



IX CONGRESSO DE
Construção Metálica
e Mista

I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

ANÁLISE DE PAINÉIS COM PERFIS DE AÇO ENFORMADOS A FRIO PARA UTILIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO MODULAR

Filipe Garcia^a, José Henriques^b, Helena Gervásio^a e Luís Simões da Silva^a

^a *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra*

^b *COOLHAVEN - Construções Modulares, S.A., Coimbra*

Resumo

Numa época em que o Mundo reclama cuidados crescentes com o meio ambiente, surge o aço enformado a frio associado a uma construção modular. No contexto da construção sustentável, o aço leve apresenta inúmeras vantagens que o torna um material de excelência, tendo vindo a ganhar quota no mercado da construção civil.

O trabalho aqui apresentado teve como principal objectivo o cálculo da resistência de um painel tipo de parede constituído por perfis de aço enformados a frio, correspondente a uma das soluções propostas pela empresa *CoolHaven*, S.A. Dada a importância das ligações no comportamento dos referidos painéis, surgiu a necessidade de se analisar a influência destas no comportamento dos mesmos. Assim neste artigo serão apresentados: i) o desenvolvimento de modelos capazes de simular o comportamento estrutural dos painéis, incluindo o comportamento das ligações, utilizando o programa de cálculo *Abaqus*, e ii) a calibração dos modelos numéricos com base nos resultados obtidos de ensaios experimentais das ligações entre perfis.

1. Introdução

O trabalho apresentado neste artigo [1] enquadra-se no desenvolvimento de painéis de aço enformados a frio para construção modular *CoolHaven*. A construção modular visa aproveitar todas as potencialidades do aço enformado a frio em conjunto com a pré-fabricação, permitindo uma grande flexibilidade e mobilidade estrutural.

Os perfis laminados a frio são caracterizados, principalmente, pela elevada esbelteza das suas secções transversais, constituídas por chapa de espessura reduzida, o que lhes confere um baixo peso, daí a designação de aço leve. "Esta esbelteza elevada provoca potencialmente fenómenos de distorção da secção transversal, para além dos fenómenos

de encurvadura local da secção e encurvadura global tradicionalmente presentes e tratados regularmente para secções laminadas a quente." [2].

Existem inúmeros perfis de aço enformados a frio. Estes são obtidos através da laminagem a frio ou quinagem de chapas de aço, que apresentam espessuras entre 1.0 e 5.0 mm, mas que podem chegar a 0.5 mm, em perfis, caso se esteja na presença de um aço de alta resistência [3].

As diversas formas da secção transversal visam responder a requisitos específicos de uma determinada aplicação. Neste sentido, estas têm de suportar de uma forma eficiente as cargas que lhe serão aplicadas. As secções transversais dos perfis de aço enformados a frio mais utilizadas são em C, U e Z.

O presente estudo teve como principal objetivo a elaboração e análise de um modelo de cálculo representativo de um painel tipo de parede constituído por perfis de aço enformados a frio, correspondente a uma das soluções propostas pela empresa *CoolHaven*, S.A.

As ligações existentes no painel têm um papel preponderante no comportamento do mesmo, surgindo assim a necessidade de se analisar a influência destas no comportamento do painel, com vista à sua posterior otimização. O trabalho apresentado neste artigo envolveu o desenvolvimento de modelos capazes de simular o comportamento estrutural dos painéis utilizando o programa de cálculo *Abaqus*. De forma a calibrar os modelos numéricos foram ainda realizados diversos ensaios experimentais das ligações entre os perfis constituintes do painel tipo.

Assim, em primeiro lugar serão descritos os ensaios experimentais que permitiram a posterior calibração dos modelos numéricos. Em seguida serão apresentados os modelos numéricos das ligações, os quais depois de calibrados, permitiram obter a curva força-deslocamento das ligações. Finalmente, serão apresentados os modelos numéricos dos painéis tipo de parede, os quais permitiram obter a resistência dos mesmos. Nestes modelos foi ainda analisada a influência de excentricidades e o tipo de carregamento na resistência dos painéis.

2. Análise experimental das ligações

Nesta secção são descritos os ensaios laboratoriais efetuados para dar suporte ao estudo desenvolvido neste trabalho. Os ensaios experimentais realizados tiveram como finalidade analisar o comportamento de uma ligação à tração, entre dois perfis de aço enformados a frio. Posteriormente, os resultados obtidos foram utilizados para a calibração dos modelos numéricos das ligações.

Assim, foram ensaiadas seis ligações (protótipos experimentais), como se pode observar na Tabela 1, sendo a única diferença o tipo de parafusos utilizados (*Fabory* e *SFSintec*) para efetuar a ligação entre os dois perfis do tipo "C".

Os protótipos experimentais foram preparados procurando recriar as características da ligação que se pretende adotar no painel parede criado pela empresa *CoolHaven*. Foram utilizados dois tipos de parafusos autoperfurantes, com o objetivo de perceber a sua influência para o comportamento da ligação.

Os ensaios realizaram-se aplicando um carregamento do tipo monotónico e aplicando um controlo de deslocamento de 0.02mm/s, válido para todos os ensaios, os quais foram conduzidos à rotura.

