

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rafael Lages Ribas

Modelação de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
Área de Conhecimento em Estruturas

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Salvador Dias
e do Professor Doutor Joaquim Barros

Dezembro de 2016

Agradecimentos

Nesta fase de conclusão do trabalho empreendido, sinto a necessidade de expressar o meu agradecimento às pessoas que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Salvador Dias, orientador da mesma, por ter acreditado nas minhas capacidades e por se ter mostrado disponível quando precisei, tendo sempre bons conselhos a dar, no momento certo, na hora certa.

Ao Professor Joaquim Barros, coorientador da minha dissertação, que me fez querer descobrir cada vez mais relativamente ao tema abordado, mostrando-se disponível quando tinha dúvidas e que, nos momentos chave, foi decisivo na resolução de dúvidas e questões.

Ao meu colega Tontrakarn Worajak, um muito obrigado por toda a sua disponibilidade, reunindo e trabalhando comigo em diversas ocasiões. Foi uma ajuda importantíssima na resolução de alguns problemas nos primeiros momentos de contacto com os softwares.

Um agradecimento especial à Ana, a minha namorada, por ter estado ao meu lado durante todo este percurso, nos momentos mais difíceis e nas alegrias, e por me ter incentivado a lutar contra as adversidades para que, com esforço e dedicação, as conseguisse ultrapassar.

Gostaria de agradecer também à minha família por todo o apoio recebido, em todos os momentos, a todas as horas. Sempre se mostraram interessados, fazendo-me acreditar que tudo iria correr bem.

Finalmente, gostaria de agradecer aos meus pais visto que, sem eles, todo este sonho não seria possível de se concretizar.

Muito obrigado.

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do tema do reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP aplicados com técnica NSM. A realização deste trabalho permitiu efetuar a modelação do comportamento de um conjunto de vigas de betão armado, reforçadas à flexão com a referida técnica de reforço, usando software de elementos finitos. Além disso, foi realizado um estudo paramétrico para avaliar a influência de um conjunto de parâmetros na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado.

Numa primeira fase foi feita uma revisão bibliográfica sobre o estado do conhecimento atual no que diz respeito ao reforço de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP, com particular destaque para a técnica NSM com laminados de CFRP. Posteriormente, procedeu-se à modelação do comportamento de um conjunto de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM, ensaiadas experimentalmente no Laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Para a referida modelação foi usado o software de elementos finitos *femix* e o *GID*. Após a calibração do modelo numérico, foi efetuado um estudo paramétrico para avaliar a influência dos seguintes parâmetros na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado: classe de resistência do betão, percentagem de armadura longitudinal existente e percentagem de reforço de CFRP. Finalmente, são apresentadas as conclusões mais importantes deste trabalho e são indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Vigas de betão armado; Reforço à flexão; Laminados de CFRP; Técnica da inserção; Comportamento experimental; Modelação numérica; Estudo paramétrico.

Abstract

The present dissertation was developed under the theme of flexural strengthening of reinforced concrete beams with CFRP laminates applied with NSM technique. The realization of this work allowed the behaviour modelling of a set of strengthened reinforced concrete beams with the referred reinforcement technique using finite element software. In addition, a parametric study was carried out to evaluate the influence of a set of parameters on the effectiveness of the NSM technique with CFRP laminates in the strengthened reinforced concrete beams. In a first phase, a bibliographical review was made on the current state of knowledge regarding the strengthened reinforced concrete beams with CFRP composite materials, with particular emphasis on the NSM technique with CFRP laminates. Later, the behaviour of a set of strengthened reinforced concrete beams with CFRP laminates applied with the NSM technique, experimentally tested in the Laboratory of Structures (LEST) of the Department of Civil Engineering of the University of Minho, was carried out. The finite element software *femix* and the software GID were used for this modelling. After calibration of the numerical model, a parametric study was carried out to evaluate the influence of the following parameters on the effectiveness of the NSM technique with CFRP laminates in the strengthening of reinforced concrete beams: concrete strength class, percentage of existing longitudinal reinforcement and percentage of CFRP strengthening. Finally, the most important conclusions of this work are presented and some suggestions for future work are indicated.

Keywords: Reinforced concrete beams; Flexural strengthening; Carbon fibre reinforced polymers (CFRP) laminates; NSM technique; Experimental behaviour; Numerical simulation; Parametric study.

Índice geral

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice geral	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de Tabelas	xix
Capítulo 1 - Introdução	
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Objetivos do trabalho	2
1.3 - Organização da dissertação	2
Capítulo 2 - Revisão bibliográfica	
2.1 - Materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado.....	5
2.1.1 - Introdução aos FRP	5
2.1.2 - Comparação entre os CFRP e o aço no reforço de estruturas de betão armado....	10
2.2 - Técnicas de reforço usando materiais compósitos de CFRP	10
2.2.1 - Técnica de colagem externa (<i>EBR Externally Bonded Reinforcement</i>).....	11
2.2.2 - Técnica de inserção de varões ou laminados de CFRP (<i>NSM Near-surface Mounted</i>)	13
2.2.3 - Comparação entre as técnicas NSM e EBR	18
2.3 - Comportamento de vigas de betão armado reforçadas com CFRP usando a técnica NSM	20
Capítulo 3 - Modelação numérica de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos – <i>GID/femix</i>	
3.1 - Introdução.....	25
3.2 - Introdução dos dados referentes às vigas no software GID (regime linear).....	26

3.2.1 - Criação dos pontos principais da viga	26
3.2.2 - Criação das superfícies e linhas de cada material.....	27
3.2.3 - Criação de <i>layers</i> para cada material	27
3.3 - Construção da malha de elementos finitos.....	28
3.3.1 - Refinamento da malha de elementos finitos	28
3.3.2 - Construção da malha de elementos finitos	32
3.4 - Atribuição das características respetivas aos elementos da malha	35
3.4.1 - Tipo de problema (<i>Problem type</i>).....	35
3.4.2 - Condições (<i>Conditions</i>)	35
3.4.2.1 - Propriedade dos elementos (<i>Element Properties</i>).....	36
3.4.2.2 - Cargas (<i>Loads</i>).....	37
3.4.2.3 - Apoios (<i>Supports</i>).....	37
3.4.3 - Materiais (<i>Materials</i>)	38
3.4.4 - Casos de carga (<i>Interval Data</i>)	40
3.4.5 - Combinações (<i>Combinations</i>)	40
3.5 - Verificação do modelo numérico em regime linear no <i>femix</i>	41
3.6 - Transformação do modelo numérico de regime linear para regime não linear	42
3.6.1 - Alteração dos parâmetros principais (<i>Main Parameters</i>).....	42
3.6.2 - Alteração das características dos materiais utilizados	42
3.6.3 - Alteração das combinações.....	47
3.6.3.1 - Alteração convencional das combinações	47
3.6.3.2 - Arc length	48
3.7 - <i>Posfemix</i> -GID	51
3.7.1 - Reações (<i>recsv</i>).....	52
3.7.2 - Deslocamentos (<i>dicsv</i>).....	53
3.7.3 - Resultados deslocamentos e reações (<i>rslpt</i>)	55

3.7.4 - Tensões (<i>sepva</i>)	55
3.7.5 - Extensões (<i>sapva</i>).....	56
3.7.6 - Histórico das extensões dos elementos finitos (<i>hdcsv</i>)	57
3.7.7 - Malha deformada (<i>dms3d</i>)	57
3.7.8 - Padrão de fendilhação (<i>cps3d</i>)	58
Capítulo 4 - Resultados Numéricos vs. Resultados experimentais e Estudos Paramétricos	
4.1- Introdução.....	61
4.2 - Resultados numéricos vs. resultados experimentais referentes às vigas testadas por Dias <i>et al.</i> (2012)	61
4.2.1 - Relação força vs. flecha a meio-vão.....	62
4.2.2 - Padrão de fendilhação final instalado nas vigas.....	64
4.2.3 - Tensões e extensões nas armaduras	67
4.2.4 - Carga de fendilhação, carga de cedência das armaduras, carga máxima e respetiva flecha a meio-vão.....	68
4.3 - Estudos paramétricos.....	70
4.3.1 - Classe de betão	71
4.3.2 - Percentagem de CFRP	77
4.3.3 - Percentagem de armadura longitudinal	80
Capítulo 5 - Considerações finais	
5.1 - Conclusões Gerais	87
5.1.1 - Modelação do comportamento de vigas de betão armado	87
5.1.2 - Estudo paramétrico.....	88
i) Influência da classe de resistência do betão.....	89
ii) Influência da percentagem de armadura longitudinal	90
iii) Influência da percentagem de CFRP	90
5.2 - Desenvolvimentos Futuros	91
Capítulo 6 - Referências bibliográficas	93

Índice de figuras

Figura 2.1 - Diferentes tipos de reforço de estruturas de betão armado.....	6
Figura 2.2 - Diagrama tensão vs.. extensão de diferentes tipos de fibras: carbono HM, carbono HS, aramida e vidro, aço convencional (A500) e cordões de aço de pré-esforço (adaptado de ACI 440R-96 (1996)).	8
Figura 2.3 - Diferentes tipos de matriz dos materiais compósitos.....	8
Figura 2.4 - Materiais compósitos de CFRP (Dias, 2008).....	9
Figura 2.5 - Comparação entre os materiais CFRP e o aço.....	10
Figura 2.6 - Aplicação da técnica EBR utilizando CFRP (Alkhrdaji, T., 2015).	11
Figura 2.7 - Procedimento da aplicação da técnica NSM utilizando CFRP (adaptado de Dias <i>et al.</i> (2012) e Dias <i>et al.</i> (2014)).	13
Figura 2.8 - Diferentes tipos de secções transversais dos CFRP para aplicações da técnica NSM.	14
Figura 2.9 - Reforço de vigas de betão armado à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP em forma de T.....	16
Figura 2.10 - Ensaio de tração uniaxial a elevadas temperaturas em laminados embebidos em resina epoxy.....	17
Figura 2.11 - Temperatura vs. força resistente do laminado de CFRP (adaptado Baolin Yu e Venkatesh Kodur, 2014).....	17
Figura 2.12 - Efeito da temperatura na resina epoxy utilizada na técnica NSM com CFRP (adaptado Baolin Yu e Venkatesh Kodur, 2014).....	17
Figura 2.13 - Comparação entre a relação temperatura vs. força resistente de laminados e varões de CFRP (adaptado Baolin Yu e Venkatesh Kodur, 2014).	18
Figura 2.14 - Vigas de betão armado reforçadas com CFRP ensaiadas à flexão por Bilotta <i>et al.</i> (2015)	19
Figura 2.15 - Secção das vigas ensaiadas por Bilotta <i>et al.</i> (2015).....	20
Figura 2.16 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço das quatro vigas ensaiadas, dimensões em milímetros (Dias <i>et al.</i> , 2012).	20

Figura 2.17 - Secções transversais das vidas ensaiadas (adaptado de Dias <i>et al.</i> , 2012).....	21
Figura 2.18 - Relação força-flecha a meio-vão das vigas ensaiadas (adaptado de Dias <i>et al.</i> , 2012).	21
Figura 2.19 - Efeito da percentagem de CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado (adaptado Dias <i>et al.</i> , 2012)...	22
Figura 3.1 - Geometria da viga S1-M testada por Dias <i>et al.</i> (2012) (dimensões em mm).	26
Figura 3.2 - Esquema estrutural usado para a modelação das vigas.	26
Figura 3.3 - Criação de pontos por coordenadas.....	26
Figura 3.4 - Criação da superfície através de pontos.	27
Figura 3.5 - Criação e associação dos <i>layers</i> aos elementos.....	28
Figura 3.6 - Graus de refinamento da malha de elementos finitos.	29
Figura 3.7 - Relação entre o número de elementos finitos da altura e o número de elementos finitos do comprimento da viga para um grau de refinamento intermédio (1:4).	32
Figura 3.8 - Seleção do número de pontos de integração dos elementos.....	33
Figura 3.9 - Construção da malha de elementos finitos.....	33
Figura 3.10 - Criação da malha de elementos finitos.....	34
Figura 3.11 - Malha de elementos finitos construída.....	35
Figura 3.12 - Tipo de software de cálculo a utilizar com software GID.....	35
Figura 3.13 - Introdução das propriedades dos elementos da malha.	36
Figura 3.14 - Visualização gráfica das propriedades dos elementos.	36
Figura 3.15 - Introdução das cargas e deslocamentos prescritos.	37
Figura 3.16 - Introdução dos apoios da estrutura.....	38
Figura 3.17 - Introdução dos materiais.	38
Figura 3.18 - Parâmetros do betão considerando comportamento linear material.....	39
Figura 3.19 - Atribuição de um material ao respetivo elemento.....	39
Figura 3.20 - Render da malha de elementos finitos com os respetivos materiais atribuídos.	40
Figura 3.21 - Introdução do caso de carga.	40

Figura 3.22 - Introdução das combinações.....	41
Figura 3.23 - Mensagem de sucesso após cálculo no <i>femix</i>	41
Figura 3.24 - Alteração dos parâmetros principais.....	42
Figura 3.25 - Alteração das características dos materiais utilizados.	42
Figura 3.26 - Parâmetros do betão em comportamento não linear material.....	43
Figura 3.27 - Diagrama de amolecimento em tração do betão (<i>tensile-softening</i>).....	43
Figura 3.28 - Parâmetros do aço e do CFRP em comportamento não linear material.	44
Figura 3.29 - Relação Força vs. flecha a meio-vão da viga S1-M considerando uma extensão de rotura igual a 0.018.....	45
Figura 3.30 - Gráfico Tensão-Extensão do CFRP para os modelos numérico.....	46
Figura 3.31 - Relação Força vs. flecha a meio-vão da viga S1-M (com simulação de deslizamento do CFRP).....	47
Figura 3.32 - Alteração das combinações.....	47
Figura 3.33 - Fenómenos de snap-through e snap-back (Azevedo <i>et al.</i> , 2006).....	48
Figura 3.34 - Utilização da função arc length.	48
Figura 3.35 - Início do tratamento de resultados no posfemix.	52
Figura 3.36 - Função recsv para cálculo de reações.	53
Figura 3.37 - Tratamento dos resultados da função recsv e dicsv no formato Excel.	53
Figura 3.38 - Relação da reação no apoio com a força aplicada.	54
Figura 3.39 - Curva força vs. flecha a meio-vão da viga de referência: numérico vs. experimental.	55
Figura 3.40 - Representação gráfica das tensões instaladas no betão da viga de referência.	56
Figura 3.41 - Representação gráfica das extensões instaladas no betão da viga de referência.....	56
Figura 3.42 - Representação gráfica da deformação da malha de elementos finitos da viga de referência.	57
Figura 3.43 - Estados das fendas (Sena Cruz, 2004).....	58

Figura 3.44 - Padrão de fendilhação experimental (em cima) e numérico (em baixo) da viga de referência.....	58
Figura 3.45 - Representação gráfica dos deslocamentos na direção y da viga de referência. .	59
Figura 4.1 - Relação força vs. flecha a meio-vão de cada uma das vigas analisadas (numérico vs.. experimental).....	63
Figura 4.2 - Relação flecha a meio-vão vs. força das 4 vigas ensaiadas numericamente e experimentalmente.	63
Figura 4.3 - Padrão de fendilhação final instalado na viga de referência.	65
Figura 4.4 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S1-M.....	65
Figura 4.5 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S2-M.....	66
Figura 4.6 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S3-M.....	66
Figura 4.7 - Tensões e extensões máximas numéricas no aço na direção x para as quatro vigas ensaiadas.	67
Figura 4.8 - Variação dos acréscimos de carga de cedência das armaduras e da carga máxima aumentando a percentagem de CFRP.	69
Figura 4.9 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C12/15.	72
Figura 4.10 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C20/25.	73
Figura 4.11 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C30/37.	73
Figura 4.12 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C40/50.	73
Figura 4.13 - Acréscimos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima resistente da viga S1-M.....	75
Figura 4.14 - Acréscimos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima resistente da viga S2-M.....	75
Figura 4.15 - Acréscimos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima resistente da viga S3-M.....	75
Figura 4.16 - Relação força vs. flecha a meio-vão para diferentes percentagens de CFRP. ...	77
Figura 4.17 - Principais resultados para cada percentagem de CFRP utilizado no reforço das vigas.	78

Figura 4.18 - Acréscimos relativos de F_{max} para as quatro vigas reforçadas com CFRP.....	79
Figura 4.19 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga de referência.....	81
Figura 4.20 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga S1-M.....	82
Figura 4.21 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga S2-M.....	82
Figura 4.22 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga S3-M.....	82
Figura 4.23 - Percentagem de acréscimos de carga de cedência de armaduras e carga máxima da viga S1-M.	84
Figura 4.24 - Percentagem de acréscimos de carga de cedência de armaduras e carga máxima da viga S2-M.	84
Figura 4.25 - Percentagem de acréscimos de carga de cedência de armaduras e carga máxima da viga S3-M.	85

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades dos AFRP, GFRP e CFRP (adaptado de Juvandes e Reis, 2012). ...	7
Tabela 2.2 - Principais resultados experimentais obtidos por Dias <i>et al.</i> (2012)	22
Tabela 3.1- Exemplo da força e do respetivo erro para o deslocamento de 10mm.....	30
Tabela 3.2 - Erro médio das malhas analisadas (%) para cada uma das fases de comportamento da viga.	30
Tabela 3.3 - Erro médio das malhas analisadas (%) considerando todas as fases de comportamento da viga	30
Tabela 3.4 - Tempo de cálculo do <i>femix</i> para cada nível de refinamento da malha.....	31
Tabela 3.5 - Número de elementos por dm^3 de cada malha.	32
Tabela 3.6. Dados da relação tensão vs. extensão do CFRP	46
Tabela 3.7 - Alteração dos incrementos para a função <i>restart</i>	51
Tabela 4.1 - Tensões e extensões máximas numéricas no aço na direção x para as quatro vigas ensaiadas.....	67
Tabela 4.2 - Carga de fendilhação, carga de cedência das armaduras e carga máxima.	68
Tabela 4.3 - Flecha a meio-vão numérica vs. experimental correspondente à carga máxima das quatro vigas.	69
Tabela 4.4 - Variação dos acréscimos de carga de cedência das armaduras e da carga máxima aumentando a percentagem de CFRP.....	69
Tabela 4.5 - Parâmetros relativos aos tipos de betão utilizados no estudo paramétrico das vigas	71
Tabela 4.6 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga de referência.	71
Tabela 4.7 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga S1-M.....	72
Tabela 4.8 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga S2-M.....	72

Tabela 4.9 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga S3-M.	72
Tabela 4.10 - Acréscimos de carga dos principais resultados avaliando a classe de betão das vigas.	74
Tabela 4.11 - Acréscimo de carga de início de fendilhação do betão das vigas em percentagem.	76
Tabela 4.12 - Acréscimo de carga cedência das armaduras das vigas em percentagem.....	76
Tabela 4.13 - Acréscimo de carga máxima resistente das vigas em percentagem.....	76
Tabela 4.14 - Principais resultados para cada percentagem de CFRP utilizado no reforço das vigas.	78
Tabela 4.15 - Dados para cálculo da armadura longitudinal mínima para a viga em estudo. .	80
Tabela 4.16 - Tensões e extensões dos varões utilizados no estudo paramétrico relativo à percentagem de armadura.	81
Tabela 4.17 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de referência.	83
Tabela 4.18 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de S1-M.....	83
Tabela 4.19 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de S2-M.....	83
Tabela 4.20 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de S3-M.....	83
Tabela 4.21 - Resultados dos acréscimos de carga obtidos para diferentes percentagens de armadura longitudinal.	84
Tabela 5.1 - Cálculo da temperatura necessária para simular a pré-tensão nos laminados de CFRP.....	92

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Considerações Gerais

A necessidade de reforçar estruturas impulsionou o desenvolvimento das técnicas de reforço com materiais de elevado desempenho, designadamente os compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer - Polímeros Reforçados com Fibras*). No âmbito do reforço de estruturas de betão armado, o FRP mais utilizado é designado por CFRP (*Carbon Fiber Reinforcement Polymer - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono*).

Os CFRP possuem características de elevado desempenho mecânico (elevada rigidez e resistência à tração), são materiais com baixo peso específico e apresentam elevada resistência à corrosão. Além disso, são materiais fornecidos com uma inúmera quantidade de soluções em termos de dimensões, verificando-se que em alguns casos existe uma enorme facilidade em se adaptarem a superfícies curvas (grande vantagem comparativamente com as soluções de reforço com chapas de aço). Uma vez que os CFRP são materiais leves e têm características mecânicas de elevado desempenho, comparativamente com os materiais de reforço tradicionais, a quantidade de material de reforço a utilizar será menor, fazendo com que as alterações a nível arquitetónico sejam também menores. Além das mencionadas vantagens, refira-se o facto de os CFRP serem facilmente transportáveis, serem de fácil e rápida aplicação e de às técnicas de reforço com CFRP estarem associados baixos custos de manutenção durante a vida útil da estrutura reforçada.

O reforço à flexão de estruturas de betão armado utilizando os materiais compósitos CFRP pode ser executado usando a técnica da colagem externa (EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) e a técnica da inserção do CFRP no betão de recobrimento (NSM - *Near Surface Mounted*). A investigação experimental realizada até ao presente tem vindo a demonstrar a melhor eficácia da técnica NSM em relação à técnica EBR. Para tal, contribui o facto de a área de colagem usando a técnica NSM ser o dobro da área de colagem usando a técnica EBR, o que proporciona um significativo aumento do grau de fixação do reforço de CFRP e, conseqüentemente, uma mobilização de tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado, mostrando que existe melhor aproveitamento das potencialidades do CFRP.

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, tem vindo a ser feita investigação no âmbito do reforço à flexão de elementos estruturais de betão usando a técnica

NSM com laminados de CFRP. A presente dissertação insere-se no seguimento desta linha de investigação.

1.2 - Objetivos do trabalho

De um modo geral, com a presente dissertação, pretende-se modelar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM), ensaiadas experimentalmente no Laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Para a referida modelação será usado o software de elementos finitos *femix* e o *GID*. Após a calibração do modelo numérico será efetuado um estudo paramétrico para avaliar a influência dos seguintes parâmetros na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado: classe de resistência do betão, percentagem de armadura longitudinal existente e percentagem de reforço de CFRP.

1.3 - Organização da dissertação

A dissertação apresentada é composta por 6 capítulos.

No Capítulo 1 (Introdução) é efetuado o enquadramento da temática da dissertação, são apresentados os objetivos a serem alcançados com a realização deste trabalho e é descrita a organização da dissertação.

No Capítulo 2 (Revisão bibliográfica) é apresentado o trabalho de pesquisa bibliográfica efetuada relativa ao tema desta dissertação. Após uma breve referência às técnicas tradicionalmente utilizadas para reforçar estruturas de betão armado, foi dado particular relevo às técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP. Assim, após uma referência a estes materiais de elevado desempenho foram apresentadas as técnicas existentes (EBR e NSM) utilizando CFRP como material de reforço, assim como as vantagens e desvantagens da utilização destas técnicas de reforço. Tendo como base investigação experimental realizada até ao presente, a parte final do capítulo é dedicado ao comportamento estrutural de vigas de betão armado reforçadas à flexão usando laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM.

No início do Capítulo 3 (Modelação numérica de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos - *GID/femix*) é apresentado todo o procedimento que conduziu à calibração do modelo numérico e modelação do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos utilizando o software de elementos finitos *femix* (Azevedo e Barros, 1998) e o *GID* (Coll *et al.*, 2016). Concretamente,

foi efetuada a modelação do comportamento de quatro vigas ensaiadas experimentalmente no Laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Dias *et al.*, 2012) que tinham previamente sido ensaiadas

Na primeira parte do Capítulo 4 (Resultados Numéricos *vs.* Resultados Experimentais e Estudo Paramétrico) é efetuada uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos numericamente em termos do comportamento estrutural das vigas anteriormente referidas. Na segunda parte deste capítulo apresentam-se os resultados de um estudo paramétrico realizado com o modelo numérico já calibrado. Neste estudo paramétrico foi avaliada a influência da classe de resistência do betão, da percentagem de armadura longitudinal existente e da percentagem de reforço de CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado.

No Capítulo 5 (Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros) são apresentadas as conclusões gerais resultantes do trabalho de investigação realizado. Neste capítulo também são apresentadas propostas para desenvolvimentos futuros.

No Capítulo 6 (Referências bibliográficas) estão apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base à realização desta dissertação.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 - Materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado

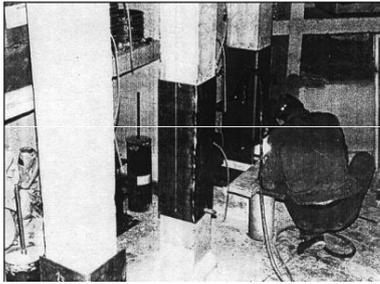
2.1.1 - Introdução aos FRP

As estruturas de betão armado, são projetadas para um período de vida útil previamente determinado, consoante o pretendido. Durante este tempo, a estrutura deve garantir níveis adequados de segurança, funcionalidade e durabilidade. No entanto, por vezes surgem situações, quer durante a fase construtiva, quer durante a fase de vida útil da estrutura, que fazem com que se tenha de aplicar um reforço para que os requisitos de segurança sejam garantidos.

Durante a fase construtiva, podem surgir situações que originem a necessidade de intervenção de reforço numa determinada estrutura: devido a erros a nível do projeto de estabilidade, devido à aplicação de materiais com características inferiores às estabelecidas pelo projetista ou a erros de execução. Quando uma estrutura se encontra na fase de vida útil, podem surgir ocorrências que ponham em causa a segurança da mesma e por conseguinte podem originar a necessidade de reforço da estrutura: ocorrência de sismos, ocorrência de ações de acidente (choques, incêndios, explosões, atos de vandalismo), modificação da função da estrutura para condições mais desfavoráveis, redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras). Também pode haver necessidade de reforçar estruturas para fazer face a novas disposições regulamentares mais severas.

Em função da deficiência estrutural, deve-se proceder à elaboração de um conjunto de procedimentos de avaliação para que o tipo de intervenção na estrutura a utilizar seja a mais adequada. Existem diferentes tipos de intervenção que usualmente são utilizados, tais como: demolição total ou parcial da estrutura; imposição de medidas restritivas no seu uso; modificação do seu sistema estrutural; substituição ou introdução de novos elementos estruturais; ou reforço de elementos estruturais. A escolha do tipo de intervenção passará naturalmente por uma análise técnica e económica. Em inúmeros casos a solução mais viável é reforço estrutural. Neste contexto, refira-se a necessidade cada vez mais crescente de reforçar estruturas de betão armado.

Dada esta emergente necessidade de reforço das estruturas de betão armado, a procura do material e da técnica de reforço “ideais” tem sido cada vez mais investigada.



a. Encamisamento metálico das secções (Júlio, E., 2012).



b. Pré-esforço exterior da Ponte da Figueira da Foz (Costa, A., 2014).

Figura 2.1 - Diferentes tipos de reforço de estruturas de betão armado.

A necessidade do reforço de estruturas de betão não é recente. Assim, foram desenvolvidas algumas técnicas de reforço estrutural utilizando o aço como material de reforço principal, nomeadamente: colagem de chapas metálicas, encamisamento das secções e aplicação de pré-esforço exterior, tal como se pode observar na Figura 2.1.

A técnica mais utilizada tem sido a colagem de chapas metálicas, cuja eficácia é condicionada pela sensibilidade do aço ao fenómeno da corrosão, o que afeta diretamente a zona de colagem da interface betão-cola-aço, fazendo com que esta se deteore relativamente rápido. Esta técnica apresenta mais uma desvantagem referente à dificuldade do manuseamento de chapas de grandes dimensões, devido ao seu elevado peso próprio.

O encamisamento metálico das secções também tem vindo a ser utilizado quando se pretende aumentar a ductilidade, a resistência e a rigidez. Como principal desvantagem desta técnica, surge o facto de se ter de aumentar consideravelmente as secções transversais e por sua vez aumenta-se as cargas permanentes. Esta técnica condiciona bastante a zona da obra durante o reforço o que também é considerado um aspeto menos positivo.

A técnica da aplicação de pré-esforço exterior é utilizada para que haja um controlo da capacidade carga assim como um controlo da deformação. Apresenta como principais desvantagens a necessidade de proteger as armaduras de pré-esforço à corrosão, do fogo e também de atos de vandalismo. É necessário elaborar sistemas de ancoragens, o que poderá criar um acréscimo de esforços nos elementos não reforçados, utilizando esta técnica.

Analisando estas três técnicas de reforço de estruturas de betão armado correntemente utilizadas, pode-se concluir que a origem da maioria dos seus aspetos negativos acima mencionados tem base na utilização do aço como material de reforço. A par da constatação dos aspetos negativos associados às técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas, foram desenvolvidos novos materiais de elevado desempenho, mais conhecidos como FRP (*Fiber Reinforcement Polymer*-polímeros reforçados com fibras).

