



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura

Estado de Arte sobre Ensaios de Vigas de Betão Estrutural sujeitas à Torção

Mário Nelson Ferreira Filipe

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Jorge Miguel de Almeida Andrade

Covilhã, junho de 2013

Agradecimentos

Expresso o meu sincero agradecimento às pessoas, que das mais diversas formas contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível.

Quero agradecer ao Professor Doutor Jorge Miguel de Almeida Andrade, orientador científico deste trabalho, pelo constante apoio, disponibilidade e por todo o conhecimento transmitido ao longo do tempo sob cuja orientação tenho trabalhado.

Quero agradecer também ao Professor Doutor Luís Filipe Almeida Bernardo pela disponibilidade e apoio demonstrado durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos e família mais próxima por todo o encorajamento e apoio demonstrado.

Um especial agradecimento aos meus pais, pelo apoio incondicional e esforço que fizeram para que pudesse alcançar esta etapa.

Resumo

Neste trabalho estuda-se o “*estado de arte*” sobre ensaios experimentais de vigas de betão estrutural à Torção. O estudo realizado tem por objetivo efetuar uma base bibliográfica significativa, relativa a vigas de betão estrutural ensaiadas à Torção. Esta compilação é apresentada na forma de uma Base de Dados de forma a simplificar a sua consulta.

Para tal, realizou-se uma recolha bibliográfica através de uma ampla pesquisa. Foram consideradas para pesquisa, vigas de seção cheia e de seção vazada. A pesquisa foi dividida em 3 fases distintas. Primeiramente, foram pesquisados ensaios experimentais de vigas à Torção Pura. De seguida, foram pesquisados ensaios experimentais de vigas à Torção com Interação de Esforços. Por fim, foram pesquisados ensaios experimentais de vigas à Torção com Pré-Esforço.

Após a realização da pesquisa, organizou-se e estruturou-se o conjunto de estudos compilados, relativos a ensaios de vigas à Torção, por forma a construir uma Base de Dados. Para isso, foi elaborado e devidamente preenchido, um ficheiro em formato Excel, que caracteriza-se individualmente, mas de forma homogénea, toda a informação relativa ao ensaio de cada viga do conjunto total de vigas.

É realizado um estudo estatístico ao conjunto de vigas compiladas do ponto de vista global e posteriormente, é avaliada a evolução cronológica dos estudos recolhidos sobre ensaios experimentais à Torção, realizados ao longo das últimas décadas. Do ponto de vista global, são analisados os tipos de estudos realizados, assim como o tipo seção utilizado. Realizaram-se também estudos complementares, referentes ao número de vigas com betão de alta resistência e à composição material apresentada pelas vigas compilados.

Palavras-chave

Torção, Ensaio experimental, Viga, Betão estrutural, Base de dados

Abstract

The “state of art” on experimental tests of structural concrete beams under torsion is studied in this thesis. This study aims to make a significant background literature on structural concrete beams tested under torsion. This compilation is presented in the form of a database to simplify an inquiry.

For this purpose, a bibliography collection was carried out by extensive research. Were considered for research, solid section beams and hollow section beams. The research was divided into three distinct phases. First, were surveyed beams tested under Pure Torsion. Then were surveyed beams with Combined Load. Finally, were surveyed beams tested under Torsion with Pre-Stress.

After the research, the group of studies compiled for beams tested under Torsion, was organized and structured, in order to build a database. For this, was developed and filled in, a file in excel format, which define individually, but in a homogeneous way, all information concerning the test of each beam of the compiled group.

It was conducted a statistical study for the set of beams compiled, in a global point of view and a study on the chronological evolution of experimental studies collected on Torsion, conducted over the last decades. From the global point of view, were analyze the types of experimental study, as well as the section type used. There were also additional studies regarding the number of beams with high strength concrete and material composition presented by beams compiled.

Keywords

Torsion, Experimental study, Beam, Reinforced concrete, Database

Índice

Capítulo I - Enquadramento e Objetivos.....	1
I.1. Introdução à Problemática da Torção	1
I.1.1. Notas históricas.....	1
I.1.2. Classificação Fundamental dos Efeitos de Torção	5
I.1.3. Exemplos de Casos Práticos de Torção em Estruturas	7
I.1.4. Comportamento à Torção de Secções Cheias e Vazadas	9
I.2. Justificação e Objetivos do Trabalho	11
I.3. Organização do documento.....	11
Capítulo II - Procedimentos Experimentais e tratamento de resultados.....	13
II.1. Introdução	13
II.2. Descrição do Programa Experimental.....	13
II.2.1. Caracterização dos Modelos de Ensaio	13
II.2.2. Métodos de Ensaio.....	17
II.2.3. Medições a efetuar	20
II.2.4. Operações a realizar no Modelo de Ensaio.....	23
II.2.4.1. Operações anteriores ao ensaio.....	23
II.2.4.2. Operações posteriores ao ensaio	23
II.3. Análise Global dos Resultados Experimentais	24
II.3.1. Evolução do Momento Torsor com a Deformação Angular Média	24
II.3.2. Evolução das Extensões.....	26
II.3.2.1. Evolução das Extensões no Betão	26
II.3.2.2. Evolução das Extensões nas Armaduras.....	27
II.3.3. Evolução da Força na Armadura de Pré-Esforço com a Deformação Angular 28	
II.3.4. Evolução das Rotação ao longo do Eixo das Vigas.....	29
II.3.5. Caracterização Geral do Estado das Vigas a seguir ao Ensaio	31
II.3.5.1. Análise do registo fotográfico das vigas após o Ensaio.....	31
II.3.5.2. Análise do estado de fissuração das vigas após o ensaio.....	32
Capítulo III - Criação da Base de Dados	35
III.1. Introdução.....	35
III.2. Pesquisa efetuada para a construção da Base de Dados	36
III.2.1. Introdução	36
III.2.2. Estruturação prévia da pesquisa	36
III.2.3. Tipo de Dados pretendidos para a pesquisa	38
III.2.4. Realização da pesquisa.....	41

III.2.5.	Conjunto de estudos pretendidos	41
III.3.	Metodologia seguida na construção da Base de Dados	45
III.3.1.	Estruturação da Base de Dados	45
III.3.2.	Esboço para o Ficheiro de Dados da Viga (ficheiro FDV).....	50
III.4.	Definição e apresentação do Ficheiro de Dados da Viga (ficheiro FDV). ...	52
Capítulo 4 -	Apresentação dos Resultados Recolhidos	81
IV.1.	Introdução	81
IV.2.	Análise Global da Base de Dados	82
IV.2.1.	Análise Global dos Dados Recolhidos	82
IV.2.2.	Estudos Complementares (analisados de forma global).....	86
IV.3.	Análise cronológica dos Dados Recolhidos.....	89
IV.3.1.	Evolução Cronologia para a Globalidade das Vigas	89
IV.3.2.	Evolução Cronologia dos Estudos Recolhidos.....	92
Capítulo V -	Conclusões e Trabalhos Futuros	97
V.1.	Conclusões.....	97
V.2.	Recomendações para trabalhos futuros:	98
Referências	99
Anexos	105
Anexo I –	Ficheiro FDV para a viga 1.5	107
Anexo II –	Ficheiro FDV para a viga 5.1	111

Lista de Figuras

Figura I.1 - Processo de cravação de estacas parafuso [1]	1
Figura I.2 (a) - Vista da Ponte de Waterloo [32]	2
Figura I.2 (b) - Corte transversal do tabuleiro da Ponte de Waterloo [20]	2
Figura I.3 (a) - Vista do caixão triangular para suporte da laje em consola no Royal Festival Hall [44]	3
Figura I.3 (b) - Vista do balcão em consola no Royal Festival Hall [44]	3
Figura I.4 - Rotura frágil por torção de uma viga num edifício [31]	4
Figura I.5 - Exemplo de modelação por elementos finitos com recurso a software para análise estrutural [6]	4
Figura I.6 (a) e (b) - Exemplo de estrutura com torção de compatibilidade [6].....	6
Figura I.7 (a) e (b) - Exemplo de estrutura com torção de equilíbrio [6].....	6
Figura I.8- Torção circulatoria (a) e Torção com empenamento (b) [6]	7
Figura I.9 - Laje de cobertura em consola com continuidade [11].....	7
Figura I.10 (a) e (b) - Vigas com carregamento excêntrico [6]	8
Figura I.11 - Vigas com apoios indiretos [6].....	8
Figura I.12 - Escada em curva [11]	8
Figura I.13 (a) e (b) - Viaduto rodoviário de Linn Cove [11]	9
Figura I.14 - Influência da espessura da parede no comportamento á torção pura [8]	10
Figura II.1 - Exemplos para fixação de atuador eletromecânico a) [11] e b) [51].....	17
Figura II.2 - dispositivo de torção que só introduz esforços de torção a) [11], b) [17] e c) [15]	18
Figura II.3 - dispositivo de torção que permite transmissão de vários esforços [4]	19
Figura II.4 - Exemplo para sistema de apoio a) [11] e b) [27]	19
Figura II.5 - Exemplo de célula de carga [33].....	20
Figura II.6 - Exemplo para medição de rotações (a) [27] e b) [28]	21
Figura II.7 - Instrumentação de uma viga com transdutores de deslocamento [11].	21
Figura II.8 - Colocação e proteção dos extensómetros em armadura [11].....	22
Figura II.9 - Colocação de pontos alvo de cobre na face de uma viga [27].....	22
Figura II.10 - colocação dos LVDTs na superfície da viga [51]	23
Figura II.11 - Exemplo de curva tipo Momento Torsor vs Deformação Angular Média [18]	24
Figura II.12 - Faseamento da Curva Torção vs Rotação [6].....	25
Figura II.13 - Exemplo de Curva Extensão vs Torção [47]	26
Figura II.14 - Exemplo de curva tipo Extensão na armadura vs Deformação Angular Média [11]	27
Figura II.15 - Exemplo de curva tipo Extensão na armadura vs momento Torsor atuante [42]	28
Figura II.16 - Exemplo de curva Força na Armadura de Pré-Esforço vs Deformação Angular Média [11]	29
Figura II.17 - Exemplo da evolução das rotações ao longo do eixo da viga para uma viga ensaiada [11]	30

Figura II.18 - Registo fotográfico de vigas ensaiadas por Alnuaimi, Al-jabri e Hago[4].	31
Figura II.19 - Registo fotográfico de vigas ensaiadas por Okay e Engin[46].	31
Figura II.20- Exemplo do registo da fissuração para uma viga ensaiada por Fang, Shiau, Shiu e Young[18].	32
Figura II.21 - Exemplo do registo da fissuração num programa CAD, para uma viga ensaiada por Bernardo[11].	32
Figura III.1 - Seção Cheia	37
Figura III.2 - Seção Vazada	37
Figura III.3 - Exemplo de Caracterização Geométrica de Viga [42].	39
Figura III.4 - Exemplo de Quadro Resumo das Propriedades Mecânicas para armaduras [29].	39
Figura III.5 - Exemplo de Gráfico Torção vs. Rotação para um conjunto de vigas [15]	40
Figura III.6 - Exemplo de Quadro Resumo para os resultados dos ensaios [29]	40
Figura III.7 - Campos de pesquisa para a Base de Dados On-line Elsevier [34]	41
Figura III.8 - Folha 1; Keywords	52
Figura III.9 - Quadro 1.1 do FDV.	53
Figura III.10 - Quadro 1.1 preenchido para a viga 10 do estudo 5	53
Figura III.11 - Folha 2; General Information	54
Figura III.12 - Quadro 2.1 do FDV	54
Figura III.13 - Quadro 2.1 preenchido para a viga 1 do estudo 11	55
Figura III.14 - Quadro 2.2 do FDV	55
Figura III.15 - Quadro 2.2 preenchido para a viga 1 do estudo 11	55
Figura III.16 - Quadro 2.3 do FDV	56
Figura III.17 - Quadro 2.3 do FDV	56
Figura III.18 - Quadro 2.3 preenchido para a viga 1 do estudo 11	57
Figura III.19 a) - Quadro 2.4 do FDV	57
Figura III.19 b) - Quadro 2.5 do FDV	57
Figura III.20 a) - Quadro 2.6 do FDV	58
Figura III.20 b) - Quadro 2.7 do FDV	58
Figura III.21 - Quadro 2.4 preenchido para a viga 1 do estudo 11	58
Figura III.22 - Folha 3; Geometric Properties	59
Figura III.23 - Quadro 3.1 do FDV	59
Figura III.24 - Quadro 3.1 preenchido para a viga 10 do estudo 5	60
Figura III.25 - Quadro 3.2 do FDV	61
Figura III.26 - Quadro 3.2 preenchido para a viga 10 do estudo 5	62
Figura III.27 - Quadro 3.3 do FDV	62
Figura III.28 - Quadro 3.3 preenchido para a viga 3 do estudo 1	63
Figura III.29 - Quadro 3.4 do FDV	63
Figura III.30 - Quadro 3.4 preenchido para a viga 3 do estudo 11	64
Figura III.31 - Quadro 3.5 do FDV	64
Figura III.32- Quadro 3.5 preenchido para a viga 4 do estudo 8	65
Figura III.33 - Folha 4; Mechanical Characteristics of Concrete	66
Figura III.34 - Quadro 4.1 do FDV	66
Figura III.35 - Quadro 4.1 preenchido para a viga 10 do estudo 2	67
Figura III.36 - Folha 5; Mechanical Characteristics of Reinforcement	67
Figura III.37 - Quadro 5.1 do FDV	68

Figura III.38 - Quadro 5.1 preenchido para a viga 11 do estudo 4	68
Figura III.39 - Quadro 5.2 do FDV	69
Figura III.40 - Quadro 5.2 preenchido para a viga 11 do estudo 4	69
Figura III.41 - Quadro 5.3 do FDV	70
Figura III.42 - Quadro 5.3 preenchido para a viga 3 do estudo 1	70
Figura III.43 - Quadro 5.4 do FDV	71
Figura III.44 - Quadro 5.5 preenchido para a viga 3 do estudo 11	71
Figura III.45 - Quadro 5.5 do FDV	72
Figura III.46 - Quadro 5.6 preenchido para a viga 2 do estudo 8	72
Figura III.47 - Folha 6; Numerical Data	73
Figura III.48 - Quadro 6.1 do FDV	73
Figura III.49 - Quadro 6.2 do FDV	74
Figura III.50 - Quadro 6.2 preenchido para a viga 10 do estudo 5	74
Figura III.51 - Gráfico Modelo do FDV	75
Figura III.52 - Quadro 6.1 preenchida para a viga 10 do estudo 5	75
Figura III.53 - Folha 7; Key Points.....	76
Figura III.54 - Quadro 7.1 do FDV	76
Figura III.55 - Quadro 7.1 preenchida para a viga 10 do estudo 5	78
Figura III.56 - Folha 8 - Comments.....	78
Figura III.57 - Quadro 8.1 do FDV	78
Figura III.58 - Quadro 8.2 do FDV	79
Figura III.59 - Quadro 8.1 e 8.2 preenchidos para a viga 20 do estudo 2	79
Figura IV.1 - Gráfico 1: Análise Global da Distribuição por Tipo de Ensaio realizado	83
Figura IV.2 - Gráfico 2: Análise Global da Distribuição por Tipo de Seção de Viga	83
Figura IV.3 - Gráfico 3: Análise Global da Distribuição por Tipo de Ensaio para Vigas de Seção Cheia	84
Figura IV.4 - Gráfico 4: Análise Global da Distribuição por Tipo de Ensaio para Vigas de Seção Vazada	84
Figura IV.5 - Gráfico 5: Análise Global para a Base de Dados.....	85
Figura IV.6 - Gráfico 6: Distribuição Global para Vigas de Resistência Normal e Alta Resistência	87
Figura IV.7 - Gráfico 7: Análise à Composição Material das Vigas.....	88
Figura IV.8 - Gráfico 8: Número de Vigas ensaiadas ao longo do Tempo	91
Figura IV.9 - Gráfico 9: Evolução Cronológica da Base de Dados.....	91
Figura IV.10 - Gráfico 10: Evolução Cronológica dos Estudos Recolhidos	94

Lista de Quadros

Quadro III.1 - Faseamento da Pesquisa	38
Quadro III.2 - “ <i>Estudos Pretendidos</i> ” para a Base de Dados.	42
Quadro III.3 - “ <i>Estudos Obtidos</i> ” para a Base de Dados.....	45
Quadro III.4 - Caracterização dos “ <i>Estudos Obtidos</i> ”	46
Quadro III.5 - Tipo de ensaio e tipo de seção para o conjunto de “ <i>Estudos Obtidos</i> ”.....	47
Quadro III.6 - Número de Vigas ensaiadas para o conjunto de “ <i>Estudos Obtidos</i> ”	48
Quadro IV.1 - Lista Global da Base de Dados	82
Quadro IV.2- Análise Global Ensaio vs. Seção.....	83
Quadro IV.3- Análise Global para a Classe de Resistência do Betão	86
Quadro IV.4- Análise à Composição Material das Vigas	87
Quadro IV.5- Lista Cronológica da Base de Dados.....	89
Quadro IV.6- Quadro Análise Cronológica Ensaio vs. Seção	90
Quadro IV.7- Análise Cronológica aos Estudos Obtidos.....	92

Capítulo I - Enquadramento e Objetivos

I.1. Introdução à Problemática da Torção

I.1.1. Notas históricas

No século XX, o betão armado passou a desempenhar um papel mais relevante na construção de estruturas. Contudo, foi apenas na década de 60 que a torção passou a ser considerada para os projetistas como um dos esforços relevantes para o dimensionamento. Era assumido pelos projetistas que estes esforços eram absorvidos pela redistribuição interna de esforços e pela elevada reserva de resistência que os coeficientes de segurança garantiam. Isto porque, o dimensionamento se baseava no método das tensões admissíveis para o material, proporcionando um elevado grau de segurança, ao contrário do método atual, mais económico e realista, que se baseia nos estados limites e no comportamento plástico dos materiais. Refira-se que, nessa altura, os documentos normativos de dimensionamento, em geral, não incorporavam disposições para o dimensionamento de secções de betão armado à torção.

No entanto, já existiam alguns casos considerados excecionais, em que a torção era considerada relevante para o dimensionamento. Exemplo disso seria as estacas de betão armado pré-fabricado que devido ao processo de cravação utilizado, em que eram comprimidas e torcidas por meios mecânicos, eram designadas por estacas parafuso (figura I.1). Como a torção aplicada era conhecida era adotada uma armadura helicoidal transversal, calculada com base em literatura especializada e na capacidade resistente destes elementos obtida muitas vezes através de ensaios experimentais.



Figura I.1 - Processo de cravação de estacas parafuso [1]

Para além deste caso particular, em 1954, Armstrong [7] apresenta dois casos reais de estruturas onde os esforços de torção foram considerados primordiais no dimensionamento. Tais casos referem-se aos projetos da Ponte de Waterloo (Londres) (Figura 1.2 (a)) e do Royal Festival Hall (Londres) (Figura 1.3(a)).

No caso da Ponte de Waterloo, foi adotado pelo projetista, Cuerel em 1948 [20], um tabuleiro com duas vigas em caixão, com três células cada (Figura 1.2 (b)). Devido às cargas excêntricas consideradas em projeto, que provocavam momentos torsores elevados, existiu a necessidade de se efetuar ensaios para verificar se o fato rigidez era coincidente com o previsto pela teoria de St. Venant. Os ensaios confirmaram essa relação.



Figura 1.2 (a) - Vista da Ponte de Waterloo [32]

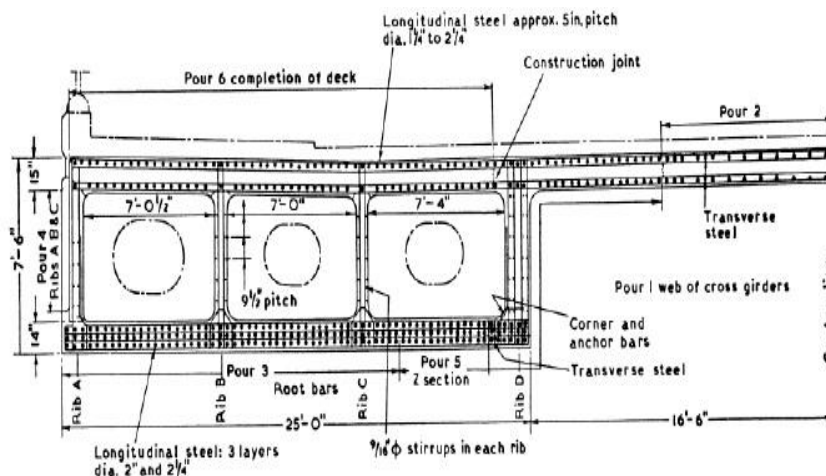


Figura 1.2 (b) - Corte transversal do tabuleiro da Ponte de Waterloo [20]

Para o Royal Festival Hall, foi concebido e dimensionado uma viga em caixão triangular, para suporte de uma laje em consola (figura 1.3 (b)), que provocava também elevados momentos

torsores. Que se tenha conhecimento, o dimensionamento baseou-se apenas em bibliografia especializada, não havendo registo de ensaios realizados [44].

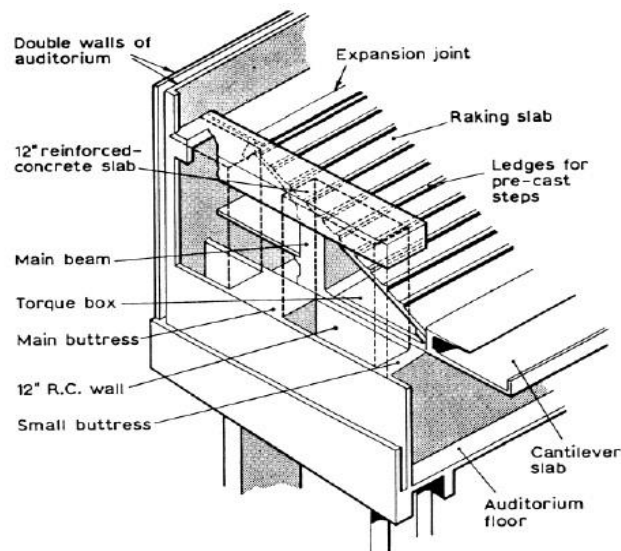


Figura I.3 (a) - Vista do caixão triangular para suporte da laje em consola no Royal Festival Hall [44]



Figura I.3 (b) - Vista do balcão em consola no Royal Festival Hall [44]

Estes dois casos práticos, despertaram a atenção da comunidade técnica e científica para a necessidade de estudar-se convenientemente a problemática da torção em elementos de betão armado.

Devido às hipóteses simplificadoras adotadas para o dimensionamento antes da década de 60, do século XX, existia a possibilidade de serem observados casos problemáticos devido a resistência insuficiente da estrutura a esforços de torção elevados ou deformação e/ou fissuração pronunciados. Contudo, são raros os casos documentados. Hsu, em 1984 [31], descreve um caso registado na Florida (USA) (figura I.4), de uma rotura de uma viga da estrutura de um parque de estacionamento. A superfície de rotura é denunciada exteriormente por uma única fenda helicoidal, característica de uma rotura por insuficiência de armadura de torção.



Figura I.4 - Rotura frágil por torção de uma viga num edifício [31]

Segundo Bernardo [11], em 2003, estes tipos de casos são uma consequência do cálculo simplificativo adotado para o dimensionamento em estruturas que coincidem com o desenvolvimento da arquitetura moderna, após a Segunda Guerra Mundial. As estruturas, particularmente os edifícios, possuíam formas e configurações mais irregulares, o que levava muitas vezes a carregamentos excêntricos. É de referir também, a dificuldade sentida na altura pelos projetistas, em calcular os efeitos torsionais em estruturas estaticamente indeterminadas, dificuldade agravada com o desenvolvimento da arquitetura moderna, devido á maior complexidade das estruturas. Contudo, simultaneamente, dá-se a evolução das aplicações em computadores para a análise estrutural. Esta evolução veio simplificar a análise estrutural permitindo ao projetista calcular com facilidade estruturas mais complexas. Hoje em dia, a modelação estrutural através de uma aplicação computacional é prática corrente no projeto de estruturas. Como exemplo, apresenta-se a Figura I-5 de um modelo de cálculo para uma ponte com desenvolvimento curvo, em que os esforços de torção foram certamente importantes para o dimensionamento de muitos elementos principais.

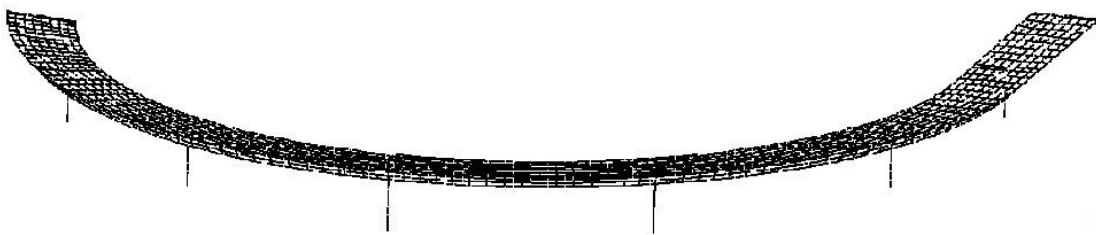


Figura I.5 - Exemplo de modelação por elementos finitos com recurso a software para análise estrutural [6]

Com vista a desenvolver um procedimento adequado ao dimensionamento de estruturas com esforços de torção, foram criadas comissões dedicadas ao estudo e investigação deste problema. De referir, a Comissão 438 do American Concrete Institute, criada em 1958, e o Comité Européen du Béton, que o extenso estudo desenvolvido culminou com a elaboração,

em 1978, do código europeu (MC 78), já baseado na teoria dos Estados Limites. Este código, deu origem ao Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) em 1983. Contudo, ainda existe a necessidade de continuar o estudo e investigação, pois ainda existem grandes lacunas do ponto de vista normativo, sobretudo no cálculo e verificação do comportamento á torção em serviço de vigas de betão armado no estado fissurado.

Apesar de na prática os esforços de torção surgirem em combinação com outros esforços, as normas indicam que o dimensionamento deve ser feito separadamente, somando-se e sobrepondo-se as armaduras resultantes. Este processo revela a importância da análise da torção pura, para uma melhor compreensão do seu funcionamento e posterior dimensionamento.

Na seção seguinte serão analisados os diferentes graus de importância para o dimensionamento de estruturas, que os esforços de torção podem ter.

I.1.2. Classificação Fundamental dos Efeitos de Torção

Nos casos práticos em que o esforço de torção deve ser considerado na análise estrutural, deve-se atender às condições em que esse esforço surge na estrutura, e às consequências de ser desprezado no procedimento de verificação de segurança, assim como a forma como a seção vai absorver esse esforço.

Designa-se por Torção de Compatibilidade aquela que resulta para um elemento de uma estrutura em virtude das condições de compatibilidade de deformação (Figura I.6(a)). Se a resistência desse elemento a este tipo de torção for nula, existe a possibilidade de ocorrerem grandes deformações e/ou fissuração excessiva, mas a estrutura não colapsa. Na maioria dos pórticos de edifícios, a torção a que as vigas estão sujeitas, constitui somente uma ação secundária, resultante das exigências de compatibilidade de deformação, sendo desprezada para o equilíbrio estrutural, e conseqüentemente no dimensionamento, desde que sejam garantidas as disposições construtivas adequadas e as armaduras mínimas necessárias para controlo de fissuração. Isto porque quando a viga passa para o Estado II (estado fissurado), a rigidez de torção diminui drasticamente, assim, é irrealista considerar no dimensionamento, os diagramas elásticos obtidos admitindo o betão no estado não fissurado. Esta simplificação é equivalente a desprezar-se a rigidez de torção das vigas de apoio (Figura I-6 (b)).

No caso da Torção de Equilíbrio, é necessário garantir a resistência á torção para que o equilíbrio se verifique (Figura I-7 (a)), caso contrário, a estrutura, ou parte dela, torna-se instável (Figura I-7 (b)). Neste caso, a Torção é considerado um esforço principal, uma vez que a formação de uma rótula plástica, caso seja desprezada a rigidez de torção da peça em estudo, leva á instabilidade da estrutura, que se passa a comportar como um mecanismo. Torna-se evidente que em estruturas isostáticas apenas pode existir Torção de Equilíbrio.

Desta forma, compreende-se que, quando se considere os Estados Limites Últimos deve-se considerar a Torção de Equilíbrio, e para os Estados Limites de Serviço deve-se considerar a Torção de Compatibilidade. Este é o procedimento simplificado, prescrito pelas normas em vigor.

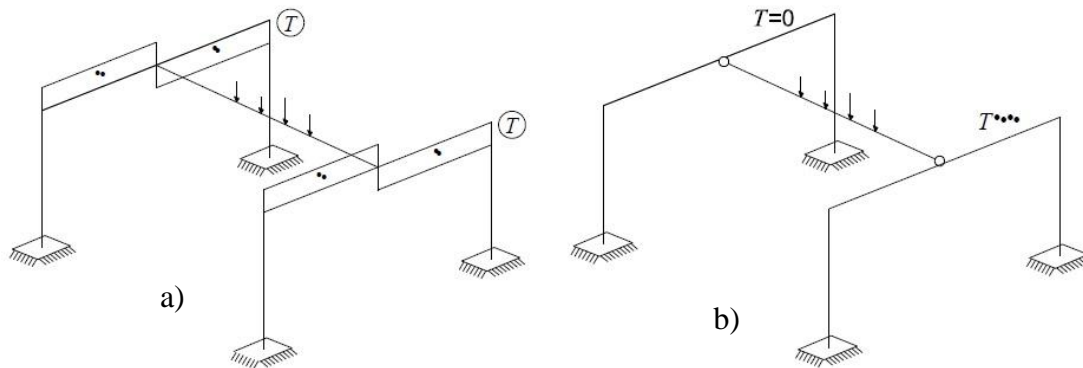


Figura I.6 (a) e (b) - Exemplo de estrutura com torção de compatibilidade [6]

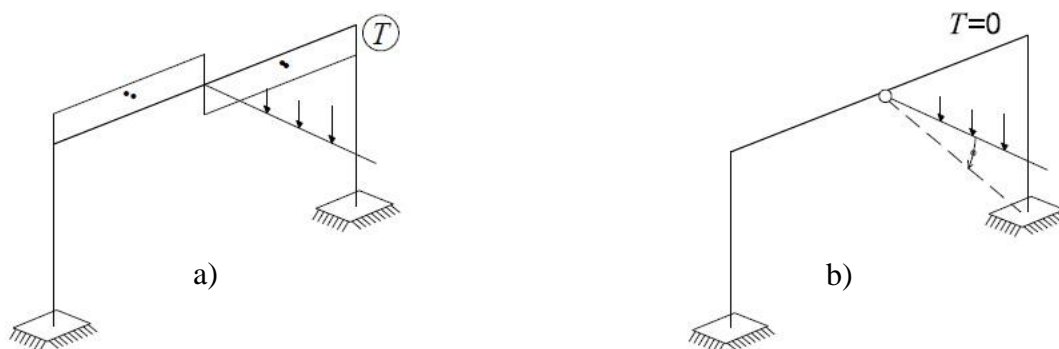


Figura I.7 (a) e (b) - Exemplo de estrutura com torção de equilíbrio [6]

A forma da seção transversal de um elemento tem influência direta na maneira como a mesma resiste aos esforços de torção e origina outra classificação fundamental dos problemas de torção. Se a seção for cheia ou vazada, os esforços de torção são resistidos por um fluxo de tensões tangenciais (torção circulatoria ou torção de St. Venant - figura I.8 (a)), se a seção for aberta, os esforços de torção são resistidos por momentos adicionais (torção com empenamento - figura I.8 (b)). Na elaboração deste trabalho, as vigas analisadas serão de seção cheia ou vazada, logo, a torção com empenamento não será explicitamente abordada.

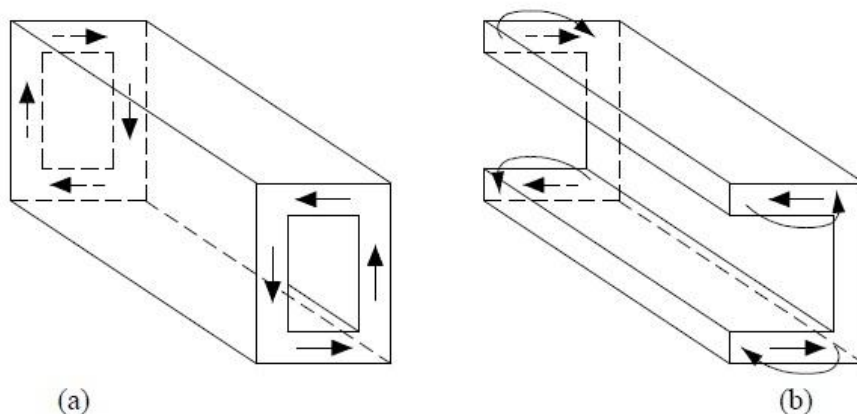


Figura I.8- Torção circulatoria (a) e Torção com empenamento (b) [6]

I.1.3. Exemplos de Casos Práticos de Torção em Estruturas

De seguida serão apresentados casos práticos correntes em estruturas de edifícios com esforços de torção. Na figura I.9, ilustra-se o caso de uma pala na zona de entrada de uma moradia, que possui continuidade com a laje de pavimento. Neste caso, a viga de apoio encontra-se sujeita a esforços de torção.



Figura I.9 - Laje de cobertura em consola com continuidade [11]

A figura I.10 ilustra os casos de cargas excêntricas, que atuam em vigas através de abas que funcionam como consolas curtas. Na Figura I-10(a), qualquer assimetria nas reações suspensas provocam esforços de torção na viga de apoio. Na figura I-10 (b), ilustra o caso de uma parede de alvenaria a apoiar excentricamente numa aba superior da viga de apoio. O peso próprio da parede vai provocar esforços de torção na viga de apoio.

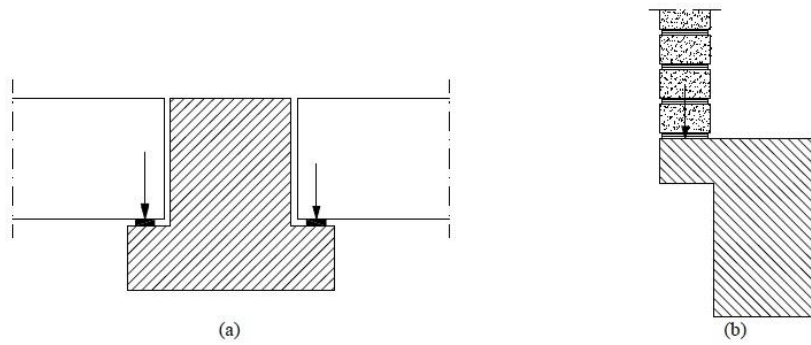


Figura I.10 (a) e (b) - Vigas com carregamento excêntrico [6]

A figura I.11 ilustra o caso de vigas com apoios indiretos. A compatibilidade de deformações entre vigas apoiadas e vigas de apoio provoca esforços de torção nas últimas.

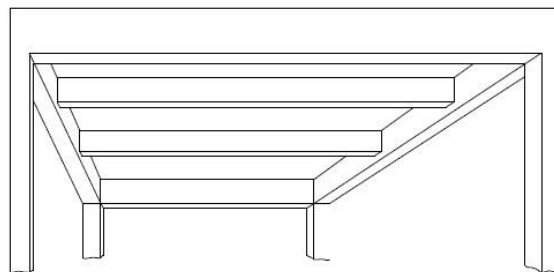


Figura I.11 - Vigas com apoios indiretos [6]

A figura I.12 ilustra o caso de uma escada em curva, com os degraus ativos posicionados em “asa de avião” e viga com diretriz parcialmente helicoidal. Este tipo de escadas são obrigatoriamente encastradas nas extremidades, provocando nas mesmas, esforços de torção elevados.

