

Mecanismo de Vierendeel em Vigas de Aço com Abertura na Alma

Análise Experimental e Numérica

Miguel Romão dos Santos Gomes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador:

Professor Doutor Luís Manuel Calado de Oliveira Martins

Júri

Presidente: Professor Doutor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Calado de Oliveira Martins

Vogais: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Novembro 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer à minha mãe, por todo o apoio ao longo destes anos.

Ao meu avô, por todo o incentivo, forças e conhecimentos por ele passados.

Queria também agradecer à Beatriz Alcântara por todo o apoio para que estes objetivos fossem alcançados, assim como pela amizade e paciência demonstradas.

Ao Miguel Proença por toda a disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de dúvidas.

A toda a minha família e amigos que sempre me apoiaram ao longo desta caminhada.

Ao Professor Luís Calado, por toda a disponibilidade no esclarecimento de dúvidas demonstrada e pela orientação.

Ao Engenheiro José Duarte por ter fornecido e entregue betão necessário para a betonagem das vigas mistas.

E por fim aos senhores Fernando Costa e Fernando Alves, técnicos do LERM, por todo o auxílio prestado na preparação e realização dos ensaios

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a análise de vigas de aço com uma abertura na alma quando sujeitas à rotura pelo mecanismo de Vierendeel.

De forma a realizar uma análise da influência de fatores como reforços longitudinais, foram realizados modelos numéricos, executados no programa ABAQUS 6.13, utilizando elementos sólidos com 8 nós. Estes modelos foram utilizados de modo a dimensionar as vigas de aço e mistas com o intuito de as ensaiar.

Foram realizados ensaios de duas vigas de aço, com 4m de vão, com uma abertura quadrada na alma, sendo que uma das vigas foi reforçada longitudinalmente na zona da abertura. São também descritos neste trabalho todos os processos da preparação e realização dos ensaios.

Por fim são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, sendo estes analisados e comparados com os resultados obtidos através dos modelos numéricos realizados.

Palavras chave: Vigas de aço; mecanismo de Vierendeel; Abertura na alma; Ensaios experimentais; Modelos numéricos

Abstract

The present work has the objective of the analysis of steel beams with an opening in the soul when subjected to failure by Vierendeel mechanism.

In order to perform an analysis of the influence of factors such as longitudinal reinforcement, numerical models were executed in ABAQUS program 6.13, using solid elements with 8 nodes. These models were used in order to design the steel and composite beams in order to test them.

Two steel beams were tested, with a span of 4m, with a square opening in the core, one of the beams being reinforced longitudinally in the opening zone. All processes of the preparation and performance of the tests are also described in this work.

Finally, the experimental results are presented, analyzed and compared with the numerical models

Key-Words: Steel beams; Vierendeel mechanism; Web Opening; Experimental tests; Numerical models

Índice

1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos da Dissertação	1
1.3	Organização da Dissertação	2
2	Estado de Arte	3
2.1	Considerações Gerais	3
2.2	Vigas com abertura na alma	3
2.3	Vigas de aço	4
2.3.1	Trabalhos prévios	4
2.3.2	Métodos de Dimensionamento	9
3	Modelo numérico	15
3.1	Considerações Gerais	15
3.2	Vigas de aço	15
3.3	Vigas mistas de aço e betão	18
4	Conceção das vigas de aço	23
4.1	Considerações iniciais	23
4.2	Características da abertura	23
4.3	Viga de aço sem reforço, V1	24
4.3.1	Conceção da geometria	24
4.3.2	Modelo numérico	25
4.4	Viga de aço reforçada, V2	26
4.4.1	Conceção da geometria	26
4.4.2	Modelo numérico	28
5	Campanha experimental	29
5.1	Considerações iniciais	29
5.2	Caracterização dos materiais	29
5.3	Viga de aço sem reforço, V1	32
5.3.1	Instrumentação do Ensaio	32
5.3.2	Ensaio	35
5.3.3	Análise de Resultados	37
5.4	Viga de aço reforçada V2	45
5.4.1	Instrumentação do ensaio	45
5.4.2	Ensaio	47
5.4.3	Análise dos resultados	48
5.5	Comparação dos resultados obtidos para V1 e V2	56
5.6	Síntese de resultados	58
6	Modelo numérico vs Ensaio experimental	59
6.1	Considerações iniciais	59

6.2	Viga de aço sem reforço, V1	59
6.3	Viga de aço reforçada V2	61
6.4	Síntese dos resultados	63
7	Conclusões e desenvolvimentos futuros	64
7.1	Conclusões	64
7.2	Desenvolvimentos futuros	65
8	Bibliografia.....	66

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Características mecânicas dos aços utilizados na calibração do modelo	16
Tabela 3.2 Dados usados na modelação do betão à compressão	20
Tabela 4.1 Propriedades geométricas de um perfil IPE400.....	24
Tabela 5.1 Características dos materiais obtidas através dos ensaios de tração	32
Tabela 5.2 Características mecânicas consideradas para os materiais	32
Tabela 5.3 Características dos equipamentos utilizados no ensaio da viga V1	34
Tabela 5.4 Características dos equipamentos utilizados no ensaio da viga V2	46
Tabela 6.1 Comparação dos valores de tensão obtidos no modelo numérico e ensaio experimental para a viga V1.....	61
Tabela 6.2 Comparação dos valores de tensão obtidos no modelo numérico e ensaio experimental para a viga V1.....	63

Lista de Figuras

Figura 2.1 Geometria de aberturas em vigas.....	4
Figura 2.2 Processo de fabrico de vigas alveolares.	4
Figura 2.3 Esforços globais.	6
Figura 2.4 Esforços locais nos "T's" superior e inferior.	6
Figura 2.5 Mecanismo de Vierendeel.....	7
Figura 2.6 Redução da capacidade resistente devido ao efeito local.....	8
Figura 2.7 Curvas de interação M-V.	9
Figura 2.8 Área de alma que pode ser utilizada como área resistente ao corte.....	10
Figura 2.9 Valores da relação de resistencia dupla ao corte para diferentes tipos de aberturas.	11
Figura 2.10 Relação entre o fator V_i e a relação d_0/c para diferentes aberturas.	13
Figura 3.1 Elemento de oito nós utilizado na realização do modelo numérico.....	15
Figura 3.2 Vigas modedas por Chung & Ko [2].	16
Figura 3.3 Gráfico força deformação utilizado na modelação do aço,.....	16
Figura 3.4 Malha definida no modelo numérico da viga 2A, com pormenor da abertura refinada.....	17
Figura 3.5 Malha definida no modelo numérico da viga 3A, com pormenor da abertura refinada.....	17
Figura 3.6 Resultados obtidos para a viga 2A.....	18
Figura 3.7 Resultados obtidos para a viga 3A.....	18
Figura 3.8 Dimensões da viga ensaiada por Darwin.....	19
Figura 3.9 Curva tensão deformação do betão.....	19
Figura 3.10 Curva representativa do comportamento do betão à tração.	21
Figura 3.11 Malha utilizada na calibração dos modelos de vigas mistas com pormenor da abertura .	21
Figura 3.12 Comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos por Darwin.....	22
Figura 4.1 Dimensões da viga de aço V1.....	24
Figura 4.2 Pormenor da abertura e reforço vertical.....	25
Figura 4.3 Vista geral da viga V1.....	25
Figura 4.4 Malha utilizada no modelo da viga V1, com pormenor da abertura refinada.....	25
Figura 4.5 Tensões de Von Mises na abertura no modelo numérico.....	26
Figura 4.6 Dimensões da viga de aço V2.....	27
Figura 4.7 Pormenor da abertura reforçada.....	27
Figura 4.8 Pormenor dos reforços vertical e horizontal.....	27
Figura 4.9 Vista geral da viga V2.....	27
Figura 4.10 Malha utilizada no modelo da viga V2, com pormenor da abertura refinada.....	28
Figura 4.11 Tensões de Von Mises na abertura no modelo numérico.....	28
Figura 5.1 Provetes ensaiados.....	29
Figura 5.2 Instron, modelo 1343 utilizada nos ensaios de caracterização dos materiais.....	30
Figura 5.3 Gráfico tensão deformação para os provetes de aço da alma.....	31
Figura 5.4 Curva Tensão-deformação dos provetes de aço dos banzos.....	31
Figura 5.5 Gráfico Tensão-deformação do provete de aço do reforço.....	31
Figura 5.6 Pórtico no qual foi realizado o ensaio da viga V1.....	33
Figura 5.7 Chapas metálicas colocadas na extremidade para evitar deslocamentos laterais.....	33
Figura 5.8 Posição dos equipamentos.....	34
Figura 5.9 Extensómetros na viga V1 com pormenor dos extensómetros na abertura.....	35
Figura 5.10 Fotografias Documentativas da posição dos extensómetros.....	35
Figura 5.11 História de carregamento utilizado no ensaio da viga V1.....	36
Figura 5.12 Deformada de V1.....	36
Figura 5.13 Deformações visíveis na abertura na rotura.....	37
Figura 5.14 Gráfico força total vs deslocamento d_3 na viga V1.....	37
Figura 5.15 Gráfico força total vs deslocamento d_5 na viga V1.....	38
Figura 5.16 Gráfico força total vs deslocamento d_4 na viga V1.....	38
Figura 5.17 Gráfico comparativo dos deslocamentos d_2 e d_3 obtidos para a viga V1.....	39
Figura 5.18 Gráfico comparativo dos deslocamentos d_5 e d_6 obtidos para a viga V1.....	39
Figura 5.19 Evolução das deformações na abertura.....	40
Figura 5.20 Deslocamento lateral a meio vão registado pelo transdutor d_7	40
Figura 5.21 Deslocamento horizontal no apoio registado pelo transdutor d_8	41
Figura 5.22 Orientação das deformações.....	41
Figura 5.23 Direções principais de tensão.....	42

Figura 5.24 Gráficos força tensão máxima de compressão para as tensões principais obtidas nas rosetas.....	42
Figura 5.25 Evolução das tensões a meio vão	43
Figura 5.26 Evolução das tensões normais no banzo superior, nas zonas dos cantos da abertura....	43
Figura 5.27 Evolução das tensões normais nos cantos da abertura	43
Figura 5.28 Evolução das tensões no banzo inferior na zona dos cantos da abertura	44
Figura 5.29 Evolução das tensões tangenciais máximas na abertura.....	44
Figura 5.30 Pórtico instrumentado para o ensaio da viga V2	45
Figura 5.31 Instrumentação do ensaio da viga V2.....	45
Figura 5.32 Posição dos extensómetros na viga V2 com pormenor da abertura	46
Figura 5.33 Documentação fotográfica da posição dos extensómetros em V2.....	47
Figura 5.34 Historia de Carregamento para a viga V2.....	47
Figura 5.35 Deformada final da viga V2	48
Figura 5.36 Deformações na abertura na rotura	48
Figura 5.37 Gráfico força total vs deslocamento d3 para a viga V2	49
Figura 5.38 Gráfico fora total vs deslocamento d4 para a viga V2	49
Figura 5.39 Gráfico fora total vs deslocamento d4 para a viga V2	49
Figura 5.40 Gráfico comparativo dos deslocamentos d2 e d3 para a viga V2	50
Figura 5.41 Gráfico comparativo dos deslocamentos d2 e d3 para a viga V2	50
Figura 5.42 Evolução das deformações na abertura	51
Figura 5.43 Gráfico força deslocamento obtido para o transdutor d7.....	52
Figura 5.44 Gráfico força deslocamento obtido para o transdutor d8.....	52
Figura 5.45 Direções principais de tensão	53
Figura 5.46 Gráficos força tensão para as tensões principais nas rosetas	53
Figura 5.47 Evolução das tensões normais a meio vão	54
Figura 5.48 Evolução das tensões normais no banzo superior nas zonas dos cantos da abertura.....	54
Figura 5.49 Evolução das tensões normais nos cantos da abertura	54
Figura 5.50 Evolução das tensões normais no banzo inferior nas zonas dos cantos da abertura.....	55
Figura 5.51 Evolução das tensões tangenciais máximas na abertura.....	55
Figura 5.52 Gráfico comparativo do deslocamento d4 para V1 e V2	56
Figura 5.53 Gráfico comparativo do deslocamento d3 para a viga V1 e V2.....	56
Figura 5.54 Comparação entre as fendas na viga V1 e V2	57
Figura 5.55 Gráficos comparativos do andamento das tensões máximas de compressão nas rosetas para ambas as vigas	57
Figura 5.56 Gráficos comparativos do andamento das tensões nos cantos da abertura.....	58
Figura 6.1 Deslocamento d3 modelo vs experimental	59
Figura 6.2 Evolução da deformação na abertura da viga V1 obtida através do modelo numérico	60
Figura 6.3 Evolução das tensões na abertura registadas no modelo numérico	60
Figura 6.4 Deslocamento d3 modelo vs experimental para a viga V2.....	61
Figura 6.5 Evolução da deformação na abertura da viga V2 obtida através do modelo numérico	62
Figura 6.6 Evolução das tensões na abertura registadas no modelo numérico	62

Lista de Símbolos

Maiúsculas

A - área de uma secção transversal

A_v - área resistente ao esforço transversal

E_{cm} - módulo de elasticidade secante do betão

$M_{bh,Ed}$ - valor de cálculo do momento local atuante no HMS da secção "T" inferior

$M_{bl,Ed}$ - valor de cálculo do momento local atuante no LMS da secção "T" inferior

$M_{bT,NV,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente da secção "T" inferior, reduzido pela interação com o esforço normal e esforço transversal

$M_{bT,v,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente da secção "T" inferior, reduzido pela interação com o esforço transversal

M_{Ed} - valor de cálculo do momento fletor atuante

$M_{N,y,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente, reduzido pela interação com o esforço normal

$M_{V,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente ao mecanismo de Vierendeel de uma secção perfurada

$M_{vc,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente procedente da interação entre a secção "T" superior e a laje de betão

$M_{0,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente plástico de uma secção perfurada

M_{Rd} - valor de cálculo do momento fletor resistente plástico

$M_{tT,NV,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente da secção "T" superior, reduzido pela interação com o esforço normal e esforço transversal

$M_{tT,v,Rd}$ - valor de cálculo do momento fletor resistente da secção "T" superior, reduzido pela interação com o esforço transversal

N_a - máxima força de tração no aço

N_c - máxima força de compressão no betão

V_{Ed} - valor de cálculo do esforço transversal atuante

$V_{pl,Rd}$ - valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico

W_{pl} - módulo de flexão plástico de uma secção transversal

$W_{pl0,y}$ - módulo de flexão plástico de uma secção transversal com abertura

Minúsculas

c - comprimento de uma abertura na alma

f_{cm} - valor médio da tensão de rotura do betão à compressão

f_y - tensão de cedência do perfil do aço estrutural

h - altura de uma secção transversal

h_0 - altura de uma abertura na alma

h_c - altura de betão

t_f - espessura de um banzo

t_w - espessura da alma

Símbolos gregos

ρ - coeficiente de redução para determinar os valores de cálculo dos momentos flectores resistentes, tendo em conta a interação com os esforços transversos

ε_u - extensão última do aço

ε_{c1} - extensão do betão à compressão correspondente à tensão máxima

ε_{cr} - extensão do betão à tração correspondente à tensão de fendilhação

ε_{cu} - extensão última do betão à compressão

ε_t - extensão do betão à tração

σ - tensão no aço

σ_c - tensão de compressão no betão

σ_t - tensão de tração no betão

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

A engenharia civil está em todos os sentidos ligada à procura de soluções seguras e económicas. Esta característica está associada a uma constante busca por soluções cada vez mais eficientes e agradáveis do ponto de vista estético. As estruturas de aço surgem frequentemente como resposta a estas questões.

No âmbito da otimização dos espaços úteis, surgem, por questões de estética e segurança, limitações de pé direito. Tais limitações obrigam à busca de uma solução no que toca à incorporação de tubagens de serviço sem que se aumente a altura entre pisos. Surgiram então soluções como: vigas com inércia variável, treliças mistas, “stub girders”, vigas misuladas, vigas com aberturas na alma, etc. Como é natural, todas estas soluções apresentam vantagens e desvantagens, e a sua adoção dependerá sempre de inúmeros fatores, entre eles, fatores económicos, estéticos, facilidade e rapidez de execução e dos processos construtivos, entre outros.

As vigas com abertura na alma constituem uma solução frequente para estes casos. Estas aberturas costumam ser quadradas ou circulares, e a sua altura pode chegar a 75% da altura total da viga. As aberturas na alma são, no entanto, responsáveis por uma alteração da distribuição das tensões e uma redução da capacidade resistente das vigas, quer de aço quer mistas, ao corte e ao momento fletor, que depende da forma, tamanho localização e número de aberturas ao longo da vida, assim como do tipo de tensão aplicada. Muitas vezes são aplicados reforços à volta da abertura, sendo que, no entanto, devido ao acréscimo de custos associados à soldadura, estas soluções devem ser evitadas, tanto devido aos custos como a questões construtivas.

A rotura destas vigas está muito relacionada com a relação momento/esforço transversal (M/V) na zona da abertura. Quando o momento fletor é predominante relativamente ao esforço transversal, a rotura dá-se por flexão pura. Quando tal não sucede, o esforço transversal presente de cada lado da abertura introduz um momento secundário, momento de Vierendeel, que aumenta as tensões normais nas secções “T” em cima e em baixo da abertura. Este efeito dá-se devido a transferência de esforço transversal na zona da abertura, dado que para que haja equilíbrio nas secções “T” são necessários os ditos momentos locais.

1.2 Objetivos da Dissertação

O presente trabalho tem como principal objetivo a análise e descrição do comportamento de vigas de aço com abertura na alma quando submetidas à rotura pelo mecanismo de Vierendeel. Esta análise foi feita através do ensaio experimental de duas vigas de aço com abertura na alma.

É também objetivo deste trabalho a compreensão do efeito que os reforços longitudinais têm na resistência das vigas de aço com abertura ao mecanismo de Vierendeel. É também feita a concepção de duas vigas mistas que serão posteriormente ensaiadas de modo a comparar os seus resultados com os resultados obtidos experimentalmente para as vigas de aço

1.3 Organização da Dissertação

De modo a atingir os objetivos propostos, a dissertação foi organizada do seguinte modo:

- Neste primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao tema da dissertação e ao problema em análise, e são também descritas as motivações e organização da dissertação;
- No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos de autores sobre vigas de aço e mistas com aberturas nas almas, assim como o enquadramento histórico do tema, abordando-se os principais trabalhos experimentais e numéricos realizados; é feita também uma referência aos métodos de dimensionamento existentes de vigas mistas e de aço com aberturas na alma;
- No terceiro capítulo são desenvolvidos os modelos numéricos, são apresentados os diversos passos da sua calibração; por fim, é feita a comparação dos modelos realizados com trabalhos de outros autores, de modo a obter a sua validação;
- No quarto capítulo é desenvolvida a concepção das vigas de aço que viriam a ser ensaiadas, são apresentadas as vigas, assim como as suas características e respetivos modelos numéricos;
- No quinto capítulo é apresentado o desenvolvimento dos ensaios experimentais realizados; são apresentados todos os dados relevantes à realização destes, assim como os resultados obtidos nos ensaios de cada uma das vigas; por fim são também comparados neste capítulo os resultados obtidos em ambos os ensaios;
- No sexto capítulo é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através dos modelos numéricos;
- Por fim no sétimo capítulo é feita uma exposição das conclusões obtidas na realização do trabalho, assim como uma comparação entre os resultados obtidos e os objetivos propostos; são também apresentadas sugestões para trabalhos futuros;

2 Estado de Arte

2.1 Considerações Gerais

Nas últimas décadas foram realizados vários estudos, numéricos e experimentais, sobre o comportamento de vigas tanto de aço como mistas com aberturas na alma, tendo sido desenvolvidos vários métodos simplificados e teóricos que permitem determinar a capacidade de carga destas vigas. Estes métodos foram aplicados quase exclusivamente a vigas com uma única abertura, visto que as vigas com múltiplas aberturas são analisadas como vigas celulares através de métodos empíricos.

A inserção de uma abertura na alma da viga causa nessa região um decréscimo da capacidade resistente ao momento fletor e, principalmente, uma redução da resistência ao esforço transversal. Mas o principal aspeto a estudar neste tipo de vigas é o mecanismo de Vierendeel, que se dá por plastificação das zonas dos cantos da abertura devido a um acréscimo de momento local nas secções “T” superior e inferior à abertura por propagação do esforço transversal ao longo da zona da abertura.

A resistência das vigas a este modo de rotura é, portanto, um assunto crucial na análise deste tema. Neste capítulo é feita uma análise dos principais trabalhos até à data sobre o assunto em estudo, onde se expõem as soluções encontradas para a interação entre esforço transversal, momento fletor e esforço normal nas secções “T” no topo e na zona inferior da abertura, a influência da laje de betão nas soluções mistas e dos reforços na zona da abertura.

2.2 Vigas com abertura na alma

De acordo com a sua função e localização na viga, as aberturas podem assumir diferentes formas, sendo algumas delas apresentadas na figura 2.1.

No que toca ao processo de fabrico, no fabrico de vigas com uma abertura isolada destacam-se os principais métodos que consistem em fazer a abertura directamente no perfil metálico por soldadura ou até punção, mantendo-se a altura original do perfil, havendo apenas uma redução na área na zona da abertura. O outro principal método, utilizado essencialmente no fabrico de vigas alveolares ou casteladas, passa por recortar o perfil de aço, e voltar a soldá-lo de forma desfazada, o que resulta num aumento da altura do perfil de aço até 50%, e conseqüentemente um aumento da inércia e resistência ao momento fletor. Por esta razão, e também por apresentarem um grande apelo arquitectónico devido ao grande número de formas que podem tomar, as vigas alveolar são muito utilizadas em estruturas de grandes vãos.

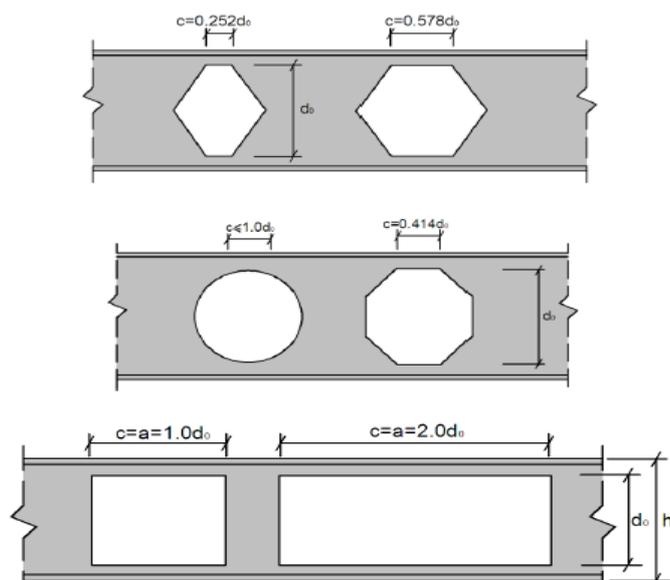


Figura 2.1 Geometria de aberturas em vigas

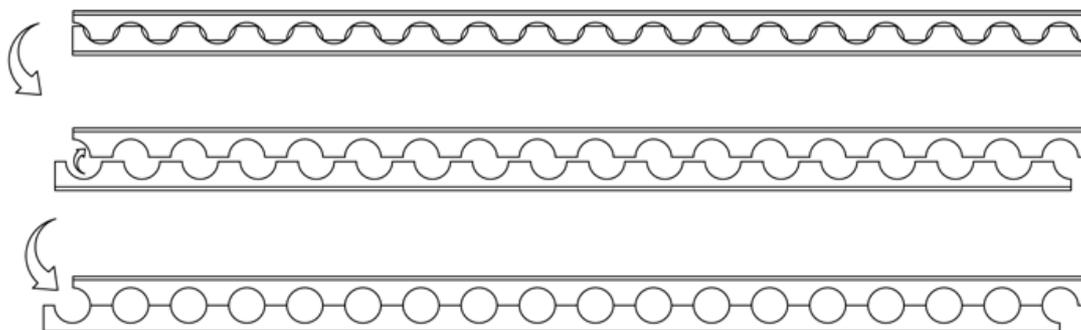


Figura 2.2 Processo de fabrico de vigas alveolares.