Os materiais compósitos de FRP são compostos por fibras embebidas num material de matriz polimérica. Existem três grandes tipos de fibras nos FRP que se utilizam na Engenharia Civil, nomeadamente as de aramida (A), carbono (C) e vidro (G). Cada uma destas fibras tem o seu próprio compósito, designadamente o AFRP (Aramid Fiber Reinforcement Polymer – Polímero Reforçado com Fibras de Aramida), o CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polymer – Polímero Reforçado com Fibras de Carbono) e o GFRP (Glass Fiber Reinforcement Polymer – Polímero Reforçado com Fibras de Vidro). As fibras poder ser colocadas apenas numa direção ou em várias direções: se forem colocadas numa direção o compósito é denominado como FRP unidirecional, se forem colocadas em várias direções o compósito é denominado FRP multidirecional. No caso dos compósitos de FRP unidirecionais, a orientação unidirecional das fibras confere ao FRP a maximização da rigidez e da resistência na direção longitudinal das fibras.

Comparando os três tipos de fibras anteriormente mencionados, destacam-se as fibras de carbono porque apresentam as seguintes vantagens comparativamente às fibras de aramida e de vidro (ver Tabela 2.1 e a Figura 2.2): melhores propriedades mecânicas tais como maior rigidez (E_f) e maior resistência à tração (f_{fu}); são mais resistentes a ataques químicos; imunes de corrosão; não absorvem água. As fibras de vidro apresentam um menor custo, uma menor resistência à fadiga e um maior peso específico. As fibras de aramida apresentam maior dificuldade de moldagem, são mais sensíveis à fluência e têm baixa resistência à compressão. Considerando as vantagens das fibras de carbono, anteriormente referidas, comparativamente com os outros tipos de fibras, é de fácil compreensão o porquê de serem as mais utilizadas a nível do reforço de estruturas de betão armado. Neste contexto, o estudo efetuado na presente dissertação está direcionado para o uso de compósitos de CFRP.

Tabela 2.1 - Propriedades dos AFRP, GFRP e CFRP (adaptado de Juvandes e Reis, 2012).

Propriedades	AFRP	GFRP	CFRP
ρ (g/cm ³)	1,30 - 1,45	1,73 - 2,18	1,43 - 1,67
E_f (GPa)	40 - 125	35 - 60	100 - 580
σ_{fu} (MPa)	1000 - 2540	450 - 1600	600 - 3690
ε_{fu} (%)	1,9 - 4,4	1,2 - 3,7	0,5 - 1,7

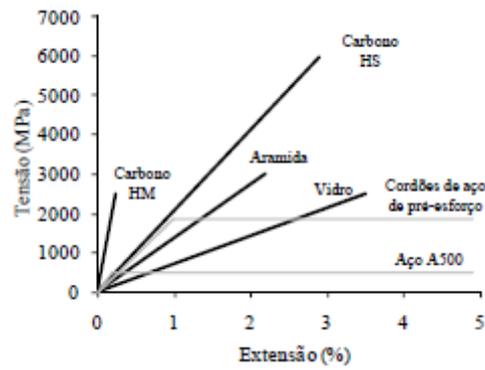


Figura 2.2 - Diagrama tensão vs. extensão de diferentes tipos de fibras: carbono HM, carbono HS, aramida e vidro, aço convencional (A500) e cordões de aço de pré-esforço (adaptado de ACI 440R-96 (1996)).

A matriz é a segunda componente dos materiais compósitos. Esta tem como principais funções garantir que as fibras funcionem em conjunto, não deixar que as fibras se danifiquem por agentes exteriores ao compósito e proteger o compósito dos fenómenos de instabilidade. Quando se trata de um material compósito, temos de ter em conta a sua matriz e o seu reforço. Tal como se pode observar na Figura 2.3, a matriz de um material compósito pode ser polimérica, cerâmica ou metálica. No caso dos FRP, a matriz é do tipo polimérica e assim os FRP são constituídos por uma matriz polimérica reforçada com fibras. A matriz polimérica dos FRP pode ser termoplástica ou termoendurecível. Caso seja termoplástica, esta quando é aquecida, funde assumindo formas específicas que mantem quando arrefecida. A matriz polimérica termoendurecível tem como vantagens: elevada aderência a outros materiais, elevada resistência mecânica; não absorve água. Deste modo, analisando as vantagens e desvantagens de ambas as matrizes, a matriz polimérica mais utilizada é a termoendurecível, mais propriamente do tipo epóxi.

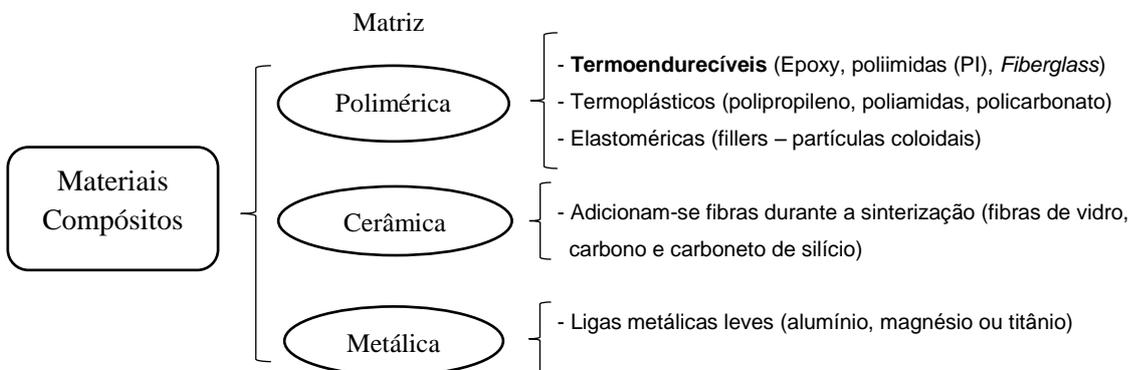


Figura 2.3 - Diferentes tipos de matriz dos materiais compósitos.

Existem dois sistemas de comercialização dos CFRP para o reforço de estruturas de betão armado: os sistemas pré-fabricados e os sistemas curados “in situ”. Os sistemas pré-fabricados são compostos por laminados e varões unidireccionais; os sistemas curados “in situ” são compostos por mantas (sistema unidirecional) ou tecidos (sistema multidirecional), tal como se pode observar na Figura 2.4.

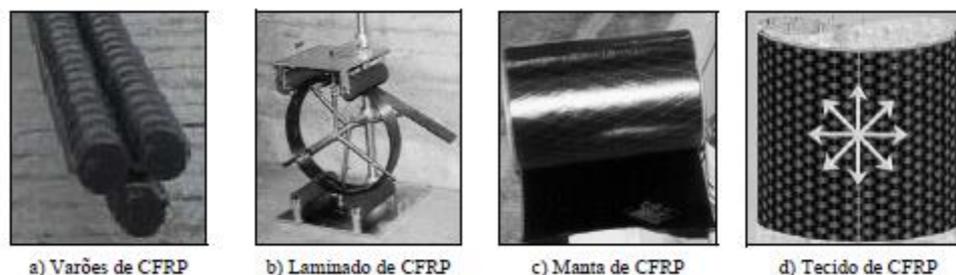


Figura 2.4 - Materiais compósitos de CFRP (Dias, 2008).

A comercialização dos CFRP é um tema que tem merecido especial atenção pois está a ser feito um esforço por forma a encontrar novas estratégias para reduzir o preço final do CFRP. Com efeito, o preço dos CFRP ainda é um entrave para a sua utilização no reforço de estruturas de betão armado. No entanto, o preço dos materiais não deve ser o único critério de escolha de uma técnica de reforço. Se for tido em conta aspetos como o baixo custo de instalação/execução associado à utilização de CFRP; facilidade de transporte e aplicação dos CFRP devido ao seu baixo peso; a necessidade de poucos elementos de suporte (andaimes) e pouca mão-de-obra “in situ” quando o reforço é feito com CFRP; baixos custos de manutenção durante vida útil em virtude dos CFRP serem materiais duráveis e imunes à corrosão. Além de todos estes fatores, acrescenta-se o facto da utilização dos CFRP estar a aumentar. Brito Junior (2011) apontou um aumento na utilização destas fibras nos próximos anos em cerca de 13% por ano, fazendo com que o preço base unitário deste diminua, enquanto que o custo do aço tem aumentando ao longo do tempo. No entanto, 51% do custo das fibras de carbono estão associadas ao custo do processo de obtenção das fibras de poliacrilonitrila (PAN), precursoras de fibras de carbono, utilizadas posteriormente no processo de pirólise (decomposição do material rico em carbono usando calor) e posteriormente na grafitização, processo este que proporciona uma “cristalização” ordenada dos cristais de carbono no interior da fibra. As fibras de carbono utilizadas estão associadas diretamente ao custo do petróleo, logo, se houver uma aposta maior nas energias renováveis e sustentáveis, o preço do petróleo irá descer visto que a procura será menor, e por sua vez, o custo da produção de fibras de carbono será menor, logo o custo final do compósito de CFRP será menor. Para que o custo das fibras de carbono baixe ainda mais,

no laboratório nacional de Oak Ridge no Tennessee (EUA), a *lignina* poderá vir a ser um precursor das fibras de carbono bastante viável visto que oferece um menor custo de produção comparativamente com ao precursor de PAN (cerca de 50% do custo da PAN), embora quando testada em laboratório, tenham tido uma menor resistência à tração, comparadas com as PAN (cerca de 4 vezes menos que a PAN). Com o avançar do tempo, o processo de fabrico das fibras de carbono será cada vez mais otimizado, fazendo com que o preço desça e se torne ainda mais competitivo relativamente ao aço e a outros materiais de reforço.

2.1.2 - Comparação entre os CFRP e o aço no reforço de estruturas de betão armado

As principais vantagens dos CFRP comparativamente ao aço no reforço de estruturas de betão armado são a elevada resistência à corrosão, o baixo peso específico e a excelente relação resistência à tração/peso específico. Relativamente à primeira vantagem, os CFRP solucionam o problema da corrosão associado às chapas de aço e as suas consequências em termos da segurança da estrutura de betão armado reforçada. O baixo peso específico dos compósitos de CFRP é outro fator que tem uma elevada importância uma vez o peso específico do CFRP é aproximadamente 20% do peso específico do aço (Figura 2.5). O baixo peso específico dos CFRP facilitam o seu transporte, manuseamento e instalação em obra, o que é uma enorme vantagem em termos económicos. Por último, o elevado valor da relação resistência à tração/peso específico o que proporciona soluções leves com elevado desempenho.

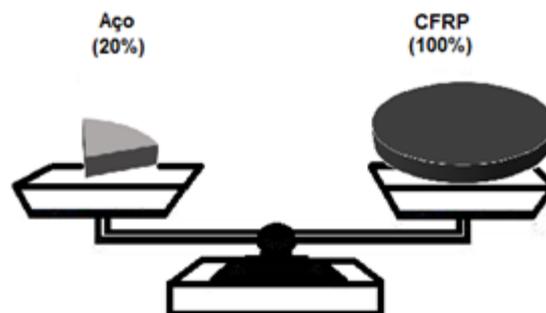


Figura 2.5 - Comparação entre os materiais CFRP e o aço.

2.2 - Técnicas de reforço usando materiais compósitos de CFRP

As técnicas de reforço usando materiais compósitos de CFRP podem-se dividir em dois grupos: colagem externa do CFRP (laminados, mantas, ...) e inserção de varões ou laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento. A primeira técnica é designada na literatura internacional por EBR (*Externally Bounded Reinforcement*), enquanto a segunda técnica é designada na literatura internacional por NSM (*Near Surface Mounted*).

2.2.1 - Técnica de colagem externa (EBR Externally Bonded Reinforcement)

A técnica de colagem externa foi a primeira a ser investigada cientificamente e a mais utilizada em termos de casos de obra (Figura 2.6). O reforço de elementos de betão armado com materiais compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR envolve as três fases seguintes (Juvandes *et al.*, 2003):

- Preparação da superfície na zona da estrutura onde o reforço será aplicado, de modo a garantir boas condições de aderência do CFRP ao betão. No sistema curado “in situ”, a superfície deve ser esmerilada. No caso do sistema pré-fabricado unidirecional, a superfície do elemento deve ser boiardada com jatos de areia ou picotada com um martelo de agulhas. Após este primeiro passo, a superfície deve ser limpa por intermédio da aplicação de ar comprimido. Em alguns sistemas de reforço é aconselhável, posteriormente às tarefas anteriormente descritas, a aplicação de uma camada de primário.
- Colagem do reforço de CFRP;
- Controlo da qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação do CFRP.

Para que o terceiro tópico seja aprovado, os dois primeiros tópicos têm de ser cumpridos com rigor. Caso haja um teor de humidade elevado na superfície do elemento a reforçar, a aderência betão-primário não será adequada e por sua vez, o reforço terá uma perda de eficiência (Juvandes *et al.*, 2003). Outro exemplo é relativamente à limpeza dos laminados, visto que caso não se utilize um desengordurante adequado (sem acetona), poderá originar uma ineficiência no reforço (Dias *et al.*, 2002).

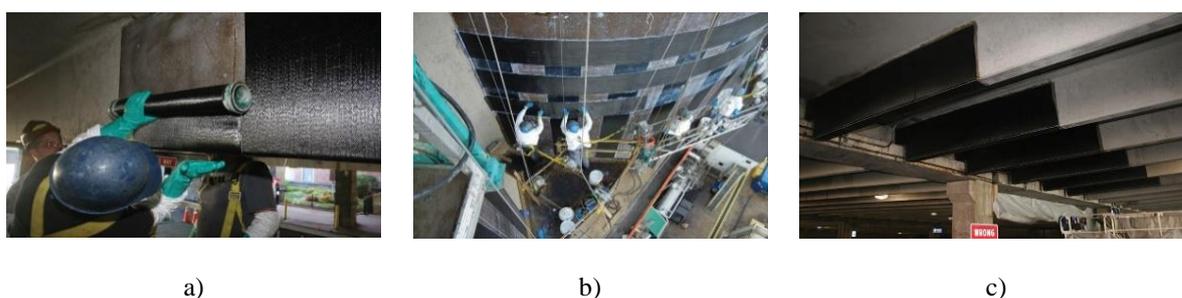


Figura 2.6 - Aplicação da técnica EBR utilizando CFRP (Alkhrdaji, T., 2015).

Existe um conjunto de medidas a serem aplicadas antes, durante e após a aplicação do reforço de CFRP, com o objetivo de minimizar os riscos de se efetuar um deficiente reforço. As medidas são as seguintes (Bettor, 2003; Carolin, 2003; Eurocomp, 1986; Juvandes, 1999 e Sika, 2001):

- Deve ser efetuada a avaliação da qualidade do betão superficial do elemento a reforçar através de ensaios de tração direta de “*pull off*”. Segundo o ACI Committee 440 (2002), para que se possa aplicar a técnica de colagem externa (EBR), o valor mínimo recomendável da resistência à tração superficial deve ser de 1.4 MPa:
- Devem ser tratadas todas as irregularidades da superfície utilizando o “*putty*” (resina de regularização de superfície);
- Após a limpeza da base de betão, o teor máximo de humidade desta não deve exceder 4%;
- Na altura da aplicação do reforço a humidade relativa da superfície de betão não deve ser superior a 80%;
- A temperatura do ar deve ser, no mínimo, de 10°C e superior, em 3°C, à temperatura que origina a formação de orvalho;
- É recomendado a fixação de um limite superior para a amplitude térmica esperada numa aplicação normal da construção (T_c) de valor igual ao da temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas ou dos adesivos, reduzido de 10°C a 20°C [$T_c \cong T_g - 10^\circ\text{C}$ (a 20°C)];
- A mistura da resina e do endurecedor, fornecidas pelo fabricante, devem ser efetuadas, cumprindo com as especificações técnicas a nível de dosagens e do modo de mistura;
- Deve-se cumprir o tempo prático de utilização (*pot-life*) dos adesivos e das resinas. O *Pot-life* corresponde ao tempo que demora uma mistura a duplicar a sua viscosidade ou o quadruplo, no caso de materiais com pouca viscosidade. O tempo começa a ser contado a partir do momento que o produto é misturado;
- Quando são aplicados os sistemas de manta, deve-se ter em atenção o alinhamento das fibras e deve-se evitar a formação de bolhas de ar;
- Após a colagem do laminado, deve-se verificar, aplicando pancadas suaves, que não existem vazios entre o laminado e o adesivo;
- Para que se proteja a matriz da ação dos raios ultravioletas, deve-se pintar o reforço com tintas adequadas ao efeito pretendido.

2.2.2 - Técnica de inserção de varões ou laminados de CFRP (NSM Near-surface Mounted)

No passado, a técnica NSM já foi utilizada, mas em vez de se utilizar laminados ou varões de CFRP, utilizavam-se varões de aço (Asplund, 1949). O facto de os CFRP serem resistentes à corrosão permite que os entalhes tenham profundidades inferiores às necessárias para o caso dos varões de aço, o que facilita a instalação dos laminados, diminuindo também o risco de interferir com as armaduras existentes para a aplicação da técnica NSM com CFRP (Figura 2.7 no caso do reforço à flexão de uma viga de betão armado), o procedimento a cumprir é o seguinte (Dias, 2008):

- Execução do entalhe na face do elemento a reforçar;
- Limpeza do entalhe efetuado com a aplicação de ar comprimido;
- Corte do CFRP e posteriormente limpeza deste com acetona;
- Produção do adesivo epoxy seguindo os procedimentos do fornecedor;
- Preenchimento do entalhe com adesivo;
- Aplicação do adesivo também nas faces do CFRP para que haja uma colagem homogénea;
- Introdução do CFRP no entalhe, retirando o adesivo em excesso.

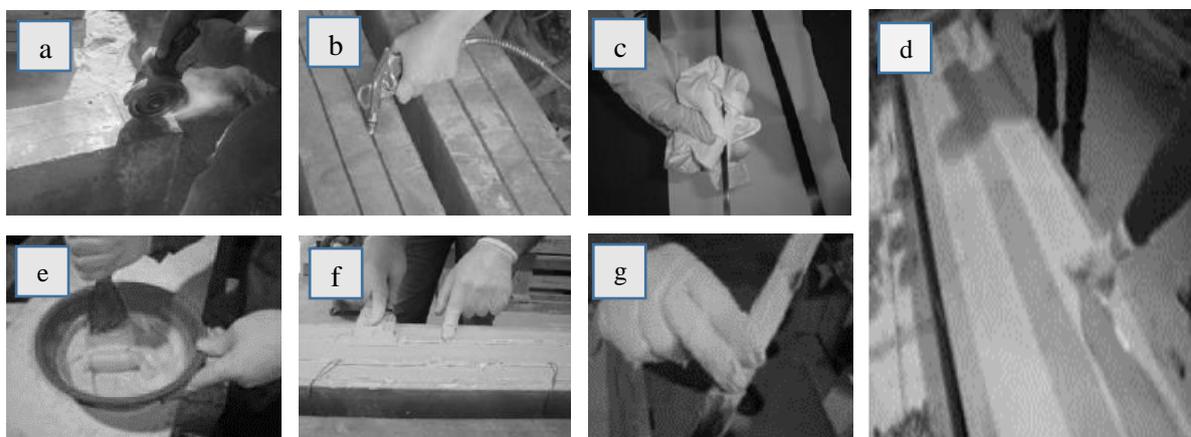


Figura 2.7 - Procedimento da aplicação da técnica NSM utilizando CFRP (adaptado de Dias *et al.* (2012) e Dias *et al.* (2014)).

As secções transversais dos CFRP mais utilizadas no reforço de estruturas de betão armado com a técnica NSM são as seguintes (Figura 2.8): circular (varões nervurados ou varões com superfície rugosa), quadrada e retangular (laminados com umas das dimensões bastante maior que a outra).

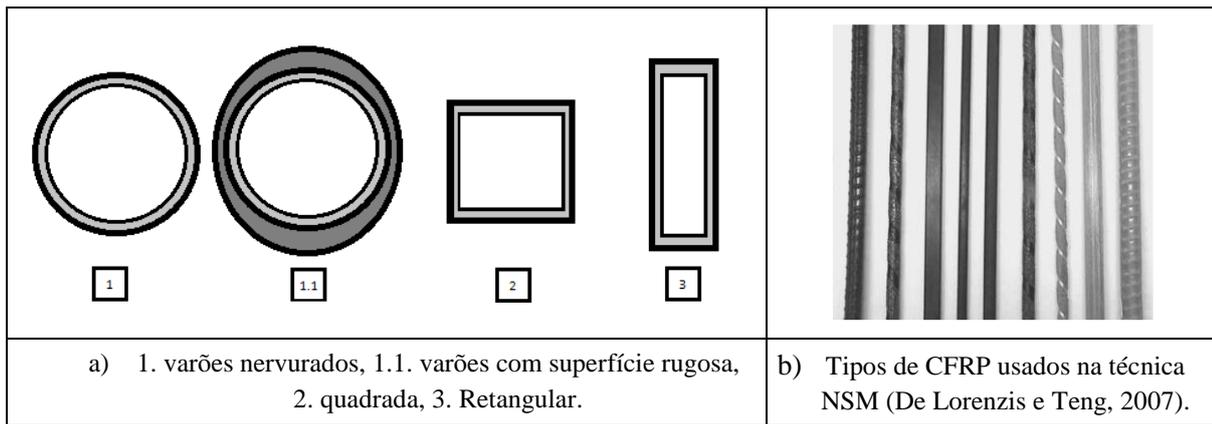


Figura 2.8 - Diferentes tipos de secções transversais dos CFRP para aplicações da técnica NSM.

El-Hacha e Rizkalla (2004), após o seu estudo e investigação, depararam-se com um problema visto que demasiadas vigas reforçadas com varões de CFRP, quando ensaiadas à flexão, sofriam roturas por deslizamento ou deslocamento dos varões de CFRP em contacto com o betão de recobrimento. Com os valores obtidos destas experiências, concluíram que seria pouco o aproveitamento em reforçar vigas de betão armado com varões de CFRP e não de aço. Foi então que decidiram ensaiar em vigas de betão armado, laminados de CFRP em substituição dos varões de CFRP. Após efetuarem os ensaios laboratoriais e ser retiradas a devidas conclusões, a solução mais eficaz para os autores foram os laminados. As principais justificações que apresentaram foram que, com os laminados, houve um maior aproveitamento do material de reforço e o descolamento/deslizamento dos laminados CFRP acontecia para um valor de tensão máxima de rotura superior aos dos varões. Isto deveu-se ao facto da área de colagem dos varões ser baixa comparativamente à área de colagem dos laminados com o entalhe feito previamente à medida da secção transversal do compósito. Logo, conclui-se que mesmo que possa exigir uma profundidade maior do betão de recobrimento, a forma geométrica dos laminados CFRP é a mais indicada para que haja um melhor aproveitamento da técnica NSM numa estrutura de betão armado.

Os parâmetros que condicionam a eficiência do reforço de estruturas de betão usando a técnica NSM são a geometria do elemento a reforçar, a percentagem de armadura longitudinal, a percentagem de CFRP, a classe de resistência do betão, o tipo de carregamento da estrutura a reforçar, o espaçamento entre laminados CFRP adjacentes e a distância do laminado à face do elemento a reforçar. Alguns destes parâmetros e respetiva influência na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado serão objeto de análise no âmbito do quarto capítulo desta dissertação.

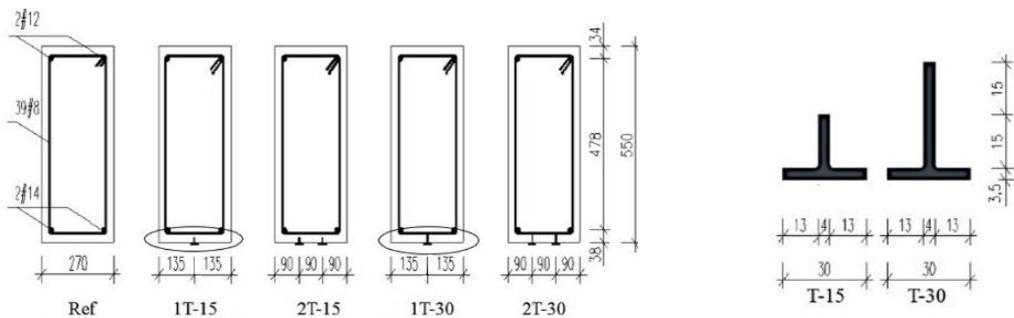
Kotynia e Cholostiakow (2015) investigaram sobre a eficácia do uso de laminados com secção em forma de “T”. Nesta investigação foram ensaiadas 9 vigas de betão armado com dimensões 270mm×550mm×4000mm (largura da secção transversal × altura da secção transversal × comprimento das vigas), tendo como armadura longitudinal dois varões de 12mm (2φ12) e dois varões de 14mm (2φ14), respetivamente, em termos de armadura de compressão e de tração. A nível de estribos foram utilizados varões de 8mm espaçados de 100 mm e de 200 mm, respetivamente, perto dos apoios e nos 1200mm centrais da viga. Após a análise dos resultados obtidos, foram retiradas algumas conclusões: i) existiram aumentos de 86% até 250% na capacidade de carga máxima das vigas reforçadas com laminados de CFRP, comparativamente com a viga de referência; ii) quanto mais profundo foi colocado o laminado em T, maior foi a extensão do CFRP e maior foi também a resistência ao deslizamento/descolamento do laminado; iii) quanto maior a percentagem de CFRP utilizado no reforço de uma viga de betão armado, maior foi o acréscimo da capacidade de carga máxima, mas em contrapartida, menor foi a extensão do CFRP.

Um ano mais tarde, Rezazadeh *et al.* (2016), publicaram um artigo com o intuito de fornecer um acréscimo de informação da aplicação da técnica NSM utilizando CFRP para reforço de estruturas de betão armado com laminados em forma de T. Estes autores ensaiaram à flexão cinco vigas de betão armado (Ref, 1T-15, 2T-15, 1T-30, 2T-30), tal como se pode observar na Figura 2.9. Nas vigas 1T-30 e 2T-30 foram cortados os ramos inferiores dos estribos das vigas, para que fosse possível inserir os perfis de CFRP no betão de recobrimento, visto que este não tinha altura suficiente relativamente à altura dos laminados. Após a realização destes ensaios foi possível avançar com algumas conclusões relacionadas com esta nova vertente da aplicação da técnica NSM: i) os perfis de CFRP adotados aumentaram substancialmente a capacidade de carga máxima das vigas de betão armado, variando esse aumento entre os 114,6% e 252,01% comparativamente à viga de referência; ii) aumentando o número de laminados de CFRP em forma de T, a carga máxima e a rigidez da viga aumentaram, enquanto que o nível máximo de extensão instalado nos perfis de CFRP diminuiu; iii) quanto maior for a alma dos laminados de CFRP em forma de T (Figura 2.9b), maior é a extensão máxima no CFRP e a capacidade máxima resistente das vigas, confirmando desta forma algo que tinha sido concluído no âmbito do estudo desenvolvido por Kotynia e Cholostiakow (2015).

O modo de rotura mais comum das vigas reforçadas com CFRP foi o destacamento dos laminados de CFRP em forma de T do betão de recobrimento da viga; O corte dos estribos

inferiores na zona da colocação dos laminados em T (1T-30 e 2T-30) não afetou a capacidade de carga máxima nem a deformabilidade da viga reforçada.

De acordo com Kotynia e Cholostiakow (2015) e Rezazadeh et al. (2016) esta técnica poderá vir a ser uma excelente alternativa no que respeita as técnicas de reforço estrutural à flexão com laminados de CFRP.



a. Vigas reforçadas com laminados de CFRP em forma de T aplicados com a técnica NSM (unidades em mm)

b. Detalhe dos laminados de CFRP em forma de T

Figura 2.9 - Reforço de vigas de betão armado à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP em forma de T.

A investigação sobre o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP usando a técnica NSM quando sujeitas a elevadas temperaturas é ainda reduzida, apesar de ser crucial importância. Segundo Barnes e Fidell (2006), a temperatura de transição vítrea do adesivo de ligação betão/CFRP é de 50 a 60 graus Celcius, o que indica que na presença de altas temperaturas associadas por exemplo a um incêndio, rapidamente estes valores são alcançados pondo em causa a ligação betão/CFRP. Baolin Yu e Venkatesh Kodur (2014) avaliaram o efeito da temperatura nas propriedades de resistência e rigidez de CFRP aplicados com técnica NSM. Foram testados 13 laminados e 12 varões de CFRP à tração uniaxial em ambiente de elevadas temperaturas. Estes ensaios visaram também o estudo da resina epoxy utilizada na técnica NSM como material de colagem (Figura 2.10), com o intuito de se saber o efeito das temperaturas nesta, isto é, de verificar as alterações das características mecânicas da resina epoxy ao longo do aumento progressivo da temperatura. Com estes ensaios foi possível concluir que a resina fica intacta até aos 200°C, enquanto que os laminados de CFRP já apresentam cerca de 80% da resistência a tração inicial. Aproximadamente aos 305°C foi atingida a temperatura crítica na qual os laminados perdem aproximadamente 50% da sua capacidade resistente à tração (Figura 2.11).



Figura 2.10 - Ensaio de tração uniaxial a elevadas temperaturas em laminados embebidos em resina epoxy.

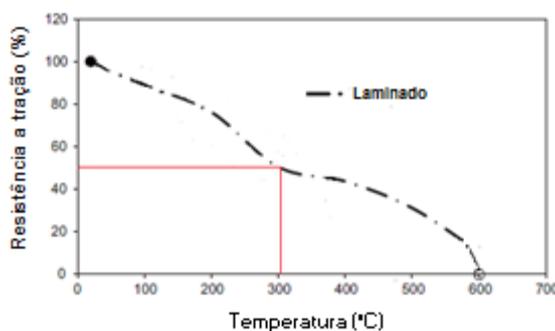


Figura 2.11 - Temperatura vs. força resistente do laminado de CFRP (adaptado Baolin Yu e Venkatesh Kodur, 2014).

