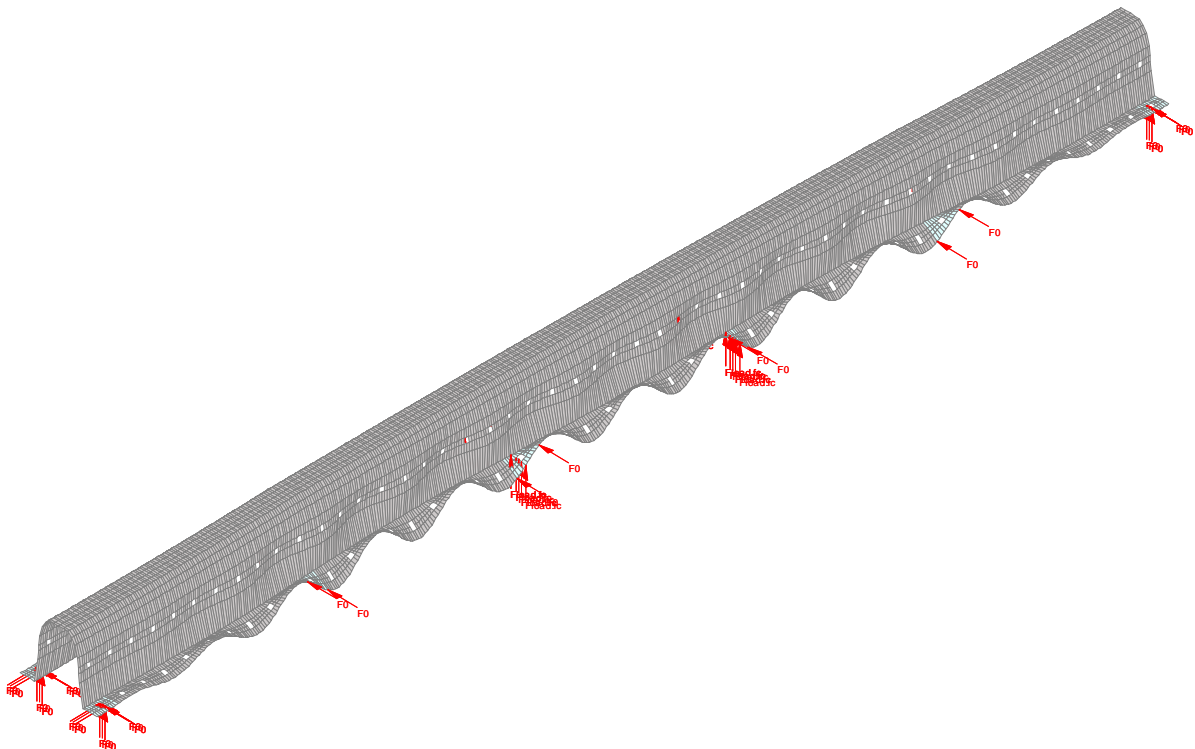


Figura 8. Modelo numérico correspondente ao modelo MMax 150x1.5 com a combinação das imperfeições geométricas, ampliadas 10x.

