

# Avaliação experimental do comportamento ao corte de vigas de aço esbeltas

Carlos M. M. Gomes <sup>1,†</sup>, Paulo J. S. Cruz <sup>2</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

Luís Simões da Silva <sup>3</sup>

*Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil  
3049 Coimbra Codex*

## RESUMO

Este trabalho pretende apresentar os resultados da investigação levada a cabo no domínio da encurvadura por esforço transversal de vigas de aço esbeltas. Para isso foram executados em laboratório uma série de ensaios em vigas metálicas com esbelteza de alma de  $\lambda_w=150$  para diversas configurações de reforços longitudinais e transversais e uma viga mista.

O principal objectivo deste trabalho é o de aferir os métodos propostos nos Eurocódigos 3 e 4, efectuar um estudo comparativo e concluir sobre a aplicabilidade de cada um dos métodos para cada uma das situações distintas estudadas.

## 1. INTRODUÇÃO

Prevê-se que a aprovação final dos Eurocódigos por parte do CEN esteja para breve. Embora um grande número de partes e anexos já estejam aprovados e ratificados como pré normas Europeias, tem-se assistido à alteração de algumas partes e publicação de partes adicionais, provenientes de trabalhos ainda em curso.

A parte 1.1 do Eurocódigo 3 (estruturas de aço - regras gerais e regras para edifícios) apresenta dois métodos alternativos de avaliação da resistência à encurvadura por esforço transversal de almas reforçadas transversalmente. Soluções económicas para vigas de alma cheia ou em caixão em estruturas de pontes correspondem, muito frequentemente, a almas muito esbeltas com reforços longitudinais. A parte 1.5 (estruturas de aço - regras suplementares para estruturas laminares) recentemente aprovada pela CEN apresenta um novo método que contempla também a consideração destes reforços.

---

<sup>1</sup> Assistente

<sup>†</sup> Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (cgomes@eng.uminho.pt)

<sup>2</sup> Professor Auxiliar

<sup>3</sup> Professor Associado

A parte 1.1 do Eurocódigo 4 referente à concepção e dimensionamento de estruturas mistas aço-betão remete o cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal de vigas mistas para os métodos preconizados no Eurocódigo 3 e apresenta, alternativamente, o método simples pós-crítico modificado que pode ser utilizado desde que se cumpram algumas condições.

Neste trabalho descreve-se, com detalhe, os ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. É dado especial destaque à descrição das características dos materiais, do equipamento de ensaio e do sistema de aquisição de dados, da instrumentação dos provetes e dos procedimentos de ensaio. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos, efectuando-se uma comparação com os resultados dos métodos regulamentares.

## 2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PRECONIZADOS NO EUROCÓDIGO 3

Relativamente a almas sem reforços longitudinais, o EC3 - Parte 1.1 considera separadamente almas sem reforços transversais e almas reforçadas transversalmente. Preconiza ainda que a resistência da alma de uma viga de alma cheia, em relação à encurvadura por esforço transversal, deve ser verificada sempre que  $d/t_w$  (relação entre a altura da alma e a sua espessura), satisfaça uma das seguintes condições:  $d/t_w > 69\varepsilon$  no caso de almas sem reforços transversais e  $d/t_w > 30\varepsilon(k_\tau)^{0.5}$  no caso de almas reforçadas transversalmente, em que  $\varepsilon$  é um coeficiente que depende do tipo de aço e  $k_\tau$  é o coeficiente de encurvadura da placa.

Na parte 1.1 são propostos dois métodos para verificar a resistência das almas em relação à encurvadura por esforço transversal: o *Método simples pós-crítico* e o *Método do campo diagonal de trações*.

O primeiro método, que é o mais conservativo, pode ser utilizado em qualquer situação, enquanto que o segundo método apenas pode ser utilizado no caso de almas reforçadas transversalmente para as quais se tenha uma relação:  $1 \leq (a/d) \leq 3$ , sendo  $a$  o espaçamento livre entre reforços transversais.

Como método alternativo, ou no caso de almas com reforços longitudinais, deve-se utilizar o método indicado na ENV 1993-2 EC3 - Parte 2. Este por sua vez remete para a parte 1.5 do EC3, que complementa a parte 2 do EC3 com regulamentação específica para estruturas laminares. Neste caso, o método, indicado como o *Método do campo de tensões rodado*, refere que a segurança da alma em relação à encurvadura por esforço transversal deve ser verificada sempre que:  $d/t_w > 72\varepsilon/\eta$  no caso de almas não reforçadas e  $d/t_w > 31\varepsilon\sqrt{k_\tau}/\eta$  no caso de almas reforçadas, em que  $\eta$  é um coeficiente que depende do tipo de aço utilizado.