2.3 Vigas de aço

2.3.1 Trabalhos prévios

A procura pela solução mais segura e eficiente para as vigas com uma única abertura na alma já foi abordada de diversas maneiras.

Em 1983, Redwood [1] publicou um trabalho no qual foram realizados estudos de dimensionamento, assim como uma revisão de estudos de diversos autores até à data. No referido trabalho, cita que Bower, em 1966, considerou os esforços através de toda a viga, e não apenas nas extremidades da abertura, o que o levou a concluir que com aberturas até 50% da altura total da viga é possível realizar-se uma análise elástica. O autor refere que uns anos mais tarde, Bower constatou que o esforço transversal tem uma influência significativa com o aumento da altura da abertura na alma, num estudo que serviu de base para a criação dos diagramas de interação momento-esforço transversal.

Assumindo pontos de deformação nas zonas acima e abaixo dos cantos da abertura, a sua deformação local devido ao esforço transversal que suportam é calculável através de teorias de equilíbrio. À deformação calculada através desse método adiciona-se a deformação causada pelo momento fletor usando a inércia da viga sem abertura. Este processo é apelidado de aproximação de Vierendeel, sendo que ignora as concentrações de deformação nos cantos da abertura.

No mesmo trabalho, Redwood [1] citou um trabalho de Frost e Leffler, de 1971, onde estes esclarecem que as flechas podem ser obtidas somando três componentes:

1. Componente devido ao momento fletor ao longo da viga sem abertura;
2. Componente devido à rotação dos "T's" superior e inferior provocada pelo momento secundário ao longo da abertura;
3. E por fim a componente devido ao esforço transversal nas regiões acima e abaixo da abertura, sem considerar rotação relativa;

Em 2001, Chung & Ko [2], da Universidade Politécnica de Hong Kong realizaram um extenso estudo numérico, de modo a analisar os esforços e desenvolverem métodos de dimensionamento para vigas de aço com aberturas circulares na alma.

Cada um dos "T's" superior e inferior à abertura tem uma resistência difícil de avaliar devido à presença simultânea de momento fletor, esforço normal e esforço transversal. Neste trabalho, os autores após efetuarem uma revisão das recomendações de projeto, mostram que regra geral há duas abordagens, no que toca à análise de vigas de aço com uma abertura na alma:

- Abordagem das secções "T": Nesta abordagem, a região da abertura é considerada como sendo constituída por duas secções em forma de T, separadas por uma altura que é equivalente à altura da abertura; o dimensionamento da secção é feito com base na capacidade resistente destas secções à atuação simultânea de esforço normal e esforço transversal com os momentos locais; este processo é em geral complicado e o esforço do cálculo é considerável, sendo que a precisão do método depende da precisão de regras de dimensionamento para modos específicos de rotura; devido à complexidade do problema, são muitas vezes sugeridas formas simplificadas de segurança, que são, no entanto, conservativas.
- Abordagem da secção perfurada: nesta abordagem considera-se que a secção crítica é a secção com a abertura, e a adequabilidade estrutural da viga depende da capacidade de resistência da secção perfurada para resistir ao esforço transversal e momento fletor global simultaneamente. Neste caso são usadas as curvas simples de interação momento-esforço transversal. Embora consideravelmente mais simples, este método conduz a resultados conservativos.

Na figura 2.3 podem-se observar as forças globais na zona da abertura. Na figura 2.4 estão representadas as forças locais atuantes sobre as secções "T"

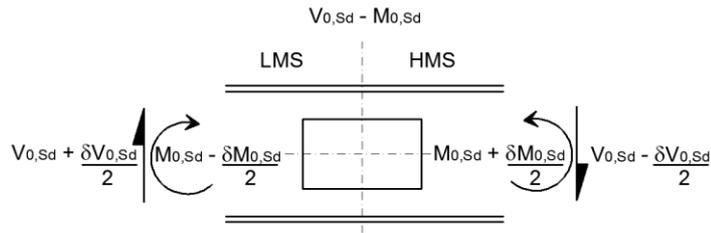


Figura 2.3 Esforços globais.
Adaptado de Chung & Ko, 2003[3]

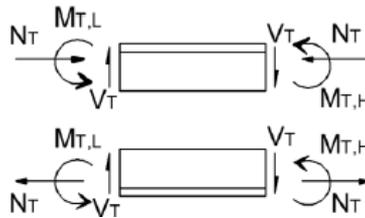


Figura 2.4 Esforços locais nos "T's" superior e inferior.
Adaptado de Chung & Ko, 2003[3]

Sendo que:

- força axial no "T", N_T , devido ao momento global $M_{0,sd}$;
- força de corte no "T", V_T , devido à força de corte global $V_{0,sd}$;
- momento local no "T", M_T , devido à transferência da força de corte $V_{0,sd}$, ao longo do comprimento da abertura.
- As siglas HMS e LMS representam respetivamente os lados de maior e menor momento

No trabalho desenvolvido por Chung & Ko [2] em 2001, os autores propõem um método de dimensionamento no qual a segurança está limitada pela formação da rótula plástica no "T" superior do LMS (Low-Moment Side) da abertura. Este método é, no entanto, conservativo, pois após a formação da referida rótula plástica, a viga ainda suporta um acréscimo de carga devido à redistribuição de esforços ao longo da abertura, até que se dê a rotura da viga pelo mecanismo de Vierendeel, com a formação de quatro rótulas plásticas. Devido a esta redistribuição de esforços os autores concluíram também que limitar a carga pela formação da rótula no T superior do HMS (High-Moment Side) é não conservativa.

O referido artigo apresenta uma investigação realizada sobre o efeito do mecanismo de Vierendeel em vigas com aberturas circulares, baseado em modelos numéricos. O modelo de elementos finitos foi calibrado com não-linearidade tanto geométrica como do material, de modo a obter a redistribuição de esforços ao longo da abertura. Os autores consideraram que a resistência das secções "T" à atuação simultânea de esforço transversal e momento fletor pode ser obtida através da análise do modelo de elementos finitos. Por fim os autores apresentam curvas de interação momento-esforço transversal obtidas empiricamente através do referido estudo, de modo a facilitar o dimensionamento de vigas de aço com uma abertura circular na alma.

A abertura na alma pode implicar um dos seguintes modos de rotura:

- Rotura por insuficiente resistência ao corte, visto que a abertura é regra geral colocada numa região perto do apoio, e pode retirar até 75% da área resistente ao corte naquela região;
- Rotura por insuficiente resistência ao momento fletor;
- E o mecanismo de Vierendeel, representado na figura 2.5, onde as siglas “LMS” e “HMS” representam respetivamente os lados de menor e maior momento, que se dá pela formação de quatro rótulas plásticas nas secções “T” localizadas nos cantos da abertura, que se devem ao momento local provocado pela mobilização do esforço transversal ao longo da abertura.

Os autores concluíram também que deve ser considerado um acréscimo de deformação devido à presença das aberturas. A avaliação da resistência das secções com abertura à atuação de momento fletor e esforço transversal é fácil de prever. No entanto, devido à atuação dos momentos locais nos “T” e à redistribuição de esforços provocada pela formação das rótulas nos cantos da abertura, o cálculo analítico da resistência é dificultado.

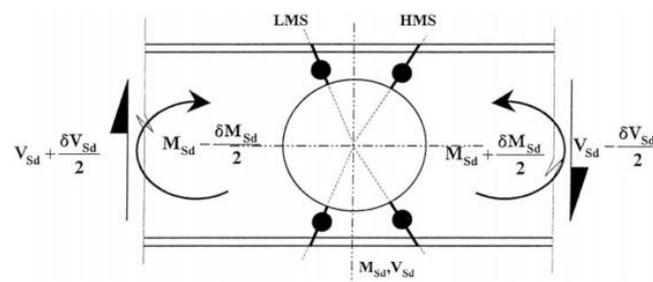


Figura 2.5 Mecanismo de Vierendeel.
Adaptado de Chung & Ko 2001[2]

Dando continuação ao estudo efetuado, Chung & Ko [3] desenvolveram um novo estudo numérico em 2003, no qual é feita uma análise mais generalizada ao comportamento de vigas com aberturas na alma de várias formas e tamanhos, no qual os autores propõem um método de dimensionamento baseado numa nova curva M-V generalizada.

O mecanismo de Vierendeel é sempre crítico em vigas com aberturas na alma. No referido estudo, Chung & Ko [3] concluíram que as curvas de interação momento-esforço transversal são muito semelhantes para as diferentes formas de aberturas, como tal seria possível a obtenção de uma curva generalizada para vigas com aberturas na alma. Partindo do princípio que tanto a rotura por corte como o mecanismo de Vierendeel são provocados pela força de corte global, o efeito local de Vierendeel pode ser tido em conta através de uma redução na capacidade resistente da viga ao corte. Foi também determinado um parâmetro Vierendeel (v_i), que representa a importância do mecanismo de Vierendeel nas secções em estudo. Na figura 2.6 está representada a redução da capacidade resistente devido ao efeito local.

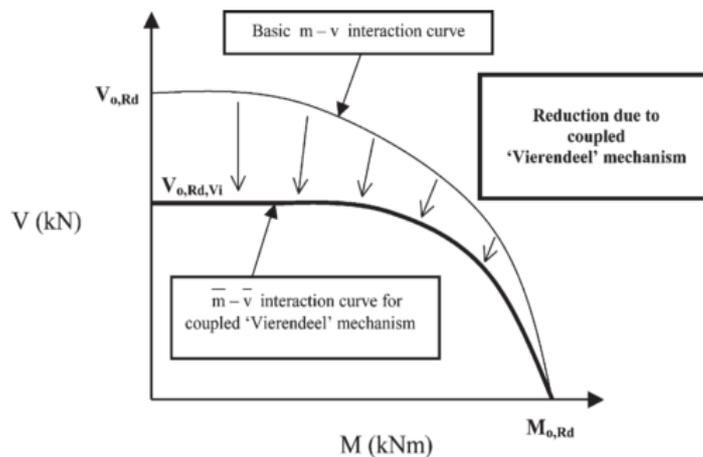


Figura 2.6 Redução da capacidade resistente devido ao efeito local.
Adaptado de Chung & Ko, 2003[3]

O trabalho desenvolvido pelos autores nesse estudo em 2003 foi dividido em duas fases. Uma primeira na qual foram efetuados modelos numéricos com aberturas com diferentes geometrias e tamanhos, e uma segunda fase, na qual foi elaborado um método de dimensionamento para vigas de aço usando uma curva de interação M-V generalizada.

Na figura 2.7 estão representadas algumas das curvas de interação M-V obtidas pelos autores. Através da sua análise, é possível concluir que todas as curvas convergem para o mesmo ponto no eixo dos 'x', o que indica que a resistência ao momento fletor quando o esforço transversal é nulo não depende da geometria da abertura. Por outro lado, a convergência no eixo dos 'y' toma diferentes valores, o que reflete a importância relativamente à resistência ao esforço transversal que a abertura tem. Estas curvas foram realizadas normalizando os esforços atuantes $M_{0,sd}$ e $V_{0,sd}$ no centro da secção perfurada relativamente aos esforços resistentes, $M_{0,rd}$ e $V_{0,rd}$ nessa secção.

Chung & Ko [3], comparando os vários resultados obtidos, concluíram que:

- Para vigas com aberturas pequenas na alma, sob esforço transversal elevado, a rotura dá-se por corte, e é tanto mais evidente quando mais longa for a abertura.
- Para vigas com grandes aberturas na alma, sob esforço transversal elevado o mecanismo de Vierendeel é dominante.
- Para vigas com grandes aberturas na alma, sob elevado momento fletor, a rotura dá-se por flexão na zona perfurada.

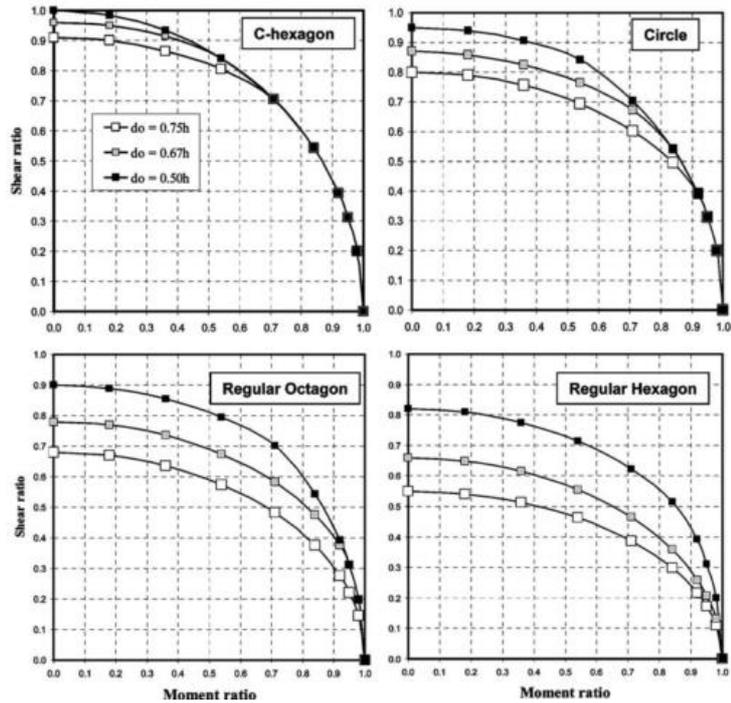


Figura 2.7 Curvas de interação M-V.
Adaptado de Chung & Ko 2003[3]

A partir destas conclusões é fácil perceber que o efeito de Vierendeel tem maior preponderância quando a relação M/V é menor, pois neste caso o esforço normal instalado nas secções “T” devido ao momento fletor global é menor, e tanto o esforço transversal, como o efeito local resultante da sua propagação ao longo da sua altura aumenta.

2.3.2 Métodos de Dimensionamento

Como referido anteriormente, houve ao longo dos anos vários estudos que apresentaram propostas de curvas de interação M-V. No entanto, o estudo de Chung & Ko [3] em 2003, que contemplava aberturas na alma de diferentes geometrias e diâmetros, foi o que mais se aproximou de conseguir uma curva generalizada. O método de dimensionamento por eles proposto é aqui explicado.

O primeiro passo trata do cálculo do momento fletor resistente da secção com abertura:

$$M_{0,Rd} = f_y * W_{0,pl} \quad [2.1]$$

e

$$W_{0,pl} = W_{pl} - \frac{d_0^2 * t_w}{4} \quad [2.2]$$

Onde:

- W_{pl} – Módulo de plasticidade da secção não perfurada
- d_0 – corresponde à altura da abertura
- t_w – espessura da alma
- f_y – resistência mecânica do aço

No que toca à resistência ao corte, é comum nas vigas de aço considerar-se que a resistência ao esforço transversal é feita totalmente pela alma, sendo a sua resistência obtida através da multiplicação da força resistente do aço pela área da alma da secção I de aço, a área de corte. No entanto, na zona da abertura há uma redução substancial nesta área de resistência ao corte.

Durante a sua investigação de modelos de elementos finitos, os autores aperceberam-se que a força de corte a que a viga resistia era superior à calculada pelos métodos de dimensionamento utilizados. Como tal, concluíram que era possível incorporar uma parte do banzo como área resistente à força de corte, como demonstrado na figura 2.16:

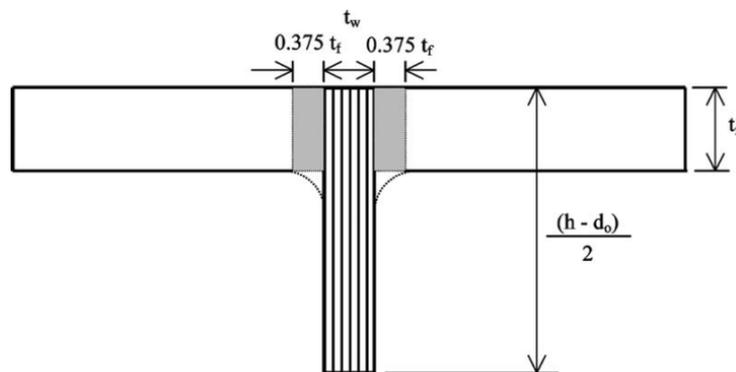


Figura 2.8 Área do banzo que pode ser utilizada como área resistente ao corte.
Adaptado de Chung et al, 2003[3]

Daqui podemos tirar que a área resistente ao corte da secção com abertura é dada por:

$$A_{v0} = t_w * \frac{(h - d_0)}{2} + 4 * 0,375 t_f^2 \quad [2.3]$$

E o cálculo da resistência ao corte da secção com abertura é feito, usando a expressão:

$$V_{0,Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} * A_{v0} \quad [2.4]$$

Este acréscimo na área de corte pode representar um acréscimo de 10% na força de cálculo resistente ao corte. Na região da abertura, numa viga com uma abertura em que $d_0 = 0,75h$ este acréscimo pode chegar aos 21%, 30% se os banzos forem espessos.

Após analisar as resistências básicas ao momento fletor e esforço transversal da secção com abertura, é necessário então ter em conta os efeitos que os momentos locais têm nas secções “T” superior e

inferior. Nesta análise, tendo em conta que na secção com abertura o esforço transversal atua sempre simultaneamente com o efeito de Vierendeel, considera-se que estes estão “acoplados”. No estudo por eles realizado, Chung & Ko [3] defenderam que a resistência ao corte global considerando o mecanismo de Vierendeel, ou a resistência dupla ao corte global, $V_{0,Rd,Vi}$, da viga por eles analisada pode ser obtida através das tabelas de interação apresentadas na figura 2.7. Para efeitos de dimensionamento, foi também desenvolvido um parâmetro que define a relação entre a resistência simples e a resistência dupla ao corte de uma secção com abertura.

$$\bar{v} = \frac{V_{0,Rd,Vi}}{V_{0,Rd}}$$

Na ausência de momento fletor, a relação de resistência dupla ao corte é o que determina a resistência da secção tanto à ação do corte global como do mecanismo de Vierendeel. O valor do fator \bar{v} depende de diversos aspetos, como a forma da sua abertura e a sua altura e extensão. Para aberturas hexagonais, para diversos valores da relação d_o/h , os valores de \bar{v} são muito próximos da unidade. No entanto, para aberturas grande e alongadas, a relação de resistência dupla ao corte assume valores muitas vezes inferiores a 0,5. Na figura 2.17 são apresentados alguns dos valores de \bar{v} obtidos por Chung & Ko [3] para diferentes geometrias de aberturas com diferentes alturas.

Opening shapes	Opening sizes		
	$d_o/h = 0.50$	$d_o/h = 0.67$	$d_o/h = 0.75$
C-hexagon	1.00	0.96	0.91
Circle	0.95	0.87	0.80
Regular octagon	0.90	0.78	0.68
Regular hexagon	0.82	0.66	0.55
Square	0.66	0.42	0.32
Elongated circle $2d_o$	0.56	0.35	0.26
Rectangle 2:1	0.38	0.21	0.16
Elongated circle $3d_o$	0.35	0.19	0.13

Figura 2.9 Valores da relação de resistência dupla ao corte para diferentes tipos de aberturas. Adaptado de Chung et al, 2003[3]

No que toca à realização da curva, esta trata-se geralmente de uma função de forma elíptica, cuja expressão é:

$$m^2 + v^2 = 1 \quad [2.6]$$

Onde:

- m corresponde à relação entre o momento atuante e o momento resistente. M_{sd}/M_{rd}
- v corresponde à relação entre o esforço transversal atuante e o esforço transversal resistente: V_{sd}/V_{rd}

Para vigas com abertura na alma, esta expressão precisa, no entanto, de ser modificada, de modo a que possa ter em conta os efeitos do mecanismo de Vierendeel. No caso de o momento global ser nulo, essa redução é feita da unidade para o valor de \bar{v} . No caso mais geral em que há momento global na zona da abertura, a proporção de utilização de resistência diminuirá. Chung & Ko [3] realizaram então uma calibração nas curvas, propondo as seguintes fórmulas de interação:

$$\text{Se } \bar{v} < \frac{2}{3} \text{ então:} \quad [2.7]$$

$$\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2 + m^{-2} = 1$$

$$\text{Se } \bar{v} \geq \frac{2}{3} \text{ então:}$$

$$\left(\frac{v - \left(\bar{v} - \frac{2}{3}\right)^2}{\frac{2}{3}}\right) + m^{-2} = 1 \quad [2.8]$$

Sendo \bar{m} a relação de resistência à flexão dupla, e dado por: $\frac{M_{0,Rd,Vi}}{M_{0,Rd}}$.

Em todos os casos, a relação de utilização de resistência ao corte, v , não deverá ser superior à relação de resistência dupla ao corte, \bar{v} . As curvas propostas pelos autores Chung et al [10] foram já apresentadas na figura 2.7. É importante notar, que tendo a relação de resistência ao corte utilizada, v , a relação de resistência à flexão utilizada, m , e a relação de resistência dupla ao corte, \bar{v} , a capacidade de carga de vigas com diferentes aberturas na alma pode facilmente ser deduzida utilizando as curvas de relação M/V propostas pelos autores. Este método de dimensionamento apresenta uma grande precisão, tendo sido cuidadosamente calibrado com as análises não lineares de elementos finitos, sendo a sua utilização muito simples.

De modo a avaliar a importância do efeito local de Vierendeel na secção com abertura, os autores desenvolveram um parâmetro, o parâmetro de Vierendeel, v_i , definido por:

$$v_i = \frac{V_{0,Rd,Vi}}{4 * M_{T,Rd}/c} \quad [2.9]$$

Onde $M_{t,Rd}$ corresponde à resistência à flexão das secções "T", quando estas estão submetidas a esforço axial e transversal nulo; $V_{0,Rd,Vi}$ trata-se da capacidade máxima de fora dupla de corte obtida através da análise de elementos finitos, e c o comprimento crítico da abertura. Para vigas em que o momento global é nulo, o parâmetro v_i assume o valor da unidade, visto a rotura dar-se por formação de rótulas plásticas nos cantos da abertura.

De modo a ilustrar a importância do fator v_i na análise de vigas com uma abertura na alma, os autores elaboraram o gráfico apresentado na figura 2.18, no qual está relacionado o parâmetro v_i com a relação c/d_0 , para secções submetidas a momento fletor global nulo. Nota-se que para aberturas com uma componente c grande, como é o caso de aberturas quadradas, retangulares ou circular alongada, o fator v_i assume valores próximos da unidade. Se o c for menor, como é o caso para aberturas hexagonais ou quadradas, o parâmetro de Vierendeel assume um valor menor, principalmente para valores de $d_0/c \leq 0,5$.

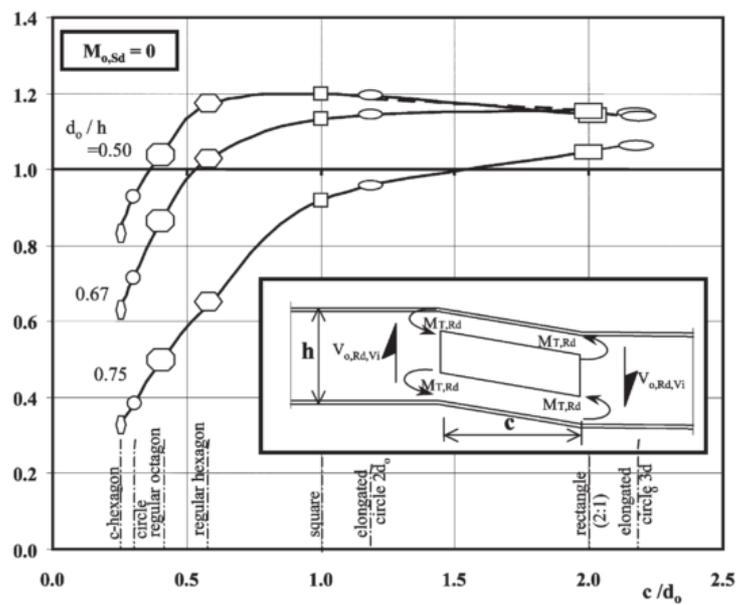


Figura 2.10 Relação entre o fator v_i e a relação d_0/c para diferentes aberturas.
Adaptado de Chung et al, 2003[3]

3 Modelo numérico

3.1 Considerações Gerais

De modo a atingir o objetivo de melhor compreender o comportamento de vigas de aço e vigas mistas com uma abertura na alma, quando sujeitas à rotura pelo mecanismo de Vierendeel, foram realizadas análises com modelos numéricos, assim como ensaios experimentais de modo a validar os ditos modelos.