Tabela 1 - Plano de ensaios

Tipo de Parafusos	Ensaio
Fabory	FAB T1
	FAB T2
	FAB T3
SFSintec	SFS T1
	SFS T2
	SFS T3

Os ensaios foram efetuados com o auxílio da prensa *SERVOSIS ME 402/20*. Adicionalmente foram colocados dois defletómetros mecânicos da marca TML com um comprimento inicial na ordem dos 25mm, para validar o gráfico força-deslocamento obtido pela prensa. Estes foram colocados do lado "interior e exterior" do perfil disposto na vertical, ou seja, do lado direito e esquerdo respetivamente do modelo experimental, o mais centrados na medida do possível, afim de registar a deformação da ligação consoante a força exercida pela prensa hidráulica

Os gráficos ilustrados na Fig. 1 dizem respeito aos resultados dos protótipos experimentais e permitem comparar as curvas força-deslocamento dos diversos protótipos ensaiados.

Conclui-se que, de uma forma geral, os protótipos experimentais em que se utilizaram os parafusos da *Fabory* apresentam um melhor comportamento em termos de resistência, apesar de atingirem a rotura para valores de deslocamento menores. O protótipo experimental SFS T3 apresentou um comportamento semelhante aos protótipos experimentais com parafusos FAB, mas tendo-se atingido uma resistência menor, devendo-se ao facto de o parafuso SFSintec apresentar um diâmetro menor. Em relação ao protótipo experimental SFS T2, este apresentou um comportamento díspar dos seus pares, devendo-se a alguma imperfeição inicial no protótipo.

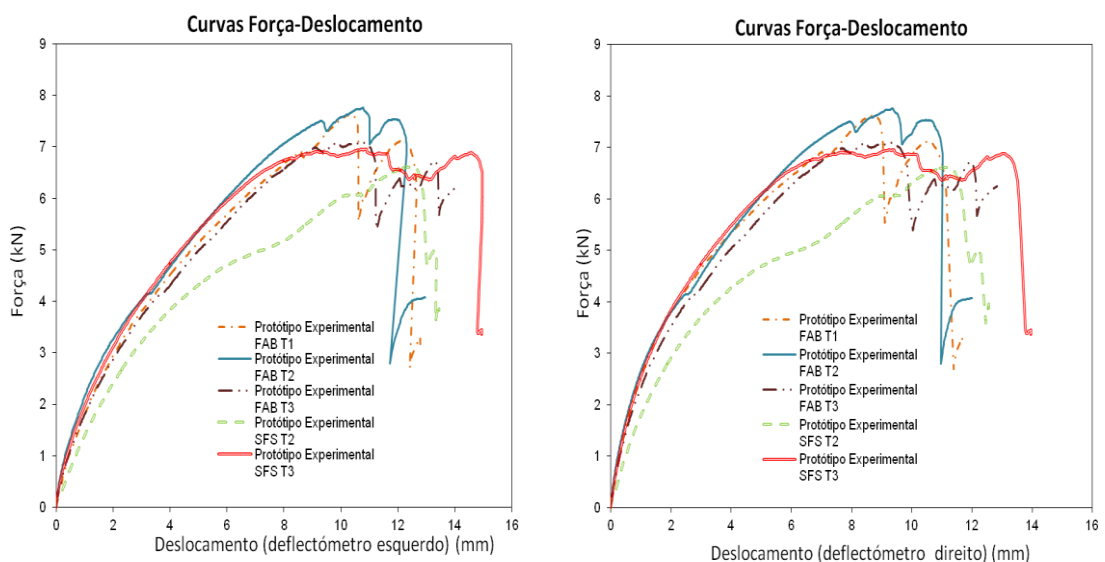


Fig. 1 - Curvas força-deslocamento de todos os protótipos experimentais.

Note-se que o primeiro protótipo experimental com parafusos SFS (protótipo SFS T1) apresentou um comportamento muito diferente em relação aos seus pares, razão porque não são apresentados os seus resultados. Este comportamento deveu-se ao facto

de este ter sido ensaiado com uma chapa auxiliar na base pouco rígida, o que permitiu uma grande rotação por parte da ligação, o que não era de todo desejável, tendo influenciado a leitura dos deslocamentos pelos defletómetros. Assim, em todos os outros ensaios, a situação descrita foi resolvida utilizando uma chapa auxiliar na base mais rígida.

3. Análise numérica do comportamento da ligação

Após a análise experimental das ligações, o passo seguinte consistiu na criação de um modelo numérico que simulasse a ligação. O modelo numérico foi desenvolvido com base no programa de cálculo *Abacus* [4]. Posteriormente, procedeu-se à calibração do modelo com os resultados obtidos da análise experimental.

A modelação efetuada assentou no método dos elementos finitos, recorrendo-se para isso ao elemento finito do tipo C3D8R, ou seja, trata-se de um elemento finito sólido (3D) com integração reduzida (o elemento só tem um ponto de integração no seu centro) apresentando oito nós. Aplicou-se uma análise não linear, uma vez que a rigidez da ligação varia enquanto esta se deforma.

No que se refere à calibração dos modelos numéricos, efetuou-se um estudo de convergência da malha de elementos finitos. Este consistiu em obter uma malha que não fosse exageradamente discretizada, exigindo um grande esforço computacional, e por outro lado evitou-se utilizar uma malha pouco discretizada, onde os resultados obtidos poderiam não ter o rigor exigido.

Houve ainda o cuidado de adaptar a malha a todas as singularidades do modelo, para que não surgissem elementos distorcidos, assim como a correta definição dos contactos, ou interações, entre as diversas superfícies.

Por forma a definir as interações entre as superfícies, foi utilizado um modelo de interações do tipo "*Surface to Surface contact*", sendo necessário distinguir as superfícies em contacto entre "slave ou master". Esta distinção tem dois objetivos: evitar a penetração entre superfícies durante a análise e introduzir a possível modelação de atrito entre as mesmas, de maneira a condicionar o escorregamento das diferentes partes. No presente modelo o atrito entre superfícies foi desprezado.