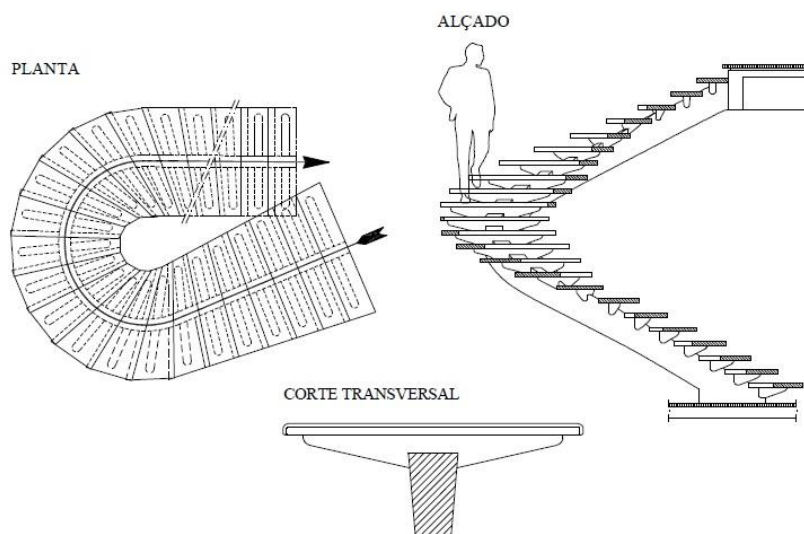


Figura I.12 - Escada em curva [11]

No caso de estruturas especiais, a torção apresenta-se como um esforço muito mais relevante, principalmente no caso de pontes. Neste tipo de estrutura, devido à sua tipologia e também ao tipo de carregamento a que se encontra sujeita (cargas elevadas e excêntricas), estão instalados momentos torsões muito elevados. Como exemplo apresenta-se de seguida a figura I.13 (a) e (b).



a)



b)

Figura I.13 (a) e (b) - Viaduto rodoviário de Linn Cove [11]

Os exemplos apresentados demonstram a frequência e relevância, que os esforços de torção apresentam, tanto em estruturas correntes como em estruturas especiais, e a necessidade subjacente do seu estudo e compreensão.

I.1.4. Comportamento à Torção de Secções Cheias e Vazadas

Nas secções vazadas, o fluxo de tensões tangenciais gerado é na sua essência absorvido pela zona periférica da secção, demonstrando que na prática, este tipo de secção apresenta uma resistência mais eficiente aos esforços de torção. Desta forma, as secções vazadas de parede fina revelam-se as mais apropriadas para um melhor aproveitamento do material. No caso de estruturas de grandes dimensões, como em pontes, onde os elevados esforços de torção assumem um papel determinante, a escolha por uma secção em caixão para o tabuleiro, revela-se uma solução economicamente vantajosa comparativamente a uma secção cheia, apesar de uma acrescida dificuldade de execução envolvida. A redução do peso próprio, com implicações diretas na altura da secção e na quantidade de armadura necessária, tornam a opção por este tipo de secção uma solução corrente neste tipo de estruturas. Contudo, em estruturas correntes, como o caso de edifícios, essa opção não se justifica devido às dimensões normalmente utilizadas para as secções das vigas nessas estruturas.

O comportamento de vigas de secção vazada não é completamente semelhante ao de vigas de secção cheia. A capacidade de redistribuição de tensões tangenciais em vigas de secção vazada é muito limitada comparativamente às de secção cheia, principalmente se as primeiras forem de paredes finas. Nestas condições é de esperar que as vigas de secção vazada possuam uma menor capacidade de desenvolver um comportamento dúctil na última fase de

comportamento à torção. Com o objetivo de se perceber a diferença de comportamento entre vigas de seção cheia e vazada, a figura I.14 apresenta alguns resultados publicados por Hsu em 1973 [48]. A Figura I-14 ilustra as curvas experimentais momento torsos (T) “versus” rotação de torção (Θ) para duas vigas idênticas em termos de dimensões exteriores para a seção, materiais e taxas de armadura de torção. A diferença reside apenas na espessura da parede da seção. A Viga B4 possui uma seção cheia, enquanto a viga D4 possui uma seção vazada com $h / x = 0,25$ (com h = espessura da parede e x = largura da seção). Hsu tinha por objetivo averiguar qual a influência do núcleo de betão na rigidez de torção pós-fissuração. Com base nos dados apresentados na figura I.14, é notória a perda de ductilidade quando é retirado o núcleo de betão da seção uma vez que o intervalo de sustentação de carga sob deformações inelásticas decresce bastante, apesar de ser garantida a resistência última. É também de referir a diferença de comportamento quando é atingido o momento torsor de fendilhação, tanto no seu nível como na ausência do patamar horizontal para a viga de seção vazada. A mesma conclusão pode ser observada em outros autores, designadamente por Walther e Miehlbradt em 1990 [80] com base em ensaios experimentais obtidos por Luchinger e Thurlimann em 1973 [41] e Miehlbradt em 1989 [45].

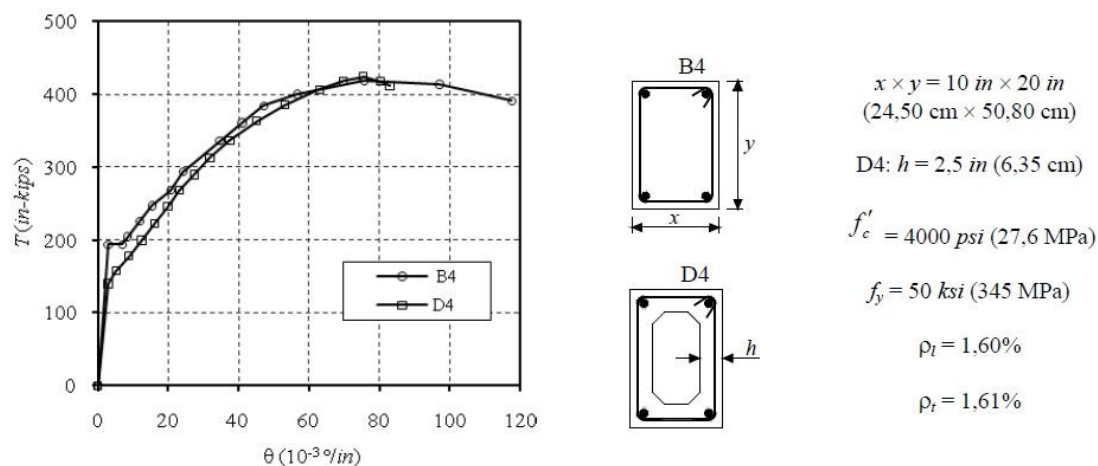


Figura I.14 - Influência da espessura da parede no comportamento à torção pura [8]

A problemática apresentada anteriormente revela-se preocupante quando se observa que os autores em geral, e para o estabelecimento de conclusões, não diferenciam os resultados obtidos e referentes a secções cheias ou vazadas. Contudo, é com base nessas conclusões que são estabelecidas as regras e disposições normativas. Apesar disso, o número de resultados encontrados na literatura, referentes a ensaios de vigas de seção vazada, é substancialmente inferior aos referentes a vigas com seção cheia [11].

É de referir portanto, a importância da realização do presente trabalho, na elaboração de uma base de dados de vigas ensaiadas à torção, de forma a uma melhor comparação entre os dados obtidos experimentalmente e a compreensão e consequente conclusão de relações deduzidas teoricamente.

I.2. Justificação e Objetivos do Trabalho

Quando um investigador pretende iniciar um estudo, precisa de uma base bibliográfica adequada. Com este trabalho pretende-se simplificar e aligeirar esse processo, principalmente no que se refere ao estudo de vigas de betão estrutural ensaiadas à Torção.

Desta forma, a compilação da diversa informação referente a este tema, será colocada numa Base de Dados para facilitar a sua consulta.

O presente trabalho, em termos de estudo desenvolvido, pode ser dividido em 3 objetivos principais:

1º Objetivo - Realizar uma compilação de diversos ensaios experimentais, através de uma extensa pesquisa bibliográfica. Os ensaios experimentais recolhidos deverão apresentar diferentes tipos de ensaios. Serão pesquisados ensaios experimentais à Torção Pura, à Torção com Interação de Esforços e à Torção com Pré-Esforço para vigas de seção cheia e seção vazada.

2º Objetivo - Organizar e estruturar os ensaios recolhidos de forma a facilitar a sua utilização. Para tal, pretende-se criar uma Base de Dados, que fosse ergonómica e dinâmica, isto é, que permita ser complementada em qualquer altura com novos ensaios.

3º Objetivo - Analisar a evolução cronológica de ensaios experimentais à Torção, para vigas de betão estrutural, ao longo das últimas décadas.

I.3. Organização do documento

Apresenta-se seguidamente a organização do presente trabalho com uma descrição sumária do conteúdo dos diversos capítulos.

No Capítulo I apresenta-se o tema, enquadrando-o no âmbito da investigação na área do betão estrutural, salientando-se os aspetos que tornam esta investigação importante e necessária.

No Capítulo II e no interesse deste trabalho, são apresentadas os procedimentos seguidos por diversos autores para ensaios experimentais de vigas à Torção, acompanhadas por exemplos de ensaios realizados. São também apresentadas as opções desses autores para o tratamento dos resultados obtidos através do ensaio, recorrendo a exemplos de estudos realizados.

No Capítulo III apresenta-se a metodologia seguida na construção da Base de Dados. Primeiramente é descrita a pesquisa realizada. De seguida é apresentada a compilação de estudos obtida e respetiva estruturação e formatação efetuada. Por fim, apresenta-se o Ficheiro de Dados da Viga, que caracteriza cada uma das vigas reunidas.

No Capítulo IV apresenta-se o tratamento estatístico e análise dos dados recolhidos. Inicialmente, os dados recolhidos são tratados de forma global, e em seguida é efetuada uma análise à evolução cronológica do conjunto de estudos compilados.

Por fim, no Capítulo V resumem-se as conclusões principais deste trabalho e apresentam-se recomendações para trabalhos futuros.

Para facilitar a leitura do presente trabalho, a anteceder o texto são apresentados o índice geral, o índice de figuras e o índice de quadros. As referências bibliográficas são listadas no final do texto.

Capítulo II - Procedimentos Experimentais e tratamento de resultados

II.1. Introdução

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos gerais seguidos por diversos autores, relativos a ensaios experimentais de vigas de betão estrutural à Torção. De seguida, apresentam-se as opções desses autores para a análise que pode ser elaborada aos resultados obtidos experimentalmente.

Inicialmente, apresenta-se a caracterização dos modelos de ensaio, onde são definidas a geometria, armaduras adotadas e propriedades mecânicas dos materiais. Em seguida, apresentam-se várias hipóteses para métodos de ensaio á torção recorrendo, a título exemplificativo, de ensaios já utilizados na prática. Por fim, define-se que tipo de medições podem ser efetuadas de forma a obter os dados pretendidos para posterior análise.

Na segunda parte deste capítulo, é descrito como pode ser feito o tratamento dos dados obtidos experimentalmente para posterior análise e interpretação. Esta análise, em termos de comportamento à torsão de vigas e das variáveis consideradas para estudo (exemplo: taxa de armadura de torsão; resistência á compressão do betão), é feita através da comparação de gráficos globais de comportamento experimental obtidos para cada viga, a título de exemplo, a evolução do momento tursor com a rotação angular média. É também efetuada uma análise visual e descritiva de forma a complementar os dados já obtidos.

II.2. Descrição do Programa Experimental

II.2.1. Caracterização dos Modelos de Ensaio

Na caracterização dos modelos de ensaio deve-se começar por definir a geometria adotada, tanto a nível longitudinal (escolha do comprimento) como transversal (escolha da seção), tendo em conta as condicionantes impostas.

Na escolha do comprimento do modelo deve-se atender a três condicionantes:

- Dimensão do dispositivo de ensaio: a escolha da dimensão da viga encontra-se condicionada pela dimensão do dispositivo de ensaio uma vez que esse dispositivo tem de conseguir acomodar a viga para se proceder á realização do ensaio;
- Comportamento estrutural: as vigas devem possuir um comprimento tal que possam ser consideradas como peças lineares, para que na sua zona central as tensões sejam uniformes (sem influência de apoios de extremidade). Uma vez que a rotura por torção não é tão localizada como a rotura por flexão, a viga deve possuir um comprimento suficiente para que possa desenvolver a sua zona de rotura. É costume considerar-se que um elemento possui um comportamento linear se verificar a

condição: $l/h \geq 5$, em que l é o comprimento do elemento e h a maior dimensão da sua seção;

- Limitação da deformação angular: a rigidez global à torção da viga deve ser de tal ordem de grandeza que permita que o atuador do dispositivo de ensaio imponha uma deformação angular que permita a plena realização do ensaio.

Na escolha da seção do modelo deve atender a três condicionantes:

- Efeito de escala: caso não se pretenda utilizar a teoria da semelhança, a viga deve possuir dimensões que permitam desprezar o efeito de escala no processo de cálculo. É corrente considerar-se que no domínio dos ensaios de betão armado, os modelos não sofrem alterações de comportamento apreciáveis até uma escala de cerca de 1/3.
- Capacidade de carga do atuador: a seção da viga deve também ser definida em função da capacidade de carga do atuador, para que seja possível conduzir a viga à rotura. Logo, em função da capacidade de carga, deve-se definir a resistência da viga à torção, que está dependente das dimensões da seção transversal, conjuntamente com a quantidade e posicionamento de armadura de torção e resistência à compressão do betão.
- Encurvadura das paredes da seção (no caso de viga em caixão): no caso de se optar por uma seção em caixão para a viga, deve-se relacionar a espessura das paredes da seção com as dimensões globais da seção de forma a minimizar o surgimento de problemas relacionados com a instabilidade das paredes, uma vez que poderia conduzir a uma diminuição da resistência e a uma rotura prematura. Segundo Bernardo [11], aconselha-se a aplicação do disposto na Cláusula 11.6.1.2 do ACI 318R-84[2], que inclui disposições específicas relacionadas com a problemática apresentada, para que os efeitos de instabilidade nas paredes pudessem ser desprezados.

De seguida, deve-se definir a solução adotada para a armadura de torção para o modelo de ensaio. Esta decisão depende inteiramente do autor do ensaio e do objetivo a que se propõe atingir. No entanto, é aconselhável que as taxas de armadura adotadas sejam definidas tendo por base os valores máximos e mínimos fixados pelas Cláusulas 6.1.5.2 e 6.1.5.3, respetivamente, do ACI 318R-89 [2] para a taxa de armadura de torção longitudinal e transversal de torção, de forma a garantir que a rotura em torção seja dúctil. Segundo Bernardo [11], o referido código é o que permite o maior intervalo para a taxa de armadura de torção, logo os intervalos permitidos pelos outros regulamentos ficam igualmente incluídos. É de referir, que se devem adotar pormenorizações que respeitem as cláusulas específicas para a armadura de torção em relação ao espaçamento entre armaduras, diâmetro mínimo dos varões, etc.

De forma a se obter a resistência real do modelo de ensaio, deve-se proceder à caracterização das propriedades do material que o constituem. Saber o valor da resistência do betão à compressão e do aço das armaduras à tração (através de ensaios), permite obter um valor, para a resistência da viga, mais próximo do real.

Betão:

A resistência à compressão do betão, pode ser obtida com base em ensaios à compressão uniaxial de provetes característicos da amassadura efetuada. Utilizando-se provetes cúbicos (com 15 cm de aresta), betonados e ensaiados na mesma altura do modelo de ensaio. Os provetes devem ser curados nas mesmas condições das vigas por forma a serem o mais representativos possível. O ensaio à compressão dos provetes cúbicos encontra-se normalizado pela Especificação LNEC E226-1968 [24]. Geralmente é recomendado que, para betões de alta resistência ($f_{ck} \geq 50$ MPa), a resistência à compressão deve ser referente a provetes cilíndricos padrão ($\varphi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$). A tensão resistente referente a provetes cilíndricos pode, de forma aproximada, ser obtida a partir da tensão resistente referente a provetes cúbicos diminuída de 10MPa.

A resistência média à tração do betão (f_{ctm}), é calculada através da Clausula 2.1.3.3.1 do código modelo europeu MC 90 [12]:

$$f_{ctm} = f_{ctko,m} \left(\frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} \quad (1)$$

Para betões de alta resistência ($f_{ck} \geq 50$ MPa), Taerwe em 1996 [59], propôs uma expressão corrigida para o cálculo da resistência à tração:

$$f_{ctm} = f_{ctko,m} \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{f_{cko} + \Delta f} \right)^{0,6} \quad (2)$$

em que Δf corresponde ao desvio padrão, considerado constante para todos os betões, de valor igual a 8 MPa.

O módulo de elasticidade do betão, E_c , é calculado através da Cláusula 2.1.4.2 do MC 90 [12], que fornece a seguinte expressão:

$$E_c = E_{co} [(f_{ck} + \Delta f)/f_{cmo}]^{0,3} \quad (3)$$

em que $E_{co}=21,5\text{GPa}$, $f_{cmo}= 10\text{MPa}$ e $\Delta f= 8\text{MPa}$.

Para betões de alta resistência ($f_{ck} \geq 50$ MPa), Taerwe em 1996 [59], propôs uma expressão idêntica à anterior, para o cálculo do módulo de elasticidade, com a única diferença de $E_{co}=22$ GPa.

Em relação aos valores atribuídos para a extensão correspondente ao pico de tensão e extensão última convencional (ε_0 e ε_{cu} respetivamente), são os convencionais para o caso de betões de resistência normal ($\varepsilon_0 = 0,0020$ e $\varepsilon_{cu} = 0.0035$). No caso de betões de alta resistência ($f_{ck} \geq 50$ MPa), os valores atribuídos serão calculados pelas expressões propostas por Taerwe em 1996 [59] :

$$\varepsilon_0 = 0,001 \times [2 + 0,005 (f_{ck} - 50)] \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,001 \times [2,5 + 2 (1 - f_{ck} / 100)] \quad (5)$$

É recomendado que os ensaios dos provetes de betão sejam realizados no mesmo dia do ensaio da viga correspondente.

Pode também ser apresentada a composição do betão utilizado.

Aconselha-se a apresentação de todos os resultados obtidos para estas características num quadro resumo de forma a facilitar a sua consulta.

Aço para armaduras ordinárias:

Para um conhecimento mais rigoroso das tensões e extensões de cedência das armaduras, deve-se proceder à realização de ensaios de tração de provetes dessas mesmas armaduras. Estes ensaios encontram-se normalizados na Norma Portuguesa EN 10 002-1 [37]. A partir do valor obtido para a tensão de cedência, f_{ym} , é determinada a primeira extensão de cedência, ε_{ym} , através da Lei de Hooke :

$$\varepsilon_{ym} = \frac{f_{ym}}{E_s} \quad (6)$$

O módulo de elasticidade do aço das armaduras, E_s , pode ser assumido como igual ao regulamentar habitualmente indicado para as armaduras ordinárias, ou seja, 200 GPa. Para a extensão última convencional do aço para armaduras ordinárias também pode ser assumido o valor habitual regulamentar de $\varepsilon_u = 0,010$.

Aconselha-se a apresentação de todos os resultados obtidos para estas características num quadro resumo de forma a facilitar a sua consulta.

No caso dos resultados correspondentes a estes parâmetros já se encontrarem disponíveis, não se justifica a realização destes ensaios.

Aço para armaduras de pré-esforço:

As armaduras de pré-esforço, geralmente, são solicitadas a um nível de tensões bastante inferior a 75% do valor característico da tensão de rutura da armadura de pré-esforço ($0,75f_{puk}$). No entanto, deve-se proceder a ensaios a ensaios de tração com o objetivo de obter a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% ($f_{p0,1\%}$) e a tensão de rotura (f_{pu}) dos cordões utilizados. Estes ensaios encontram-se normalizados na Norma Portuguesa EN 10 002-1 [37]. A extensão correspondente à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% é calculada através da Lei de Hooke:

$$\varepsilon_{p0,1\%} = \frac{f_{p0,1\%}}{E_p} \quad (7)$$

O módulo de elasticidade do aço das armaduras de pré-esforço, E_p , pode ser assumido como igual ao regulamentar habitualmente indicado para os cordões de pré-esforço, ou seja, 195 GPa (Cláusula 2.3.4.2 do MC 90 [12]). Para o caso da extensão última convencional do aço para armaduras de pré-esforço, o valor assumido é de $\varepsilon_{pu} = 0,035$ (Cláusula 2.3.4.2 do MC 90 [12]).

Aconselha-se a apresentação de todos os resultados obtidos para estas características num quadro resumo de forma a facilitar a sua consulta.

No caso dos resultados correspondentes a estes parâmetros já se encontrarem disponíveis, não se justifica a realização destes ensaios.

II.2.2. Métodos de Ensaio

A metodologia seguida num ensaio de uma viga á torção consiste na introdução dessa mesma viga num dispositivo de ensaio, que garante a ligação a um dispositivo de torção. É através desse dispositivo que posteriormente lhe é introduzido um carregamento, que provoca esforços de torção (pura ou com interação de esforços). À medida que a viga se deforma com o aumento gradual do carregamento, são efetuadas medições em determinadas secções da viga (tema abordado na próxima secção). Este procedimento decorre até à rotura da viga.

O dispositivo de ensaio, é constituído por três elementos: o atuador; o dispositivo de torção; e o sistema de apoio. O atuador, que gera a carga aplicada, introduz essa carga no dispositivo de torção, que a transforma num momento torsor aplicado à viga. Esse momento torsor, é depois absorvido, por reação, pelo sistema de apoio.

O número de atuadores (geralmente eletromecânicos) será definido consoante o mecanismo de torção adotado. O actuador tem como função esforçar o dispositivo de torção. A figura II.1 exemplifica duas disposições para um atuador. A figura II.1 a), apresenta um atuador fixo na travessa de um pórtico; já a figura II.1 b), apresenta o atuador ancorado ao chão.

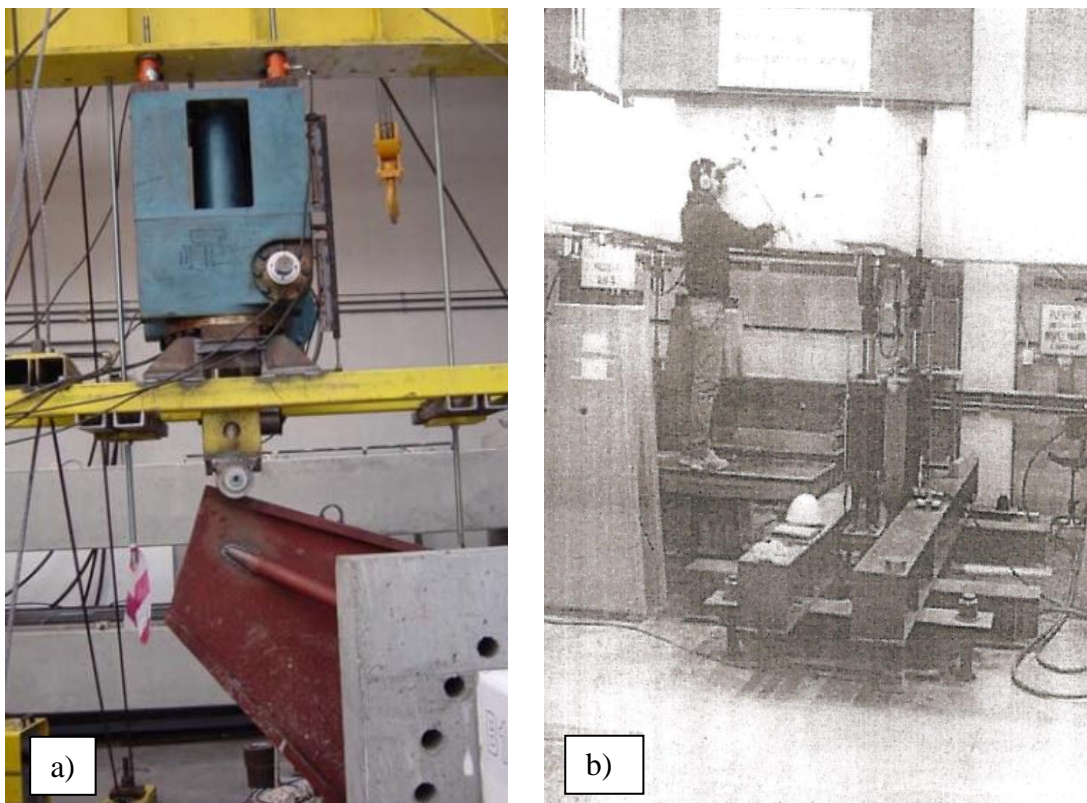


Figura II.1 - Exemplos para fixação de atuador eletromecânico a) [11] e b) [51]

O dispositivo de torção, tem como função transformar a força aplicada pelo atuador num momento torsor que vai ser aplicado á viga. Este dispositivo pode ser caracterizado como um elemento de rigidez elevada, fixo à viga, em que o seu eixo longitudinal é perpendicular ao eixo longitudinal da viga e o plano formado por estes é perpendicular ao vetor da força

imposta pelo atuador. É importante referir que este dispositivo, depende do tipo de esforços que se pretendem introduzir na viga a ser ensaiada. Se se pretender realizar um ensaio á torção pura, este dispositivo só deve introduzir torção, se se pretender realizar um ensaio com interação de esforços, deve introduzir esses mesmos esforços. A principal limitação para o dimensionamento deste dispositivo será a máxima força aplicada pelo atuador durante o ensaio. As figuras II.2 e II.3 a) e b) apresentam dispositivos de torção que só introduz esforços de torção. A figura II.4 apresenta um dispositivo de torção que introduz esforços de torção, flexão e esforço transversal (interação de esforços).

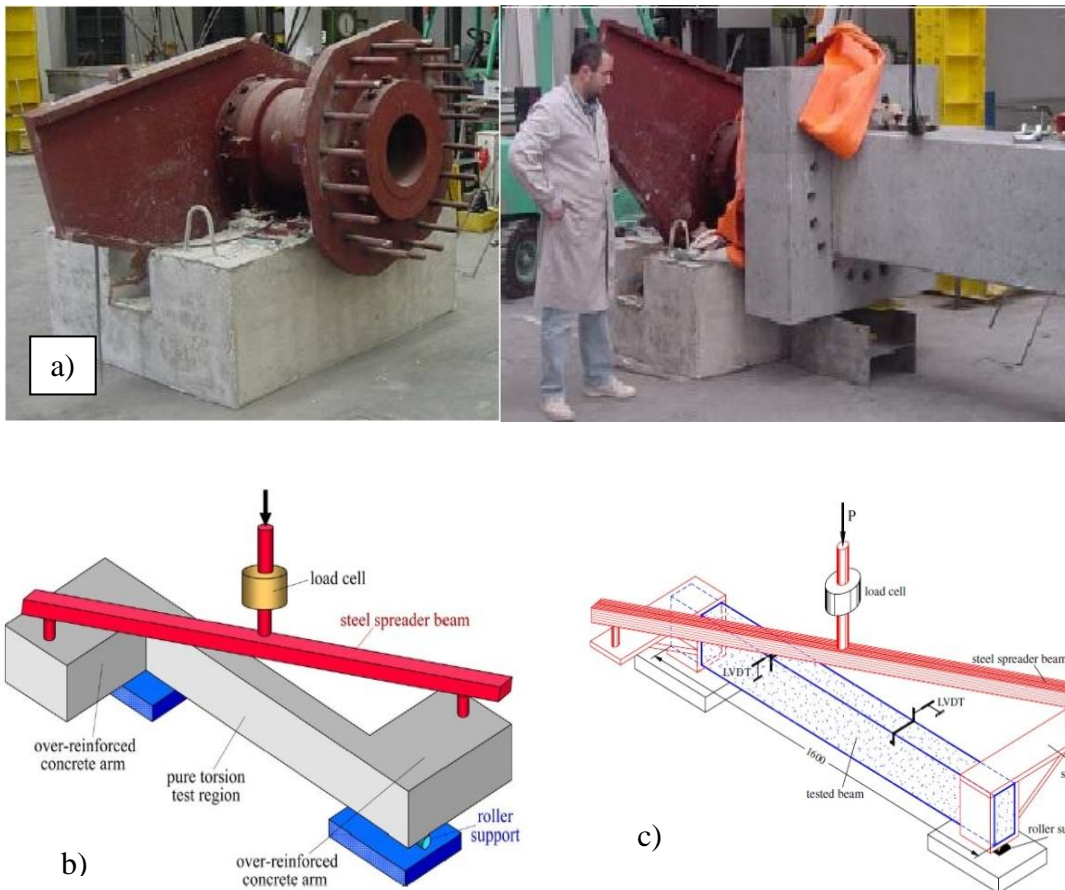


Figura II.2 - dispositivo de torção que só introduz esforços de torção a) [11], b) [17] e c) [15]

A figura II.2 (b) apresenta como dispositivo de torção parte da viga. É importante referir que neste caso, os braços em betão se encontram sobreamados de forma a garantir a uma rigidez adequada. Este método foi também utilizado por Rahal [51] nos seus ensaios com interação de esforços.

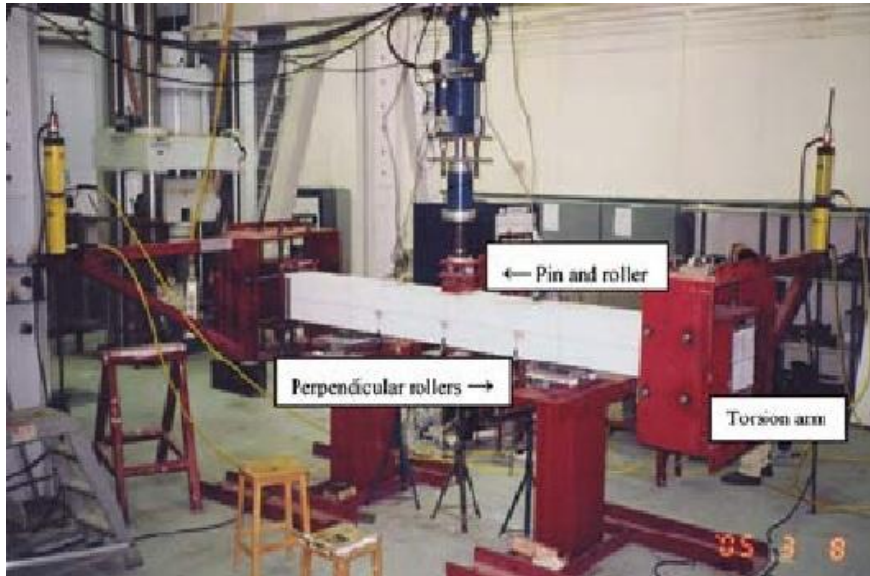


Figura II.3 - dispositivo de torção que permite transmissão de vários esforços [4]

O sistema de apoio tem como objetivo apoiar a viga e absorver, por reação, os esforços introduzidos. Nestas condições, deve ser dimensionado para receber os esforços máximos introduzidos pelo dispositivo de torção, e garantir a uma fixação adequada para a viga a ser ensaiada. As figuras II.4 (a) e (b) representam alguns exemplos já utilizados na prática.

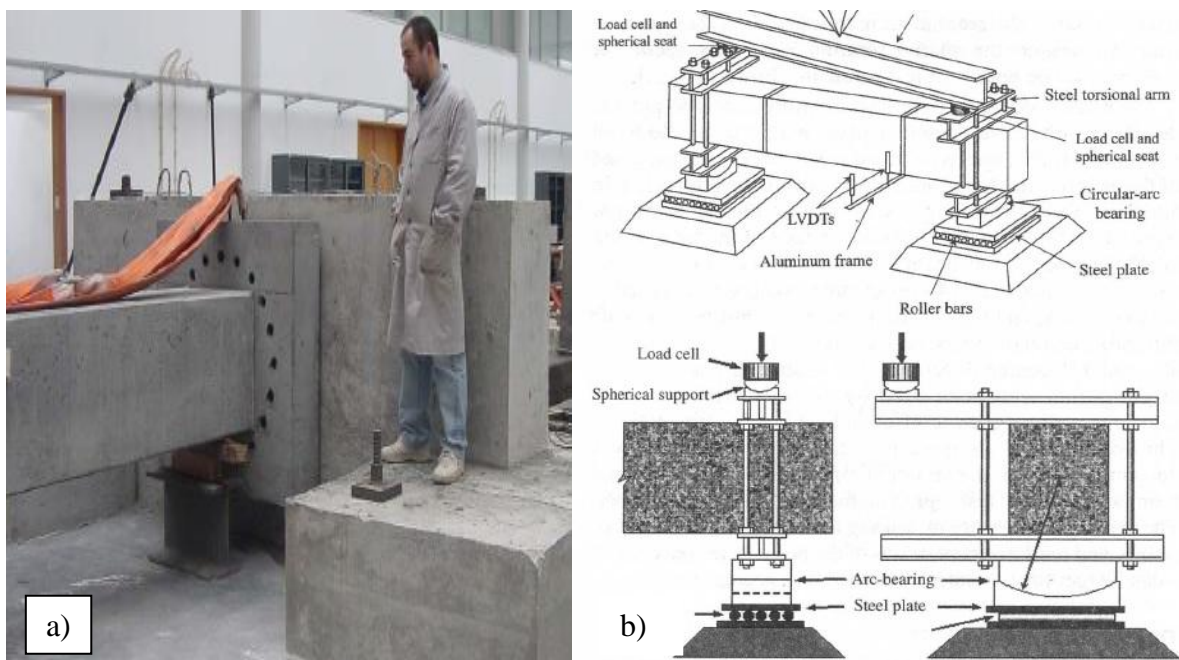


Figura II.4 - Exemplo para sistema de apoio a) [11] e b) [27]

II.2.3. Medições a efetuar

Num ensaio de uma viga á torção, a medição da evolução da força aplicada pelo atuador e a medição das rotações que a viga sofre nas suas secções, revelam-se de extrema importância, uma vez que, é com base nesses resultados que se retiram conclusões. Essas medições devem ser elaboradas de forma inteligente, de forma a garantir, o melhor possível, que os valores obtidos correspondam aos reais. Pode-se, se possível, avaliar também extensões sofridas nas armaduras e/ou no betão, deslocamentos em determinadas secções ou outras características consideradas relevantes consoante o objetivo do ensaio.

- Medição de Forças

Para avaliar a força registada em determinado ponto do dispositivo de ensaio devem ser utilizadas células de carga. Assim, na zona de contacto do atuador podem ser colocadas células de carga de forma a garantir o conhecimento da força aplicado pelo mesmo ao modelo de ensaio. Se a viga possuir pré-esforço longitudinal, pode-se colocar uma célula de carga entre a ancoragem e a extremidade da viga por forma a avaliar a força na armadura de pré-esforço. No caso de a viga possuir restrição parcial ao alongamento pode-se colocar uma célula de carga entre a viga e a estrutura colocada para impor essa restrição.



Figura II.5 - Exemplo de célula de carga [33]

- Medição de deslocamentos (translação e rotação)

A medição da rotação de uma secção no ensaio de uma viga á torção revela-se de extrema importância. O método utilizado para sua obtenção assim como o número de secções instrumentadas é da preferência do autor do ensaio. É de referir que, quanto maior o número de secções instrumentadas, mais próximo do real serão os dados em que serão baseadas conclusões. Para a medição de deslocamentos existem várias soluções que podem ser adotadas. Entre as várias soluções disponíveis, serão apresentadas as mais comumente utilizadas.