A verificação à encurvadura por esforço transversal de vigas mistas pode ser executada de acordo com a parte 1.1 do Eurocódigo 4 através dos métodos preconizados nas partes 1.1 e 1.5 do Eurocódigo 3 ou através do *Método pós-crítico simples modificado*. Note-se que este último método apenas pode ser aplicado nos casos em que se têm vigas simplesmente apoiadas sem reforços intermédios, com conexão completa e sujeita a uma carga uniformemente distribuída, e a verificação deve ser executada sempre que:

$$\begin{array}{ll}
 d/t_w > 69 \varepsilon & \text{- almas e sem reforços transversais} \\
 d/t_w > 124 \varepsilon & \text{- almas preenchidas e sem reforços transversais} \\
 d/t_w > 30 \varepsilon (k_\tau)^{0.5} & \text{- almas não preenchidas e reforçadas transversalmente} \\
 d/t_w > 124 \varepsilon e > 30 \varepsilon (k_\tau)^{0.5} & \text{- almas preenchidas e reforçadas transversalmente}
 \end{array} \quad (3)$$

Uma revisão completa destes métodos pode ser encontrada em Gervásio (1998) e Silva *et al.* (1998).

### 3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EFECTUADOS

#### 3.1 Introdução

Os ensaios efectuados tiveram como principais objectivos: observar o comportamento de vigas metálicas com diversas configurações de reforços transversais e longitudinais; obter resultados por forma a confrontar com os obtidos pelos métodos apresentados no Eurocódigo 3 e construir um acervo de informação que venha a permitir a aferição de modelos numéricos de análise não linear através de programas de elementos finitos.

Seguidamente, são descritos os exemplos estudados e é exposta a metodologia adoptada na realização dos ensaios.

#### 3.2 Descrição dos exemplos a estudar

Os exemplos a estudar consistem numa série de vigas metálicas com diversas configurações de reforços transversais e longitudinais. A viga V1 tem apenas reforços junto aos apoios. As vigas VT têm apenas reforços transversais e as vigas VTL têm reforços transversais e um reforço longitudinal, conforme apresentado na Figura 1.

As vigas metálicas foram executadas com um vão de 1.80 metros, por questões de dimensão e rigidez do pórtico de carregamento.

As dimensões da secção transversal foram escolhidas por forma a que o seu modo de rotura fosse a encurvadura por esforço transversal das chapas da alma, à excepção da viga V1 cujo modo de rotura é o enrugamento da alma. A alma tem uma esbelteza  $\lambda_w=150$ , com uma altura de 300 mm e espessura de 2 mm, e os banzos têm 100 mm de largura e 5 mm de espessura. Os reforços têm uma espessura de 5 mm.

Os reforços transversais foram colocados com afastamentos de 300, 600 e 900 mm por forma a garantir uma relação entre o afastamento dos reforços e a altura da alma ( $a/d$ ) de 1, 2 e 3, respectivamente. O reforço longitudinal foi criteriosamente colocado, junto ao centro de gravidade das compressões das vigas flectidas ( $d/5$ ).

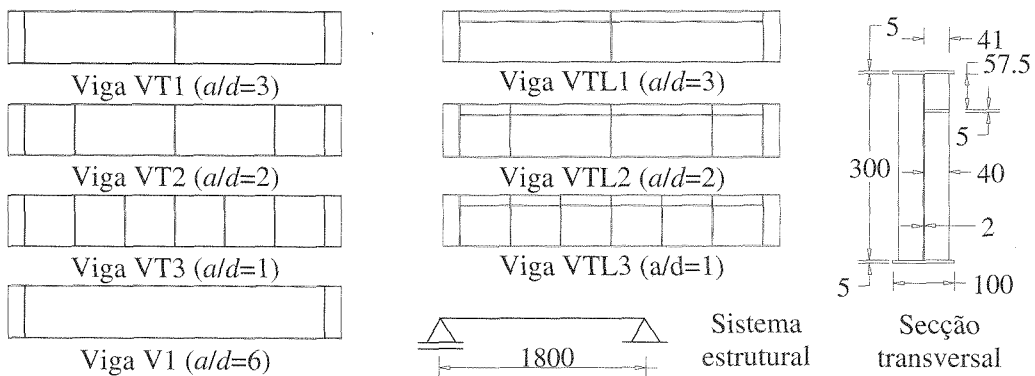


Figura 1 – Alçados e secção transversal das vigas a estudar e ensaiar

A viga mista foi realizada a partir de uma viga do tipo VT1, com uma laje de betão simples com fibras de aço com secção de  $500 \times 60 \text{ mm}^2$ , conectada totalmente através de um conjunto de 19 conectores metálicos tipo “Tecnaria” com 12 mm diâmetro, Afastados longitudinalmente de 100 mm, conforme secção apresentada na Figura 2. O betão apresentou características de um B50.

