

# MODELAÇÃO DE LIGAÇÕES METÁLICAS E MISTAS PELO MÉTODO DAS COMPONENTES: UM PRÉ-PROCESSADOR PARA A GERAÇÃO DE MODELOS GENERALIZADOS BIDIMENSIONAIS

João Leitão <sup>1</sup>, Nuno Neves <sup>1</sup>, Rui Simões <sup>2</sup>, Luís Simões da Silva <sup>3</sup> e Luís Borges <sup>4</sup>

## RESUMO

A modelação do comportamento de uma ligação metálica ou mista pode ser efectuada através de diversos métodos: analíticos, numéricos ou experimentais. Dos métodos analíticos destaca-se o Método das Componentes, previsto no Eurocódigo 3, Parte 1-8: Ligações Metálicas, que permite a obtenção da curva de comportamento momento flector-rotação não linear, a partir da qual se definem as três propriedades fundamentais de uma ligação: rigidez, momento resistente e capacidade de rotação.

Com o crescimento exponencial da velocidade de processamento dos computadores e com o incremento do software disponível, a análise de estruturas tornou-se mais rápida e eficiente. Com a programação avançada em Delphi Pascal, entre outras, é possível a criação de pré-processadores capazes de modelar ligações metálicas e mistas cada vez mais complexas. O objectivo deste trabalho foi, com base em software pré-processador já existente, desenvolver um software que permitisse englobar um maior número de componentes, e assim modelar um maior número de tipologias de ligações em estruturas metálicas e mistas: ligações viga-pilar simples e duplas, ligações base de pilar, emendas de vigas, entre outras.

**Palavras Chave:** Ligação metálica, ligação mista, método das componentes, momento resistente, rigidez, capacidade de rotação.

## 1. INTRODUÇÃO

O comportamento global de uma estrutura metálica ou mista depende, entre outros factores, do comportamento das ligações. O comportamento das ligações resulta de uma complexa interacção entre o comportamento individual dos elementos que a constituem:

---

<sup>1</sup> Aluno de Licenciatura em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra

<sup>2</sup> Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra

<sup>3</sup> Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas, EPFL, Lausanne, Suíça

parafusos, placas, soldaduras, alma e banzo de perfis, entre outros. No passado, a incerteza e complexidade do comportamento de ligações levaram à utilização de critérios de análise e dimensionamento semi-empíricos. Nas últimas décadas, em resultado de um esforço notável levado a cabo por diversos investigadores, surgiram novas metodologias para a análise e dimensionamento de ligações em estruturas metálicas e mistas, das quais se destaca o Método das Componentes, previsto no Eurocódigo 3, Parte 1-8: Ligações Metálicas <sup>[1]</sup> (designado abreviadamente por EC3-1-8).

Segundo o método das componentes, aplicável a um largo número de tipologias, o comportamento global de uma ligação é traduzido por uma curva não linear momento flector-rotação, a partir da qual se definem as três propriedades fundamentais: rigidez, momento resistente e capacidade de rotação. O conhecimento da rigidez é importante para a utilização de métodos elásticos de análise de estruturas; quando se utilizam métodos plásticos, para além da rigidez é fundamental conhecer a resistência e a capacidade de rotação <sup>[2], [3]</sup>.

A curva de comportamento de uma ligação é obtida por associação do comportamento individual das diversas componentes, utilizando modelos mecânicos, que consistem em barras rígidas e molas deformáveis axialmente, representativas das diversas componentes, como se ilustra na Figura 1 para uma ligação viga-pilar aparafusada. Cada mola representa uma parte específica da ligação sujeita a um determinado tipo de carregamento - componente; cada componente é caracterizada por uma curva força-deformação não linear, embora idealizações mais simples sejam possíveis sempre que se pretenda avaliar apenas a resistência ou a rigidez inicial da ligação. O comportamento das componentes pode ser obtido por via analítica, numérica ou experimental; actualmente, as principais características das componentes mais frequentes em ligações metálicas podem ser obtidas através do EC3-1-8. Na Figura 1 ilustra-se a aplicação do Método das Componentes a uma ligação viga pilar aparafusada com placa de topo; neste caso as componentes mais relevantes, incluindo os respectivos coeficientes de rigidez  $k_i$ , são: alma do pilar ao corte ( $k_1$ ), alma do pilar à compressão ( $k_2$ ), alma do pilar à tracção ( $k_3$ ), banzo do pilar à flexão ( $k_4$ ), placa de extremidade à flexão ( $k_5$ ) e parafusos à tracção ( $k_{10}$ ), aos níveis 1 e 2.