A medição pode ser efetuada através da fixação de uma estrutura metálica à seção que se deseja instrumentar. Esta estrutura deverá ter ainda um “braço” acoplado, onde estarão dois LVDTs (transformador diferencial de variação linear). Os LVDTs encontram-se ligados a uma estrutura externa que serve de referencial fixo. Este método foi utilizado por Fang e Shiau[27]. Chalioris[15] utiliza um método semelhante. Rao e Seshu[28] assim como Okay e Engin[46], utilizaram um método semelhante mas com inclinómetros. A figura II.6 (a) e (b) apresenta esquemática e respetivamente o método de Fang e Shiau e o de Rao e Seshu.

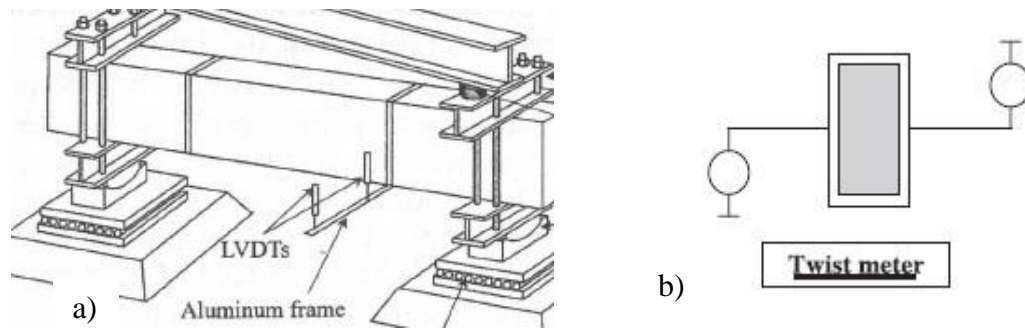


Figura II.6 - Exemplo para medição de rotações (a) [27] e b) [28]

Osongo [47] e Bernardo [11], utilizaram transdutores de deslocamento diretamente em contacto com a viga, para medição de rotações. Foram utilizados um par de transdutores por cada seção instrumentada, presos a uma estrutura exterior utilizada com referencial fixo. A figura II.7 apresenta a instrumentação de uma viga ensaia por Bernardo [11], na qual é possível observar o elevado número de secções ensaiadas em comparação com diversos autores.

Consoante o propósito do ensaio, pode existir a necessidade da medição de deslocamentos de translação em determinadas secções. Para a medição de deslocamentos de translação são utilizados LVDTs.



Figura II.7 - Instrumentação de uma viga com transdutores de deslocamento [11].

- Medição de extensões

Para medir as extensões nas armaduras podem ser utilizados extensómetros de resistência. Nas secções analisadas, pode-se colocar extensómetros nas armaduras longitudinais, e nas armaduras transversais. Os extensómetros podem ser colocados, preferencialmente no eixo de flexão dos varões instrumentados. A instrumentação das armaduras deve ser efetuada antes do início da betonagem. Os extensómetros de resistência devem ser devidamente protegidos para não entrarem em contacto direto com a água da amassadura e não sofrerem danos devidos á vibração durante a betonagem. O número de secções analisadas é da opção do autor do ensaio. A figura II.8 ilustra a proteção e disposição dos extensómetros na armadura antes da betonagem.



Figura II.8 - Colocação e proteção dos extensómetros em armadura [11]

Para medir as extensões na superfície do betão pode-se utilizar extensómetros de resistência (de uma direção, duas ou roseta). Este método foi utilizado por diversos autores. Fang e Shiau [27], além deste método, utilizaram pontos alvo de cobre. Nesse método, pequenas peças em cobre são fixas em pontos das faces da viga a ensaiar. Durante o ensaio, o deslocamento relativo entre os pontos, é medido eletronicamente para vários níveis de carga. Desta forma consegue-se obter as extensões em diversas direções. A figura II.9 apresenta o mapeamento utilizado por Fang e Shiau [27] para a colocação dos pontos alvo numa face da viga.

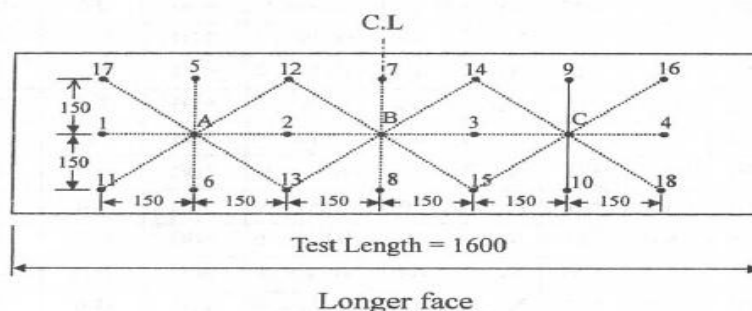


Figura II.9 - Colocação de pontos alvo de cobre na face de uma viga [27]

Também é comum o uso de LVDTs na medição de extensões na superfície do betão. Rahal[51], além de pontos alvo, utilizou LVDTs nos seu ensaios para determinar extensões á superfície no betão. A figura II.10 exemplifica a disposição dos mesmos na face lateral de uma das vigas ensaiada.

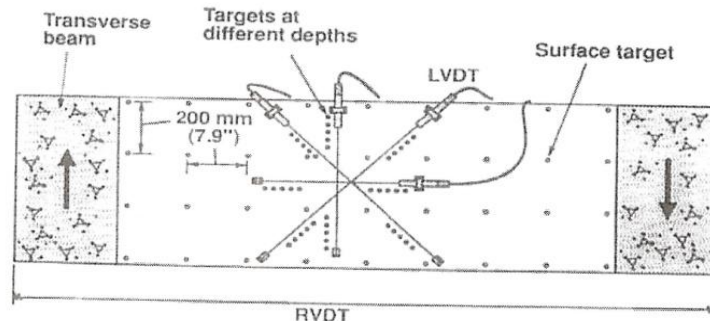


Figura II.10 - colocação dos LVDTs na superfície da viga [51]

II.2.4. Operações a realizar no Modelo de Ensaio

II.2.4.1. Operações anteriores ao ensaio

Por forma a facilitar a leitura visual da fissuração nas vigas bem como o momento em que ocorre a primeira fissura, as vigas podem ser previamente pintadas de branco com uma tinta de muita baixa plasticidade.

II.2.4.2. Operações posteriores ao ensaio

Após a realização do ensaio e após retirar os instrumentos exteriores de medição, podem ainda ser efetuadas as seguintes operações antes da remoção final da viga:

- Marcação das fissuras com marcadores para realçar o padrão de fissuração e para permitir o posterior registo fotográfico;
- Destacamento manual do betão superficial solto na zona de rotura para melhor visualização do padrão de rotura.

II.3. Análise Global dos Resultados Experimentais

II.3.1. Evolução do Momento Torsor com a Deformação Angular Média

Nesta subsecção, é descrito como pode ser feito o tratamento dos resultados obtidos experimentalmente de forma a avaliar a evolução do momento torsor com a deformação angular média. Esta avaliação, permite obter o gráfico momento torsor (T) “versus” deformação angular média (Θ_m).

O momento torsor, T, é relativo ao nível do momento torsor aplicado á viga durante o ensaio. Este valor é calculado com base nas leituras das células de carga, que registaram, durante o ensaio, a força aplicada pelo atuador no braço do dispositivo de torção. O momento torsor atuante é obtido através do produto da referida força pelo seu braço.

A deformação angular média, Θ_m , representa o ângulo médio de deformação sofrido pela viga ao longo do ensaio. O seu valor nominal resulta da divisão dos valores experimentais dos ângulos calculados para a secção que sofre a maior deformação angular, de entre as secções instrumentadas, pelo comprimento instrumentado das vigas. Os ângulos das secções instrumentadas são obtidos a partir das leituras registadas nessas secções. Este parâmetro, caracterizador da deformação angular das vigas, pode ser considerado demasiado generalista, contudo, atendendo ao objetivo de efetuar uma análise global e comparativa do comportamento de vigas, a deformação angular média serve perfeitamente.

A figura II.11 apresenta, como exemplo, um gráfico tipo T vs Θ_m obtido para um conjunto de vigas ensaiadas por Chiu, Fang, Young e Shiau [18].

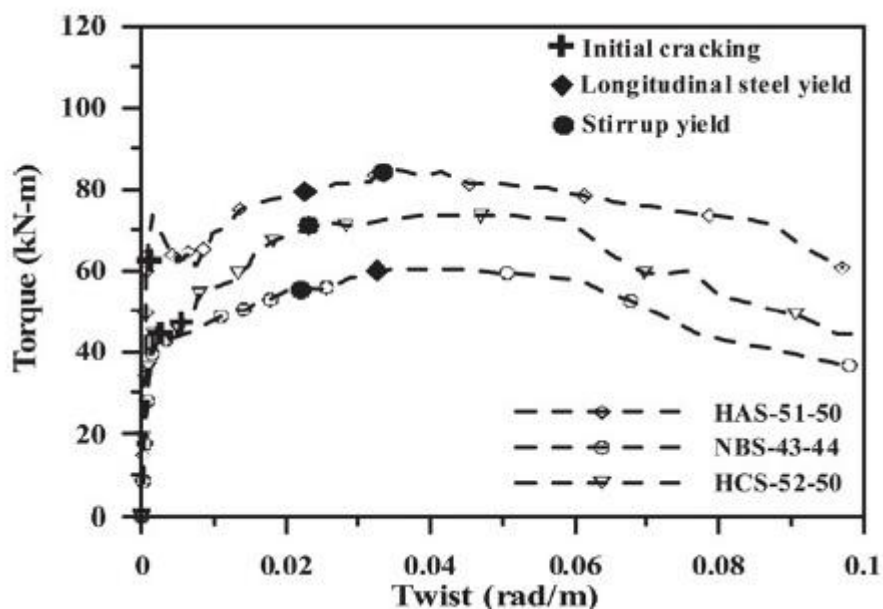


Figura II.11 - Exemplo de curva tipo Momento Torsor vs Deformação Angular Média [18]

Na elaboração do gráfico T vs Θ_m pode-se apresentar, para a Curva T- Θ_m , o ponto correspondente á fissuração da viga assim como os pontos correspondentes ao início da

cedência da armadura longitudinal (A_{sl}) e transversal (A_{st}), como se encontra exemplificado na figura II.11. Os pontos de cedência das armaduras, longitudinal e transversal, são calculados com base nos valores experimentais das extensões, obtidos através do método utilizado para a instrumentação das armaduras. Estes valores são comparados com os valores da extensão de cedência do aço das armaduras usadas na viga. O ponto correspondente à fissuração da viga, é atribuído ao momento do ensaio em que é detetado, visualmente, e por vezes sonoramente, o aparecimento da primeira fissura na viga. É facilmente confirmada a sua localização no gráfico T vs Θ_m devido à quebra súbita de rigidez de torção da viga. É de referir, que a Curva T vs Θ_m , deve evidenciar um andamento característico, no qual se pode distinguir três zonas de comportamento diferenciado, exemplificado na figura II.12.

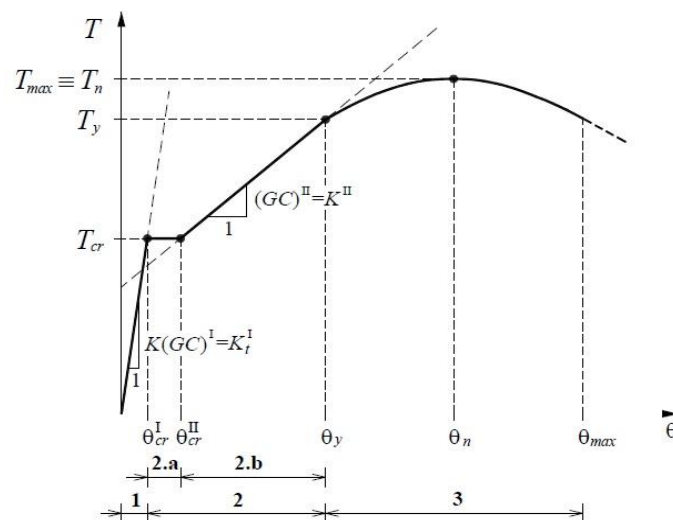


Figura II.12 - Faseamento da Curva Torção vs Rotação [6]

Na primeira zona, definida entre o início do ensaio e a fissuração da viga, a Curva T vs Θ_m apresenta-se como um troço praticamente reto, em que se dá um aumento gradual e quase linear da deformação angular com o momento torsor. Esta zona, corresponde à fase pré-fissuração (Estado I), em que as vigas apresentam um comportamento praticamente elástico linear.

A segunda zona, que tem início com a fissuração da viga e, devido a isso, apresenta uma forte quebra de rigidez de torção, relativamente à mesma rigidez antes da fissuração, traduz-se por grandes incrementos de deformação angular à medida que o momento torsor aumenta. É nesta fase de comportamento que é notória a influência da armadura de torção na rigidez de torção da viga. Geralmente, esta zona de comportamento pode ser aproximada, até determinado nível de momento torsor, a uma reta. Assim, a viga pode ser considerada como possuindo comportamento elástico linear mas agora em regime fissurado (Estado II). Esta zona, é limitada superiormente pela cedência das armaduras, altura em que surge um comportamento marcadamente não linear.

A terceira zona de comportamento tem início com a cedência das armaduras de torção. Nesta fase, a Curva T vs Θ_m tende a ficar horizontal, à semelhança de um patamar de cedência. A

extensão dessa zona traduz a maior ou menor ductilidade da viga, uma vez que, tal propriedade é definida como a capacidade da viga sustentar grandes deformações inelásticas sem perda apreciável da sua capacidade de carga. Se não se verificar o início da cedência das armaduras de torção, mas apenas se verificar uma ligeira quebra final de rigidez, com a resistência a aumentar ainda substancialmente até à rotura efetiva da viga, por compressão do betão nas escoras, significa que a viga sofreu uma rotura do tipo frágil.

Pode ser apresentado um quadro que reúna o resumo das características da Curva T vs Θ_m para a(s) viga(s) ensaiada(s). Tais características são referentes aos seguintes parâmetros: momento torsor de fissuração e respetiva rotação (T_{cr} e Θ_{cr} , respetivamente), rigidez de torção em Estado I ((GC)^I), rigidez de torção em Estado II ((GC)^{II}), momento torsor correspondente ao início da cedência da armadura transversal e respetiva rotação (T_{ty} e Θ_{ty} , respetivamente), momento torsor correspondente ao início da cedência da armadura longitudinal e respetiva rotação (T_{ly} e Θ_{ly} , respetivamente), momento torsor resistente (máximo) e respetiva rotação (T_r e Θ_{tr} , respetivamente). A rigidez de torção em Estado I é calculada simplesmente dividindo T_{cr} por Θ_{cr} (com Θ_{cr} em radianos).

Desta forma, procede-se a uma análise e comparação dos resultados obtidos, com o intuito de retirar conclusões.

II.3.2. Evolução das Extensões

II.3.2.1. Evolução das Extensões no Betão

Nesta subsecção, é descrito como pode ser feito o tratamento dos resultados obtidos experimentalmente de forma a avaliar a evolução das extensões no betão. Esta evolução pode ser avaliada por comparação com o momento Torsor atuante, como foi feito por diversos autores, e permite obter o gráfico extensão no betão (ϵ_c) “versus” momento Torsor (T).

A extensão no betão, ϵ_c , é relativo á extensão que o betão sofre durante o ensaio. Este valor é obtido diretamente a partir dos registos experimentais resultantes da instrumentação da viga.

A figura II.13 apresenta, como exemplo, um gráfico tipo ϵ_c vs T para uma viga ensaiada por Osongo[47].

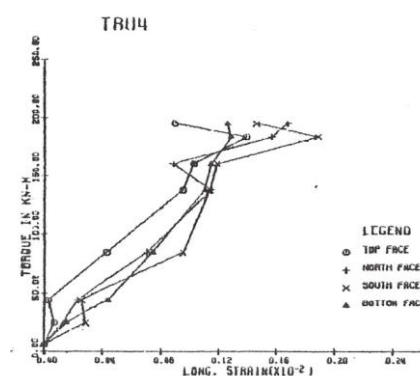


Figura II.13 - Exemplo de Curva Extensão vs Torção [47]

Na elaboração do gráfico ε_c vs T para uma viga, relacionam-se os valores obtidos experimentalmente para a extensão do betão, numa determinada direção, com a evolução do momento Torsor. A curva resultante é referente à variação da extensão no betão na direção respetiva. Pode-se apresentar, não só a direção, mas também a face correspondente como se encontra exemplificado na figura II.13.

Desta forma, procede-se a uma análise e comparação dos resultados obtidos, com o intuito de retirar conclusões.

II.3.2.2. Evolução das Extensões nas Armaduras

Nesta subsecção, é descrito como pode ser feito o tratamento dos resultados obtidos experimentalmente de forma a avaliar a evolução das extensões nas armaduras. Esta evolução pode ser avaliada por comparação com a deformação angular média, como foi feito por Bernardo [11], e permite obter o gráfico extensão das armaduras (ε_s) “versus” deformação angular média (Θ_m). Ou por comparação com a evolução do momento Torsor atuante, como foi feito por McMullen e El-Degwy [42], e permite obter o gráfico extensão das armaduras (ε_s) “versus” momento Torsor (T).

A extensão nas armaduras, ε_s , é relativo à extensão que a armadura sofre durante o ensaio. Este valor é obtido diretamente a partir dos registos experimentais resultantes da instrumentação das armaduras da viga.

A deformação angular média, Θ_m , e o momento torsor atuante, T, encontram-se definidos na subsecção anterior.

A figura II.14 apresenta, como exemplo, um gráfico tipo ε_s vs Θ_m para uma viga ensaiada por Bernardo[11], em que três secções se encontram instrumentadas.

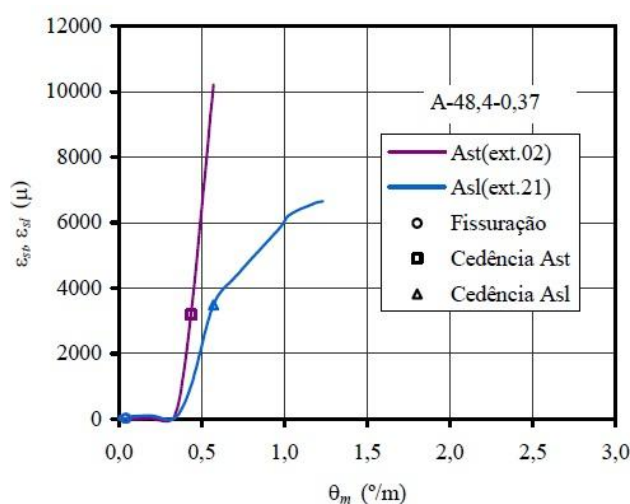


Figura II.14 - Exemplo de curva tipo Extensão na armadura vs Deformação Angular Média [11]

Na elaboração do gráfico ε_s vs Θ_m para uma viga, relacionam-se os valores obtidos experimentalmente para a extensão de uma dada armadura, numa determinada seção, com a evolução da deformação angular. A curva resultante, ou é referente à variação da extensão

na armadura longitudinal (ϵ_{sl}), ou é referente à variação da extensão na armadura transversal (ϵ_{st}). Em qualquer uma das curvas, podem ser apresentados os pontos referentes à fissuração da viga assim como da cedência da respetiva armadura, como se encontra exemplificado na figura II.14. Caso a viga apresente uma rotura frágil, (não se verifique a cedência da armadura), deve-se considerar os resultados que apresentem os valores mais elevados, ou seja, os mais solicitados. É de referir que, os valores seleccionados para cada tipo de armadura (longitudinal e transversal) não tem de se localizar na mesma seção instrumentada. Isto porque o padrão de fissuração em torção (fissuras helicoidais que se desenvolvem ao longo do eixo longitudinal da viga), conduz a que não se possa falar numa seção condicionante da viga durante grande parte do ensaio.

A figura II.15 apresenta, como exemplo, um gráfico tipo ϵ_s vs T para uma viga ensaiada por McMullen e El-Degwy [42].

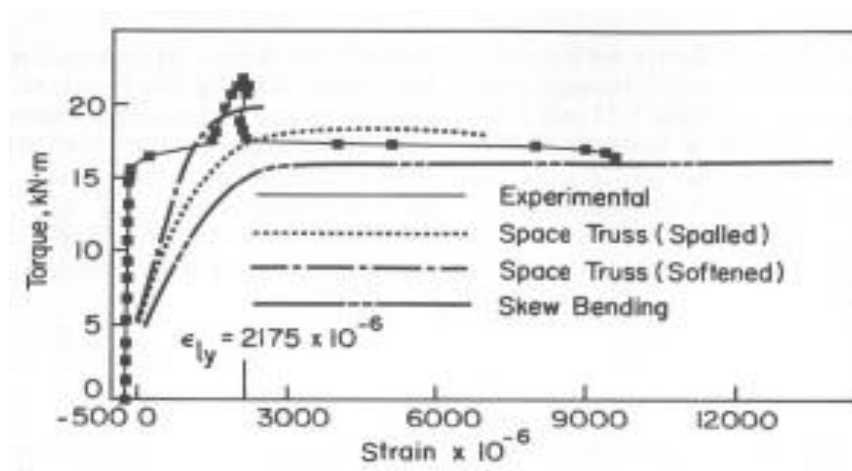


Figura II.15 - Exemplo de curva tipo Extensão na armadura vs momento Torsor atuante [42]

Na elaboração do gráfico ϵ_s vs T para uma viga, relacionam-se os valores obtidos experimentalmente para a extensão de uma dada armadura, numa determinada seção, com a evolução momento Torsor. A curva resultante ou é referente à variação da extensão na armadura longitudinal (ϵ_{sl}), ou é referente à variação da extensão na armadura transversal (ϵ_{st}). Em qualquer uma das curvas, devem ser apresentados os pontos referentes à fissuração da viga assim como da cedência da respetiva armadura. A figura II.15 é referente à extensão sofrida por uma armadura longitudinal de uma viga ensaiada.

Desta forma, procede-se a uma análise e comparação dos resultados obtidos, com o intuito de retirar conclusões.

II.3.3. Evolução da Força na Armadura de Pré-Esforço com a Deformação Angular

Nesta subseção, é descrito como pode ser feito o tratamento dos resultados obtidos experimentalmente de forma a avaliar a evolução da força na armadura de pré-esforço com a

deformação angular média. Esta avaliação, permite obter o gráfico força na armadura de pré-esforço (F_{ps}) “versus” deformação angular média (Θ_m).

A força na armadura de pré-esforço, F_{ps} , é relativa à força a que a armadura de pré-esforço se encontra sujeita durante o ensaio, quando submetida ao momento torsor atuante. Este valor é obtido com base nas leituras registadas ao longo do ensaio, na célula de carga colocada entre a ancoragem e a extremidade da viga.

A deformação angular média, Θ_m , encontra-se definida na subsecção II.3.1.

A figura II.16 apresenta, como exemplo, um gráfico tipo F_{ps} vs Θ_m para um uma viga ensaiada por Bernardo [11].

Na elaboração do gráfico F_{ps} vs Θ_m pode-se apresentar, para a Curva F_{ps} - Θ_m , o ponto correspondentes á fissuração da viga assim como os pontos correspondentes ao início da cedência da armadura longitudinal (A_{sl}) e transversal (A_{st}), como se encontra exemplificado na figura II.16.

Desta forma, procede-se a uma análise e comparação dos resultados obtidos, com o intuito de retirar conclusões.

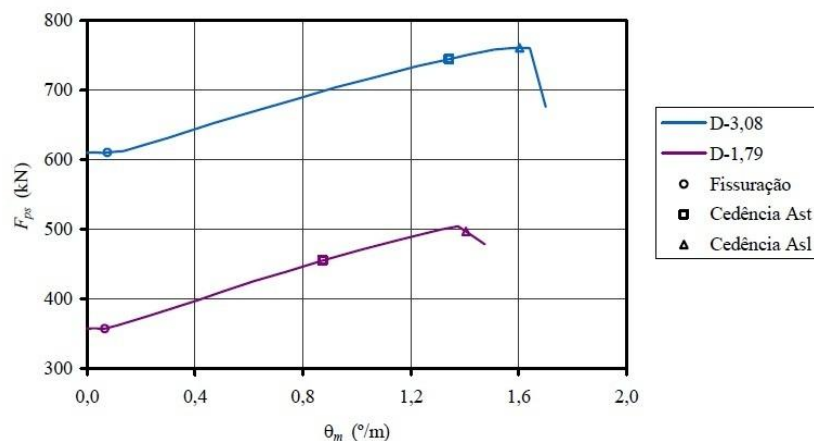


Figura II.16 - Exemplo de curva Força na Armadura de Pré-Esforço vs Deformação Angular Média [11]

II.3.4. Evolução das Rotação ao longo do Eixo das Vigas

Até à presente subsecção, as rotações das vigas foram caracterizadas pela deformação angular média, Θ_m . Se se pretende efetuar um estudo do comportamento plástico da viga ensaiada, através do estudo da capacidade de rotação plástica em torção, torna-se necessário localizar a zona de rotura da viga e estudar o seu carácter local e o seu comportamento plástico, relativamente à restante zona da viga. Desta forma, conclui-se facilmente que o parâmetro Θ_m é demasiado generalista, uma vez que não permite averiguar sobre a existência de um eventual comportamento não uniforme e plástico ao longo do eixo da viga.

Pretende-se assim, analisar a forma como evoluem as rotações ao longo do eixo longitudinal das vigas. É de referir que, para este tipo de análise, devem ser instrumentadas um número considerável de secções da viga, ao longo do ensaio.

Assim, podem ser apresentados dois tipos de gráficos informativos para cada viga.

O primeiro gráfico é referente aos ângulos de rotação absoluta (ϕ_i) calculados nas secções instrumentadas i ao longo do eixo das vigas e representados no eixo das ordenadas. Esses ângulos são calculados a partir das leituras registadas diretamente pela instrumentação colocada nessas secções. O eixo das abcissas é referente às cotas x_i das secções instrumentadas i ao longo do eixo. Tais cotas são medidas a partir de uma secção definida pelo autor do ensaio, geralmente correspondendo a uma das secções delimitadoras da zona de ensaio.

O segundo gráfico é referente às taxas de rotação ao longo do eixo das vigas. O objetivo deste gráfico é informar sobre a participação individual de cada zona da viga (representada em termos médios por uma determinada secção instrumentada), em termos de rotação individual, para a rotação global sofrida pela viga. Se se supor que existe uma zona condicionante da viga em termos de comportamento último à torção, e que se possa considerar tal zona como sendo local na viga, então as secções nessa zona da viga irão sofrer incrementos de rotação superiores às das restantes secções. Tais secções serão assim mais “participativas” do que as restantes em termos de deformação global da viga. As taxas de rotação $\Delta\theta_{ij}$, representadas em ordenadas nos gráficos, são calculadas, para cada nível de carga, dividindo a diferença das rotações absolutas entre duas sucessivas e instrumentadas (secções i e j) pela distância entre essas mesmas secções. O eixo das abcissas é referente às cotas x_{ij} das secções intermédias entre as secções instrumentadas. Tais secções intermédias são representativas da zona da viga que se encontra limitada por duas secções sucessivas e instrumentadas i e j .

A figura II.17 apresenta, como exemplo, um gráfico tipo da evolução das rotações ao longo do eixo da viga para uma viga ensaiada por Bernardo [11].

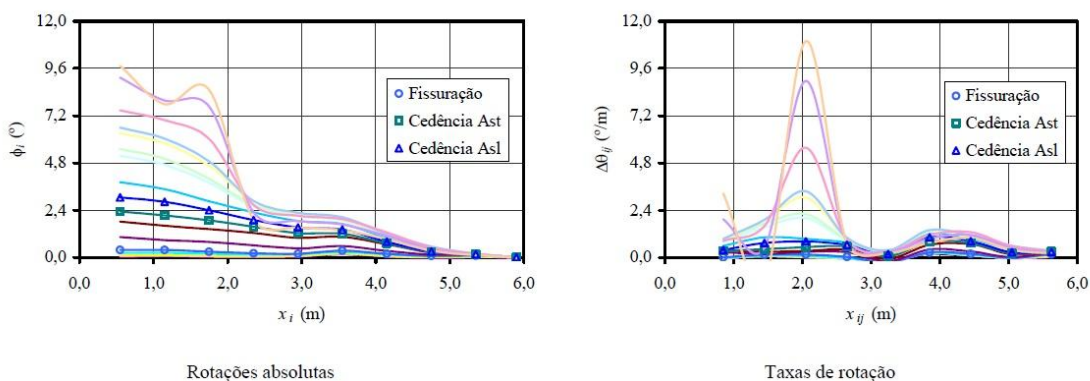


Figura II.17 - Exemplo da evolução das rotações ao longo do eixo da viga para uma viga ensaiada [11]

Como no exemplo apresentado na figura II.17, cada curva apresentada é referente a um determinado nível de carga do ensaio. Para cada gráfico, devem ser identificadas as curvas referentes aos níveis de carga correspondentes à fissuração da viga e à cedência da armadura transversal e longitudinal de torção. A análise evolutiva das curvas apresentadas nos gráficos, deve seguir a ordem crescente das rotações, ou seja, analisar os gráficos de baixo para cima. Desta forma, procede-se a uma análise e comparação dos resultados obtidos, com o intuito de retirar conclusões.

II.3.5. Caracterização Geral do Estado das Vigas a seguir ao Ensaio

II.3.5.1. Análise do registo fotográfico das vigas após o Ensaio

Pretende-se, nesta seção, descrever o processo de caracterização geral do estado da viga após o ensaio, bem como o tipo de rotura ocorrido. Para tal, pode-se efetuar um registo fotográfico na viga antes e após o ensaio.

Podem ser apresentadas fotografias gerais ilustrando o estado geral da viga após o ensaio e após se terem retirado todos os aparelhos e dispositivos de medição instalados nas vigas. Antes de se efetuar o registo fotográfico, devem ser realçadas as fissuras da viga, com o auxílio de marcadores, nas faces visíveis da viga. Devem ser também apresentadas fotografias da zona de rotura após se ter retirado o betão superficial destacado assim como, fotografias de pormenor dessa mesma zona, quando julgado conveniente, para realçar algum aspeto importante. As figuras II.18 e II.19 apresentam, como exemplo, o registo fotográfico registado para vigas ensaiadas, realizado pelo autor do ensaio.



Figura II.18 - Registo fotográfico de vigas ensaiadas por Alnuaimi, Al-jabri e Hago[4].

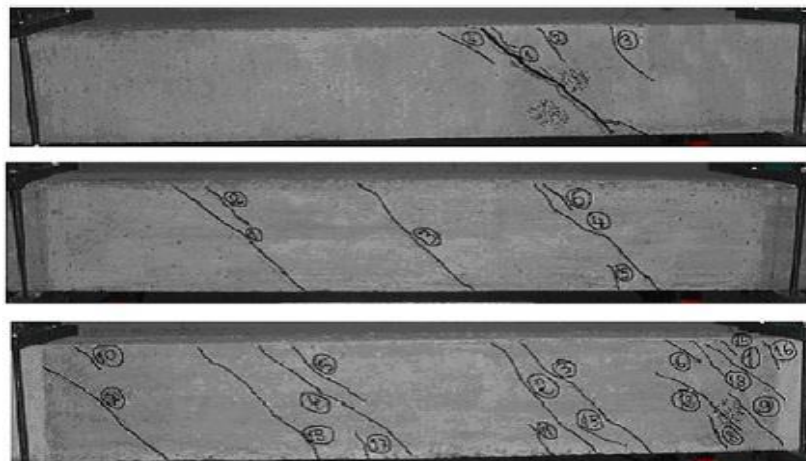


Figura II.19 - Registo fotográfico de vigas ensaiadas por Okay e Engin[46].

Através da análise desse registo e dos resultados obtidos no tratamento dos valores experimentais, deve ser apresentado o modo de rotura da viga e possíveis conclusões.

II.3.5.2. Análise do estado de fissuração das vigas após o ensaio

Pretende-se, nesta seção, descrever a caracterização do estado de fissuração apresentado pela viga após a realização do ensaio. Para tal, deve ser registada a fissuração da viga, após o ensaio da mesma, nas faces visíveis. O método usado para o desenho gráfico das fissuras nas vigas consiste em, numa primeira fase e logo após o ensaio, realçar por meio de marcadores as fissuras nas faces visíveis. Em seguida, pode-se proceder ao registo fotográfico parcelar. Uma grelha auxiliar pode ser desenhada para melhor percepção das fissuras na face da viga. Esta grelha, pode ser desenhada na própria viga ou na foto, dependendo do autor. As fotos, serão então posteriormente digitalizadas e importados para um programa de desenho assistido por computador (CAD), onde são redesenhadas todas as fissuras. As áreas referentes a zonas de rotura e a zonas em que o betão superficial se destacou, devem ser preenchidas a preto. A título de exemplo para esta metodologia são apresentadas as figuras II.20 e II.21.

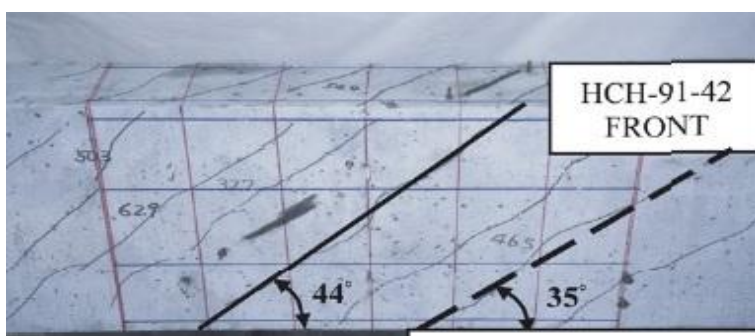


Figura II.20- Exemplo do registo da fissuração para uma viga ensaiada por Fang, Shiau, Shiu e Young[18].

FACE LATERAL ESQUERDA



FACE SUPERIOR



FACE LATERAL DIREITA



Figura II.21 - Exemplo do registo da fissuração num programa CAD, para uma viga ensaiada por Bernardo[11].

Com base nesta metodologia, pretende-se estudar a distância média entre fissuras, o ângulo médio que estas desenham com o eixo longitudinal da viga e a abertura média de fissuras, como parâmetros caracterizadores da fissuração. Para isso, pode ser elaborado em quadro que apresente, para a viga em análise, a distância média entre fissuras de torção ao longo do

eixo longitudinal da viga (d_m), o ângulo médio que as fissuras desenham com o mesmo eixo longitudinal (a_m) e a abertura média de fissuras (w_m).

A medição da distância média entre fissuras é executada com base no programa de desenho assistido usado para redesenhar as próprias fissuras. Só devem ser consideradas fissuras correspondentes a fissuras típicas de torção resultantes do comportamento em Estado II. A distância média entre fissuras (d_m) é calculada tendo por base uma linha auxiliar localizada a meio da face e que representa o eixo longitudinal da viga. Podem ser determinadas as sucessivas distâncias entre fissuras, medidas diretamente na linha auxiliar, e posteriormente calculada a média aritmética dessas distâncias. Essa mesma média constitui o parâmetro d_m . Deve ser referido que d_m não representa a distância real entre fissuras, medida na direção perpendicular a estas, que seria inferior.

O ângulo médio a_m , constitui a média aritmética de todos os ângulos medidos entre fissuras e o eixo longitudinal das faces em estudo da viga, medidos a meio da largura da face. As fissuras consideradas na obtenção deste parâmetro, devem ser as mesmas que foram consideradas na obtenção do parâmetro d_m . Os ângulos, podem ser medidos, com base na orientação mais característica da fissura em análise, devendo-se, se necessário e de forma pontual, deslocar o eixo longitudinal.

A medição da abertura média de fissuras (w_m) é executada diretamente na viga em análise através da utilização de material de medição adequado, (exemplo: fissurómetro, medidor ótico). A abertura média de fissuras (w_m), constitui a média aritmética de todas as espessuras medidas para cada fissura de cada face da viga em estudo. As fissuras consideradas na obtenção deste parâmetro, devem ser as mesmas que foram consideradas na obtenção do parâmetro d_m .