Neste capítulo são abordados os métodos utilizados para a simulação das vigas de aço e mistas com uma abertura na alma. Foram modeladas quatro vigas, duas de aço, sendo uma delas reforçada longitudinalmente, e duas vigas mistas, sendo igualmente uma delas reforçada longitudinalmente na secção da abertura.

Relativamente aos modelos numéricos, o programa utilizado foi o ABAQUS 6.13, pois permite análises não lineares tanto geometricamente como fisicamente. Os modelos foram definidos com elementos sólidos, do tipo C3D8, com oito nós, como ilustrado na figura 3.1. As análises foram feitas com integração completa (usando quatro pontos de integração) e função de aproximação linear.

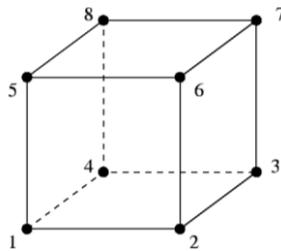


Figura 3.1 Elemento de oito nós utilizado na realização do modelo numérico

3.2 Vigas de aço

Os modelos numéricos realizados foram calibrados através da sua comparação com os modelos realizados por Chung & Ko [2] em 2001. No referido trabalho, os autores recorreram à modelação de duas vigas de aço, com uma abertura circular na alma, representadas na figura 3.2.

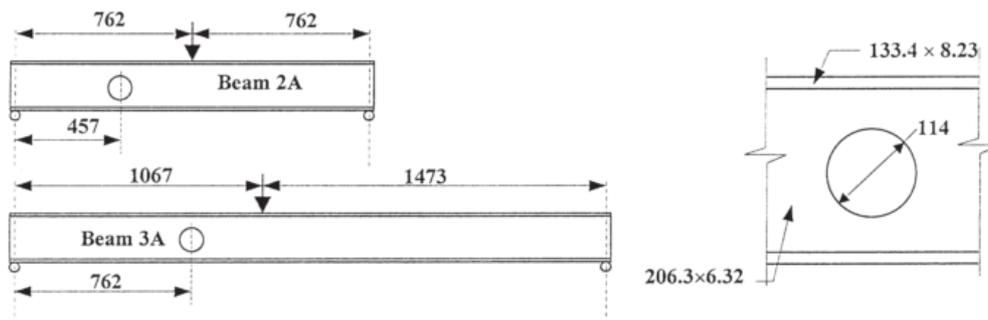


Figura 3.2 Vigas modadas por Chung & Ko [2].
Adaptado de *Investigation on vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings.*[2]

O aço foi modelado com um comportamento elasto-plástico, de acordo com a curva sugerida no EN1993-1-5, Anexo C [13], representada na figura 3.3, na qual se pode observar que na fase elástica inicial as tensões crescem linearmente com as deformações a uma taxa que é igual ao módulo de elasticidade do material, E , que no caso do aço é de 200 GPa. Após atingir a tensão de cedência, o seu crescimento reduz para uma taxa de $E/100$.

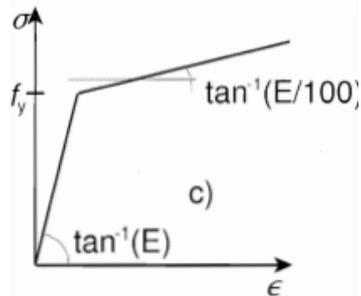


Figura 3.3 Gráfico força deformação utilizado na modelação do aço,
Adaptado de EN1993-1-5[13]

As classes de resistência utilizadas foram as mesmas que as usadas pelos autores, sendo apresentados na tabela 3.1 os valores que as caracterizam.

Tabela 3.1 Características mecânicas dos aços utilizados na calibração do modelo

	Alma			Banzos		
	σ_{ced} (Mpa)	σ_u (Mpa)	ϵ_u (%)	σ_{ced} (Mpa)	σ_u (Mpa)	ϵ_u (%)
Viga 2A	376	512	65	352	503	66
Viga 3A	361	492	62	311	576	68

A sensibilidade da malha foi testada, definindo-se que uma malha muito refinada não introduz uma melhoria significativa nos resultados, como tal optou-se por refinar a malha simplesmente nas zonas das aberturas em ambas as vigas. As malhas obtidas são apresentadas nas figuras 3.4 e 3.5.

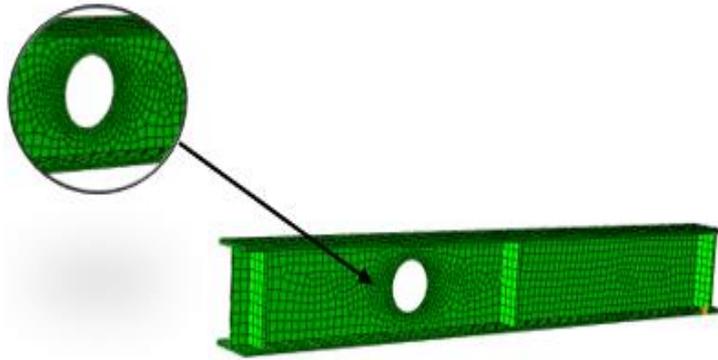


Figura 3.4 Malha definida no modelo numérico da viga 2A, com pormenor da abertura refinada

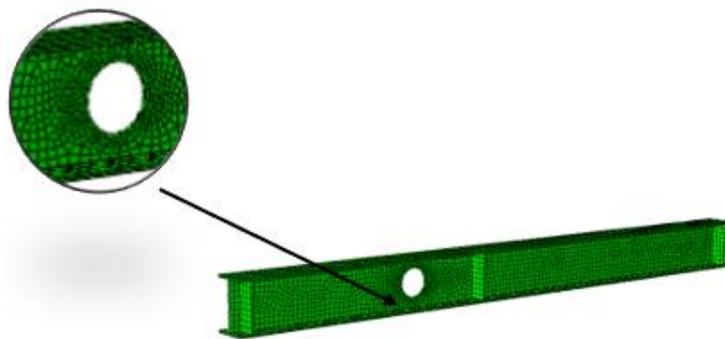


Figura 3.5 Malha definida no modelo numérico da viga 3A, com pormenor da abertura refinada

É possível observar que os modelos numéricos definidos são muito semelhantes aos modelos desenvolvidos por Chung & Ko [2]. Relativamente às condições de apoio, o apoio esquerdo foi definido como sendo fixo, permitindo a rotação, mas impedindo todos os restantes deslocamentos. o apoio direito é móvel, permitindo o deslocamento na direção da viga.

Analisados os modelos procedeu-se à sua validação, que foi feita comparando os resultados obtidos com os resultados obtidos por Chung & Ko [2]. A comparação dos resultados é apresentada nos gráficos apresentados nas figuras 3.6 e 3.7 para as vigas 2A e 3A respetivamente.

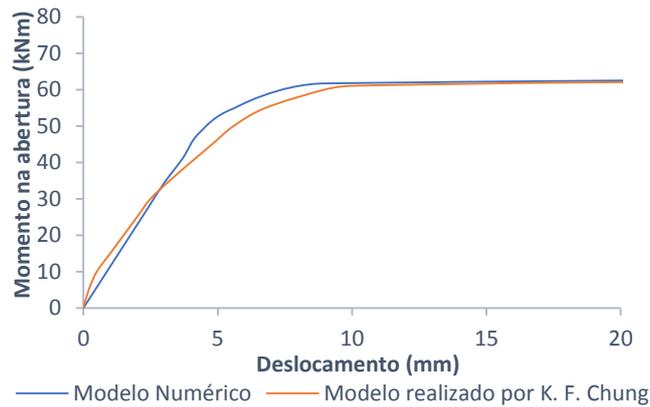


Figura 3.6 Resultados obtidos para a viga 2A

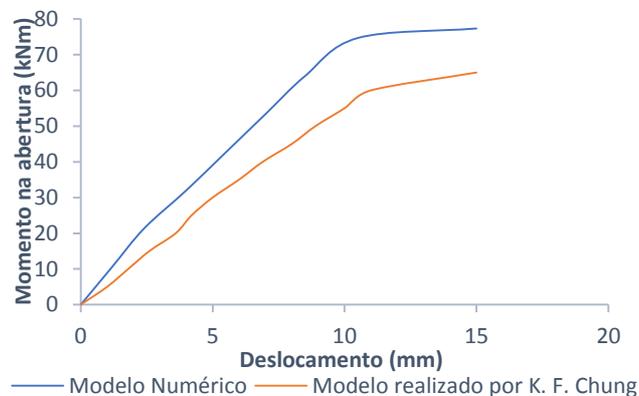


Figura 3.7 Resultados obtidos para a viga 3A

É possível observar que há alguma disparidade, principalmente na viga 3A, que se deve ao fato de a modelação dos materiais não ter as mesmas características exatas, verificando-se uma menor rigidez nos modelos realizados por K.F. Chung. Os resultados obtidos foram, no entanto, muito semelhantes aos resultados obtidos pelos autores, o que valida, portanto, o modelo numérico realizado.

3.3 Vigas mistas de aço e betão

O processo de calibração das vigas mistas modeladas foi semelhante ao processo efetuado na calibração das vigas de aço. Foi realizado um modelo de uma viga mista, semelhante a uma viga ensaiada por Clawson & Darwin [4], ilustrada na figura 3.8, sendo que de modo a validar o modelo se compararam os resultados obtidos através deste com os resultados obtidos pelos autores.

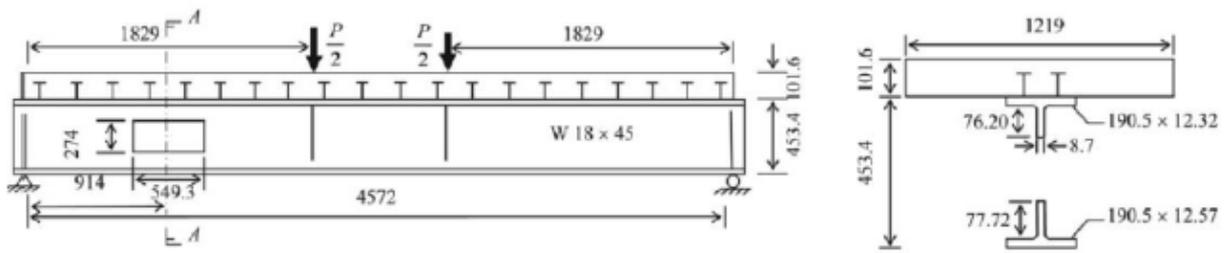


Figura 3.8 Dimensões da viga ensaiada por Darwin.

Adaptado de *Análise e Verificação da Segurança de Vigas Mistas com Aberturas na Alma*[4]

As características mecânicas do aço foram definidas do mesmo modo que havia sido definido para as vigas de aço, sendo as suas características mecânicas apresentadas na tabela 3.1. A modelação do betão revela-se um pouco mais complexa. Como é sabido, o betão apresenta comportamentos diferentes tanto à compressão como à tração, o que impossibilita que este material seja modelado do mesmo modo que o aço havia sido modelado.

O betão foi então modelado utilizando o Concrete Damaged Plasticity, uma ferramenta disponibilizada pelo programa, que permite simular o comportamento plástico do betão quando submetido à compressão, assim como a degradação de força que este exhibe quando sujeito a tração.

Na definição deste modo de rotura, é necessário definir o parâmetro K_c , que se trata da distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração ou compressão deviatória, que se tornará a nova superfície de rotura. Este parâmetro toma valores entre 0,5 e 1, sendo que por defeito se assume como sendo 2/3. São também definidos a relação entre o estado de tensão biaxial inicial e o estado de tensão uniaxial, σ_{bd}/σ_{co} , que é por defeito igual a 1.16. Finalmente, é necessário definir o ângulo de dilatância do betão, que é igual a 36° (Systèmes, 2011 [14]).

Na definição da curva do betão à compressão, o EN1992-1-1 [12] sugere que até 40% da força média de resistência à compressão, f_{cm} , a curva seja considerada perfeitamente elástica, com inclinação igual ao módulo médio de plasticidade, E_{cm} , como ilustrado na figura 3.9.

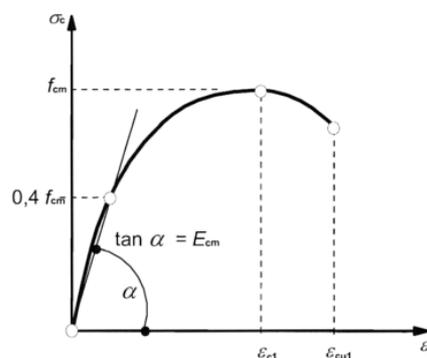


Figura 3.9 Curva tensão deformação do betão.

Adaptado de EN1992-1-1[12]

Relativamente à parte plástica da curva, o EN1992-1-1 [12] sugere a seguinte equação de modo a defini-la, recorrendo à máxima tensão de compressão e ao módulo de elasticidade:

$$\sigma_c = f_{ctm} * \frac{k * \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) * \eta} \quad [3.1]$$

Onde:

$$k = 1,05 * E_{cm} * \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad [3.2]$$

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad [3.3]$$

Os parâmetros f_{cm} , E_{cm} e ϵ_{c1} estão estipulados no EN1992-1-1 [12]. Na tabela 3.2 apresentam-se os parâmetros considerados na modelação do comportamento do betão à compressão.

Tabela 3.2 Dados usados na modelação do betão à compressão

Ecm	33 Gpa
v	0,3
ρ	25 kN/m ³
fcm	30 Mpa
fctm	2,9 MPa
ϵ_{c1}	2,2 ‰
ϵ_{cu}	3,5 ‰

Em relação ao comportamento do betão à tração, o EN1992-1-1 [12] não define uma curva do comportamento do material. Como tal na modelação foi utilizada a curva sugerida por T. Wang & Hsu [15], em 2001. Tal como quando sujeito à compressão, a curva do betão à tração apresenta um troço perfeitamente elástico que se estende até à tensão máxima do betão à tração, f_{ctm} , seguido de um troço plástico, que neste caso representa a degradação da força de tração no betão após a fendilhação, como representado na figura 3.10.

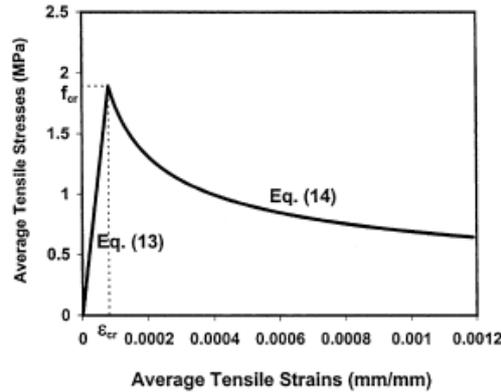


Figura 3.10 Curva representativa do comportamento do betão à tração.
Adaptada de *Computers and Structures*, 2011[20]

As equações que definem as curvas representadas no gráfico são de seguida apresentadas. Refere-se que tal como acontecia com o betão à compressão, estas curvas dependem apenas do módulo de elasticidade e da tensão máxima à tração.

$$\sigma_c = E_{cm} * \varepsilon_t, se \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \quad [3.4]$$

$$\sigma_c = f_{ctm} * \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t}\right)^{0,4} se \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \quad [3.5]$$

A malha usada na calibração deste modelo, no que toca ao perfil de aço, foi muito semelhante à malha desenvolvida para a validação do modelo de viga de aço. Relativamente ao betão, verificou-se que uma malha muito refinada não condicionava os resultados obtidos. Como tal, devido à complexidade da sua análise, optou-se por uma malha ligeiramente mais grosseira, visto este ser um fator determinante para a velocidade do processamento. Na figura 3.11 é apresentada a malha utilizada, com o pormenor na zona da abertura em foco.

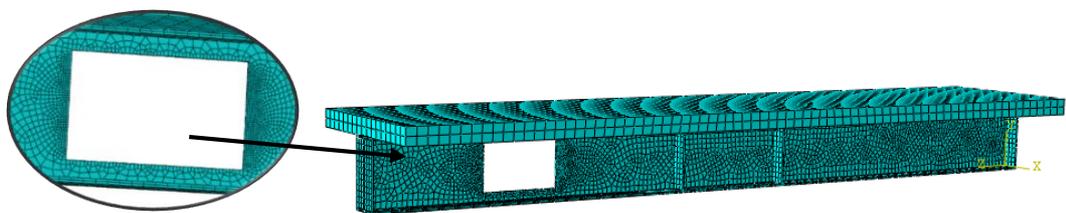


Figura 3.11 Malha utilizada na calibração dos modelos de vigas mistas com pormenor da abertura

Definida a malha, procedeu-se à validação do modelo. O modelo foi analisado de modo semelhante ao que havia sido feito para a validação das vigas de aço. A viga modelada foi testada para diferentes níveis de carregamento, de modo a definir uma curva força-deslocamento que pudesse ser comparada com a curva obtida por Clawson & Darwin [4]. Os resultados obtidos podem ser observados no gráfico apresentado na figura 3.12.

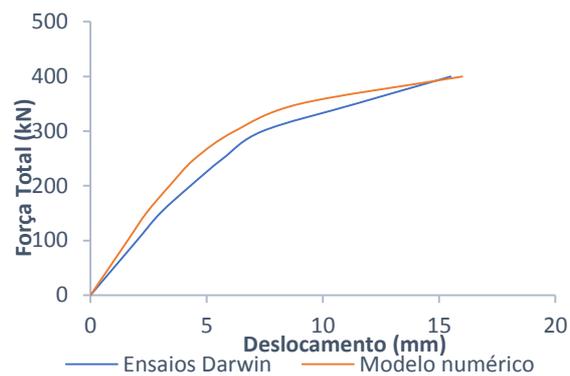


Figura 3.12 Comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos por Darwin

Uma vez mais verifica-se que os resultados obtidos através do modelo numérico são muito próximos dos modelos desenvolvidos pelos autores, ficando assim validados

4 Conceção das vigas de aço

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são descritos os processos de concepção das vigas de aço que viriam a ser ensaiadas experimentalmente.

A concepção destas vigas foi iniciada com a calibração dos modelos apresentados no capítulo anterior. Tendo esses modelos realizados, passou-se à modelação de vigas de aço com as dimensões pretendidas para que pudessem ser ensaiadas até à rotura, e de modo a que esta se desse pelo mecanismo de Vierendeel.

4.2 Características da abertura

O objetivo desta fase do trabalho é, como referido anteriormente, a concepção de duas vigas de aço, com uma abertura na alma, de modo a que a rotura destas se desse pelo mecanismo de Vierendeel.

O primeiro problema foi a decisão de onde colocar a abertura, e que dimensões esta iria ter. Sendo o objetivo o forçar da rotura pelo mecanismo de Vierendeel, estas escolhas teriam que ser feitas de modo a que esta fosse propícia a acontecer.

Relativamente à posição, esta foi decidida com base nos estudos paramétricos realizados por Chung & Ko [3] em 2003, que foi complementado por Paulo Bernardino [11]. Nestes trabalhos, ambos os autores concluem que quanto mais próxima do apoio a abertura está, mais condicionantes são os efeitos locais, visto esta proximidade reduzir a relação M/V na zona do centro da abertura. Os autores sugerem também que a distância mínima ao apoio seja de $1/8$ do vão total, optando-se por colocar a abertura nessa posição.

Relativamente à forma e dimensões da abertura, os autores anteriormente referidos concluíram que o mecanismo de Vierendeel é mais condicionante quanto maior for a abertura, sendo que, no entanto, também o é quanto menores forem as secções “T” dos cantos da abertura. Verifica-se, portanto, que as formas mais condicionantes para a abertura são quadradas ou retangulares, visto que tanto nas aberturas circulares como hexagonais as secções dos cantos da abertura têm maior área que a secção central desta.

A altura da abertura é também um fator determinante na concepção desta, tendo em conta que quanto mais alta esta for, menor será a área resistente ao esforço transversal, e conseqüentemente, mais condicionantes serão os efeitos locais. A altura da abertura pode ir até 75% da altura da alma.

Tendo todas estas condicionantes em conta, optou-se por uma abertura quadrada, com 240mm de lado (69% da altura da alma). Optou-se por uma abertura quadrada e não retangular, de modo a poder manter a localização da abertura sem que os cantos desta se situassem demasiado próximos do apoio.

4.3 Viga de aço sem reforço, V1

4.3.1 Conceção da geometria

O processo de conceção das vigas foi iniciado na fase de realização dos modelos numéricos. O objetivo seria obter uma viga semelhante às vigas modeladas na calibração dos modelos, e cujas dimensões permitissem que fosse ensaiada no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do Instituto Superior Técnico.

Tabela 4.1 Propriedades geométricas de um perfil IPE400

IPE400	
A	8450 mm ²
A _v	4269 mm ²
A _w	3320 mm ²
I _y	2,31E+08 mm ⁴
I _z	13200000 mm ⁴
W _{ply}	1310000 mm ³
W _{plz}	229000 mm ³
K	504000 mm ³
h	400 mm
b	180 mm
t _w	8,6 mm
t _f	13,5 mm

Optou-se por um perfil IPE400, cujas dimensões estão apresentadas na tabela 4.1. A viga tem um comprimento de 4,2m, sendo o vão de 4m. De modo a evitar que se dê instabilização dos banzos, optou-se por colocar reforços nas zonas dos apoios e das cargas. Nas figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os desenhos enviados para a metalo-mecânica com a pormenorização e dimensões da viga, com foco da zona da abertura e dimensões do reforço vertical.

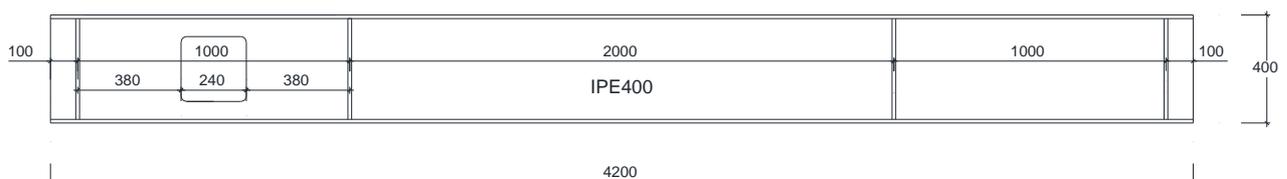


Figura 4.1 Dimensões da viga de aço V1

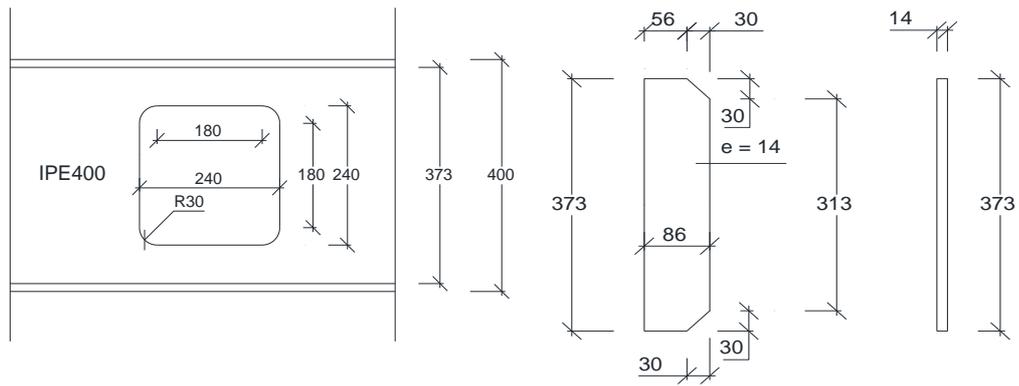


Figura 4.2 Pormenor da abertura e reforço vertical

A viga ensaiada é apresentada na figura 4.3.