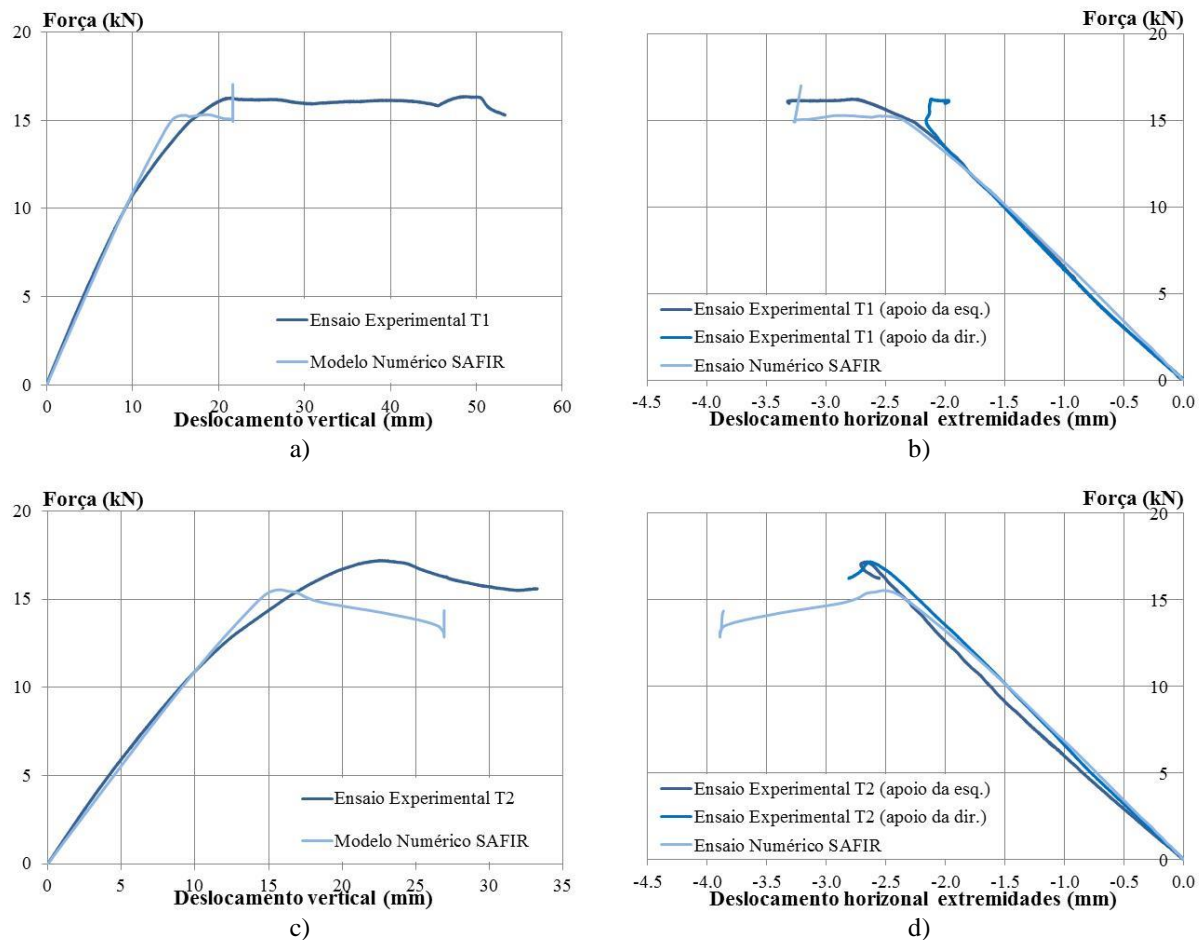
As propriedades materiais consideradas, nomeadamente a tensão de cedência, f_y , e o módulo de elasticidade, E , foram obtidas a partir de ensaios de tração realizados a provetes extraídos das amostras de ensaio. Foi considerada uma lei constitutiva bi-linear, elástica e perfeitamente plástica como proposto na Parte 1-5 do Eurocódigo 3 [7].

Construídos os modelos numéricos procedeu-se à análise dos mesmos com o programa SAFIR, extraindo da análise os resultados dos deslocamentos nas zonas de aplicação dos LVDT's e do atuador, assim como das reações obtidas nos apoios.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Por questões de limitação de espaço optou-se por detalhar apenas os resultados obtidos para o modelo MMax 150x1.5, sendo apresentado no final um resumo de todos os resultados obtidos, assim como as respetivas conclusões retiradas deste estudo.

Da Figura 9 à Figura 11 são apresentados os resultados obtidos tanto do ensaio experimental como da análise numérica. Na Figura 8 é possível observar a evolução força-deslocamento obtida a meio vão do elemento assim como a evolução força-deslocamento horizontal obtida nas extremidades do elemento (diretamente proporcional à rotação nos apoios). Pode-se observar que os comportamentos do modelo experimental e do numérico são bastante semelhantes em quase todas as fases do ensaio, para qualquer um dos ensaios apresentados. As pequenas diferenças observadas podem dever-se à modelação das ligações aparafusadas através de restrições completas a graus de liberdade nos apoios. Eventualmente, a possibilidade da existência de algum atrito entre a madre e os elementos que restringem o movimento lateral durante o ensaio experimental poderá ter tido alguma influência em alguns resultados.