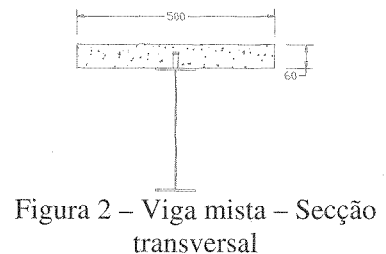


Figura 2 – Viga mista – Secção transversal

### 3.3 Ensaios e características do material

As vigas metálicas apresentadas na Figura 1 foram executadas a partir de 3 chapas de 2 mm para a alma e 3 chapas de 5 mm para os banzos e reforços. As chapas foram cortadas e soldadas com um cordão contínuo de 3.5 mm de espessura na ligação da alma aos banzos e na ligação dos reforços.

Para avaliar as características do aço foram extraídas 18 amostras das 6 chapas de aço, 3 de cada chapa, por forma a que fossem executados ensaios de tracção. As dimensões dos provetes representados na Figura 3 foram consideradas de acordo com as normas DIN50125 e EN10002-Parte 1. Os resultados dos ensaios demonstraram tratar-se de um aço com características de um S275, tendo as tensões apresentado um desvio padrão de cerca de 3.5%. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

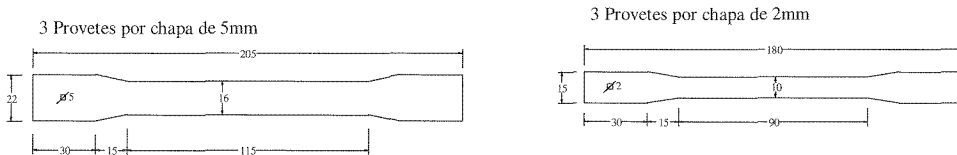


Figura 3 – Provetes metálicos ensaiados

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de tracção dos provetes metálicos

Tensão a 2‰ (MPa)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Extensão na Rotura (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
275	274	408	24	206

### 3.4 Equipamento de ensaio e sistema de aquisição de dados

Para a realização dos ensaios foi necessário criar uns dispositivos de contraventamento lateral do banzo superior para que a rotura não se desse por encurvadura lateral. Esses dispositivos são compostos por dois meios perfis IPE100 ligados na base ao pórtico e no topo entre si através de uma cantoneira L50x5, conforme se ilustra na Figura 4.

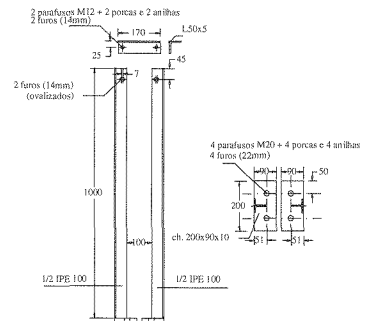


Figura 4 – Contraventamentos transversais das vigas

A aplicação da carga foi executada por intermédio de actuadores hidráulicos comandados por uma bomba automática em que se controla a força transmitida e a sua velocidade de aplicação. O actuador apresenta um curso máximo de 200 mm. A força proveniente do actuador é transmitida a meio vão à viga através da interposição de uma meia cana. Nos casos das viga VT3 e VTL3, em que os reforços transversais estão afastados de 300 mm, a carga foi aplicada aos terços da viga, pelo que foi necessário interpor um perfil composto por 2UNP100 e utilizar duas meias canas, como se explicará mais à frente.

A força proveniente do actuador foi medida através de uma célula de carga colocada entre o actuador e a meia cana. A célula utilizada é da marca TML, com a referência CLC-20A e tem uma capacidade máxima de 200 KN.

O sistema de aquisição de dados é composto pelas seguintes unidades: a célula de carga, os transdutores de deslocamento, os extensómetros lineares e as rosetas de extensão são ligados a uma caixa de extensão de canais. As suas leituras transmitem os sinais analógicos a um “Data Logger” que inclui o software que converte essas leituras em valores digitais que por sua vez são apresentados no ecrã e arquivados em ficheiro.

### 3.5 Instrumentação

Para além da célula de carga, a instrumentação das vigas inclui transdutores de deslocamentos (LVDT's – *Linear Voltage Displacement Transducer*) com cursos de 25 a 100 mm, bem como extensómetros lineares e rosetas de extensão. Ao todo foram necessários 21 canais: 1 para a célula de carga, 5 a 9 para LVDT's e 7 a 15 para extensómetros.