Entre os 300°C e os 400°C, a resina polimérica começou a decompor-se. Dos 400°C até aos 600°C, apenas as fibras individuais contribuem para a carga resistente do laminado, atingindo os 10% da resistência à tração inicial, começando as fibras de carbono a oxidar. A partir dos 400°C já não existe qualquer resina epoxy na estrutura, visto que esta evaporou por completo, como se pode analisar na Figura 2.12.

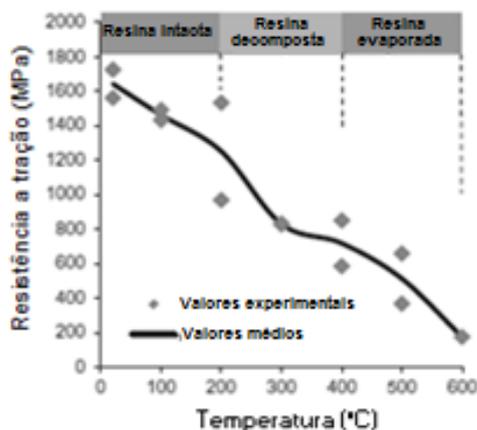


Figura 2.12 - Efeito da temperatura na resina epoxy utilizada na técnica NSM com CFRP (adaptado Baolin Yu e Venkatesh Kodur, 2014).

Neste estudo foram também testados e posteriormente comparados os laminados com os varões de CFRP. Observando a Figura 2.13, o comportamento dos laminados e dos varões de CFRP é muito semelhante, verificando-se que a temperatura crítica de ambos diferiu apenas 25°C (a temperatura crítica dos laminados foi 305°C e a dos varões foi 330°C). Ambos os elementos de reforço de CFRP apresentaram uma relação linear entre a tensão e extensão em ambiente de elevadas temperaturas. No entanto, a extensão última destes perfis de CFRP decresce com o aumento da temperatura, o que é o oposto do que acontece num ambiente semelhante de elevadas temperaturas, de um reforço estrutural utilizando aço.

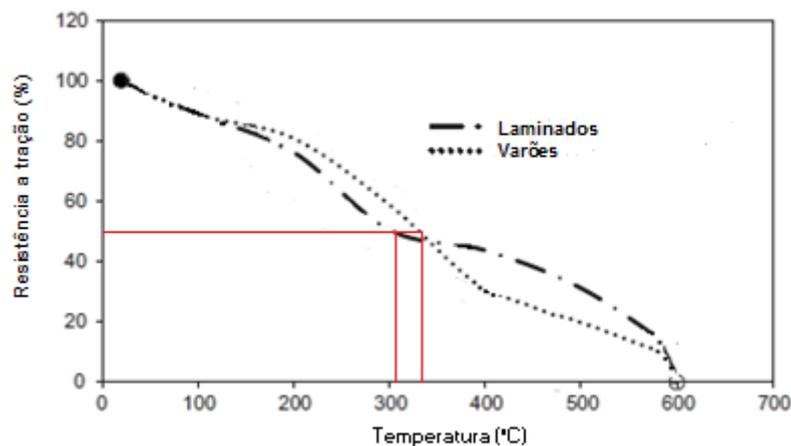


Figura 2.13 - Comparação entre a relação temperatura vs. força resistente de laminados e varões de CFRP (adaptado Baolin Yu e Venkatesh Kodur, 2014).

2.2.3 - Comparação entre as técnicas NSM e EBR

Para que exista uma melhor percepção das limitações de cada técnica usada no reforço de estruturas de betão armado, serão descritas as principais vantagens da técnica NSM comparativamente com a técnica EBR:

- A técnica NSM não requer qualquer tipo de preparação da superfície, apenas é necessário proceder à abertura dos entalhes no betão de recobrimento. Pelo facto do reforço estar inserido e não colado à superfície aumenta a probabilidade do betão que está em contacto com o laminado ser de melhor qualidade;
- Menor risco de descolagem do reforço atendendo ao maior grau de fixação do reforço de CFRP. O laminado do reforço, usando a técnica NSM, tem o dobro da área de colagem comparativamente ao laminado da técnica EBR, o que faz com que o grau de fixação do laminado (NSM) aumente significativamente;
- Facilidade na ancoragem dos CFRP aos elementos estruturais adjacentes (de forma a prevenir a ocorrência de roturas prematuras);

- Facilidade na aplicação de pré-esforço aos CFRP;
- Menor exposição às ações mecânicas, desgaste e impacto;
- Maior proteção ao fogo (maior resistência a elevadas temperaturas);
- Maior proteção a atos de vandalismo;
- Esteticamente, a estrutura reforçada não é afetada visualmente, quando tem os CFRP inseridos nos entalhes contrariamente ao que acontece com o reforço aplicado com a técnica EBR;
- Solução de reforço mais adequada para reforçar estruturas de betão armado em termos de momentos negativos;

Apesar das vantagens anteriormente mencionadas da técnica NSM em relação à técnica EBR, um aspeto importante que deve ser tido em consideração na utilização da técnica NSM está relacionado com a espessura do betão de recobrimento, visto que aos entalhes destinados à inserção dos laminados de CFRP podem estar associadas profundidades que podem colidir com o posicionamento das armaduras existentes na estrutura a reforçar.

A investigação experimental realizada até ao presente tem vindo a demonstrar a melhor eficácia da técnica NSM em relação à técnica EBR. Neste contexto, refira-se o estudo realizado por Bilotta *et al.* (2015) no qual foram ensaiadas 10 vigas de betão armado (duas vigas de referência sem reforço, 4 vigas reforçadas utilizando a técnica EBR e 4 vigas reforçadas utilizando a técnica NSM), com 160mm de altura, 120 mm de largura e 2400mm de comprimento. Relativamente à armadura longitudinal, foram reforçadas com 2 ϕ 10 para a armadura de compressão e 2 ϕ 10 para a armadura de tração. A armadura transversal era composta por ϕ 6, espaçados de 200mm (Figura 2.14)

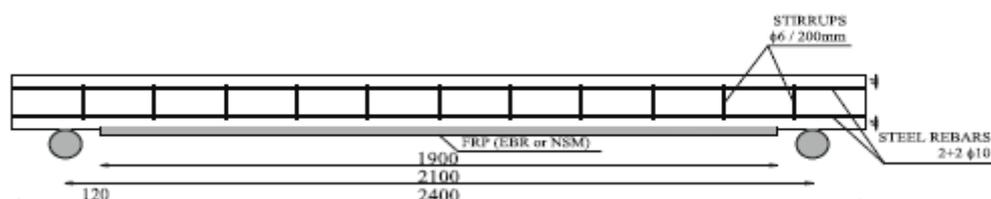


Figura 2.14 - Vigas de betão armado reforçadas com CFRP ensaiadas à flexão por Bilotta *et al.* (2015).

Nas vigas reforçadas com CFRP aplicando a técnica EBR, foram coladas chapas de 40mm de largura e 1.4 mm de altura na face tracionada das vigas (Figura 2.15^a). Nas quatro vigas reforçadas com CFRP, aplicando a técnica NSM, duas tinham 2 laminados (Figura 2.15b) e as outras duas tinham 3 laminados de CFRP (Figura 2.15c). Estes laminados com 10mm de altura e 1.4mm de largura foram inseridos em entalhes de 15mm de altura e 5mm de largura.

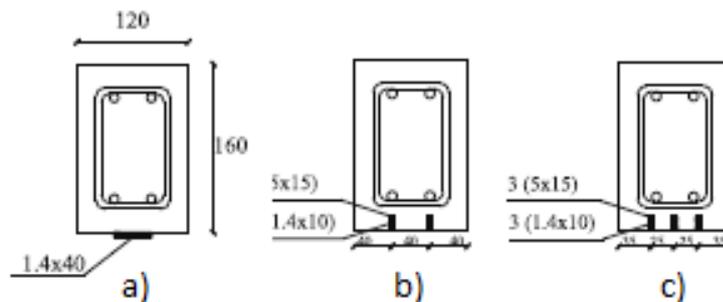


Figura 2.15 - Secção das vigas ensaiadas por Bilotta *et al.* (2015).

Após o ensaio das vigas acima mencionadas, foram possíveis retirar as seguintes conclusões:

- Os laminados de CRFP utilizados na técnica NSM são menos suscetíveis ao modo de rotura por destacamento dos CFRP do que utilizando a técnica EBR com as chapas de CFRP;
- Os laminados de CFRP (quando são aplicados apenas 2 laminados) são menos eficazes no aumento da rigidez das vigas de betão armado do que as chapas utilizadas com a técnica EBR;

2.3 - Comportamento de vigas de betão armado reforçadas com CFRP usando a técnica NSM

Nesta seção é descrito o programa experimental realizado por Dias *et al.* (2012) com o objetivo de avaliar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. No total foram ensaiadas 4 vigas, uma de referência sem CFRP e três reforçadas com percentagens diferentes de CFRP (reforço com um laminado, com dois laminados e com três laminados). As vigas apresentavam 2600mm de comprimento e secção transversal retangular de 150×300mm². Foram utilizados para a armadura longitudinal de compressão dois varões de aço nervurado com 8mm de diâmetro (2φ8) e para a armadura longitudinal de tração dois varões de aço nervurado com 10mm de diâmetro (2φ10). Desta forma, as vigas continham uma percentagem de armadura longitudinal de tração de 0,38%. Relativamente aos estribos, foram colados estribos verticais (2ramos) com varões de aço nervurado de 6mm de diâmetro espaçados de 75mm (φ6//75). Na Figura 2.16 apresenta-se a geometria, o tipo de ensaio e as armaduras aplicadas às quatro vigas que foram ensaiadas.

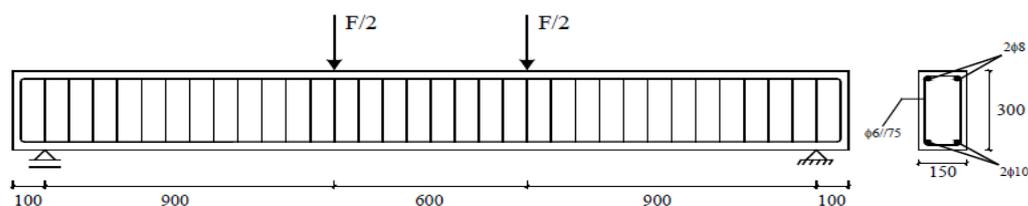


Figura 2.16 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço das quatro vigas ensaiadas, dimensões em milímetros (Dias *et al.*, 2012).

As três vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento foram designadas por S1-M, S2-M e S3-M, sendo reforçadas com um laminado, dois laminados e três laminados, respetivamente, de acordo com o representado na Figura 2.17. Estes laminados apresentavam uma secção transversal de dimensões $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ e tinham um comprimento de 2300mm. A extensão de rotura destes laminados foi estimada no valor de 18%.

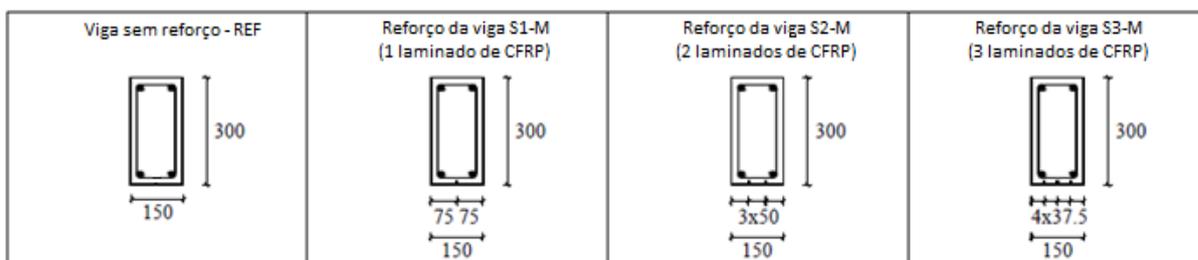


Figura 2.17 - Secções transversais das vigas ensaiadas (adaptado de Dias *et al.*, 2012).

As vigas foram ensaiadas até à rotura com um carregamento monotónico. Na Figura 2.18 apresenta-se a relação força vs. flecha a meio-vão das quatro vigas ensaiadas. Comparativamente com a viga de referência, as vigas reforçadas tinham maior rigidez, maior carga correspondente à cedência das armaduras e maior carga máxima. As vigas reforçadas com laminados de CFRP apresentam três fases principais de comportamento: 1) betão fendilhado; 2) betão fendilhado com o aço não plastificado; 3) betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais. Analisando a Figura 2.18, pode-se verificar também que, após a cedência das armaduras, o aumento da capacidade resistente das vigas reforçadas é aproximadamente linear, o que se deve ao comportamento linear elástico dos CFRP. Quanto maior a percentagem de CFRP, maior rigidez apresentaram as vigas após a cedência das armaduras.

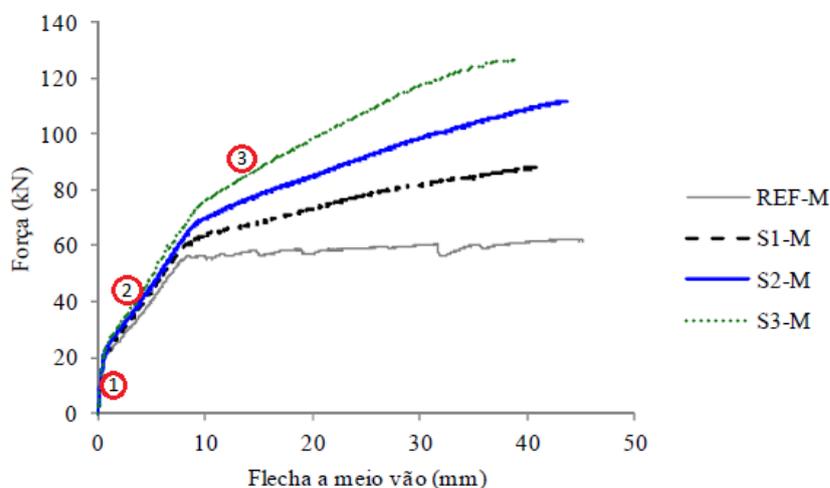


Figura 2.18 - Relação força-flecha a meio-vão das vigas ensaiadas (adaptado de Dias *et al.*, 2012).

De acordo com os resultados dos ensaios, com o aumento do número de laminados inseridos, os acréscimos em termos de carga de início de fendilhação do betão (4 %, 10 % e 19% respetivamente, para as vigas reforçadas com 1, 2 e 3 laminados), carga correspondente à cedência das armaduras (10%, 23%, 34% respetivamente, para as vigas reforçadas com 1, 2 e 3 laminados) e carga máxima resistente (42%, 80% e 103% respetivamente, para as vigas reforçadas com 1, 2 e 3 laminados) também aumentaram. A solução de reforço com três laminados (S3-M) permitiu a duplicação da carga máxima da viga de referência (103% superior) (Tabela 2.2). Dos vários acréscimos anteriormente referidos em termos de carga, foi o referente à carga máxima onde se verificaram maiores valores (Figura 2.19).

Tabela 2.2 - Principais resultados experimentais obtidos por Dias *et al.* (2012).

Viga	F_{cr} (kN)	ΔF_{cr} (%)	F_{sy} (kN)	ΔF_{sy} (%)	F_{max} (kN)	ΔF_{max} (%)	u_{Fmax} (mm)
Referência	20.10	-	56.60	-	62.30	-	45.1
S1-M	21.00	4	62.40	10	88.40	42	41.20
S2-M	22.20	10	69.50	23	111.90	80	43.6
S3-M	24.00	19	76.00	34	126.60	103	38.9

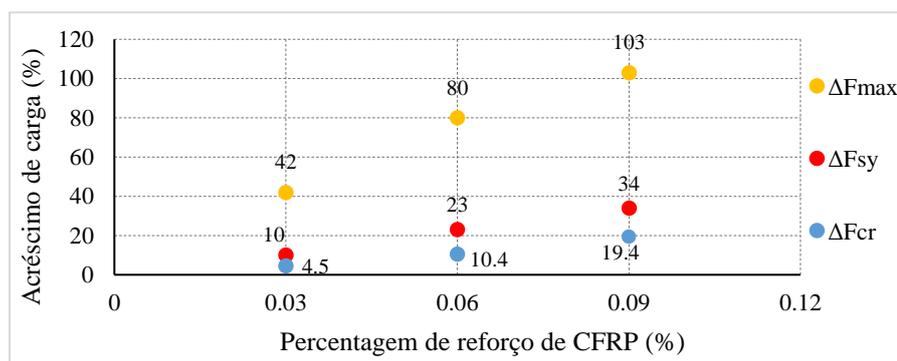


Figura 2.19 - Efeito da percentagem de CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado (adaptado Dias *et al.*, 2012).

Em termos de flecha a meio-vão, as vigas reforçadas com laminados tiveram uma flecha menor comparativamente a viga de referência (Ref-M). O valor da flecha a meio-vão referente à carga máxima das vigas reforçadas com laminados de CFRP, variou entre os 86% e 97% do valor da flecha a meio-vão associada à carga máxima da viga de referência. O modo de rotura da viga de referência foi por esmagamento do betão na zona comprimida após cedência das armaduras longitudinais. A viga reforçada apenas por um laminado de CFRP (S1-M) teve como modo de rotura o esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP, atingindo um valor para extensão máxima do laminado de CFRP de 17.9 %. Nas restantes vigas S2-M e S3-M, o modo de rotura registado foi o destacamento do CFRP do betão de recobrimento, sendo o valor da

extensão máxima registada para os laminados de CFRP de 17.4 ‰ e 14.9 ‰, respetivamente. Em termos médios, o valor da referida extensão máxima para as três vigas foi de 16,7 ‰, o que correspondeu a um grau de mobilização médio do reforço de 93%. Analisando estes valores, é possível concluir que o reforço de vigas de betão armado com CFRP, usando a técnica NSM tem um elevado nível de aproveitamento das capacidades resistentes dos CFRP.

Este estudo será abordado novamente no âmbito do trabalho realizado nos capítulos 3 e 4 desta dissertação.

Capítulo 3

Modelação numérica de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos – *GID/femix*

3.1 - Introdução

A calibração de um modelo numérico a partir de resultados de ensaios experimentais efetuados (por exemplo: ensaios em vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM), permite que, posteriormente, se possam efetuar estudos por intermédio de ensaios numéricos, obtendo resultados, para o exemplo anteriormente referido, como a relação força aplicada *vs.* flecha a meio-vão, o padrão de fendilhação, deslocamentos, reações, extensões e tensões nos materiais, entre outros. Desta forma, tendo como base o comportamento experimental de um determinado conjunto de modelos, é possível, de uma forma mais rápida e económica, prever o comportamento de modelos semelhantes, variando um conjunto de parâmetros (estudos paramétricos) que não foram considerados na experimentação já realizada. Assim, numa primeira fase, é indispensável proceder à calibração do modelo numérico tendo como base os resultados obtidos em investigação experimental anteriormente realizada. Uma vez calibrado o modelo numérico, podem então ser feitos os referidos estudos paramétricos. O presente capítulo destina-se à descrição detalhada do faseamento da calibração do modelo numérico assim como a obtenção de resultados através dos softwares *femix/posfemix* e *GID*. Neste contexto foi efetuada a modelação numérica do comportamento das quatro vigas ensaiadas experimentalmente por Dias et al. (2012), que foram apresentadas no Capítulo 2 desta dissertação (viga REF, S1-M, S2-M e S3.M). Os softwares utilizados neste capítulo foram o *prefemix*, o *femix*, o *posfemix* e o *GID*. O programa *prefemix* lê um ficheiro de dados de extensão *_gl.dat*, verifica a informação nele contida e escreve os dados num ficheiro não formatado com uma extensão *_gl.bin*. O programa *femix* lê o ficheiro de extensão *_gl.bin* e calcula a estrutura. O programa *posfemix* tem como potencialidades o pós-processamento dos dados e resultados. O software *GID* inicialmente faz o “preenchimento” do ficheiro de dados de extensão *_gl.dat*, quando são introduzidas todas as características das vigas assim como da sua malha de elementos finitos, e, posteriormente, lê os resultados obtidos no pós-processamento efetuado pelo *posfemix* de forma gráfica e bastante intuitiva. A viga utilizada como exemplo para descrever o faseamento usado na modelação das vigas foi a viga de betão armado reforçada à flexão com um laminado de CFRP (viga S1-M) que se encontra

representada na Figura 3.1. Atendendo à simetria da estrutura em análise, na modelação das vigas foi apenas considerada metade da estrutura de acordo com o representado na Figura 3.2.

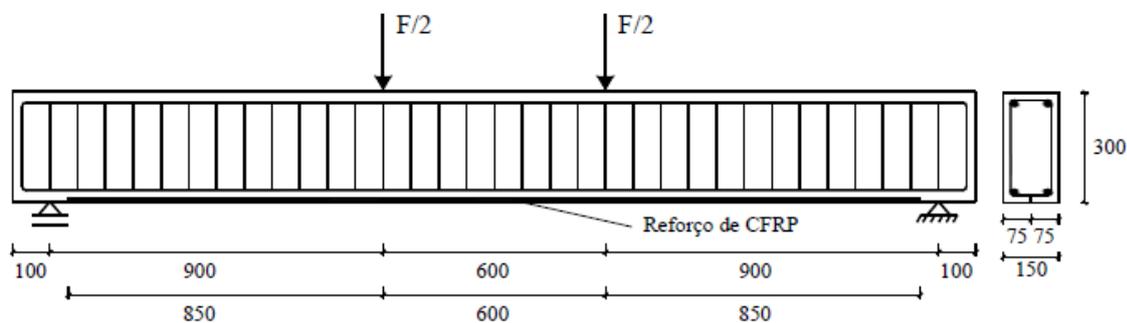


Figura 3.1 - Geometria da viga S1-M testada por Dias *et al.* (2012) (dimensões em mm).

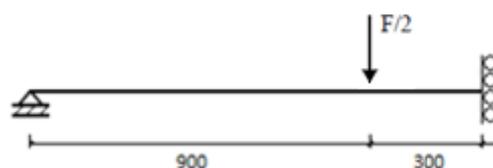


Figura 3.2 - Esquema estrutural usado para a modelação das vigas.

3.2 - Introdução dos dados referentes às vigas no software *GID* (regime linear)

Para efetuar a introdução dos dados relativos aos elementos em estudo, é necessário introduzir-se as coordenadas de x e y (Figura 3.3a e 3.3b), referentes aos vértices da geometria da viga, assim como os pontos de interceção das armaduras transversais com as armaduras longitudinais. Uma vez definidos os pontos principais da geometria da viga, irão ser criadas superfícies relativas ao betão e linhas relativas as armaduras (tópico 3.1.2).

3.2.1 - Criação dos pontos principais da viga

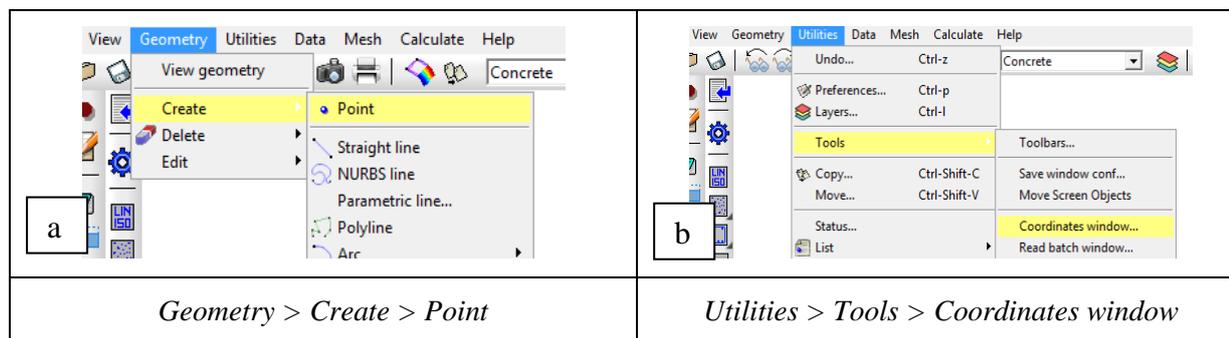


Figura 3.3 - Criação de pontos por coordenadas.

3.2.2 - Criação das superfícies e linhas de cada material

Em relação à criação das superfícies do betão, são selecionadas áreas compostas por quatro pontos (Figura 3.4b), de modo a criar uma superfície retangular, delimitada pelos 4 pontos selecionados. Na Figura 3.4a pode-se observar a localização no software GID do comando para a realização desta tarefa (Geometry > Create > NURBS Surface > By Points). É de referir que não é necessário criar linhas referentes à geometria do betão, pois estas serão criadas automaticamente com as superfícies. Assim, apenas é necessário criar as linhas referentes às armaduras longitudinais superior, inferior e transversal. No final de criar as superfícies deve-se clicar no lado direito do rato na tela branca e pressionar *redraw*.

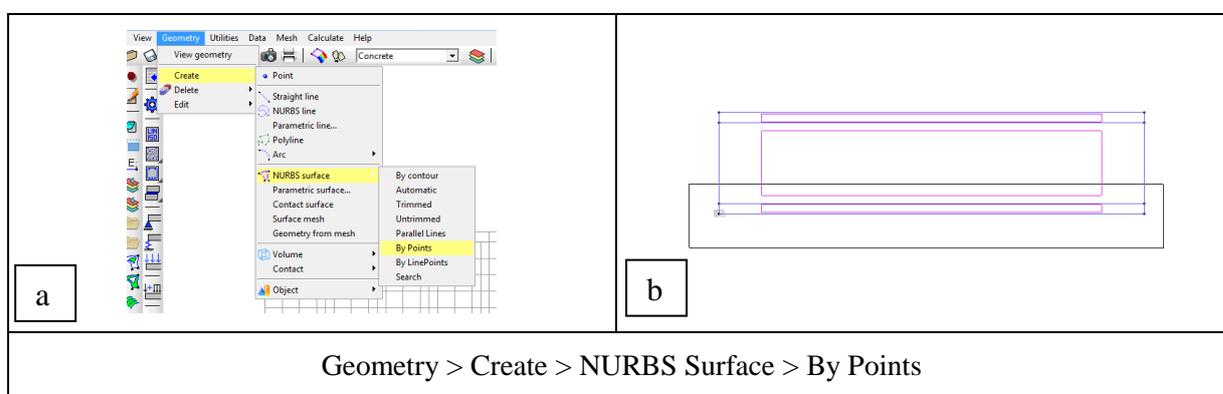


Figura 3.4 - Criação da superfície através de pontos.

Em função do que foi referido anteriormente, no que se refere às armaduras, deve-se ter o mesmo procedimento que para o betão, mas apenas se seleciona 2 pontos em simultâneo de forma a criar linhas que simulam a presença das armaduras longitudinais (superior e inferior) e das armaduras transversais.

3.2.3 - Criação de layers para cada material

Devem ser criados as *layers* (camadas) relativas a cada tipo de material utilizado, assim como se tem que distinguir as armaduras longitudinais superiores, das inferiores, uma vez que, geralmente, estas armaduras são diferentes. É necessário distinguir também as armaduras transversais da armadura transversal atravessada pelo eixo de simetria da viga. O modo de criação das *layers* está representado na Figura 3.5a.

Deste modo, cada elemento da geometria desenhada no *GID* anteriormente, terá um *layer* associado, mediante o material que lhe está associado, como se pode ver na Figura 3.5b.

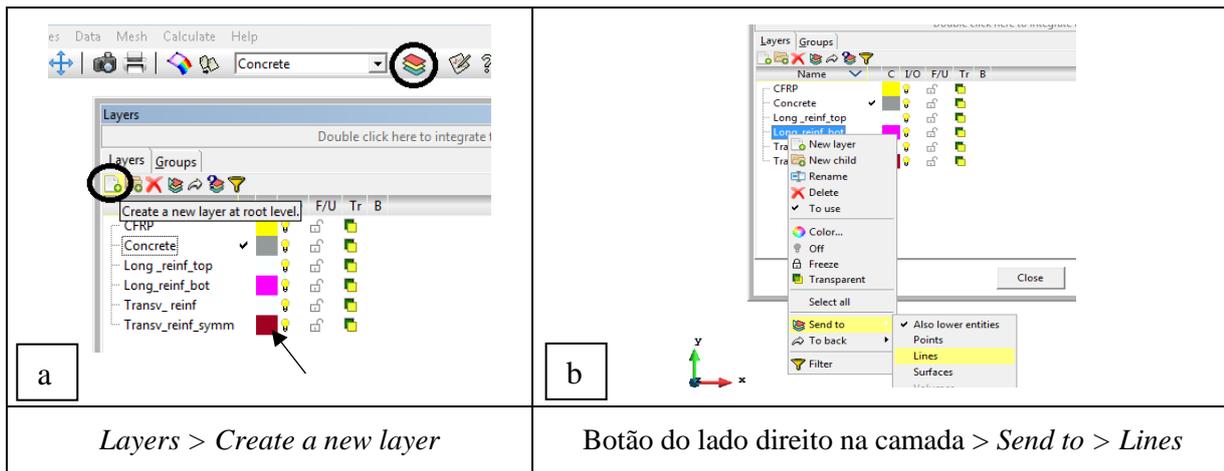


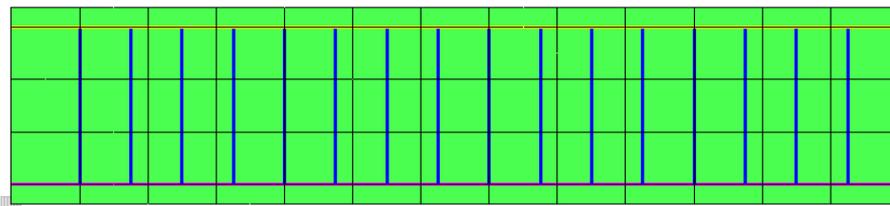
Figura 3.5 - Criação e associação dos *layers* aos elementos.