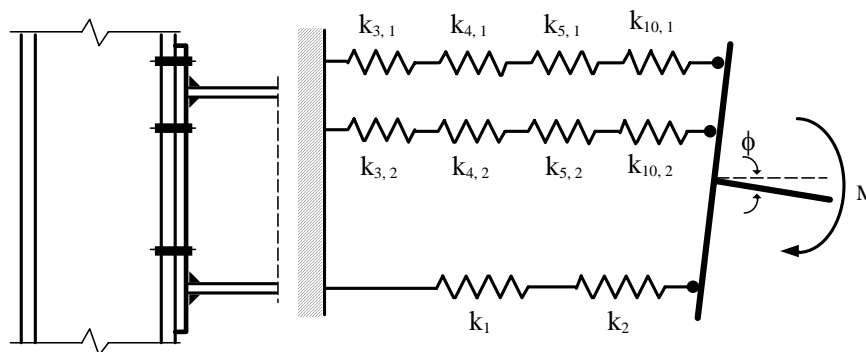


Fig. 1 - Método das componentes aplicado a uma ligação viga pilar aparafusada

Tendo em conta a complexidade e o volume de cálculo envolvidos na análise de ligações com tipologias muito diversas, como as que surgem nas estruturas metálicas e mistas correntes, torna-se imperativo desenvolver ferramentas de cálculo automático que permitam de uma forma rápida e eficiente efectuar a análise e dimensionamento de uma ligação. A resposta a este desafio constitui o objectivo principal do trabalho aqui apresentado.

O Delphi Pascal <sup>[4], [5]</sup> é uma ferramenta computacional avançada com capacidade para desenvolver software com grande qualidade e versatilidade. Com esta ferramenta é possível criar programas com um nível de sofisticação suficiente para responder com rapidez e funcionalidade às múltiplas exigências do utilizador.

O trabalho aqui apresentado consiste na elaboração de um programa pré-processador, utilizando o Delphi Pascal, capaz de gerar qualquer tipologia de ligações, ultrapassando as limitações actuais do ConneAssist [6].

## 2. O PROGRAMA

O programa que serviu de base ao presente trabalho, designado por ConneAssist, foi escrito em linguagem pascal. Este programa permitia apenas criar ligações simples com fiadas de molas paralelas e horizontais; além disso, permitia introduzir apenas doze das vinte componentes previstas no EC3-1-8, sendo as características atribuídas à posteriori (Figura 2).

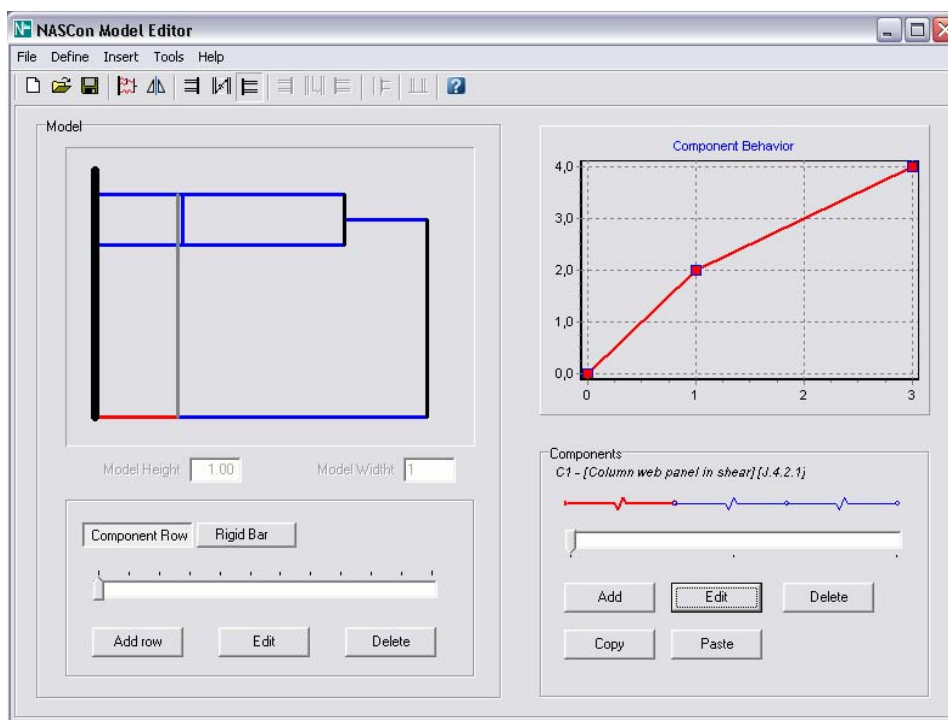


Fig. 2 - ConneAssist – captura da janela principal

O programa agora apresentado (NASCon Model Editor) foi realizado com o objectivo de incorporar o maior número de ligações possíveis. Para cumprir este objectivo foi necessário efectuar algumas alterações no código do programa base. O programa ficou com a capacidade de realizar ligações simples, duplas, base pilar e de simular o comportamento dos banzos dos pilares nas ligações duplas (Figura 3), bem como de isolar o comportamento ao corte da alma do pilar.

O programa foi dotado com a capacidade de desenhar fiadas de componentes horizontais, verticais e até diagonais e também de desenhar barras rígidas. Para isso foi introduzido um sistema de coordenadas, como se ilustra na Figura 4.

Outra das potencialidades do programa é a sua capacidade de fazer ligações em mirror, ou seja, caso uma ligação dupla seja simétrica, é possível apenas com o accionar de um botão copiá-la para o outro lado do pilar, incluindo as suas características – Figura 5. Para melhor visualização da ligação criada, foi incluído no programa a potencialidade (através de um melhoramento gráfico) de observar toda a ligação.