De seguida, apresenta-se o resultado da calibração dos modelos com base nos deslocamentos e na resistência, através das respetivas curvas força deslocamento. Assim, apresentam-se nas Figuras 2 e 3 as curvas força deslocamento obtidas dos protótipos experimentais e do modelo numérico para cada tipo de parafuso.

No que diz respeito à calibração efetuada do modelo numérico com parafusos FAB, pode-se observar na Fig. 2, que se conseguiu de forma muito satisfatória a calibração do modelo em causa, pois as três curvas força-deslocamento referentes aos protótipos experimentais estão bastante próximas da curva força-deslocamento referente ao modelo numérico.

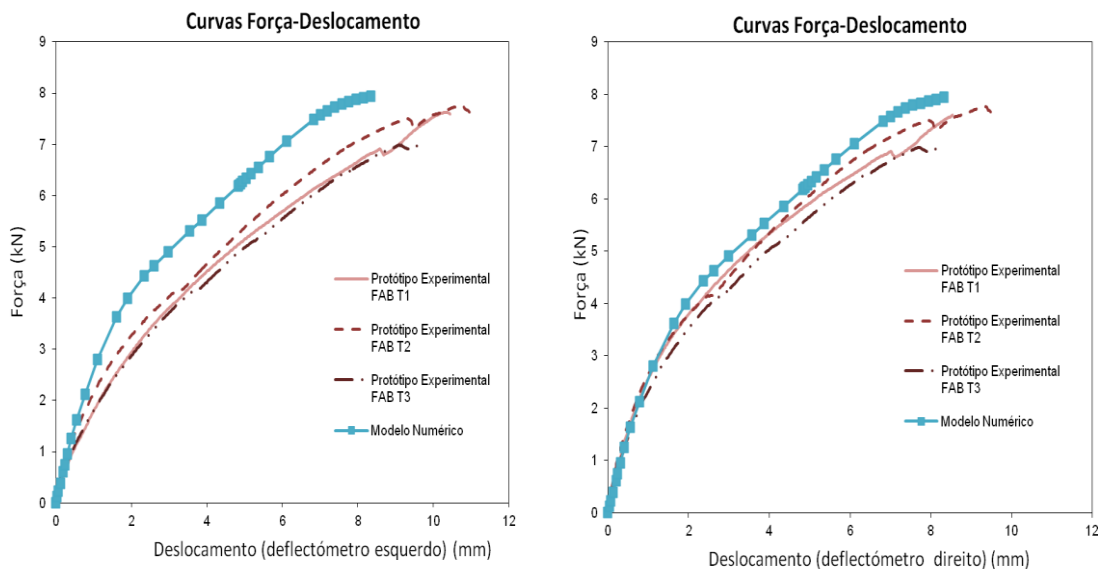


Fig. 2 - Curvas força-deslocamento referentes a modelos em que se utilizam parafusos FAB.

Relativamente à calibração efetuada ao modelo numérico com parafusos SFS, pode-se observar na Fig. 3, que se conseguiu de forma ainda satisfatória a calibração do modelo em causa. Observa-se no entanto que a calibração deste modelo relativamente ao anterior não foi tão bem conseguida.

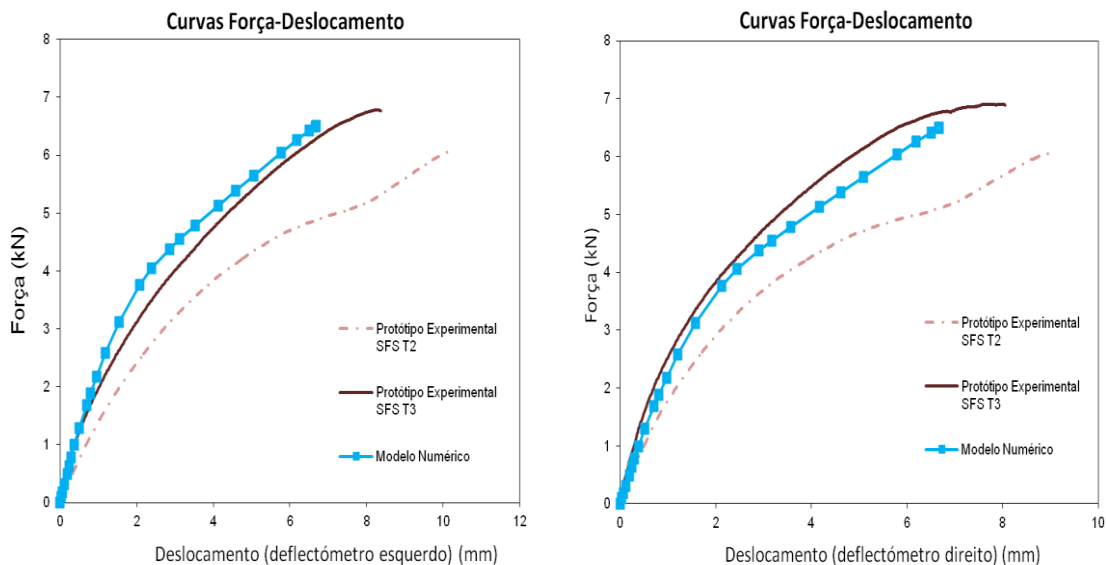


Fig. 3 - Curvas força-deslocamento referentes a modelos em que se utilizam parafusos SFS.