Após atribuir a cada elemento geométrico desenhado da viga, o respetivo *layer*, deve-se verificar se estão bem atribuídos, clicando onde está representado o símbolo de uma “lâmpada” (Figura 3.5), que simboliza a ativação e desativação de cada *layer*. Desta forma, o utilizador poderá saber se atribuiu corretamente o *layer* certo, ao elemento certo.

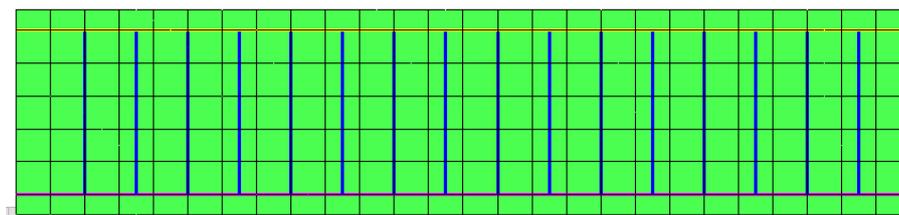
3.3 - Construção da malha de elementos finitos

3.3.1 - Refinamento da malha de elementos finitos

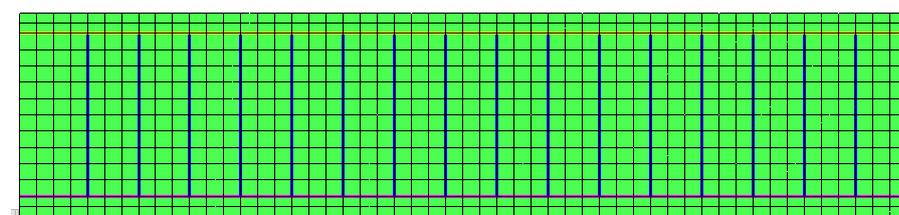
Para a definição da malha de elementos finitos a adotar, é necessário começar por definir o grau de refinamento da malha. No âmbito do presente estudo, foram analisados três níveis de refinamento para a simulação da viga de referência (viga REF): reduzido, intermédio e elevado, que se encontram representados, respetivamente nas Figuras 3.6a, 3.6b e 3.6c, com o objetivo de avaliar qual seria o melhor grau de refinamento da malha de elementos finitos, para trabalhos futuros na área da modelação numérica de vigas de betão armado. A malha com grau de refinamento reduzido é composta por 65 (5x13) elementos, a malha com grau de refinamento intermédio tem 182 (7x26) elementos e a malha com grau de refinamento elevado é composta por 728 (14x52) elementos.



a. Grau de refinamento reduzido



b. Grau de refinamento intermédio



c. Grau de refinamento elevado

Figura 3.6 - Graus de refinamento da malha de elementos finitos.

Após efetuar os cálculos com o software *femix* (considerando modelo não linear definido de acordo com o descrito nas secções seguintes) foi possível obter a relação força vs. flecha a meio-vão da viga em análise para os 3 níveis de refinamento e comparar com a relação força vs. flecha a meio-vão obtida experimentalmente. Concretamente, foram comparados os valores das forças obtidas numericamente para os três níveis de refinamento, com a força obtida experimentalmente, para os mesmos deslocamentos a meio-vão. Desta forma, foi possível calcular o erro entre os valores numéricos e os valores experimentais. O cálculo do erro para cada instante da curva de comportamento da viga analisada foi determinado por intermédio da seguinte expressão:

$$\text{Abs}[Força Num - Força Exp] / Força Exp \times 100 = \text{Erro} (\%) \quad (3.1)$$

Em que:

- *Força Num* é o valor da força obtida no modelo numérico, em correspondência com um determinado deslocamento estipulado;
- *Força Exp* é o valor da força obtida experimentalmente para o mesmo deslocamento estipulado para a determinação de *Força Num*;
- *Abs* função para se obter o valor absoluto do erro, isto é, a percentagem de erro obtida será sempre positiva.

Como se pode observar na Tabela 3.1, utilizando o comando *procv* do software Excel, foi possível para cada deslocamento saber imediatamente o erro ocorrido para cada malha, uma

vez que esta função procura na lista de cada grau de refinamento a força respetiva ao deslocamento pretendido.

Tabela 3.1- Exemplo da força e do respetivo erro para o deslocamento de 10mm.

Grau de refinamento da malha	Força Num (kN)	Força Exp (kN)	Erro (%)
Reduzido	54.09	55.58	2.67
Intermédio	55.76	55.58	0.34
Elevado	57.62	55.58	3.68

Na Tabela 3.2. apresenta-se, para cada grau de refinamento da malha analisado, a média dos erros a diferentes fases da relação força vs. flecha a meio-vão, nomeadamente a fase elástica (até ao início de fendilhação do betão), a fase entre o início de fendilhação do betão e a cedência das armaduras e a fase da pós cedência das armaduras. Para uma análise mais global dos resultados foi também calculada a média do erro, para cada tipo de malha em estudo, referente às 3 fases em simultâneo (Tabela 3.3).

Tabela 3.2 - Erro médio das malhas analisadas (%) para cada uma das fases de comportamento da viga.

Fase de comportamento da viga	Grau de refinamento da malha		
	Reduzido	Intermédio	Elevado
Elástica	2.25	1.11	4.89
Fendilhação do betão/cedência das armaduras	1.67	2.67	6.37
Pós cedência das armaduras	3.10	1.07	1.38

Tabela 3.3 - Erro médio das malhas analisadas (%) considerando todas as fases de comportamento da viga.

Grau de refinamento da malha	Reduzido	Intermédio	Elevado
Erro médio	2.75	1.42	2.59

A análise das Tabelas 3.2 e 3.3 permite que sejam retiradas as seguintes conclusões:

- A malha com grau de refinamento reduzido tem a menor percentagem de erro na fase de fendilhação do betão/cedência das armaduras (1.67%), comparativamente com as outras duas malhas;
- A malha com grau de refinamento intermédio tem a percentagem de erro mais reduzida na fase elástica (1,11 %) e na fase pós cedência das armaduras (1.07%), comparativamente com as outras duas malhas.

- A malha que tem o menor erro médio, durante as três fases analisadas, é a malha com grau de refinamento intermédio, com 1.42%.
- As três malhas em estudo obtiveram um erro médio, para as três fases de comportamento da viga analisadas, que variou entre 1.42% e 2.75%, o que indica que o refinamento da malha não altera significativamente a resposta numérica do modelo da viga em análise.

A análise anteriormente efetuada (Tabelas 3.2 e 3.3) demonstra que, não é diretamente relacionável que uma malha mais refinada tenha associado menores erros, nem que uma malha menos refinada tenha associado maiores erros. Tal como representado na Tabela 3.2, a análise deve ser feita por fases, para que se possa ter uma melhor perceção das limitações de cada malha.

Outro fator que foi contabilizado neste estudo sobre o nível de refinamento da malha, foi o tempo que demorou o cálculo de cada malha no software *femix*. Na Tabela 3.4 apresenta-se o tempo de cálculo no *femix* da estrutura modelada, com um grau de refinamento reduzido, intermédio e elevado.

Tabela 3.4 - Tempo de cálculo do *femix* para cada nível de refinamento da malha.

Grau de refinamento da malha	Reduzido	Intermédio	Elevado
Tempo de cálculo no <i>femix</i>	1min38seg	8min33seg	2h30min02seg

A análise da Tabela 3.4 permite concluir que:

- A malha de elementos finitos com menor tempo de cálculo foi a malha com um grau de refinamento reduzido (1 minuto e 38 segundos);
- A malha com um grau de refinamento intermédio demorou 5.2 vezes mais que a malha com um grau de refinamento reduzido;
- A malha com um grau de refinamento elevado demorou 17.5 vezes mais que a malha com um grau de refinamento intermédio e 91.9 vezes mais que malha com um grau de refinamento reduzido.

O número de elementos finitos que uma malha deve ter, pode ser relacionável, numa primeira fase, com a geometria da face lateral da viga que se pretende estudar. Com os diferentes níveis de refinamento adotados (reduzido, intermédio e elevado), foi possível concluir que a malha com um grau de refinamento intermédio obteve resultados mais eficazes, comparativamente com as outras malhas. O número de elementos finitos por cada decímetro quadrado da face lateral da viga a utilizar poderá ser uma boa estimativa para se saber que tipo de malha utilizar, tendo como objetivo otimizar simultaneamente o desempenho em termos do tempo de cálculo

no *femix* e do nível de erro entre o modelo numérico e o experimental. Uma vez que a área lateral de meia viga era de 39 dm^2 ($13 \times 3 \text{ dm}$), é possível verificar, de acordo com os dados da Tabela 3.5, que o número de elementos finitos que uma malha deve ter para ser de grau de refinamento intermédio deverá ser igual a aproximadamente 5 vezes o valor da área da face lateral da viga quantificada em decímetros quadrados (Expressão 3.2 em que e é o número de elementos finitos da malha, A é a área da face lateral e n é o número de elementos por dm^2). Uma vez que se obtém o número de elementos finitos da malha (e), apenas é necessário conhecer por quantos elementos se deve dividir o comprimento e a altura da viga. A relação do número de elementos finitos para a altura e o comprimento de meia viga, para um grau de refinamento intermédio, deve ser aproximadamente 1:4. Por exemplo: se se obtém um número de elementos finitos para a malha de uma viga (e) igual a 100, deve-se colocar 5 elementos finitos para a altura e 20 para o comprimento, cumprindo assim a razão de 1:4, assim como os 100 elementos previamente calculados (Figura 3.7).

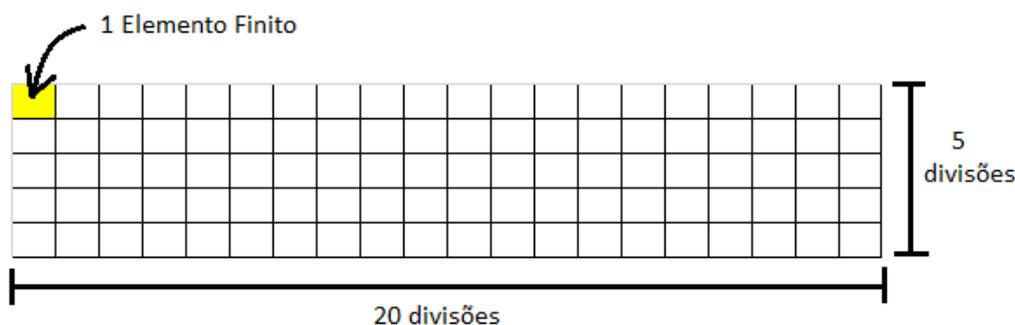


Figura 3.7 - Relação entre o número de elementos finitos da altura e o número de elementos finitos do comprimento da viga para um grau de refinamento intermédio (1:4).

Com este estudo, o conceito de um grau de refinamento intermédio pode ser aplicado a todo o tipo de dimensões de vigas.

$$n = \frac{e}{A} \quad (3.2)$$

Tabela 3.5 - Número de elementos por dm^3 de cada malha.

Grau de refinamento da malha	Reduzido	Intermédio	Elevado
Número de elementos finitos da malha (e)	65	182	728
Número de elementos finitos por dm^2 (n)	1.7	4.7	18.7

3.3.2 - Construção da malha de elementos finitos

Antes de proceder à construção da malha de elementos finitos é necessário definir o tipo de elemento finito que se pretende, isto é, o número de pontos de integração que constituem cada

elemento finito. Este tópicó é selecionado no *GID*, como se pode observar na Figura 3.8. Na presente dissertação foram utilizados elementos finitos bidimensionais de 8 nós para o betão e elementos finitos unidimensionais de 3 nós para as armaduras e para o CFRP (estes tipos de elementos são associados à malha por intermédio da função *Quadratic*). Caso se pretenda escolher elementos mais simples, pode-se optar por selecionar a função *Normal* à qual estão associados elementos finitos bidimensionais de 4 nós (para o caso do betão) e elementos finitos unidimensionais de 2 nós (para o caso das armaduras e do CFRP).

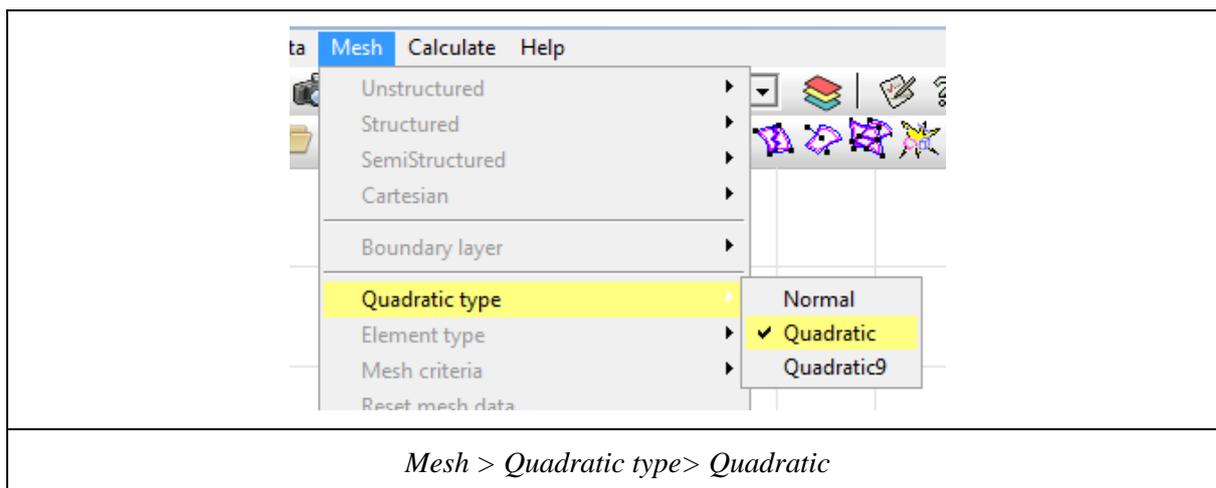


Figura 3.8 - Seleção do número de pontos de integração dos elementos.

No âmbito da construção da malha de elementos finitos, existem duas hipóteses (Figura 3.9) que podem ser utilizadas: *Assign number of cells* (atribuir nº de células) e/ou *Assign size* (atribuir tamanho das células).

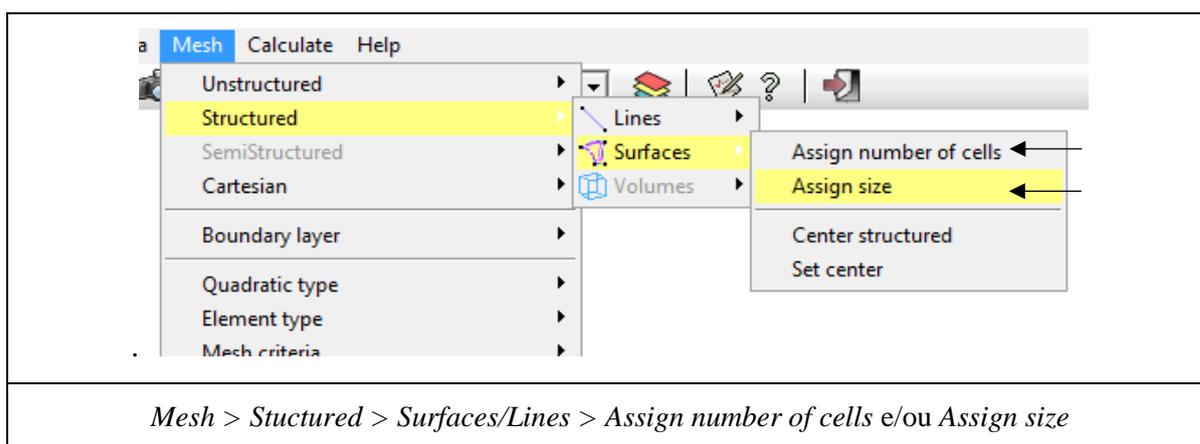


Figura 3.9 - Construção da malha de elementos finitos.

Caso seja escolhido *Assign number of cells*, o elemento pretendido irá ser dividido no número de células que for introduzido. Caso seja escolhido *Assign size*, o elemento pretendido será

divido em células com o tamanho introduzido, previamente, em milímetros. Para se proceder à construção da malha utilizando a função *Assign size* deve-se, em primeiro lugar, seleccionar a superfície, caso seja o betão, ou linha, caso seja CFRP ou armaduras. De seguida é necessário pressionar *ESC* e introduzir o valor da dimensão lateral de um elemento finito da malha (em milímetros). Posteriormente, pressiona-se *Assign* e selecciona-se o elemento a que se pretende atribuir a dimensão escolhida (fazendo o mesmo processo para a segunda dimensão de cada elemento). A tarefa termina pressionando *ESC* outra vez. O procedimento para a opção *Assign number of cells*, é igual ao descrito para a função *Assign size*, com a excepção do valor a ser introduzido, pois neste caso será referente ao número de células que dividirá o elemento seleccionado. Assim, no caso de superfícies (exemplo do betão no presente estudo) utiliza-se *Mesh > Structured > Surfaces > Assign size* ou *Assign number of cells* e no caso das linhas (para o as armaduras de aço e para os CFRP no presente estudo utilizou-se *Mesh > Structured > Lines > Assign size* ou *Assign number of cell*. Por forma a que não exista conflito de *layers*, deve-se ocultar o *layer* do betão quando se cria a malha para as armaduras, assim como se deve ocultar as *layers* do aço e do CFRP quando se cria a malha para o betão. No âmbito do presente trabalho, foi utilizado para o betão o comando *Assign size* para ambas as direcções do elemento, enquanto que para os CFRP e as armaduras, foi utilizado o comando *Assign number of cells*.

Uma vez que, quer a superfície de betão, como as linhas correspondentes às armaduras e ao CFRP foram divididas em elementos finitos, pode-se nesta fase gerar a malha (*Generate mesh*) e posteriormente colapsar a malha (*Colapse mesh*), tal como se pode observar na Figura 3.10.

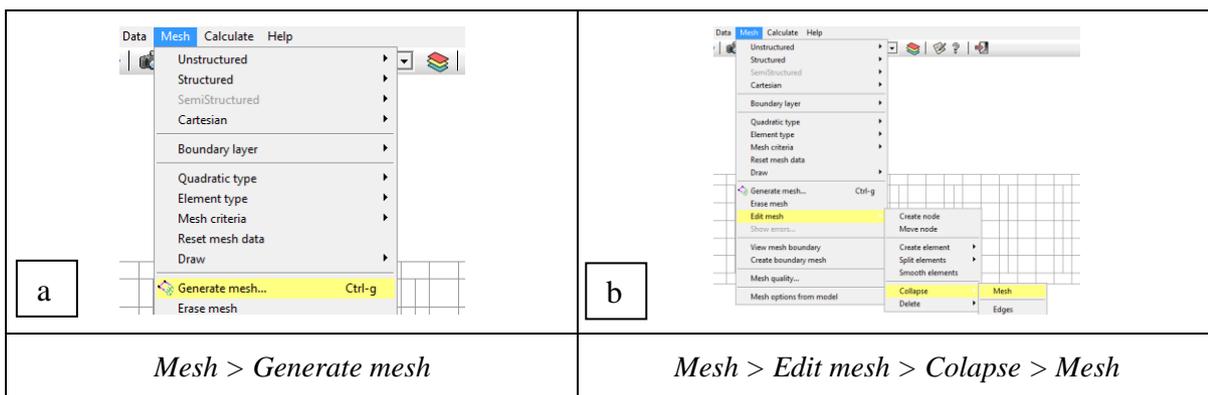


Figura 3.10 - Criação da malha de elementos finitos.

A necessidade de colapsar a malha, é devido ao facto de no local onde estão os nós dos elementos finitos referentes às armaduras, existirem já os nós referentes aos elementos finitos do betão (sobreposição de nós). Desta forma deve-se sempre colapsar a malha no final de a gerar, de modo a eliminar todos os pontos sobrepostos. Uma vez colapsada a malha de

elementos finitos, pode-se introduzir a informação referente às características dos materiais, dos apoios, das cargas/deslocamentos prescritos nela aplicados e as combinações existentes (Figura 3.11).

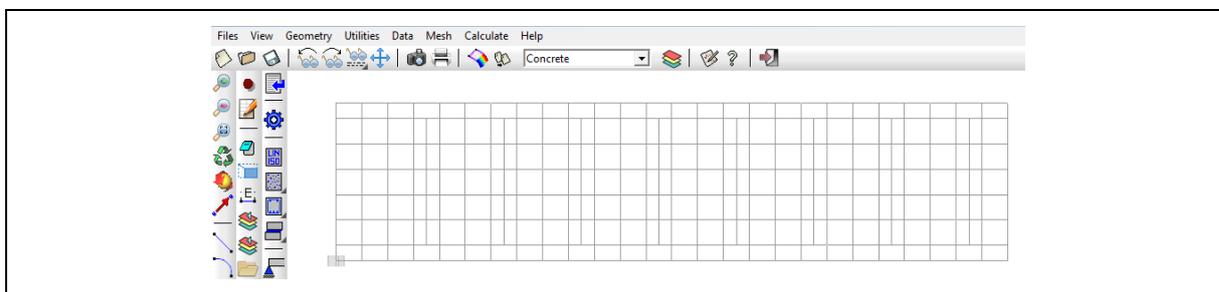


Figura 3.11 - Malha de elementos finitos construída.

3.4 - Atribuição das características respetivas aos elementos da malha

3.4.1 - Tipo de problema (Problem type)

Antes de atribuir as características dos elementos da malha de elementos finitos é necessário escolher qual o software que se pretende para efetuar os cálculos da estrutura que foi introduzida no *GID*. No âmbito da presente dissertação, o software escolhido foi o *femix*. Quando o *GID* é instalado no computador, este não tem por defeito o *femix* na sua base de dados relativos aos softwares de cálculo. Para tal, é necessário obter uma pasta que foi denominada por *femix.gid* (contém ficheiros executáveis do *femix*) e, posteriormente, deve ser colada na diretoria *C:\Program Files\GID\GID 11.1.9d\problemtypes*. De seguida, abre-se o *GID* e como se pode verificar na Figura 3.12, o software *femix* já aparece na lista de softwares possíveis para o cálculo da estrutura. Para terminar o processo de escolha do software de cálculo, deve ser selecionado *femix*.

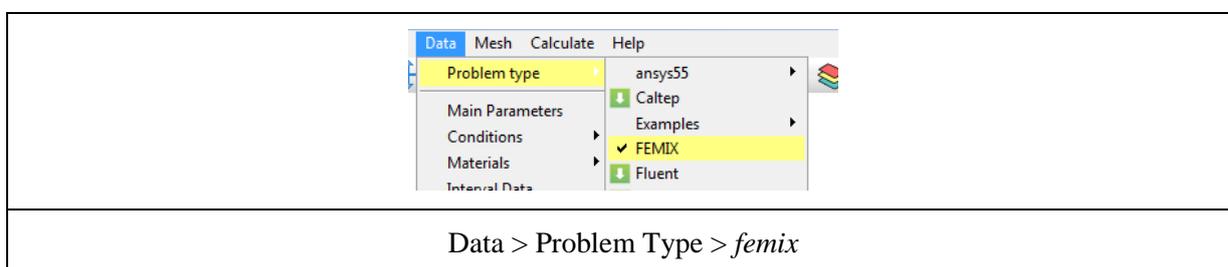


Figura 3.12 - Tipo de software de cálculo a utilizar com software *GID*.

3.4.2 - Condições (Conditions)

Nesta fase é definido o tipo de elemento finito a usar e suas características, os apoios da estrutura e as cargas/deslocamentos prescritos a que a estrutura está sujeita. Além disso, serão

ainda introduzidas as características dos materiais utilizados e as combinações a iterar posteriormente no *femix*.

3.4.2.1 - Propriedade dos elementos (*Element Properties*)

No que se refere às propriedades dos elementos (*Element Properties*), apresentada na Figura 3.13a, no presente estudo foram utilizados dois tipos de elementos (*element type*): *Plane stress quad* e *Emb cable 2D*. O *Plane stress quad* foi utilizado para os elementos de betão, no qual é apenas necessário introduzir a espessura (*thickness*) da viga em milímetros, que no âmbito do estudo desta dissertação, era de 150mm (Figura 3.13b). O *Emb cable 2D* foi utilizado para as armaduras e para o CFRP, sendo necessário introduzir a área total das secções do elemento. Por exemplo em termos de armaduras longitudinais inferiores, as vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012) que foram usadas neste estudo tinha $2\phi 10$, o que corresponde a uma área total de 157.08mm^2 (Figura 3.13c). Após inserir o valor da área de armadura, deve-se premir *Assign* e seleccionar o layer pretendido. No final de introduzir todos os valores de todos os *layers*, deve-se verificar sempre se todos os elementos têm as suas propriedades atribuídas, pressionando dentro dos *element properties*, *draw>Colors*. Obtendo-se uma figura semelhante à Figura 3.14.

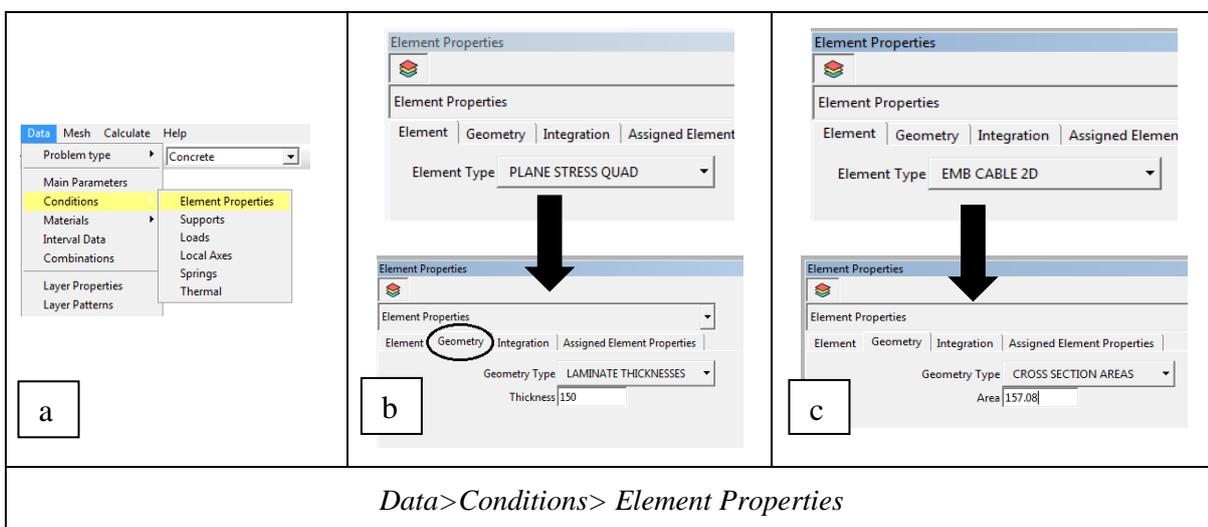


Figura 3.13 - Introdução das propriedades dos elementos da malha.

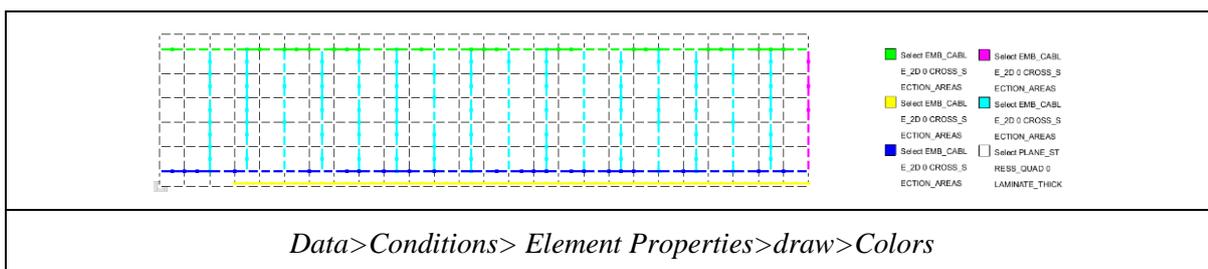


Figura 3.14 - Visualização gráfica das propriedades dos elementos.

3.4.2.2 - Cargas (Loads)

A forma de proceder à introdução das cargas ou dos deslocamentos prescritos atuantes na estrutura está ilustrada na Figura 3.15. No âmbito do estudo da presente dissertação, foi adicionada na estrutura uma carga pontual de -500N na direção de y (Figura 3.15b). Para atribuir uma carga ou um deslocamento a um nó da malha de elementos finitos, deve-se introduzir o respetivo valor na direção pretendida, seleccionar *Assign*, seleccionar o nó da malha de elementos finitos pretendido e pressionar *ESC*. Para verificar se a carga ou o deslocamento foram bem atribuídos deve-se pressionar na mesma janela a sequência *draw>colors*.