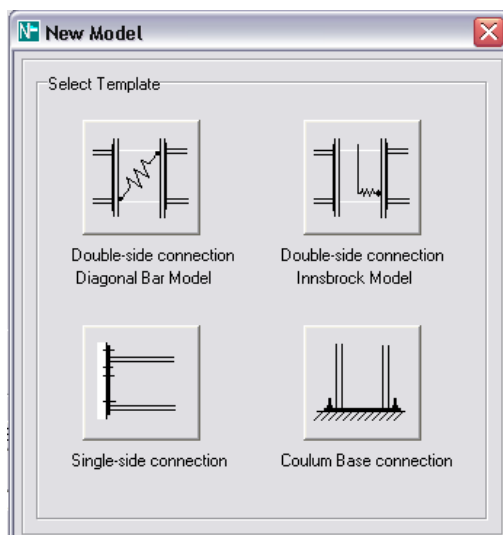


Fig. 3 - Escolha do tipo de ligação

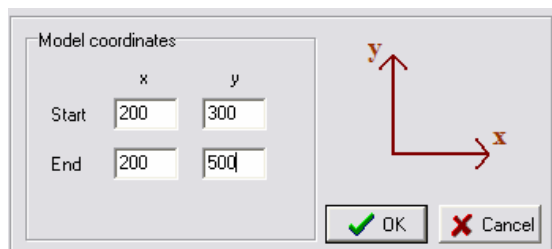


Fig. 4 - Sistema de coordenadas

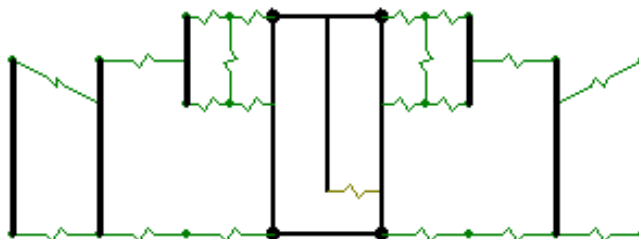


Fig. 5 - Modelação melhorada

O programa tem também um novo design, mais atractivo e funcional, separando as várias fases de concepção das ligações.

Apesar das alterações efectuadas no código, o novo programa mantém a compatibilidade com o solver NASCon (Figura 6).

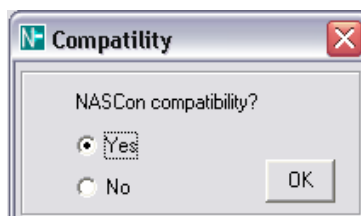


Fig. 6 - Compatibilidade com o NASCon

O código das componentes manteve-se inalterado, apesar de se ter aumentado o número de doze para vinte, perfazendo assim todas as componentes previstas no EC3-1-8 (Figura 7).

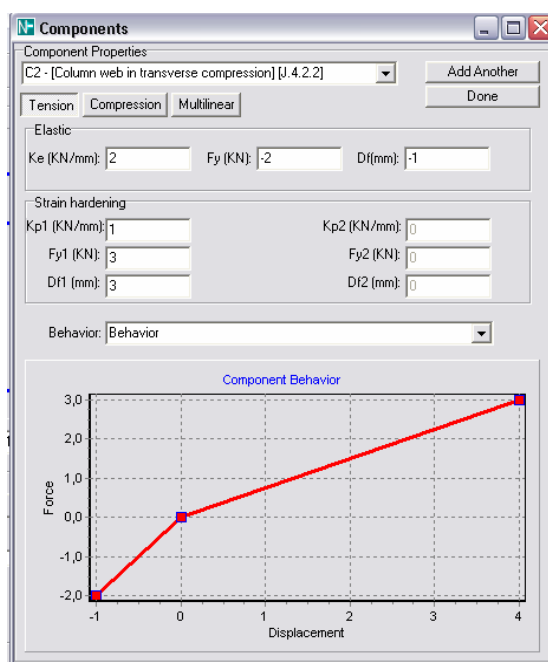


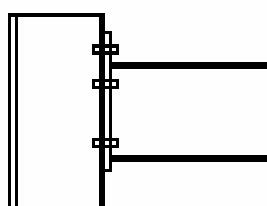
Fig.7 - Janela das componentes

### 3. APLICAÇÕES PRÁTICAS

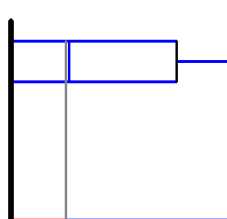
A seguir apresentam-se algumas aplicações práticas do programa desenvolvido com base em imagens do programa em funcionamento e com imagens de ligações reais.

#### 3.1 Ligações simples

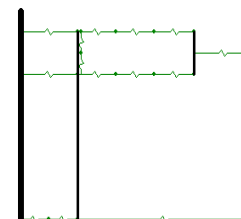
Para uma ligação viga-pilar aparafusada com placa de topo prolongada acima do banzo superior da viga, de acordo com o EC3-1-8, devem ser consideradas as seguintes componentes: alma do pilar ao corte (1), alma do pilar à compressão (2), alma do pilar à tracção (3), banzo do pilar à flexão (4), placa de extremidade à flexão (5), banzo e alma da viga à compressão (7), alma da viga em tracção (8), parafusos à tracção (10), parafusos ao corte (11) e parafusos ao esmagamento (12), ilustradas na Figura 8.