Figura 4.3 Vista geral da viga V1

4.3.2 Modelo numérico

De modo a garantir que a rotura da viga se daria pelo modo pretendido, foi realizada uma análise numérica.

O modelo realizado foi semelhante aos modelos de vigas de aço calibrados no capítulo 3, tendo, no entanto, as dimensões da viga apresentada. A malha usada na viga modelada, assim como o pormenor da abertura, é visível na figura 4.4.



Figura 4.4 Malha utilizada no modelo da viga V1, com pormenor da abertura

Não tendo ainda ensaios de tração do aço utilizado no perfil, utilizaram-se as características tabelas do aço S235, o aço no qual as vigas foram encomendadas aos fornecedores.

Os modelos foram analisados para diversos níveis de carga, de modo a verificar como as tensões na abertura evoluía, e que as secções condicionantes seriam as secções da abertura. Na figura 4.5 são ilustradas as tensões de Von Mises para um nível de carga de 300 kN, o valor de carga para o qual o modelo numérico iniciou o comportamento plástico.

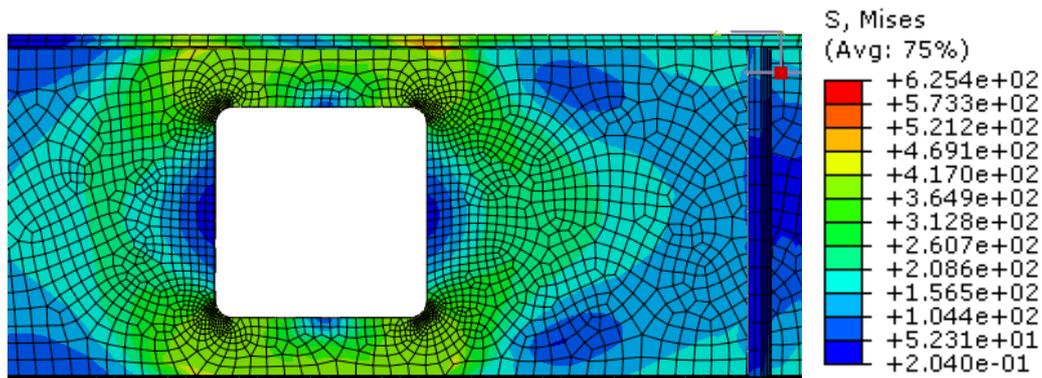


Figura 4.5 Tensões de Von Mises na abertura no modelo numérico (MPa)

Verifica-se, portanto, que as secções da abertura apresentam valores absolutos de tensão superiores aos registados na restante viga, sendo, portanto, as secções críticas, dando-se a rotura pelo modo pretendido.

4.4 Viga de aço reforçada, V2

4.4.1 Conceção da geometria

A conceção da viga V2 foi muito semelhante à conceção da viga V1. Sendo um dos objetivos a comparação dos resultados de ambas de modo a compreender o efeito dos reforços longitudinais, foi utilizado um perfil com as mesmas dimensões.

A viga é reforçada horizontalmente na zona da abertura, estando os reforços colocados acima e abaixo da abertura, de ambos os lados da viga. Os reforços têm a mesma dimensão da abertura na alma, mais 5cm de ancoragem de cada um dos lados desta. Os desenhos técnicos são representados na figura 4.6. Na figura 4.7 é representado um pormenor da abertura reforçada. O reforço vertical e reforço longitudinal são ilustrados na figura 4.8.

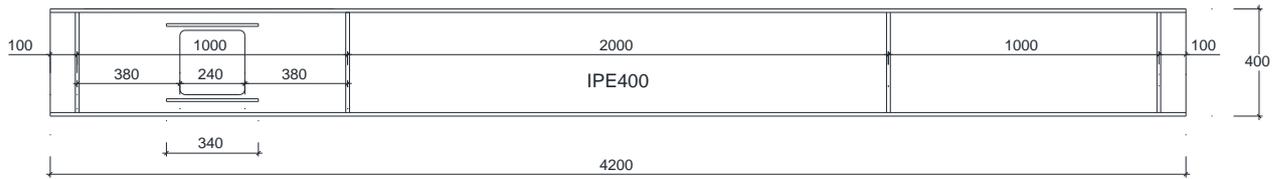


Figura 4.6 Dimensões da viga de aço V2

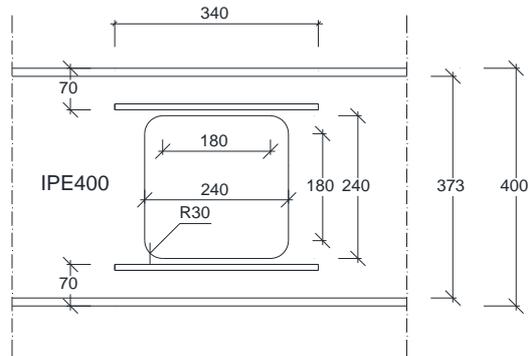


Figura 4.7 Pormenor da abertura reforçada

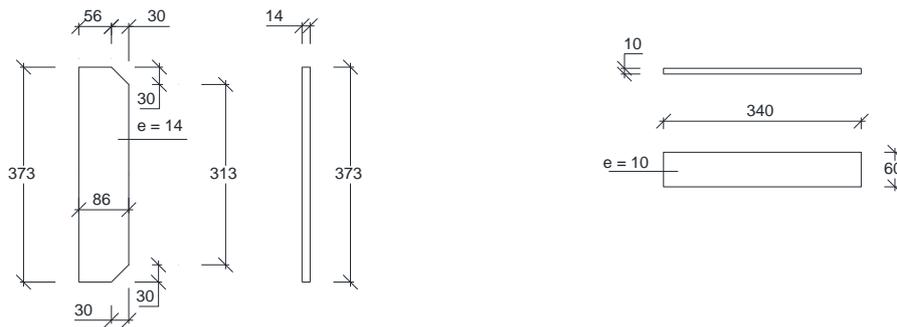


Figura 4.8 Pormenor dos reforços vertical e horizontal

Foram também colocados reforços verticais nas zonas das cargas e dos apoios, sendo estes semelhantes aos que haviam sido definidas para a viga V1. A viga está representada na figura 4.9.



Figura 4.9 Vista geral da viga V2

4.4.2 Modelo numérico

De modo a garantir que a rotura da viga se daria pelo modo pretendido, foi realizada uma análise numérica das vigas que viriam a ser ensaiadas.

O modelo realizado foi semelhante aos modelos de vigas de aço calibrados no capítulo 3, sendo que, para além de ter as dimensões da viga previamente apresentada, devido à presença do reforço, e de modo a obter melhores resultados optou-se por refinar mais a zona da abertura. A malha aplicada na viga modelada, assim como o pormenor da abertura refinada, é visível na figura 4.10.

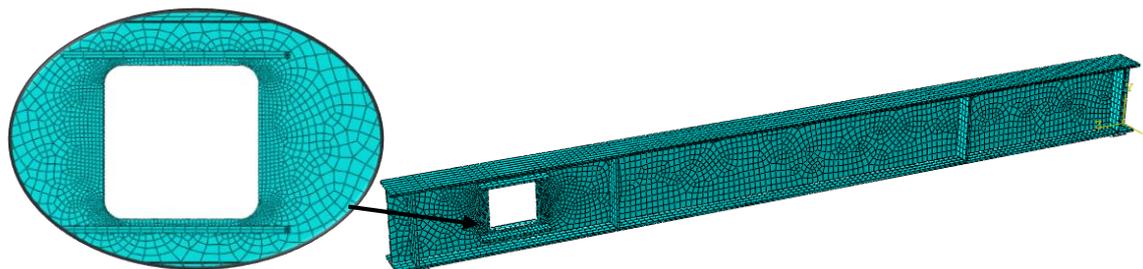


Figura 4.10 Malha utilizada no modelo da viga V2, com pormenor da abertura refinada

Não tendo ainda ensaios de tração do aço utilizado no perfil, utilizaram-se as características tabelas do aço S235, o aço no qual as vigas foram encomendadas aos fornecedores.

Os modelos foram analisados para diversos níveis de carga, de modo a verificar que as tensões na abertura evoluíam como pretendido, e que as secções condicionantes seriam as secções da abertura. Na figura 4.11 são ilustradas as tensões de Von Mises para um nível de carga de 370 kN, o valor de carga para o qual o modelo numérico iniciou o comportamento plástico.

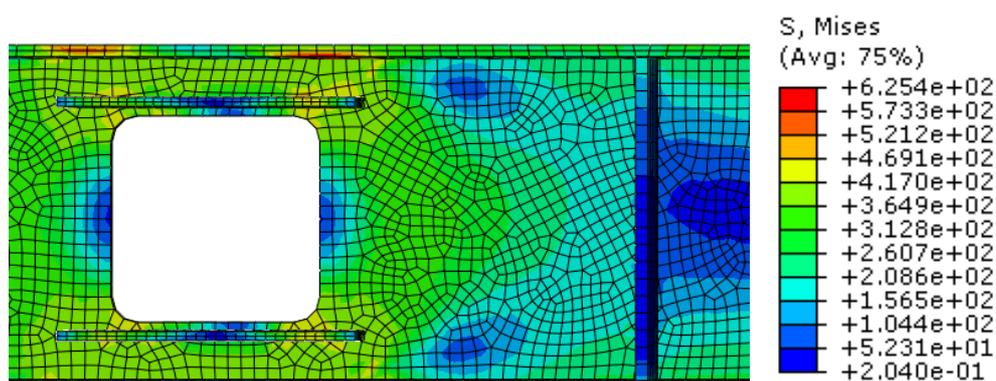


Figura 4.11 Tensões de Von Mises na abertura no modelo numérico (MPa)

Verifica-se, uma vez mais que as tensões absolutas de Von Mises na secção da abertura são consideravelmente superiores às tensões registadas na restante viga, garantindo que a rotura se dá pela formação de rótulas plásticas nos cantos desta.

5 Campanha experimental

5.1 Considerações iniciais

O presente capítulo aborda a campanha experimental levada a cabo com o intuito de melhor compreender o momento local de Vierendeel em vigas de aço e mistas com uma abertura na alma e o comportamento das mesmas

São inicialmente referenciados os ensaios de caracterização dos materiais efetuados, sendo que foram realizados ensaios de tração do aço utilizado nos perfis. São também descritos neste capítulo todos os processos da preparação dos ensaios, as posições dos extensômetros e equipamentos.

5.2 Caracterização dos materiais

De modo a fazer uma análise mais correta, assim como de modo a aproximar os resultados obtidos na análise numérica com os resultados obtidos experimentalmente é necessário efetuar ensaios de caracterização dos materiais.

Foram, portanto, realizados ensaios de tração ao aço do perfil. Os ensaios realizaram-se no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) do Instituto Superior Técnico, tendo sido realizados segundo as normas do EN ISO 6892-1 [16]. Foram ensaiados depois provetes de aço da alma, dois provetes de aço do banzo e um provete do aço utilizado no reforço longitudinal na abertura. Os provetes ensaiados estão expostos na figura 5.1.



Figura 5.1 Provetes ensaiados

Os ensaios foram realizados numa Instron, modelo 1343, ilustrada na figura 5.2. O comprimento inicial (L_0) considerado foi de 160 mm. Visto que o objetivo dos ensaios passava pela determinação

da mínima tensão elástica e das tensões e extensões máximas, a norma permite que esta tenha uma velocidade de $0,1\text{mms}^{-1}$.



Figura 5.2 Instron, modelo 1343 utilizada nos ensaios de caracterização dos materiais.

Os cálculos da tensão e extensão são efetuados segundo:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [4.1]$$

e

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad [4.2]$$

Na determinação da tensão de cedência (σ_c) há dois valores que são relevantes, segundo o EN ISSO 6892-1 [16]. São eles a tensão máxima para a qual se inicia o comportamento plástico, ou máxima tensão elástica, e a mínima tensão para a qual o material mantém esse comportamento plástico, ou mínima tensão elástica. Nas normas é aconselhado que se utilize a mínima tensão elástica como valor da máxima tensão elástica. Nas figuras 5.3 e 5.4 estão representados os gráficos tensão-extensão obtidos para os aços da alma e dos banzos.

Observando os gráficos, é possível verificar, mesmo previamente à sua análise, que as tensões de cedência tanto do aço da alma como dos banzos é muito superior à cedência do aço S235 que se pretendia em análise. Este aumento da resistência proporcionou um aumento da carga de cedência prevista tanto nos modelos como no ensaio. As tensões de cedência e rotura, assim como as respectivas extensões foram calculadas como sendo uma média dos resultados de ambos os provetes.

Relativamente ao provete de aço do reforço ensaiado, cujos resultados são apresentados na figura 5.5, foi retirado diretamente do reforço após o ensaio da viga, atingindo níveis de tensão e de deformação

muito superiores ao restante aço, assim como um comportamento muito diferente, optando-se por modela-lo com o menos resistente entre o aço da armadura e banzos.

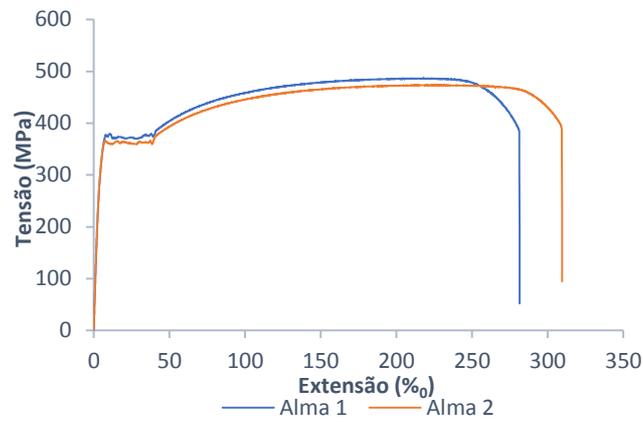


Figura 5.3 Gráfico tensão deformação para os provetes de aço da alma

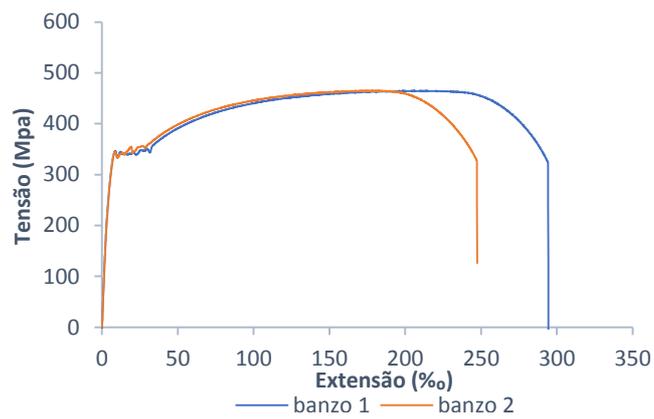


Figura 5.4 Curva Tensão-deformação dos provetes de aço dos banzos

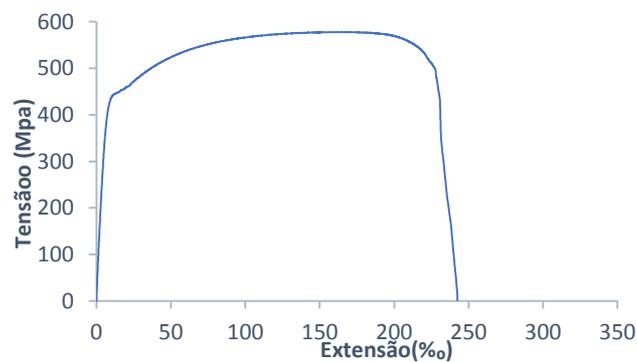


Figura 5.5 Gráfico Tensão-deformação do provete de aço do reforço

Na tabela 5.1 estão representados os resultados obtidos para os diferentes aços ensaiados. Na tabela 5.2 são representadas as características adotadas para os diferentes aços ensaiados, obtidos pela média dos resultados dos provetes ensaiados.

Tabela 5.1 Características dos materiais obtidas através dos ensaios de tração

Aço	L_0 (mm)	A(mm ²)	Δl (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	f_y (MPa)	σ_u/f_y	σ_{ced} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
Alma 1	160	170	35	83,2	235	2,1	377	486	22,1
Alma 2	160	173	37	82,1	235	2,0	366	480	23,0
Banzo 1	160	256	35	79,5	235	2,0	346	465	22,0
Banzo 2	160	264	29	79,5	235	2,0	346	465	18,4
Reforço	160	303	0	0,0	235	0,0	-	-	-

Tabela 5.2 Características mecânicas consideradas para os materiais

Alma			Banzos		
σ_{ced} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	σ_{ced} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
371	483	22,55	346	465	20,23

Conclui-se então que o aço utilizado no perfil, tanto nos banzos como na alma, apresenta uma resistência claramente superior à resistência ao valor fornecido pelo fornecedor. Verifica-se, no entanto, que tanto o aço dos banzos como da alma apresentam pouca ductilidade.

5.3 Viga de aço sem reforço, V1

5.3.1 Instrumentação do Ensaio

O ensaio foi, como referido, realizado no LERM, dentro de um pórtico fechado, ilustrado na figura 5.6. Devido ao elevado nível de carga que se pretendia atingir, a ligação do pórtico à laje do laboratório foi efetuada através do pré-esforço de um varão em cada um dos pilares do pórtico. Foi efetuado o reforço da travessa do pórtico com dois triângulos rígidos de modo a diminuir os deslocamentos.



Figura 5.6 Pórtico no qual foi realizado o ensaio da viga V1

Os apoios foram efetuados com rótulas, que tendo muito pouco atrito, permitiam a rotação. Ambas as rótulas estavam fixas, não tendo sido possível utilizar uma rótula móvel. As cargas foram aplicadas por dois macacos hidráulicos, com capacidade máxima de carga de 600 kN. A cada um dos macacos foi acoplada uma célula de carga, com capacidade de leitura até 400 kN, com o objectivo de registar o valor de carregamento exercido por cada um dos macacos.

Foram colocadas nas extremidades da viga chapas de aço, para impedir que esta se desloca-se lateralmente, como ilustrado na figura 5.7.



Figura 5.7 Chapas metálicas colocadas na extremidade para evitar deslocamentos laterais

Foi também efetuado um controlo de deslocamentos verticais nas posições das cargas, nos cantos da abertura e meio vão. Foi também efetuado um controlo de deslocamentos horizontais na zona do apoio em que se encontra a abertura e a meio vão. O esquema de instrumentação é apresentado na figura 5.8. Na tabela 5.3 são apresentadas as características dos transdutores em cada posição e das células de carga. Os macacos 1 e 2 estão associados respetivamente às células de carga F1 e F2.

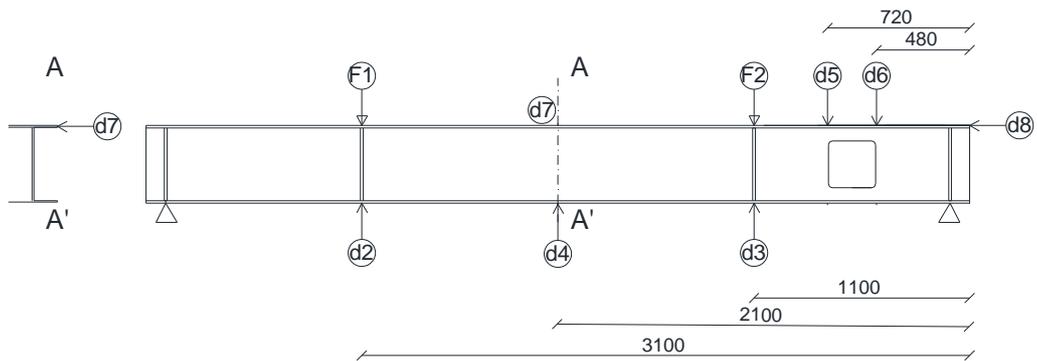


Figura 5.8 Posição dos equipamentos

Tabela 5.3 Características dos equipamentos utilizados no ensaio da viga V1

	Curso(mm)	Capacidade (kN)
Macaco 1	-	600
Macaco 2	-	600
Célula de carga F1	-	400
Célula de carga F2	-	400
d2	100	-
d3	100	-
d4	500	-
d5	50	-
d6	50	-
d7	50	-
d8	50	-

Foram também colocados extensômetro na viga, de modo a que fosse possível analisar as tensões na viga. Os extensômetros foram colocados nos cantos da abertura, nos banzos da secção da abertura e a meio vão, como ilustrado na figura 5.9. Refere-se que os extensômetros 1, 2 e 3 e 4,5 e 6 correspondem às rosetas R1 e R2 respetivamente, colocadas nos cantos da abertura com o intuito de compreender qual a direção principal de tensão na zona do canto da abertura. Foram tiradas fotografias a todos os extensômetros colocados, de modo a melhor documentar o ensaio. Estas fotografias são apresentadas na figura 5.10.

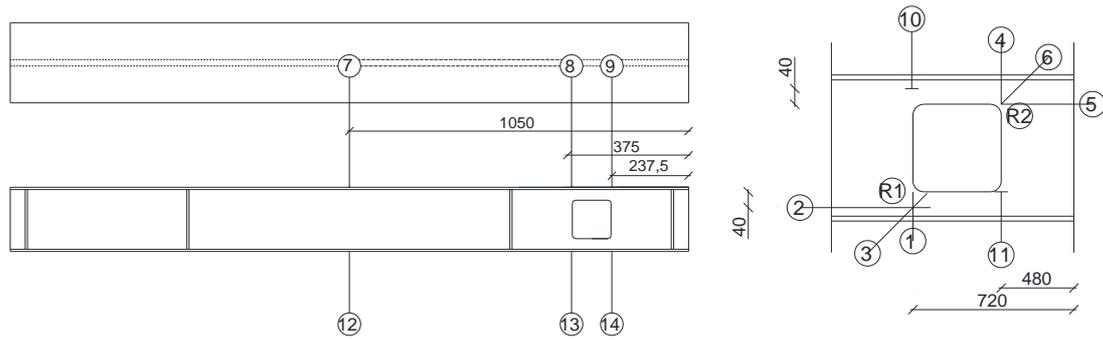


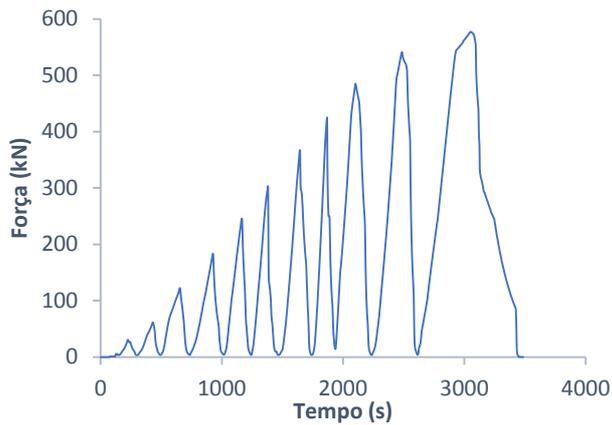
Figura 5.9 Extensómetros na viga V1 com pormenor dos extensómetros na abertura



Figura 5.10 Fotografias Documentativas da posição dos extensómetros

5.3.2 Ensaio

Feita a instrumentação, prosseguiu-se para o ensaio. O ensaio realizou-se num esquema de carga descarga, estando a história de carregamento apresentada no gráfico da figura 5.11.



Ciclos de Carregamento (kN)	
Mínimo	Máximo
0	30
5	60
5	120
5	180
5	240
5	300
5	360
5	420
5	480
5	540
5	570

Figura 5.11 História de carregamento utilizado no ensaio da viga V1

A viga foi ensaiada até à rotura, tendo-se esta verificado para uma carga de cerca de 570 kN, sendo evidente que se deu pelo mecanismo de Vierendeel. O método pelo qual se deu a rotura é evidente ao observar a configuração deformada da viga, apresentada na figura 5.12.



Figura 5.12 Deformada de V1

Na rotura notou-se que as deformações na abertura eram evidentes, sendo que nos cantos que se encontravam tracionados podem-se observar fendas claras, e nos cantos comprimidos nota-se uma instabilização. Na figura 5.13 estão demonstradas as deformações sustentadas pela viga na rotura.