É de referir que, o estudo do grau de fissuração insere-se numa análise do comportamento em serviço. Desta forma, o registo da fissuração deveria ser feito para um nível de carga correspondente à fase de comportamento em serviço da viga. Contudo, se estivermos perante um ensaio que se realize de forma contínua, a paragem desse mesmo ensaio com o âmbito de um registo pormenorizado da fissuração, levaria certamente bastante tempo, o que poderia afetar os resultados. Essa paragem poderia permitir algum tipo de ajustamento e acomodação da viga em estado de carga. Tais fenómenos poderiam provocar alterações no estado de deformação e de tensão na viga que, após o retomar do ensaio, encontrar-se-ia num estado diferente do existente imediatamente antes da paragem do ensaio. Assim, para ensaios efetuados de forma contínua, procede-se à análise do estado de fissuração, no final do ensaio.

Desta forma, procede-se a uma análise e comparação dos resultados obtidos, com o intuito de retirar conclusões.

Capítulo III - Criação da Base de Dados

III.1. Introdução

O presente capítulo, pretende descrever e apresentar, o trabalho desenvolvido para garantir a elaboração de uma Base de Dados de vigas ensaiadas á Torção. Para tal, este capítulo foi estruturado em três partes.

A primeira parte, corresponde à pesquisa efetuada para a elaboração do presente trabalho. Procedeu-se a uma estruturação prévia para a pesquisa por forma a otimizar a mesma. Após ser demonstrado onde e como se procedeu á pesquisa, é apresentado o conjunto de estudos obtidos.

Numa segunda parte, é então descrita a metodologia seguida na construção da Base de Dados. Apresenta-se a estruturação da Base de Dados e a forma de como a mesma foi trabalhada. Por fim, procedeu-se à elaboração de um esboço para um ficheiro que garantisse a caracterização de cada uma das vigas encontradas.

Por fim, é descrito e apresentado o Ficheiro de Dados da Viga sendo exibida a metodologia seguida para o seu preenchimento, e uma exemplificação do resultado desse preenchimento.

III.2. Pesquisa efetuada para a construção da Base de Dados

III.2.1. Introdução

Foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica, em duas bases de dados on-line. Previamente, foi definida a sua orientação e estruturação, com o objetivo de restringir a mesma aos resultados pretendidos.

Assim sendo, a pesquisa bibliográfica foi efetuada em 3 fases distintas: numa primeira fase, a busca de informação foi sobre ensaios experimentais de vigas de betão estrutural (seção cheia ou vazada) ensaiadas à Torção Pura (T); numa segunda fase, a pesquisa estaria focada em ensaios experimentais do mesmo tipo de vigas, mas agora ensaiadas à Torção com Interação de Esforços (T+V;T+M;T+V+M); por fim, numa terceira fase a pesquisa realizar-se-ia para ensaios experimentais do mesmo tipo de vigas estando a mesmas pré-esforçadas, sendo ensaiadas à Torção, (Torção com Pré-Esforço, T+N).

Após a conclusão da pesquisa bibliográfica, os dados recolhidos foram compilados e reestruturados. Desta forma, cada elemento viga de cada ensaio realizado, teve toda a informação recolhida, devidamente caracterizada num ficheiro individual.

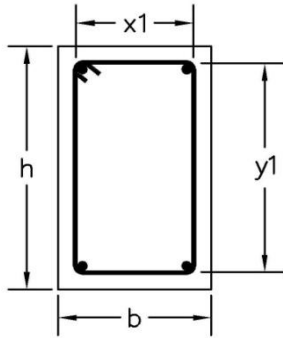
Terminada esta etapa, foram analisados e tratados os resultados obtidos de forma a se proceder à sua introdução na Base de Dados.

III.2.2. Estruturação prévia da pesquisa

A pesquisa para o presente trabalho, foi portanto orientada para ensaios realizados para vigas de betão estrutural ensaiadas à Torção. No Capítulo II foi descrito como podem ser realizados os devidos ensaios. Tais ensaios, podem apresentar uma diversificação elevada, no que diz respeito tanto aos procedimentos relativos à sua realização como aos objetivos a que os autores se propõem atingir. Por exemplo, Alnuaimi *et al.* [4], em 2006, compararam secções cheias com secções vazadas, igualmente armadas, ensaiadas à Torção com interação de esforços; já Fang e Shiau [27], em 2004, estudaram o comportamento à Torção pura, para vigas (de seção cheia) de betão de alta resistência em comparação com vigas de betão de resistência normal. Desta forma, tornou-se necessário definir e estruturar a pesquisa em diversas etapas, para assegurar uma maior eficiência na sua produção. Esta estruturação prévia, visava não apenas facilitar a realização da pesquisa mas pretendia também garantir uma diversificação global para os resultados finais.

Decidiu-se então que, a pesquisa de ensaios à Torção para vigas de betão, seria então orientada para duas secções tipo: seção cheia e seção vazada.

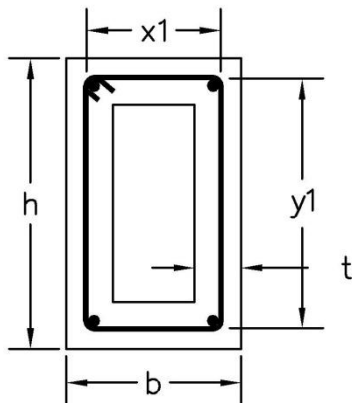
Seção Cheia: Seção para as vigas ensaiadas será de seção tipo retangular cheia, como exemplificado na figura III.1.



- b : dimensão da base da seção;
- h : dimensão da altura da seção;
- x_1 : dimensão entre os centros geométricos dos estribos verticais medida horizontalmente;
- y_1 : dimensão entre os centros geométricos dos estribos horizontais medida verticalmente;

Figura III.1 - Seção Cheia

Seção Vazada: Seção para as vigas ensaiadas será de seção tipo retangular oca, como exemplificado na figura III.2.



- b : dimensão da base da seção;
- h : dimensão da altura da seção;
- x_1 : dimensão entre os centros geométricos dos estribos verticais medida horizontalmente;
- y_1 : dimensão entre os centros geométricos dos estribos horizontais medida verticalmente;
- t : dimensão da espessura da parede da seção (caso a seção apresente espessuras diferentes entre as paredes horizontais e verticais, deve ser apresentado o respetivo valor t_x e t_y);

Figura III.2 - Seção Vazada

Caso os resultados encontrados justificassem a inclusão de outro tipo de seção, a mesma poderia ter sido considerada.

Estando definido os tipos de seção considerados para a pesquisa, a mesma foi dividida em três fases distintas.


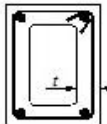
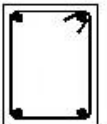
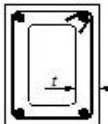
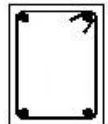
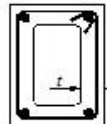
Numa primeira fase, Fase I, a pesquisa foi orientada para vigas de betão ensaiadas apenas e só à Torção (Torção Pura, T). Seriam então pesquisados ensaios para vigas de seção cheia e em seguida para vigas de seção vazada. Optou-se por iniciar esta pesquisa, para ensaios experimentais à Torção Pura, pois previa-se que seria o tipo de ensaio mais frequentemente realizado, sendo assim o mais provável de obter um maior número de resultados. Desta forma, era espectável que o maior grupo de vigas obtidas para a Base de Dados seria obtida nesta primeira fase.

Para a segunda fase, Fase II, a pesquisa foi orientada para vigas de betão estrutural ensaiadas à Torção com Interação de Esforços, isto é, ensaios em que os esforços actantes seriam uma combinação entre Momento Torsor e Esforço Transverso (T+V), ou Momento Torsor e Momento Fletor (T+ M), ou Momento Torsor, Esforço Transverso e Momento Fletor (T+V+M). Foram então pesquisados ensaios para vigas de seção cheia e em seguida para vigas de seção vazada. O estudo da Torção com Interação de Esforços, abordado nesta fase, foi então um complemento á Fase I, por forma a abranger um leque mais vasto de opções no espectro de ensaios à Torção.

Por fim, para a terceira fase, Fase III, a pesquisa foi orientada para vigas de betão estrutural ensaiadas à Torção (Pura ou com Interação de Esforços) com Pré-esforço, isto é, foram procurados ensaios em que as vigas de betão apresentem condições semelhantes ás da Fase I ou Fase II, com a particularidade de se encontram Pré-esforçadas (T+N_p). Foram então pesquisados ensaios para vigas de seção cheia e em seguida para vigas de seção oca. Atualmente, o pré-esforço apresenta uma importância relevante para o dimensionamento estrutural (principalmente no caso de estruturas especiais), logo, foi considerado que estudos efetuados sobre interação entre Torção e Pré-Esforço, seriam imprescindíveis para a presente compilação de dados.

O seguinte quadro resumo, quadro III.1, expressa o faseamento da pesquisa efetuada.

Quadro III.1 - Faseamento da Pesquisa

Pesquisa					
Fase I		Fase II		Fase III	
T		T+V+M		T+N _p	
					
“Cheia”	“Vazada”	“Cheia”	“Vazada”	“Cheia”	“Vazada”

III.2.3. Tipo de Dados pretendidos para a pesquisa

No decorrer da pesquisa, constatou-se que em diversas publicações de estudos realizados, a informação disponibilizada, era demasiado escassa, não se revelando suficiente de forma a ser catalogada. Em outras situações, apresentavam apenas referências de estudos no qual se basearam. Apesar de, nessas situações, as referências serem consideradas e catalogadas no presente trabalho, nem sempre foi possível obter o estudo original pretendido. Por vezes, o estudo pretendido, não era encontrado em nenhuma das bases de dados consultadas, ou não se apresentava disponível gratuitamente, o que inviabilizava a sua obtenção. Neste tipo de situação, a referência do respetivo estudo era devidamente catalogada num quadro criado para estes casos, os quais futuramente podem servir para expandir o presente trabalho.

Assim sendo, o mínimo de informação apresentada por uma publicação, relativa a ensaios experimentais (que se insiram no tema do presente trabalho), teria de ser suficiente por forma a garantir uma caracterização eficiente. Para tal, basta que sejam apresentadas informação relativa aos quatro seguintes tópicos:

- *Características geométricas:* a caracterização geométrica dos modelos de ensaio pode ser apresentada através de uma descrição e/ou pormenorização; a caracterização da armadura utilizada também se insere neste tópico. Geralmente, a par da descrição são apresentadas pormenorizações de secções consideradas relevantes para o ensaio, nas quais são apresentadas as disposições das armaduras do modelo de ensaio. A título de exemplo, apresenta-se a figura III.3, relativa aos ensaios realizados por McMullen e El-Degwy[42].

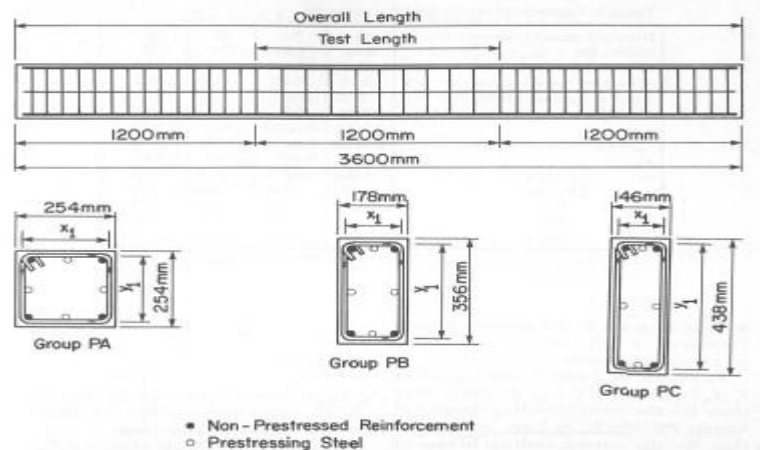


Figura III.3 - Exemplo de Caracterização Geométrica de Viga [42]

- *Propriedades mecânicas dos materiais:* para os materiais utilizados nos modelos de ensaio (betão e aço das armaduras) são geralmente apresentadas as propriedades mecânicas de resistência num quadro resumo. Os valores para diferentes materiais podem ser apresentados em conjunto ou separado. Classes de resistência, módulo de Elasticidade, extensão de cedência (aço) e fissuração (betão), são comumente apresentados. A figura III.4 exhibe o quadro resumo para as propriedades mecânicas do aço para armaduras, apresentado por Hii e Al-Mahaidi[29] nos seus ensaios.

Table 2
Steel reinforcement properties from tensile coupon tests

Reinforcement properties	Stirrups \varnothing 6 mm	Longitudinal bar \varnothing 10 mm
Area, A_s (mm ²)	28.27	78.54
Young's modulus, E_s (MPa)	213,444	207,046
Yield strength, f'_y (MPa)	426.5	398.2
Poisson's ratio, ν	0.3	0.3

Figura III.4 - Exemplo de Quadro Resumo das Propriedades Mecânicas para armaduras [29]

- *Gráficos resultantes dos ensaios:* os resultados obtidos nos ensaios são apresentados, inúmeras vezes, na forma de gráficos, cuja elaboração foi descrita na seção II.3, do presente trabalho. A figura III.5 apresenta um dos gráficos obtidos por Chalioris [15] para um conjunto de vigas, nos seus ensaios.

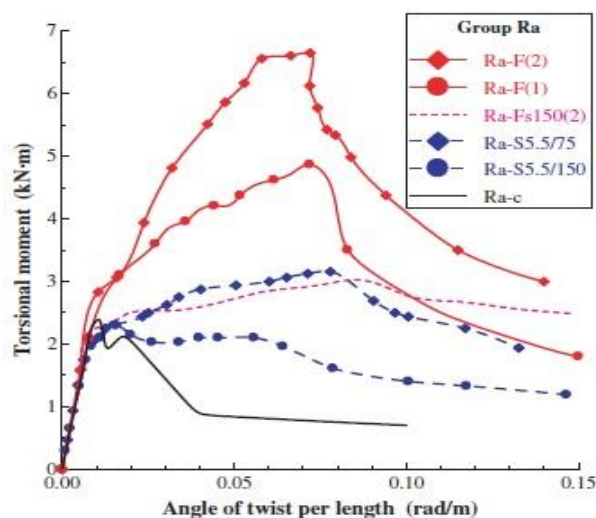


Figura III.5 - Exemplo de Gráfico Torção vs. Rotação para um conjunto de vigas [15]

- *Quadro resumo de resultados dos ensaios:* A par dos gráficos são frequentemente apresentados quadros resumos dos valores característicos do tipo de ensaio. Geralmente, são apresentados valores para o Momento Torsor de fissuração (T_{cri}), Momento Torsor de cedência para armaduras (T_{yl}) e Momento Torsor último (T_u), acompanhados dos respectivos ângulos característicos. Por vezes, são também apresentados os valores para a Rigidez de Torção em Estado I, e/ou em Estado II. Apresenta-se a figura III.6 como exemplo para um quadro resumo de resultados para os ensaios efetuados por Hii e Al-Mahaidi[29].

Table 3
Cracking, ultimate strengths and corresponding twist angles of beam specimens

Specimens	Cracking strength (kN m)	Twist at cracking load (°)	Ultimate strength (kN m)	Twist at ultimate strength (°)
CS1	68.4	0.15	62.9	1.79
FS050D2	73.7 (7.7%)	0.16	93.8 (49.2%)	7.54
CH1	15.8	0.03	49.4	5.29
FH075D1	19.6 (23.9%)	0.00	67.5 (36.7%)	4.60
FH050D1	21.3 (34.4%)	0.04	74.8 (51.5%)	5.43
FH050D2	22.2 (40.0%)	0.02	87.7 (77.6%)	5.52

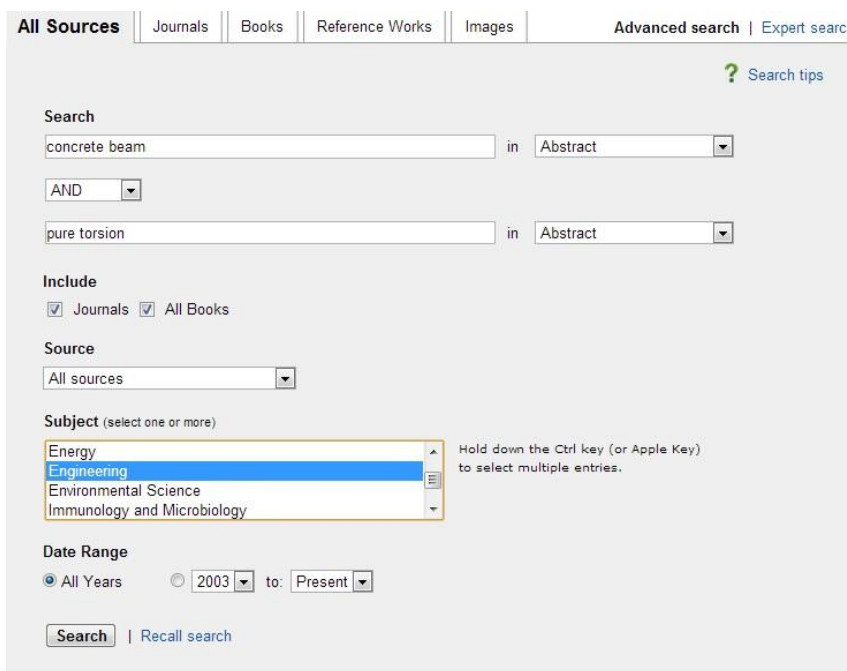
Figura III.6 - Exemplo de Quadro Resumo para os resultados dos ensaios [29]

III.2.4. Realização da pesquisa

A pesquisa foi realizada principalmente através de duas bases de dados on-line, para as quais o acesso foi concedido, com o propósito da elaboração deste trabalho. Foram então consultadas as seguintes Base de Dados: Elsevier Science Direct e Web of Knowledge. Foi também consultado um extenso conjunto bibliográfico, previamente recolhido e recomendado ao autor.

Ambas as Bases de Dados on-line, possuíam motores de busca semelhantes, onde eram devidamente introduzidas palavras-chave que facilitavam a procura. Ambas possuíam também campos relativos a autores, áreas de estudo, tipo de publicação, período cronológico, etc. A combinação destes campos, permitia melhorar a objetividade da pesquisa. A título de exemplo, é apresentada a figura III.7, na qual se vê o preenchimento dos campos de pesquisa no motor de busca de uma das Bases de Dados consultada.

O conjunto bibliográfico consultado, era o resultado de uma compilação prévia, utilizado em estudos anteriores, que estavam inseridos em uma área de estudo semelhante. Logo, do mesmo modo, foi realizada uma pesquisa nesse mesmo conjunto, com o objetivo de encontrar informação considerada relevante para o presente trabalho.



The image shows a search interface for Elsevier. At the top, there are tabs for 'All Sources', 'Journals', 'Books', 'Reference Works', and 'Images'. To the right, there are links for 'Advanced search' and 'Expert search'. Below the tabs, there is a search bar with the text 'concrete beam' and a dropdown menu set to 'Abstract'. Below this, there is a dropdown menu for 'AND' and another search bar with the text 'pure torsion' and a dropdown menu set to 'Abstract'. Underneath, there is an 'Include' section with checkboxes for 'Journals' and 'All Books', both of which are checked. Below that is a 'Source' section with a dropdown menu set to 'All sources'. The 'Subject' section has a dropdown menu with the following options: 'Energy', 'Engineering' (highlighted), 'Environmental Science', and 'Immunology and Microbiology'. To the right of the subject dropdown, there is a note: 'Hold down the Ctrl key (or Apple Key) to select multiple entries.' At the bottom, there is a 'Date Range' section with radio buttons for 'All Years' (selected), '2003', and 'Present'. Below the date range, there is a 'Search' button and a 'Recall search' link.

Figura III.7 - Campos de pesquisa para a Base de Dados On-line Elsevier [34]

III.2.5. Conjunto de estudos pretendidos

Como foi referido anteriormente, no decorrer da pesquisa, todos os estudos encontrados que revelavam um enriquecimento para o presente trabalho, foram devidamente registados e catalogados. Apesar de, por diversas situações, nem sempre ter sido possível obter um dado estudo, o mesmo encontra-se referenciado. Pretende-se assim que, quando o mesmo se encontrar disponível, a sua informação seja propriamente adicionada.

Assim, como resultado da pesquisa efetuada, apresenta-se o quadro III.2. Neste quadro, são exibidos todos os estudos encontrados, de interesse para o presente trabalho. No quadro III.2, para cada estudo, são apresentados o título, a respectiva referência e o tipo de apresentação do mesmo (Artigo; Master, (Tese de mestrado); Ph.D., (Tese de Doutorado)). Os estudos que se encontram sombreados em tom azul, são os que efetivamente foram obtidos com sucesso e foram considerados na elaboração da Base de Dados pretendida.

Quadro III.2 - “Estudos Pretendidos” para a Base de Dados.

Nº	Pesquisa		
	Título	Ref.	Doc.
1	Prestressed concrete tests compared with torsion theories.	42	Artigo
2	Torção em vigas em caixão de betão de alta resistência	11	Ph. D.
3	Behaviour of reinforced concrete beams subjected to combined shear and torsion	51	Ph. D.
4	The diagonal compression field theory for reinforced concrete beams subjected to combined torsion, flexure and axial load	47	Ph. D.
5	The behavior of uniformly prestressed concrete box beams in combined torsion and bending	63	Master
6	Torsional behavior of normal and high strength concrete beams	27	Artigo
7	comparison between solid and hollow reinforced concrete beams	4	Artigo
8	Torsion of structural concrete-behavior of reinforced concrete rectangular members	30	Artigo
9	Torsionsversuche na Stahlbetonbalken	40	Artigo
10	Pure torsion in rectangular section - A re-examination	43	Artigo
11	Genetic-programming based modeling of RC Beam torsional strength	13	Artigo
12	Effect of stirrups on ultimate torque of reinforced concrete beams	23	Artigo
13	Shear and torsion design of prestressed and non-prestressed concrete beams	53	Artigo
14	Torsion of high strength reinforced concrete beams and minimum reinforcement requirement	68	Artigo
15	Using radial basis function neural networks to model torsional strength of reinforced concrete beams	78	Artigo
16	Effect of concrete strength on the behavior of RC beams subjected to pure torsion	22	Artigo
17	Torsion in reinforced normal and high strength concrete beams part-1 : An experimental test series	67	Artigo
18	Torsion in high strength concrete rectangular beams	65	Master
19	Redistribution of moments at cracking - The key to simpler torsion design	52	Artigo
20	Ultimate strength of reinforced concrete beams in combined torsion and shear	76	Artigo
21	Torsion, bending and shear in rectangular reinforced concrete beams- An experimental study	70	Artigo
22	Design of reinforced concrete spandrel beams	21	Artigo
23	Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fiber-reinforced-polymers-experimental study	15	Artigo
24	Upgrading torsional resistance of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer	77	Artigo
25	Torsional strengthening of reinforced concrete beams strengthened with FRP composites	72	Artigo

26	A calculation method of cracking moment for the high strength concrete beams under pure torsion	35	Artigo
27	Experimental study of the torsion of reinforced concrete members	26	Artigo
28	Behaviour of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement	18	Artigo
29	Torsion in reinforced concrete	66	Artigo
30	Torsion of reinforced concrete	69	Artigo
31	Softening of concrete in torsional members-theory and tests	41	Artigo
32	T-beams subjected to combined bending and torsion	42	Artigo
33	Strength evaluation and retrofit of reinforced concrete beams subjected to pure torsion	43	Master
34	The behavior of structural concrete beams in pure torsion	44	Ph. D.
35	Torsional behavior of high-strength concrete beams strengthened using CFRP sheets; An experimental and analytical study	71	Artigo
36	Torsional behavior of steel fiber reinforced concrete beams	46	Artigo
37	Thin-walled composite beams under bending, torsional and extensional loads	64	Artigo
38	Analysis of sections subjected to combined shear and torsion	5	Artigo
39	Experimental study of prestressed concrete under combined torsion, bending and shear	25	Artigo
40	Combined torsion and bending in reinforced and prestressed concrete beams	50	Artigo
41	Experimental study of externally prestressed segmental beam under torsion	3	Artigo
42	Simple rational formulas for cracking torque and twist of reinforced concrete members	54	Artigo
43	Softening of concrete in torsional members-design recommendations	50	Artigo
44	Toward a rational approach for design of minimum torsion reinforcement	75	
45	Quantifying the reduction factor for hsu/zhu ratio for RC members under torsion	52	
46	A softened membrane model for torsion in reinforced concrete member	79	Artigo
47	Strain gradient effect in RC elements subjected to torsion	49	Artigo
48	Chapter 4: Softened membrane model for torsion of reinforced Concrete	54	Artigo
49	Torsionsversuche na stahlbetonbalken	16	
50	Torsionsversuche na stahl-und spannbetonbalken	73	
51	Investigation on thickness of shear flow zone for RC beams subjected to Pure torsion(in chinese)	74	Master
52	Behaviour of reinforced concrete box beams subjected to pure torsion (in Chinese)	36	Master
53	The behavior od reinforced concrete beam subjected to combine torsion and shear(in Chinese)	10	Master
54	Torsion Calculations For Hollow Sections	60	Artigo
55	Torsion of concrete beams using a post-twisting technique	8	Artigo
56	Torsion of steel fiber reinforced members	28	Artigo
57	Analytical model for the torsional behaviour of reinforced concrete beams retrofitted with FRP materials	14	Artigo
58	Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams	17	Artigo
59	Behavior of FRP strengthened reinforced concrete beams under torsion	19	Artigo
60	An experimental investigation on torsional strengthening of solid and box-section RC beams using CFRP laminates.	29	Artigo
61	Torsionsversuche und Torsions-Biege-Versuche an Stahlbetonbalken	39	Artigo

62	Cracking of reinforced concrete beams under torsion - theory and experimental research	9	<i>Artigo</i>
63	Design formulas for cracking torque and twist in hollow RC members	38	<i>Artigo</i>
64	Versuche na Stahlbetonbalken unter Torsion	41	<i>Artigo</i>
65	Torsion	45	<i>Artigo</i>

A estruturação e organização dos estudos obtidos, decorreu de forma simultânea com a pesquisa. Assim, quando foi considerado que a informação recolhida era suficiente para a composição da Base de Dados, foi dada por encerrada a pesquisa. Procedeu-se então ao tratamento da informação recolhida.

III.3. Metodologia seguida na construção da Base de Dados

Nesta seção, é descrita a forma de como foram desenvolvidos e trabalhados os estudos obtidos em resultado da pesquisa efetuada.

III.3.1. Estruturação da Base de Dados

A estruturação da presente Base de Dados, foi evoluindo à medida que a mesma ia crescendo. Inicialmente, consistiu na catalogação de estudos relativos a ensaios experimentais de vigas à Torção (quadro III.2). É de referir que, apesar dos esforços aplicados na pesquisa, não foi possível obter com sucesso todos os estudos pretendidos. Uma parte considerável desses mesmos estudos, apresentou-se indisponível. Os estudos obtidos (identificados no quadro III.2 com sombreamento), foram agrupados e estruturados à medida que iam sendo adicionados.

O quadro III.3, apresenta os estudos obtidos, devidamente numerados, com a respetiva referência e o tipo de documento em que se encontra (Artigo; Master, (Tese de mestrado); Ph.D., (Tese de Doutoramento)). A numeração apresentada no quadro III.3, constitui a identificação de cada estudo adicionado para a Base de Dados. Assim, futuramente, os estudos obtidos serão apresentados e identificados pelo número correspondente.

Quadro III.3 - “Estudos Obtidos” para a Base de Dados

Nº	Pesquisa		
	Título	Ref.	Doc.
1	Prestressed concrete tests compared with torsion theories.	42	Artigo
2	Torção em vigas em caixão de betão de alta resistência	11	Ph. D.
3	Behaviour of reinforced concrete beams subjected to combined shear and torsion	51	Ph. D.
4	The diagonal compression field theory for reinforced concrete beams subjected to combined torsion, flexure and axial load	47	Ph. D.
5	Torsional behavior of normal and high strength concrete beams	27	Artigo
6	comparison between solid and hollow reinforced concrete beams	4	Artigo
7	Genetic-programming-based Modeling of RC Beam Torsional Strength	13	Artigo
8	Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fiber-reinforced-polymers-experimental study.	15	Artigo
9	A calculation method of cracking moment for the high strength concrete beams under pure torsion	35	Artigo
10	Behaviour of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement.	18	Artigo
11	Torsional behavior of steel fiber reinforced concrete beams	46	Artigo
12	Combined torsion and bending in reinforced and prestressed concrete beams.	50	Artigo
13	Experimental study of externally prestressed segmental beam under torsion	3	Artigo
14	Torsionsversuche na Stahlbetonbalken	40	Artigo
15	"Torsion of concrete beams using a post-twisting technique" indian institute of technology, Bombay, India 1994	8	Artigo
16	"torsion of steel fiber reinforced members",national institute of technology , warangal, india 2003	28	Artigo

17	"Analytical model for the torsional behaviour of reinforced concrete beams retrofitted with FRP materials"	14	Artigo
18	"Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams"	17	Artigo
19	Design formulas for cracking torque and twist in hollow RC members	38	Artigo
20	An experimental investigation on torsional strengthening of solid and box-section RC beams using CFRP laminates.	29	Artigo
21	Torsion of structural concrete-behavior of reinforced concrete rectangular members	30	Artigo
22	Pure torsion in rectangular section - A re-examination.	43	Artigo
23	Torsionsversuche und Torsions-Biege-Versuche an Stahlbetonbalken	29	Artigo

Uma análise ligeira do quadro III.3 permite constatar que, na sua grande maioria, os estudos obtidos encontram-se no formato de Artigo, o que vai de encontro ao esperado.

Os estudos obtidos, foram então devidamente analisados e posteriormente catalogados. Recolheu-se informação acerca dos autores do estudo, assim como do ano de publicação e do país de origem do mesmo. Esta informação é apresentada no quadro III.4, e será posteriormente (Capítulo IV) tratada estatisticamente.

Quadro III.4 - Caracterização dos "Estudos Obtidos"

Estudos Obtidos			Autores	Ano de publicação	País de origem
Nº	Documento	Ref.			
1	Artigo	42	Arthur E. McMullen & Wael M. El-Degwy	1985	Canadá
2	Ph. D.	11	Luís A. Bernardo	2003	Portugal
3	Ph. D.	51	Khaldoun N. Rahal	1993	Canadá
4	Ph. D.	47	Wiston M. Onsongo	1978	Canadá
5	Artigo	27	I-Kuang Fang & Jyh-Kun Shiau	2004	China
6	Artigo	4	Ali Said Alnuaimi & Khalifa S. Al-Jabri & Abdelwahid Hago	2006	Omã
7	Artigo	13	Cevik A. & Arslan M.H. & Korogku M.A.	2010	Turquia
8	Artigo	15	Constantin E. Chariolis	2006	Grécia
9	Artigo	35	Metin Hussein & Ertekin Oztekin & Selim Pul	2010	Turquia
10	Artigo	18	Chiu H-J & Fang I-K & Young W-T & Shiau J-K	2006	China
11	Artigo	46	Fuad Okay & Serkan Engin	2011	Turquia
12	Artigo	50	Rahal KN & Collins MP	2003	Kuwait/ Canadá
13	Artigo	3	M.A. Algorafi & A.A.A. Ali & I. Otthman & M.S. Jaafar & M.P. Anwar	2008	Malásia
14	Artigo	40	Leonhardt, F. & Schelling, G.	1974	Alemanha
15	Artigo	8	Nisith k. Bairagi & Pramod T. Pise	1994	Índia
16	Artigo	28	T.D. Gunneswara Rao & D. Rama Seshu	2003	Índia
17	Artigo	14	Constantin E. Chariolis	2007	Grécia
18	Artigo	17	Constantin E. Chariolis & Chris G. Karayannis	2009	Grécia
19	Artigo	38	Jeng C.-H & Chiu, H-J	2011	China
20	Artigo	29	Hii A K Y & Al-Mahaidi R	2006	Austrália

21	<i>Artigo</i>	30	Thomas C. Hsu	1968	E.U.A
22	<i>Artigo</i>	43	McMullen, A.E. & Rangan, B.V.	1978	Canadá
23	<i>Artigo</i>	29	Lampert, P. & Thürlimann, B.	1969	Alemanha

Através de uma análise ao quadro III.4, pode-se verificar uma heterogeneidade elevada quanto ao país de origem dos estudos obtidos. É também possível constatar que na sua maioria, os estudos obtidos foram feitos na ultima década, sendo relativamente recentes. Os dados aqui apresentados, serão analisados e discutidos no Capítulo IV.

Após esta fase, procedeu-se á separação entre os ensaios realizados em cada um dos estudos obtidos. Esta separação consistiu em catalogar os ensaios quanto ao tipo de ensaio, e tipo de seção do modelo viga ensaiado. Assim, os estudos foram catalogados quanto aos seus ensaios em: Ensaio à Torção Pura (T); Ensaio à Torção com Interação de Esforços (T+V+M); Ensaio à Torção (Pura ou com Interação de Esforços) com Pré-Esforço (T+N_p). Em relação ao tipo de seção do modelo viga ensaiado, o mesmo era distinguido em seção cheia e seção vazada. Em algumas ocasiões, os resultados desta separação coincidiram com a fase (Fase I, II ou III) da pesquisa em que se obtinha o estudo em questão. A priori, previa-se que essa situação fosse constante, mas tal não se verificou no decorrer da pesquisa.

O quadro III.5, apresenta então os resultados obtidos, através da separação anteriormente descrita para o conjunto de estudos obtidos. Nesse mesmo quadro, figuram o número respetivo de cada estudo (N°), a forma do estudo (Documento), a respetiva referencia (Ref), o tipo de ensaio realizado nesse estudo e o tipo de seção ensaiada (Cheia ou Vazada). Se para um dado estudo, se realizaram diferentes tipos de ensaios, todos serão referenciados. No caso de um estudo apresentar ensaios de ambos os tipos de secções, ambas foram referenciadas.

Quadro III.5 - Tipo de ensaio e tipo de seção para o conjunto de “*Estudos Obtidos*”

Estudos Obtidos			Tipo Ensaio	Tipo de seção	
N°	Documento	Ref.		Cheia	Vazada
1	<i>Artigo</i>	42	T+N	x	
2	<i>Ph. D.</i>	11	T & T+N		x
3	<i>Ph. D.</i>	51	T+V	x	
4	<i>Ph. D.</i>	47	T+M+V	x	x
5	<i>Artigo</i>	27	T	x	
6	<i>Artigo</i>	4	T+M+V	x	x
7	<i>Artigo</i>	13	T	x	
8	<i>Artigo</i>	15	T	x	
9	<i>Artigo</i>	35	T	x	
10	<i>Artigo</i>	18	T	x	x
11	<i>Artigo</i>	46	T	x	
12	<i>Artigo</i>	50	T+N		x
13	<i>Artigo</i>	3	T+N		x
14	<i>Artigo</i>	40	T	x	

15	<i>Artigo</i>	8	T	x	
16	<i>Artigo</i>	28	T	x	
17	<i>Artigo</i>	14	T	x	
18	<i>Artigo</i>	17	T	x	
19	<i>Artigo</i>	38	T		x
20	<i>Artigo</i>	29	T	x	x
21	<i>Artigo</i>	30	T	x	
22	<i>Artigo</i>	43	T	x	
23	<i>Artigo</i>	29	T	x	

Os dados apresentados no quadro III.5, referentes à separação dos ensaios e tipos de seção dos estudos obtidos, revelam, para o tipo de ensaio, uma predominância dos ensaios à Torção Pura. No entanto, se bem que minoritariamente representados, obteve-se com sucesso estudos que representam os vários tipos de ensaios pretendidos inicialmente. No caso relativo ao tipo de seção, os estudos obtidos apresentam variedade entre os dois tipos, com predominância para o tipo de seção cheia. Tanto para o tipo de ensaio como para o tipo de seção, obteve-se o resultado esperado. Através do quadro III.5, pode-se verificar que, exceto em cinco casos particulares (estudos nº 2,4,6,10 e 20), os ensaios realizam-se apenas para um tipo de ensaio e um tipo de seção. Os dados aqui apresentados, serão analisados e discutidos no Capítulo IV.