Com a única excepção da viga V1 (devido à especificidade do seu modo de rotura), adoptou-se para as restantes vigas metálicas a seguinte instrumentação: 1 Célula de carga; 2 extensómetros nos banzos superior e inferior; 1 extensómetro em cada reforço transversal; 1 extensómetro em cada reforço longitudinal (VTL); 1 roseta a meio de cada painel; 2 LVDT's nos banzos superior e inferior e um conjunto de LVDT's afastados de 150 mm em cada painel. Como exemplo, apresenta-se na Figura 5 a instrumentação da viga VTL3.

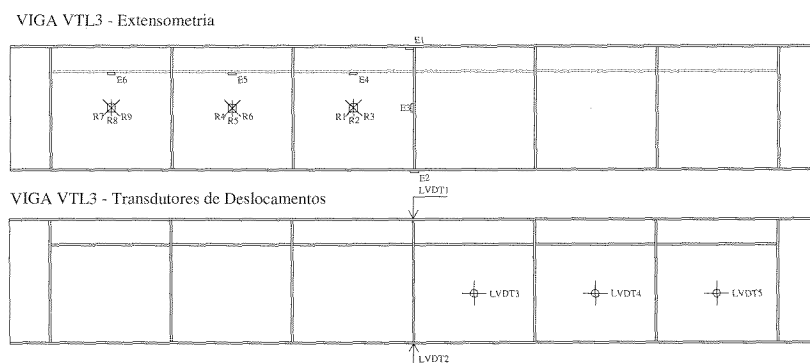


Figura 5 – Instrumentação da viga VTL3

A instrumentação da viga mista foi feita de uma forma muito simples, recorrendo apenas a uma série de transdutores de deslocamentos, que permitissem a medição de deslocamentos verticais.

### 3.6 Procedimentos de ensaio

Os ensaios foram executados de uma forma quase-estática, com aplicação de carga e controlo de deslocamentos (a meio vão da viga), até à rotura da viga. À medida que o ensaio ia decorrendo era necessário fazer o ajuste da pernilagem da força e velocidade do actuador consoante o nível de carga que, em cada instante, estivesse a ser aplicado. O procedimento implementado teve como objectivo a obtenção perfeita da curva que relaciona a carga com o deslocamento vertical. No que concerne à paragem dos ensaios esta resulta do cumprimento de uma condição de rotura. Quando o modelo exhibe uma rotura frágil, a condição de rotura é inquestionável. No presente caso, em que a rotura se dá de uma forma dúctil, haverá que definir uma rotura, que correntemente se designa de rotura convencional. O critério utilizado baseia-se na apreciação visual de rotura por excesso de deformação.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Introdução

Neste capítulo vão apresentar-se os resultados do cálculo das vigas através dos modelos regulamentares, assim como os principais resultados obtidos nos ensaios.

### 4.2 Resultados numéricos dos exemplos em estudo

A capacidade resistente à encurvadura por esforço transversal das sete vigas metálicas e da viga mista foi calculada recorrendo aos modelos preconizados no Eurocódigo 3 e 4, descritos no capítulo 2.

Note-se que os valores foram calculados desprezando a contribuição dos banzos pelo facto destes estarem completamente mobilizados devido à flexão das vigas.

Tabela 2 - Quadro resumo dos resultados dos três métodos do EC3

MÉTODO		M.S.P.C.	M.C.D.T.	M.C.T.R.
Viga	<i>a/d</i>	$V_{ba,rd}$ (KN)	$V_{bb,rd}$ (KN)	$V_{bc,rd}$ (KN)
V1	6	41.51	-	39.31
VT1	3	43.21	41.09	40.48
VT2	2	45.23	48.89	41.83
VT3	1	54.90	69.15	47.82
VTL1	3	-	-	46.54
VTL2	2	-	-	47.53
VTL3	1	-	-	52.15

Note-se que o método simples pós-crítico dá valores mais elevados na viga VT1 que o método do campo diagonal de tracções e menores nas vigas VT2 e VT3. Por sua vez o método do campo de tensão rodado é mais conservativo, dando resistências ao corte sempre inferiores do que os outros dois métodos preconizados no Eurocódigo 3. No que concerne ao cálculo da resistência à encurvadura por esforço transversal da viga mista pelo método alternativo apresentado no EC4 obtém-se uma resistência de  $V_{ba,RD} = 62.7$  KN.

### 4.3 Resultados dos ensaios

As vigas ensaiadas tiveram comportamentos distintos, a que correspondem diferentes mecanismos de rotura. A viga V1, que é constituída por reforços transversais apenas nos apoios, isto é, não tem reforços na zona de aplicação da carga, rompeu, como seria de esperar, através de um mecanismo de rotura de enrugamento da alma. As restantes tiveram modos de colapso que se caracterizaram por uma encurvadura por esforço transversal dos painéis interiores. Seguidamente vai analisar-se de uma forma sucinta o comportamento de cada uma das vigas. Um estudo mais aprofundado onde se analisam cargas, deslocamentos verticais e horizontais, tensões, etc. pode ser encontrado em Gomes (1999).