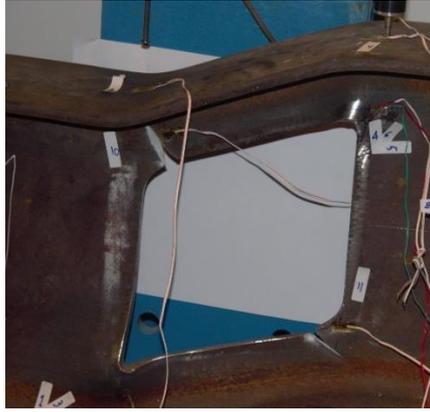


Figura 5.13 Deformações visíveis na abertura na rotura

5.3.3 Análise de Resultados

Analisando os resultados obtidos no ensaio experimental da viga V1, é possível uma vez mais concluir que a rotura se deu pelo modo pretendido. As figuras 5.14 a 5.16 ilustram a evolução dos deslocamentos d3, d4 e d5 com o aumento do nível de carregamento. O defletómetro d5 perdeu o curso durante o ensaio, mas é possível concluir pela observação da configuração da viga na rotura que se tal não tem acontecido seria o deslocamento que apresentaria um valor mais expressivo.

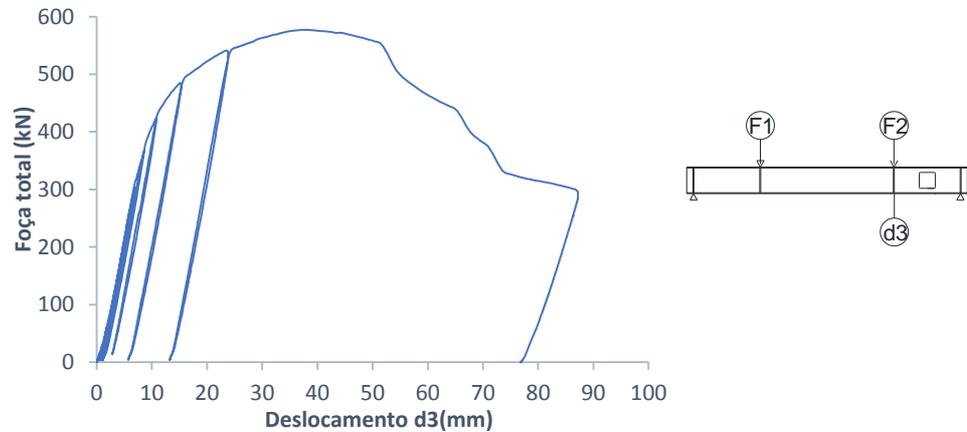


Figura 5.14 Gráfico força total vs deslocamento d3 na viga V1

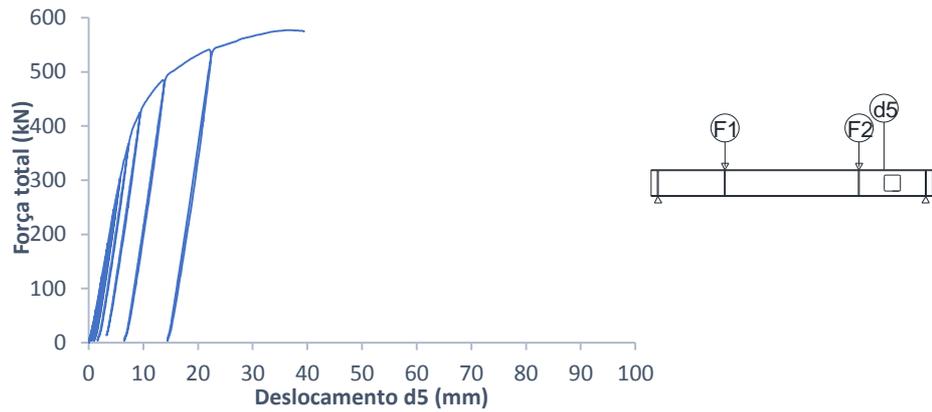


Figura 5.15 Gráfico força total vs deslocamento d5 na viga V1

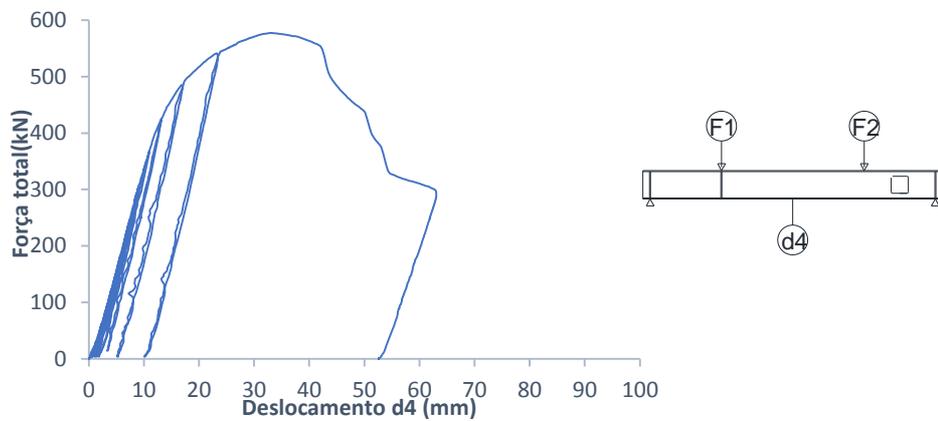


Figura 5.16 Gráfico força total vs deslocamento d4 na viga V1

Analisando os gráficos é possível perceber que à medida que a viga vai entrando em fase plástica e se aproxima do colapso, os deslocamentos na zona da abertura vão progressivamente ganhando expressão relativamente aos deslocamentos a meio vão. É possível observar na figura 5.17, onde são comparados os deslocamentos nas posições das cargas, que o deslocamento na zona da carga mais perto da abertura atinge valores consideravelmente mais expressivos.

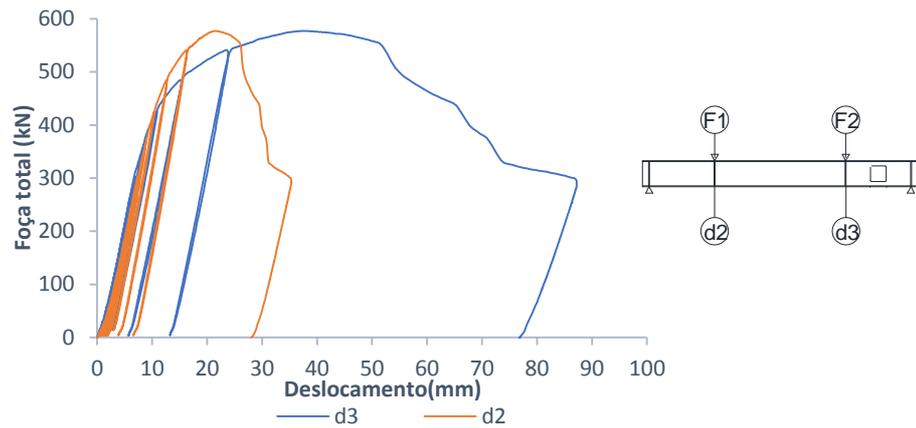


Figura 5.17 Gráfico comparativo dos deslocamentos d2 e d3 obtidos para a viga V1

Nos cantos da abertura também se verificou uma diferença significativa entre os deslocamentos no lado de maior e menor momento, notando-se que há uma clara deflexão na viga na zona da abertura. O gráfico na figura 5.18 representa a diferença verificada.

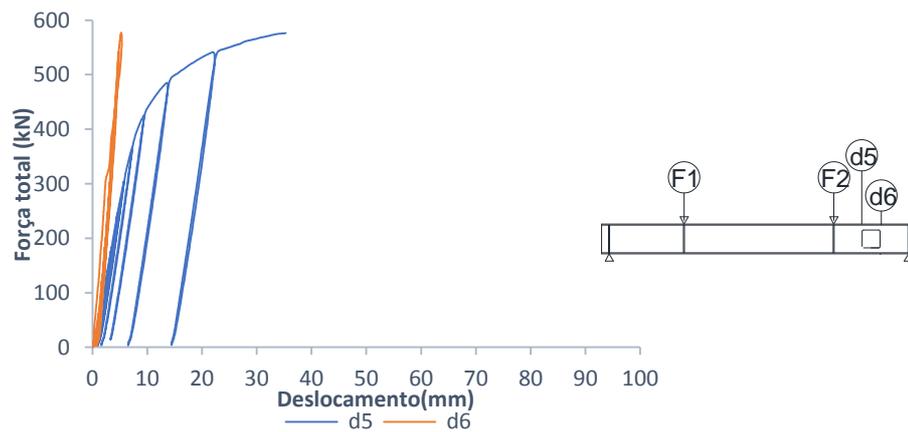


Figura 5.18 Gráfico comparativo dos deslocamentos d5 e d6 obtidos para a viga V1

Verifica-se que o defletómetro na posição d6 nunca chega a refletir a fase plástica do comportamento da viga. Esta evolução dos deslocamentos e deformações na abertura foi documentada fotograficamente, sendo ilustrada da figura 5.19.

~

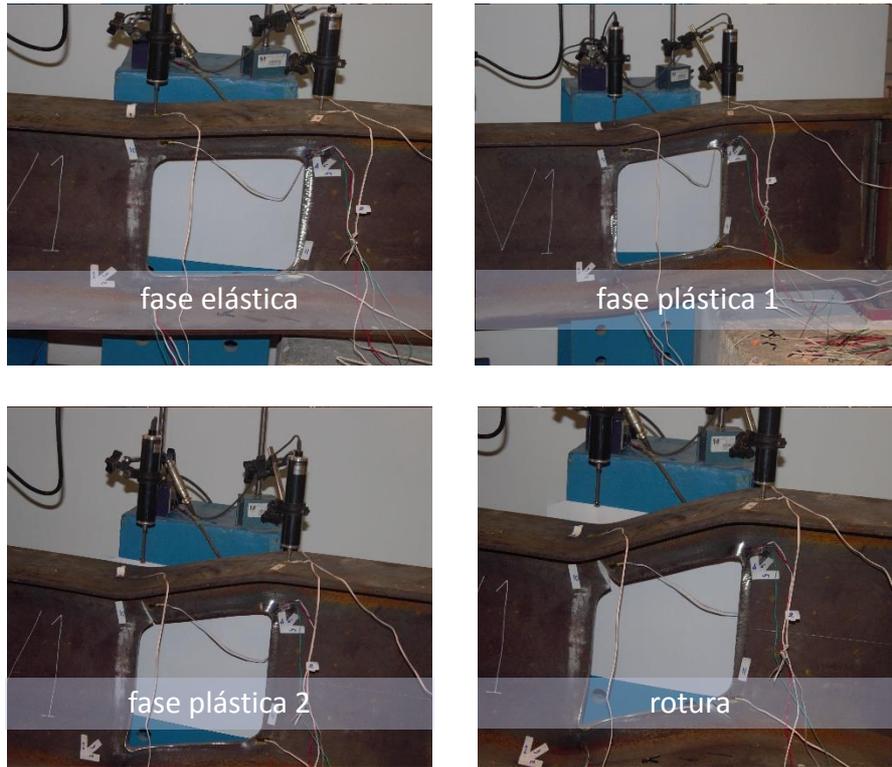


Figura 5.19 Evolução das deformações na abertura

É claramente visível através da figura 5.19 o desnível entre os cantos da abertura. É também perceptível na figura que após o defletómetro d5 ter perdido o curso, as deformações nessa zona aumentaram consideravelmente.

Relativamente aos deslocamentos transversais a meio vão, registados pelo transdutor d7, é possível confirmar na figura 5.20 que os valores registados são bastante inferiores relativamente aos restantes transdutores, verificando-se que este deslocamento não tem influência na rotura da viga.

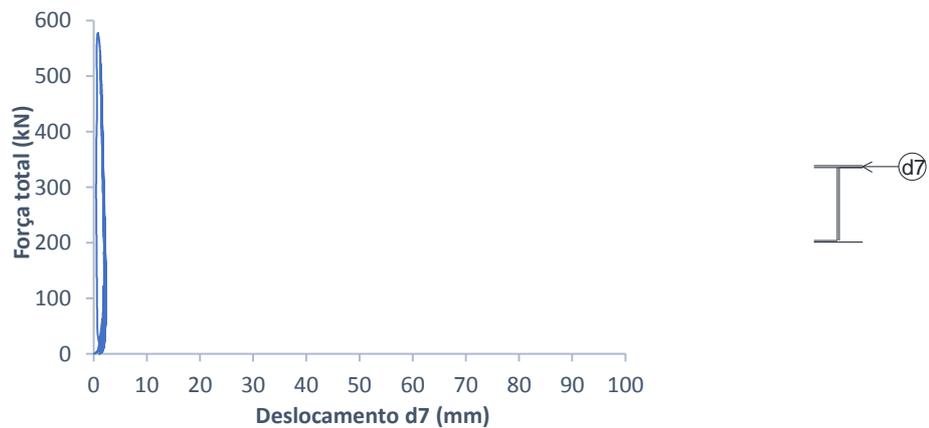


Figura 5.20 Deslocamento lateral a meio vão registado pelo transdutor d7

Por fim, o deslocamento longitudinal na zona do apoio, d8, é apresentado na figura 5.21, verificando-se que este é igualmente pouco relevante na análise da viga.

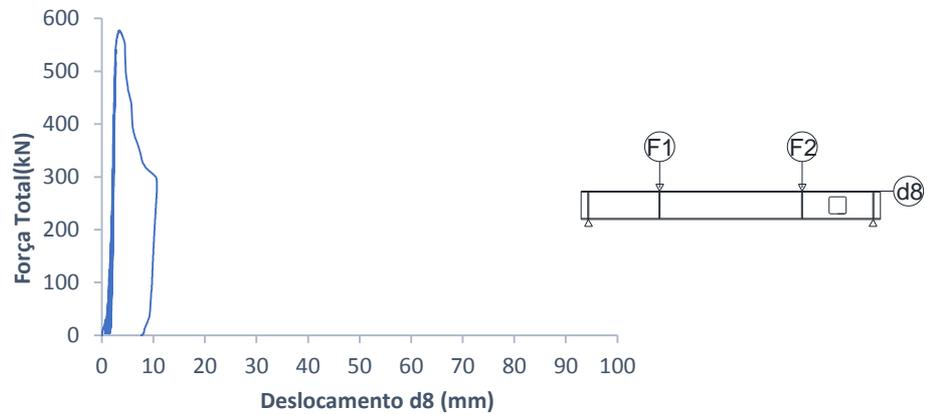


Figura 5.21 Deslocamento horizontal no apoio registado pelo transdutor d8

Relativamente às tensões na abertura, foram analisadas as rosetas de modo a compreender as principais direções, assim como as tensões principais. Esta análise foi feita através das fórmulas facilitadas pelo fornecedor, que são abaixo apresentadas. Na figura 5.22 são apresentadas as definições sugeridas.

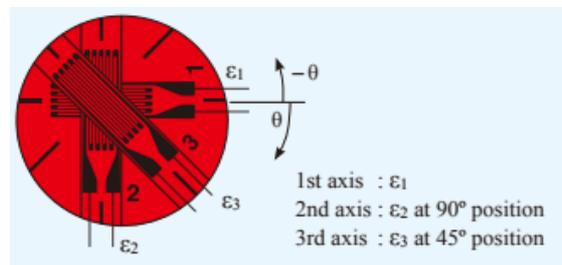


Figura 5.22 Orientação das deformações

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} [\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \sqrt{2 * ((\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2)}] \quad [4.3]$$

e

$$\theta = \frac{1}{2} * \tan^{-1} \left(\frac{2 * \varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad [4.4]$$

Através da utilização das fórmulas acima apresentadas, concluiu-se que as tensões máximas em valor absoluto são na realidade as mínimas, visto que ambas as rosetas se encontram em cantos submetidos à compressão. A direção principal de tensão faz em ambas as rosetas um ângulo de cerca de 30° com a vertical, como representado na figura 5.23.

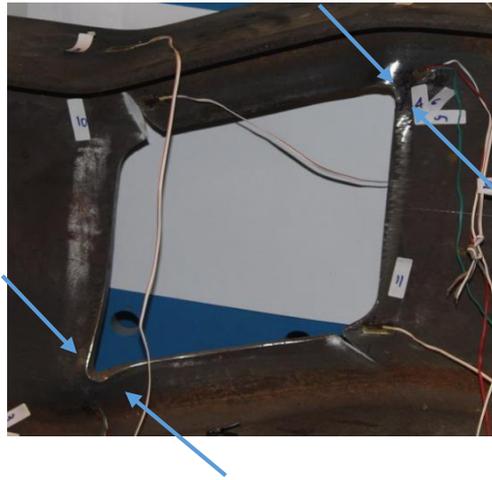


Figura 5.23 Direções principais de tensão

Os valores absolutos das tensões registadas são apresentados nos gráficos da figura 5.24.

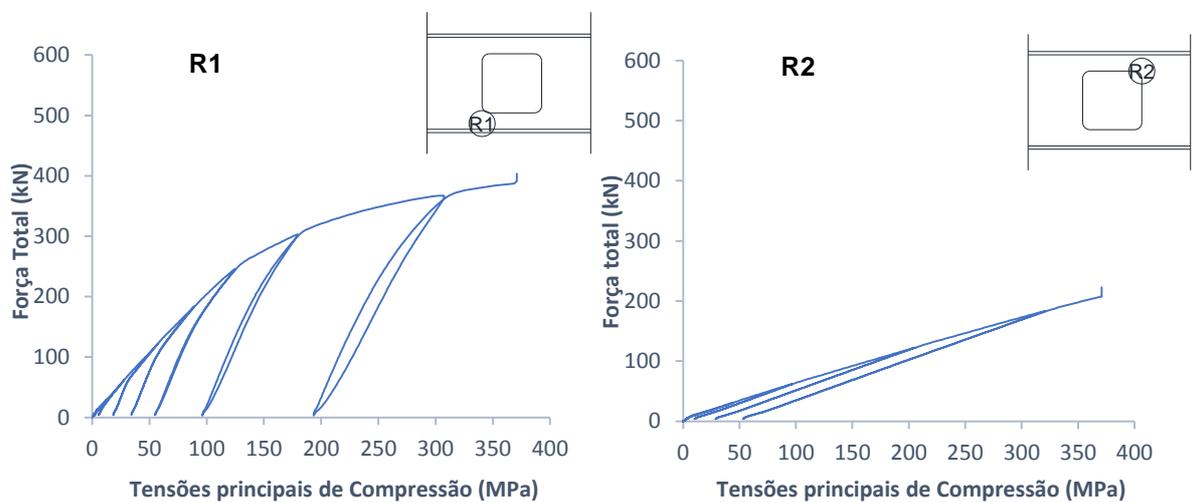


Figura 5.24 Gráficos força tensão máxima de compressão para as tensões principais obtidas nas rosetas

Verifica-se que a roseta R2, situada no canto da abertura, atinge as tensões de cedência para valores de carga inferiores relativamente aos valores registados para R1, que se encontrava 4 cm abaixo do canto. Estes resultados eram esperados, não só visto a primeira fibra a entrar em cedência das secções de cada canto seja a mais afastada do centro de gravidade, mas também pois a roseta R1 estava colocada do lado de maior momento, onde os efeitos locais e momentos global produzem tensões de sentido contrário.

Relativamente aos valores de tensão registados nos restantes extensómetros, é visível que as tensões a meio vão, apresentadas na figura 5.25, evoluem mais lentamente com o aumento de carga que as tensões na zona da abertura, apresentadas nas figuras 5.26 a 5.28.

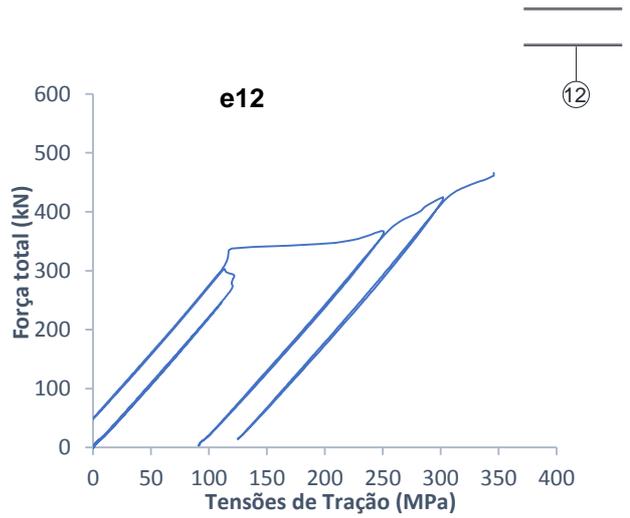
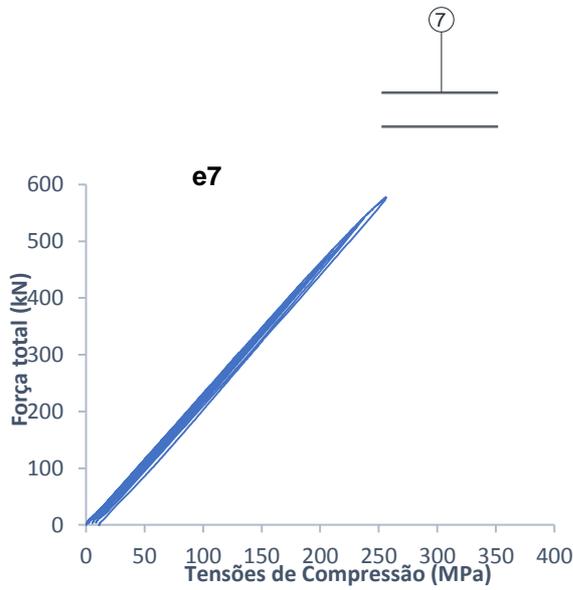


Figura 5.25 Evolução das tensões a meio vão

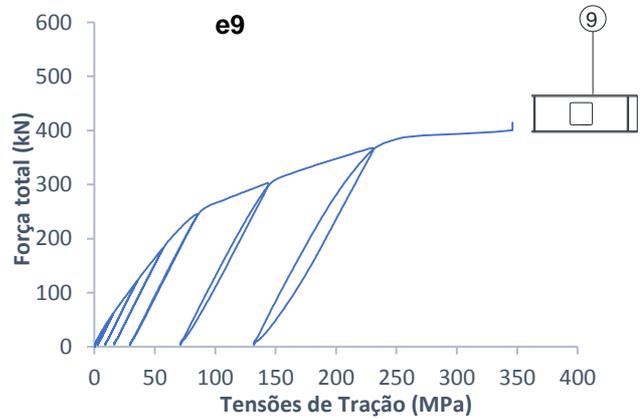
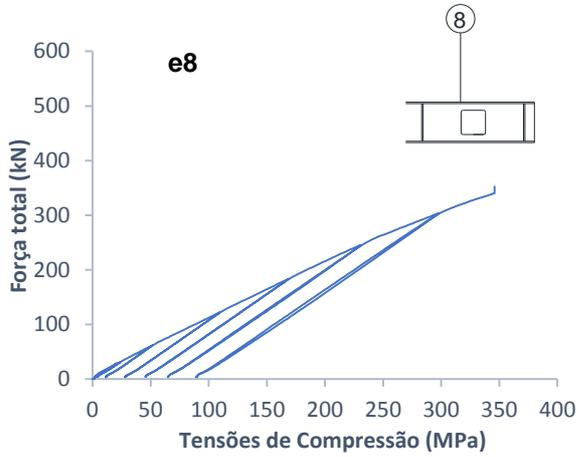


Figura 5.26 Evolução das tensões normais no banzo superior, nas zonas dos cantos da abertura

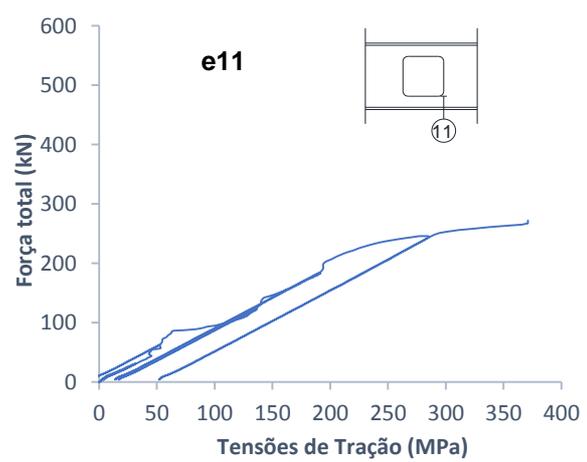
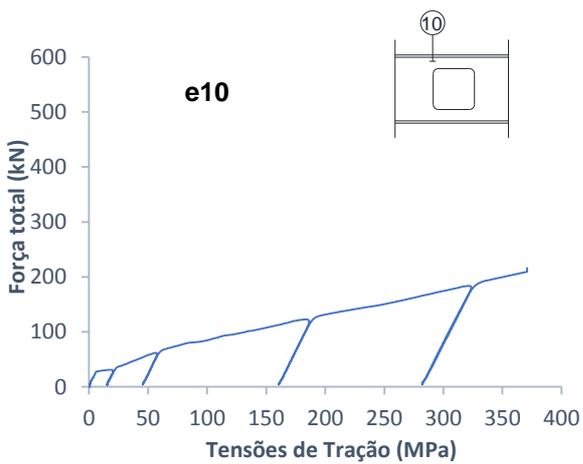


Figura 5.27 Evolução das tensões normais nos cantos da abertura

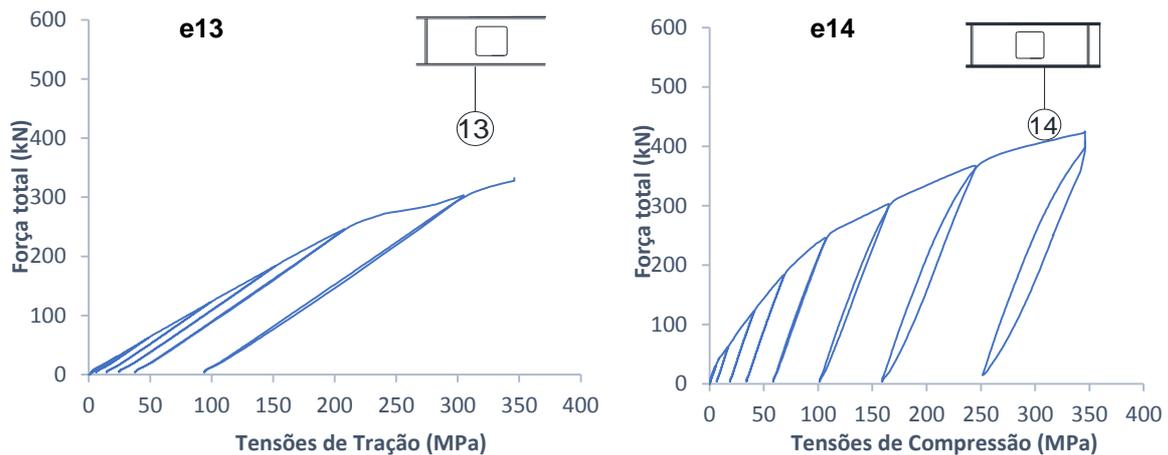


Figura 5.28 Evolução das tensões no banzo inferior na zona dos cantos da abertura

Nota-se que embora as tensões da alma tenham uma evolução superiores do lado de menor momento, no lado de maior momento é onde as tensões nos banzos atingem a sua velocidade máxima. Isto deve-se ao facto de ser nessas localizações que os efeitos locais induzem tensões com o mesmo sentido que as induzidas pelo momento global.