Modelo real



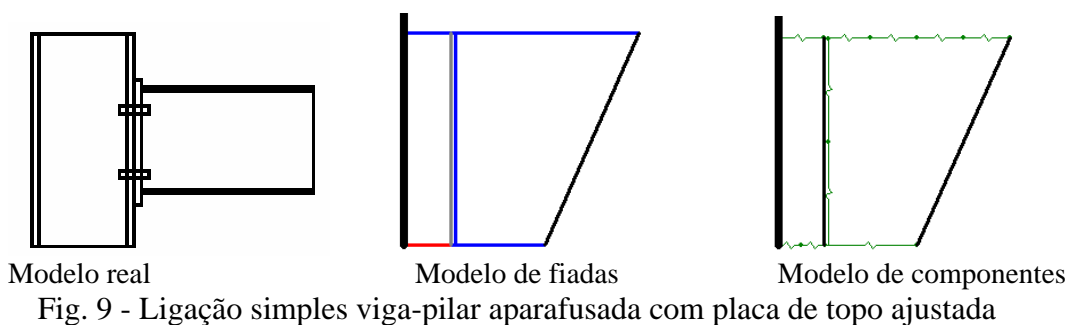
Modelo de fiadas



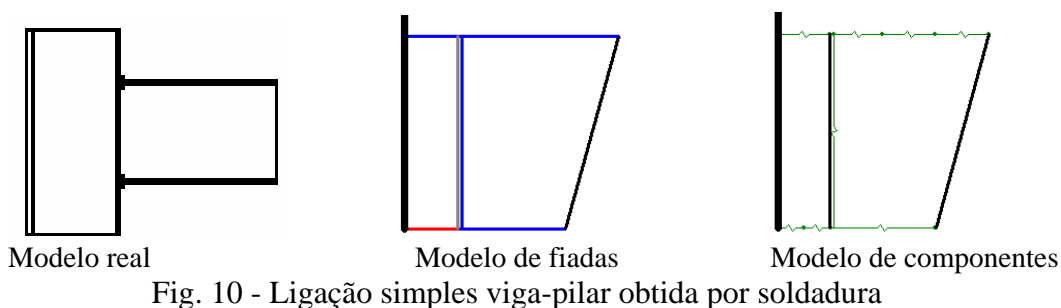
Modelo de componentes

Fig. 8 - Ligação simples viga-pilar aparafusada com placa de topo prolongada

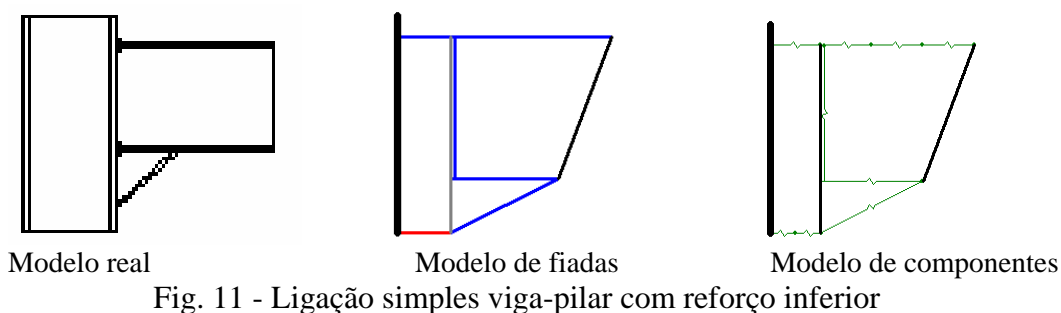
Para uma ligação viga-pilar aparafusada com placa de topo ajustada à altura da viga, segundo o EC3-1-8, surgem as mesmas componentes, ou seja: alma do pilar ao corte (1), alma do pilar à compressão (2), alma do pilar à tracção (3), banzo do pilar à flexão (4), placa de extremidade à flexão (5), banzo e alma da viga à compressão (7), alma da viga em tracção (8), parafusos à tracção (10), parafusos ao corte (11) e parafusos ao esmagamento (12), ilustradas na Figura 9.



Para uma ligação simples viga-pilar por soldadura, as componentes previstas no EC3-1-8 são as seguintes: alma do pilar ao corte (1), alma do pilar à compressão (2), alma do pilar à tracção (3), banzo do pilar à flexão (4), banzo e alma da viga à compressão (7), alma da viga em tracção (8) e soldaduras (19), ilustradas na Figura 10.



Para uma ligação viga-pilar por soldadura com reforço na parte inferior, segundo o EC3-1-8, surgem as seguintes componentes: alma do pilar ao corte (1), alma do pilar à compressão (2), alma do pilar à tracção (3), banzo do pilar à flexão (4), banzo e alma da viga à compressão (7), alma da viga em tracção (8), soldaduras (19) e reforço (20), ilustradas na Figura 11.



### 3.2 Ligações simples com barras inclinadas

Para as ligações ilustradas na Figura 12, bastava inclinar a direcção das componentes.