Optou-se então por utilizar a ligação com parafusos FAB, em detrimento da ligação com parafusos SFS, devido a ter-se obtido uma melhor calibração para o primeiro modelo.

Assim, a curva força-deslocamento adoptada para a análise numérica dos painéis, a qual será apresentada na secção seguinte, está representada na Fig. 4. Tal como indicado no parágrafo anterior, esta curva foi fornecida pelo modelo numérico com parafusos FAB.

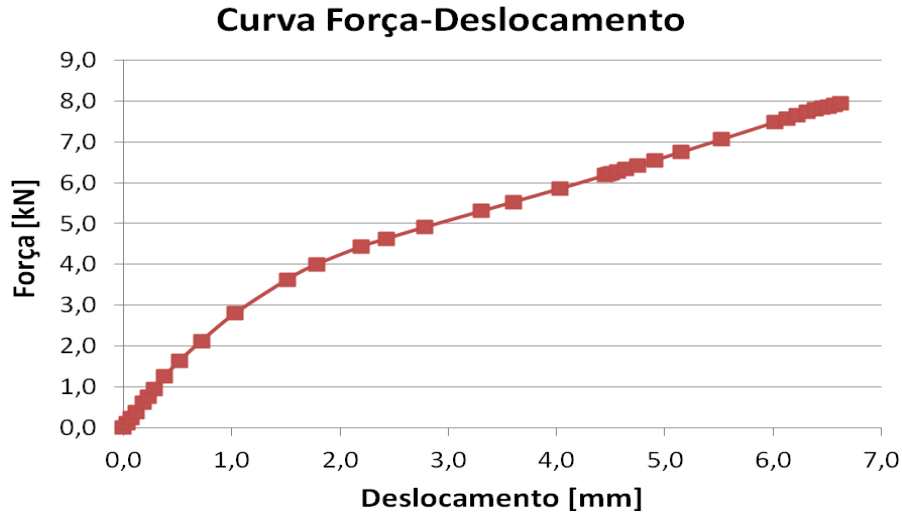


Fig. 4 - Curva força-deslocamento adoptada para o comportamento da ligação.

4. Análise numérica do comportamento de painéis estruturais

4.1 Descrição do modelo e da análise

A análise numérica de painéis estruturais teve como objectivo o estudo do comportamento do painel tipo de parede, considerando a influência da ligação no mesmo, para duas situações: i) considerando a existência de excentricidades na ligação entre elementos e ii) não considerando qualquer tipo de excentricidade.

Na Fig. 5 apresentam-se os dois tipos de painéis de parede considerados no presente estudo.

Os perfis dispostos na vertical (montantes) têm secções transversais do tipo "macho-fêmea" de forma a existir uma encaixe entre painéis consecutivos, enquanto que os perfis dispostos na horizontal e os perfis com funções de contraventamento têm secções transversais do tipo "C".

A definição das condições de apoio é um fator preponderante na modelação do modelo. Assim sendo, adotou-se uma solução rotulada (apoiada) na base dos montantes (perfis dispostos na vertical), simulando as condições reais.

A modelação dos painéis de parede foi efectuada com recurso ao programa de cálculo *Abaqus*, tendo-se considerado elementos de barra (*wire*) em três dimensões, atribuindo a cada elemento a devida secção transversal. Já no que diz respeito à simulação das ligações utilizou-se a ferramenta "*Connector*", assumindo que estas têm igual comportamento à tração e à compressão.

Quanto ao tipo de análise, foi realizada uma análise não linear, em que se considerou a não linearidade geométrica e material. Para o material, considerou-se um aço com tensão de cedência nominal de 320 Mpa e com uma lei constitutiva elástica perfeitamente plástica, com comportamento bilinear no gráfico tensão-extensão, considerando-se os valores nominais descritos no Eurocódigo 3 [5].