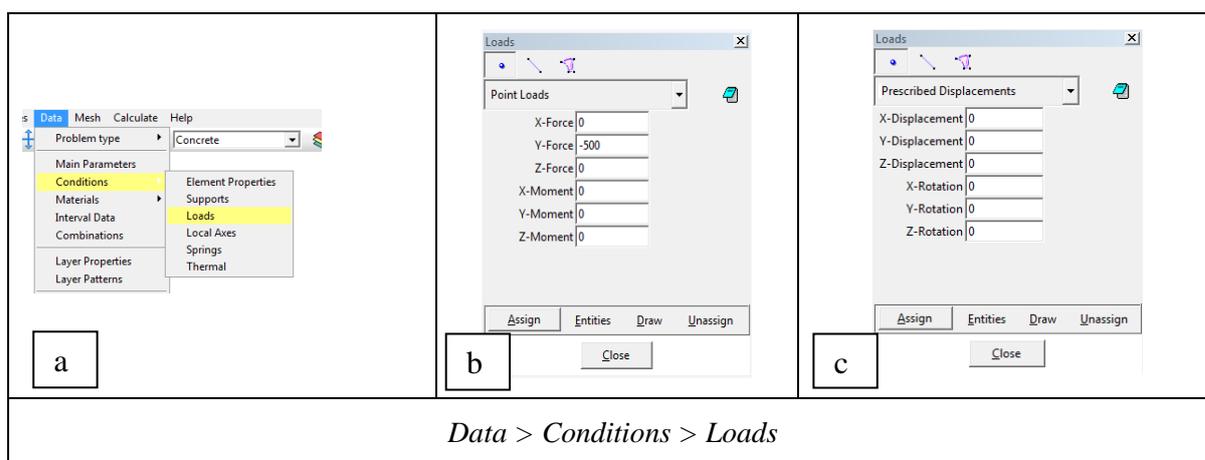


Figura 3.15 - Introdução das cargas e deslocamentos prescritos.

3.4.2.3 - Apoios (Supports)

Nesta fase procede-se à simulação de todos os apoios existentes na estrutura. Para a introdução dos apoios é necessário seleccionar qual a direção ou direções em que se pretende bloquear o movimento. Posteriormente prime-se *Assign* e selecciona-se o nó da malha de elementos finitos onde se localiza o apoio que se pretende simular. Para visualizar o conjunto de apoios introduzidos na malha, pressiona-se dentro da janela dos apoios, *draw > All Supports* (Figura 3.16c.). Como já foi referido no início deste capítulo, na presente dissertação é apenas calculada meia estrutura, devido à simetria estrutural existente (Figura 3.1 e 3.2). Assim, no eixo de simetria da estrutura, são considerados em todos os nós apoios de roletes (com o deslocamento em x e z bloqueados). O apoio duplo existente na estrutura foi simulado, bloqueando o deslocamento na direção de x e y (Figura 3.16b).

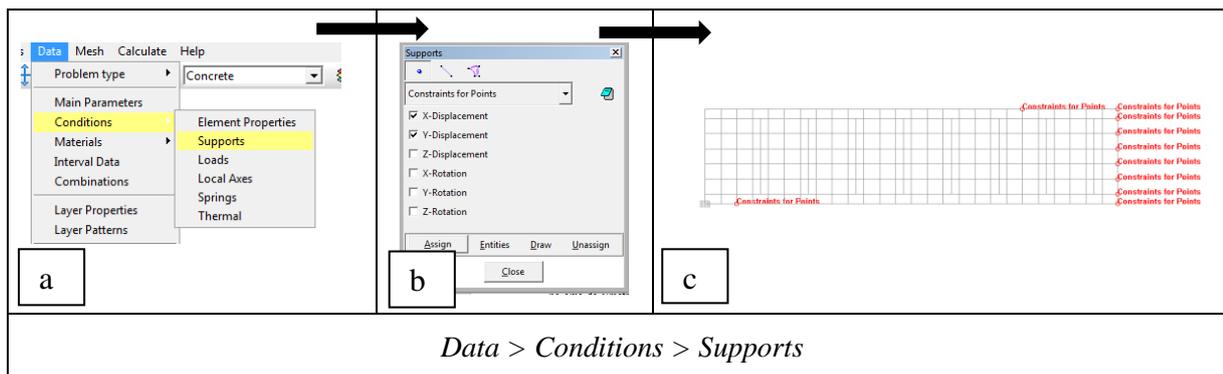


Figura 3.16 - Introdução dos apoios da estrutura.

3.4.3 - Materiais (Materials)

A forma de introdução dos parâmetros referentes à caracterização dos materiais a usar no modelo numérico é apresentada nesta secção. Os materiais dos modelos de vigas usados na presente dissertação são o betão, o aço e o CFRP (Figura 3.17).

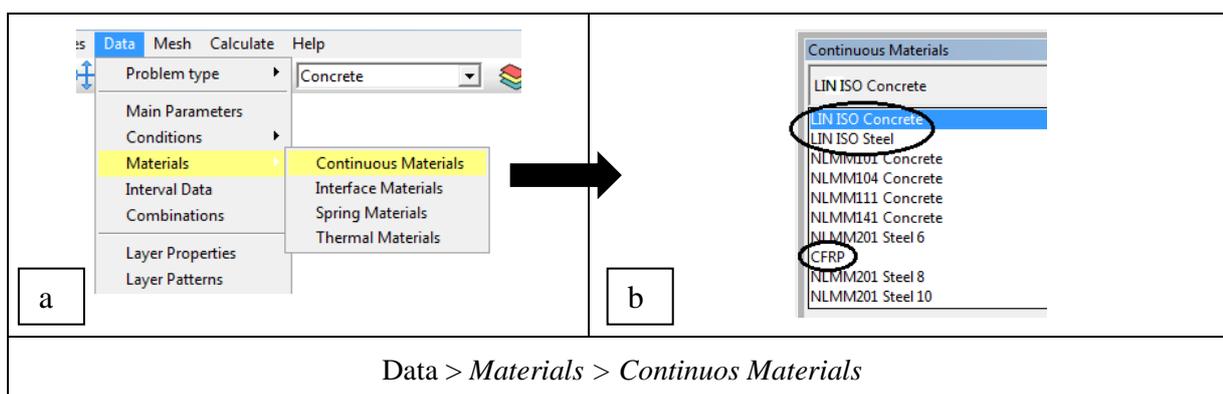


Figura 3.17 - Introdução dos materiais.

Uma vez que, numa primeira fase deste estudo, se efetuou uma análise da estrutura considerando um comportamento linear, deve-se seleccionar *LIN ISO Concrete* para adicionar os parâmetros do betão, *LIN ISO Steel* para adicionar os parâmetros do aço, tal como se pode observar na Figura 3.16b. Em relação ao CFRP, para simular o seu comportamento linear deve-se criar um material novo replicando os parâmetros do *LIN ISSO Steel*. Seja para o betão, para o aço ou para o CFRP, os parâmetros que serão pedidos são a massa volúmica (ρ), o coeficiente de dilatação térmica (α), o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de *Poisson* (ν), tal como representados na Figura 3.17. As unidades que se devem utilizar são de Newton (N) e milímetros (mm). Assim, para a massa volúmica o valor deve ser introduzido em N/mm^3 , para o coeficiente de dilatação térmica deve ser introduzido o valor em $^{\circ}\text{C}^{-1}$ enquanto que para o módulo de elasticidade, o valor deve ser introduzido em N/mm^2 . O coeficiente de *Poisson* é adimensional.

Continuous Materials	
LIN ISO Concrete	
ρ [ML ⁻³]	2.500e-05
α [T ⁻²]	1.000e-05
E [FL ⁻²]	3.117e+04
ν [-]	1.500e-01

Figura 3.18 - Parâmetros do betão considerando comportamento linear material.

Após a introdução das propriedades dos materiais utilizados, o passo seguinte é atribuir os materiais aos respetivos elementos. Para que seja mais fácil realizar esta tarefa é aconselhável ativar apenas os *layers* que são necessários, de modo a que não existam erros posteriores e seja mais simples e clara a visualização do elemento pretendido.

Como se pode observar na Figura 3.19b, para o elemento de betão, com apenas o *layer Concrete* (betão) ativo, pressiona-se *Assign > Elements* (Figura 3.19a), seleciona-se todo o elemento de betão e prime-se *ESC*. Para o aço e para o CFRP efetua-se o mesmo processo. No final da atribuição dos materiais aos elementos respetivos, para que seja possível visualizar todos os materiais atribuídos na malha (Figura 3.20), é necessário efetuar a seguinte sequência: *Data > Materials > Continuous Materials > Draw > all materials*. A legenda da Figura 3.20 refere-se ao tipo de materiais que foram atribuídos aos elementos da viga S1-M, isto é:

- LIN ISO Concrete: betão com comportamento linear;
- LIN ISO Steel 6, 8 e 10: aço das armaduras com comportamento linear referente a varões com 6, 8 e 10 mm de diâmetro, respetivamente;
- CFRP: CFRP com comportamento linear.

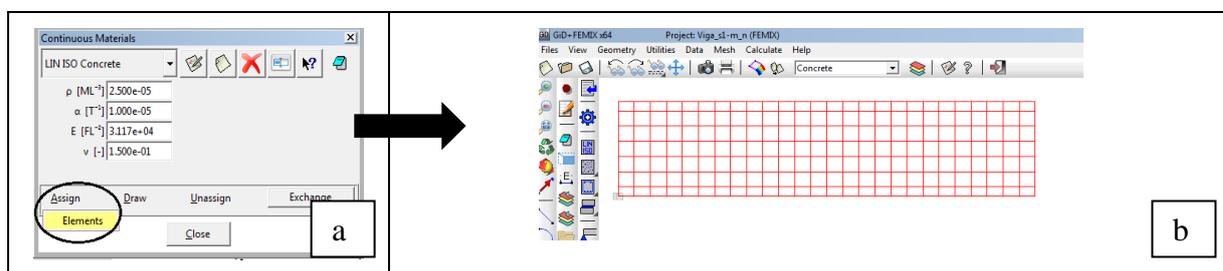


Figura 3.19 - Atribuição de um material ao respetivo elemento.

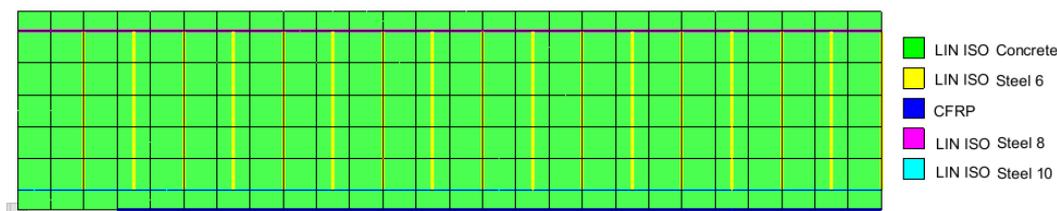


Figura 3.20 - Render da malha de elementos finitos com os respetivos materiais atribuídos.

3.4.4 - Casos de carga (*Interval Data*)

A etapa seguinte diz respeito à definição de casos de carga, de acordo com o representado na Figura 3.21a. Para tal, é necessário apenas definir o nome da carga a aplicar (*Load title*) e indicar se é pretendido a aplicação da correspondente ação da gravidade (Figura 3.21b). Para os restantes tópicos, podem ser utilizados os que estão por defeito do software *GID*. No final é necessário premir “*Accept*”.

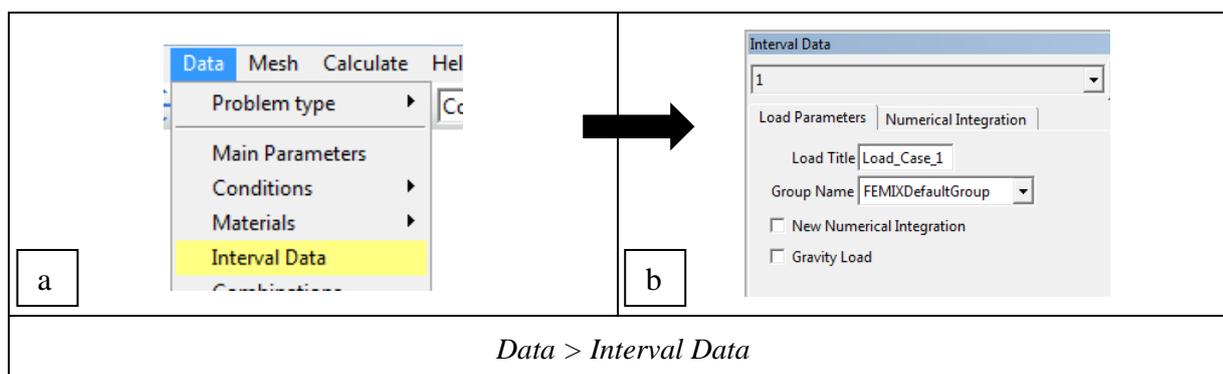


Figura 3.21 - Introdução do caso de carga.

3.4.5 - Combinações (*Combinations*)

Por forma a introduzir as combinações do modelo numérico com comportamento linear, numa primeira fase, deve-se pressionar *Data > Combinations* (Figura 3.22a), abrindo-se uma janela de acordo com o representado na Figura 3.22b. De seguida, é necessário dar um nome à combinação (*Combinations title*). Posteriormente, aconselha-se a colocação do valor de “1” no número de incrementos de combinações (*Number of Increment in the Combination*) e a selecionar o número de casos de carga estipulado anteriormente (*Number of Load Cases*). Relativamente ao factor de carga (*load factor*) é aconselhável a utilização de “1”. Para adicionar esta combinação, deve-se pressionar “*Add*”. Para concluir a operação, é necessário premir “*Accept*”.

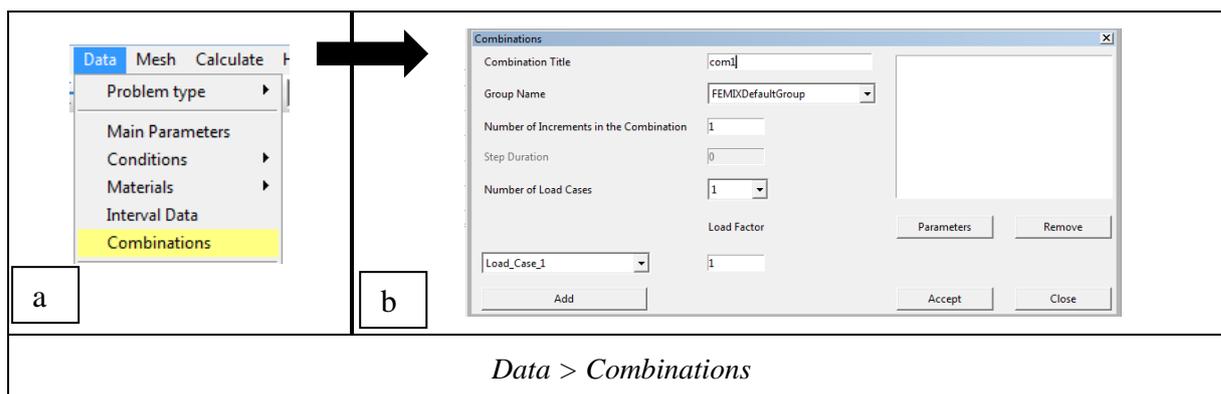


Figura 3.22 - Introdução das combinações.

Esta combinação foi criada apenas para que sejam corridos os software *prefemix* e o *femix*, com o objetivo de se verificar se não existem erros a nível de malha e propriedades dos elementos. Após percorridas todas as etapas descritas em 3.2, 3.3 e 3.4 deste capítulo, é possível proceder ao cálculo da estrutura em comportamento linear usando o *prefemix* e o *femix* (secção 3.5).

3.5 - Verificação do modelo numérico em regime linear no *femix*

Antes de prosseguir para a transformação do modelo numérico de regime linear para regime não linear, convém fazer sempre a verificação do modelo numérico em regime linear, utilizando os softwares *prefemix* e *femix* (Figura 3.23a). Para tal, apenas é necessário correr o modelo no software e aguardar que a única combinação introduzida seja feita calculada com sucesso como se pode observar na Figura 3.23b.

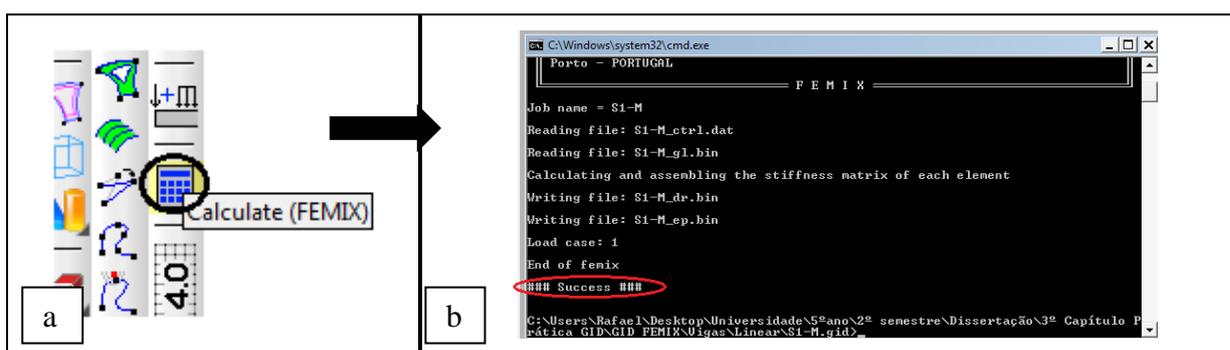


Figura 3.23 - Mensagem de sucesso após calculo no *femix*.

Após aparecer a mensagem `### Success ###` (Figura 3.23b) fecham-se as duas janelas *cmd.exe* referentes ao *femix* e passa-se para a etapa seguinte, que tem como objetivo transformar o modelo numérico atual com comportamento linear material, num modelo numérico de comportamento não linear material.

3.6 - Transformação do modelo numérico de regime linear para regime não linear

Para que se possa alterar um modelo numérico de regime linear para um regime não linear, deve-se realizar três alterações específicas ao modelo existente, nomeadamente: alteração dos parâmetros principais (*Main Parameters*), alteração das características dos materiais utilizados (*Continuous Materials > NLMM*) e alteração das combinações (*Combinations*).

3.6.1 - Alteração dos parâmetros principais (*Main Parameters*)

Em relação à alteração dos parâmetros principais, tal como se pode observar na Figura 3.24, deve-se colocar apenas um visto no quadrado correspondente a “*Materially Nonlinear Problem*” (Problema materialmente não linear) e de seguida pressionar “*Accept*”.

Data > Main Parameters > Materially Nonlinear Problem

Figura 3.24 - Alteração dos parâmetros principais.

3.6.2 - Alteração das características dos materiais utilizados

Nesta fase deve ser feita a alteração das características dos materiais utilizados: betão, aço, CFRP. Assim, no caso do betão em vez de ser escolhido “*LIN ISO Concrete*” deverá ser escolhido o “*NLMM104 Concrete*”. Para o aço, em vez de ser escolhido o “*LIN ISO Steel*” deverá ser escolhido o “*NLMM201 Steel*”. Neste contexto, deverá ser considerada que existem diferentes tipos de aço associados aos três tipos de varões existentes nas vigas em análise (varões de aço com diâmetro de 6, 8 e 10mm). Assim, de acordo com a Figura 3.24b para o aço dos varões com 6, 8 e 10mm foi considerado, respetivamente, *NLMM201 Steel6*, *NLMM201 Steel8* e *NLMM201 Steel10*.

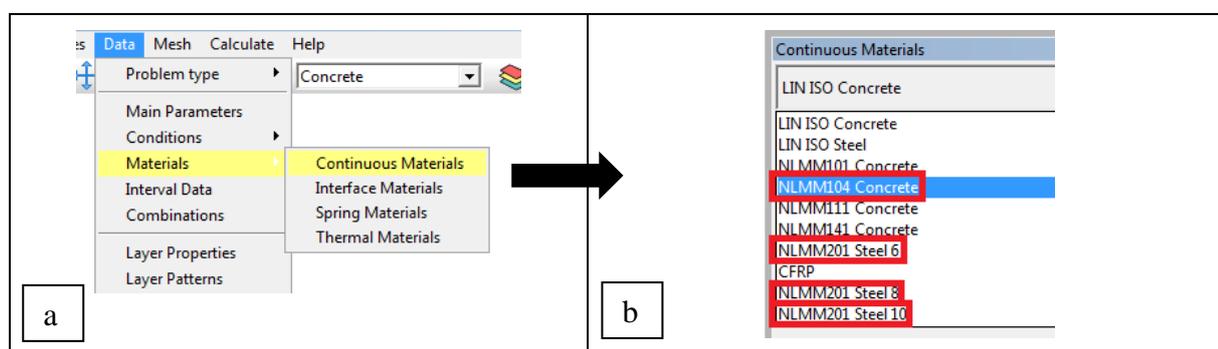


Figura 3.25 - Alteração das características dos materiais utilizados.

Na Figura 3.26 é possível verificar os parâmetros necessários para a simulação do comportamento do betão referente ao modelo escolhido (*NLMM104 Concrete*). Na Figura 3.26a pode-se observar a janela das propriedades genéricas (*Generic Properties*) e verificar que o único valor que não foi considerado, quando se introduziu o betão como tendo comportamento linear, foi o da tensão f_c (resistência à compressão do betão expressa em MPa). Na Figura 3.26b estão representadas as propriedades de fratura modo I (*Fracture Mode I Properties*) que tem direta correspondência com o diagrama *Tensile-Softening* (que tem como tradução para a língua portuguesa diagrama de amolecimento de tração do betão) apresentado na Figura 3.27. Assim, para o estudo a realizar no âmbito da presente dissertação foi escolhido o diagrama do tipo trilinear.

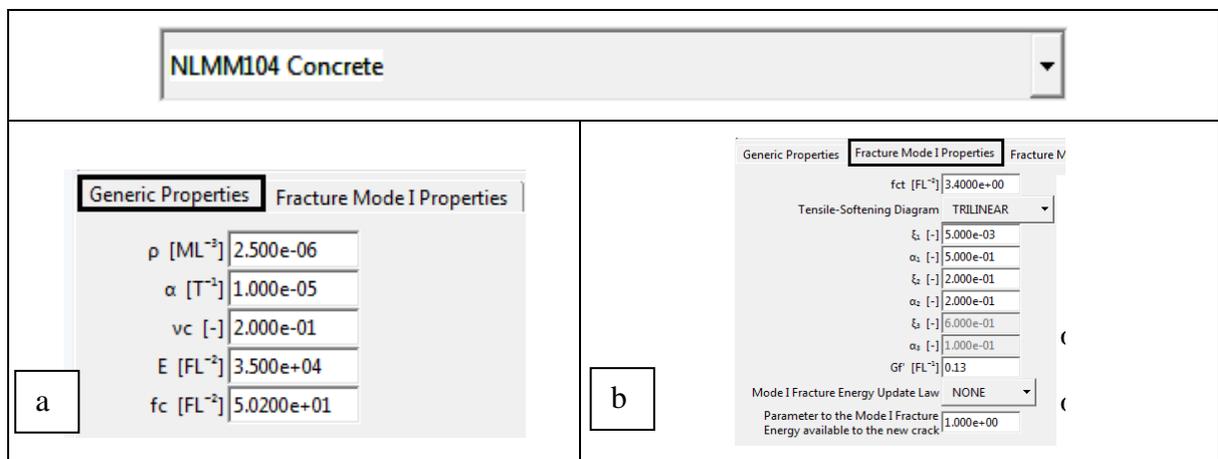


Figura 3.26 - Parâmetros do betão em comportamento não linear material.

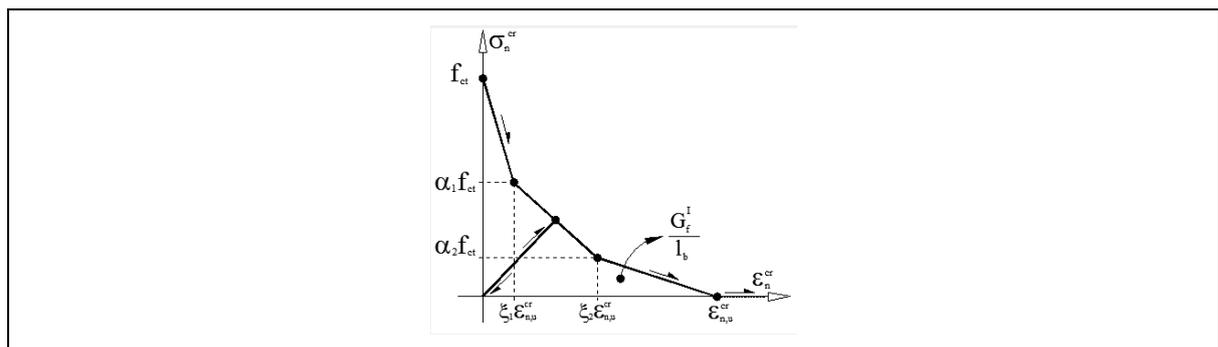


Figura 3.27 - Diagrama de amolecimento em tração do betão (*tensile-softening*).

Os parâmetros que são necessários preencher, para o quadro da Figura 3.26b, são os seguintes:

- f_{ct} : resistência à tração do betão (MPa);
- ξ_1, ξ_2 : razão entre a extensão correspondente à tensão pós-pico 1 ($\alpha_1 f_{ct}$) e pós-pico 2 ($\alpha_2 f_{ct}$), respetivamente, e a extensão última do diagrama trilinear *Tensile-Softening* do betão (os valores adotados para ξ_1 e ξ_2 foram $1,0 \times 10^{-2}$ e $2,0 \times 10^{-1}$, respetivamente);

- α_1, α_2 : razão entre a tensão pós-pico 1 e pós-pico 2, respetivamente, e a resistência à tração do betão (f_{ct}), tendo-se adotado 5.0×10^{-1} e 2.0×10^{-1} , respetivamente, para α_1 e α_2 .
- GF' : Energia de Fratura (Modo I) - na presente dissertação foi utilizado do valor numérico de 0,085, tendo sido este calculado segundo o MC2010;
- *Parameter to the Model I Frature Energy available to the new crack*: Parâmetro de energia de fratura modo I disponível para abertura de nova fenda, tendo sido adotado o valor de 1.

Para os restantes parâmetros (*Fracture Mode II Properties; Miscellaneous; Out-of-Plane Shear (OP) Data*) admitiram-se os valores por defeito para esta dissertação. No final da introdução dos parâmetros do betão, deve-se pressionar *Update Changes* para que os novos valores sejam guardados.

Na Figura 3.28 apresentam-se os parâmetros necessários a preencher em termos da modelação do comportamento do aço (*NLMM201 Steel*). De acordo com a Figura 3.28a existem parâmetros que são idênticos aos introduzidos quando se simulou o aço com comportamento linear, nomeadamente a massa volúmica (ρ) e o coeficiente de dilatação térmica (α). Em relação aos restantes parâmetros foram utilizados neste estudo os valores resultantes dos ensaios experimentais efetuados para a caracterização do aço das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012). Na Figura 3.28b (gráfico tensão vs. extensão) é possível ver o significado dos vários parâmetros necessários para o preenchimento do quadro da Figura 3.28a. em termos de extensões e tensões em determinadas fases do comportamento do aço. Em relação ao parâmetro *Third Branch configuration* (configuração do terceiro patamar da Figura 3.28b), o valor que foi considerado foi de 1, sendo este o valor por defeito do software *GID*.

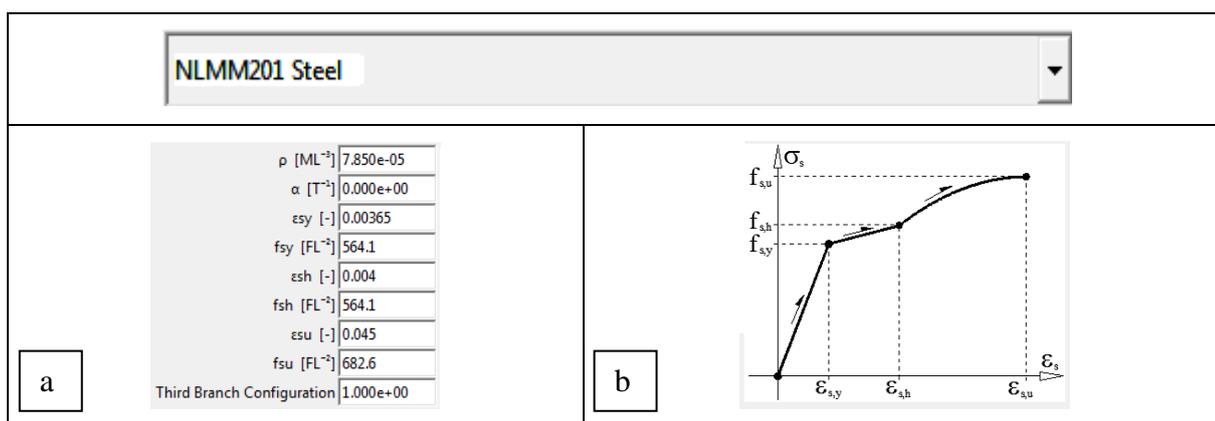


Figura 3.28 - Parâmetros do aço e do CFRP em comportamento não linear material.