De seguida, houve necessidade de averiguar o número de vigas ensaiadas em cada um dos estudos obtidos. Para tal, foi construído um quadro (quadro III.6), no qual se registou, para cada estudo, o número total de vigas ensaiadas. Além do número total de vigas, registou-se da mesma forma, e também para cada estudo, o número de vigas ensaiadas para o tipo de ensaio realizado, e também o número de vigas correspondentes a cada tipo de seção. Esta especificação, apresenta especial importância, para o caso de estudos onde os ensaios realizados, são de vários tipos, ou no caso de as vigas apresentarem vários tipos de seção (estudos 2,4,6,10 e 20 do quadro III.6.)

Quadro III.6 - Número de Vigas ensaiadas para o conjunto de “Estudos Obtidos”

Estudos Obtidos			Nº de vigas ensaiadas					
			Total	Tipo de ensaio			Tipo de seção	
Nº	Documento	Ref.		T	T+M	T+Np	Cheia	Vazada
1	<i>Artigo</i>	42	13			13	13	
2	<i>Ph. D.</i>	11	20	18		2		20
3	<i>Ph. D.</i>	51	7		7		7	
4	<i>Ph. D.</i>	47	14		14		4	10
5	<i>Artigo</i>	27	16	16			16	
6	<i>Artigo</i>	4	14		14		7	7
7	<i>Artigo</i>	13	21	21			21	
8	<i>Artigo</i>	15	14	14			14	
9	<i>Artigo</i>	35	10	10			10	

10	Artigo	18	13	13			10	3
11	Artigo	46	12	12			12	
12	Artigo	50	5			5		5
13	Artigo	3	12			12		12
14	Artigo	40	18	18			18	
15	Artigo	8	10	10			10	
16	Artigo	28	20	20			20	
17	Artigo	14	23	23			23	
18	Artigo	17	35	35			35	
19	Artigo	38	3	3				3
20	Artigo	29	6	6			2	4
21	Artigo	30	41	41			41	
22	Artigo	43	6	6			6	
23	Artigo	29	1	1			1	

Uma análise ligeira ao quadro III.6, permite verificar que na sua maioria, os estudos obtidos apresentam ensaios onde foram testadas mais de dez vigas. Também se pode constatar, nos casos particulares referidos anteriormente, como estes se encontram estruturados. No caso do estudo nº2 [11], das vinte vigas de seção vazada ensaiadas, apenas duas são ensaiadas à Torção com Pré-Esforço, sendo as restantes ensaiadas à Torção Pura. No caso do estudo nº4 [47], das catorze vigas ensaiadas à Torção com Interação de Esforços, dez são vigas com seção vazada e quatro são com seção cheia. No caso do estudo nº6 [4], das catorze vigas ensaiadas também à Torção com Interação de Esforços, sete são vigas com seção vazada e sete são com seção cheia. No caso do estudo nº10 [18], das treze vigas ensaiadas à Torção Pura, 10 são vigas com seção cheia e três são com seção vazada. Por fim, no caso do estudo nº20 [29], das seis vigas ensaiadas à Torção Pura, duas são vigas com seção vazada e quatro são com seção cheia. Os dados aqui apresentados, serão analisados e discutidos no Capítulo IV.

Durante a recolha dos dados do qual resulta o quadro III.6, procedeu-se a uma análise mais alargada dos estudos obtidos, por forma a perceber o melhor possível, toda a informação acessível. O propósito dessa mesma análise, prendeu-se com a preparação da individualização da informação de cada uma das vigas ensaiadas. Durante esta análise, atendeu-se principalmente, à forma em que a informação se encontrava disponível, o que se encontrava concretamente disponível, em que unidades se expressavam, entre outros. Através desta análise, foi então pensada a forma como toda essa informação seria individualizada.

Estando reunida toda esta informação, surgiu então a necessidade de caracterizar e definir, para cada uma das vigas ensaiadas, todos os dados e resultados obtidos e disponibilizados. Atendendo a atingir esse propósito, foi pensado um ficheiro digital singular, em formato Excel, que pudesse compilar em si, toda essa informação. Atribuiu-se a esse ficheiro o nome de Ficheiro de Dados da Viga, o qual será doravante denominado por “*ficheiro FDV*”.

Visto que, a cada viga da presente compilação, corresponde um ficheiro singular e individual, e tendo em conta o elevado número de vigas provenientes de diferentes estudos, tornou-se imprescindível, desenvolver uma nomenclatura adequada para este conjunto de ficheiros.

Posto isto, optou-se por simplesmente numerar o *ficheiro FDV* com dois números separados por um ponto. O primeiro número corresponderá ao número do estudo (definido anteriormente pelo Quadro III.3) ao qual a viga caracterizada pertence. O segundo número corresponde à própria posição ordinal da viga no seu respetivo estudo. A título de exemplo, o *ficheiro FDV* correspondente à primeira viga apresentada pelo estudo nº 16, será nomeado de 16.1, o *ficheiro FDV* da segunda viga desse mesmo estudo, será 16.2 e assim sucessivamente. Esta nomenclatura permite, de uma forma simples e praticamente instantânea, identificar a origem da viga, apenas pelo título do seu ficheiro caracterizador.

III.3.2. Esboço para o Ficheiro de Dados da Viga (ficheiro FDV)

De seguida, foi pensado como podia estar estruturado o *ficheiro FDV*, que tipo de informação podia conter e como a mesma seria apresentada. Optou-se por fasear a caracterização de cada viga, tendo em conta a diversidade da informação acessível. Assim, a caracterização encontrar-se-ia dividida em sete fases distintas.

Decidiu-se então que, numa primeira fase, podia-se caracterizar o ensaio para a viga através de palavras-chave. Obviamente, essas palavras estavam relacionadas com o tipo de ensaio, tipo de viga ou mesmo o que se estava a analisar através do ensaio. Esta foi uma solução efetiva para uma localização simples do ficheiro-viga através de um motor de busca, a elaborar com esse propósito.

Em seguida, e numa segunda fase, definiu-se todas as características conhecidas, relacionadas com o estudo ao qual a viga pertence, em simultâneo com todas as características do ensaio. Foi então descrito, o tipo de formato do estudo, autores, ano de publicação, entre outros, assim como o tipo de ensaio, tipo de carga do ensaio, ano de realização, entre outros. Este tipo de informação, já tinha sido compilada e apresentada, de uma forma geral, para os estudos obtidos. Foi então necessário, especificar esta informação de uma forma particular, adaptada para cada viga.

Posteriormente, numa terceira fase, procedeu-se à definição das propriedades geométricas do modelo viga ensaiado. Nesta fase, foram definidas categoricamente, não apenas as propriedades geométricas da viga, como também as armaduras que a constituem. As armaduras, podiam ser definidas quanto à localização e quantidades. É de realçar que, não apenas seriam consideradas as armaduras ordinárias convencionais (longitudinal e transversal), como também as armaduras de pré-esforço, reforço do betão por fibras de aço, ou com polímeros reforçados com fibras (FRP).

A quarta fase, consistiu na definição das propriedades mecânicas dos materiais constituintes do modelo viga. Esta fase, estava dividida em duas partes. Na primeira atendia-se à caracterização das propriedades mecânicas do betão utilizado, Classe de Resistência, Modulo de Elasticidade, entre outros. Na segunda parte, foram então caracterizadas as propriedades

mecânicas das armaduras utilizadas (Classes de Resistência, extensões de cedência, entre outras).

A quinta fase, apresentava a informação numérica relativa aos resultados dos ensaios. Esta fase, antecipou-se como a mais morosa, uma vez que, regra geral, esta informação encontrava-se apenas disponibilizada sob a forma de gráficos, em formato de imagem. Para transpor esta informação, houve necessidade de desenvolver um método que se revelasse rigoroso o suficiente, com vista a que os dados obtidos não perdessem precisão. Desta forma, optou-se pela seguinte metodologia:

Os dados obtidos sobe forma gráfica, foram digitalizados e importados para um programa de desenho assistido (CAD). Em seguida, foram marcados pontos ao longo das curvas apresentadas nesses mesmos gráficos. O número de pontos utilizados, não seria constante e variavam consoante a curva. O principal objetivo seria o de garantir, com um elevado grau de aproximação, um andamento em tudo semelhante ao da respetiva curva. Posteriormente, foram retiradas as coordenadas desses mesmos pontos, e devidamente catalogadas, para depois serem convertidas nas unidades reais. A conversão revelava-se necessária devido a escala da figura. Este processo, se bem que preciso o suficiente, revelou-se muito moroso (como esperado) e fatigante, devido ao elevado número de curvas recolhidas.

Estes dados, apresentam uma importância elevada pois, são efetivamente os resultados obtidos nos ensaios das respetivas vigas. Foram apresentados sob a forma de quadro, com todos os valores recolhidos através da metodologia acima citada, e com o respetivo gráfico, obtido a partir dessa mesmo quadro.

Numa sexta fase, foram apresentados os valores caracterizadores do ensaio na forma de um quadro resumo. Estes valores, disponibilizados muitas vezes nos estudos também sob a forma de um quadro resumo, são obtidos consoante o estudo realizado. Geralmente, são apresentados o Momento Torsor de Fissuração da viga (T_{cr}) e respetivo Angulo de Rotação Θ_{cr} , assim como o Momento Torsor Máximo (T_m) e respetivo Angulo de Rotação Θ_m e o Momento Torsor de Rotura da viga (T_u) e respetivo Angulo de Rotação Θ_u , mas podem ser apresentados outros valores. Assim, o quadro resumo, apresenta todos os valores característicos recolhidos dos estudos obtidos, encontrando-se preenchidos apenas os valores disponibilizados para a respetiva viga.

Por fim, numa última fase, apresenta-se um espaço destinado a comentários e/ou notas. Se, por algum motivo em especial, fosse necessário acrescentar um comentário ou informação que não se enquadre nas restantes fases, o mesmo seria então aqui apresentado.

Através deste faseamento, esperava-se obter com sucesso uma compilação clara e ergonómica da informação disponibilizada pelos estudos encontrados.

Encontrando-se, desta forma, esboçado o *ficheiro FDV*, procedeu-se de seguida à sua elaboração.

III.4. Definição e apresentação do Ficheiro de Dados da Viga (ficheiro FDV).

A presente seção tem como objetivo a apresentação e definição do *ficheiro FDV*. Será demonstrada a sua constituição, assim como o processo de preenchimento desse mesmo ficheiro. Inicialmente, será apresentado de forma global, sendo em seguida apresentado, a par de uma demonstração de preenchimento, cada uma das suas partes.

O *ficheiro FDV* é um ficheiro em formato Excel, constituído por oito folhas distintas. No seguimento da estruturação elaborada anteriormente, atribuiu-se a cada uma das folhas uma fase de caracterização, exceto no caso da quarta fase, relativa às propriedades mecânicas dos materiais. Visto esta fase se encontrar dividida em duas partes (betão e armaduras), entendeu-se que seria melhor atribuir uma folha distinta para cada. Cada uma das folhas, apresenta um conjunto de quadros, pré-formatadas, onde foi então preenchida a informação correspondente, informação essa retirada dos estudos encontrados. Posto isto, o *ficheiro FDV* apresenta a seguinte constituição: **Folha 1 - Keywords**, correspondente à primeira fase; **Folha 2 - General Information**, correspondente à segunda fase; **Folha 3 - Geometric Properties**, correspondente à terceira fase; **Folha 4 - Mechanical Characteristics of Concrete**, correspondente à primeira parte da quarta fase; **Folha 5 - Mechanical Characteristics of Reinforcement**, correspondente à segunda parte da quarta fase; **Folha 6 - Numerical Data**, correspondente à quinta fase; **Folha 7 - Key Points**, correspondente à sexta fase; e **Folha 8 - Notes**, correspondente à sétima fase.

Optou-se por considerar para idioma base do ficheiro FDV o inglês para ser mais a sua utilização por qualquer investigador, seja nacional ou estrangeiro.

De seguida será então apresentada e definida cada uma das Folhas, acompanhada por uma explicação quanto à sua constituição e preenchimento.

Folha 1 - Keywords

Esta folha, apresenta-se como a primeira, e nela caracteriza-se, de forma geral, o ensaio para a viga, através de palavras-chave. Para esse efeito, é disponibilizado um quadro. A figura III.8 apresenta uma vista geral sobre a Folha 1.

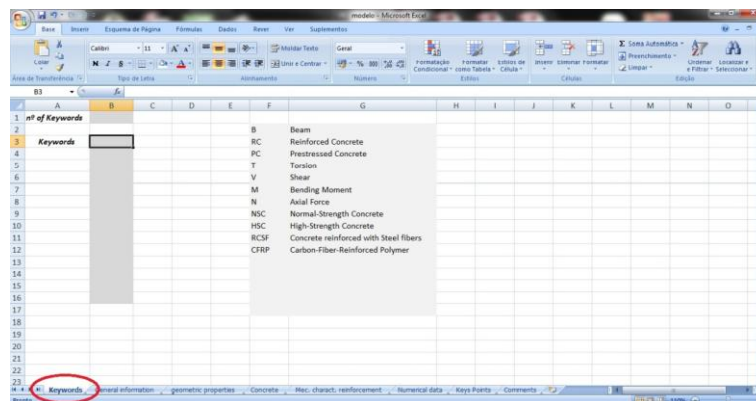


Figura III.8 - Folha 1; Keywords

No quadro que figura na Folha 1, apresentado de seguida, deve ser introduzido, em primeiro lugar e na célula correspondente, o número de palavras-chave utilizadas das disponibilizadas. De seguida devem ser listadas as palavras-chaves utilizadas, através das siglas ou símbolos correspondentes. No caso de não existir a palavra-chave desejada, é sempre possível adicionar uma nova palavra á lista existente, acompanhada do respetivo símbolo ou sigla. Note-se que, por cada palavra-chave utilizada deve corresponder uma única célula do quadro e vice-versa.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<i>nº of Keywords</i>							
2						B	Beam	
3	<i>Keywords</i>					RC	Reinforced Concrete	
4						PC	Prestressed Concrete	
5						T	Torsion	
6						V	Shear	
7						M	Bending Moment	
8						N	Axial Force	
9						NSC	Normal-Strength Concrete	
10						HSC	High-Strength Concrete	
11						RCSF	Concrete reinforced with Steel fibers	
12						CFRP	Carbon-Fiber-Reinforced Polymer	
13								
14								
15								

Figura III.9 - Quadro 1.1 do FDV

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.10, na qual figura o Quadro 1.1, preenchido para a Viga 5.10.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<i>nº of Keywords</i>	3						
2						B	Beam	
3	<i>Keywords</i>	B				RC	Reinforced Concrete	
4		HSC				PC	Prestressed Concrete	
5		T				T	Torsion	
6						V	Shear	
7						M	Bending Moment	
8						N	Axial Force	
9						NSC	Normal-Strength Concrete	
10						HSC	High-Strength Concrete	
11								

Figura III.10 - Quadro 1.1 preenchido para a viga 10 do estudo 5

Estando esta folha devidamente preenchida, segue-se para a próxima.

Folha 2 - General Information

Nesta folha, são especificadas todas as características relacionadas com o estudo ao qual a viga pertence, em simultâneo com todas as características do ensaio. É agora definido, o tipo de formato do estudo, autores, ano de publicação, entre outros, assim como o tipo de ensaio, tipo de carga do ensaio, ano de realização, entre outros. Para esse efeito, são disponibilizados vários quadros. A figura III.11 apresenta uma vista geral sobre a Folha 2.

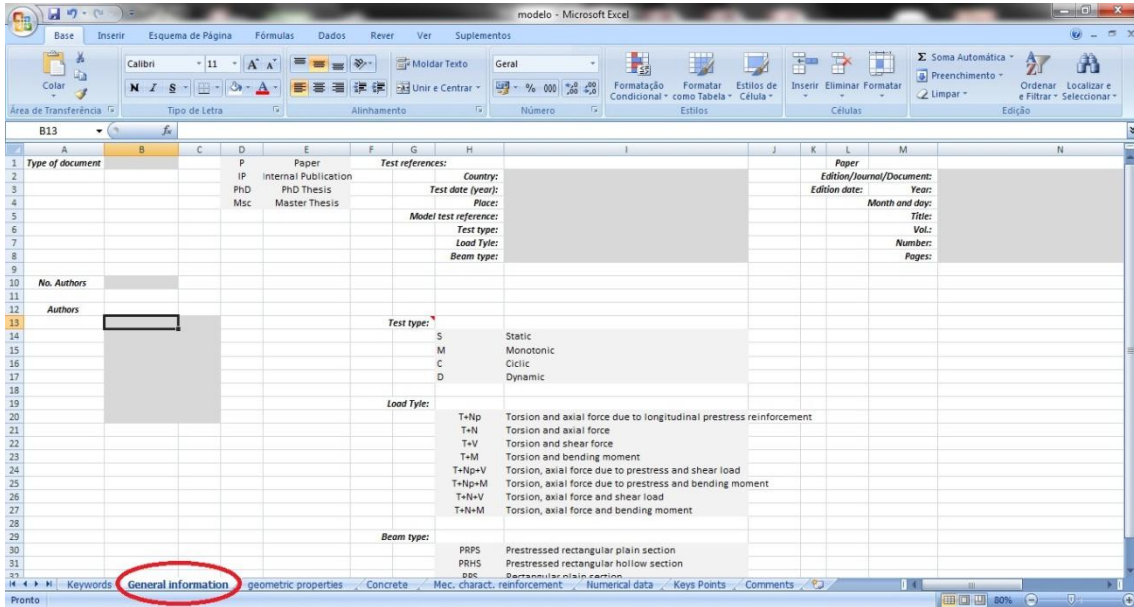


Figura III.11 - Folha 2; General Information

O primeiro quadro que figura na Folha 2, apresentado de seguida, tem com propósito expressar o tipo de documento do estudo proveniente da viga, e nela deve ser introduzido, na célula correspondente, a sigla representante desse tipo de documento. É fornecida uma lista de tipos de documentos com as respectivas siglas.

Área de Transferência		Tipo de Letra		Alinhamento	
B1		fx			
Type of document		P	Paper		Te
		IP	Internal Publication		
		PhD	PhD Thesis		
		Msc	Master Thesis		
No. Authors					

Figura III.12 - Quadro 2.1 do FDV

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.13, na qual figura o Quadro 2.1, preenchido para a Viga 11.1.

	A	B	C	D	E	F
1	Type of document	P		P	Paper	Test re
2				IP	Internal Publication	
3				PhD	PhD Thesis	
4				Msc	Master Thesis	
5						
6						

Figura III.13 - Quadro 2.1 preenchido para a viga 1 do estudo 11

O segundo quadro que figura na Folha 2, apresentado de seguida na figura III.14, tem como propósito expressar os autores do estudo proveniente da viga, e nela devem ser introduzidos, em primeiro lugar e na célula correspondente o número de autores, e em seguida, os nomes dos autores. Note-se que, a cada autor declarado deve corresponder uma única célula do quadro e vice-versa.

8				
9				
10	No. Authors			
11				
12	Authors			
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				

Figura III.14 - Quadro 2.2 do FDV

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.15, na qual figura o Quadro 2.2, preenchida para a Viga 11.1.

8				
9				
10	No. Authors	2		
11				
12	Authors			
13		Okay	F.	
14		Engin	S.	
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				

Figura III.15 - Quadro 2.2 preenchido para a viga 1 do estudo 11

O terceiro quadro que figura na Folha 2, apresentado de seguida na figura III.16, tem com propósito expressar as referências relativas ao ensaio da viga, e nela devem ser introduzidos, em primeiro lugar e nas células correspondentes, o país de origem do ensaio, o ano no qual se realizou e o local. Em seguida, devem ser preenchidas as células referentes ao tipo de ensaio, tipo de carga e tipo de viga em análise. Para estas últimas três características, são seleccionadas, de uma lista fornecida, apresentada na figura III.17, as siglas referentes às opções de preenchimento. Note-se que, a cada sigla escolhida deve corresponder uma única célula do quadro e vice-versa.

F	G	H	I	J	K
Test references:					
		Country:			Edit
		Test date (year):			Editor
		Place:			
		Test type:			
		Load Tyle:			
		Beam type:			

Figura III.16 - Quadro 2.3 do FDV

F	G	H	I	J
Test type:				
		S	Static	
		M	Monotonic	
		C	Ciclic	
		D	Dynamic	
Load Tyle:				
		T+Np	Torsion and axial force due to longitudinal prestress reinforcement	
		T+N	Torsion and axial force	
		T+V	Torsion and shear force	
		T+M	Torsion and bending moment	
		T+Np+V	Torsion, axial force due to prestress and shear load	
		T+Np+M	Torsion, axial force due to prestress and bending moment	
		T+N+V	Torsion, axial force and shear load	
		T+N+M	Torsion, axial force and bending moment	
Beam type:				
		PRPS	Prestressed rectangular plain section	
		PRHS	Prestressed rectangular hollow section	
		RPS	Rectangular plain section	
		RHS	Rectangular hollow section	

Figura III.17 - Quadro 2.3 do FDV

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.18, na qual figura o quadro 2.3, preenchido para a Viga 11.1.

		Número	Estilos	Células	Edição	
	F	G	H	I	J	K
	Test references:					
tion			Country: Turkey			Edit
			Test date (year): 2009			Editior
is			Place: Kocaeli University			
			Test type: M			
			Load Tyle: T			
			Beam type: RHS			

Figura III.18 - Quadro 2.3 preenchido para a viga 1 do estudo 11

Dos quatro quadros seguintes, preenche-se apenas um. Os quatro quadros são referentes aos tipos de documento em que o estudo se apresenta e neles são expressas as suas referências. Assim, consoante o tipo de documento, procede-se ao preenchimento do quadro equivalente. Os quadros referentes aos tipos de documento, Artigo e Publicação Interna, apresentam as mesmas referências a ser preenchidas. A figura III.19 a) e b), apresentam essas duas quadros.

K	L	M	N	O
	Paper			
	Edition/Journal/Document:			
	Edition date:	Year:		
	Month and day:			
		Title:		
		Vol.:		
		Number:		
		Pages:		

Figura III.19 a) - Quadro 2.4 do FDV

R	S	T	U
	Internal Publication		
	Edition/Journal/Document:		
	Edition date:	Year:	
	Month and day:		
		Title:	
		Vol.:	
		Number:	
		Pages:	

Figura III.19 b) - Quadro 2.5 do FDV

Desta forma, os quadros 2.4 e 2.5 devem exibir, a publicação em que consta o respetivo estudo; o ano, mês e dia; o título do estudo, assim como o volume, número e páginas correspondentes na publicação.

Os quadros referentes aos tipos de documento, Tese de Mestrado e Tese de Doutoramento, também apresentam as mesmas referências a ser preenchidas. A figura III.20 a) e b) apresentam essas duas quadros.

W	X	Y	Z	AD	AE	AF	A
	<i>PhD Thesis</i>			<i>Master Thesis</i>			
		University:			University:		
		Year:			Year:		
		Title:			Title:		
		Chapters:			Chapters:		

Figura III.20 a) - Quadro 2.6 do FDV

Figura III.20 b) - Quadro 2.7 do FDV

Desta forma, os quadros 2.6 e.2.7 devem exibir, a Universidade respectiva estudo; o ano de realização; o título da Tese, assim como os capítulos correspondentes á parte experimental. A título de exemplo, apresenta-se a figura III.21, na qual figura o quadro 2.4, preenchido para a Viga 11.1.

K	L	M	N
	<i>Paper</i>		
	Edition/Journal/Document:	Construction and Building Materials	
	Edition date:	Year:	1012
		Month and day:	?
		Title:	Torsional behavior of steel fiber reinforced concrete beams
		Vol.:	28
		Number:	
		Pages:	169 - 275

Figura III.21 - Quadro 2.4 preenchido para a viga 1 do estudo 11

Preenchendo-se o quadro correspondente ao tipo de documento, dá-se por finalizada e completa a segunda folha do ficheiro caracterizador de viga. Passa-se então para a Folha 3.

Folha 3 - Geometric Properties

Nesta folha, são especificadas todas as propriedades geométricas caracterizadoras da viga em estudo. São também definidas, as armaduras que constituem essa mesma viga. Para esse efeito, são disponibilizadas vários quadros. A figura III.22 apresenta uma vista geral sobre a Folha 3.

O primeiro quadro que figura na Folha 3, apresentado na figura III.23, tem com propósito definir geometricamente a viga em análise. Assim introduzem-se os valores correspondem-te às propriedades solicitadas, nas respetivas células. É de referir que são indicadas, as unidades em que devem ser introduzidas certas propriedades.

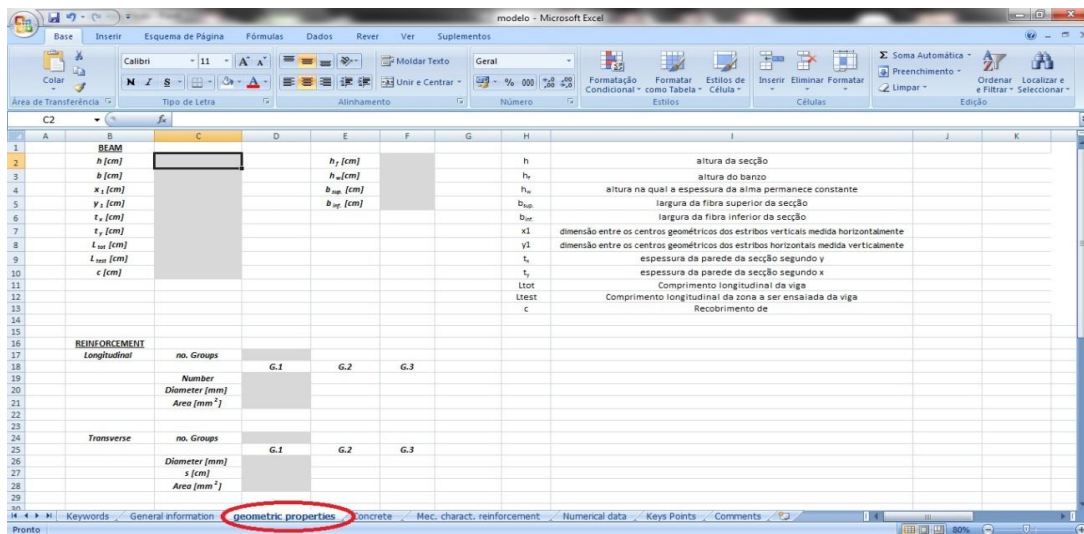


Figura III.22 - Folha 3; Geometric Properties

B	C	D	E	F	G
BEAM					
h [cm]			h_f [cm]		
b [cm]			h_w [cm]		
x_1 [cm]			$b_{sup.}$ [cm]		
y_1 [cm]			$b_{inf.}$ [cm]		
t_x [cm]					
t_y [cm]					
L_{tot} [cm]					
L_{test} [cm]					
c [cm]					

Figura III.23 - Quadro 3.1 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- h : Altura da seção, [cm];
- b : Base da seção, [cm];
- x_1 : Dimensão entre os centros geométricos dos estribos verticais medida horizontalmente, [cm];
- y_1 : Dimensão entre os centros geométricos dos estribos horizontais medida verticalmente, [cm];
- t_x : Espessura da parede vertical, [cm];
- t_y : Espessura da parede horizontal, [cm];

- L_{tot} : Comprimento longitudinal da viga, [cm];
- L_{test} : Comprimento longitudinal da zona a ser ensaiada da viga, [cm];
- c : Recobrimento da seção, [cm];

No caso da seção da viga apresentar uma configuração diferente da retangular, surge a necessidade de aumentar as propriedades geométricas referentes á seção. Foi o caso de um conjunto de vigas do estudo nº17 que apresentavam uma configuração em T. O quadro III.1 foi então adaptada de forma a poder caracterizar com rigor a seção desse conjunto de vigas. Foram então adicionadas, numa nova coluna (que se pode observar na figura III.23 - quadro 3.1), as seguintes propriedades geométricas:

- h_f : Altura do banzo da seção T, [cm];
- h_w : Altura na qual a espessura da alma permanece constante, [cm];
- b_{sup} : Largura da fibra superior da seção, [cm];
- b_{inf} : Largura da fibra inferior da seção, [cm];

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.24, na qual figura o quadro 3.1, preenchido para a Viga 5.10.

B	C	D
BEAM		
h [cm]	50	
b [cm]	35	
x_1 [cm]	30	
y_1 [cm]	45	
t_x [cm]		
t_y [cm]		
L_{tot} [cm]	310	
L_{test} [cm]	160	
c [cm]	2	

Figura III.24 - Quadro 3.1 preenchido para a viga 10 do estudo 5

O segundo quadro que figura na Folha 3, apresentado de seguida na figura III.25, é referente á caracterização das armaduras ordinárias (longitudinal e transversal), da viga em estudo. O mesmo encontra-se dividido em duas partes, a primeira para a armadura longitudinal, e a segunda, para a armadura transversal.

A	B	C	D	E	F
	REINFORCEMENT				
	<i>Longitudinal</i>	<i>no. Groups</i>			
			G.1	G.2	G.3
		<i>Number</i>			
		<i>Diameter [mm]</i>			
		<i>Area [mm²]</i>			
	<i>Transverse</i>	<i>no. Groups</i>			
			G.1	G.2	G.3
		<i>Diameter [mm]</i>			
		<i>s [cm]</i>			
		<i>Area [mm²]</i>			

Figura III.25 - Quadro 3.2 do FDV

Começando pela armadura longitudinal, deve ser indicado na primeira célula o número de diferentes tipos de varões que constituem a armadura. Em seguida, e para cada grupo distinto, indica-se o número de varões que constitui o grupo, o diâmetro de um varão e a respectiva área unitária. No caso de a informação disponibilizada não discriminar a armadura, e apresentar apenas a área total, esta deve ser introduzida com 1 grupo de 1 varão ao qual corresponde a área referida.

Passando para armadura transversal, o procedimento a seguir é muito semelhante. Deve ser indicado o número de diferentes tipos de varões que constituem a armadura. Em seguida, e para cada grupo distinto, indica-se o número o diâmetro de um varão, o espaçamento da armadura transversal e a área de um varão.

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas para a armadura longitudinal:

- no. Groups: Número de varões distintos, [un];
- Number: Número de varões que constitui o respetivo grupo, [un];
- Diameter: Diâmetro dos varões do respetivo grupo, [mm];
- Área: Área transversal de um varão do respetivo grupo, [mm²];

E agora, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas para a armadura transversal:

- no. Groups: Número de varões distintos, [un];
- Diameter: Diâmetro dos varões do respetivo grupo, [mm];
- s: Espaçamento entre cintas da armadura transversal, [cm];
- Área: Área transversal de um varão do respetivo grupo, [mm²];

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.26, na qual figura o quadro 3.2, preenchido para a Viga 5.10.

REINFORCEMENT				
Longitudinal	no. Groups	1		
		G.1	G.2	G.3
	Number	16		
	Diameter [mm]	13		
	Area [mm²]	2064,00		
Transverse	no. Groups	1		
		G.1	G.2	G.3
	Diameter [mm]	10		
	s [cm]	10		
	Area [mm²]	71,00		

Figura III.26 - Quadro 3.2 preenchido para a viga 10 do estudo 5

O terceiro quadro que figura na Folha 3, apresentado de seguida pela figura III.27, é referente à caracterização das armaduras de Pré-Esforço longitudinal, da viga em estudo. Foi apenas definida a caracterização para armaduras de Pré-Esforço longitudinais, uma vez que no decorrer do presente trabalho não se recolheu qualquer tipo de estudo referente a ensaios com armaduras de Pré-Esforço transversal. No entanto, futuramente, e se se justificar, a mesma poderá ser adicionada.

PRESTRESS REINFORCEMENT				
Longitudinal	no. Groups	1		
		G.1	G.2	G.3
	Number			
	Diameter [mm]			
	Area [mm²]			
	f_p [MPa]			Te
	f_{pc} [MPa]			Te
STEEL FIBER REINFORCEMENT				

Figura III.27 - Quadro 3.3 do FDV

Então, para a armadura de Pré-Esforço, deve ser indicado na primeira célula o número de diferentes tipos de cordões que constituem a armadura. Em seguida, e para cada grupo distinto, indica-se o número de cordões que constitui o grupo, o diâmetro de um cordão e a respetiva área unitária. Em seguida, devem ser apresentados, os valores da tensão na

armadura de Pré-Esforço e da tensão induzida no betão pela força do Pré-esforço. No caso de a informação disponibilizada não discriminar a armadura, e apresentar somente a área total, esta deve ser introduzida com 1 grupo de 1 varão ao qual corresponde a área referida. Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas para a armadura longitudinal:

- no. Groups: Número de cordões distintos, [un];
- Number: Número de cordões que constitui o respetivo grupo, [un];
- Diameter: Diâmetro dos cordões do respetivo grupo, [mm];
- Área: Área transversal de um cordão do respetivo grupo, [mm²];
- f_p : Tensão de Pré-Esforço na Armadura, [MPa];
- f_{pc} : Tensão de Pré-Esforço induzida no Betão, [MPa];

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.28, na qual figura o quadro 3.3, preenchido para a Viga 1.3.

28		Area [mm ²]	31,97		
29					
30					
31	PRESTRESS REINFORCEMENT				
32	Longitudinal	no. Groups	1		
33			G.1	G.2	G.3
34		Number	4		
35		Diameter [mm]	6,9		
36		Area [mm ²]	37,39		
37		f_p [MPa]	1098		
38		f_{pc} [MPa]			
39					
40					
41					

Figura III.28 - Quadro 3.3 preenchido para a viga 3 do estudo 1

O quarto quadro que figura na Folha 3, apresentado de seguida pela figura III.29, encontra-se reservado para o caso da viga apresentar reforço do betão por Fibras de Aço. Neste quadro, apresenta-se a caracterização geométrica dessas mesmas Fibras de Aço.

38		f_{pc} [MPa]		
39				
40				
41	STEEL FIBER REINFORCEMENT			
42		no. Groups		
43			G.1	
44		Length [mm]		
45		Diameter [mm]		
46		Volume fraction [%]		
47				
48				
49				
50	CFRP REINFORCEMENT			

Figura III.29 - Quadro 3.4 do FDV

Desta forma, para as Fibras de Aço, deve ser indicado na primeira célula o número de diferentes tipos de fibras que foram adicionadas ao betão. Em seguida, e para cada grupo distinto, indica-se o comprimento característico da fibra, o diâmetro característico da fibra e a fração volumétrica adicionada ao betão, em termos percentuais.

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas para a armadura longitudinal:

- no. Groups: Número de tipos distintos de fibras, [un];
- Lenght: Comprimento médio característico da fibra, [mm];
- Diameter: Diâmetro médio característico da fibra, [mm];
- Volume fraction: fração volúmica de fibras adicionadas ao betão, [%];

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.30, na qual figura o quadro 3.4, preenchido para a Viga 11.3.

38		f_{py} [MPa]	
39			
40			
41	STEEL FIBER REINFORCEMENT		
42		no. Groups	1
43			G.1
44		Lenght [mm]	30
45		Diameter [mm]	0,75
46		Volume fraction [%]	0,60
47			

Figura III.30 - Quadro 3.4 preenchido para a viga 3 do estudo 11

O quinto e último quadro que figura na Folha 3, apresentado de seguida pela figura III.31, encontra-se reservado para o caso da viga apresentar reforço por adição de Polímeros reforçados com Fibras (FRPs). Neste quadro, apresenta-se a caracterização geométrica desse tipo de reforço.