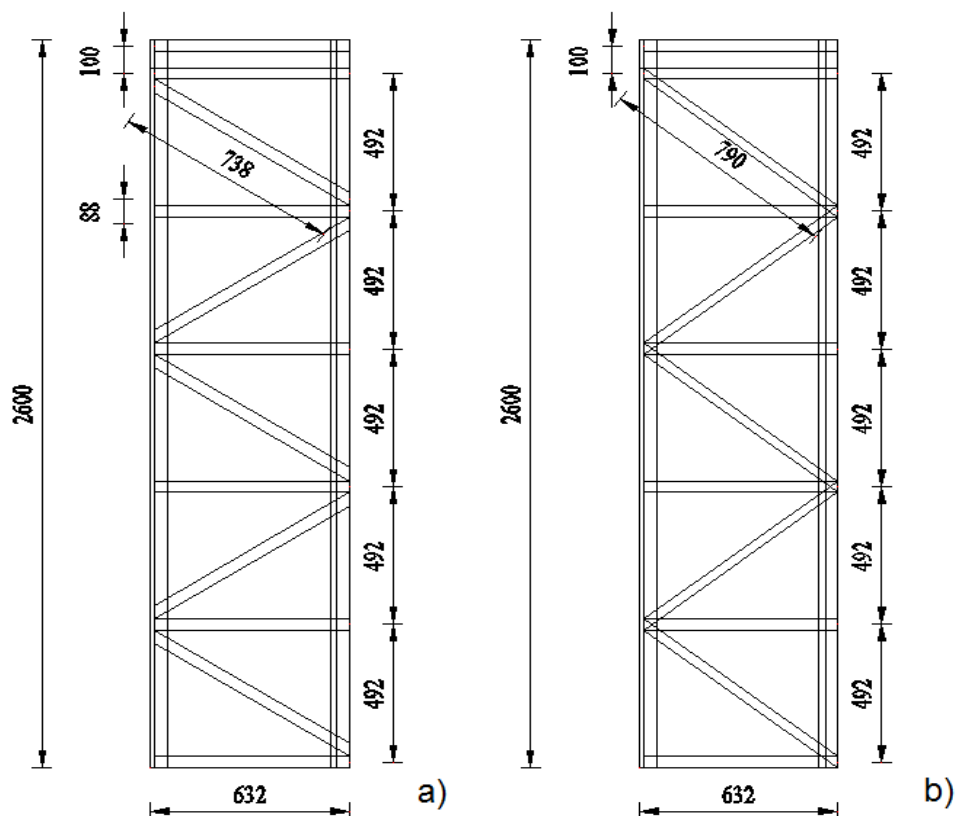


Fig. 5 - Painel de parede: a) com excentricidades e b) sem excentricidades.

De forma a analisar a influência da ligação entre elementos no painel estrutural, foram consideradas três tipos de ligações entre todos os elementos: uma ligação rígida, uma ligação elástica e uma ligação com o comportamento “real” dado pela curva apresentada na Fig. 4.

No que diz respeito ao tipo de carregamento, aplicaram-se dois casos de carga, como se pode observar na Tabela 2. O primeiro, consiste em aplicar uma carga pontual horizontal no topo do painel. No segundo caso de carga, aplica-se uma carga pontual horizontal no topo do painel (tal como no caso de carga 1) e duas forças pontuais verticais no topo do painel, no valor de 15kN cada. A carga horizontal, em ambos os casos, foi incrementada de modo a conduzir a análise à rotura.

Assim, os diversos modelos numéricos realizados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos numéricos

		Modelo Com Excentricidades		Modelo Sem Excentricidades	
Caso de carga		1	2	1	2
Análise Não Linear	Ligação com comportamento rígido	A1ExNL	A2ExNL	A1NL	A2NL
	Ligação com comportamento elástico (k=2000 N)	B1ExNL	B2ExNL	B1NL	B2NL
	Ligação com comportamento real	C1ExNL	C2ExNL	C1NL	C2NL

4.2 Comparação do comportamento dos diversos modelos

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos para os diversos modelos numéricos indicados na Tabela 2. Como indicado anteriormente, todas as análises não lineares efectuadas foram conduzidas até à rotura, onde se assumiu como critérios de rotura a plastificação do material e a cedência das ligações.

No primeiro grupo de quatro gráficos, ilustrados nas Fig. 8 e 9, efetua-se a comparação entre modelos com excentricidades e modelos sem excentricidades, para o primeiro e segundo casos de carga, respectivamente. Em ambos os casos considerou-se o comportamento rígido das ligações e o comportamento real das mesmas.

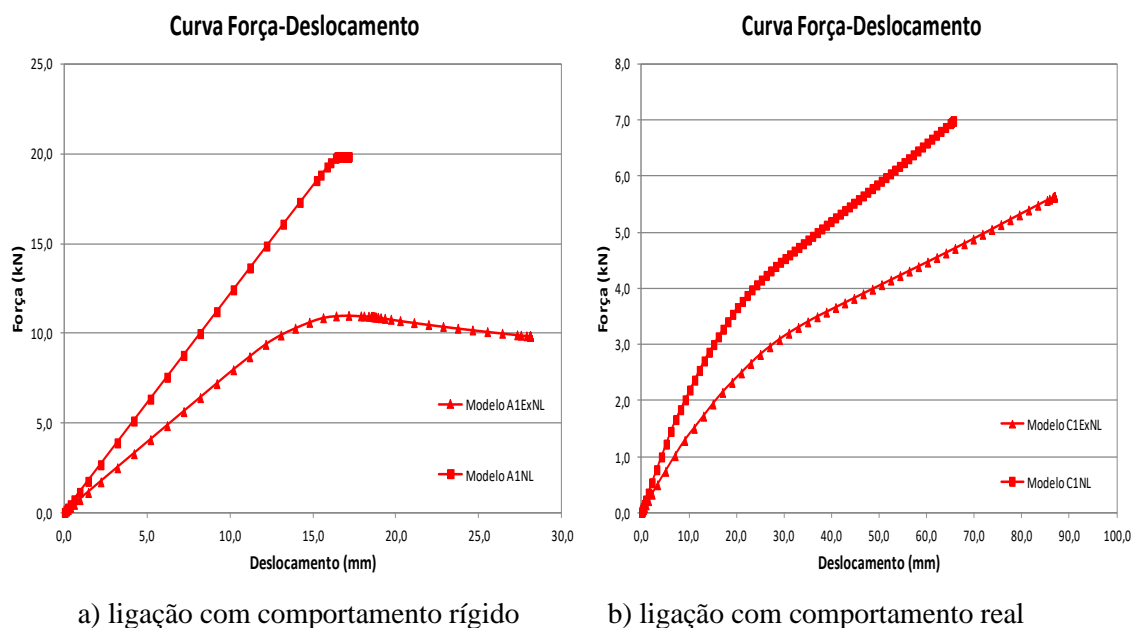


Fig. 8 - Gráficos curva força deslocamento para o primeiro caso de carga.

Ao observar a Fig.8, verifica-se que, para o mesmo caso de carga, o comportamento do painel é muito diferente quando se simula um comportamento rígido das ligações. Sendo as ligações rígidas, estas não permitem grandes deslocamentos e para o modelo sem excentricidades consegue-se obter grande resistência com pequenos deslocamentos em comparação com o modelo com excentricidades.