Referente ao aço e ao CFRP, quanto às suas propriedades em comportamento não linear, observando a Figura 3.28a, denota-se que existem parâmetros que são idênticos aos introduzidos para comportamento linear, nomeadamente a massa volúmica (ρ) e o coeficiente de temperatura (α). Para completar os restantes parâmetros, foram utilizados nesta dissertação, os valores adquiridos pelos ensaios efetuados em laboratório, através de gráficos semelhantes ao da Figura 3.28b, que demonstram o comportamento do aço sujeito a esforços de tração.

- ε_{sy} : Extensão final de regime elástico;
- ε_{sh} : Extensão final de regime elasto-plástico;
- ε_{su} : Extensão total relativa à tensão máxima de rotura;
- f_{sy}, f_{sh} : Tensão de cedência;
- f_{su} : Tensão máxima de rotura;
- *Third Branch configuration*: Configuração do terceiro setor do diagrama; foi utilizado nesta dissertação o valor por defeito do software *GID* igual a 1,0.

O CFRP é um material com comportamento linear elástico até à rotura. Para que o modelo numérico funcione corretamente é necessário existir um critério de paragem associado ao CFRP (introdução da sua extensão de rotura e a respetiva tensão máxima). O valor da tensão e a extensão de rotura dos laminados utilizados no reforço das vigas em análise (Dias *et al.*, 2012) era de 3165 MPa e 0.018, respetivamente. Para se poder simular o CFRP com comportamento similar ao do aço (Figura 3.28b), deve-se considerar os três ramos com a mesma inclinação dada pelo módulo de elasticidade do CFRP. O resultado da comparação da relação força vs. flecha a meio-vão numérica e experimental está representado na Figura 3.29.

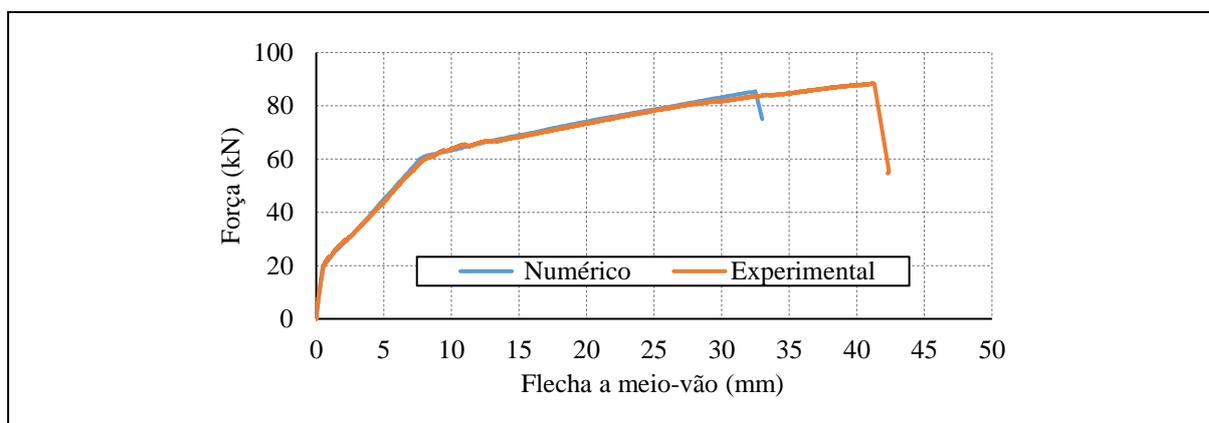


Figura 3.29 - Relação Força vs. flecha a meio-vão da viga S1-M considerando uma extensão de rotura igual a 0.018.

Este resultado em termos numéricos (rotura aos 32mm) indica que durante o carregamento da viga ocorreu algum deslizamento do laminado previamente à sua rotura. Para se conseguir maior proximidade entre resultados numéricos e experimentais, em termos da relação força-flecha a meio-vão, foi necessário criar uma compensação no comportamento dos laminados, com uma diminuição sucessiva do seu módulo de elasticidade ao longo das três fases do diagrama tensão vs. extensão, aumentando assim a extensão de rotura. Para que o modelo numérico efetuado simule um comportamento semelhante ao comportamento da viga a nível experimental, foi necessário recriar um comportamento não linear para o CFRP, com 3 pontos, como se pode observar a Tabela 3.6. (3 extensões e respetivas tensões) para o CFRP.

Tabela 3.6. Dados da relação tensão vs. extensão do CFRP.

Extensão (%)	Tensão (MPa)	E (GPa)
0	0	0
0.012057	2110	175.0
0.016984	2632.5	155.0
0.02532	3165	125.0

O comportamento do laminado de CFRP está representado na Figura 3.30. Nesta figura podem-se observar as três fases do diagrama tensão vs. extensão, assim como o decréscimo do declive de cada tramo, associado ao decréscimo do módulo de elasticidade.

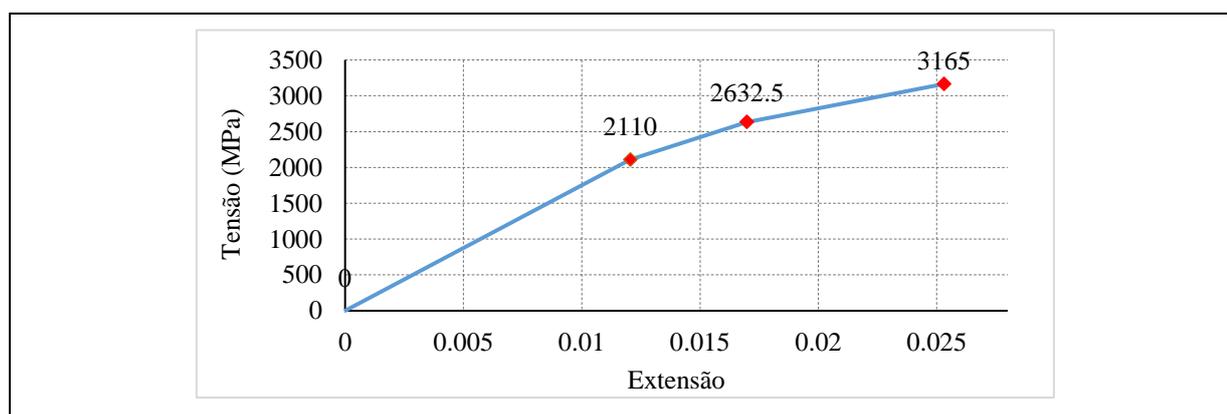


Figura 3.30 - Gráfico Tensão-Extensão do CFRP para os modelos numérico.

Desta forma, obteve-se um resultado numérico bem mais realista, como se pode observar na Figura 3.31:

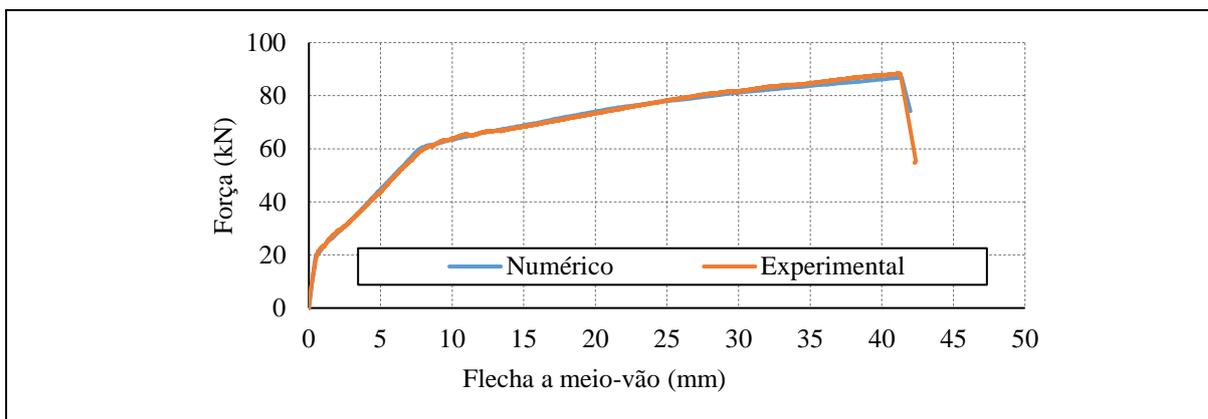


Figura 3.31 - Relação Força vs. flecha a meio-vão da viga S1-M (com simulação de deslizamento do CFRP).

3.6.3 - Alteração das combinações

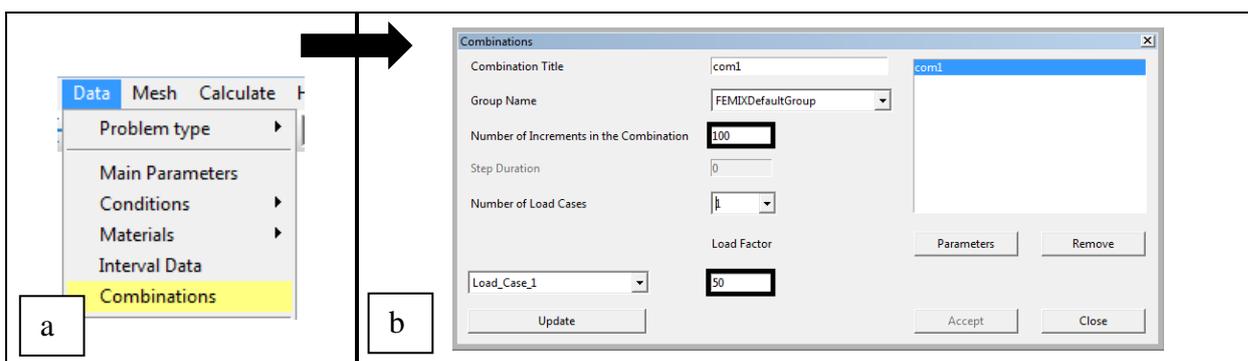


Figura 3.32 - Alteração das combinações.

3.6.3.1 - Alteração convencional das combinações

Para transformar o modelo numérico de regime linear para regime não linear é necessário alterar a combinação utilizada anteriormente (Figura 3.32a). Os parâmetros que deverão ser alterados são (Figura 3.32b):

- Número de incrementos na combinação (*Number of Increments in the Combination*): este valor representa o número de incrementos que irão ser calculados no *femix* por cada combinação, isto é, se o valor do número de incrementos for 100 e o fator de carga for 50, cada incremento terá 0,5 e será repetido 100 vezes nessa combinação;
- Fator de carga (*Load Factor*): este valor definirá o valor dos incrementos anteriormente descritos, sendo que quanto maior for o fator de carga, maior será o valor de cada incremento.

3.6.3.2 - Arc length

Na altura em que se efetua a alteração das combinações para transformar o modelo de comportamento linear num modelo de comportamento não linear, foi selecionada a opção para utilização da ferramenta do *arc length*. Esta ferramenta tem o objetivo de melhorar as simulações numéricas efetuadas no software *femix*, tendo como foco a possibilidade de cálculo com precisão mesmo quando ocorrem fenómenos de *snap-back* ou *snap-through*, como ilustrado na Figura 3.33.

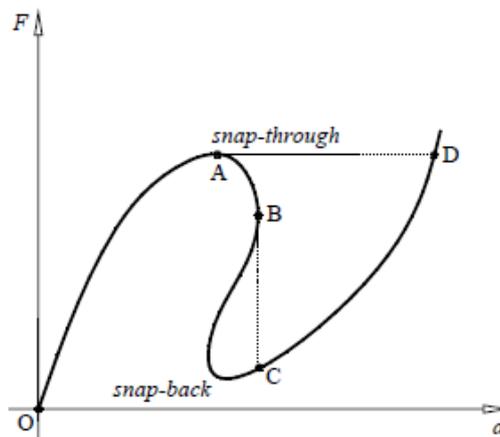


Figura 3.33 - Fenómenos de *snap-through* e *snap-back* (Gouveia *et al.*, 2006).

O procedimento necessário para utilizar a ferramenta do *arc length*, assim como a descrição de cada parâmetro a preencher, estão apresentados por ordem de preenchimento, imediatamente após a Figura 3.34.

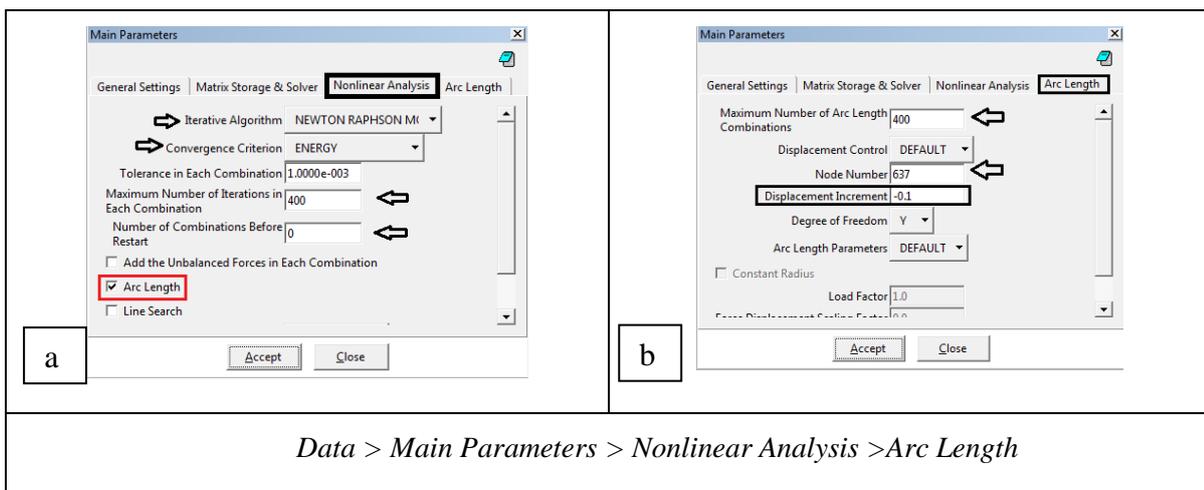


Figura 3.34 - Utilização da função *arc length*.

i. Iterative Algorithm

Como se pode observar na Figura 3.34a, após seleccionar a opção *Arc Length* deve-se escolher o algoritmo iterativo pretendido (*Iterative Algorithm*); na presente dissertação foi seleccionado o *Newton-Raphson Mode 1* visto ser o mais apropriado para o caso de estudo adotado.

ii. Convergence Criterion

De seguida deve-se escolher o critério de convergência (*Convergence Criterion*), existindo a possibilidade de ser pela norma do deslocamento (*Displacement Norm*), pela norma da força (*Force Norm*) ou pela energia (*Energy*); foi utilizado nesta dissertação o critério de convergência relativo à energia.

iii. Tolerance in Each Combination

A tolerância de cada combinação (*Tolerance in Each Combination*) utilizada nesta dissertação foi de 1.00×10^{-3} . Este será o erro máximo admitido durante o cálculo das iterações. Uma vez que o erro é menor que a tolerância estipulada, a combinação converge e passa à combinação seguinte. Caso numa determinada combinação, o erro das suas iterações não consiga baixar a tolerância introduzida pelo utilizador, geralmente ocorre o efeito Ping-Pong fazendo com que não haja convergência para a combinação em causa e seja necessário aumentar o *Displacement Increment* (ponto vi).

O efeito *Ping-Pong* anteriormente mencionado refere-se à situação em que o erro de várias iterações de uma combinação, durante o cálculo do *femix*, não converge, aumentando e diminuindo o seu valor. Assim, não segue a sequência normal de convergência em que o erro vai diminuindo ao longo das iterações, para cada combinação, até um valor estipulado previamente (*Tolerance in each combination*), de forma a convergir e a transitar para a próxima combinação.

iv. Maximum Number of Iteration in Each Combination

Como se pode observar na Figura 3.34b., é necessário definir o número máximo de iterações de cada combinação (*Maximum Number of Iteration in Each Combination*) e 400 foi o valor estipulado no âmbito do estudo realizado na presente dissertação.

v. Node Number

A tradução de *Node Number* para a língua portuguesa é “número do nó” e, neste contexto, refere-se precisamente ao número do nó da malha de elementos finitos onde será aplicado o incremento de descolamento (*Displacement Increment*).

vi. Displacement Increment

O incremento de deslocamento será o valor do deslocamento aplicado no *Node Number*, que na presente dissertação foi aplicado inicialmente um deslocamento de -1 na direção de *y* (*Degree of Freedom = y*).

vii. Number of Combinations Before Restart

Para que se compreenda melhor esta funcionalidade é necessário previamente explicar o conceito de *Restart*. Esta ferramenta, que traduzida para a língua portuguesa significa “recomeço”, tem como função reiniciar o cálculo do *femix* na combinação que se pretende. Por exemplo, se forem definidas 400 combinações e na combinação 290 aparece a mensagem de erro do *femix* na qual refere que a combinação não convergiu, devido ao erro das iterações efetuadas nessa combinação, não ser menor que a tolerância admitida para cada combinação, pode-se utilizar a ferramenta *restart* introduzindo o número de 289 (tem de ser sempre a última combinação que convergiu com sucesso), aumentando de seguida o incremento de deslocamento. Este procedimento repete-se o número de vezes necessárias até que todas as combinações converjam. Na Tabela 3.7 pode-se observar todos os *Restart* utilizados no *femix* no âmbito das 4 vigas em estudo (REF. S1-M, S2-M e S3-M).

viii. Maximum Number of Arc Length Combinations

O número máximo de combinações do *arc length* será o número de combinações que irão ser calculadas para um determinado incremento de deslocamento. Por exemplo, se se colocar neste parâmetro o valor de 100 e o incremento de deslocamento for de -0.2, o modelo numérico irá calcular até um deslocamento total de 20 mm ($100 \times 0.2 = 20$) num determinado nó escolhido pelo utilizador (*Node Number*). Utilizando a ferramenta *restart*: se o modelo convergir até à 90^a combinação com um incremento de -0.1 e na 91^a combinação já não converge, deve-se utilizar a função *restart* na combinação 90^a e aumentar o incremento para -0.15 até à 100^a. O deslocamento total no nó pretendido pelo utilizador será igual a 10.5mm ($90 \times 0.1 + 10 \times 0.15$).

Tabela 3.7 - Alteração dos incrementos para a função *restart*.

Vigas	Combinação (<i>Restart</i>)	Incremento	Flecha a meio-vão (mm)
REF	0 - 450	-0.1	45
S1-M	0 - 315	-0.1	41.4
	316 - 345	-0.15	
	346 - 372	-0.20	
S2-M	0 - 256	-0.1	49.05
	257 - 261	-0.15	
	262 - 265	-0.2	
	266 - 331	-0.25	
	332 - 351	-0.3	
S3-M	0 - 208	-0.1	52.75
	209 - 253	-0.15	
	254 - 303	-0.2	
	304 - 366	-0.25	

ix. Displacement Control e Arc Length Parameters

Para estes parâmetros foram utilizados, nesta dissertação, os valores que estavam por defeito do *femix*.

Após o utilizador preencher todos os parâmetros relativos à alteração do modelo numérico de comportamento linear para um modelo numérico de comportamento não linear material, seguindo a ordem anteriormente descrita, é necessário pressionar *Accept* para que sejam guardadas as alterações efetuadas. De seguida é possível executar o *femix*. Logo que surja a mensagem de sucesso de cálculo do *femix*, igual à referida no ponto 3.5 deste capítulo, é possível proceder ao tratamento dos resultados obtidos pelo *femix* utilizando as potencialidades dos softwares *posfemix* e *GID*.

3.7 - Posfemix-GID

Este tópico destina-se a descrever o processamento dos resultados obtidos após o cálculo efetuado anteriormente no *femix*, usando para tal o software *posfemix*. No final do cálculo efetuado pelo *femix*, tal como referido anteriormente, irá aparecer uma mensagem semelhante à da Figura 3.35a, onde aparece o registo de conclusão de todos os cálculos de todas as

combinações com sucesso. Para prosseguir com o *posfemix*, deve-se em primeiro lugar fechar a janela da mensagem de sucesso do *femix*, e na segunda janela *cmd.exe* que irá surgir, deve-se utilizar o comando *help* (ajuda). Este irá apresentar todos os comandos existentes no software *posfemix* (Figura 3.35b). Uma vez que o utilizador esteja contextualizado com o software, pode avançar esta etapa da introdução do comando *help* e escrever diretamente os comandos que pretende na janela do *posfemix* que surge quando se fecha a janela da mensagem de sucesso de cálculo.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Residual norm = 1.608169943849e-003
Residual norm = 1.531694075303e-003
Residual norm = 1.462922428456e-003
Residual norm = 1.401004354794e-003
Residual norm = 1.345691614270e-003
Residual norm = 1.296719613070e-003
Residual norm = 1.252207096752e-003
Residual norm = 1.211202904006e-003
Residual norm = 1.173095060094e-003
Residual norm = 1.130941155092e-003
Residual norm = 1.106631132957e-003
Residual norm = 1.076687824877e-003
Residual norm = 1.049079177710e-003
Residual norm = 1.023834952576e-003
Residual norm = 1.000205156612e-004
Residual norm = 9.783005456188e-004

End of femix
### Success ###

C:\Users\Rafael\Desktop\Universidade\5
rática GID\FEMIX\Dissertação\Uigas
ia\Uiga_s1-m-n.gid>

Job name = Uiga_ref1_n
Reading file: Uiga_ref1_n_ctrl.dat
Reading file: Uiga_ref1_n_g1.bin
Command (to obtain the command list type help) [accsv] help
You answered: help