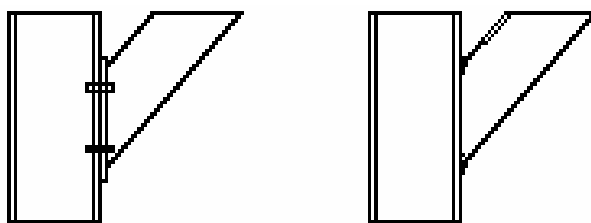


Fig. 12 - Alguns tipos de ligações com barras inclinadas

### 3.3 Ligações Duplas

Na Figura 13 são ilustrados alguns tipos de ligações viga-pilar duplas, previstas no programa desenvolvido no âmbito deste trabalho.

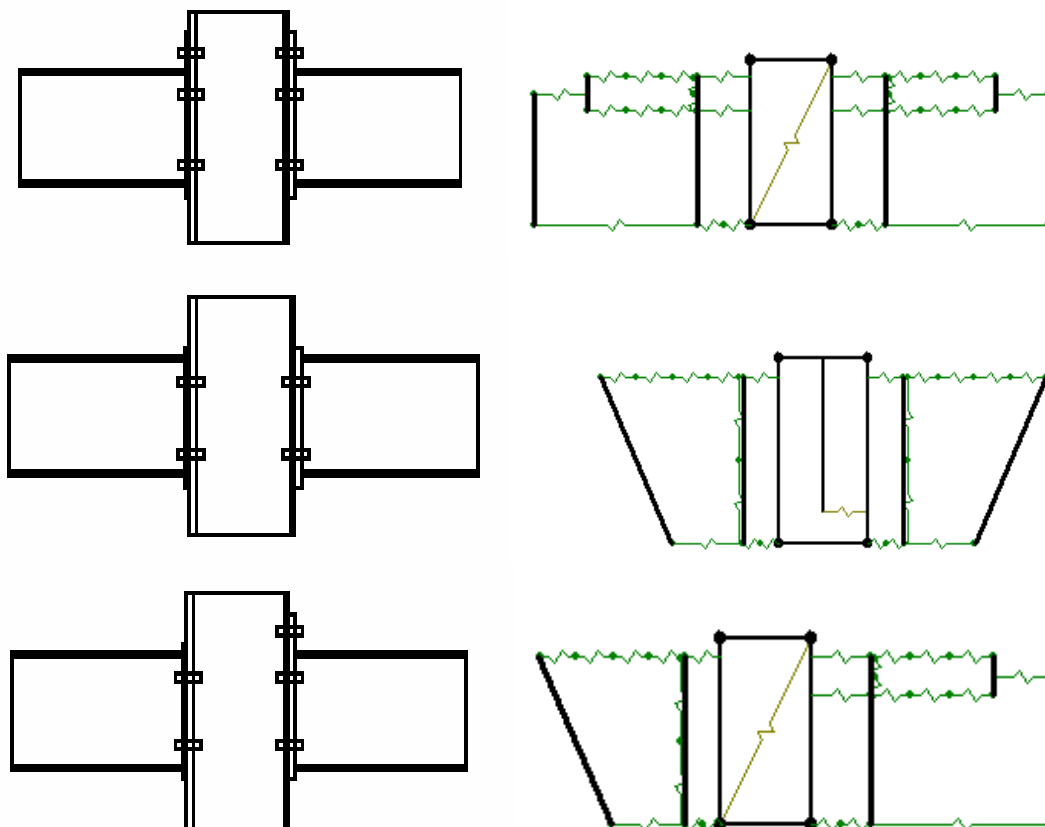


Fig. 13 - Ligações viga-pilar duplas e respectivos modelos de componentes

O comportamento do painel da alma do pilar em ligações viga-pilar duplas, solicitadas com carregamentos não simétricos, pode ser simulado segundo os modelos de mola diagonal (Figura 14) ou segundo o modelo de Innsbruck (Figura 15) <sup>[7]</sup>.