No modelo com excentricidades, desenvolvem-se grandes esforços transversais na zona da excentricidade, atingindo-se a extensão última do aço adotada para o comportamento não linear deste, dando-se a rotura precisamente na zona da excentricidade. Neste modelo obtém-se menor resistência mas com maiores deslocamentos. Já para o comportamento real das ligações, os dois tipos de modelos apresentam o mesmo padrão de comportamento, apesar de o modelo sem excentricidades ter, mais uma vez, maior resistência mas agora com pouca diferença no que diz respeito aos deslocamentos.

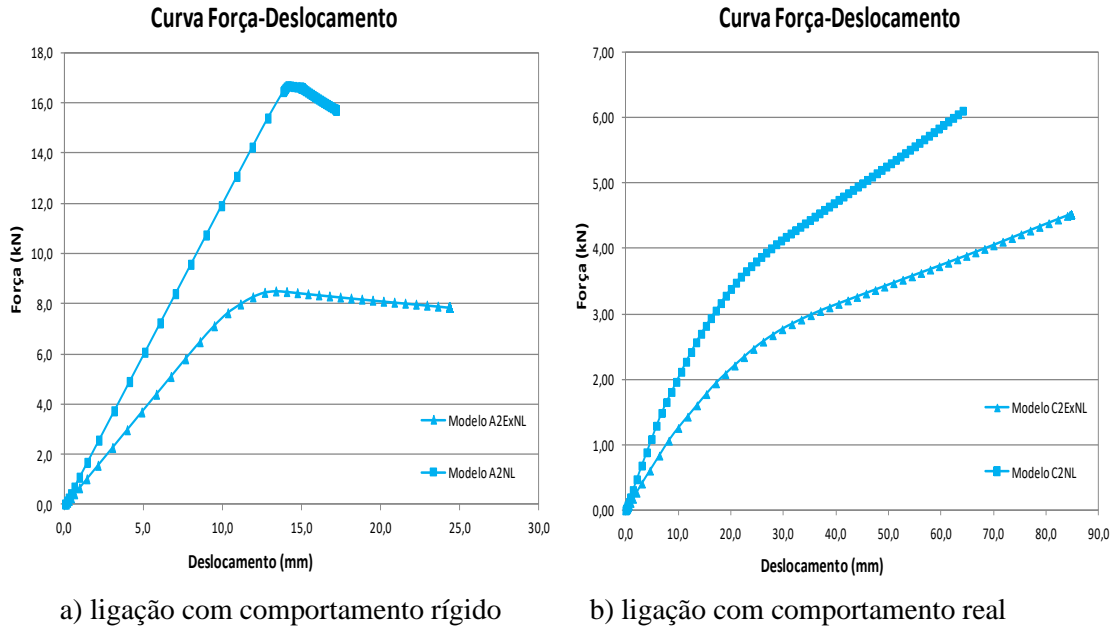


Fig. 9 - Gráficos curva força deslocamento para o segundo caso de carga.

Atendendo à Fig.9, relativa ao segundo caso de carga, pelo facto de os perfis estarem em compressão, todos os modelos apresentam menor resistência, bem como menores deslocamentos em relação aos gráficos da Fig.8. Nesta análise regista-se maior diferença entre os dois tipos de modelos estudados, tanto em termos de resistência como de deslocamentos.

No grupo de gráficos ilustrados nas Fig. 10 e 11, efetua-se a comparação entre os dois casos de carga considerados, para o modelo com excentricidades e sem excentricidades, respectivamente. Da mesma forma, em ambos os casos considerou-se o comportamento rígido e o comportamento real das ligações.

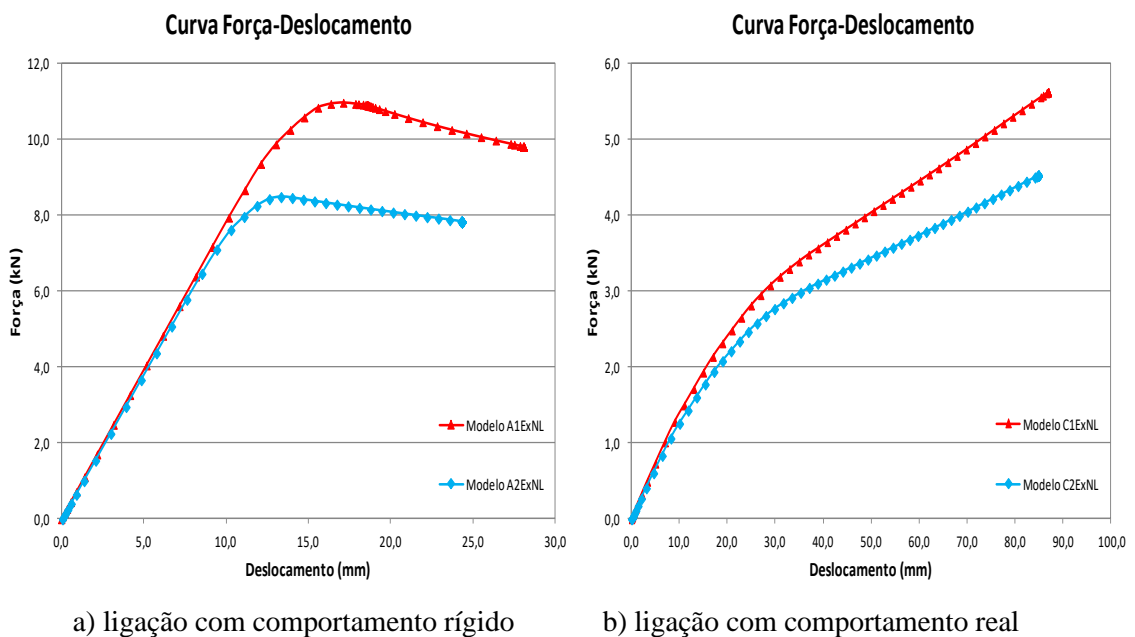


Fig. 10 - Curvas força-deslocamento correspondentes aos dois casos de carga, para o modelo com excentricidades.