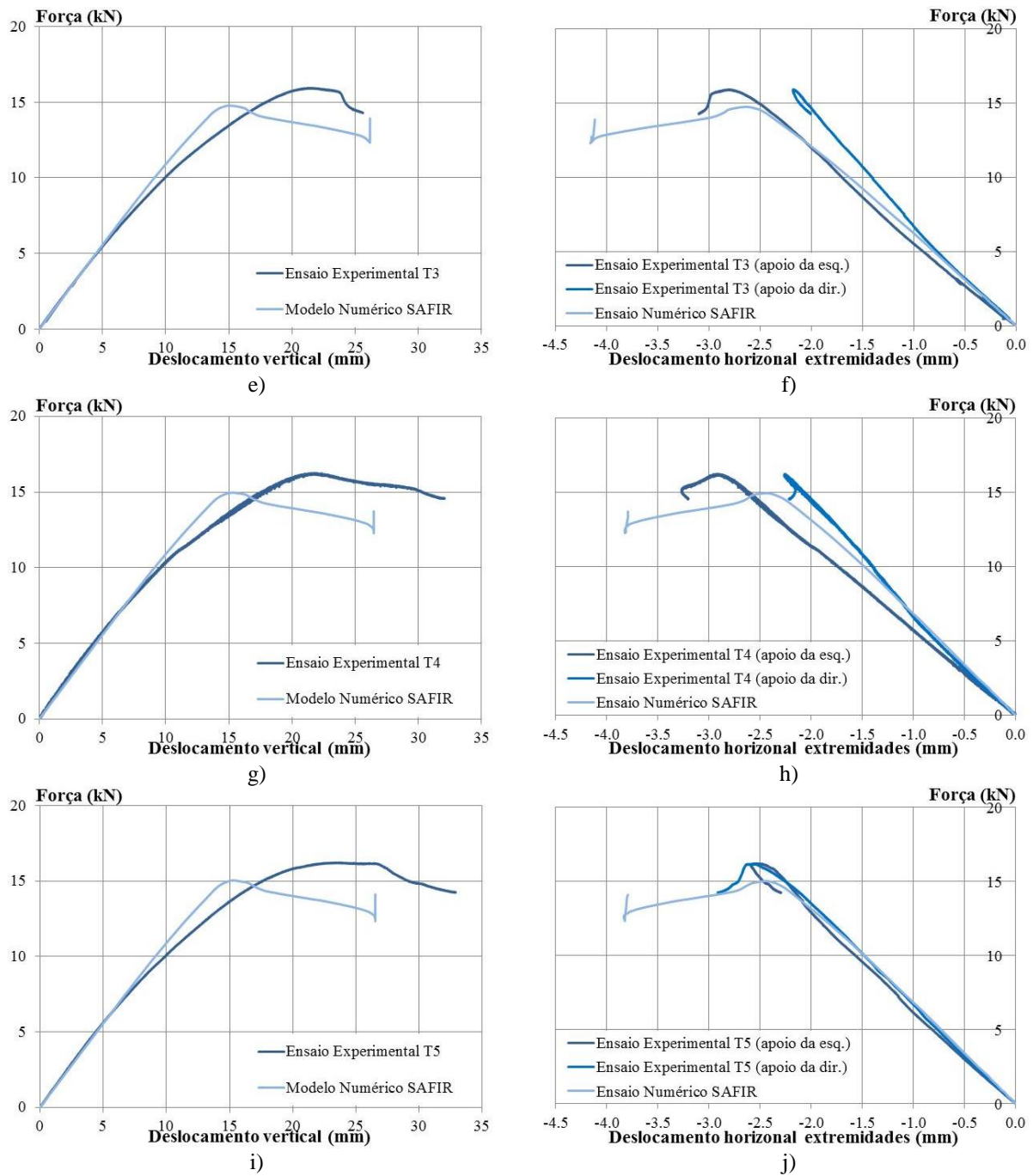


Figura 9. Força aplicada em função do deslocamento vertical a meio vão e do deslocamento horizontal nas extremidades (experimental e numérico) para os ensaios à madre MMax150x1.5.

Observou-se ocorrência de encurvadura local nestes ensaios como se pode observar o aparecimento do vinco na secção na Figura 10. Na Figura 11 é perceptível a influência deste vinco no comportamento global da madre.