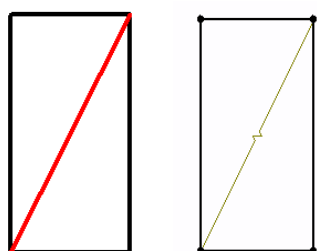


Fig. 14 - Modelo da mola diagonal

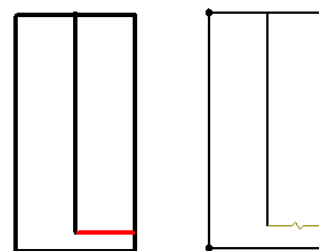
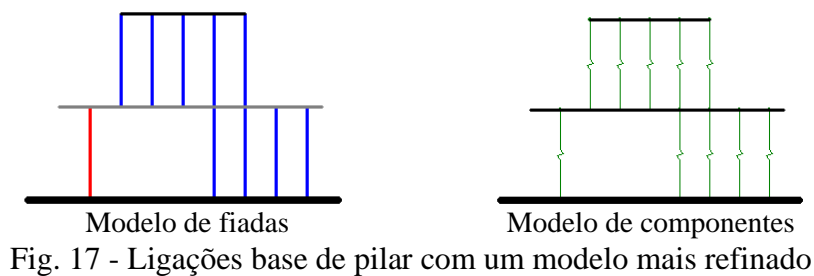
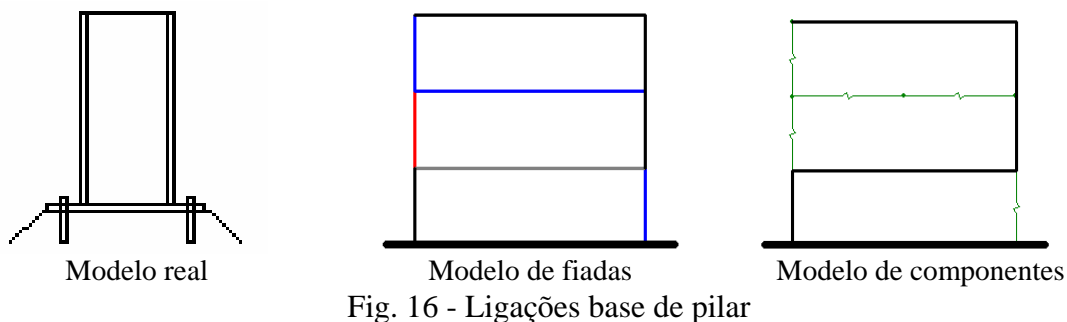


Fig. 15 - Modelo de Innsbruck

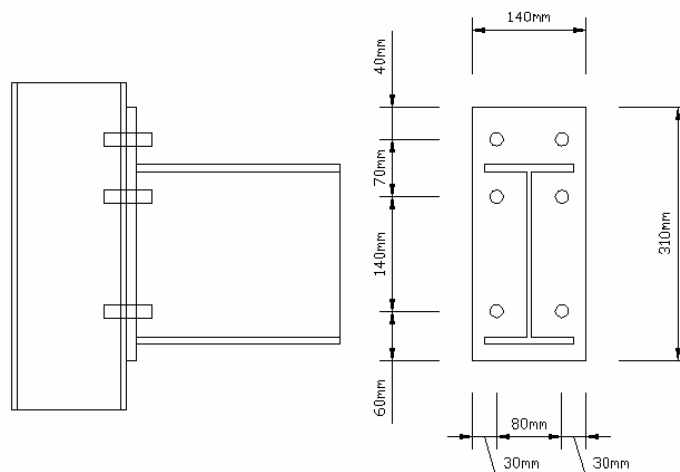
### 3.4 Ligações Base Pilar

Conforme referido anteriormente, o programa agora desenvolvido permite a criação de ligações base de pilar; na Figura 16 é ilustrada uma ligação base de pilar, incluindo o respectivo modelo de componentes. Na Figura 17 é ilustrado um modelo de ligação viga-pilar mais sofisticado.



#### 4. EXEMPLO PRÁTICO

Para exemplificação do programa desenvolvido, apresenta-se a seguir um exemplo prático de aplicação, com base no método das componentes. Este exemplo consiste na análise de uma ligação viga-pilar aparafusada, por intermédio de uma placa de topo prolongada para cima do banzo superior da viga (Figura 18). As características da ligação, bem como os esforços actuantes, são apresentadas na Figura 18 e no Quadro 1.



Quadro 1 - Características da ligação

Dados de Base:	
Pilar	HEB 140
Viga	IPE 220
Aço	FE360
Parafusos	M16 Classe 8.8
$M_{Ed}$ (kN.m)	30
$N_{Ed}$ (kN)	5

#### 4.1 Escolha da ligação

Numa primeira fase é escolhida a tipologia da ligação; na Figura 19 ilustra-se o menu correspondente à criação de uma ligação de um só lado compatível com o NASCon.

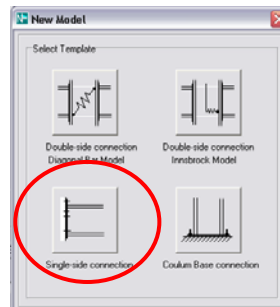


Fig. 19 - Escolha da ligação

#### 4.2 Definição do número de fiadas

A seguir introduz-se a altura do modelo e as coordenadas das fiadas (Figura 20). Neste caso considera-se  $h = 0,310$  m. Para introduzir as fiadas horizontais de componentes – carregar no Botão “Add Row”.

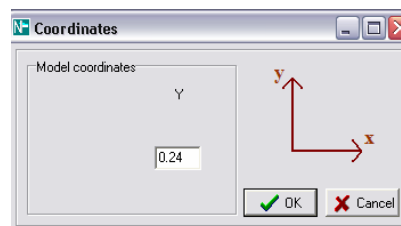


Fig. 20 - Coordenadas das fiadas

As alturas a que se localizam as fiadas são as seguintes: 1ª Fiada -  $h = 0.286$  m, 2ª Fiada -  $h = 0.11$  m e 3ª Fiada -  $h = 0.04$  m.

#### 4.3 Componentes e características da ligação

A seguir introduzem-se as componentes de cada fiada com o botão “Add” (Figura 21).