Available commands:
accsv - write the accelerations in the file jobname..._ac.csv
cps3d - write the crack pattern in the file jobname..._cp.s3d
cs3d - write element coordinate systems in the file jobname..._cs.s3d
dicsv - write the displacements in the file jobname..._di.csv
dipva - write the displacements in the file jobname..._di.pva
dms3d - write the deformed mesh in the file jobname..._dm.s3d
ecsv - write the execution parameters in the file jobname..._ep.csv
eplpt - write the execution parameters in the file jobname..._ep.lpt
evs3d - write the eigen values and eigen vectors in the file jobname..._ev.s3d
g1lpt - write the geometry and load in the file jobname..._g1.lpt
hdcsv - write the historical data (nonlinear analysis) in the file jobname..._hd.csv
ifcsv - write the internal equivalent nodal forces in the file jobname..._if.csv
ipp3d - write the integration points in the file jobname..._ip.s3d
mes3d - write the undeformed mesh in the file jobname..._me.s3d
pzs3d - write the plastic zone information in the file jobname..._pz.s3d
rslpt - write the reinforcement design results in the file jobname..._rd.lpt
rdpva - write the reinforcement design results in the file jobname..._rd.pva
reCSV - write the reactions in the file jobname..._re.csv
rslpt - write the results in the file jobname..._rs.lpt
sapva - write the strains in the file jobname..._sa.pva
sepva - write the stresses in the file jobname..._se.pva
srpva - write the stress resultants in the file jobname..._sr.pva
svCSV - write the vonMises in the file jobname..._sv.csv
opppa - write the consumed out-of-plane shear fracture energy in the file jobname..._op.pva
tempa - write the temperatures in the files jobname..._te.pva
teCSV - write the temperatures in the file jobname..._te.csv
tdCSV - write the stop duration in the file jobname..._td.csv
tegid - write the geometry and temperature variation load in the file jobname..._te.gid
fr.lpt - write the consumed mode I fracture energy in the file jobname..._gf.lpt
or - write the crack displacements in the file jobname..._cr.pva
crlpt - write the crack displacements in the file jobname..._cr.lpt
end - terminate posfemix
  
```

Figura 3.35 - Início do tratamento de resultados no *posfemix*.

Na presente dissertação, foram utilizados diversos comandos na utilização dos *posfemix*, nomeadamente: *recsv*, *dicsv*, *rslpt*, *sepva*, *sapva*, *hdcsv*, *dms3d* e *cps3d*. Cada um deles será explicado detalhadamente neste tópico, uma vez que foram os principais comandos e os que maior importância têm para o efeito desta dissertação. É necessário destacar que, antes de prosseguir com o tratamento dos resultados, é necessário calibrar o modelo numérico. Para tal, apenas serão necessários os comandos *recsv* e *dicsv*.

3.7.1 - Reações (*recsv*)

O comando *recsv* tem a função de criar um ficheiro em formato excel e de colocar lá todas as reações de um determinado ponto da malha de elementos finitos, previamente escolhido pelo utilizador (*point* na Figura 3.36). Se for pretendido as reações para todos os casos de carga em *N. of load cases* (nº de casos de carga) deve-se escrever *all*. No presente estudo o ponto (*point*) a ser introduzido era o referente ao apoio duplo da viga. Para posteriormente se aceder ao ficheiro excel criado com as reações, é necessário abrir a pasta relativa à diretoria do ficheiro GID (*jobname.gid*) e estará nessa mesma diretoria um ficheiro *jobname_re* com os dados das reações para cada combinação.

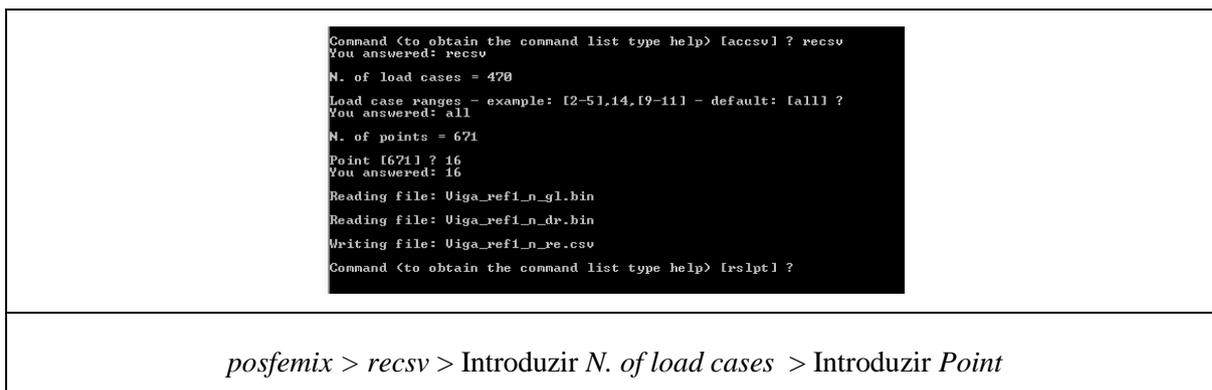


Figura 3.36 - Função *recsv* para cálculo de reações.

3.7.2 - Deslocamentos (*dicsv*)

O comando *dicsv* tem uma função muito similar ao comando anteriormente descrito. Com efeito com este comando é armazenado num ficheiro em formato excel todos os incrementos de deslocamento que ocorreram em cada combinação. Este ficheiro irá efetuar uma lista que relaciona cada combinação com o respetivo incremento acumulado (para cada combinação o valor do deslocamento será sempre a soma dos incrementos das combinações anteriores com o incremento da combinação atual). Na Tabela 3.7 apresenta-se o deslocamento total (flecha a meio-vão) para as quatro vigas analisadas. Este deslocamento está especificado individualmente por combinação no ficheiro *jobname_di*, na diretoria *jobname.gid*.

Para o tratamento dos resultados obtidos no ficheiro em excel quer do comando *recsv*, quer do *dicsv*, é necessário ter atenção como os valores são apresentados. De seguida será descrito como proceder para o tratamento dos dados após a criação do ficheiro excel, uma vez que se tem de transformar o “Texto para Colunas”:

1. Selecionar todos os dados da coluna A da folha de excel *jobname_re / jobname_di*;
2. Efetuar procedimento descrito na Figura 3.37.

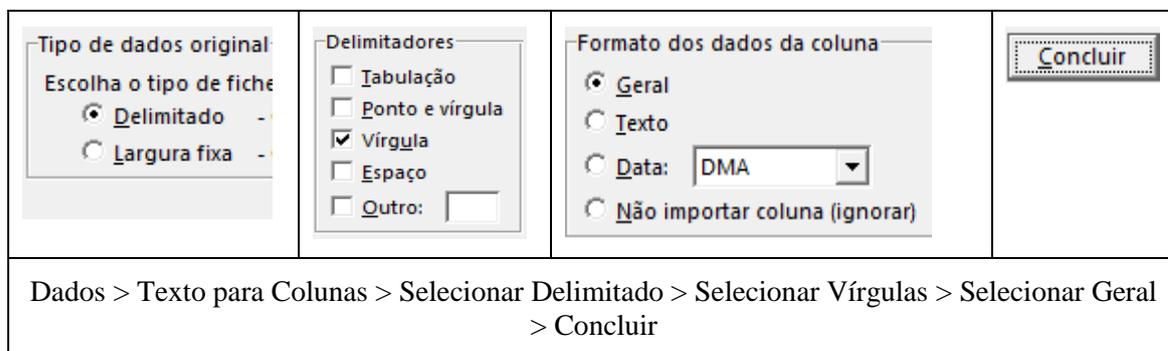


Figura 3.37 - Tratamento dos resultados da função *recsv* e *dicsv* no formato Excel.

O valor da coluna C da folha de excel, representa a reação em unidades de Newton, no ponto da malha escolhido previamente. Na presente dissertação, o passo seguinte foi avaliar a relação entre a reação obtida pelo *femix* e o valor da força aplicada no ensaio experimental. A reação representava $\frac{1}{2}$ da força aplicada (F), após efetuar o cálculo segundo a lei da estática ($\Sigma F_y=0$), como se pode analisar na Figura 3.38.

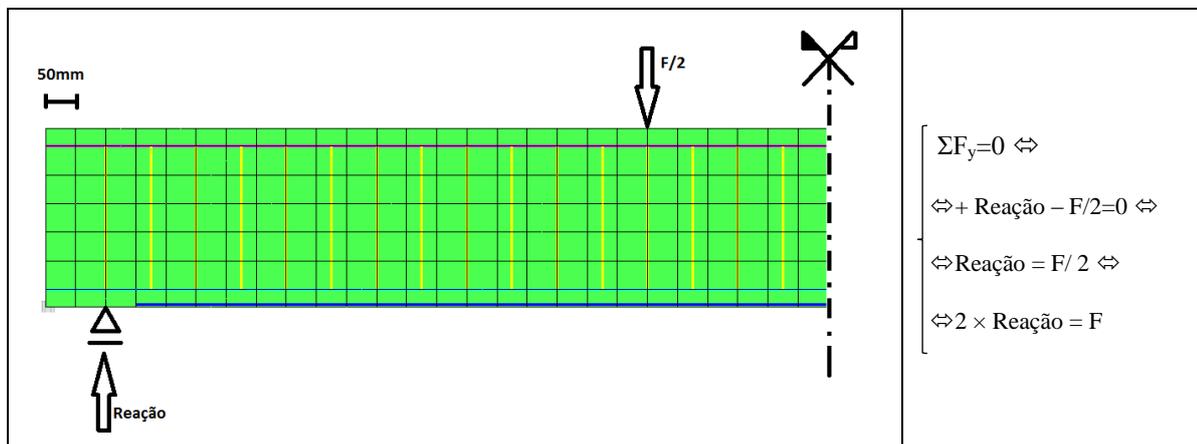


Figura 3.38 - Relação da reação no apoio com a força aplicada.

Uma vez que se tem o conhecimento da relação entre a reação do apoio e a força aplicada, é possível construir o gráfico força *vs.* flecha a meio-vão, uma vez que para cada combinação, através das funções *recsv* e *dicsv*, existe uma força e o correspondente deslocamento. A calibração do modelo numérico é feita comparando a relação força *vs.* flecha a meio-vão do modelo numérico com a relação força *vs.* flecha a meio-vão obtida nos ensaios experimentais. Efetuando uns pequenos ajustes dos parâmetros dos materiais no modelo numérico, tais como a energia de fratura do betão, as extensões das armaduras e também nos parâmetros do diagrama de tensão de amolecimento em tração do betão, foi possível calibrar o modelo numérico. Na Figura 3.39 apresentam-se, a título de exemplo, as curvas numérica e experimental da viga de referência (Viga REF), verificando-se uma excelente aproximação entre os resultados numéricos e os experimentais. No capítulo 4 desta dissertação será apresentado o resultado obtido para as restantes vigas analisadas.

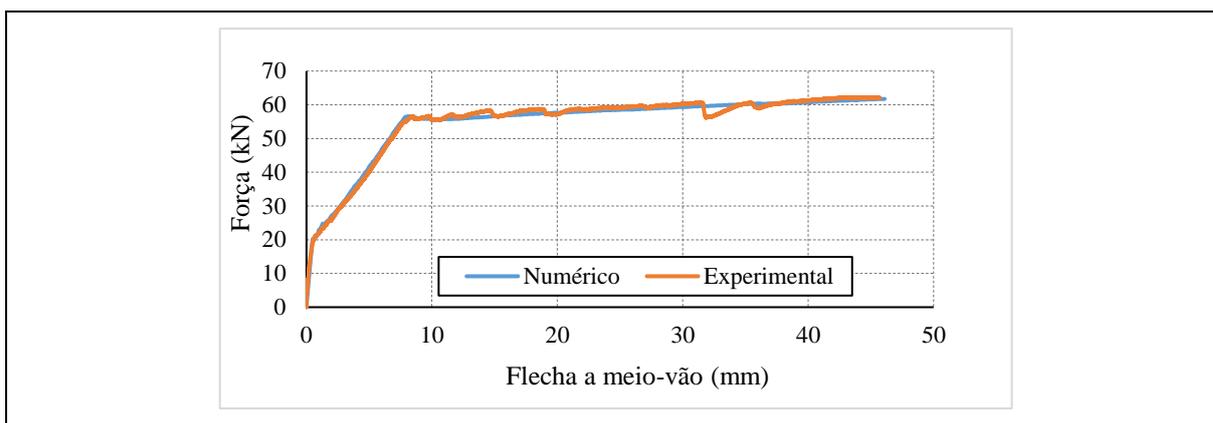


Figura 3.39- Curva força vs. flecha a meio-vão da viga de referência: numérico vs. experimental.

3.7.3 - Resultados deslocamentos e reações (*rsplt*)

O comando *rsplt* usualmente é utilizado logo após ter terminado o cálculo no *femix*, uma vez que o modelo numérico esteja calibrado. Tem como função criar um ficheiro que guarda todos os dados relativos aos deslocamentos e reações, para cada combinação. O procedimento para utilizar esta ferramenta é o seguinte:

- i. *posfemix* > *rsplt* > *all* (premir ENTER) > *yes* (premir ENTER)
- ii. *GID* > *Postprocess* > *Window* > *View Results* > Selecionar em *View: Contour Fill* > *Displacement* ou *Reactions* > Selecionar a direção pretendida (*x*, *y* ou *z*) e premir *Apply*.

Desta forma será possível visualizar graficamente os resultados relativos aos deslocamentos e reações, para todas as combinações e para todos os elementos finitos da viga.

3.7.4 - Tensões (*sepva*)

O comando *sepva* tem como função criar um ficheiro onde irá armazenar as tensões existentes nos materiais que se pretender conhecer. Para tal o procedimento é o seguinte:

- i. *posfemix* > *sepva* > *Default sampling point location (y)* > *N. of Load cases (all)* > *Scalar field smoothing (y)* > *Split elements (n)* > *Group name (1)* e premir ENTER;
- ii. *GID* > *Files* > *Open multiple* > Selecionar os ficheiros *...Stress_strain.post.msh* e *Stress_strain.post.res*;
- iii. *Window* > *View Results* > Selecionar em *View: Contour Fill* > *Stress* > Selecionar direção *x*, *y* ou *z* > *Apply*.

Referente à opção *Group name*, o software questiona para qual elemento se pretende extrair as tensões lá instaladas. Na presente dissertação pretendia-se analisar as tensões no betão, logo deve-se calcular para o *Group name 1*.

Como exemplo de um possível resultado das tensões do betão numa viga, pode-se observar a viga de referência da presente dissertação, na combinação 8, referente ao início da cedência das armaduras, na Figura 3.40

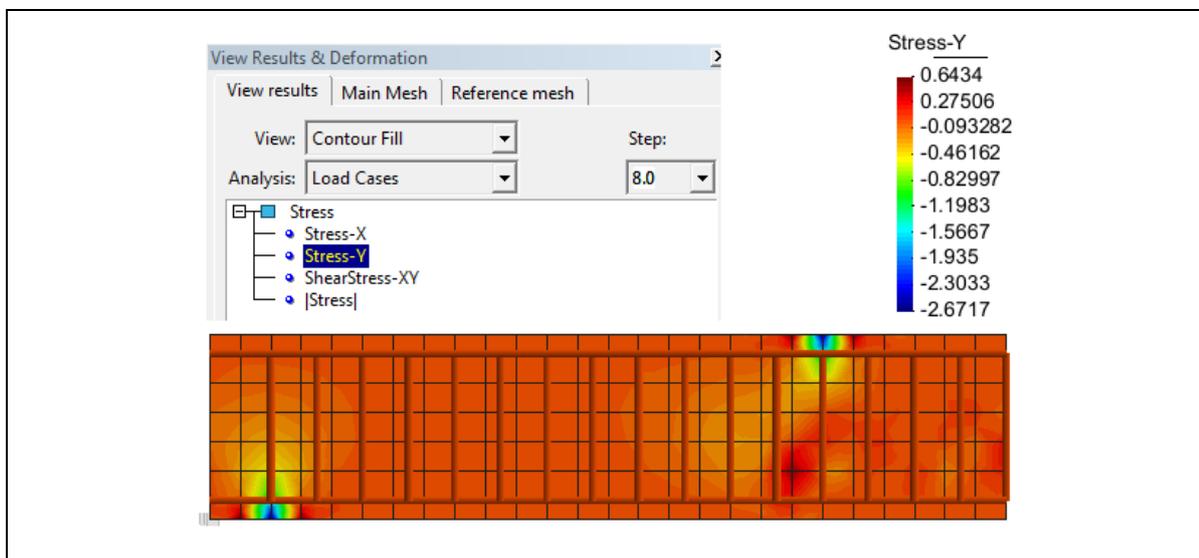


Figura 3.40 - Representação gráfica das tensões instaladas no betão da viga de referência.

3.7.5 - Extensões (*sapva*)

O comando *sapva* tem como função criar um ficheiro onde irá armazenar as extensões dos elementos pretendidos (betão, armaduras ou CFRP). O procedimento a seguir é semelhante ao descrito anteriormente (comando *sepva*). Como exemplo, na Figura 3.41 apresenta-se para o caso da viga de referência, as extensões do betão na direção x referente à combinação 8, referente ao início da cedência das armaduras.

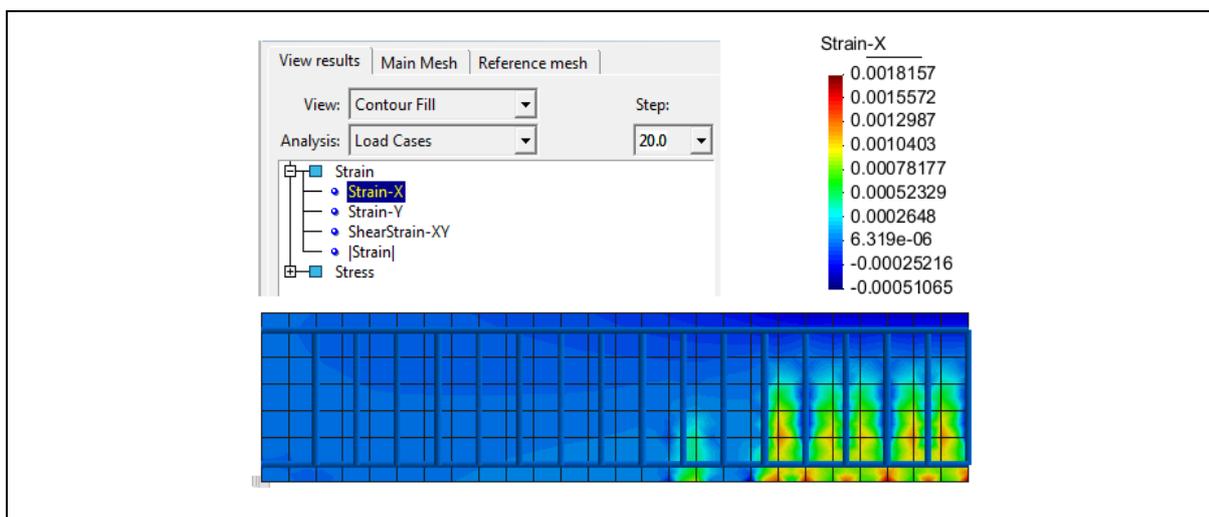


Figura 3.41 - Representação gráfica das extensões instaladas no betão da viga de referência.

3.7.6 - Histórico das extensões dos elementos finitos (*hdcsv*)

O comando *hdcsv* tem como objetivo extrair as extensões relativas às combinações pretendidas, de um determinado elemento escolhido da malha de elementos finitos. Desta forma, é possível determinar o seu histórico de extensões. O procedimento necessário para a utilização desta função é o seguinte:

- Após introduzir *hdcsv* no *posfemix*, deve-se pressionar “e” e premir ENTER (desta forma é escolhido o tipo de modelo não linear – elemento);
- Introduzir as combinações em que se pretende analisar as extensões (ENTER se se pretende para todas as combinações);
- Introduzir o elemento da malha de elementos finitos;
- Introduzir o número de pontos de integração (o software tem por defeito dois, para continuar é apenas necessário pressionar ENTER);

Uma vez realizado este procedimento, será criado na diretoria *jobname.GID* um ficheiro de dados com o nome de *jobname_..._hd_csv*, o qual poderá ser aberto com o excel ou com o bloco de notas.

3.7.7 - Malha deformada (*dms3d*)

O comando *dms3d* tem como objetivo reproduzir a malha de elementos finitos deformada (ver exemplo da Figura 3.42), para uma combinação a determinar pelo utilizador. Para que seja possível abrir a malha deformada obtida através do *posfemix*, deve-se abrir o ficheiro *jobname_dm_s3d*, utilizando a função *importar* com o software *drawmesh*.

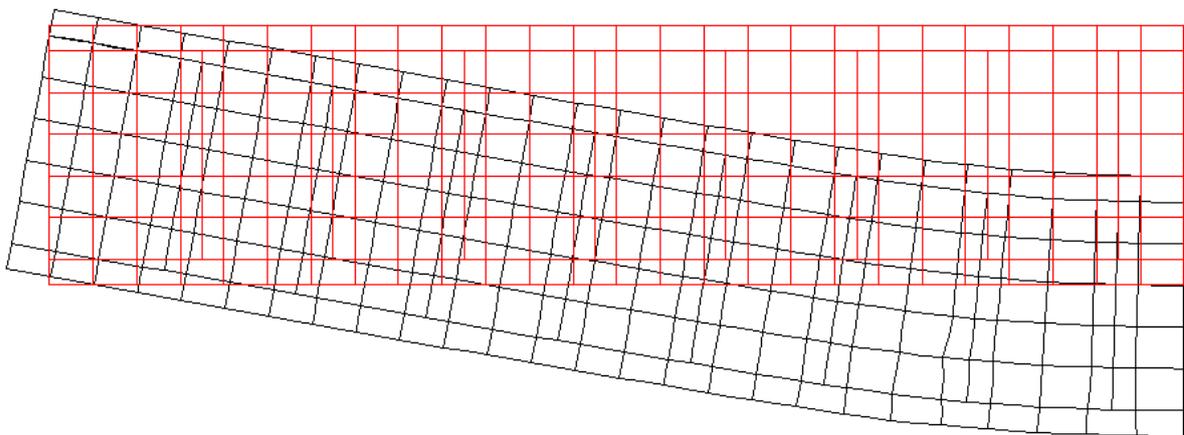


Figura 3.42 - Representação gráfica da deformação da malha de elementos finitos da viga de referência.

3.7.8 - Padrão de fendilhação (*cps3d*)

O comando *cps3d* destina-se à apresentação do padrão de fendilhação da estrutura mediante a combinação desejada. O padrão de fendilhação pode conter fendas em diferentes estados, isto é, as fendas podem ser iniciais (*initiating*), podem estar a abrir (*opening*), podem estar a fechar (*closing*), podem já estar fechadas (*closed*), podem estar a voltar a abrir (*reopening*) ou podem estar completamente abertas (*fully open*). Na Figura 3.43 consegue-se observar cada uma das fases das fendas acima descritas.

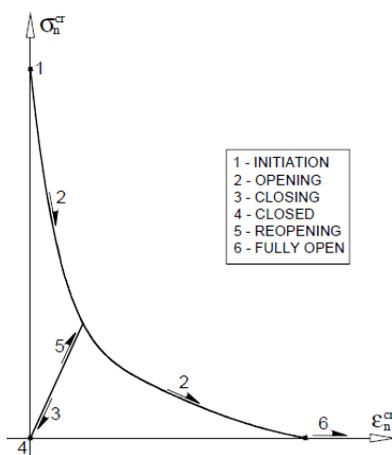


Figura 3.43 - Estados das fendas (Sena Cruz, 2004).

Na Figura 3.44 apresenta-se a título de exemplo a comparação entre o padrão de fendilhação final instalado na viga de referência obtido experimentalmente (fotografia) e o padrão de fendilhação final instalado na viga de referência obtido numericamente.

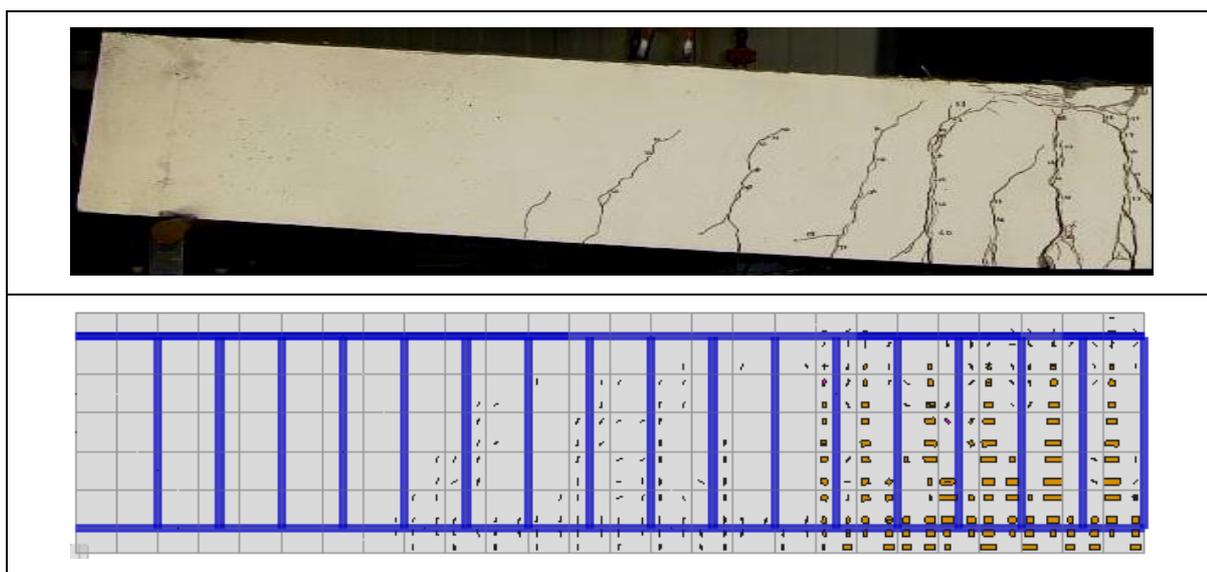


Figura 3.44 - Padrão de fendilhação experimental (em cima) e numérico (em baixo) da viga de referência.

Estes oito comandos do *posfemix* acima explicados detalhadamente, foram cruciais no tratamento dos resultados obtidos através do *femix* para esta dissertação. O software *GID* tem ainda outra potencialidade que possibilita a criação de um vídeo sequencial para a deformação da viga ao longo das combinações. Esta animação de vídeo é feita da seguinte forma:

i. Deformação da malha de elementos finitos (Figura 3.45):

- *posfemix* > *rsplt* > *Window* > *View Results* > *Displacement* > *X,Y ou Z* > *Main Mesh* > Selecionar *Deformed* > *Apply*;

ii. Vídeo sequencial da deformação da malha:

- *Window* > *Animate* > pressionar ícone *Play*.

É necessário que se cumpra o tópico i (deformação da malha de elementos finitos) antes de proceder para o tópico ii (vídeo sequencial da deformação da malha). Para acelerar o vídeo é apenas necessário reduzir o *delay between steps* que representa a duração de tempo entre a passagem de cada combinação, uma vez que o valor utilizado por defeito é demasiado longo (200ms). O aconselhável será entre 50 a 100 ms.

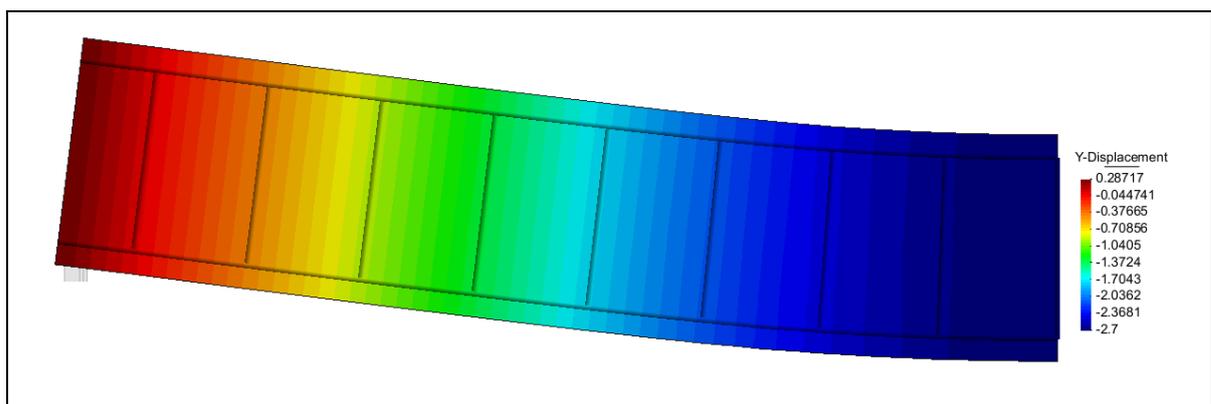


Figura 3.45 - Representação gráfica dos deslocamentos na direção Y da viga de referência.

O objetivo deste capítulo foi descrever todo o procedimento que conduziu à calibração do modelo numérico e modelação do comportamento das quatro vigas ensaiadas experimentalmente por Dias *et al.* (2012). Na primeira parte do Capítulo 4 desta dissertação serão apresentados os resultados da referida modelação.

Capítulo 4

Resultados Numéricos vs. Resultados experimentais e Estudos Paramétricos

4.1 - Introdução

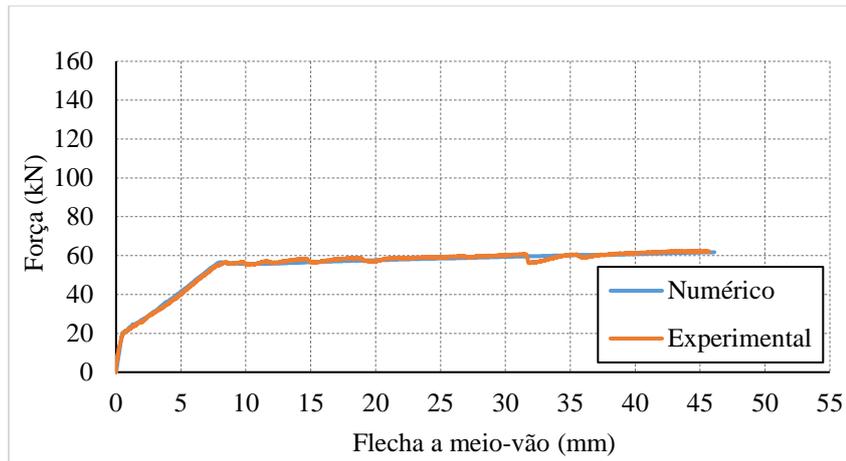
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na modelação de quatro vigas de betão armado, uma de referência sem reforço de CFRP e três reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos: a viga S1-M com 1 laminado, a viga S2-M com dois laminados e a viga S3-M reforçada com três laminados de acordo com a disposição apresentada na Figura 2.14 do Capítulo 2 desta dissertação. Os resultados obtidos via modelação numérica serão comparados com os resultados experimentais obtidos por Dias *et al.* (2012) em termos da relação força vs. flecha a meio-vão das vigas, do padrão de fendilhação final instalado nas vigas, da força correspondente ao início de fendilhação do betão, da força correspondente à entrada em cedência das armaduras longitudinais tracionadas, a força máxima suportada pelas vigas e respetiva flecha a meio-vão. Tendo como base a modelação numérica anteriormente referida, neste capítulo também serão apresentados os resultados de um estudo paramétrico efetuado por forma a avaliar a influência de um conjunto de parâmetros no desempenho de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos: a classe de resistência do betão, a percentagem de armadura longitudinal e a percentagem de CFRP.

4.2 - Resultados numéricos vs. resultados experimentais referentes às vigas testadas por Dias *et al.* (2012)

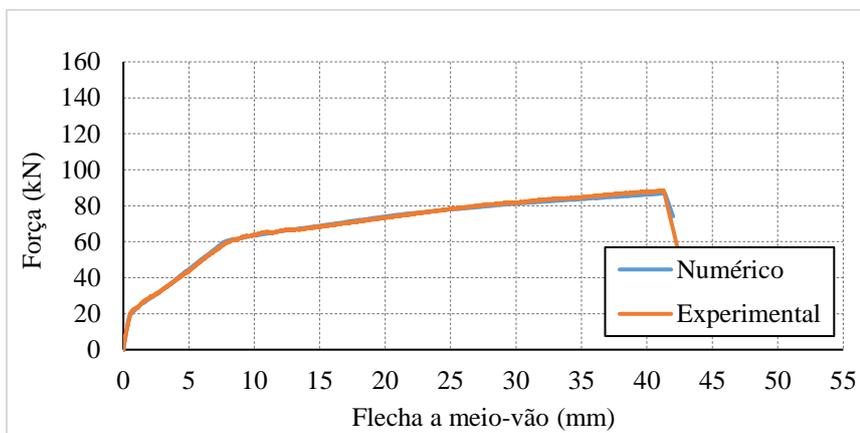
Nesta secção será feita uma comparação entre os resultados obtidos numericamente e os resultados obtidos experimentalmente nas vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012). A modelação das vigas foi feita de acordo com o descrito no Capítulo 3 desta Dissertação. A comparação “numérico vs. experimental” será feita em termos da relação força vs. flecha a meio-vão das vigas, do padrão de fendilhação final instalado nas vigas, da força correspondente ao início de fendilhação do betão, da força correspondente à entrada em cedência das armaduras longitudinais tracionadas, a força máxima suportada pelas vigas e respetiva flecha a meio-vão.

4.2.1 - Relação força vs flecha a meio-vão

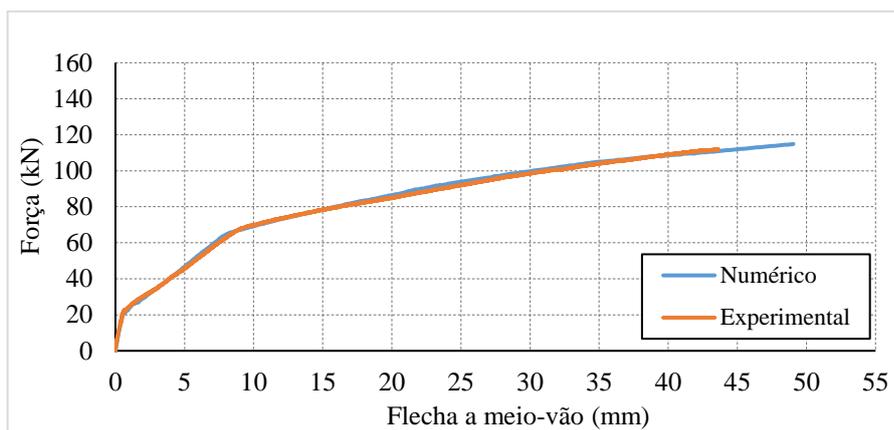
Na Figura 4.1 apresenta-se, para cada uma das quatro vigas analisadas (viga de referência, viga S1-M, viga S2-M e viga S3-M), a relação força vs. flecha a meio-vão em termos numérico e experimental. Na Figura 4.2 apresenta-se a relação força vs. flecha a meio-vão, numérica e experimental das quatro vigas anteriormente referidas.