Na Figura 6 apresentam-se três fotografias da viga V1, uma numa fase inicial, uma numa fase mais avançada do ensaio e outra após ensaio.

Da relação carga-deslocamento apresentada na Figura 7, pode avaliar-se a carga máxima atingida de cerca de 35 KN, obtida para um deslocamento vertical de 1.26 mm.

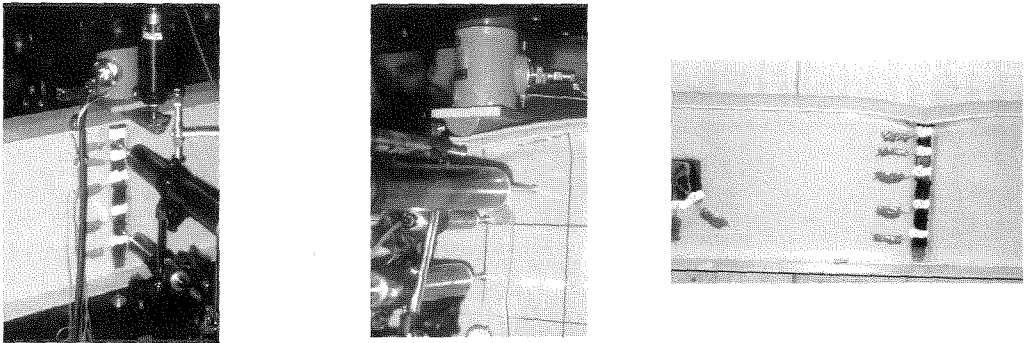


Figura 6 – Viga V1 – Início, fase intermédia e após ensaio

Se se avaliar as cargas de cálculo preconizadas pelos três métodos alternativos do EC3, para encurvadura por esforço transversal, chega-se a um valor de cerca de 40 kN (Tabela 2), que é um valor substancialmente superior à carga de rotura da viga. De facto, como já se disse, a rotura deu-se por enrugamento da alma, conforme se pode verificar na Figura 6. Assim, efectuando o cálculo pelo EC3, ponto 5.7.4 – resistência ao enrugamento, obtém-se uma resistência de  $R_{a, RD} = 22.3$  kN, que comparada com os 35 kN apresenta uma margem de segurança de aproximadamente 50%.

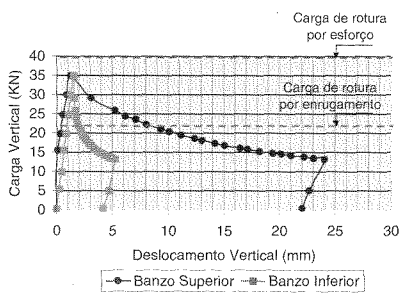


Figura 7 – Relação carga – deslocamento

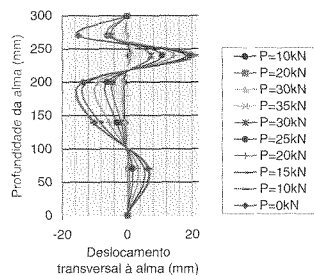


Figura 8 – Deslocamento transversal à alma

Ainda do gráfico da Figura 8, onde se representa a deformação dos banzos inferior e superior, pode avaliar-se a deformação vertical devido ao enrugamento que, atingir no fim do ensaio, chega a 18 mm (diferença das abcissas das curvas).

No que diz respeito a deslocamentos transversais à alma, apresentam-se na Figura 9 um gráfico representativo da evolução desses deslocamentos ao longo do ensaio, que traduz, através de um corte vertical da viga, a forma característica deste mecanismo de rotura. O deslocamento máximo deu-se a 60 mm de profundidade da alma e atingiu os 21 mm.

Na Figura 9 são apresentadas as respostas de cada uma das viga do tipo VT, assim como os patamares com os valores de cálculo obtidos pelos três métodos regulamentares.

A viga VT1, apresentou uma carga máxima de 110 kN e uma rigidez de cerca de 22500 kN/m. Na descarga observou-se uma recuperação de deformação de 6 mm.

Note-se que, além de se atingir um deslocamento máximo de 25 mm, o ramo descendente da curva carga-deslocamento tem uma inclinação pouco acentuada, o que traduz uma elevada ductilidade da viga, propriedade muito importante e característica do comportamento destas vigas.