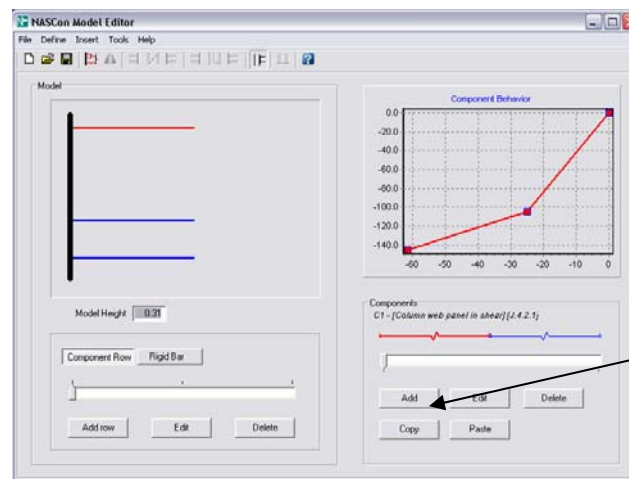


Fig. 21 - Janela principal do NASCon Model Editor

Ao definir cada componente podem ser introduzidas as características com a ajuda da janela das componentes (Components) (Figura 22).

Para o exemplo em análise vão ser introduzidas as seguintes componentes:

- Zona de Compressão – Alma do pilar ao corte (1) e alma do pilar à compressão (2).
- Zona de Tracção, 1ª Linha de Parafusos – Alma do pilar à tracção (3), banzo do pilar à flexão (4), placa de topo à flexão (5) e soldaduras (19).
- Zona de Tracção, 2ª Linha de Parafusos – Alma do pilar à tracção (3), banzo do pilar à flexão (4), placa de topo à flexão (5) e soldaduras (19).

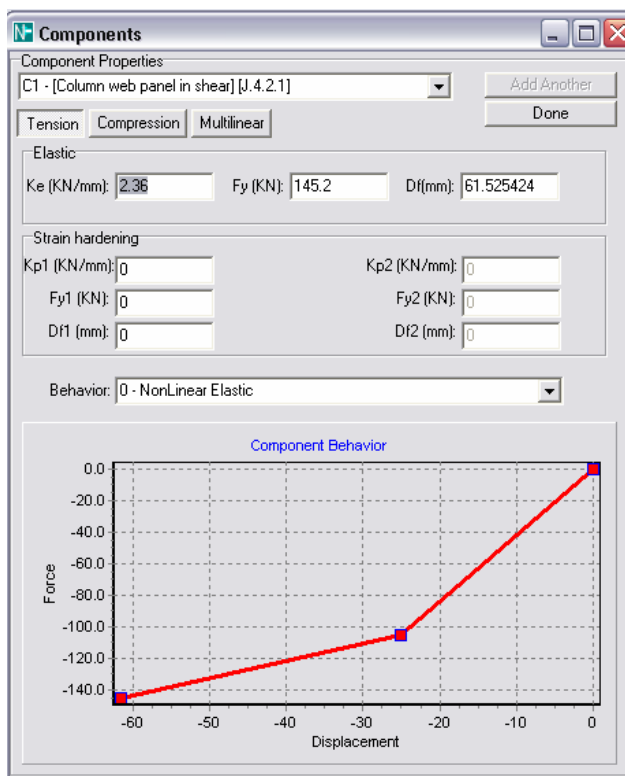


Fig. 22 - Janela das Componentes

Por fim deve-se gravar o ficheiro em formato .sco (Figura 23).

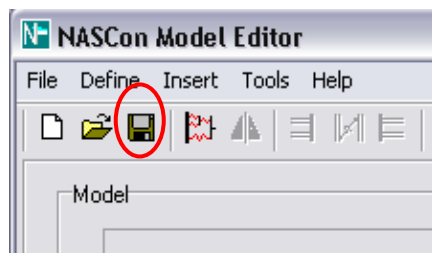


Fig. 23 - Gravar a ligação criada

#### 4.4 Resultados da análise da ligação

Para a análise da ligação deve abrir-se o ficheiro .sco com o programa NASCon. Atendendo a que o programa NASCon tem um sistema de coordenadas inverso ao do programa NASCon Model Editor, foi necessário criar neste programa ligações com as medidas inversas. Após a análise da ligação foram obtidos os seguintes resultados, ilustrados nas Figuras 24 a 27.