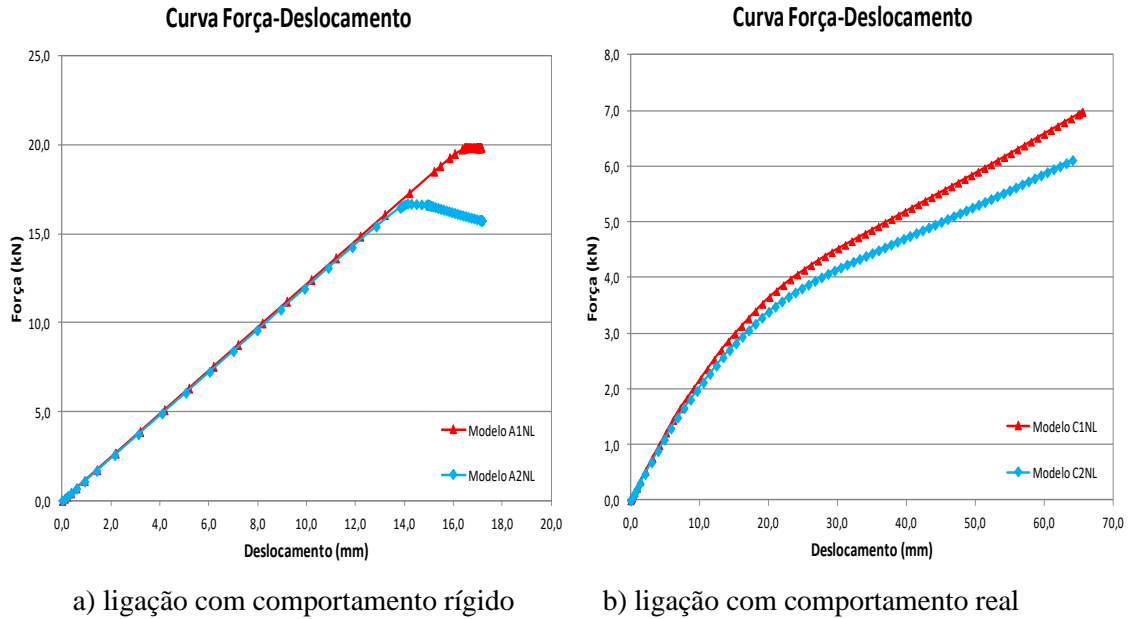


Fig. 11 - Curvas força-deslocamento correspondentes aos dois casos de carga, para o modelo sem excentricidades.

Alterando apenas o carregamento em cada gráfico, os modelos apresentam o mesmo tipo de comportamento, evidenciando que o segundo caso de carga é o mais desfavorável, atingindo para este menores resistências mas sem grande diferença na amplitude dos deslocamentos.

Verificou-se que considerando o comportamento rígido das ligações, a rotura do painel de parede ocorre pela cedência do aço nos elementos, enquanto que considerando o comportamento real das ligações, a rotura dá-se nas ligações.

Por último são apresentados nas Fig. 12 e 13 os gráficos com as curvas força deslocamento, em que se pretende realçar a resposta do modelo quando apenas varia o tipo de comportamento das ligações entre os perfis, considerando também neste caso o comportamento elástico das ligações.

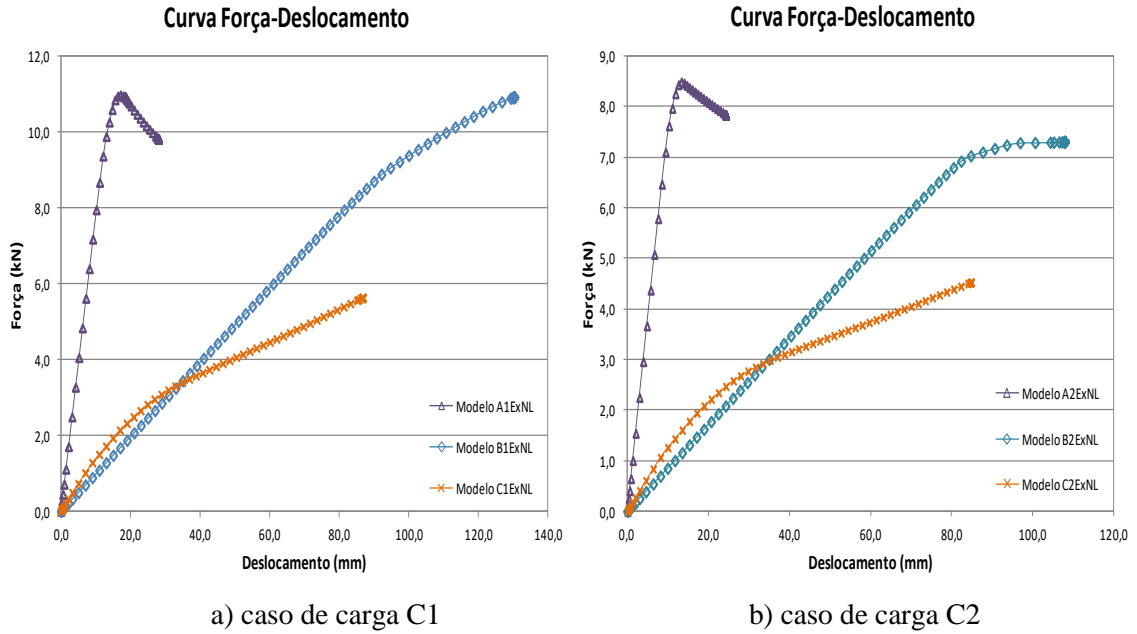


Fig. 12 - Curvas força-deslocamento dos diferentes comportamentos da ligação, para o modelo com excentricidades.