49				
50	FRP REINFORCEMENT			
51		no. Groups		
52			G.1	G.2
53		Width [mm]		
54		Thickness [mm]		
55		no. Layers		
56		s [cm]		
57		Configuration		
58				
59				

Figura III.31 - Quadro 3.5 do FDV

Para este tipo de armadura, deve ser indicado na primeira célula o número de diferentes tipos de polímeros que foram utilizados. Em seguida, e para cada grupo distinto, indica-se largura a utilizar, a espessura de uma camada, o número de camadas, o espaçamento e a configuração do FRP na seção. A configuração é apresentada por 3 caracteres na seguinte forma “X-X(x)”. O primeiro referente à configuração (W - envolvimento completo da seção; U envolvimento em u). O segundo referente ao formato do FRP (C - Folha; S- Fita). O terceiro identifica a orientação das fibras no FRP (l - longitudinal; T- Transversal).

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas para a armadura longitudinal:

- no. Groups: Número de tipos distintos de FRP, [un];
- Width: Largura da camada utilizada de FRP, [mm];
- Thickness: Espessura de cada camada de FRP, [mm];
- No. Layers: Número de camadas a utilizar, [un];
- s: Espaçamento entre camadas, [cm];
- Configuration: Configuração do FRP na seção;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.32, na qual figura o quadro 3.5, preenchido para a Viga 8.4.

9				
0		FRP REINFORCEMENT		
1		<i>no. Groups</i>	1	
2			G.1	G.2
3		<i>Width [mm]</i>	150	
4		<i>Thickness [mm]</i>		
5		<i>no. Layers</i>	2,00	
6		<i>s [cm]</i>	150,00	
7		<i>Configuration</i>	W-S(t)	
8				
9				

Figura III.32- Quadro 3.5 preenchido para a viga 4 do estudo 8

Estando este quadro devidamente preenchido, dá-se por concluído o preenchimento desta folha.

Folha 4 - Mechanical Characteristics of Concrete

A quarta folha é referente à caracterização das propriedades mecânicas do betão constituinte da viga em análise. Assim, são introduzidos os valores fornecidos pelo estudo, relativos às propriedades referidas, num quadro criada para esse propósito. A figura III.33 apresenta uma vista geral sobre a Folha 4.

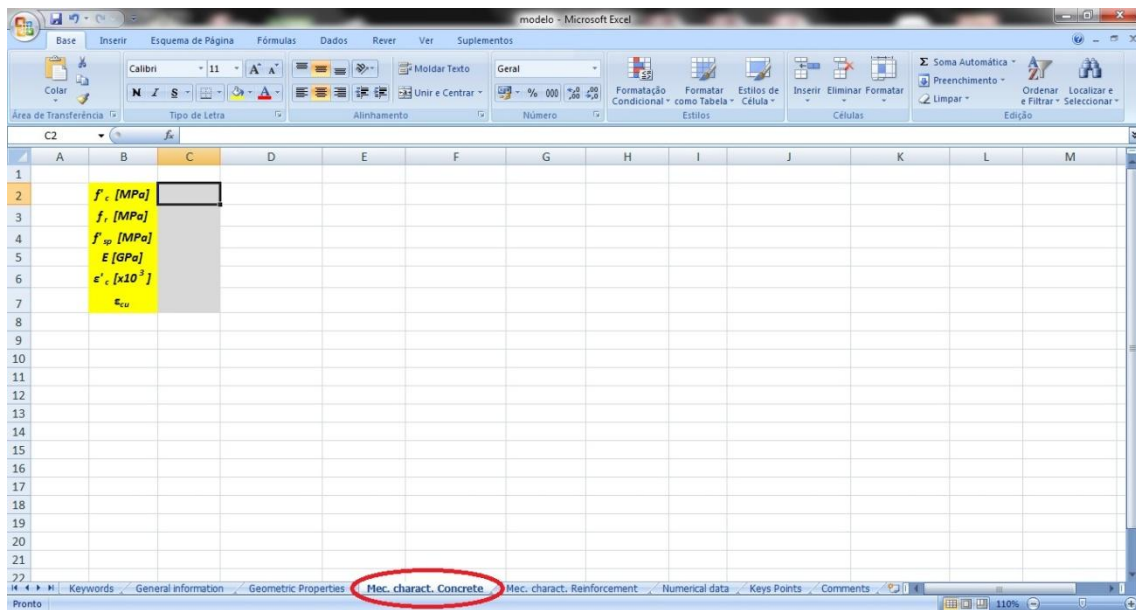


Figura III.33 - Folha 4; Mechanical Characteristics of Concrete

O único quadro que figura na Folha 4, apresentado de seguida pela figura III.34, tem como intuito a caracterização mecânica do betão da viga em análise. Assim introduzem-se os valores correspondem-te às propriedades solicitadas, nas respetivas células. É de referir que são indicadas, as unidades em que devem ser introduzidas as mencionadas características.

A	B	C	D
	f'_c [MPa]		
	f_r [MPa]		
	f'_{sp} [MPa]		
	E [GPa]		
	ϵ'_c [$\times 10^{-3}$]		
	ϵ_{cu}		

Figura III.34 - Quadro 4.1 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- f'_c : Resistência á compressão uniaxial do Betão, [MPa];
- f_r : Modulo de rotura do Betão, [MPa];
- f'_{sp} : Resistência á tração uniaxial do Betão, [MPa];
- E : Modulo de Elasticidade do Betão, [GPa];
- ϵ'_c : Extensão de fissuração do Betão, [$\times 10^{-3}$];
- ϵ_{cu} : Extensão última do Betão;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.35, na qual figura o quadro 4.1, preenchido para a Viga 2.10.

	A	B	C	D
1				
2		f'_c [MPa]	76,39	
3		f_r [MPa]		
4		f'_{sp} [MPa]		
5		E [GPa]	40,49	
6		ϵ'_c [$\times 10^{-3}$]	0,209	
7		ϵ_{cu}	0,313	
8				
9				

Figura III.35 - Quadro 4.1 preenchido para a viga 10 do estudo 2

No caso de, o estudo obtido apresentar outras características, as mesmas devem ser adicionas ao *ficheiro FDV* e devidamente preenchidas.

Estando este quadro devidamente preenchido, dá-se por concluído o preenchimento desta folha. Pode-se assim, passar à caracterização das propriedades mecânicas das armaduras.

Folha 5 - Mechanical Characteristics of Reinforcement

A quinta folha é referente à caracterização das propriedades mecânicas das armaduras constituinte da viga em análise. Assim, foram introduzidos os valores fornecidos pelo estudo, relativos às propriedades referidas, em quadros criadas para esse propósito. A cada quadro, corresponde um determinado tipo de armadura. A figura III.36 apresenta uma vista geral sobre a Folha 5.

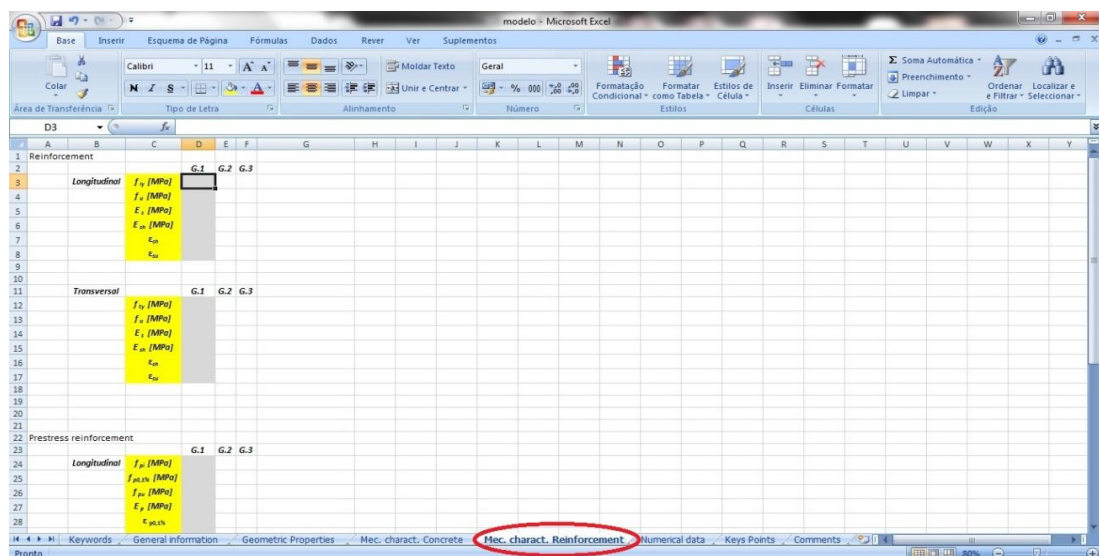


Figura III.36 - Folha 5; Mechanical Characteristics of Reinforcement

O primeiro quadro que figura na Folha 5, apresentado de seguida pela figura III.37, tem como intuito a caracterização mecânica da armadura ordinária longitudinal para viga em análise. Assim foram introduzidos os valores correspondentes às propriedades solicitadas, para o respetivo grupo de varões nas correspondentes células. É de referir que, são indicadas as unidades em que foram introduzidas as mencionadas características.

	A	B	C	D	E	F
1	Reinforcement					
2				G.1	G.2	G.3
3		Longitudinal	f_{ly} [MPa]			
4			f_u [MPa]			
5			E_s [MPa]			
6			E_{sh} [MPa]			
7			ϵ_{sh}			
8			ϵ_{su}			
9	Reinforcement					

Figura III.37 - Quadro 5.1 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- f_{ly} : Tensão de cedência para armadura ordinária longitudinal, [MPa];
- f_u : Tensão de rotura para armadura ordinária longitudinal, [MPa];
- E_s : Modulo de Elasticidade para armadura ordinária longitudinal, [GPa];
- E_{sh} : Rigidez após a cedência, [GPa];
- ϵ_{sh} : Primeira extensão de cedência para a armadura ordinária longitudinal;
- ϵ_{su} : Extensão última convencional para a armadura ordinária longitudinal;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.38, na qual figura o quadro 5.1, preenchido para a Viga 4.11.

	A	B	C	D	E	F
1	Reinforcement					
2				G.1	G.2	G.3
3		Longitudinal	f_{ly} [MPa]	406	433	436
4			f_u [MPa]	606	723	758
5			E_s [MPa]	200000	185700	194200
6			E_{sh} [MPa]	3900	11200	9000
7			ϵ_{sh}	0,01567	0,002	0,00613
8			ϵ_{su}			

Figura III.38 - Quadro 5.1 preenchido para a viga 11 do estudo 4

No caso de, o estudo obtido apresentar outras características para este tipo de armadura, as mesmas podem ser adicionadas ao ficheiro caracterizador de viga e devidamente preenchidas.

O segundo quadro que figura na Folha 5, apresentado de seguida pela figura III.39, tem como intuito a caracterização mecânica da armadura ordinária transversal para viga em análise. Assim foram introduzidos os valores correspondentes às propriedades solicitadas, para o respetivo grupo de varões nas correspondentes células. É de referir que, são indicadas as unidades em que foram introduzidas as mencionadas características.

8			ϵ_{su}			
9	Reinforcement					
10						
11		<i>Transversal</i>		G.1	G.2	G.3
12			f_{ty} [MPa]			
13			f_u [MPa]			
14			E_s [MPa]			
15			E_{sh} [MPa]			
16			ϵ_{sh}			
17			ϵ_{su}			
18						

Figura III.39 - Quadro 5.2 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- f_{ty} : Tensão de cedência para armadura ordinária transversal, [MPa];
- f_u : Tensão de rotura para armadura ordinária transversal, [MPa];
- E_s : Modulo de Elasticidade para armadura ordinária transversal, [GPa];
- E_{sh} : Rigidez após a cedência, [GPa];
- ϵ_{sh} : Primeira extensão de cedência para a armadura ordinária transversal;
- ϵ_{su} : Extensão última convencional para a armadura ordinária transversal;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.40, na qual figura o quadro 5.2, preenchida para a Viga 4.11.

8			ϵ_{su}			
9	Reinforcement					
10						
11		<i>Transversal</i>		G.1	G.2	G.3
12			f_{ty} [MPa]	443		
13			f_u [MPa]	717		
14			E_s [MPa]	190400		
15			E_{sh} [MPa]	9600		
16			ϵ_{sh}	0,00796		
17			ϵ_{su}			
18						
19						

Figura III.40 - Quadro 5.2 preenchido para a viga 11 do estudo 4

O terceiro quadro que figura na Folha 5, apresentado de seguida pela figura III.41, tem como intuito a caracterização mecânica da armadura de Pré-Esforço para viga em análise. Assim devem ser introduzidos os valores correspondentes às propriedades solicitadas, para o respetivo grupo de cordões nas correspondentes células. É de referir que, são indicadas as unidades em que devem ser introduzidas as mencionadas características.

21					
22	Prestress reinforcement				
23				G.1	G.2 G.3
24	Longitudinal	f_{pi} [MPa]			
25		$f_{p0,1\%}$ [MPa]			
26		f_{pu} [MPa]			
27		E_p [MPa]			
28		$\epsilon_{p0,1\%}$			
29		ϵ_{pu}			
30					
31					

Figura III.41 - Quadro 5.3 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- f_{pi} : Tensão inicial para armadura de Pré-Esforço, [MPa];
- $f_{p0,1\%}$: Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% da armadura de Pré-Esforço, [MPa];
- f_{pu} : Tensão de rotura para a armadura de Pré-Esforço, [MPa];
- E_p : Modulo de Elasticidade para armadura de Pré-esforço, [GPa];
- $\epsilon_{p0,1\%}$: Extensão correspondem-te a $f_{p0,1\%}$;
- ϵ_{pu} : Extensão última convencional para a armadura de Pré-Esforço;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.42, na qual figura o quadro 5.3, preenchido para a Viga 1.3.

21					
22	Prestress reinforcement				
23				G.1	G.2 G.3
24	Longitudinal	f_{pi} [MPa]	1207		
25		$f_{p0,1\%}$ [MPa]	1663		
26		f_{pu} [MPa]			
27		E_p [MPa]	195100		
28		$\epsilon_{p0,1\%}$			
29		ϵ_{pu}	0,04		
30					
31					

Figura III.42 - Quadro 5.3 preenchido para a viga 3 do estudo 1

O quarto quadro que figura na Folha 5, apresentado de seguida pela figura III.43, tem como intuito a caracterização mecânica das Fibras de Aço para o betão da viga em análise. Assim foram introduzidos os valores correspondentes às propriedades solicitadas, para o respetivo grupo de Fibras de Aço nas correspondentes células. É de referir que, são indicadas as unidades em que foram introduzidas as mencionadas características.

31			
32	Steel Fiber reinforcement		
33			G.1
34		$f_{sfy} [MPa]$	
35		$f_u [MPa]$	
36		$E_s [MPa]$	
37		ϵ_{sh}	
38		ϵ_{su}	
39			
40			

Figura III.43 - Quadro 5.4 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- f_{sfy} : Tensão de cedência para as Fibras de Aço, [MPa];
- f_u : Tensão de rotura para as Fibras de Aço, [MPa];
- E_s : Modulo de Elasticidade para as Fibras de Aço, [GPa];
- ϵ_s : Primeira extensão de cedência para as Fibras de Aço;
- ϵ_u : Extensão última convencional para as Fibras de Aço;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.44, na qual figura o quadro 5.5, preenchido para a Viga 11.3.

1			
2	Steel Fiber reinforcement		
3			G.1
4		$f_{sfy} [MPa]$	1200
5		$f_u [MPa]$	
6		$E_s [MPa]$	
7		$E_{sh} [MPa]$	
8		ϵ_{sh}	
9		ϵ_{su}	
10			

Figura III.44 - Quadro 5.5 preenchido para a viga 3 do estudo 11

O quinto e último quadro que figura na Folha 5, apresentado de seguida pela figura III.45, tem como intuito a caracterização mecânica dos Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) da viga em análise. Assim foram introduzidos os valores correspondentes às propriedades solicitadas, para o respetivo grupo de FRPs nas correspondentes células. É de referir que, são indicadas as unidades em que devem ser introduzidas as características mencionadas.

40			
41			
42	CFRP reinforcement		
43			G.1
44		type	
45		$f_{y\text{CFRP}}$ [MPa]	
46		E_{CFRP} [GPa]	
47		ϵ_{CFRPu}	
48		$f_{u\text{CFRP}}$ [MPa]	
49			

Figura III.45 - Quadro 5.5 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as propriedades a serem preenchidas:

- $f_{y\text{FRP}}$: Tensão de cedência para o FRP, [MPa];
- E_{FRP} : Modulo de Elasticidade para o FRP, [GPa];
- ϵ_{FRPu} : Extensão última convencional para o CFRP;
- $f_{u\text{FRP}}$: Tensão de rotura para o FRP, [MPa];

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.46, na qual figura o quadro 5.6, preenchido para a Viga 8.2.

41			
42	CFRP reinforcement		
43			G.1
44		type	SikaWrap-200C
45		$f_{y\text{CFRP}}$ [MPa]	
46		E_{CFRP} [GPa]	230
47		ϵ_{CFRPu}	0,015
48		$f_{u\text{CFRP}}$ [MPa]	3900
49			

Figura III.46 - Quadro 5.6 preenchido para a viga 2 do estudo 8

No caso de, o estudo obtido apresentar outras características para este tipo de armadura, as mesmas podem ser adicionas ao *ficheiro FDV* e devidamente preenchidas.

Estando este quadro devidamente preenchido, dá-se por concluído o preenchimento desta folha. Pode-se assim, passar à introdução dos resultados obtidos no ensaio da viga.

Folha 6 - Numerical Data

É nesta folha, que os dados relativos aos resultados obtidos para a viga ensaiada, são registados. A recolha de dados seguiu a metodologia mencionada anteriormente. Após a recolha de dados estar concluída e os mesmos prontos a ser introduzidos, foram colocados, sob a forma de quadro, com o respetivo gráfico. A figura III.47 apresenta uma vista geral sobre a folha 6.

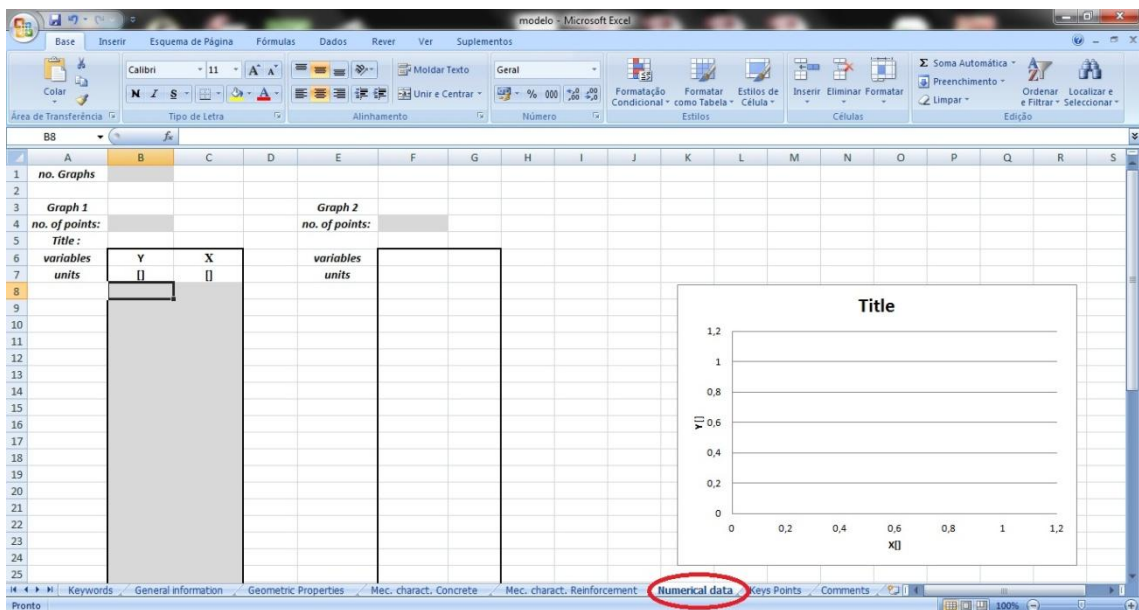


Figura III.47 - Folha 6; Numerical Data

O procedimento a seguir nesta folha, consiste em primeiro lugar, apontar o número de gráficos que se pretende registar para a viga em análise, na devida célula, do quadro 5.1, apresentada na figura III.48.

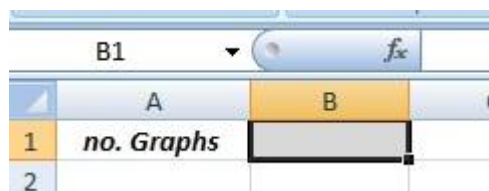


Figura III.48 - Quadro 6.1 do FDV

De seguida, e para cada gráfico que se pretende registar, devem ser introduzidos os valores desejados no quadro correspondente. Além disso, e para o mesmo quadro, devem ser apresentados, o número de pontos registados, o título do gráfico, do que é representativo o eixo das abcissas e o eixo das ordenadas, assim como as unidades em que se exprimem. A figura III.49 apresenta os citados quadros.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	no. Graphs							
2								
3	Graph 1				Graph 2			
4	no. of points:				no. of points:			
5	Title :				Title :			
6	variables	Y	X		variables	Y	X	
7	units	[]	[]		units	[]	[]	
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								

Figura III.49 - Quadro 6.2 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as células a serem preenchidas:

- *no. of points*: Número de pontos registados para o Gráfico, [un];
- *Title*: Título do Gráfico, [GPa];
- *Variables X*: Propriedade representada pelo eixo das abcissas;
- *variables Y*: Propriedade representada pelo eixo das ordenadas;
- *units X*: Unidades em que se expressam as abcissas;
- *units Y*: Unidades em que se expressam as ordenadas;

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.50, na qual figura o quadro 6.2, preenchido para a Viga 5.10.

Graph 1			
no. of points:		20	
Title :	Torsional behavior		
variables	Torque	Twist angle	
units	[kNm]	[rad/m]	
	0	0	
	31,952127	0,00104536	
	49,562924	0,00147156	
	52,622287	0,00513314	
	61,105069	0,01143448	
	72,50815	0,01816157	
	86,893071	0,02798021	
	94,680542	0,03521823	
	95,514914	0,04066803	
	93,707108	0,04637329	
	91,164176	0,05587614	
	88,521997	0,06243293	
	86,436069	0,06754212	
	82,542332	0,07435437	
	79,761093	0,07861202	
	77,118916	0,08363606	
	74,337676	0,09053346	
	70,44394	0,09623872	
	66,272081	0,10219944	
	63,490841	0,11020384	

Figura III.50 - Quadro 6.2 preenchido para a viga 10 do estudo 5

Após o quadro se encontrar devidamente preenchido, procede-se à elaboração do respetivo gráfico, o qual deve-se apresentar propriamente formatado. Um gráfico modelo tipo é apresentado pela figura III.51.

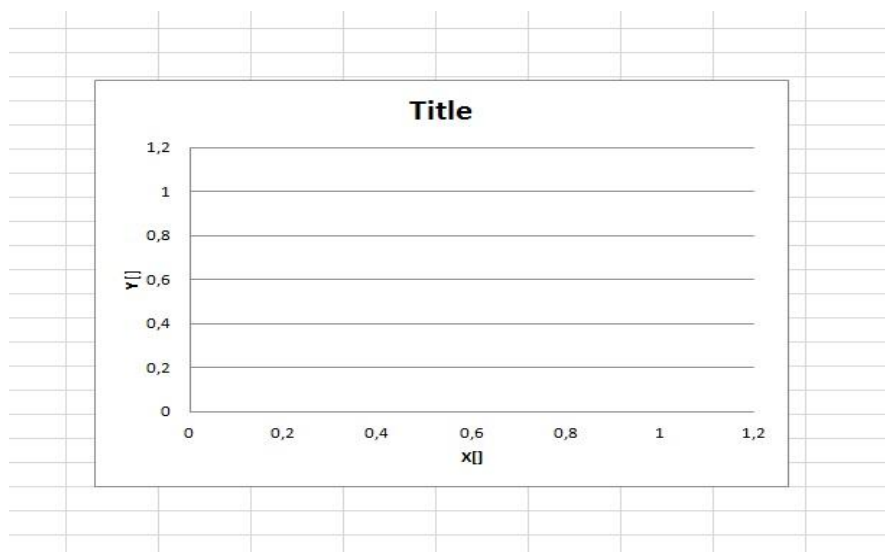


Figura III.51 - Gráfico Modelo do FDV

Para o Gráfico, deve ser apresentado o título do mesmo, o título do eixo das abcissas e respetivas unidades assim como o título do eixo das ordenadas e respetivas unidades.

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.52, na qual figura o Gráfico 6.1, preenchido para a Viga 5.10.

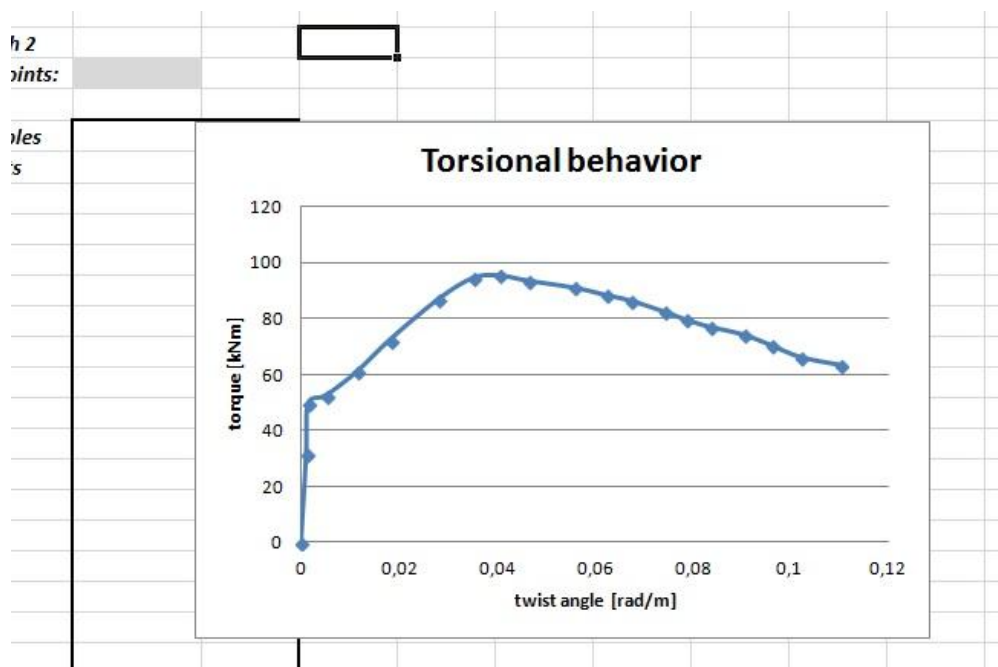


Figura III.52 - Quadro 6.1 preenchida para a viga 10 do estudo 5

Estando o Gráfico devidamente formatado, dá-se por concluído o preenchimento desta folha. Procede-se então ao registo dos dados principais relativos ao ensaio.

Folha 7 - Key Points

Nesta folha, são apresentados os dados relativos aos resultados obtidos através do ensaio, que são considerados notáveis. Consoante o tipo de recolha de dados do ensaio, assim serão os dados obtidos. Posto isto, nem sempre são apresentados sob a mesma forma. Assim, foi concebido um quadro com todos os tipos de caracterização dos resultados, apresentados pelos estudos recolhidos. A figura III.53 apresenta uma vista geral sobre a Folha 7.

Row	Parameter	Unit	Design Parameter
2	T_{cr} [kN.m]		V/T [1/m]
3	θ_{Tcr}^I [rad/m]		M/T
4	θ_{Tcr}^{II} [rad/m]		Δ_{max} [mm]
5	$(GJ)^I$ (kN.m ²)		V_{max} [kN]
6	$(GJ)^{II}$ (kN.m ²)		e [mm]
7	ηT_c [kN.m]		
8	T_{xy} [kN.m]		
9	θ_{Txy} [rad/m]		
10	T_y [kN.m]		
11	θ_{Ty} [rad/m]		
12	T_r [kN.m]		
13	θ_{Tr} [rad/m]		
14	M [kN.m]		
15	M_d [kN.m]		
16	T_d [kN.m]		
17	LFCR		
18	α°		
19	Δ [mm]		
20	$(\epsilon/\epsilon_s)_{long. Max}$		
21	$(\epsilon/\epsilon_s)_{strp. Max}$		

Figura III.53 - Folha 7; Key Points

O quadro que figura na Folha 7, apresentada de seguida na figura III.54, apresenta os pontos notáveis para os resultados obtidos do ensaio da viga em análise. Assim foram introduzidos os valores correspondentes às características solicitadas, para as respetivas células. É de referir que, são indicadas as unidades em que devem ser introduzidas as mencionadas características.

Row	Parameter	Unit
2	T_{cr} [kN.m]	
3	θ_{Tcr}^I [rad/m]	
4	θ_{Tcr}^{II} [rad/m]	
5	$(GJ)^I$ (kN.m ²)	
6	$(GJ)^{II}$ (kN.m ²)	
7	ηT_c [kN.m]	
8	T_{xy} [kN.m]	
9	θ_{Txy} [rad/m]	
10	T_y [kN.m]	
11	θ_{Ty} [rad/m]	
12	T_r [kN.m]	
13	θ_{Tr} [rad/m]	
14	M [kN.m]	
15	M_d [kN.m]	
16	T_d [kN.m]	
17	LFCR	
18	α°	
19	Δ [mm]	
20	$(\epsilon/\epsilon_s)_{long. Max}$	
21	$(\epsilon/\epsilon_s)_{strp. Max}$	
22	V_c [kN]	
23	V_r [kN]	

Figura III.54 - Quadro 7.1 do FDV

Em seguida, apresentam-se as definições para as características a serem preenchidas:

- T_{cr} : Momento Torsor de fissuração, $[kN.m]$;
- $\theta_{T_{cr}}^I$: Rotação de Torção correspondente ao T_{cr} em Estado I, $[rad/m]$;
- $(GJ)^I$: Rigidez de Torsão em Estado I, $[kN.m^2]$;
- $(GJ)^{II}$: Rigidez de Torsão em Estado II, $[kN.m^2]$;
- ηT_c : Ordenada na origem para a curva teórica T- θ , em Estado II $[kN.m]$;
- T_{ty} : Momento Torsor de cedência para armadura ordinária transversal, $[kN.m]$;
- $\theta_{T_{ty}}$: Rotação de Torção correspondente ao T_{ty} , $[rad/m]$;
- T_{ly} : Momento Torsor de cedência para armadura ordinária longitudinal, $[kN.m]$;
- $\theta_{T_{ly}}$: Rotação de Torção correspondente ao T_{ly} , $[rad/m]$;
- T_r : Momento Torsor resistente, $[kN.m]$;
- θ_{T_r} : Rotação de Torção correspondente ao T_r , $[rad/m]$;
- M_r : Momento Fletor resistente, $[kN.m]$;
- M_d : Momento Fletor de projeto, $[kN.m]$;
- T_d : Momento Torsor de projeto, $[kN.m]$;
- LFCR: Fator de carga para a primeira fissura;
- α° : Angulo médio de inclinação de fissuras para a carga última;
- Δ : Máximo deslocamento vertical a meio vão, $[mm]$;
- $(e/e_y)_{long. Max}$: Rácio máximo para extensão de armadura ordinária longitudinal;
- $(e/e_y)_{strp. Max}$: Rácio máximo para extensão de armadura ordinária transversal;
- V_c : Esforço Transverso de fissuração, $[kN]$;
- V_r : Esforço Transverso resistente, $[kN]$;
- V/T : Rácio entre Esforço Transverso-Torção, $[1/m]$;
- M/T : Rácio entre Flexão-Torção;
- Δ_{max} : deslocamento máximo, $[mm]$;
- V_{max} : Esforço Transverso máximo, $[kN]$;
- e : excentricidade, $[mm]$;

No caso de, o estudo obtido apresentar outras características como pontos notáveis, os mesmos podem ser adicionados ao *ficheiro FDV* e devidamente preenchidos.

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.55, na qual figura o quadro 7.1, preenchido para a Viga 5.10.

T_{cr} [kN.m]	51,8
θ_{Tcr}^I [rad/m]	0,002
θ_{Tcr}^{II} [rad/m]	
$(GJ)^I$ (kN.m ²)	25
$(GJ)^{II}$ (kN.m ²)	1235
ηT_c [kN.m]	
T_{Ty} [kN.m]	80,9
θ_{Ty} [rad/m]	0,0232
T_{T_y} [kN.m]	80,9
θ_{T_y} [rad/m]	0,0232
T_r [kN.m]	95,2
θ_{Tr} [rad/m]	0,0403

Figura III.55 - Quadro 7.1 preenchida para a viga 10 do estudo 5

Estando este quadro devidamente preenchida, dá-se por concluído o preenchimento desta folha. Pode-se assim, passar à última folha do ficheiro.

Folha 8 - Comments

Por fim, na oitava e ultima folha do ficheiro, pode-se adicionar comentários relacionados com o ensaio e/ou a viga em análise. A figura III.56 apresenta uma vista geral sobre a Folha 8.

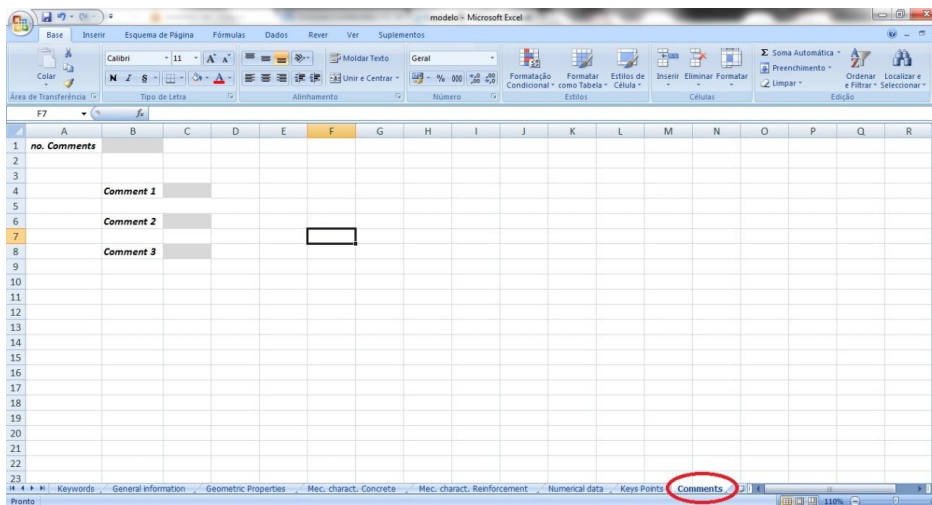


Figura III.56 - Folha 8 - Comments

O procedimento a seguir nesta folha, consiste em primeiro lugar, apontar o número de comentários que se pretende registar, na devida célula, apresentada na figura III.57, para o quadro 8.1.

	A	B	C
1	no. Comments		
2			

Figura III.57 - Quadro 8.1 do FDV

De seguida, e para cada comentário, basta inscreve-lo na célula correspondente, tal como exibido na figura III.58.

	A	B	C	D
1	no. Comments			
2				
3				
4		Comment 1		
5				
6		Comment 2		
7				
8		Comment 3		
9				

Figura III.58 - Quadro 8.2 do FDV

A título de exemplo, apresenta-se a figura III.59, na qual figuram os quadros 8.1 e 8.2, preenchidos para a Viga 2.20.

	A	B	C	D
1	no. Comments	1		
2				
3				
4		Comment 1	Apresenta reforço transversal exterior (G.2 - Transverse Reinforcement)	
5				
6		Comment 2		
7				
8		Comment 3		
9				
10				
11				

Figura III.59 - Quadro 8.1 e 8.2 preenchidos para a viga 20 do estudo 2

Estando este quadro devidamente preenchido, dá-se por concluído o preenchimento não apenas desta folha mas do *ficheiro FDV*.