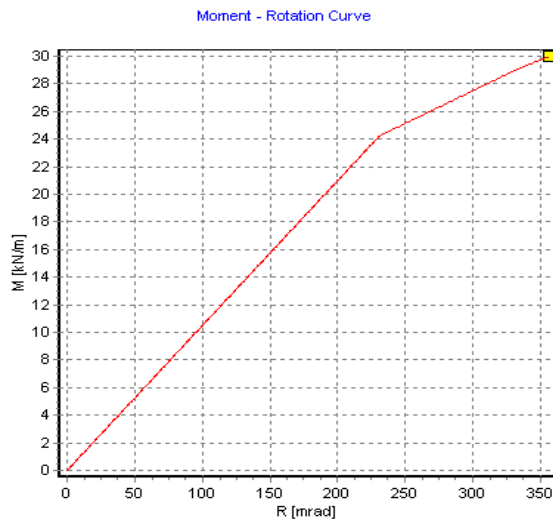


Fig. 24 - Diagrama Momento-Rotação

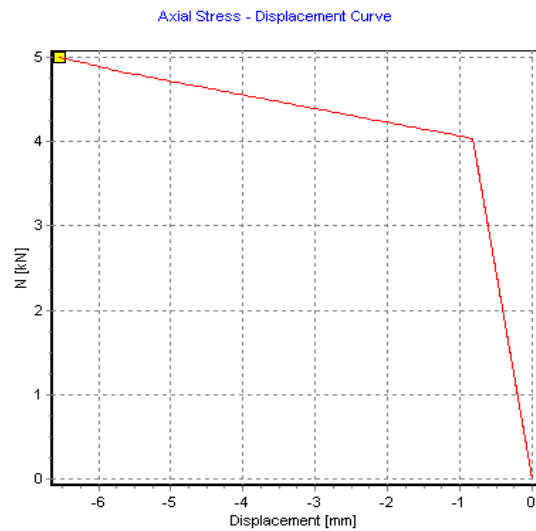


Fig. 25 - Diagrama Esforço Axial-Deslocamento

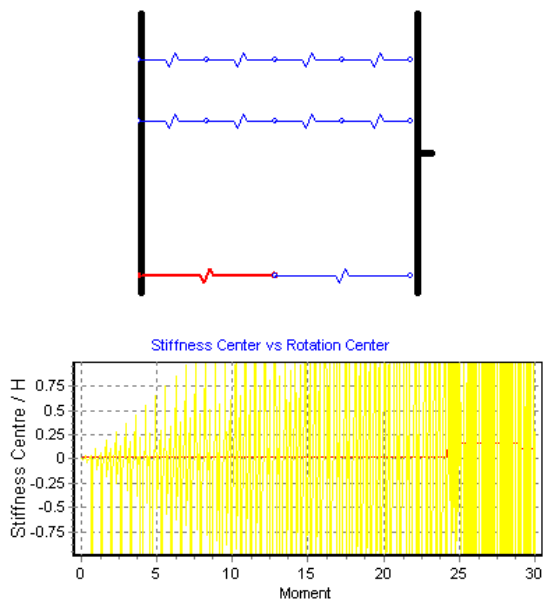


Fig. 26 - Centro de Rigidez - Centro Rotação

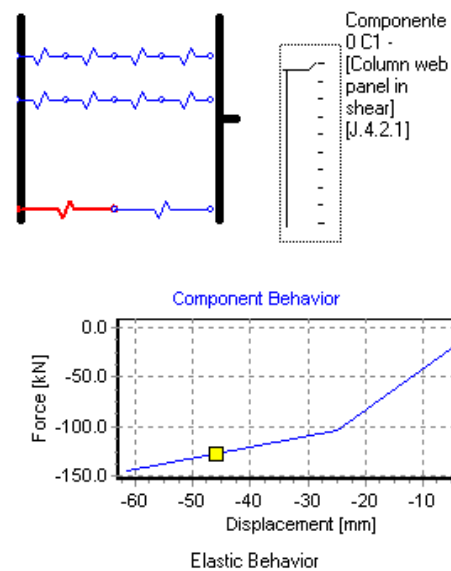


Fig. 27 - Comportamento da componente  $k_1$

Após a análise das várias componentes, verifica-se que a componente mais condicionante é a da alma do pilar ao corte. Na Figura 27 visualiza-se o gráfico com o comportamento desta componente, onde se pode observar que esta se encontra muito perto da rotura (ponto amarelo). Para além dos gráficos apresentados acima também podem ser consultadas tabelas com valores numéricos.

## 5. CONCLUSÕES

O NASCon Model Editor é um programa capaz de criar um maior número de tipologias de ligações que o programa base que lhe deu origem – o ConnecAssist.

Conclui-se também que os códigos informáticos, como o agora desenvolvido, podem constituir ferramentas bastante poderosas e funcionais para o engenheiro, especialmente em análises que envolvam um grande volume de cálculo como é o caso da análise de ligações em estruturas metálicas e mistas.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Eurocode 3, prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of Joints, CEN, Document CEN/TC 250/SC 3, Brussels, 2003.
- [2] Silva, L. S. e Santiago, A., “Manual de ligações metálicas”, CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra, 2003.
- [3] Simões, R. A. D., “Manual de dimensionamento de estruturas metálicas”, Editor: António Lamas, CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra, 2005.
- [4] Borland Delphi Interprise, version 7, 1983-2003, Borland Software Corporation.
- [5] Steve Teixeira & Xavier Pacheco, “Borland Delphi 4 Developer’s Guide”, Sams Publishing, 2000.
- [6] Borges, L. A. C., Lima, L. R. O., Silva, L. A. P. S. and Vellasco, P. C. G. S., “Evaluation of the post-limit stiffness of beam-to-column semi-rigid joints using genetic algorithms”, Proceedings of The Ninth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Egmond-aan-Zee, Netherlands, 2-4 September, 2003.
- [7] Innsbruck, Marz , “Nich – Lineare Berechnungen Von Verbundquerschnitten und Biegewichen Knoten”, Doktor der Technischen Wissenschaften, 1999.