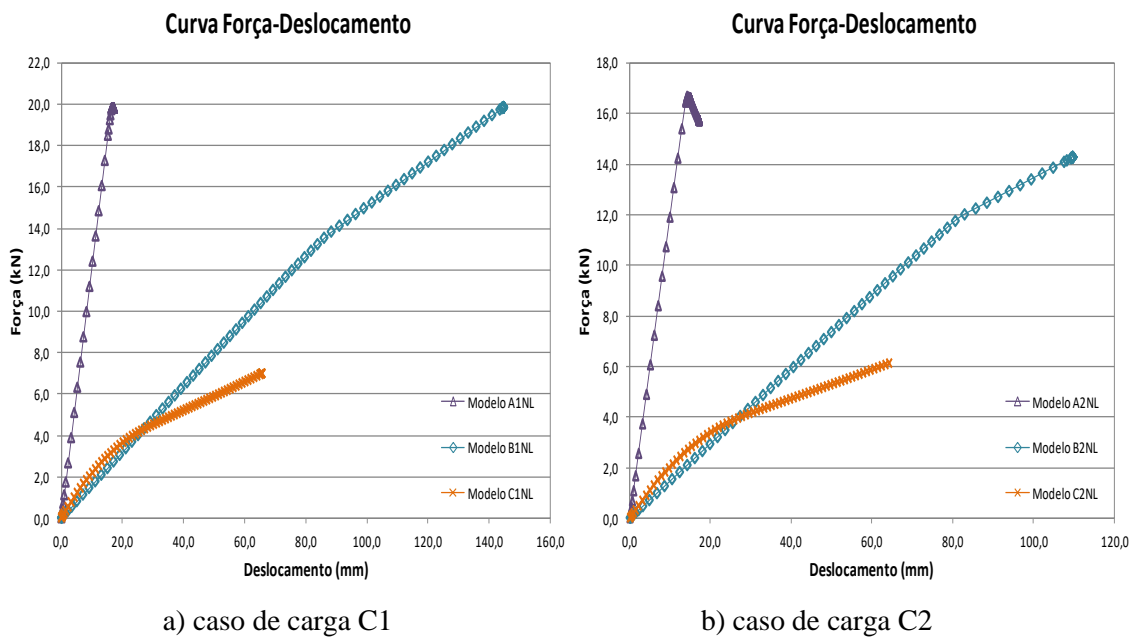


Fig. 13 - Curvas força-deslocamento dos diferentes comportamentos da ligação, para o modelo sem excentricidades.

Verifica-se assim que em ambos os modelos e para os dois tipos de casos de carga, existe uma grande disparidade em termos de comportamento dos modelos quando se altera o comportamento das ligações entre perfis. Fica claramente evidenciado que a rigidez e deformabilidade das mesmas têm grande influência no comportamento e consequentemente na capacidade de carga que os modelos em estudo conseguem suportar. **Quanto maior for a rigidez da ligação, maior será a resistência dos painéis.**

5. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo numérico para o cálculo da resistência de um painel tipo de parede constituído por perfis de aço enformados a frio. Na análise efectuada foi dada particular atenção à influência das ligações no comportamento dos referidos painéis. Assim, as principais conclusões são:

1. A realização de ensaios experimentais com diferentes parafusos permitiu perceber a influência dos dois tipos de parafusos no comportamento da ligação entre perfis e foi fundamental para a calibração dos modelos numéricos realizados posteriormente;
2. Na calibração dos modelos numéricos, a discretização da malha de elementos finitos e a modelação das zonas de contacto entre os diversos elementos revelaram-se de extrema importância;
3. Nos modelos numéricos do painel de parede, a existência de excentricidades nas zonas de ligações entre perfis provoca uma diminuição na capacidade resistente do mesmo;
4. No que respeita à influência do tipo de ligação no comportamento do painel de parede, quanto mais rígida for a ligação, melhor será o comportamento do painel de parede.

Agradecimentos

À Coolhaven por toda a colaboração prestada no fornecimento dos protótipos experimentais, bem como ao apoio prestado pela pessoa de José Henriques.

Referências

- [1] Garcia, F. “Análise de Painéis com Perfis de Aço Enformados a Frio para Utilização em Construção Modular CoolHaven”, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2013.
- [2] Gervásio H., Silva L., Simão P. "Dimensionamento de elementos metálicos com perfis enformados a frio de acordo com a parte 1.3 do Eurocódigo 3", IV Congresso de Construção Metálica e Mista, Lisboa, 2003.
- [3] Yu W. W. "Cold-formed Steel Design". John Wiley, New York, 2010.
- [4] *Abacus* v.6.13. Dassault Systèmes S.A. (<http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/latest-release/>).
- [5] CEN - Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold formed members and sheeting, Commission of the European Communities, 2006.