As rosetas colocadas permitem também a análise das tensões tangenciais máximas, sendo importante avaliar a importância que estas têm na cedência pelo mecanismo de Vierendeel. As tensões tangenciais máximas registadas pelas rosetas em função da carga são apresentadas na figura 5.29.

Refere-se que a máxima tensão tangencial elástica é igual a $\tau_{m\acute{a}x} = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$, sendo que no caso do aço utilizado para a alma é de cerca de 214 MPa.

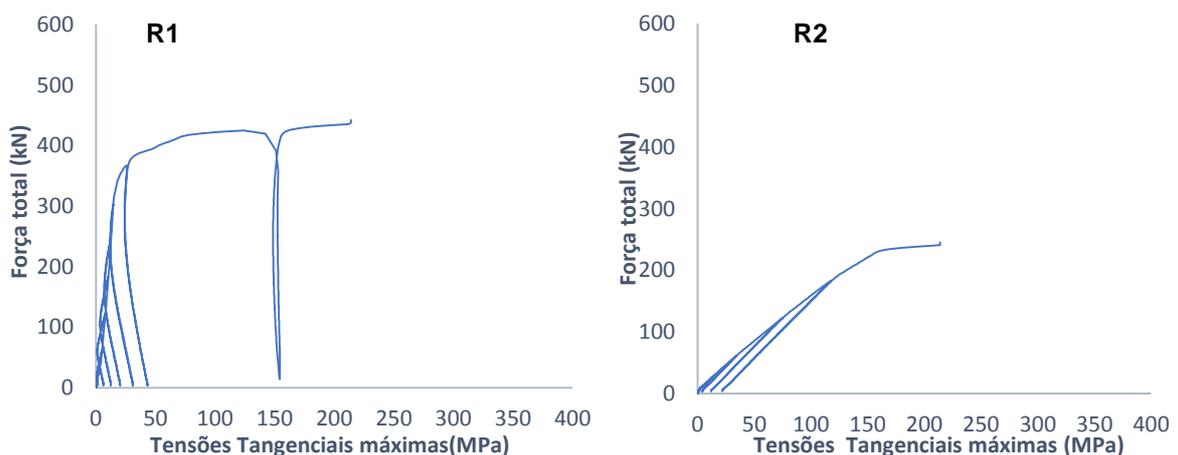


Figura 5.29 Evolução das tensões tangenciais máximas na abertura

Analisando os gráficos percebe-se rapidamente que as tensões tangenciais máximas têm um andamento mais rápido no canto da abertura, do que numa posição entre esta e o banzo.

5.4 Viga de aço reforçada V2

5.4.1 Instrumentação do ensaio

A instrumentação do ensaio da viga V2 foi semelhante à instrumentação da viga V1. Foi igualmente ensaiada no pórtico fechado, apresentado na figura 5.30. Tal como havia acontecido para a viga V1, a travessa foi reforçada de modo a diminuir os deslocamentos desta.



Figura 5.30 Pórtico instrumentado para o ensaio da viga V2

De modo a obter o máximo de dados possível do ensaio, foi também efetuado um controlo de deslocamentos verticais nas posições das cargas, nos cantos da abertura e meio vão. Foi também efetuado um controlo de deslocamentos horizontais na zona do apoio em que se encontra a abertura e a meio vão. O esquema de instrumentação é apresentado na figura 5.31. Na tabela 5.4 são apresentadas as características dos transdutores em cada posição. Os macacos 1 e 2 estão associados respetivamente às células de carga F1 e F2.

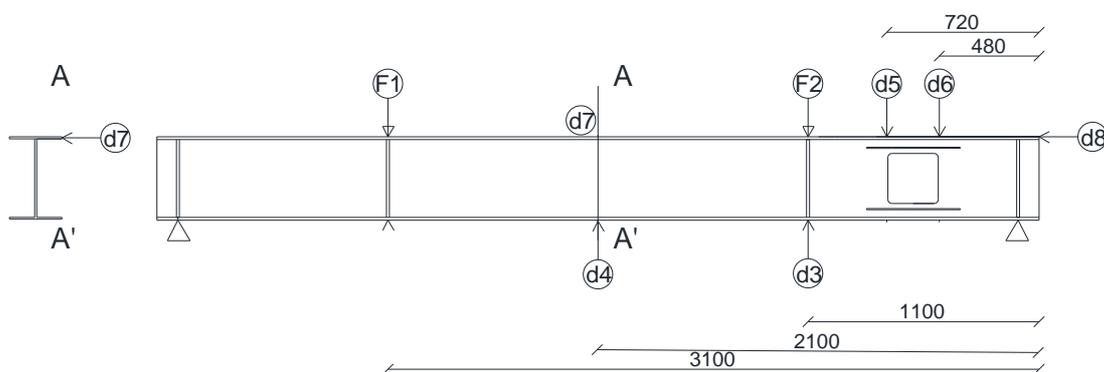


Figura 5.31 Instrumentação do ensaio da viga V2

Tabela 5.4 Características dos equipamentos utilizados no ensaio da viga V2

	Curso(mm)	Capacidade (kN)
Macaco 1	-	600
Macaco 2	-	600
Célula de carga F1	-	400
Célula de carga F2	-	400
d2	50	-
d3	100	-
d4	500	-
d5	100	-
d6	50	-
d7	50	-
d8	50	-

Os extensómetros foram colocados nas mesmas posições em que haviam sido colocados na viga V1, como apresentado na figura 5.32. Na zona da abertura, no lado de menor momento os extensómetros foram colocados alinhados com o canto da abertura, enquanto que no lado de maior momento foram colocados na mesma localização, mas exteriores ao reforço, de modo a comprar as tensões, e tentar compreender melhor o efeito dos reforços. A figura 5.33 documenta a posição de todos os extensómetros colocados na viga V2.

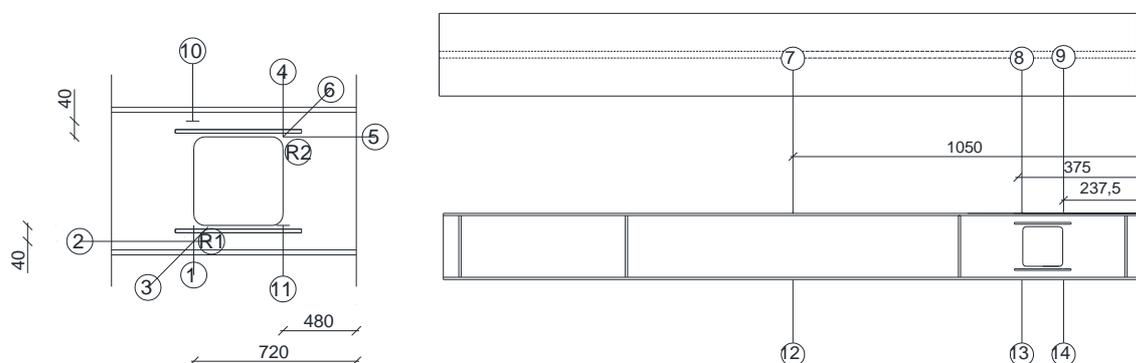


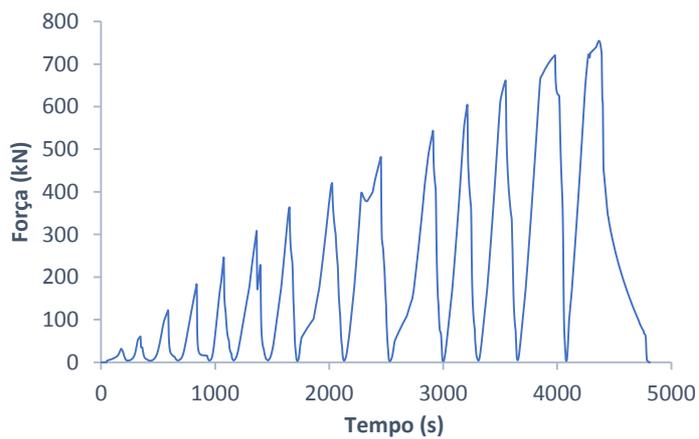
Figura 5.32 Posição dos extensómetros na viga V2 com pormenor da abertura



Figura 5.33 Documentação fotográfica da posição dos extensómetros em V2

5.4.2 Ensaio

O ensaio da viga V2 foi realizado num esquema de carga descarga, como ilustra o gráfico da figura 5.35. A capacidade de carga desta viga foi claramente superior à capacidade da viga V1, demonstrando também uma maior ductilidade.



Ciclos de Carregamento (kN)	
Minimo	Máximo
0	30
5	60
5	120
5	180
5	240
5	300
5	360
5	420
5	480
5	540
5	600
5	660
5	720
5	760

Figura 5.34 Historia de Carregamento para a viga V2

A viga foi ensaiada até à rotura, que tal como pretendido, se deu pelo mecanismo de Vierendeel, para uma carga a rondar os 760 kN. A deformada da viga é apresentada na figura 5.35.



Figura 5.35 Deformada final da viga V2

Uma vez mais são claras as deformações nas secções nos cantos da abertura, sendo evidente que os reforços longitudinais conduzem as tensões para o local onde estão ancorados, notando-se que a rotura se dá também nessa região. Na figura 5.36 é apresentada a deformação na zona da abertura quando se deu a rotura.



Figura 5.36 Deformações na abertura na rotura

5.4.3 Análise dos resultados

Analisando os resultados obtidos no ensaio experimental da viga V2, é possível uma vez mais concluir que a rotura se deu pelo modo pretendido. As figuras 5.37 a 5.39 ilustram a evolução dos deslocamentos d_3 , d_4 e d_5 com o aumento do nível de carregamento. Os defletómetros d_5 perdeu o curso durante o ensaio, mas é possível concluir que é nessas zonas que os deslocamentos verticais da viga assumem os seus valores máximos, visto terem ambos perdido o curso já perto da rotura.

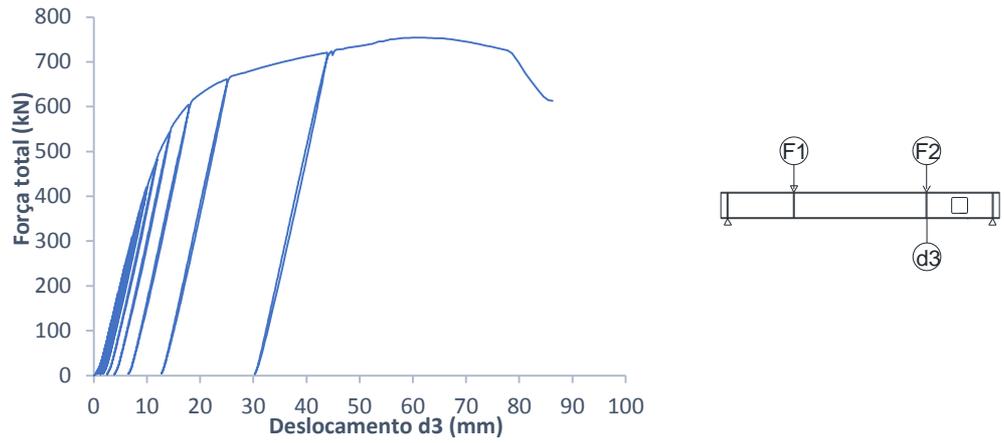


Figura 5.37 Gráfico força total vs deslocamento d_3 para a viga V2

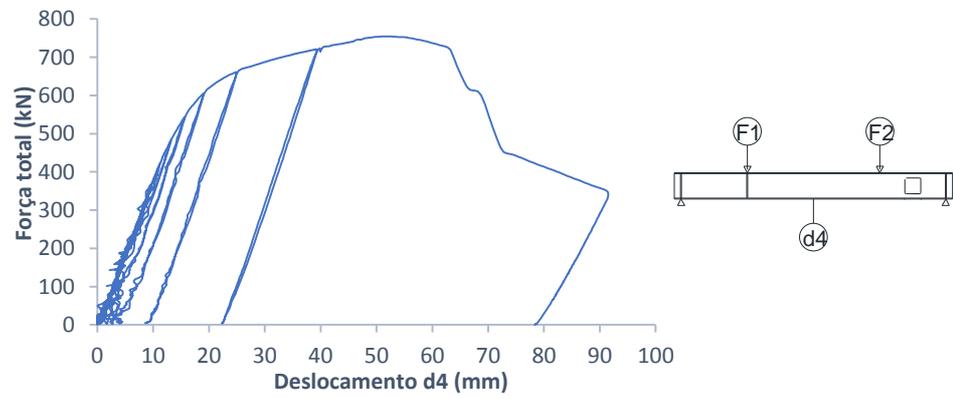


Figura 5.38 Gráfico fora total vs deslocamento d_4 para a viga V2

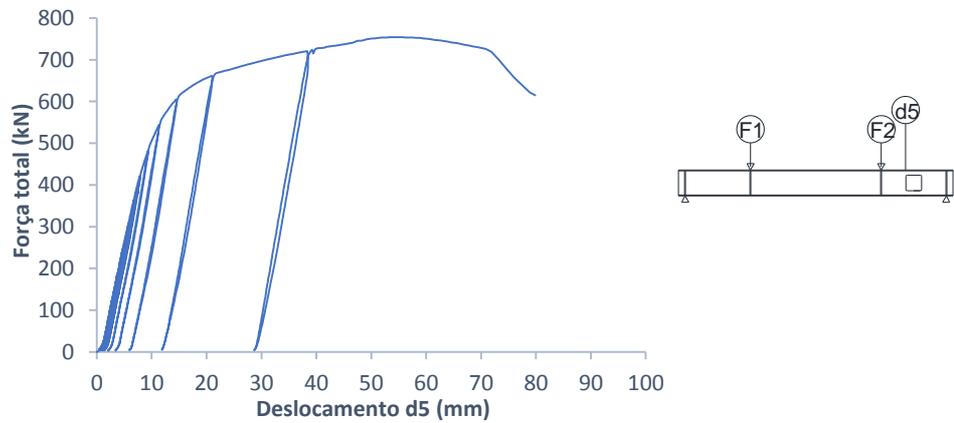


Figura 5.39 Gráfico fora total vs deslocamento d_4 para a viga V2

Analisando os gráficos é possível perceber que à medida que a viga vai entrando em fase plástica e se aproxima do colapso, os deslocamentos na zona da abertura vão progressivamente ganhando expressão relativamente aos deslocamentos a meio vão. É possível observar na figura 5.40, onde são comparados os deslocamentos nas posições das cargas, que o deslocamento na zona da carga mais perto da abertura atinge valores consideravelmente mais expressivos.

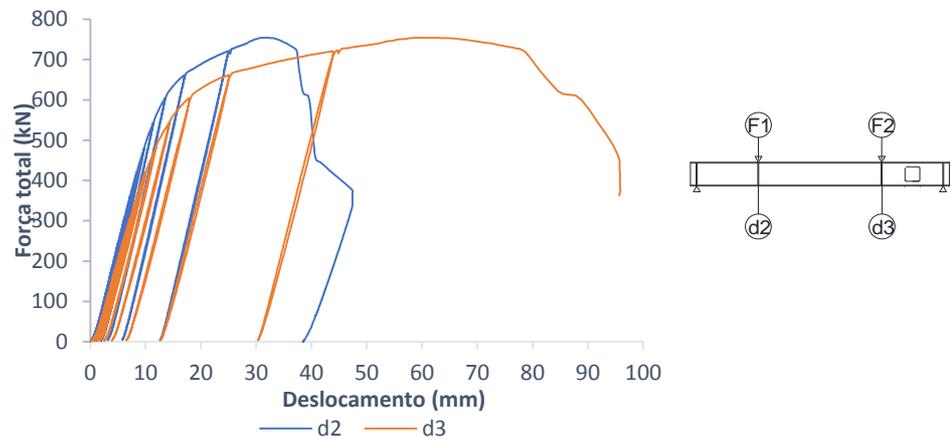


Figura 5.40 Gráfico comparativo dos deslocamentos d2 e d3 para a viga V2

Nos cantos da abertura também se verificou uma diferença significativa entre os deslocamentos no lado de maior e menor momento, notando-se que há uma clara deflexão na viga na zona da abertura. O gráfico na figura 5.36 representa a diferença verificada.

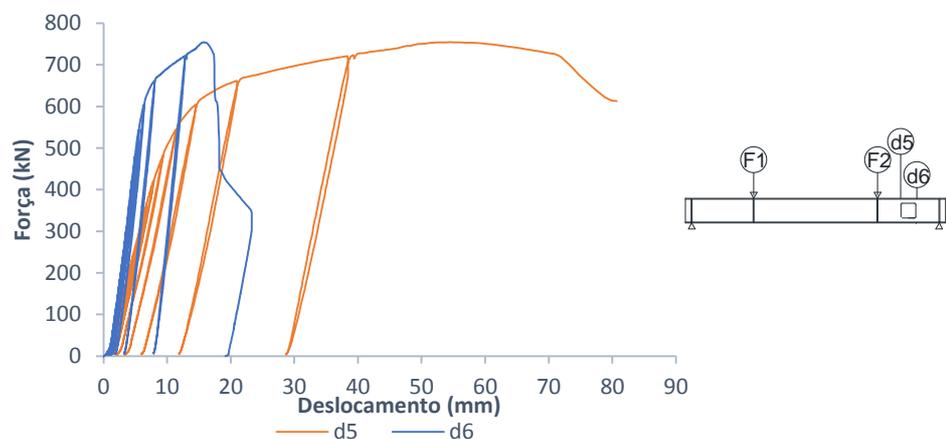


Figura 5.41 Gráfico comparativo dos deslocamentos d2 e d3 para a viga V2

Verifica-se que o defletómetro na posição d6 nunca chega a refletir a os níveis de deslocamento registados pelos restantes defletómetros. Esta evolução dos deslocamentos e deformações na abertura foi documentada fotograficamente, sendo ilustrada da figura 5.42.

~

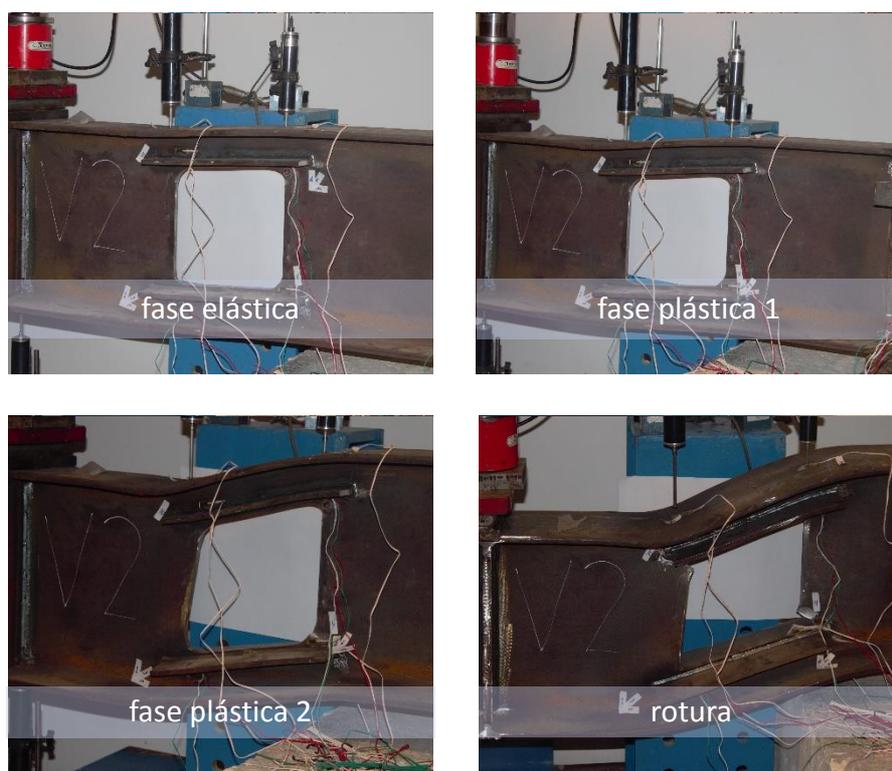


Figura 5.42 Evolução das deformações na abertura

É claramente visível através da figura 5.42 o desnível entre os cantos da abertura. É também perceptível na figura que após o defletómetro d5 ter perdido o curso, as deformações nessa zona aumentaram ainda ligeiramente.

Relativamente aos deslocamentos transversais a meio vão, registados pelo transdutor d7, é possível confirmar na figura 5.43 que os valores registados são bastante inferiores relativamente aos restantes transdutores, verificando-se que este deslocamento não tem influência na rotura da viga.