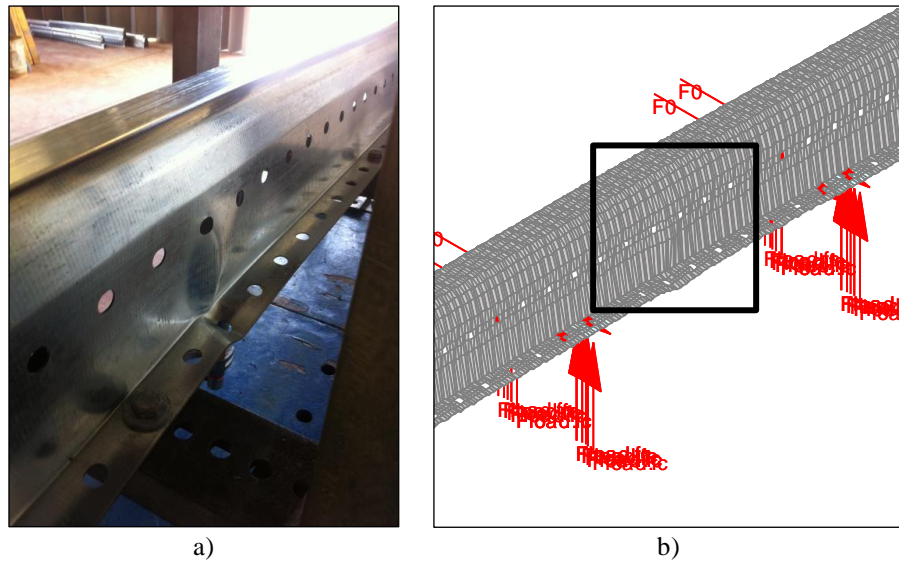


Figura 10. Pormenores do fim do ensaio à MMax150x1.5 a) experimental e b) numérico.

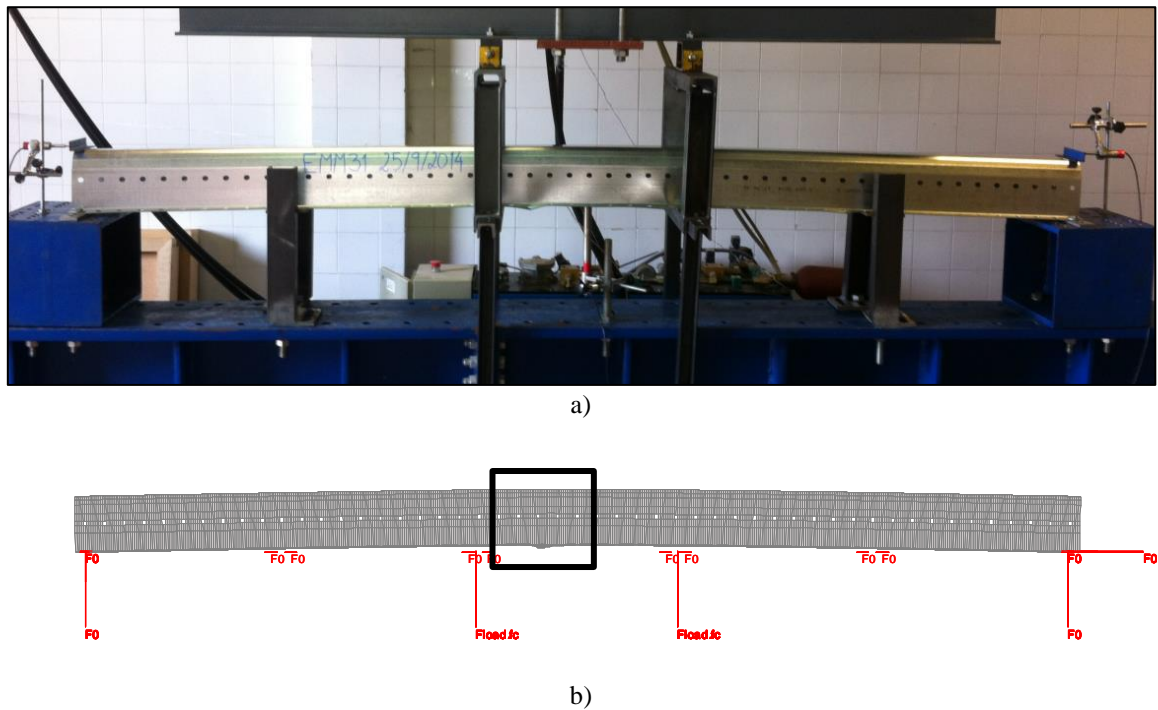


Figura 11. Fim do ensaio à MMax150x1.5 a) experimental e b) numérico.