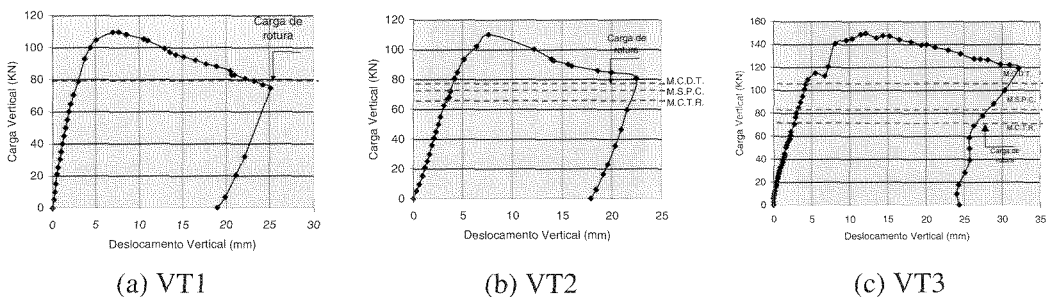


Figura 9 – Relações carga-deslocamento das vigas VT

A carga máxima atingida durante o ensaio é cerca de 30% maior que a carga obtida numericamente pelos métodos do Eurocódigo 3. De facto a carga de cerca de 80 kN (Tabela 2) é atingida numa fase em que o comportamento da viga se encontra ainda em regime linear. O valor do deslocamento nessa altura é ainda muito pequeno, cerca de 3 mm, a que corresponde a uma relação vão/flecha de  $L/600$ .

A relação carga-deslocamento da viga VT2 é semelhante à da viga VT1, mas menos rígida. De facto a carga máxima atingida é a mesma, 110 kN, e, para a uma carga de 100 kN, obtém-se uma rigidez de apenas 20500 kN/m.

Comparando a resposta da viga com as cargas obtidas pelos métodos numéricos, observa-se que a carga obtida pelo método do campo de tensão rodado é atingida aproximadamente para o pico da zona linear, cerca de 85 kN, enquanto que para os outros dois métodos, essa carga apenas é atingida na zona de resposta não linear, cerca de 100 kN. No entanto, a carga máxima obtida está sempre acima das cargas calculadas, mas apenas com uma margem de 10% relativamente ao método menos conservativo (M.C.D.T.).

A viga VT3, com reforços transversais afastados de 300 mm, isto é, com uma relação  $a/d = 1$  foi carregada de uma forma diferente das outras. De facto, em vez de ser aplicada uma carga a meio vão, foram aplicadas cargas nos dois reforços intermédios. Assim, os diagramas de esforços são diferentes, estando a viga a funcionar à flexão pura no centro do vão, entre reforços. Portanto, a rotura esperada dá-se nos dois painéis adjacentes aos de extremidade.

Analisando a curva carga-deslocamento, observa-se que a carga máxima obtida é substancialmente superior à das duas vigas anteriores, cifrando-se o seu valor em 150 kN. A irregularidade que se vê na curva ascendente, perto dos 110 kN deveu-se à encurvadura do primeiro painel, após a qual se obteve novamente um ganho de rigidez até se atingir a carga máxima. A rigidez obtida de 24800 kN/m é também superior à das vigas VT1 e VT2.

A descarga foi feita para um deslocamento de 32 mm, onde a carga suportada era ainda de 120 kN, foi acompanhada por uma recuperação de 8 mm, ficando a viga com uma deformação final de 24 mm.

Os valores calculados pelo Eurocódigo são substancialmente diferentes para os três métodos. O método do campo de tensão rodado é, como já se disse, bastante mais conservador, atingindo apenas cerca de 63% da carga de rotura. O método do campo diagonal de tracções é um método pouco seguro, estando muito próximo da carga de rotura, cerca de 92% da carga de rotura, e exige uma deformação de 8 mm para atingir esse valor. O método simples pós-crítico apresenta uma carga de cálculo de 110 kN, encontrando-se ainda no ramo linear da relação carga-deslocamento ensaiada.

Seguidamente vai analisar-se as vigas compostas por reforços transversais e longitudinais, VTL1 a VTL3. Na Figura 10 apresentam-se as suas relações carga-deslocamento.