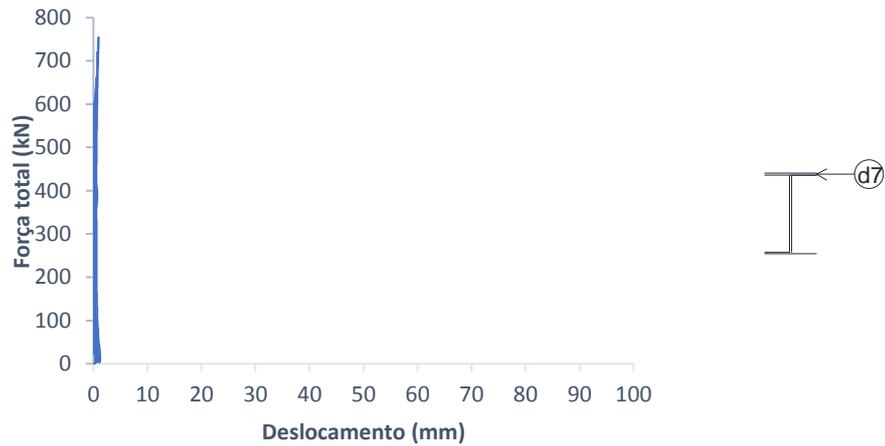


Figura 5.43 Gráfico força deslocamento obtido para o transdutor d7

Por fim, o deslocamento longitudinal na zona do apoio, d8, é apresentado na figura 5.44, verificando-se que este é igualmente pouco relevante na análise da viga.

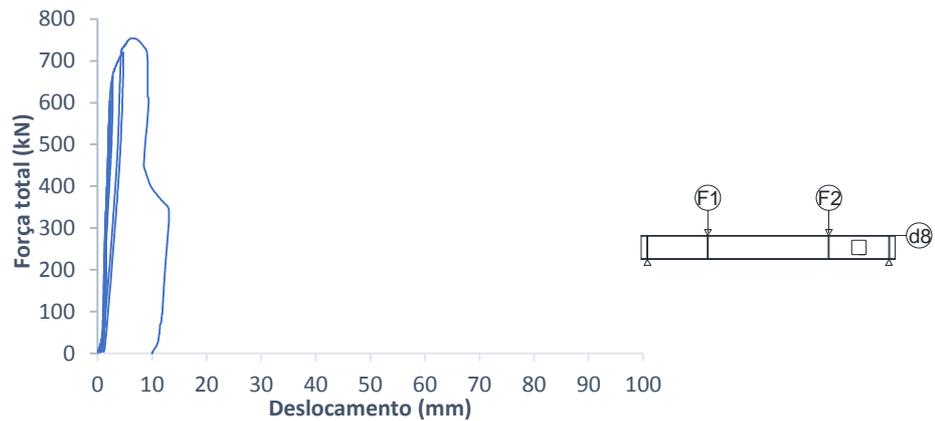


Figura 5.44 Gráfico força deslocamento obtido para o transdutor d8

Através da utilização das expressões [4.3] e [4.4], concluiu-se que as tensões máximas em valor absoluto são na realidade as mínimas, visto que ambas as rosetas se encontram em cantos submetidos à compressão. A direção principal de tensão faz em ambas as rosetas um ângulo de cerca de 30° com a vertical, como representado na figura 5.45.

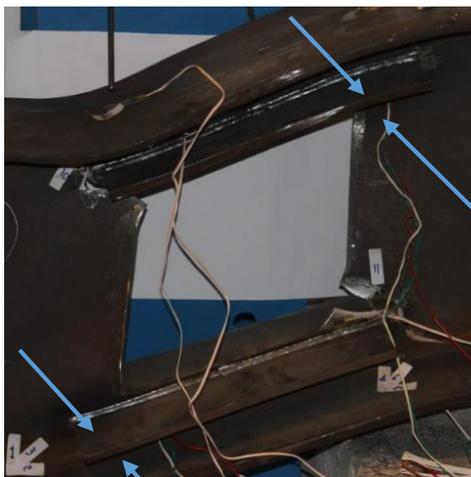


Figura 5.45 Direções principais de tensão

Os valores absolutos das tensões registadas são apresentados nos gráficos da figura 5.46.

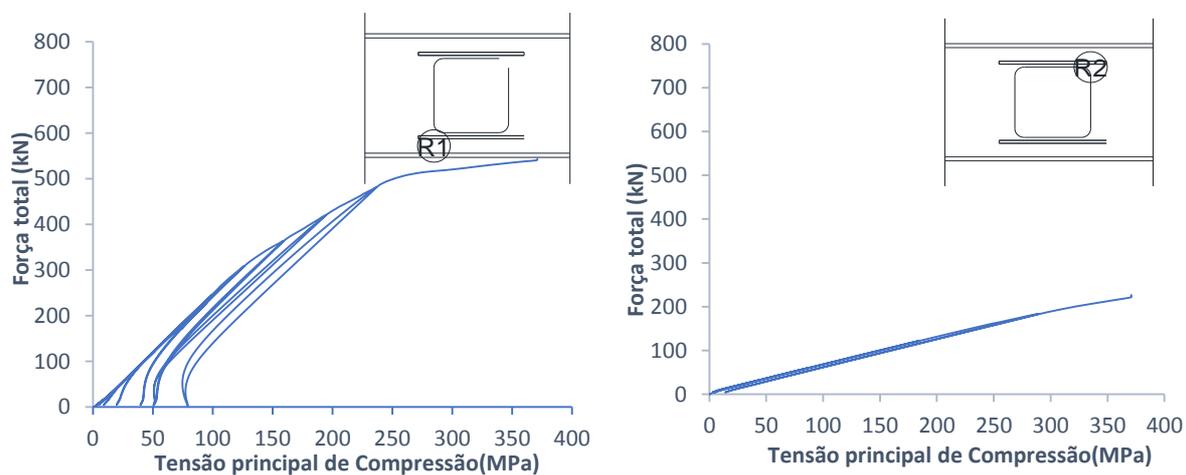


Figura 5.46 Gráficos força tensão para as tensões principais nas rosetas

Verifica-se que a roseta R2, situada no canto da abertura, atinge as tensões de cedência para valores de carga inferiores relativamente aos valores registados para R1, que se encontrava entre o reforço e o banzo inferior. Estes resultados devem-se ao facto de as tensões locais serem conduzidos pelo reforço para a zona da alma que lhes é adjacente, verificando-se que as secções dos cantos são críticas, mas as tensões nas na alma entre o reforço e o banzo tem uma taxa de crescimento claramente inferior.

Relativamente aos valores de tensão registados nos restantes extensómetros, é visível que as tensões a meio vão, apresentadas na figura 5.47, tem um andamento consideravelmente mais lento que as tensões na zona da abertura, apresentadas nas figuras 5.48 a 5.49. Refere-se que os extensómetro e12 e e10 apresentaram uma leitura irregular, o que se deve a má colocação ou mau contacto nos fios que o ligavam ao aparelho de leitura, sendo que os resultados obtidos não foram portanto considerados.

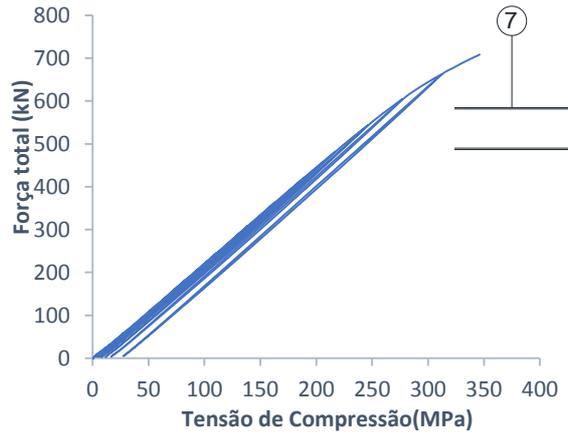


Figura 5.47 Evolução das tensões normais a meio vão

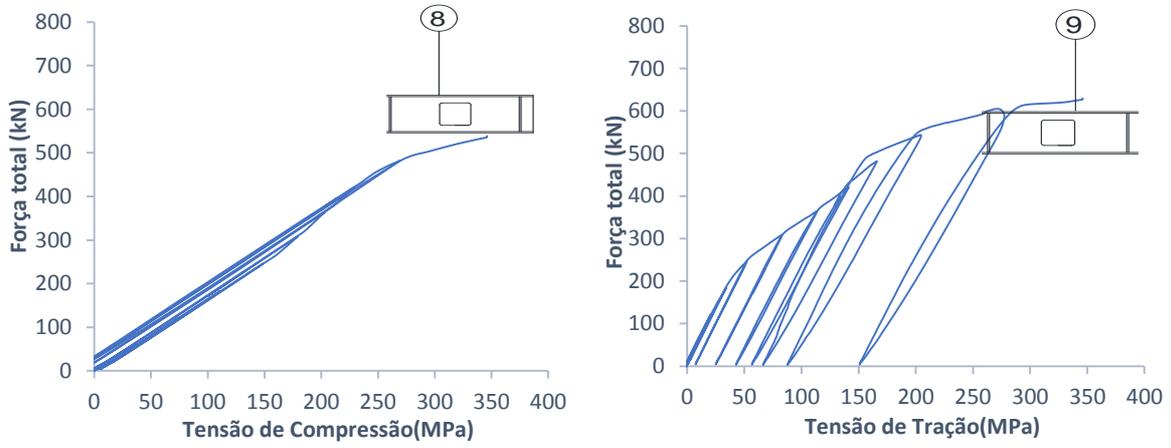


Figura 5.48 Evolução das tensões normais no banzo superior nas zonas dos cantos da abertura

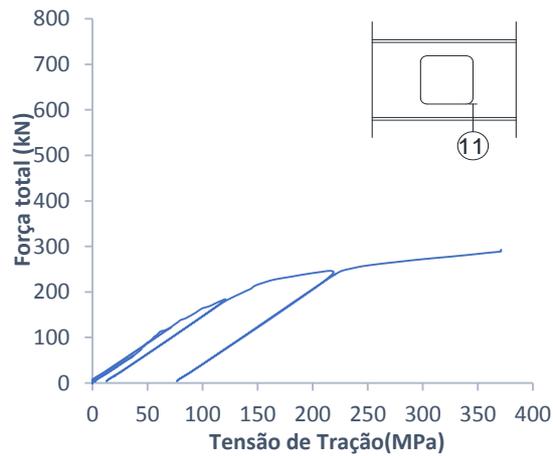


Figura 5.49 Evolução das tensões normais nos cantos da abertura

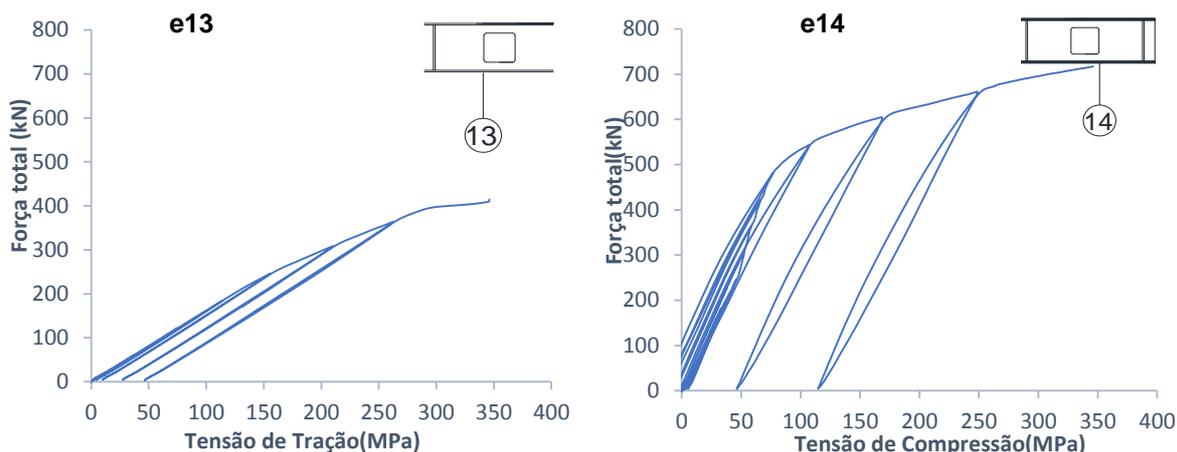


Figura 5.50 Evolução das tensões normais no banzo inferior nas zonas dos cantos da abertura

Nota-se que embora as tensões da alma tenham uma velocidade de crescimento superiores do lado de menor momento, no lado de maior momento é onde as tensões nos banzos atingem a sua velocidade máxima. Isto deve-se ao facto de ser nessas localizações que os efeitos locais induzem tensões com o mesmo sentido que as induzidas pelo momento global.

As rosetas colocadas permitem também a análise das tensões tangenciais máximas, sendo importante avaliar a importância que estas têm na cedência pelo mecanismo de Vierendeel. As tensões tangenciais máximas registadas pelas rosetas em função da carga são apresentadas na figura 5.51.

Refere-se que a máxima tensão tangencial elástica é igual a $\tau_{m\acute{a}x} = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$, sendo que no caso do aço utilizado para a alma é de cerca de 214 MPa.

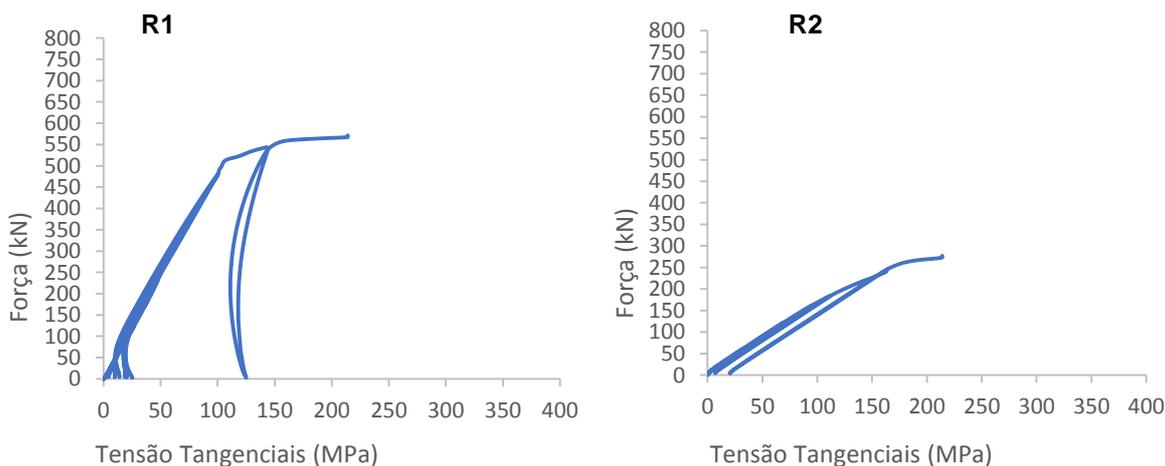


Figura 5.51 Evolução das tensões tangenciais máximas na abertura

Analisando os gráficos percebe-se rapidamente que as tensões tangenciais máximas têm um andamento claramente mais rápido no canto da abertura, do que numa posição entre esta e o banzo.

5.5 Comparação dos resultados obtidos para V1 e V2

Comparando os resultados obtidos em ambos os ensaios, salta rapidamente à vista que a rotura da viga V2 deu-se para um nível de carregamento superior em cerca de 30% relativamente à máxima carga suportada por V1. É visível na figura 5.52, onde estão ilustrados os deslocamentos a meio vão de V1 e V2, que para além deste acréscimo de resistência, os reforços proporcionam também à viga um aumento da sua ductilidade, atingindo um nível de deslocamentos superior na rotura.

Este aumento de ductilidade é também visível tanto no canto da abertura, como a na posição da carga mais perto da abertura. Na figura 5.53 é apresentado um gráfico onde são comparados os deslocamentos na zona d3 de ambas as vigas. Nota-se que embora no final da fase elástica o deslocamento de ambas as vigas é semelhante, quando se dá a rotura a viga V2, esta suporta claramente um nível de deslocamentos superiores aos verificados para a viga V1.

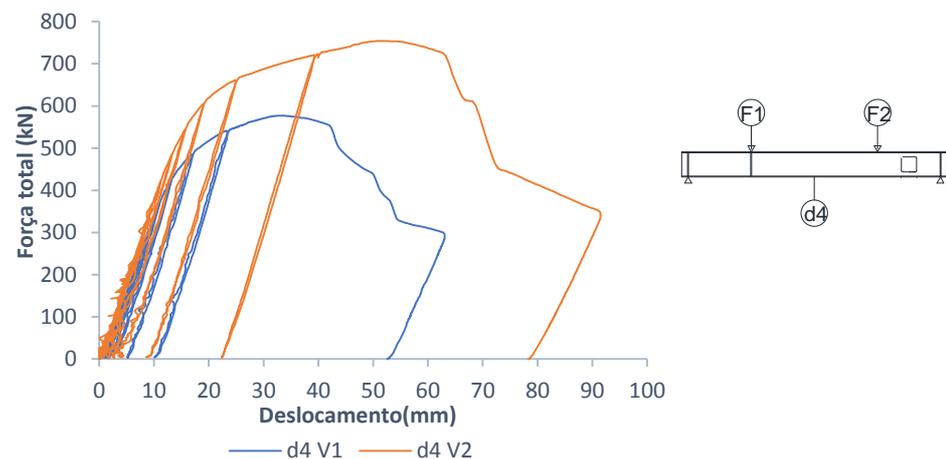


Figura 5.52 Gráfico comparativo do deslocamento d4 para V1 e V2

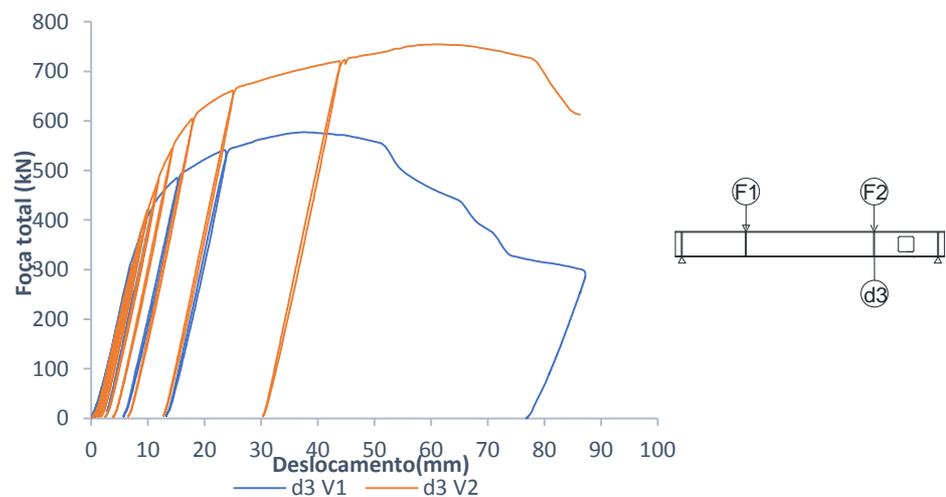


Figura 5.53 Gráfico comparativo do deslocamento d3 para a viga V1 e V2

Para além dos deslocamentos, as diferenças são também visíveis nas deformações apresentadas na zona da abertura quando se deu a rotura, como ilustra a figura 5.54. Nota-se que enquanto na viga V1 as fendas são quase retas, na viga V2 apresentam uma forma mais irregular, iniciando-se aproximadamente no mesmo local, mas contornando seguidamente o reforço.

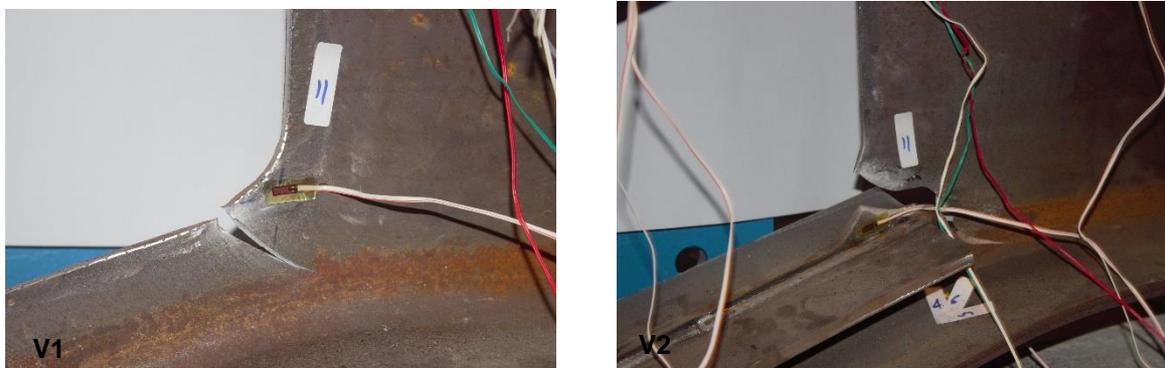


Figura 5.54 Comparação entre as fendas na viga V1 e V2

Relativamente à evolução das tensões principais nos cantos da abertura em ambas as vigas, ilustrada no gráfico da figura 5.55, é possível verificar que em R2, no canto da abertura, o efeito do reforço é pouco visível. Por outro lado, na roseta R1 nota-se que na viga reforçada as tensões têm um andamento claramente mais lento, notando-se claramente a influência do reforço.

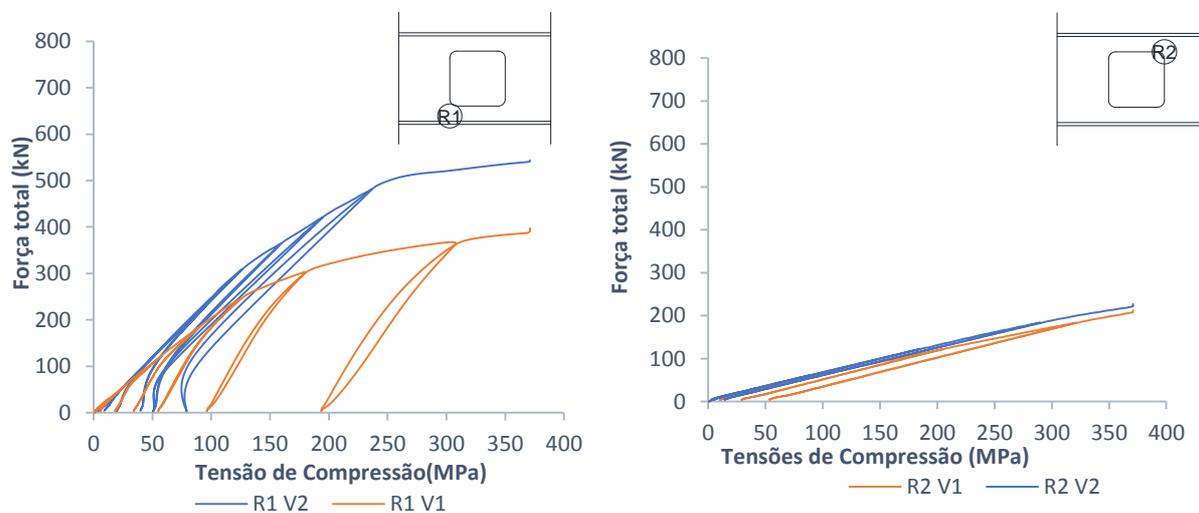


Figura 5.55 Gráficos comparativos do andamento das tensões máximas de compressão nas rosetas para ambas as vigas

Este efeito do reforço é também visível na análise dos extensómetros nos cantos da abertura. Na comparação dos resultados registados nos extensómetros e11 para ambas as vigas, representada na figura 5.56, verifica-se que os resultados obtidos para ambas as vigas foi muito semelhante.