No ensaio experimental, para o caso do teste apresentado (T3), a carga última antes da ocorrência do fenómeno de encurvadura local foi de 15.87 kN. No respectivo modelo numérico a carga última atingiu os 14.76 kN, o que corresponde a uma diferença de 7% em relação ao modelo experimental.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados experimentais e numéricos obtidos para as restantes secções. Pode constatar-se que em alguns ensaios existem diferenças não desprezáveis que podem ter sido devidas à incorreta consideração das reais condições de apoio, das propriedades mecânicas, das cargas aplicadas ou das imperfeições geométricas e materiais. No caso dos modelos com as secções transversais MM50x1.5 e MM100x1.5, uma nova posição de equilíbrio foi atingida pelas madres durante o ensaio, sem que ocorresse a redução de mais que 10% da carga aplicada. Este fenómeno deve-se à baixa esbelteza dos perfis em conjunto com a restrição a deslocamentos longitudinais em ambos os apoios. Portanto, para estes casos as cargas últimas apresentadas na Tabela 3 correspondem à carga mais elevada atingida na primeira fase elástica, quer no modelo experimental quer no numérico.

Modelo	Teste	Tensão de cedência, f_y (MPa)	Experimental Carga última (kN)	Numérico Carga última (kN)	Diferença (%)
MM50x1.5	T1	345.7	6.60	6.43	2.6
	T2	392.7	7.50	7.12	5.1
	T3	396.6	7.60	7.20	5.3
	T4	368.6	7.00	6.77	3.3
	T5	397.5	7.70	7.21	6.4
MM100x1.5	T1	352.0	13.00	14.01	7.8
	T2	371.2	13.50	14.40	6.7
	T3	380.7	14.00	15.08	7.7
	T4	377.2	13.80	15.02	8.8
	T5	381.4	14.20	15.10	6.3
MM150x1.5	T1	365.7	16.25	15.28	6.0
	T2	374.4	17.09	15.54	9.1
	T3	349.8	15.87	14.76	7.0
	T4	356.6	16.13	14.96	7.3
	T5	358.4	16.16	15.03	7.0
MM200x1.5	T1	383.0	10.44	10.90	4.4
	T2	373.8	10.09	10.76	6.6
	T3	374.3	10.15	10.87	7.1
	T4	387.4	10.85	11.10	2.3
	T5	344.1	8.96	10.30	15.0
MM250x2.0	T1	354.9	19.59	21.76	11.1
	T2	352.5	19.15	21.68	13.2
	T3	370.2	20.94	22.39	6.9
	T4	366.7	20.80	22.24	6.9
	T5	389.6	21.46	23.16	7.9
MM250x2.5	T1	381.4	40.69	41.22	1.3
	T2	345.2	36.48	38.83	6.4
	T3	380.4	40.57	41.17	1.5
	T4	371.9	39.83	40.65	2.1
	T5	375.4	40.44	40.85	1.0

Tabela 3 – Resumo dos resultados da carga última P (kN).

Embora existam algumas diferenças, conclui-se que será possível a utilização de simulações numéricas para, através de estudos paramétricos, obter resistências das secções transversais considerando a ocorrência de fenómenos de encurvadura local.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho apresentou-se a modelação numérica de uma campanha de 30 ensaios experimentais a madres do tipo MadreMax, com o objetivo de determinação da resistência à flexão da secção destes perfis.

Apresentaram-se as principais considerações realizadas na modelação numérica dos referidos ensaios com as restrições dos apoios e aplicações de cargas.

Tendo em conta a variabilidade de todos os parâmetros associados aos perfis analisados, considerando o fenómeno de instabilidade (local) 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.

Da mesma forma foi possível concluir que a consideração das imperfeições geométricas iniciais nos modelos numéricos é importante para a obtenção de resultados mais próximos da realidade.

5. AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, "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*, (2012).
- [2] Catálogo MadreMax, *Building the structures of the future*, Constálica, (2012).
- [3] J.M. Franssen, "SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire", *Engineering Journal*, A.I.S.C., Vol. 42, No. 3, pp. 143-158 (2005).
- [4] CEN, European Committee for Standardisation, *EN 1993-1-3, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-3: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, Brussels, Belgium, (2006a).
- [5] B. W. Schafer, S. Ádány, "Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods", *18th International Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Florida, (2006).
- [6] CEN, European Committee for Standardisation, *EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated structural elements*, Brussels, Belgium, (2006b).
- [7] CEN, European Committee for Standardisation, *EN 1090-2, Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures*, Brussels, Belgium, (2008).