A viga VTL1 viga atingiu uma carga máxima de 130 kN, para um deslocamento vertical de 13 mm. Comparando esta viga com a viga VT1, pode concluir-se que a introdução





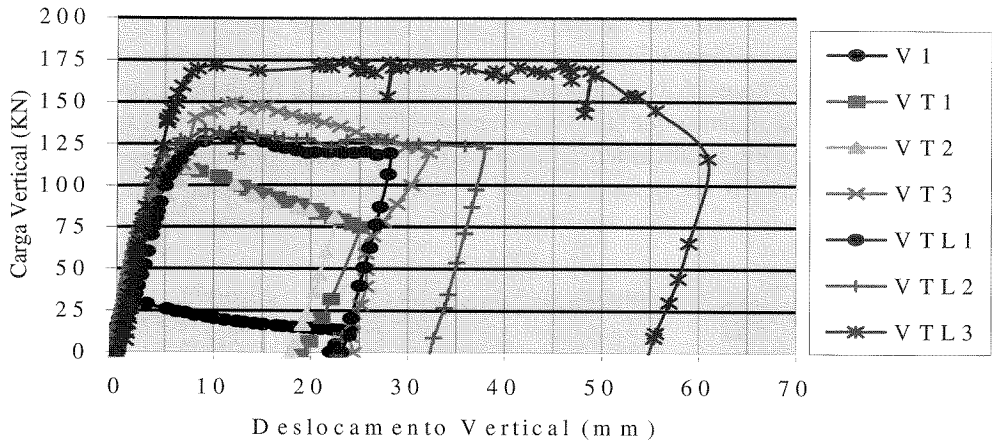


Figura 11 – Vigas V1 a VTL3 – Relações carga – deslocamento

Como exemplo das configurações típicas das deformadas das vigas após o ensaio, que traduzem o mecanismo de rotura apresenta-se na Figura 12 duas fotos obtidas após ensaio.

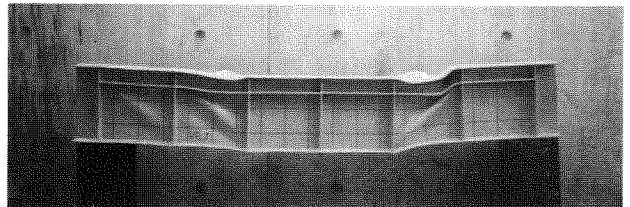
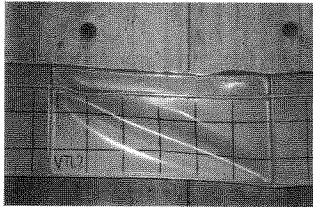


Figura 12 – Vigas VTL2 e VTL3 após ensaio

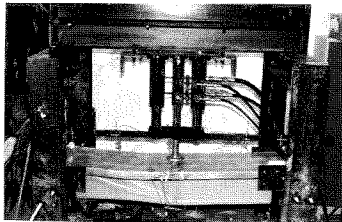


Figura 13 – Viga mista Durante ensaio

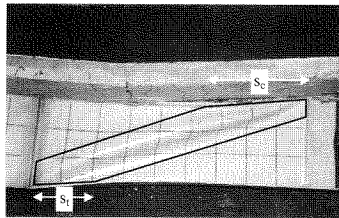


Figura 14 – Viga mista após ensaio

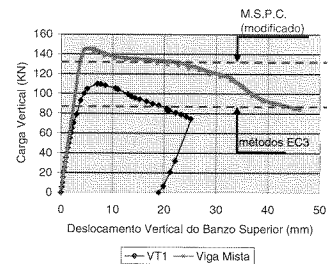


Figura 15 – Comparação das respostas - VT1 e Viga mista

No que concerne ao ensaio da viga mista, apresenta-se nas Figura 13 e 14 duas fotografias durante e após o ensaio, respectivamente.

A Figura 15 representa a relação carga – deslocamento da viga mista assim como da viga VT1. A carga máxima atingida foi de 146 KN, para um deslocamento de cerca de 5 mm, o que corresponde a um acréscimo de 33% relativamente à viga VT1. Após essa carga, a viga teve um comportamento bastante dúctil até atingir um deslocamento máximo de 46 mm, onde a viga ainda resistia a uma carga de 84 KN. A rigidez da viga foi de 36500 KN/m, ou seja, mais 60% que a da viga VT1.

Assim, pode concluir-se que a laje de betão, conectada à secção de aço, aumenta consideravelmente a resistência, a ductilidade e a rigidez da viga. Isto deve-se, essencialmente, ao facto de se verificar uma faixa de tracções maior, isto é, com maiores

comprimentos de ancoragem do painel de aço, conforme se pode observar na Figura 14, onde se assinala aproximadamente o campo de trações.

Para finalizar calculou-se a viga mista de acordo com o método simples pós-crítico modificado preconizado no Eurocódigo 4. A resistência à encurvadura por esforço transversal obtida foi de  $V_{ba, RD} = 60.8$  kN, o que corresponde a uma carga aplicada de 121.6 kN.