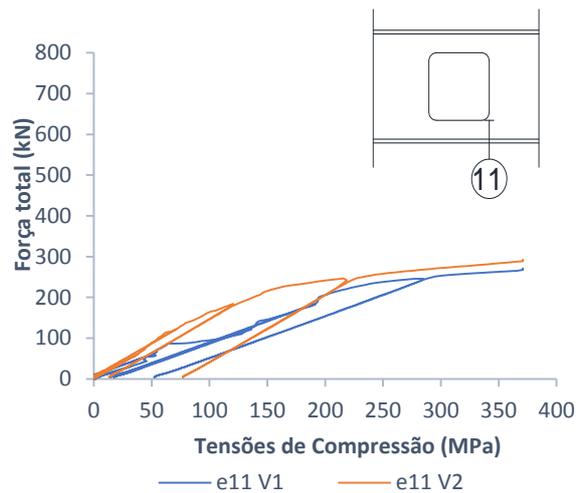


Figura 5.56 Gráficos comparativos do andamento das tensões nos cantos da abertura

5.6 Síntese de resultados

Analisando os resultados obtidos nos ensaios experimentais das vigas de aço V1 e V2, é possível concluir que os objetivos propostos foram alcançados, tendo ambas as vigas atingido a rotura pelo mecanismo de Vierendeel como pretendido.

Verificou-se que os deslocamentos máximos se deram na zona dos cantos da abertura do lado de maior momento, tanto na viga V1 como na viga V2. Este deslocamento tomou, no entanto, uma maior proporção na viga V2, fazendo-se notar o efeito dos reforços neste aumento de ductilidade.

Por fim verificou-se que o efeito dos reforços se faz notar essencialmente na zona entre estes e os banzos. As tensões nos cantos da abertura foram muito semelhantes em ambas as vigas, no entanto, os extensómetros na secção do canto da abertura, mas numa posição intermédia, entre a abertura e o banzo, registam um andamento de tensões consideravelmente mais lento em V2.

6 Modelo numérico vs Ensaio experimental

6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos experimentalmente, e os resultados obtidos através dos modelos numéricos realizados, de modo a verificar a precisão do modelo realizado.

Os modelos comparados são semelhantes aos introduzidos no capítulo 4, com a diferença, no entanto de se terem inserido as características dos materiais obtidas através dos ensaios experimentais, apresentados na tabela 5.2. São feitas comparações a nível de deslocamentos e tensões verificadas para os ensaios e modelos numéricos.

6.2 Viga de aço sem reforço, V1

Analisando os resultados obtidos para a viga de aço V1, tanto no modelo como experimentalmente, conclui-se que o comportamento da viga é muito semelhante em ambas as análises. A figura 6.1 ilustra a comparação do deslocamento em d3 para ambas as análises.

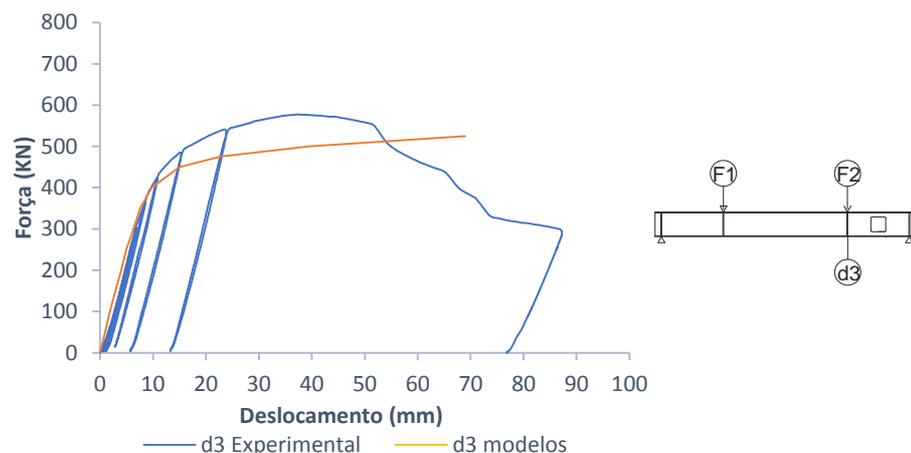


Figura 6.1 Deslocamento d3 modelo vs experimental

Verifica-se que em fase elástica, os deslocamentos obtidos no modelo são muito semelhantes aos deslocamentos obtidos, concluindo-se que até uma carga a rondar os 450 kN o comportamento da viga é corretamente previsto pelo modelo.

No entanto, quando a viga inicia a fase plástica, o comportamento registado para o modelo começa a divergir do comportamento registado experimentalmente. Isto deve-se ao facto de na análise experimental se verifica o endurecimento cinemático do aço, que não é registado pela análise

realizada pelo modelo. Para que o programa registasse esta fase do comportamento do aço seria necessário defini-la num novo parâmetro de rotura.

Relativamente à deformada verificada na análise numérica, foi muito semelhante à que se havia verificado experimentalmente. Verifica-se que a rotura se dá claramente pelos cantos da abertura, como ilustrado na figura 6.2.

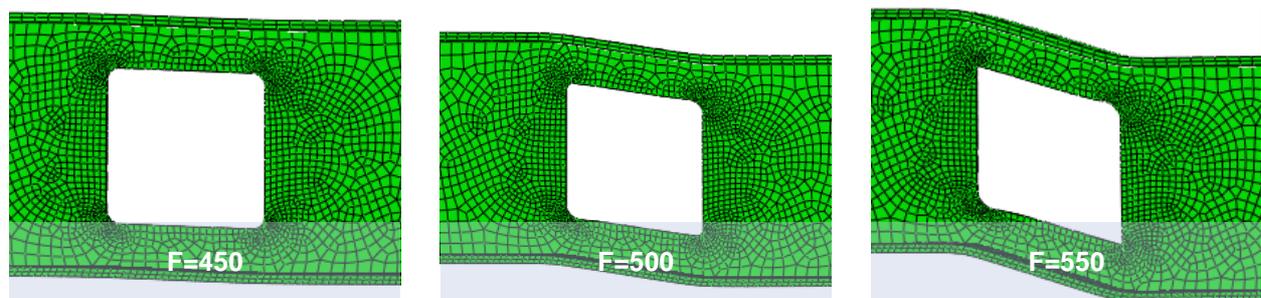


Figura 6.2 Evolução da deformação na abertura da viga V1 obtida através do modelo numérico

Relativamente às tensões registadas no modelo, verifica-se que em fase elástica foram também semelhantes às tensões verificadas experimentalmente. Na figura 6.3 é ilustrada a evolução de tensões verificada no modelo, juntamente com a sua escala.

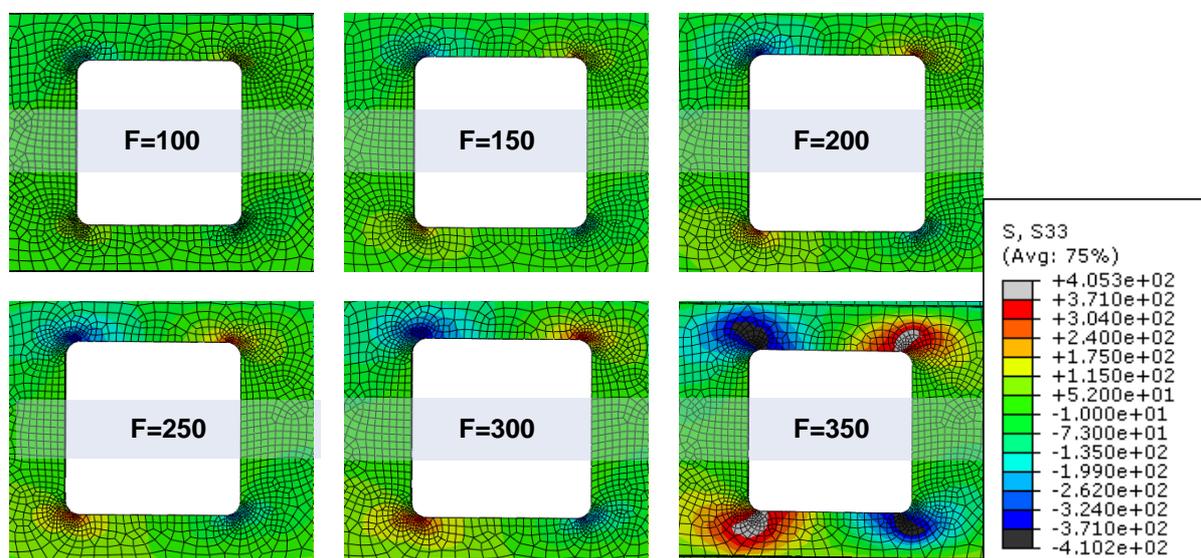


Figura 6.3 Evolução das tensões na abertura registadas no modelo numérico

A comparação entre os resultados obtidos para as tensões, experimentalmente e através do modelo numérico é apresentada na tabela 6.1.

Tabela 6.1 Comparação dos valores de tensão obtidos no modelo numérico e ensaio experimental para a viga V1

F=100				F=150			
Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (Mpa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$	Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (MPa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$
e2(R1)	-24	-30	0,80	e2(R1)	-41	-45	0,91
e5(R2)	-108	-110	0,98	e5(R2)	-167	-165	1,01
e10	133	58	2,29	e10	250	58	4,30
e11	112	100	1,12	e11	155	175	0,89
F=200				F=250			
Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (MPa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$	Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (MPa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$
e2(R1)	-60	-75	0,80	e2(R1)	-83	-110	0,75
e5(R2)	-231	-236	0,98	e5(R2)	-371	-360	1,03
e10	353	140	2,50	e10	371	58	6,40
e11	195	202	0,96	e11	250	350	0,71

Verifica-se que, tirando os valores registados no extensómetro e10, os resultados obtidos são muito semelhantes. As diferenças devem-se maioritariamente ao facto de no modelo numérico terem sido utilizadas as curvas sugeridas pelo EC1993-1-5[], inserindo somente os valores da tensão de cedência e máxima dos aços utilizados nas vigas.

6.3 Viga de aço reforçada V2

Analisando os resultados obtidos para a viga de aço reforçada V2, tanto no modelo como experimentalmente, conclui-se que o comportamento da viga é muito semelhante em ambas as análises. A figura 6.4 ilustra a comparação do deslocamento em d3 para ambas as análises.

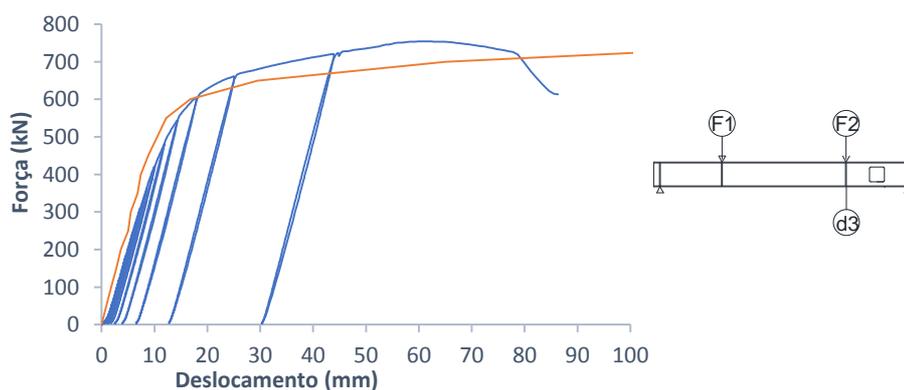


Figura 6.4 Deslocamento d3 modelo vs experimental para a viga V2

Verifica-se que em fase elástica, os deslocamentos obtidos no modelo são muito semelhantes aos deslocamentos obtidos, concluindo-se que até uma carga a rondar os 600 kN o comportamento da viga é corretamente previsto pelo modelo.

No entanto, quando a viga inicia a fase plástica, o comportamento registado para o modelo começa a divergir do comportamento registado experimentalmente. Isto deve-se ao facto de na análise experimental se verifica o endurecimento cinemático do aço, que não é registado pela análise realizada pelo modelo. Para que o programa registasse esta fase do comportamento do aço seria necessário defini-la num novo parâmetro de rotura.

Relativamente à deformada verificada na análise numérica, foi também muito semelhante à que se havia verificado experimentalmente. Verifica-se que a rotura se dá claramente pelos cantos da abertura, como ilustrado na figura 6.5.

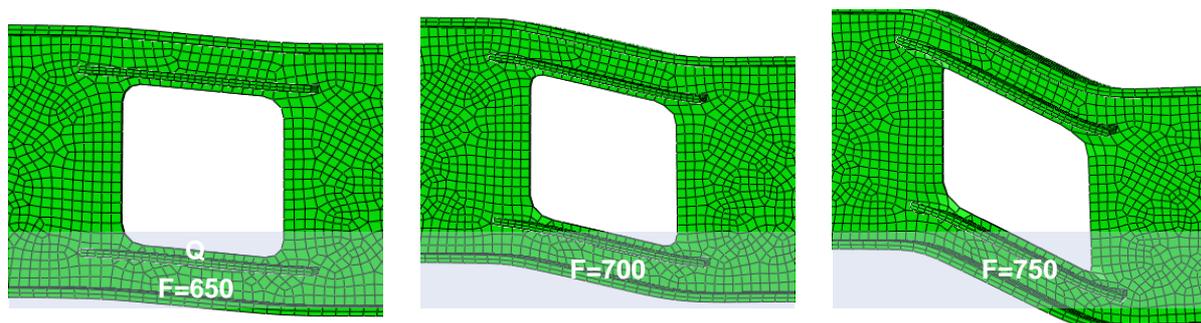


Figura 6.5 Evolução da deformação na abertura da viga V2 obtida através do modelo numérico

Relativamente às tensões registadas no modelo, verifica-se que em fase elástica foram também semelhantes às tensões verificadas experimentalmente. Na figura 6.6 é ilustrada a evolução de tensões verificada no modelo, juntamente com a sua escala.

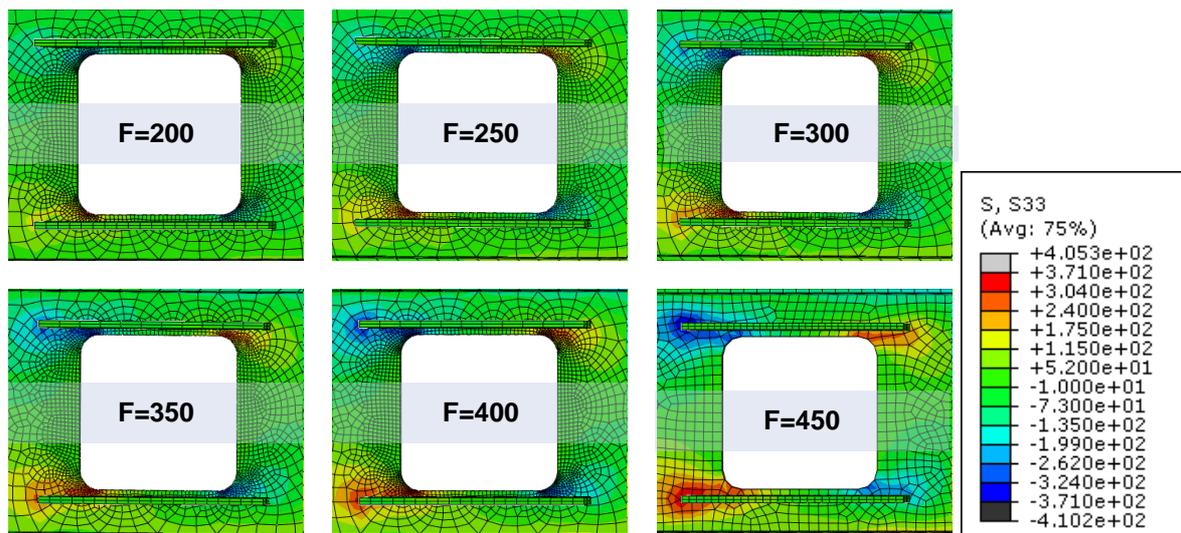


Figura 6.6 Evolução das tensões na abertura registadas no modelo numérico

A comparação entre os resultados obtidos para as tensões, experimentalmente e através do modelo numérico é apresentada na tabela 6.2.

Tabela 6.2 Comparação dos valores de tensão obtidos no modelo numérico e ensaio experimental para a viga V1

F=200				F=250			
Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (Mpa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$	Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (Mpa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$
e2(R1)	19	22	0,86	e2(R1)	22	20	1,10
e5(R2)	-167	-220	0,76	e5(R2)	-205	-290	0,71
e10	-	-24	-	e10	-	-3	-
e11	150	138	1,09	e11	231	210	1,10
F=300				F=350			
Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (Mpa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$	Posição	σ_{Exp} (MPa)	σ_{Num} (Mpa)	$\sigma_{Exp}/\sigma_{Num}$
e2(R1)	-94	-73	1,29	e2(R1)	-116	-80	1,45
e5(R2)	-371	-300	1,24	e5(R2)	-371	-371	1,00
e10	-	16	-	e10	-	38	-
e11	371	280	1,33	e11	371	371	1,00

Verifica-se que os resultados obtidos são muito semelhantes. As diferenças devem-se maioritariamente ao facto de no modelo numérico terem sido utilizadas as curvas sugeridas pelo EC1993-1-5 [13], inserindo somente os valores da tensão de cedência e máxima dos aços utilizados nas vigas.

Uma outra razão do erro é o facto de os resultados obtidos nos ensaios de tração do aço utilizado para os reforços não terem sido considerados válidos, sendo que, portanto, o aço utilizado nesses elementos tem características diferentes das inseridas na formatação do modelo.

6.4 Síntese dos resultados

Verifica-se que os resultados obtidos através dos modelos numéricos realizados são próximos dos resultados obtidos experimentalmente. Verifica-se que, principalmente em fase elástica, as curvas força deslocamento obtidas através do modelo são quase coincidentes com as curvas obtidas experimentalmente para ambas as vigas.

Nota-se que após entrar em fase plástica, devido ao facto de não se terem inserido nos modelos as curvas tensão-deformação exatas do material, e ao facto de o software não estar programado com um critério de rotura que considere o endurecimento cinemático do aço, a curva obtida experimentalmente apresenta uma maior rigidez que os modelos numéricos.

Relativamente às tensões também se nota alguma divergência entre os resultados obtidos em ambas as análises, principalmente no extensómetro e10 da viga V1 que apresentou resultados de tensão muito superiores aos obtidos no modelo numérico.

Na viga V2 a diferença entre os resultados obtidos por ambos os métodos foi menos evidente. Há ainda assim algum erro que se pode dever a imperfeições geométricas do perfil, ao facto de o aço utilizado nos reforços não ter sido ensaiado validamente à tração.

7 Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

Tendo em conta os objetivos inicialmente propostos de analisar e melhor compreender o comportamento de vigas de aço quando submetidas à rotura pelo mecanismo de Vierendeel, considera-se que estes foram atingidos de forma satisfatória. Os modelos numéricos desenvolvidos apresentaram uma boa correlação com o que foi verificado nos ensaios experimentais, tendo-se em ambos os casos verificado a rotura pelo modo pretendido.

O processo de calibração dos modelos foi concluído com resultados satisfatórios, o que ficou demonstrado na comparação posterior deste com os ensaios experimentais realizados. Os ensaios decorreram de acordo com o que seria esperado, evidenciando ambos os efeitos locais, e sendo também evidente a eficiência dos reforços colocados, assim como o aumento de ductilidade por estes proporcionado.

Dos resultados obtidos na análise experimental de ambas as vigas concluiu-se que:

- i. O mecanismo de Vierendeel, que consiste na formação de rótulas plásticas nos cantos da abertura, foi de facto preponderante no comportamento de ambas as vigas, notando-se um claro acréscimo de deformações na zona da abertura, que ocorreram antes da secção de meio vão atingir a cedência;
- ii. Os reforços proporcionaram um claro aumento da resistência da estrutura, notando-se que embora a carga na rotura seja superior, o nível de deslocamentos é semelhante em ambas as vigas, notando-se que o acréscimo de rigidez proporcionado pelos reforços na zona da abertura é notado em toda a viga;
- iii. Na abertura reforçada, a secção crítica é não só a zona da abertura, mas também a zona que é adjacente aos reforços, sendo que suporta as tensões resistidas pelos reforços, que são transmitidas para a alma da viga nessas zonas.

Da análise comparativa entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados numéricos, conclui-se que:

- i. O modelo numérico simulou dentro dos parâmetros aceitáveis o comportamento da viga quando esta se encontrava em fase elástica, faltando, no entanto, a definição de um modo de rotura do material que tivesse em conta o endurecimento cinemático do aço, verificado no ensaio experimental, mas que não se verificou no modelo numérico;
- ii. Os resultados obtidos para as tensões são maioritariamente próximos dos resultados obtidos experimentalmente, notando-se, no entanto, alguma diferença, que se deve ao facto de os cordões de ângulo não terem sido modelados na análise numérica, e imperfeições do material.

7.2 Desenvolvimentos futuros

De modo a complementar o estudo realizado neste trabalho, são sugeridas as seguintes análises como desenvolvimentos futuros:

- i. Realização dos ensaios laboratoriais nas vigas mistas modeladas e já betonadas, de modo a melhor compreender a influencia da laje de betão, e se poder comparar os resultados obtidos com os obtidos para as vigas de aço, completando assim a análise.
- ii. Estudo da influência da força de corte longitudinal e do grau de conexão no comportamento de vigas com abertura na alma, de modo a perceber a importância destes parâmetros na análise de vigas mistas com abertura.

8 Bibliografia

- [1] REDWOOD R. G. *Design of I-Beams with web perforations. Beams and beams columns stability and strength*, chapter 4. Editado por R. Narayanan, Editora: Applied Science Publishers, pp. 95-133, 1983.
- [2] CHUNG, K. F., LIU, T. C. H, KO, A. C. H., *Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings*, 2001. Journal of Constructional Steel Research. Hong Kong: p. 467-490, 2001.
- [3] CHUNG, K. F., LIU, T. C. H, KO, A. C. H., *Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve*. Journal of Constructional Steel Research. p. 1177-1200, 2003.
- [4] CLAWSON, W. C., DARWIN, D. *Composite Beams with Web Openings*, p. 209. Lawrence, Kansas, 1980.
- [5] REDWOOD R. G., CHO, S. H. *Design of steel and composite beams with web openings*. Journal of Constructional Steel Research, p. 23–41, 1993.
- [6] FAHMY, E. H. Analysis of composite beams with rectangular web openings. Journal of Constructional Steel Research, p. 47–62, 1996.
- [7] CHUNG, K. F., KO, C. H., & WANG, A. J. *Design of steel and composite beams with web openings-Verification using finite element method*. Steel and Composite Structures, Vol 5, p. 203–233, 2004.
- [8] REDWOOD, R. G., & POUMBORAS, G. *Test of composite beams with web holes*. Canadian Journal of Civil Engineering, p.713–721, 1983.
- [9] REDWOOD, R. G., & WONG, P. K. *Web Holes in Composite Beams with steel deck*, Ontario, Canada, 1982.
- [10] DONAHEY, R. C., & DARWIN, D. *Performance and design of composite beams with web openings*, p. 267. Lawrence, Kansas, 1986.
- [11] BERNARDINO, P. J. C. *Influência de Aberturas nas Almas de Vigas de Aço*, 2013, IST
- [12] ENV 1992-1-1: 2004, *Design of Concrete Structures-Part 1-1*. General Rules and Rules for Buildings,CEN. European Committee for Standardization, 2004.
- [13] ENV 1993-1-1: 2005, *Design of Steel Structures-Part 1-1*. General Rules and Rules for Buildings,CEN. European Committee for Standardization, 2005.

- [14] SYSTÉMES, D. *Analysis User's Manual 5 vol*, 2011.
- [15] ENV 1994-1-1: *Design of Composite Steel and Concrete Structures-Part 1-1*. Em General Rules and Rules for Buildings, CEN . European Committee for Standardization, 2004.
- [16] CEN, EN ISO 6892-1: *Metallic materials — Tensile Testing*, 2015.
- [17] CALADO, L., & SANTOS, J. *Estruturas Mistas de Aço e Betão* (Instituto Superior Técnico, Ed.) (1ª Edição., p. 568). IST Press, 2010.
- [18] DARWIN, D. *Design of steel and composite beams with web openings*, AISC – American Institute of Steel Construction. Lawrence, EUA, 2003.
- [19] NETO, T. M. C. *Análise e Verificação da Segurança de Vigas Mistas com Aberturas na Alma*, 2014.
- [20] Wang, T., & Hsu, T. T. C. (2001). *Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models*. Computers and Structures, 2781–2791.