Após o preenchimento do ficheiro caracterizador de viga para cada uma das vigas ensaiadas, de cada um dos estudos recolhidos, procedeu-se á compilação de todos os ficheiros num único grupo. Desta forma, deu-se por concluída a elaboração da Base de Dados e procedeu-se ao tratamento dos resultados obtidos.

Capítulo 4 - Apresentação dos Resultados

Recolhidos

IV.1. Introdução

Este capítulo, tem por objetivo apresentar os resultados obtidos após a elaboração da base de dados. Assim, serão então expostos e tratados estatisticamente, em termos quantitativos, os dados finais obtidos, a fim de se poderem retirar conclusões. Para isso, dividiu-se o tipo de Análise em duas partes distintas.

Inicialmente, serão exibidos os resultados, em função da estruturação elaborada para a pesquisa, de uma forma global. Serão apresentados os resultados em número total de vigas ensaiadas, em função do tipo de ensaio, tipo de seção de viga e tipo de seção para cada ensaio. De seguida, e também em termos globais, serão apresentados dois estudos complementares. O primeiro, apresenta o número total de vigas em função do tipo de resistência do betão da viga (betão de alta resistência, ou betão de resistência normal). O segundo, apresenta um estudo ao tipo de composição material apresentada pelas vigas (betão simplesmente armado, betão reforçado com Fibras de Aço ou betão reforçado com Polímeros reforçados com Fibras (FRP)).

De seguida, procede-se a uma análise da evolução cronológica dos resultados obtidos. Inicialmente de uma forma global (em números totais), e de seguida, especificando para cada um dos estudos obtidos, o tipo de ensaio, seção, resistência do betão e tipo de composição material.

IV.2. Análise Global da Base de Dados

IV.2.1. Análise Global dos Dados Recolhidos

Concebida a Base de Dados, procedeu-se então a um tratamento e análise cuidada dos dados recolhidos. O quadro IV.1 apresenta a lista global de resultados, referente á presente compilação, onde figuram para cada ensaio, o número de vigas ensaiadas, divididas quanto ao tipo de seção e tipo de ensaio. É também apresentado, o total de vigas ensaiadas reunidas e caracterizadas pelo presente trabalho.

Quadro IV.1 - Lista Global da Base de Dados

Estudos Obtidos			Nº de vigas ensaiadas					
			Total	Tipo de ensaio			Tipo de seção	
Nº	Documento	Ref.		T	T+M	T+Np	Cheia	Vazada
1	Artigo	42	13			13	13	
2	Ph. D.	11	20	18		2		20
3	Ph. D.	51	7		7		7	
4	Ph. D.	47	14		14		4	10
5	Artigo	27	16	16			16	
6	Artigo	4	14		14		7	7
7	Artigo	13	21	21			21	
8	Artigo	15	14	14			14	
9	Artigo	35	10	10			10	
10	Artigo	18	13	13			10	3
11	Artigo	46	12	12			12	
12	Artigo	50	5			5		5
13	Artigo	3	12			12		12
14	Artigo	40	18	18			18	
15	Artigo	8	10	10			10	
16	Artigo	28	20	20			20	
17	Artigo	14	23	23			23	
18	Artigo	17	35	35			35	
19	Artigo	38	3	3				3
20	Artigo	29	6	6			2	4
21	Artigo	30	41	41			41	
22	Artigo	43	6	6			6	
23	Artigo	29	1	1			1	
Total			334	267	35	32	270	64

Com vista a se efetuar uma análise em função dos objetivos previamente delineados para a pesquisa, apresenta-se o quadro IV.2. Este quadro resumo, apresenta uma análise ao número total de vigas ensaiadas, para o tipo de ensaio, em função da seção exibida pela viga.

Quadro IV.2- Análise Global Ensaio vs. Seção

Tipo de seção	Tipo de ensaio			Total
	T	T+M	T+Np	
Cheia	239	18	13	270
Vazada	28	17	19	64
Total	267	35	32	334

Através do quadro IV.2, foi elaborado o Gráfico 1, apresentado na figura IV.1, que exibe em números absolutos e em percentagem, a distribuição por tipo de ensaio realizado, para a globalidade das vigas compiladas.

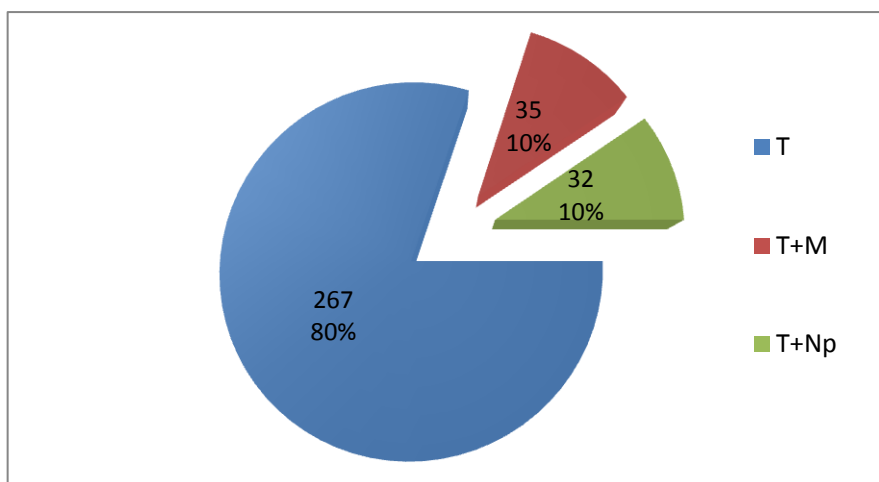


Figura IV.1- Gráfico 1: Análise Global da Distribuição por Tipo de Ensaio realizado

Foi também elaborado, o Gráfico 2, que apresenta em números absolutos e em percentagem, a distribuição por tipo de seção da viga, para a globalidade das vigas compiladas.

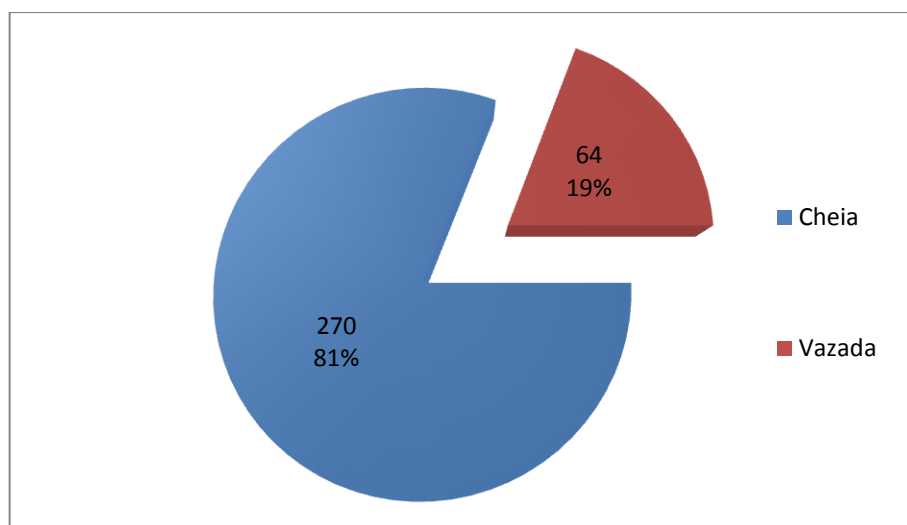


Figura IV.2 - Gráfico 2: Análise Global da Distribuição por Tipo de Seção de Viga

Apresentam-se também os Gráficos 3 e 4, que apresentam a distribuição por tipo de ensaio, para as vigas de seção cheia e vazada respetivamente, em números absolutos e em percentagem.

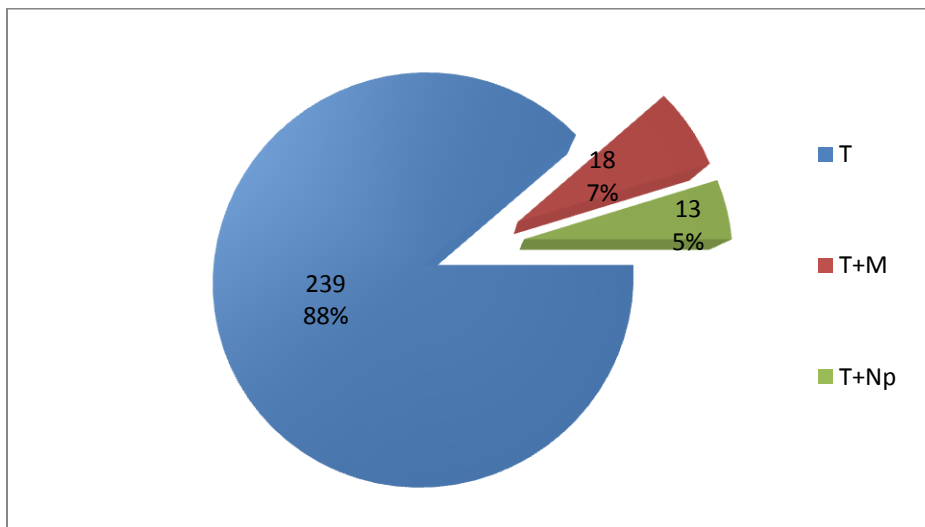


Figura IV.3 - Gráfico 3: Análise Global da Distribuição por Tipo de Ensaio para Vigas de Seção Cheia

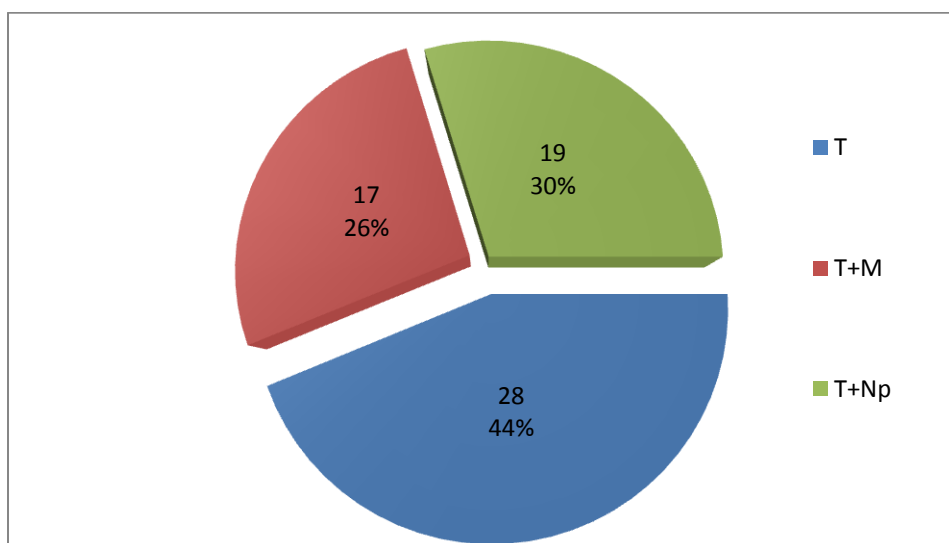


Figura IV.4 - Gráfico 4: Análise Global da Distribuição por Tipo de Ensaio para Vigas de Seção Vazada

Por fim, e também pelo quadro IV.2, apresenta-se o Gráfico 3, que apresenta em números absolutos e em percentagem, o número de vigas em função do tipo de ensaio e para ambos os tipos de seção.

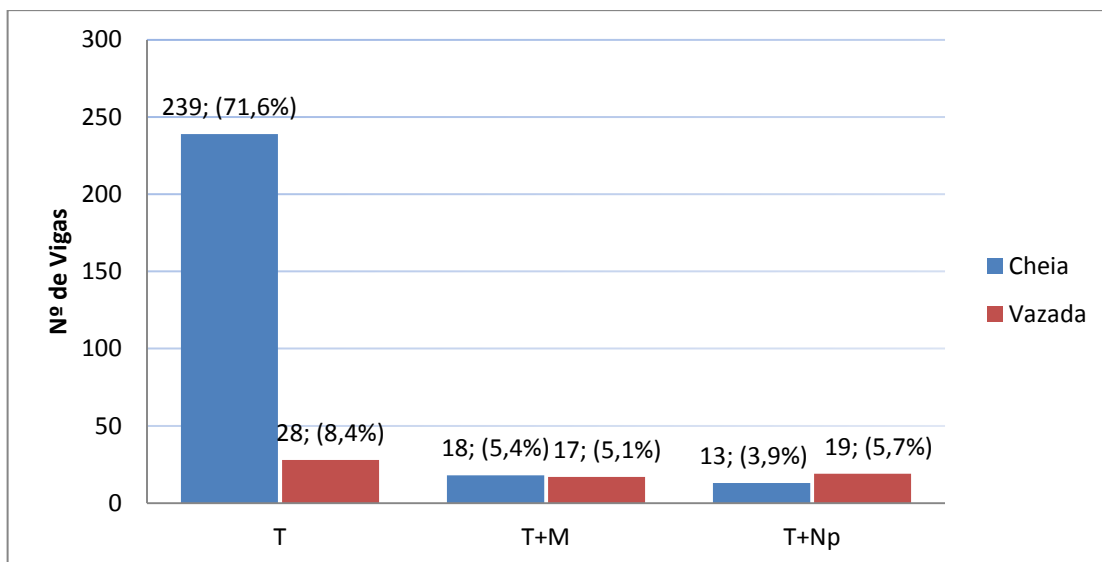


Figura IV.5 - Gráfico 5: Análise Global para a Base de Dados

Através da análise dos quadros IV.1 e IV.2, é possível verificar que, para o presente trabalho, foi elaborada uma Base de Dados para vigas ensaiadas à Torção em que figuram 334 vigas oriundas de 23 estudos distintos. Em relação à distribuição quanto ao tipo de ensaio ou seção, a análise dos quadros IV.1 e IV.2, assim como dos Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5, permitem retirar várias conclusões.

Para os tipos de ensaio realizados, observa-se uma predominância muito acentuada do ensaio à Torção Pura (aproximadamente 80%), em relação aos outros tipos de ensaio (Torção com Interação de Esforços e Torção com Pré-Esforço). Os restantes tipos de ensaios, são apresentados em valores muito semelhantes (praticamente 10% cada). Estes resultados, vão de encontro ao esperado, apesar de não se antecipar uma hegemonia tão evidenciada por parte dos ensaios à Torção Pura. Os resultados apresentados para o tipo de seção exibida globalmente pelas vigas compiladas, também não apresentam equilíbrio. Tal como se observa no Gráfico 2, 80% das vigas ensaiadas apresentam seção cheia. Era esperado um resultado mais equilibrado, com predominância para a seção tipo cheia. Através de uma análise aos gráficos 3 e 4 é possível constatar que a distribuição dos tipos de ensaio para as vigas com seção cheia, é muito semelhante aos resultados globais de distribuição quanto ao tipo de ensaio, sendo a grande maioria das vigas ensaiadas à Torção Pura. Já para as vigas com seção vazada, e ainda através dos mesmos gráficos, constata-se que a distribuição quanto ao tipo de ensaio é bastante equilibrada, apresentando valores muito próximos entre si. Em relação ao tipo de ensaio em função do tipo de seção, como observado no Gráfico 5, constata-se que, na presente Base de Dados, as vigas na sua grande maioria (70 %), são de seção cheia e foram ensaiadas à Torção Pura. As restantes vigas, encontram-se distribuídas equitativamente pelos restantes ensaios e seção, com uma ligeira vantagem para secções vazadas ensaiadas à Torção Pura. Os resultados obtidos, vão de encontro ao esperado, e apresentam uma amostra razoável, para o espectro de casos pretendidos.

IV.2.2. Estudos Complementares (analisados de forma global)

Após se abordar os resultados obtidos, em função do tipo de ensaio e tipo de seção, optou-se por uma análise para outro tipo de perspectiva. Desta forma, e após cuidadosa apreciação, foram considerados os tipos de estudos conduzidos, que não se enquadravam na análise anterior. Dessa apreciação, surgiram dois tipos de estudos, que dado a sua frequência no conjunto de estudos reunidos, merecem uma observação mais aprofundada. Assim, além da análise realizada para o tipo de ensaio e tipo de seção, para a globalidade das vigas, foram também analisadas a Classe de Resistência do Betão das vigas e a Composição Material das Vigas.

Betões de Resistência Normal vs. Betões Alta Resistência

Para o estudo, de uma forma global, à classe de resistência do betão utilizado nos ensaios, optou-se pela simples caracterização da classe de resistência do betão da viga em estudo em duas categorias: Betão de Resistência Normal (NSC), $c_f < 50\text{MPa}$; e Betão de Alta Resistência (HSC), com $c_f \geq 50\text{MPa}$. De seguida, foi analisado para cada um dos estudos obtidos, o número de vigas que apresentavam, com Betão de Alta Resistência. É apresentado o quadro IV.3, que apresenta o conjunto dos estudos analisados com a respetiva análise. No Quadro IV.3, figuram o número, ano de publicação e referência do estudo, acompanhado pelo número total de vigas ensaiadas (Total), o número de vigas para cada tipo de ensaio considerado (Torção pura, T; Torção com Interação de Esforços, T+M; Torção com Pré-Esforço, T+N_p), para cada tipo de seção considerada e o número de vigas com Betão de Alta Resistência (HSC). É também apresentado na última linha do quadro IV.3, o número total de vigas ensaiadas que possuem betão de Alta Resistência.

Quadro IV.3- Análise Global para a Classe de Resistência do Betão

Estudos Obtidos			Nº de vigas ensaiadas							
Nº	Ano de publicação	Ref.	Total	Ensaio			Secção		NSC	HSC
				T	T+M	T+N _p	Cheia	Vazada		
2	2003	11	20	18		2	0	20	3	17
3	1993	51	7		7		7	0	4	3
5	2004	27	16	16			16	0	8	8
6	2006	4	14		14		7	7	6	8
7	1995	13	21	21			21	0	4	17
9	2010	35	10	10			10	0	0	10
10	2006	18	13	13			10	3	3	10
13	2008	3	12			12	0	12	10	2
16	2003	28	20	20			20	0	15	5
20	2006	29	6	6			2	4	2	4
Total:									55	84

Para uma melhor percepção do volume de vigas consideradas, apresenta-se o Gráfico 4, onde se pode observar, por comparação, o número de vigas com Betão de Resistência Normal, NSC, e o número de vigas com Betão de Alta Resistência, HSC. Para cada classe, é apresentado o número total de vigas seguido pela percentagem equivalente.

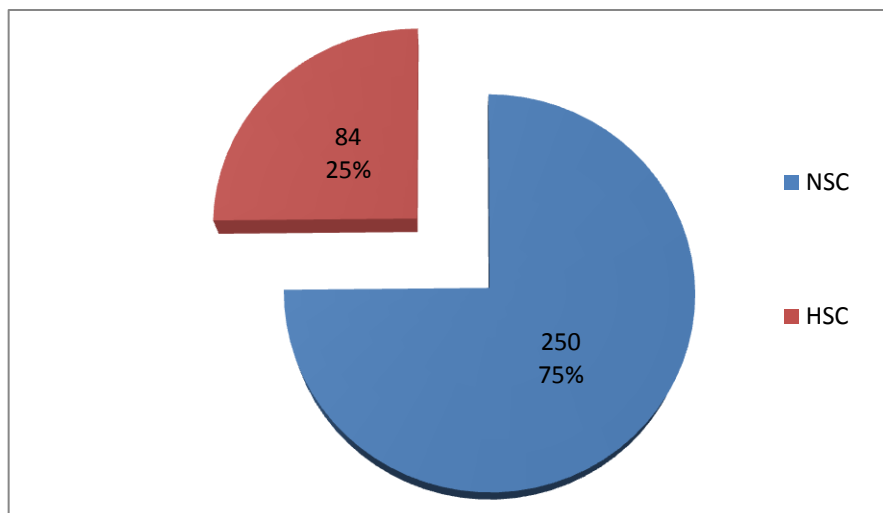


Figura IV.6 - Gráfico 6: Distribuição Global para Vigas de Resistência Normal e Alta Resistência

Composição Material das Vigas Ensaçadas

Para o estudo, de uma forma global, da composição material das vigas ensaiadas, foram analisados os estudos obtidos, que apresentavam uma composição material alternativa à convencional (entendendo-se por convencional, a viga composta apenas por betão e aço para armaduras). Foram então reunidos esses mesmos estudos, e apresentados no quadro IV.4. No quadro IV.4, figuram o número, ano de publicação e referência do estudo, acompanhado pelo número total de vigas ensaiadas (Total), o número de vigas para o tipo de ensaio considerado (Torção pura, T; Torção com Interação de Esforços, T+M; Torção com Pré-Esforço, T+N_p), para cada tipo de seção considerada e que tipo de material adicional o estudo apresenta, assim como o respetivo número de vigas. É também apresentado na última linha do quadro IV.4, o número total de vigas ensaiadas para cada tipo de material adicional.

Quadro IV.4- Análise à Composição Material das Vigas

Estudos Obtidos			Nº de vigas ensaiadas				Betão com Fibras de Aço		Polímero Reforçado com Fibras	
Nº	Ano de publicação	Ref.	Total	Ensaio	Secção		x/P	Nº Vigas	Fibra	Nº Vigas
				T	Cheia	Vazada				
8	2006	15	14	14	14		×		Carbon	14
11	2011	4	12	12	12		P	12	×	
16	2003	28	20	20	20		P	20	×	
17	2007	14	23	23	23		×		Carbon / Glass	23
18	2009	17	35	35	35		P	35	×	
20	2006	29	6	6	2	4	×		Carbon	4
Total:								67		41

Legenda: ✓ - possui; × - não possui;

Para uma melhor percepção do volume de vigas consideradas, apresenta-se o Gráfico 5, onde se pode observar, por comparação, o número de vigas com Betão Enriquecido com Fibras de Aço (BFA), o número de vigas reforçadas com Polímeros reforçado com Fibras (FRP), e o número de vigas restante, apresentadas como vigas convencionais (VC). Para cada composição material, é apresentado o número total de vigas seguido pela percentagem equivalente.

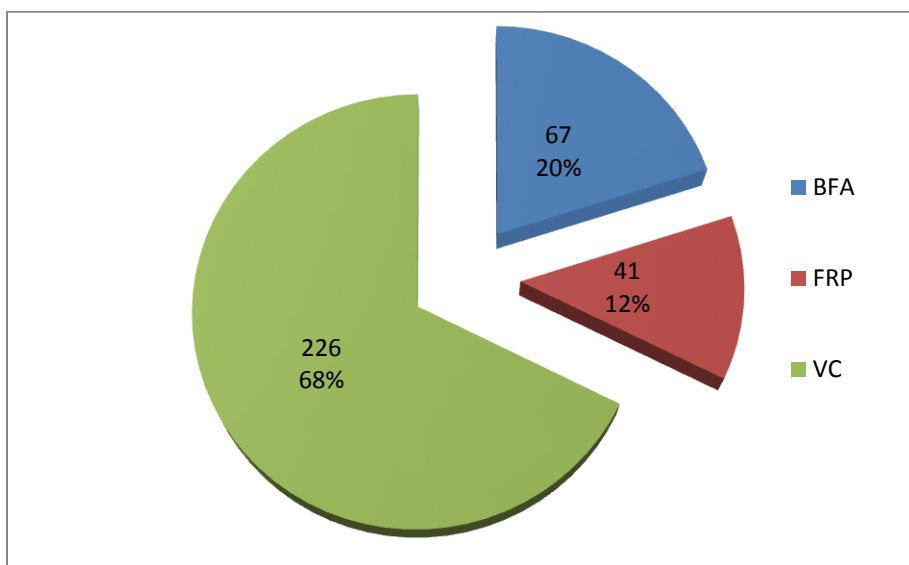


Figura IV.7 - Gráfico 7: Análise à Composição Material das Vigas

Após análise aos resultados obtidos, através dos quadros IV.3 e IV.4, e dos Gráficos 6 e 7, para os estudos complementares, retirou-se as seguintes conclusões.

No caso de vigas com Betões de Alta Resistência, verificou-se que as mesmas representam um quarto (25%) da globalidade das vigas ensaiadas. Este resultado é considerado positivo, uma vez que, apesar de não se enquadrar como um caso de estudo pretendido inicialmente, conseguiu-se compilar com sucesso, um número significativo de vigas com Betões de Alta Resistência.

No caso da Composição Material das vigas, os resultados obtidos apresentam uma diversificação interessante. Aproximadamente dois terços (68%) das vigas, apresentam uma composição material dita convencional. Um quinto (20%) das vigas ensaiadas, apresentam um betão enriquecido com Fibras de Aço, e os restantes 12 % a globalidade das vigas ensaiadas, apresentam reforço com Polímeros Reforçados com Fibras (FRP). Tal como para o caso do estudo relativo a Betões de Alta Resistência, os resultados obtidos foram considerados positivos. Mais uma vez, o número de vigas reunidas, para estes tipos de estudos, permite aumentar e enriquecer, a diversificação dos casos de estudo abordados, para as vigas que figuram na presente Base de Dados.

IV.3. Análise cronológica dos Dados Recolhidos.

Após o tratamento dos dados globais obtidos, procedeu-se a uma análise cronológica desses mesmos dados. Essa análise, tem por objetivo, um estudo do nº de vigas ensaiadas em função do tempo. Primeiramente optou-se por uma análise para a globalidade das vigas, em que as mesmas serão analisadas em números totais, e por década, em função do tipo de ensaio e tipo de seção. De seguida, foi então realizada uma análise cronológica, não para o número total de vigas, mas para os estudos encontrados. Os mesmos seriam então caracterizados por tipo de ensaio, tipo de seção, tipo de resistência do betão e por fim, tipo de composição material.

IV.3.1. Evolução Cronologia para a Globalidade das Vigas

Por forma a efetuar uma análise cronológica para a totalidade das vigas, realizou-se uma reestruturação do quadro IV.5- Lista Cronológica da Base de Dados, onde os estudos obtidos foram dispostos cronologicamente e agrupados nas respetivas décadas de realização dos mesmos. O quadro IV.5- Lista Cronológica da Base de Dados, apresenta essa mesma reestruturação.

Quadro IV.5- Lista Cronológica da Base de Dados

Década	Estudos Obtidos			Nº de vigas ensaiadas					
	Nº	Ano de publicação	Ref.	Total	Tipo de ensaio			Tipo de seção	
					T	T+M	T+Np	Cheia	Vazada
1960-69	21	1968	30	41	41			41	
	23	1969	39	1	1			1	
1970-79	14	1974	40	18	18			18	
	12	1974	50	5			5		5
	4	1978	47	14		14		4	10
	22	1978	43	6	6			6	
1980-89	1	1985	42	13			13	13	
1990-99	3	1993	51	7		7		7	
	15	1994	8	10	10			10	
	7	1995	13	12	12			12	
2000-10	7	2001	13	9	9			9	
	17	2002	14	13	13			13	
	2	2003	11	20	18		2		20
	16	2003	28	20	20			20	
	5	2004	27	16	16			16	
	6	2006	4	14		14		7	7
	8	2006	15	14	14			14	
	10	2006	18	13	13			10	3
	20	2006	29	6	6			2	4
	17	2007	14	10	10			10	

	13	2008	3	12			12		12
	18	2009	17	35	35			35	
	9	2010	35	10	10			10	
2010-...	11	2011	46	12	12			12	
	19	2011	38	3	3				3

É importante realçar que, o estudo nº12, se apresenta como publicado em 1974, quando na realidade o estudo foi publicado em 2003. Contudo, as vigas obtidas nesse estudo, são referentes a um outro estudo de 1974, o qual não foi possível aceder ao longo deste trabalho. A mesma justificação é válida para os estudos nº 7 e 17, que figuram na lista em duplicado, por apresentarem vigas referentes a estudos distintos.

De seguida, elaborou-se o seguinte quadro resumo, referente á distribuição de vigas ensaiadas cronologicamente.

Quadro IV.6- Quadro Análise Cronológica Ensaio vs. Seção

Década	Tipo de seção	Tipo de ensaio			Total
		T	T+M	T+Np	
1960-69	Cheia	42	0	0	42
	Vazada	0	0	0	0
1970-79	Cheia	24	4	0	28
	Vazada	0	10	5	15
1980-89	Cheia	0	0	13	13
	Vazada	0	0	0	0
1990-99	Cheia	22	7	0	29
	Vazada	0	0	0	0
2000-09	Cheia	139	7	0	146
	Vazada	25	7	14	46
2010-..	Cheia	12	0	0	12
	Vazada	3	0	0	3
Total		267	35	32	334

Através do quadro IV.6, foi elaborado o Gráfico 8, que exhibe em termos totais e percentuais, a distribuição de vigas ensaiadas ao longo de seis décadas, para a globalidade das vigas compiladas.

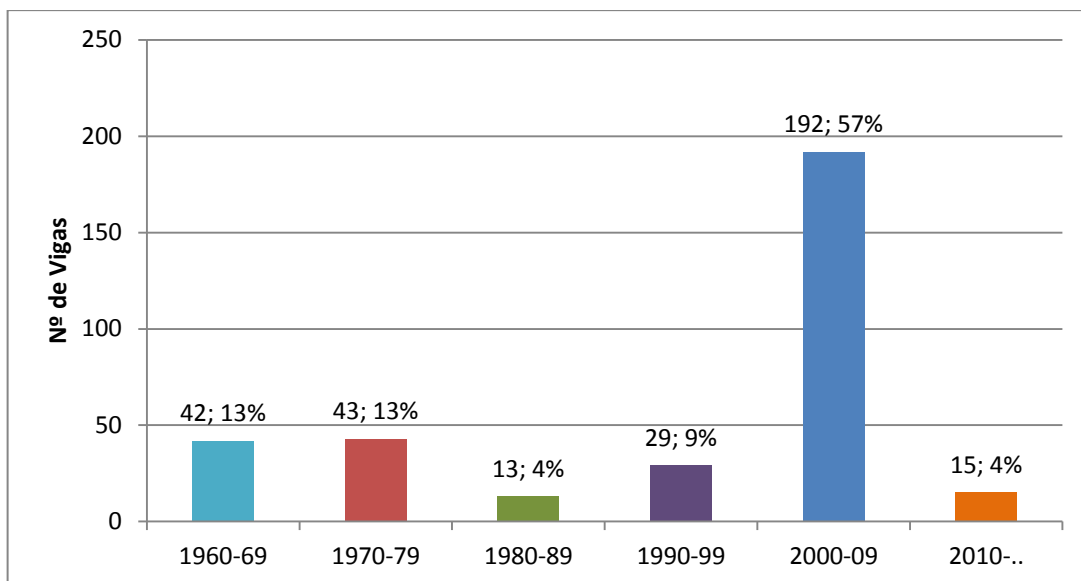


Figura IV.8 - Gráfico 8: Número de Vigas ensaiadas ao longo do Tempo

Em seguida, e também através do quadro IV.6, apresenta-se o Gráfico 9, que exhibe em números totais, a distribuição do nº de vigas ensaiadas, separadas por tipo de ensaio e de seção, ao longo de seis décadas, para a globalidade das vigas compiladas.

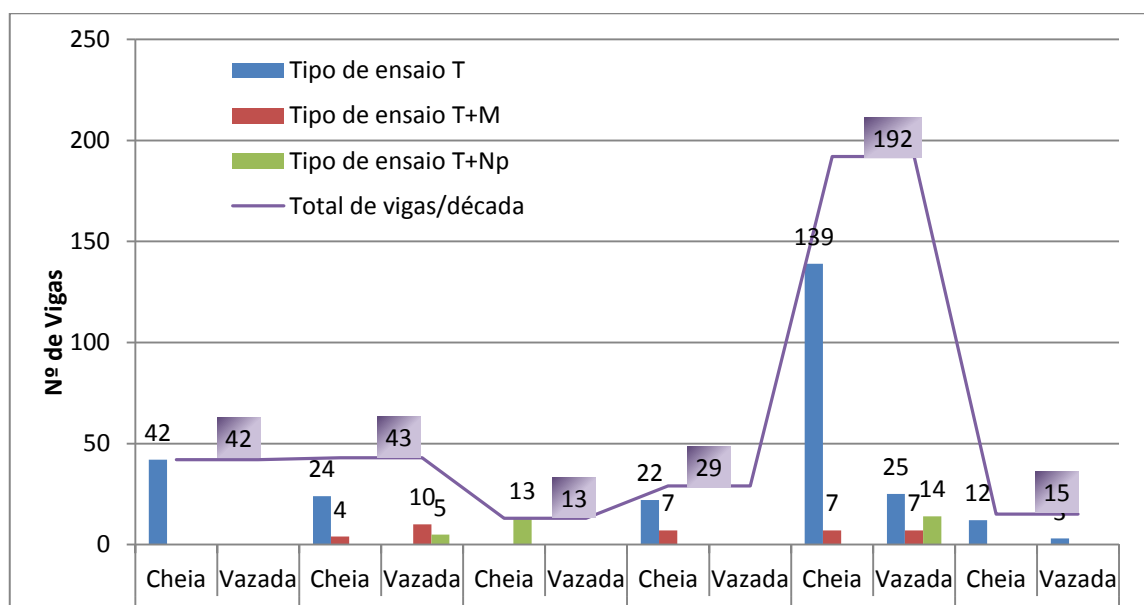


Figura IV.9 - Gráfico 9: Evolução Cronológica da Base de Dados

O tratamento de dados realizado, permite uma avaliação cronológica para a globalidade das vigas ensaiadas. Os quadros IV.5 e IV.6, assim como os Gráficos 8 e 9, apresentam esses resultados. Através do Gráfico 6, é possível verificar que aproximadamente 60% das vigas, foram ensaiadas nos últimos treze anos. A década que apresenta o menor número de ensaios de vigas é a década de 1980, onde figuram apenas as vigas referentes a um estudo. As restantes décadas, apresentam valores muito próximos. A análise do Gráfico 9, onde o número de vigas por década, é apresentado discriminado entre tipo de ensaio e tipo de

seção, possibilita outro tipo de conclusões. Os primeiros ensaios realizados, em finais da década de sessenta, seriam para vigas de seção cheia ensaiadas á Torção Pura. Na década seguinte, foram realizados ensaios na mesma ordem de grandeza. Contudo, os estudos realizados nesta década, já apresentavam outra variedade de ensaios, se bem que, com predominância do ensaio á Torção Pura com seção tipo Cheia. Nesta década surge o interesse por ensaios á Torção com Interação de Esforços e á Torção com Pré-Esforço, este último, manteve-se para a década seguinte (1980). Após a década de 1970, e para a presente compilação de estudos, o interesse por ensaios a vigas com seção Vazada, ressurgiria apenas na primeira década do século XXI. É no último período, correspondente aos últimos treze anos, que se verifica uma variedade mais acentuada, tanto para ensaios com para tipo de seção, no número de vigas ensaiadas. Apesar disso, é notória a hegemonia de ensaios á Torção Pura para secções Cheias.

IV.3.2. Evolução Cronologia dos Estudos Recolhidos

Por forma a ser efetuada uma análise à evolução cronológica para os Estudos Recolhidos, foi completado o quadro IV.5, onde agora figuram, para cada estudo, o número de vigas com betão de Alta Resistência (HSC), assim como, o número de vigas ensaiadas com Fibras de Aço (BFA) e Polímeros Reforçado com Fibras (FRP). Os estudos obtidos foram dispostos cronologicamente e agrupados nas respetivas décadas de realização dos mesmos. O quadro IV.7, apresenta essa mesma reestruturação.