Comparando a carga de 121.6 kN com a carga de 146 kN obtida no ensaio, observa-se que a carga máxima atingida é 20% maior que a carga de rotura de cálculo. Relembre-se que no caso dos métodos preconizados no EC3 essa diferença era substancialmente maior, cerca de 70% no método simples pós-crítico e cerca de 80% no caso dos métodos do campo diagonal de trações e campo de tensão rodado, o que demonstra que estes métodos têm que ser ajustados no caso do cálculo de vigas mistas.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com exposto, as principais conclusões a extrair da presente investigação são:

- ❑ De uma forma geral, o comportamento das vigas correspondeu às expectativas inicialmente previstas;
- ❑ A viga V1 rompeu, como se esperava, através de um mecanismo de enrugamento da alma, mas para uma carga substancialmente superior à obtida pelo Eurocódigo 3 (cerca de 1.5 vezes maior);
- ❑ As vigas VT e VTL apresentaram um comportamento bastante dúctil;
- ❑ As vigas do tipo 1 e 2 não apresentaram grandes diferenças, nem de comportamento nem de cargas máximas atingidas;
- ❑ As vigas do tipo 3 ( $a/d=1$ ) apresentaram um acréscimo de resistência de cerca de 30% relativamente às vigas do tipo 1 e 2 ( $a/d=3$  e  $a/d=2$ );
- ❑ As vigas VTL apresentaram um acréscimo de resistência de 15% a 20% relativamente às vigas VT, o que traduz o ganho relativo da colocação de um reforço longitudinal;
- ❑ As cargas máximas atingidas pelas vigas, são sempre superiores às obtidas pelos métodos preconizados no Eurocódigo, sendo o método do campo de tensão rodado o que dá valores mais baixos, sendo, portanto, mais conservativo;
- ❑ O método de tensões rodado apresenta, de uma forma geral, valores na ordem dos 70% da carga máxima atingida durante o ensaio;
- ❑ As cargas obtidas numericamente através do método do campo de tensões rodado encontra-se na zona linear da curva carga-deslocamento, enquanto que para os outros dois métodos, esta se encontra, na maior parte dos casos, na zona não linear;
- ❑ As deformações verticais obtidas para as respectivas cargas máximas foram pequenas;
- ❑ As deformações transversais das vigas apresentaram a superfície de encurvadura esperada, à excepção do facto de não apresentarem uma simetria muito evidenciada;
- ❑ A viga mista apresentou um acréscimo de resistência relativamente à viga VT1 de 33%;
- ❑ A viga mista é substancialmente mais rígida que as vigas metálicas;
- ❑ A resistência da viga mista é cerca de 20% maior que a preconizada no método modificado apresentado no Eurocódigo 4 e cerca de 70 a 80% maior que os métodos do Eurocódigo 3.

Relativamente à instrumentação usada nos ensaios, importa salientar que:

- ❑ Na instrumentação das vigas não é conveniente tirar partido da simetria, pois ficou demonstrado que a deformação pós-encurvadura não tem um carácter simétrico. No presente caso, tirou-se partido da simetria por uma questão de limitação de equipamento e de canais de aquisição de dados;
- ❑ Os LVDT's colocados para medir os deslocamentos transversais da alma não deverão estar fixos ao exterior mas sim à própria viga, para procurar que o ponto em que se esteja a medir a deformação não varie muito;
- ❑ Seria conveniente que se utilizassem técnicas ópticas que permitissem, com toda a comodidade, a caracterização total do campo de deslocamentos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar o agradecimento ao Dep. de Engenharia Civil da F.C.T.U.C. pela cedência do equipamento de ensaio para a realização do programa experimental e aos colaboradores do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho pela ajuda prestada na preparação e execução dos ensaios. Agradece-se também ao Eng. Rui Simões pela disponibilidade e colaboração prestada durante a execução dos ensaios.

## 7. REFERÊNCIAS

Eurocódigo 3 – Conceção e dimensionamento de estruturas de aço, Parte 1.1 – Regras gerais e regras para edifícios, 1992.

Eurocódigo 3 – Conceção e dimensionamento de estruturas de aço, Parte 1.5 – Regras suplementares para estruturas compostas por chapas, 1993.

Eurocódigo 3 – Conceção e dimensionamento de estruturas de aço, Parte 2 – Pontes metálicas, 1993.

Eurocódigo 4 – Conceção e dimensionamento de estruturas mistas aço-betão, Parte 1.1 – Regras gerais e regras para edifícios, 1994.

Gervásio, H.M.S., “Estudo comparativo da capacidade resistente de vigas de alma cheia sujeitas a esforço transversal”, Tese de Mestrado, FCTUC, Coimbra, 1998.

Gomes, C.M.M., “Pontes Mistas – Conceção, Projecto, Execução e Investigação”, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 1999.

Silva, L. S., Cruz, P. J. S., Gervásio, H., Gomes, C. M. M., “Estudo comparativo da resistência ao corte de vigas de aço esbelto”, Jornadas portuguesas de engenharia de estruturas, Lisboa, 1998.