Quadro IV.7- Análise Cronológica aos Estudos Obtidos

Década	Estudos Obtidos			Nº de vigas ensaiadas							
	Nº	Ano de publicação	Ref.	Total	Ensaio			Seção		HSC	BFA & FRP
					T	T+M	T+Np	Ch	Vz		
1960-69	21	1968	30	41	41			41	0	0	0
	23	1969	39	1	1			1	0	0	0
1970-79	14	1974	40	18	18			18	0	0	0
	12	1974	50	5			5	0	5	0	0
	4	1978	47	14		14		4	10	0	0
	22	1978	43	6	6			6	0	0	0
1980-89	1	1985	42	13			13	13	0	0	0
1990-99	3	1993	51	7		7		7	0	3	0
	15	1994	8	10	10			10	0	0	0
	7	1995	13	12	12			12	0	8	0
2000-10	7	2001	13	9	9			9	0	9	0
	17	2002	14	13	13			13	0	0	13
	2	2003	11	20	18		2	0	20	17	0
	16	2003	28	20	20			20	0	5	20
	5	2004	27	16	16			16	0	8	0
	6	2006	4	14		14		7	7	8	0
	8	2006	15	14	14			14	0	0	14

	10	2006	18	13	13			10	3	10	0
	20	2006	29	6	6			2	4	4	4
	17	2007	14	10	10			10	0	0	10
	13	2008	3	12			12	0	12	2	0
	18	2009	17	35	35			35	0	0	35
	9	2010	35	10	10			10	0	10	0
2010-...	11	2011	46	12	12			12	0	0	12
	19	2011	38	3	3			0	3	0	0

Para uma melhor interpretação dos resultados, foi elaborado através do quadro IV.7, o Gráfico 9, que exibe para cada Estudo Obtido, todas as disposições consideradas no quadro, e referentes a esse mesmo estudo. Assim é apresentado o número total de vigas por estudo, e também o número de vigas referentes ao tipo de ensaio (T; T+M; T+Np), seção (Ch e Vz), resistência do betão (HSC) e composição material alternativa (C.M.), assim como a respetiva década de realização.

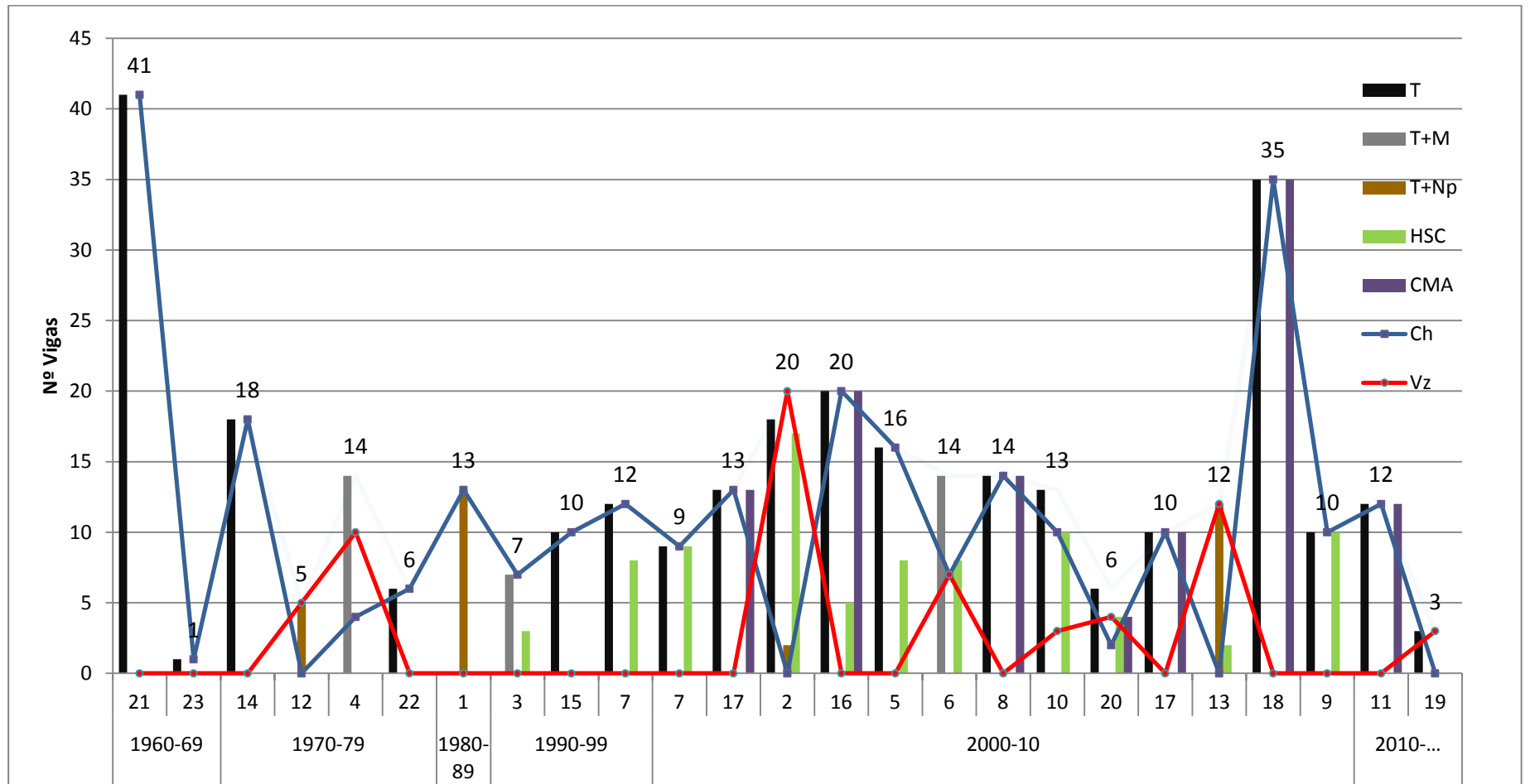


Figura IV.10 - Gráfico 10: Evolução Cronológica dos Estudos Recolhidos

Após a apresentação destes resultados, procedeu-se então à sua discussão. O quadro IV.7 e o Gráfico 10, reúnem em si, a evolução cronológica dos estudos compilados para esta Base de Dados. Através desse mesmo quadro, é possível constatar que, primeiramente, os estudos referentes à década de 1960, foram realizados nos anos finais dessa mesma década. É possível também observar para esse quadro que, a grande maioria dos estudos reunidos pertencem aos últimos treze anos. Isto revela uma intensificação enorme do trabalho desenvolvido sobre a problemática da Torção. Analisando o Gráfico 7, constata-se então que na década de 60, os estudos realizados, passavam por ensaios à Torção Pura, para vigas de seção cheia. Na década de 70, surgem então uma variedade de estudos, com ensaios de outros tipos e surge o interesse por vigas de seção vazada. Para a década de 80, só foi possível reunir um estudo, referente a vigas de seção cheia, ensaiadas à Torção com influência de Pré-Esforço. Na década de 90, surge o interesse por ensaios à Torção com Vigas de Betão de Alta Resistência. O interesse por essa área tem-se mantido desde então, sendo realizados diversos estudos sobre o referido tema. Na primeira década do século XXI, verifica-se uma diversidade de estudos elevada, apresentando estudos para ambos os tipos de seção, assim como de Torção com Pré-Esforço ou com interação de outros esforços. Também para esta década, começaram-se a realizar estudos com vigas de composição material alternativa, com vista a obter novas soluções.

Os resultados apresentados, apontam para uma intensificação dos estudos na área, a par de uma diversificação dos mesmos.

Capítulo V - Conclusões e Trabalhos Futuros

V.1. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo contribuir para o conhecimento do Estado de Arte da Torção, através da elaboração de uma Base de Dados para vigas ensaiadas à Torção. Essa compilação, tinha como objetivo reunir um número de vigas significativo, que garantisse um exemplificação clara, para todo o espectro de ensaios de Torção realizados. Esse resultado, estaria dependente do sucesso obtido, durante a pesquisa de estudos relacionados com esta temática.

Neste trabalho, inicialmente, foram descritas e apresentadas sugestões para a metodologia seguida na realização de um ensaio de uma viga à Torção. Posteriormente, foram apresentadas sugestões relativas ao tratamento de resultados. De seguida, foi descrita toda a metodologia seguida para a elaboração da Base de Dados, desde da pré-estruturação para a pesquisa, até à caracterização individual de cada viga. Por fim, foram apresentados, tratados estatisticamente e discutidos, os resultados obtidos.

De seguida apresentam-se as principais conclusões.

Para o presente trabalho, foi elaborada uma Base de Dados para vigas de betão estrutural ensaiadas à Torção em que figuram 334 vigas oriundas de 23 estudos distintos.

Observa-se uma predominância muito acentuada do ensaio à Torção Pura (80%), em relação aos outros tipos de ensaio (Torção com Interação de Esforços e Torção com Pré-Esforço), que são apresentados em valores muito semelhantes (10% cada).

O tipo de seção exibida pela maioria das vigas ensaiadas (80%) é a seção tipo cheia. Apenas 20 % apresentam seção vazada.

As vigas reunidas, na sua grande maioria (70 %), são de seção cheia e foram ensaiadas à Torção Pura. As restantes vigas, encontram-se distribuídas equitativamente pelos restantes ensaios e seção, com uma ligeira vantagem para seções vazadas ensaiadas à Torção Pura.

Para o caso de estudo de vigas com Betões de Alta Resistência, verificou-se que as mesmas representam um quarto (25%) da globalidade das vigas ensaiadas. Já para o caso da Composição Material das vigas, os resultados obtidos apresentam uma composição material dita convencional para aproximadamente dois terços (68%) das vigas, enquanto um quinto (20%) das vigas ensaiadas, apresentam o betão enriquecido com Fibras de Aço, e os restantes 12 % a globalidade das vigas ensaiadas, apresentam reforço com Polímeros Reforçados com Fibras (FRP).

Da análise cronológica aos estudos compilados pelo presente trabalho, verificou-se que a evolução dos estudos efetuados, teve início nos finais da década de 60, com ensaios de vigas de seção cheia à Torção Pura. De seguida, nos anos 70, apresentaram-se estudos sobre torção com interação de esforços e com Pré-esforço, tanto para vigas de seção cheia como vazada. Nos anos 80, apresenta-se apenas um estudo relativo a torção com Pré-Esforço, para seções cheias. Nos anos 90, apresentam-se estudos para vigas com seções cheias, ensaiadas à

Torção Pura e com Interação de Esforços, e, pela primeira vez, surgem estudos com vigas de Betão de Alta Resistência. Por fim, é para os últimos 13 anos, que figuram a grande maioria dos estudos compilados (65%). Estes estudos apresentam uma diversificação elevada, tanto em tipo de ensaio como de seção. É também iniciado o estudo de outros tipos de composição material para as vigas ensaiadas.

Os resultados obtidos, foram de encontro ao esperado, se bem que, com uma predominância acentuada para o caso de estudo de vigas de seção cheia ensaiadas á Torção Pura.

Conclui-se portanto, que se compilou com sucesso um número significativo de casos de estudo, relativos a ensaios experimentais de vigas à torção, que apresenta uma diversidade considerável. Desta forma, foi possível elaborar com sucesso uma Base de Dados que exhibe um amplificado e fundamentado termo de comparação. A compilação elaborada, permitiu também analisar a evolução cronológica dos ensaios experimentais á Torção realizados nas últimas décadas. Assim, pode-se afirmar que os objetivos propostos foram atingidos com êxito.

V.2. Recomendações para trabalhos futuros:

Atendendo á natureza do trabalho aqui apresentado, é de referir que, apesar de se considerar que os objetivos propostos foram atingidos, o mesmo se encontra incompleto.

No caso de surgir oportunidade de dar seguimento a este trabalho, sugere-se a consulta da lista apresentada anteriormente de estudos pretendidos. Nessa lista, figuram bastantes estudos que se apresentaram indisponíveis durante o período de realização deste trabalho. Será certamente um bom ponto de partida.

É de realçar que os resultados obtidos, apontam para uma intensificação e diversificação de futuros estudos. Assim, será sempre possível expandir e enriquecer a presente compilação com nova informação.

Referências

1. A. B. Chance Co. Civil Construction Installing Tools for Screw Anchores and Piles. Centralia, Bulletin 01-0103. 2006
2. ACI Comittee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-89) and Commentary (ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989
3. Algorafi, M.A. and Ali, A.A.A. Ali and Otthman, I. and Jaafar, M.S. and Anwar M.P. "Experimental study of externally prestressed segmental beam under torsion." Engineering Structures No. 32 (2010) pp.3528-3538.
4. Alnuaimi, A. S., Al-Jabri, K. S. and Hago, A. "Comparison between solid and hollow reinforced concrete beams." Materials and Structures (2008), No. 41, pp. 269-286.
5. Analysis of sections subjected to combined shear and torsion. ACI Structural J. 1995; 92(4):1-13
6. Andrade, J. M. A. "Modelação do Comportamento Global de Vigas Sujeitas à Torção", PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã 2010
7. Armstrong, S., "The Strength of Concrete Members in Combined Bending and Torsion", Proceedings of a Symposium of the Strength of Concrete Structures, Session B Paper 2, Cement and Concrete Association, London, May 1956, pp. 101-122
8. Bairagi, N. K. and Pise, P. T. "Torsion of concrete beams using a post-twisting technique" Construction and Building Materials (1995) Vol. 9, No. 3, pp. 135-139.
9. Behavior of FRP strengthened reinforced concrete beams under torsion", Journal Of Composites for construction 2007;11(2):192-200.
10. Behaviour of reinforced concrete box beams subjected to pure torsion (in Chinese), Master Thesis, Dept. of Civil Engineering, Chung Yuan Christian University, Chung Li, Taiwan 1999.
11. Bernardo, L., "Torção em Vigas em Caixão de Betão de Alta Resistência" PhD. Thesis, Departement of Civil Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2003
12. CEB-FIP MODEL CODE 1990, Comité Euro-International du Béton, Suisse, 1990.
13. Cevik, A. and Arslan, M. H. and Korogku, M. A. "Genetic-programming-based Modeling of RC Beam Torsional Strength" KSCE Journal of Civil Engineering (2010) Vol. 14, No. 3, pp. 371-384.
14. Chalioris, C. E. "Analytical model for the torsional behaviour of reinforced concrete beams retrofitted with FRP materials" Engineering Structures No. 29 (2007) pp. 3263-3276.
15. Chalioris, C. E. "Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fiber-reinforced-polymers - Experimental study" Construction and Building Materials 22 (2008) pp. 21-29.

16. Chapter 4: Softened membrane model for torsion of reinforced Concrete. Advances in engineering research. V.2, ISBN:978-1-61324-709-9, edited by Petrova, V. M. in press, to be published in 2011 by Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY 11788, USA.
17. Chariolis, C. and Karayannis, G. " Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams" Cement and Concrete Composites No. 31 (2009), pp. 331-341.
18. Chiu H. J., Fang I. K., Young W. T., Shiau J. K. "Behaviour of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement."Engineering Structures 29 (2007) pp. 2193-2205.
19. Concrete Q&A: Torsion Calculations For Hollow Sections, concrete international, July 2005, V27, n° 7, pp 68
20. Cuerel, J., "New Waterloo Bridge at London," International Association for Bridge and Structural Engineering, 3rd Congress, Liège, 1948, pp. 367-380.
21. Design of reinforced concrete spandrel beams. J Struct Eng 1974; 100(ST1):209-29
22. Effect of concrete strength on the behavior of RC beams subjected to pure torsion" American Society of Civil Engineers, special publication on high strength concrete , pp.38-51.
23. Effect of stirrups on ultimate torque of reinforced concrete beams. ACI J 1973; 70-32; 300-6.
24. Especificação LNEC E 226-1968, "Betão. Ensaio de Compressão," LNEC, 1968
25. Experimental study of prestressed concrete under combined torsion, bending and shear. PCI Journal 1973; 18(5):85-100
26. Experimental study of the torsion of reinforced concrete members. Struct.Eng.Mech. 23:713-737
27. Fang, I. K. and Shiau, J. K. (2004). "Torsional behavior of normal and high strength concrete beams." ACI Structural Journal, Vol. 101, No.3, pp. 304-313.
28. Gunneswara R.T.D. and Rama S. D. "Torsion of steel fiber reinforced members" Cement and Concrete Research No. 33 (2003) pp. 1783-1788.
29. Hii, A. K. Y. and Al-Mahaidi R. "An experimental investigation on torsional strengthening of solid and box-section RC beams using CFRP laminates" Composites Structures No. 75 (2006), pp.213-221.
30. Hsu, T. T. C. (1968). Torsion of structural concrete-behavior of reinforced concrete rectangular members, Torsion of Structural Concrete SP-18, ACI, Farmington Hills. Mich, pp. 261-306.
31. Hsu, T. T. C., "Torsion of Reinforced Concrete", Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
32. http://s3.freefoto.com/images/31/01/31_01_10_web.jpg

33. <http://www.google.pt/imgres?hl=pt-BR&sa=X&biw=1366&bih=667&tbn=isch&tbnid=62ZMgkJQAUhMVM:&imgrefurl=http://www.microanalise.com.br/produtos.htm&docid=6aohiafASv0kHM&imgurl=http://www.microanalise.com.br/sw-xx.jpg&w=560&h=356&ei=qXlGUcmrBuWR7Aa8j4DABw&zoom=1&ved=0CFsQhBwwBA&ved=1t:3588,r:4,s:0,i:91&iact=rc&dur=159&page=1&tbnh=174&tbnw=281&start=0&ndsp=17&tx=112&ty=71>
34. <http://www.sciencedirect.com/>
35. Husem, M., Oztekin, E. and Pul, S. "A calculation method of cracking moment for the high strength concrete beams under pure torsion." *Sadhana* Vol.36, Part 1, February 2011, pp. 1-15.
36. Investigation on thickness of shear flow zone for RC beams subjected to Pure torsion(in chinese), Master thesis, Dept. of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, june 1998, pp 71
37. IPQ, Norma Portuguesa EN 10 002-1, "Materiais Metálicos. Ensaios de Tracção. Parte 1: Método de Ensaio (à temperatura ambiente), " Novembro, 1990.
38. Jeng, C. H. and Chiu, H.J. "Design formulas for cracking torque and twist in hollow RC members" *ACI Structural and Materials Journal*
39. Lampert, P., and Thürlimann, B., "Essais de Poutre en Béton Armé sous Torsion Simple et Flexion Combinées (Torsionsversuche und Torsions-Biege-Versuche an Stahlbetonbalken)," *Comité Européen du Béton*, B.I. n° 71, Mars, 1969, pp 177-207.
40. Leonhardt, F. and Schelling, G. "Torsionsversuche na Stahlbetonbalken", Heft 239, *Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton*, Berlin; 1974 p.122
41. Luchinger, P. and Thurlimann, B. *Versuche na Stahlbetonbalken unter Torsion, Biegung und Querkraft*. IBK-ETHZ, N.° 6506-5, Birkhauser-Verlag, Basel and Stuttgart.1973.
42. McMullen, A. E. and El-Degwy, W. M. "Prestressed concrete tests compared with torsion theories" *PCI Journal*, (1985) September-October, pp. 96-123
43. McMullen, A.E. and Rangan, B.V. "Pure torsion in rectangular section - A re-examination." *ACI Structural Journal* 1978, Vol.75, No. 10, pp. 511-519.
44. Measor, E. O. And New, D. H., "The Design and Construction of the Royal Festival Hall, South Bank", *Journal of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 7, May 1951, pp. 241-318.
45. Miehlebradt, M. *Effort Tranchant - Torsion*. Documentation D 040, *Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes*, Zurich. 1989.
46. Okay, F. and Engin, S. "Torsional behavior of steel fiber reinforced concrete beams" *Construction and Building Materials* 28 (2012) pp. 269-275.

47. Onsongo, W. M., "The Diagonal Compression Field Theory for Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion, Flexure, and Axial Load." PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 1978, chap. IV-V.
48. Post-Cracking Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Sections. Journal of the American Concrete Institute, Proc. May 1973, Vols. 70, No. 5, pp. 352-360-
49. Quantifying the reduction factor for hsu/zhu ratio for RC members under torsion. Structural engineers world congress, Bangalore, India, Nov.2-7,2007
50. Rahal, K. N. and Collins, M. P. "Combined torsion and bending in reinforced and prestressed concrete beams." ACI structural J 2003; Vol. 100, No. 2, pp. 157-165.
51. Rahal, K. N."Behaviour of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Shear and Torsion" PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 1993, chap. III-IV.
52. Redistribution of moments at cracking - The key to simpler torsion design. Toronto,1971
53. Shear and torsion design of prestressed and non-prestressed concrete beams. PCI J 1980; 25(5):32-100.
54. Simple rational formulas for cracking torque and twist of reinforced concrete members, ACI Structural J. V. 107, n°2, Mar-Apr.2010, pp 189-198
55. Softening of concrete in torsional members-design recommendations. ACI J 82: 443-52.
56. Softening of concrete in torsional members-theory and tests. ACI J 82: 290-303.
57. Strain gradient effect in RC elements subjected to torsion." Magazine of concrete research, V.63, No 5; May 2011, pp.343-356
58. Strength evaluation and retrofit of reinforced concrete beams subjected to pure torsion MSc thesis, Rice University, Texas
59. Taerwe, L., "Codes and Regulations," 4th International Symposium on Utilization of High-Strngth / High-Performance Concrete, Paris, 1996,pp.93-99.
60. T-beams subjected to combined bending and torsion. ACI J 68: 150-159
61. The behavior od reinforced concrete beam subjected to combine torsion and shear (in chinese), Master thesis, Dept. of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan,2002
62. the behavior of structural concrete beams in pure torsion. PhD. Thesis University of Toronto. Pp140
63. The behavior of uniformly prestressed concrete box beams in combined torsion and bending MASc thesis. Department of Civil engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 1974, 73 pp.
64. Thin-walled composite beams under bending, torsional and extensional loads. J aircr 1990; 27(7): 619-26

65. Torsion in high strength concrete rectangular beams", Master thesis, University of Nevada
66. Torsion in reinforced concrete. Guven Kitabevi, Ankara
67. Torsion in reinforced normal and high strength concrete beams part-1 : An experimental test series" ACI Structural Journal, Vol.92, No.1 pp56-62.
68. Torsion of high strength reinforced concrete beams and minimum reinforcement requirement. ACI Struct J 2001; 98(4):462-9
69. Torsion of reinforced concrete. Van Nostrand Reinhold Company
70. Torsion, bending and shear in rectangular reinforced concrete beams- An experimental study. Report no. Univ R-178. Sydney: the university of new south wales; 1978
71. Torsional behavior of high-strength concrete beams strengthened using CFRP sheets; An experimental and analytical study. Transaction A: Civil Eng. V16:(4):321-330, sharif university
72. Torsional strengthening of reinforced concrete beams strengthened with FRP composites. First FIB Congress, Osaka, Japan; 2002, october 13-19, pp1-11.
73. Torsionsversuche na stahlbetonbalken, Bericht Nr. 6506-2. Jun 1968, Institute fur Baustatik, ETH, Zurich, Switzerland
74. Torsionsversuche na stahl-und spannbetonbalken, Bericht n° 6506-4, Feb.1971, Institute fur Baustatik, ETH,Zurich, Switzerland, 99pp.
75. Toward a rational approach for design of minimum torsion reinforcement". ACI Structural J. V.96 n°1, Jan-feb. 1999, pp 40-45
76. Ultimate strength of reinforced concrete beams in combined torsion and shear. ACI J 1968; 65(3):210-6
77. Upgrading torsional resistance of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer. J of Composites for Construction (ASCE); 2002, 6(4), pp 257-263.
78. Using radial basis function neural networks to model torsional strength of reinforced concrete beams. Comput Concr 2006; 3(5):335-55.
79. W.Pawlak , M.Kaminski "Cracking of reinforced concrete beams under torsion - theory and experimental research", Article, Department of Civil engineering, Institute of Building Engineering, Division of Concrete Structures, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland
80. Walther, R. and Miehlsbradt, M. Dimensionnement des Structures en Béton - Bases et Technologie. Traité de Génie Civil - Volume 7, de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse. 1990.

Anexos

Anexo I - Ficheiro FDV para a viga 1.5

Folha 1

Quadro 1.1

n° of Keywords 4

Keywords
B
PC
NSC
T

Folha 2

Quadro 2.1

Type of document P

Quadro 2.2

No. Authors 2

Authors

McMullen	A.E.
El-Degwy	W.M.

Quadro 2.3

Test references:

<i>Country:</i>	Canada
<i>Test date (year):</i>	1985
<i>Place:</i>	The University of Calgary

<i>Test type:</i>	M
<i>Load Tyle:</i>	T + Np
<i>Beam type:</i>	PRPS

Quadro 2.4

Paper

<i>Edition/Journal/Document:</i>	PCI Journal
<i>Year:</i>	1985
<i>Month and day:</i>	September-October
<i>Title:</i>	Prestressed high-strength concrete beams under torsion
<i>Vol.:</i>	
<i>Number:</i>	
<i>Pages:</i>	96-127

Folha 3

Quadro 3.1

BEAM

h [cm] 25,4

b [cm] 25,4

$x_1 [cm]$	21,9
$y_1 [cm]$	21,9
$t_x [cm]$	
$t_y [cm]$	
$L_{tot} [cm]$	360
$L_{test} [cm]$	120
$c [cm]$	

Quadro 3.2

REINFORCEMENT

Longitudinal	no. Groups	1
		G.1
	Number	4
	Diameter [mm]	19,1
	Área [mm²]	286,52
Transverse	no. Groups	1
		G.1
	Diameter [mm]	9,5
	s [cm]	5,5
	Área [mm²]	70,88

Quadro 3.3

**PRESTRESS
REINFORCEMENT**

Longitudinal	no. Groups	1
		G.1
	Number	4
	Diameter [mm]	9,7
	Área [mm²]	73,90
	f_p [MPa]	1152
	f_{pc} [MPa]	

Folha 4

Quadro 4.1

f'_c [MPa]	42,2
f_r [MPa]	
f'_{sp} [MPa]	4,81
E [GPa]	
$\epsilon'_c [\times 10^3]$	
ϵ_{cu}	0,0035

Folha 5

Quadro 5.1

Reinforcement

		G.1
Longitudinal	$f_{ly} [MPa]$	419
	$f_u [MPa]$	
	$E_s [MPa]$	
	$E_{sh} [MPa]$	
	ϵ_{sh}	
	ϵ_{su}	

Quadro 5.2

Reinforcement

		G.1
Transversal	$f_{ty} [MPa]$	435
	$f_u [MPa]$	
	$E_s [MPa]$	
	$E_{sh} [MPa]$	
	ϵ_{sh}	
	ϵ_{su}	

Quadro 5.3

Prestress reinforcement

		G.1
Longitudinal	$f_{pi} [MPa]$	1303
	$f_{p0,1\%} [MPa]$	1709
	$f_{pu} [MPa]$	
	$E_p [MPa]$	192400
	$\epsilon_{p0,1\%}$	
	ϵ_{pu}	0,04

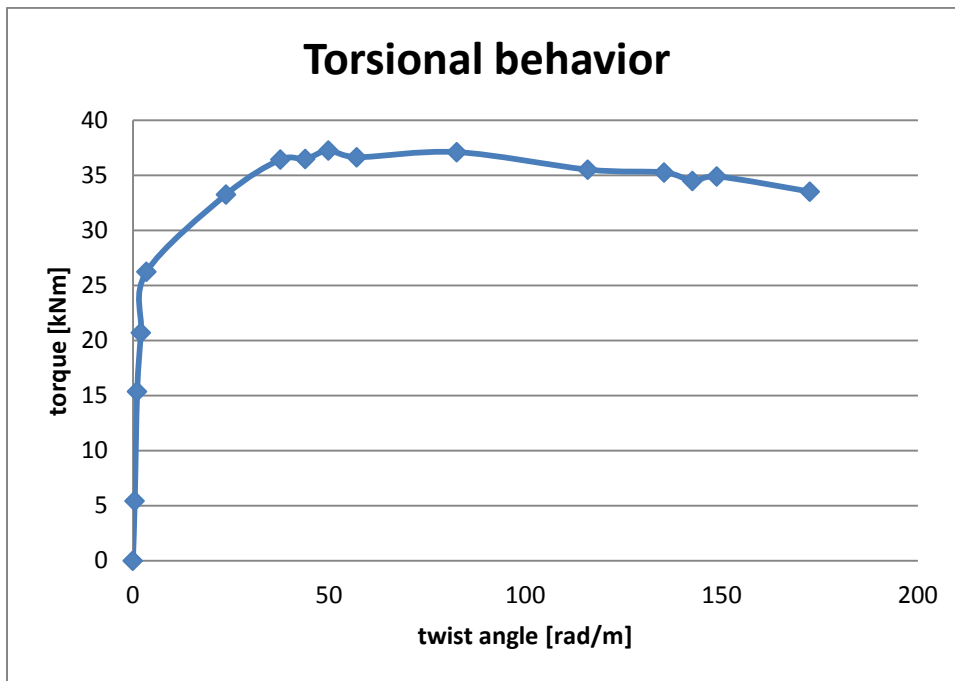
Folha 6

Quadro 6.1

no. of points:	16	
Title :	Torsional behavior	
variables	Twist angle	Torque
units	[rad/m]	[kNm]
	0	0
	0,46930402	5,426891844
	1,08352753	15,36340969
	2,06470649	20,69512658
	3,47707709	26,23400992
	23,7557994	33,24662221
	37,6049576	36,42231609

43,9401986	36,47353585
49,8334813	37,24184369
57,0527047	36,62719512
82,5410319	37,08818442
115,923541	35,50153291
135,371289	35,24543413
142,590512	34,47711479
148,778422	34,88688434
172,498785	33,50392792

Gráfico 1



Folha 7

Quadro 7.1

T_{cr} [kN.m]	27,96
θ_{Tcr}^I [rad/m]	0,005
θ_{Tcr}^{II} [rad/m]	0,005
$(GJ)^I$ (kN.m ²)	5,26
$(GJ)^{II}$ (kN.m ²)	0,233
ηT_c [kN.m]	
T_{ty} [kN.m]	
θ_{Tty} [rad/m]	
T_{ly} [kN.m]	
θ_{Tly} [rad/m]	
T_r [kN.m]	37,43

Anexo II - Ficheiro FDV para a viga 5.1

Folha 1

Quadro 1.1

nº of Keywords 3

Keywords B
HSC
T

Folha 2

Quadro 2.1

Type of document P

Quadro 2.2

No. Authors 2

Authors

Fang I-K.
Shiau J-K.

Quadro 2.3

Test references:

Country: Republic of China
Test date (year): 2004
Place: National Cheng Kung University

Test type: S
Load Tyle: T
Beam type: RPS

Quadro 2.4

Paper

Edition/Journal/Document: ACI Structural Journal
Year: 2004
Month and day: May-June
Title: Torsional Behavior of Normal and High-Streanght Concrete Beams
Vol.:
Number:
Pages: 304-313

Folha 3

Quadro 3.1

BEAM	
<i>h [cm]</i>	50
<i>b [cm]</i>	35
<i>x₁ [cm]</i>	30
<i>y₁ [cm]</i>	45
<i>t_x [cm]</i>	
<i>t_y [cm]</i>	
<i>L_{tot} [cm]</i>	310
<i>L_{test} [cm]</i>	160
<i>c [cm]</i>	2

Quadro 3.2

REINFORCEMENT		
Longitudinal	<i>no. Groups</i>	1
		G.1
	<i>Number</i>	6
	<i>Diameter [mm]</i>	16
	<i>Área [mm²]</i>	1194,00
Transverse	<i>no. Groups</i>	1
		G.1
	<i>Diameter [mm]</i>	10
	<i>s [cm]</i>	10
	<i>Área [mm²]</i>	71,00

Folha 4

Quadro 4.1

<i>f'_c [MPa]</i>	78,5
<i>f_r [MPa]</i>	
<i>f'_{sp} [MPa]</i>	
<i>E [GPa]</i>	
<i>ε'_c [x10³]</i>	
<i>ε_{cu}</i>	0,0035

Folha 5

Quadro 5.1

Reinforcement		G.1
Longitudinal	<i>f_{ly} [MPa]</i>	440
	<i>f_u [MPa]</i>	

E_s [MPa]	
E_{sh} [MPa]	
ϵ_{sh}	
ϵ_{su}	

Quadro 5.2

Reinforcement

Transversal

G.1

f_{ty} [MPa]	440
f_u [MPa]	
E_s [MPa]	
E_{sh} [MPa]	
ϵ_{sh}	
ϵ_{su}	

Folha 6

Quadro 6.1

no. Graphs 1

Graph 1

no. of points: 25

Title : Torsional behavior

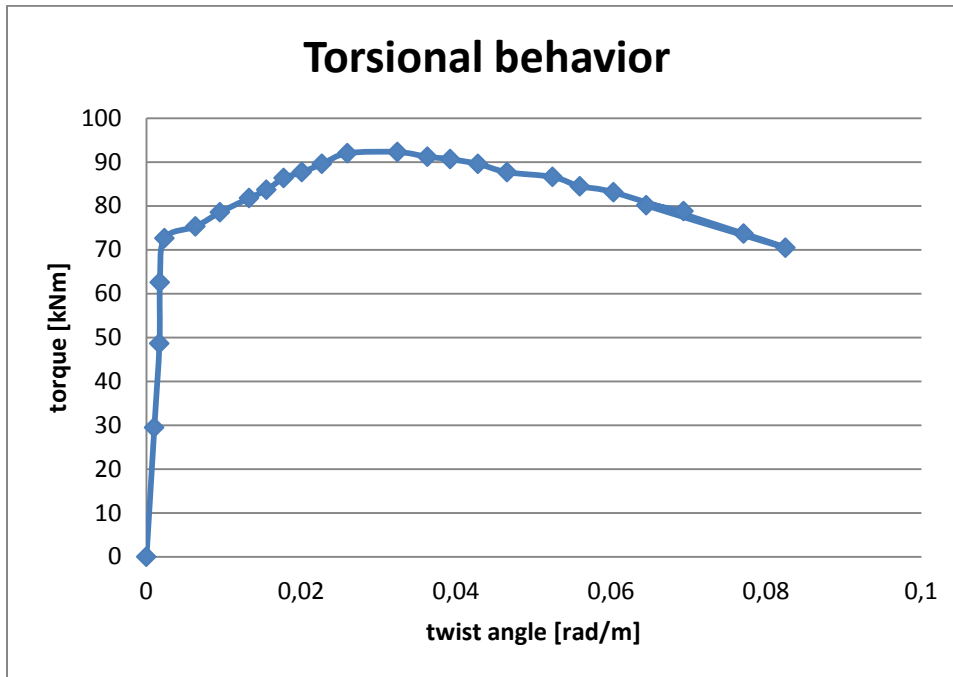
variables

units

Twist angle	Torque
[rad/m]	[kNm]
0	0
0,00101479	29,47132664
0,00167769	48,6302986
0,00173633	62,56228055
0,00234184	72,62726301
0,00633398	75,3201893
0,0095042	78,55170128
0,0132615	81,78321326
0,0154924	83,668261
0,0177233	86,36118729
0,02007161	87,70765152
0,02265476	89,59269927
0,0259424	92,0163327
0,03240026	92,28562555
0,03627498	91,20845416
0,03921037	90,66987066
0,04279428	89,57459271
0,04655158	87,68954497

0,05242236	86,61237358
0,05594483	84,45803299
0,06028922	83,11156875
0,07707966	73,68632785
0,08248078	70,45481587
0,06451618	80,14934962
0,06933022	78,80288757

Gráfico 1



Folha 7

Quadro 7.1

T_{cr} [kN.m]	70,6
$\theta_{T_{cr}}^I$ [rad/m]	0,0012
$\theta_{T_{cr}}^{II}$ [rad/m]	
$(GJ)^I$ (kN.m ²)	58,833
$(GJ)^{II}$ (kN.m ²)	860
ηT_c [kN.m]	
T_{ty} [kN.m]	79,7
$\theta_{T_{ty}}$ [rad/m]	0,0116
T_{ly} [kN.m]	79,7
$\theta_{T_{ly}}$ [rad/m]	0,0116
T_r [kN.m]	92
θ_{T_r} [rad/m]	0,0261