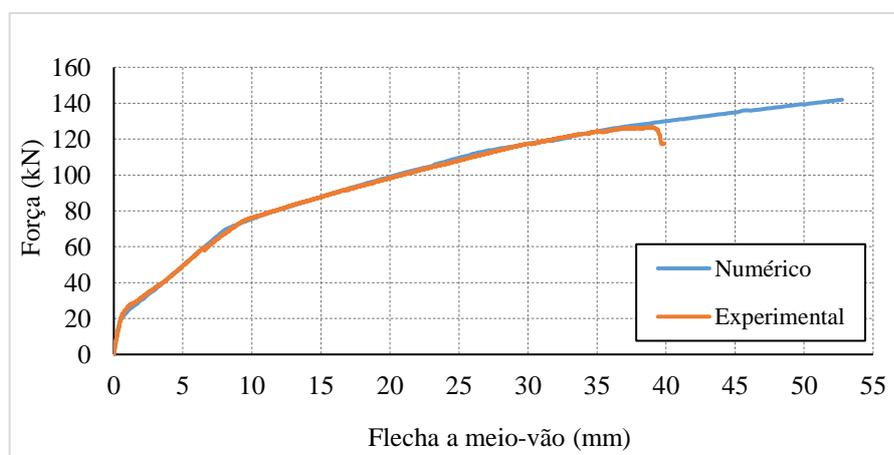
a) Viga de referência.



b) Viga S1-M.



c) Viga S2-M.



d) Viga S3-M.

Figura 4.1 - Relação força vs. flecha a meio-vão de cada uma das vigas analisadas (numérico vs. experimental).

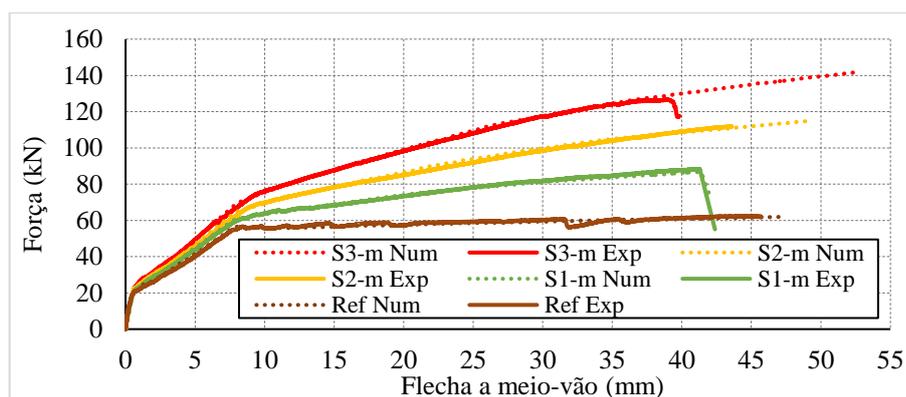


Figura 4.2 - Relação flecha a meio-vão vs. força das 4 vigas ensaiadas numericamente e experimentalmente.

Após a análise das Figuras 4.1 e 4.2, é possível concluir que as curvas numéricas das vigas reforçadas com CFRP, à semelhança do que se registou experimentalmente, apresentam três fases distintas de comportamento: até à fendilhação do betão (Fase 1), entre a fendilhação do

betão e a cedência das armaduras (Fase 2) e entre a cedência das armaduras e a carga máxima (Fase 3), com uma diminuição sucessiva da rigidez ao passar de uma fase para outra (da fase 1 até à fase 3). A diminuição de rigidez na terceira fase foi tanto maior quanto menor a percentagem de CFRP. Relativamente à terceira fase das curvas força *vs.* flecha a meio-vão das vigas S2-M e S3-M, é possível observar que existe um desfasamento considerável quanto à carga máxima resistente e respetiva flecha a meio-vão, entre o valor experimental e o valor numérico. A explicação para este acontecimento resume-se ao modo de rotura adotado para a calibração dos modelos numéricos, isto é, para a viga S1-M, uma vez que no ensaio experimental, a viga teve como modo de rotura a rotura dos laminados CFRP, esta foi calibrada numericamente para ter como modo de rotura, a rotura dos laminados de CFRP. Para que os resultados dos estudos paramétricos que posteriormente se iriam fazer, tivessem credibilidade científica, os laminados de CFRP das vigas S2-M e S3-M tiveram exatamente as mesmas características que as características utilizadas na viga S1-M (tensão e extensão de rotura, assim como respetivo módulo de elasticidade). Uma vez que no ensaio laboratorial, as vigas S2-M e S3-M obtiveram modos de rotura por destacamento dos laminados CFRP do betão de recobrimento, estas não utilizaram a totalidade da capacidade resistente dos laminados aplicados como reforço nas vigas, durante o carregamento. Dado que o software utilizado não permite simular numericamente vigas que tenham como modo de rotura o destacamento do CFRP, os resultados numéricos obtidos para a viga S2-M e S3-M referem-se ao máximo aproveitamento das capacidades resistentes dos laminados de CFRP, tendo estas vigas como modo de rotura, a rotura dos laminados CFRP.

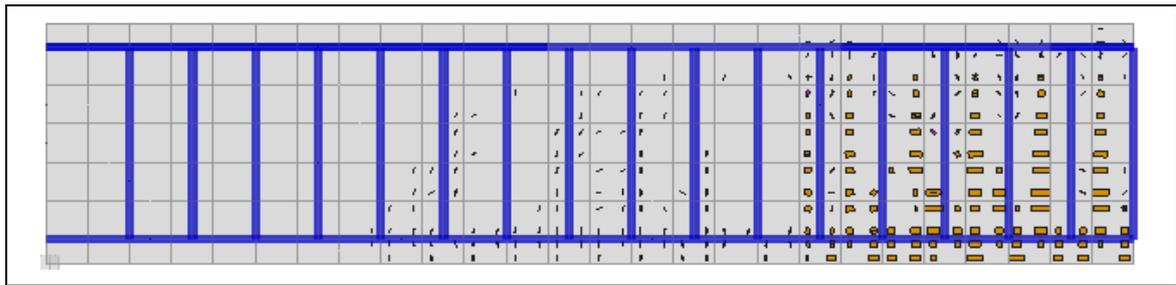
Em termos de condições de serviço, as quatro vigas obtiveram resultados numéricos com aproximações muito elevadas aos resultados experimentais, o mesmo não se passou relativamente em termos de estado limite último, designadamente nas vigas S2-M e S3-M, como foi acima explicado.

4.2.2 - Padrão de fendilhação final instalado nas vigas

Nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresenta-se, respetivamente, para as vigas de referência, S1-M, S2-M e S3-M a comparação entre o padrão de fendilhação final registado nos ensaios experimentais com o padrão de fendilhação final instalado nas vigas obtido numericamente. De acordo com as fotografias das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, os modos de rotura que ocorreram nas vigas nos ensaios experimentais realizados foram: esmagamento do betão na viga de referência; rotura do CFRP na viga S1-M, destacamento do CFRP nas vigas S2-M e S3-M.



a)

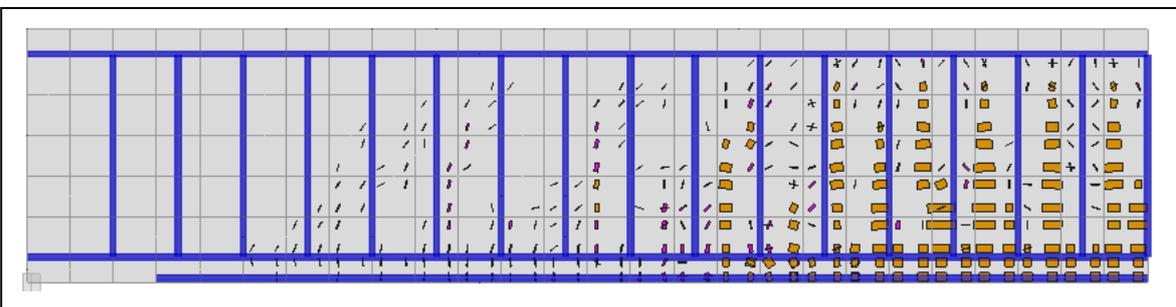


b)

Figura 4.3 - Padrão de fendilhação final instalado na viga de referência: a) verificado no ensaio experimental; b) obtido no âmbito da modelação numérica.



a)

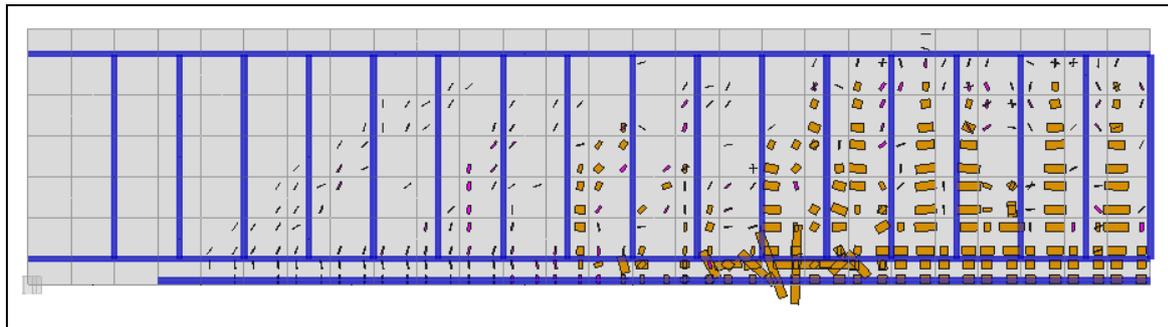


b)

Figura 4.4 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S1-M: a) verificado no ensaio experimental; b) obtido no âmbito da modelação numérica.



a)

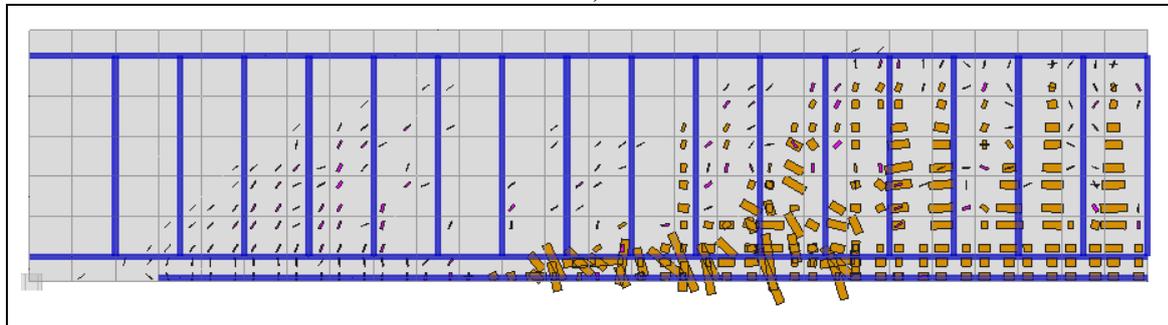


b)

Figura 4.5 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S2-M: a) verificado no ensaio experimental; b) obtido no âmbito da modelação numérica.



a)



b)

Figura 4.6 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S3-M: a) verificado no ensaio experimental; b) obtido no âmbito da modelação numérica.

4.2.3 - Tensões e extensões nas armaduras

As tensões e extensões de um material são os parâmetros que controlam o seu comportamento quando este está sujeito a esforços. Por este motivo, estes valores têm de ser controlados, de forma a que o material tenha o comportamento desejado e já devidamente previsto quando ensaiado. Na Tabela 4.1 estão apresentadas as tensões e a extensões máximas para o aço, determinadas através do software de cálculo *posfemix*. As extensões máximas para o CFRP são já conhecidas (0.025) uma vez que o modo de rotura dos modelos numéricos de todas vigas reforçadas foi a rotura do laminado CFRP.

Tabela 4.1 - Tensões e extensões máximas numéricas no aço na direção X para as quatro vigas ensaiadas.

Vigas	Extensão X	Tensão X (MPa)
referência	1.15E-03	217.2
S1-M	3.05E-03	483.2
S2-M	4.16E-03	564.0
S3-M	3.88E-03	513.7

A Figura 4.7 representa graficamente os valores obtidos para as extensões do aço apresentadas na Tabela 4.1, comparando estes com a extensão máxima das armaduras longitudinais de tração, de forma a demonstrar que estas estavam abaixo da sua extensão rotura.

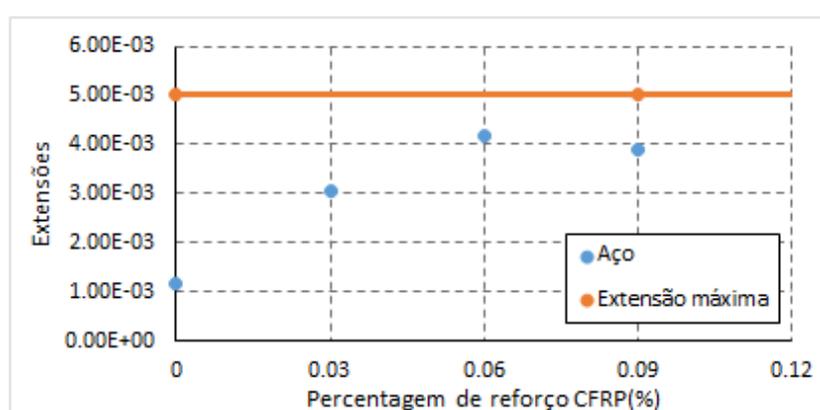


Figura 4.7 - Tensões e extensões máximas numéricas no aço na direção X para as quatro vigas ensaiadas.

Das tensões e extensões extraídas do software de cálculo, podem-se retirar as seguintes conclusões:

- A Viga S2-M foi a viga em que se verificou a máxima extensão nas armaduras com $4.16E-3$, como se pode observar na Figura 4.7, ficando abaixo da extensão última definida para a armadura de $5.0E-2$;
- A máxima tensão nas armaduras ocorreu na viga S2-M, com 564 MPa ficando abaixo da tensão de rotura das armaduras de 661 MPa;

4.2.4 - Carga de fendilhação, carga de cedência das armaduras, carga máxima e respetiva flecha a meio-vão

Na Tabela 4.2 apresentam-se, para cada uma das vigas analisadas, os valores obtidos na modelação numérica (Num.) e experimentalmente (Exp.) da carga de início de fendilhação do betão (F_{cr}), da carga correspondente ao início da cedência das armaduras (F_{sy}), da carga máxima resistente da viga (F_{max}) e respetiva flecha meio-vão (u_{Fmax}). Além disso, na referida tabela também se apresenta o valor do erro dos resultados numéricos em relação aos experimentais. Referente à Tabela 4.3, apresenta-se nesta a flecha a meio-vão numérica e a flecha a meio-vão experimental das 4 vigas ensaiadas, assim como o erro entre estes. Na Tabela 4.4 apresenta-se, em função da percentagem de CFRP (ρ_f), o valor dos acréscimos de carga, numérico e experimental, proporcionados pelas soluções de reforço testadas em termos de carga de cedência das armaduras e carga máxima. Os referidos acréscimos, em função da percentagem de CFRP estão também representados na Figura 4.8.

Tabela 4.2 - Carga de fendilhação, carga de cedência das armaduras e carga máxima.

Vigas	F_{cr} (kN)		Erro (%)	F_{sy} (kN)		Erro (%)	F_{max} (kN)		Erro (%)
	Num.	Exp.		Num.	Exp.		Num.	Exp.	
Referência	21.36	20.10	6.3	55.76	56.60	1.5	61.60	62.30	1.1
S1-M	21.54	21.00	2.6	63.39	62.40	1.6	86.33	88.40	1.7
S2-M	22.14	22.20	0.3	69.24	69.50	0.4	114.84	111.90	2.6
S3-M	22.54	24.00	6.1	75.42	76.00	0.8	141.93	126.60	12.1

Tabela 4.3 - Flecha a meio-vão numérica vs. experimental correspondente à carga máxima das quatro vigas.

Vigas	u_{Fmax} (Num.) (mm)	u_{Fmax} (Exp.) (mm)	Erro (%)
Referência	45.00	45.10	0.22
S1-M	41.40	41.20	0.49
S2-M	49.05	43.60	12.50
S3-M	52.75	38.90	35.60

Tabela 4.4 - Variação dos acréscimos de carga de cedência das armaduras e da carga máxima aumentando a percentagem de CFRP.

Vigas	ρ_f (%)	Acréscimo de carga de cedência das armaduras (%)		Acréscimo carga máxima (%)	
		Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
S1-M	0.03	14	10	41	42
S2-M	0.06	24	23	86	80
S3-M	0.09	35	34	130	103

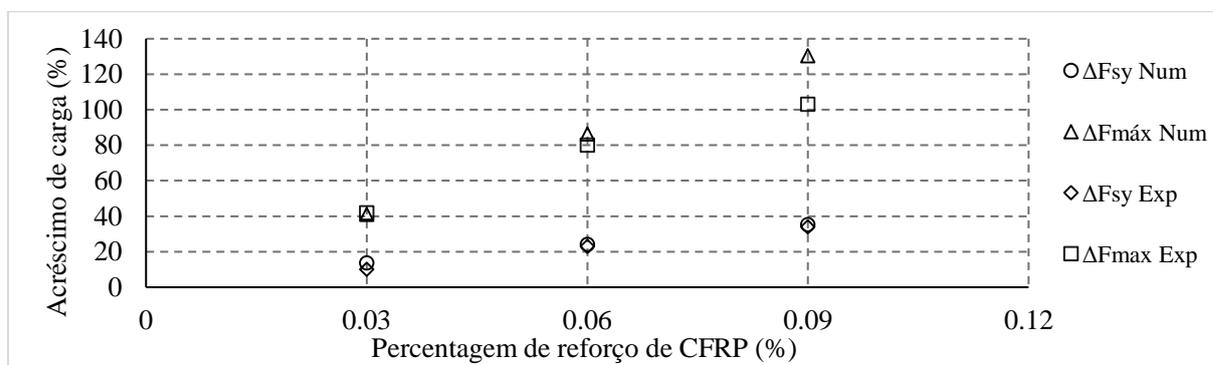


Figura 4.8 - Variação dos acréscimos de carga de cedência das armaduras e da carga máxima aumentando a percentagem de CFRP.

Relativamente aos principais resultados obtidos numericamente podem-se retirar as seguintes conclusões:

- Analisando a Figura 4.8, denota-se que ao se aumentar a percentagem de reforço de CFRP utilizado nas vigas, este tem mais influência para o acréscimo de carga máxima do que para o acréscimo de carga de cedência das armaduras;
- Relativamente aos erros para as quatro vigas, entre os valores numéricos e os valores experimentais, para a carga de início de fendilhação do betão e para a carga de início da

cedência das armaduras, a média destes foi 3.8% e 1.0% respetivamente. Para a carga máxima resistente da viga, o erro médio foi de 4.4%, sendo este o maior erro médio, logo pode-se concluir que existir uma melhor aproximação entre os resultados numéricos e experimentais a nível de estado limite de serviço do que para o estado limite último. Isto deveu-se ao facto de o modelo numérico não simular destacamentos do laminado CFRP como modo de rotura, fazendo com que os valores de F_{max} de S2-M e S3-M sejam superiores do que o que realmente aconteceu na atividade experimental, visto que o critério de paragem dos modelos numéricos utilizados é a rotura do laminado CFRP e não o destacamento do laminado do betão de recobrimento.

- A partir da Tabela 4.3 é possível concluir que quanto maior for a percentagem de CFRP, maior será a flecha a meio-vão numérica (varia entre 45 a 52,75 mm, Viga de Referência e S3-M, respetivamente), contrariamente ao que acontece com a flecha a meio-vão experimental (varia entre 45 a 38,90mm, Viga de Referência e S3-M, respetivamente), devendo ao facto referido no ponto anterior (Modo de rotura calibrado no modelo numérico vs. modo de rotura dos modelos experimentais). Por este motivo, o erro para a viga S1-M (0.49%) entre a flecha numérica e a experimental são menores do que os erros para as vigas S2-M e S3-M (12.50 e 35.60%, respetivamente), uma vez que a viga S1-M teve o mesmo modo de rotura de modelo numérico e modelo experimental, isto é, modo de rotura da viga devido à rotura do laminado CFRP.

4.3 - Estudos paramétricos

Tendo como base a calibração do modelo efetuado no âmbito da modelação do comportamento das quatro vigas testadas por Dias *et al.* (2012), nesta secção serão apresentados os resultados de um estudo paramétrico efetuado por forma a avaliar a influência de um conjunto de parâmetros no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. Os referidos parâmetros são a classe de resistência do betão, a percentagem de armadura longitudinal e a percentagem de CFRP. Para cada um destes parâmetros, foram mantidas todas as características das quatro vigas (referência, S1-M, S2-M e S3-M) usadas na sua modelação numérica apresentada anteriormente, fazendo variar apenas o parâmetro em análise (classe de resistência do betão ou percentagem de armadura longitudinal ou percentagem de reforço de CFRP).

4.3.1 - Classe de betão

O betão das quatro vigas ensaiadas experimentalmente por Dias *et al.* (2012) tinha uma resistência média à compressão de 50.2 MPa ($f_{cm}=50.2\text{MPa}$), ou seja, de acordo com a EN 1992-1-1 (2004) era um betão da classe C40/50. No âmbito do presente estudo paramétrico em termos da avaliação do efeito da classe de resistência do betão, foram avaliadas as seguintes classes: C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Os parâmetros que foram necessários alterar na modelação das quatro vigas em análise para avaliar o efeito da classe de resistência do betão foram o valor médio da resistência à compressão do betão (f_{cm}), o valor médio da resistência à tração do betão (f_{ct}), o módulo de elasticidade do betão (E) e a energia de fratura (G_f), como se pode observar na Tabela 4.5. Os valores de f_{cm} , f_{ct} e E foram obtidos na EN 1992-1-1 (2004), enquanto o valor da energia de fratura (G_f) foi determinado de acordo com o *Model Code for Concrete Structures 2010* (MC2010, 2010) por intermédio da equação (4.1):

$$G_f = 73 \times f_{cm}^{0.18} \quad (4.1)$$

Tabela 4.5 - Parâmetros relativos aos tipos de betão utilizados no estudo paramétrico das vigas.

Classe de betão	f_{cm} (MPa)	f_{ct} (MPa)	E (GPa)	G_f (N/mm)
C12/15	20	1.6	27	0.125
C20/25	28	2.2	30	0.133
C30/37	38	2.9	33	0.141
C40/50	50.2	3.6	35	0.148

As Tabelas 4.6, 4.7, 4.9 e 4.10 referem-se aos principais resultados obtidos para o estudo paramétrico relativo às classes de betão, nomeadamente a carga de fendilhação, a carga de início de cedência das armaduras, a carga máxima resistente e a flecha a meio-vão das vigas.

Tabela 4.6 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga de referência.

Classe de betão	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)
C12/15	15.18	55.77	61.04	45
C20/25	18.11	57.08	61.74	41.9
C30/37	21.48	58.23	61.99	37.7
C40/50	22.56	60.13	61.11	34.6

Tabela 4.7 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga S1-M.

Classe de betão	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm)
C12/15	15.34	60.47	86.36	43.3
C20/25	18.15	61.52	87.22	42.2
C30/37	21.58	62.23	87.76	41.1
C40/50	22.67	65.39	87.07	39.35

Tabela 4.8 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga S2-M.

Classe de betão	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm)
C12/15	15.80	65.09	113.40	49.3
C20/25	18.99	66.31	114.50	48.65
C30/37	22.46	67.43	115.30	46.6
C40/50	23.50	69.12	115.11	45.15

Tabela 4.9 - Principais resultados obtidos através do estudo paramétrico avaliando a classe de betão para a viga S3-M.

Classe de betão	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm)
C12/15	16.16	69.75	140.98	52.5
C20/25	19.30	71.36	141.73	52.1
C30/37	22.78	72.73	142.79	49.55
C40/50	24.06	74.34	142.17	49.45

As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 representam graficamente a relação força vs. flecha a meio-vão para cada classe de betão, para as quatro vigas.

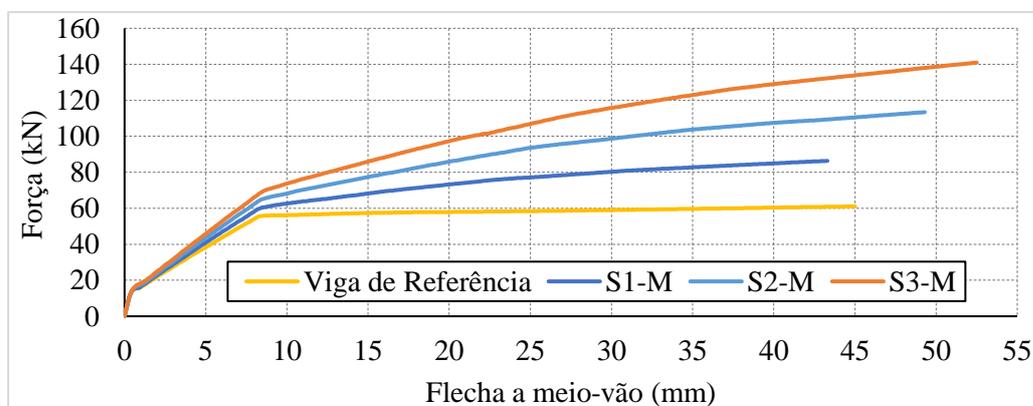


Figura 4.9 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C12/15.

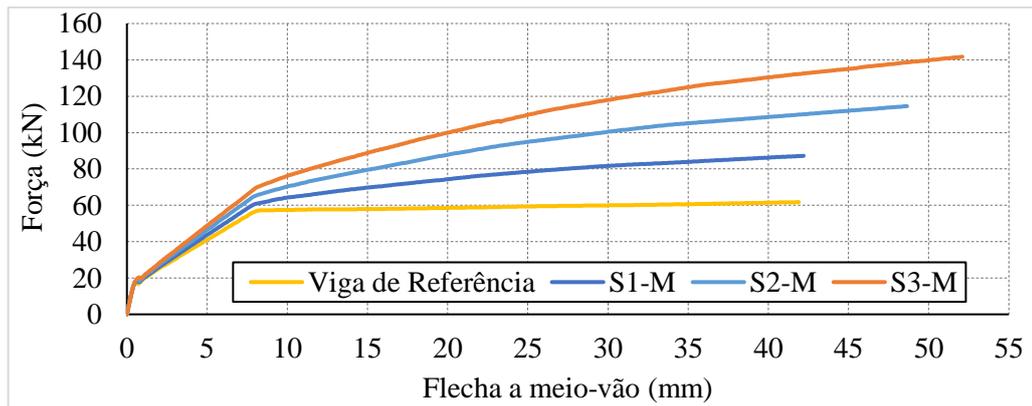


Figura 4.10 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C20/25.

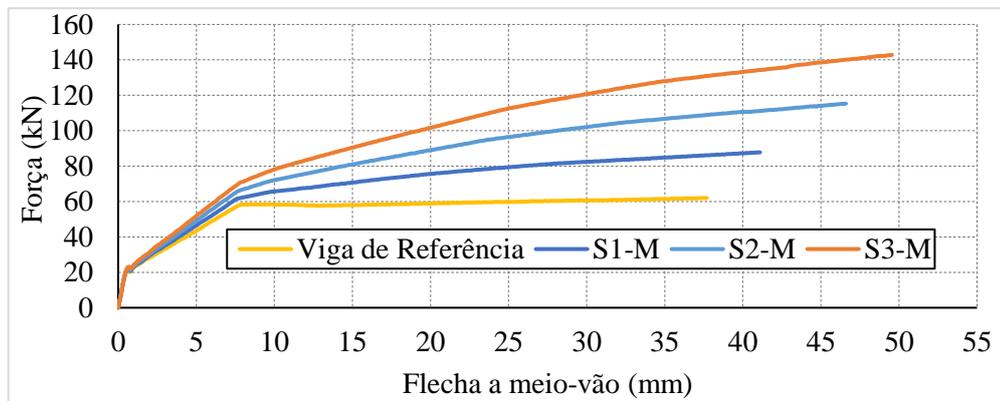


Figura 4.11 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C30/37.

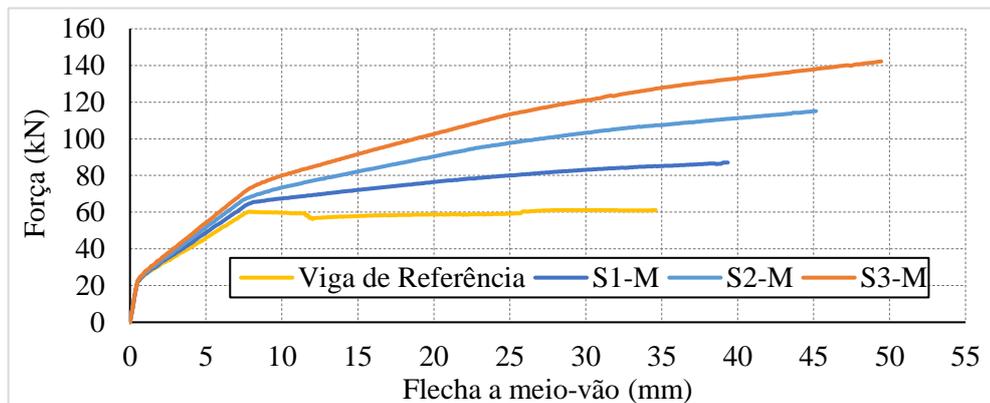


Figura 4.12 - Relação força vs. flecha a meio-vão para a classe de betão C40/50.

Analisando as Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 pode-se concluir:

- Quanto maior for a classe de betão utilizada, maior será a carga de início de fendilhação do betão e a carga de cedências das armaduras;
- A carga máxima resistente de cada viga tem alterações muito reduzidas quando se altera a classe de betão para a mesma viga. A variação entre a menor carga máxima e a maior carga máxima, alterando

a classe de betão, para cada viga foi de 1.6%, 1.6%, 1.7% e 1.3%, respetivamente para a viga de referência, viga S1-M, viga S2-M e viga S3-M;

- Para cada viga, quanto maior for a classe de betão utilizada, menor será a flecha a meio-vão.

Tabela 4.10 - Acréscimos de carga dos principais resultados avaliando a classe de betão das vigas.

Classe de betão	S1-M			S2-M			S3-M		
	ΔF_{cr} (%)	ΔF_{sy} (%)	ΔF_{max} (%)	ΔF_{cr} (%)	ΔF_{sy} (%)	ΔF_{max} (%)	ΔF_{cr} (%)	ΔF_{sy} (%)	ΔF_{max} (%)
C12/15	1.56	8.44	41.48	10.13	16.71	85.77	15.03	25.08	130.96
C20/25	1.52	7.77	40.13	5.07	16.18	83.95	6.65	25.02	127.70
C30/37	1.15	6.86	39.62	4.00	15.79	83.44	5.23	24.91	127.18
C40/50	1.16	5.96	42.48	2.87	14.95	88.36	6.41	23.63	132.64

Na Tabela 4.10 apresentam-se, para as soluções de reforço com 1 (viga S1-M), 2 (viga S2-M) e 3 (viga S3-M) laminados, os resultados dos acréscimos verificados em termos de carga de início de fendilhação (ΔF_{cr}), de carga de cedência das armaduras (ΔF_{sy}) e de carga máxima (ΔF_{max}), quando se varia a classe de resistência do betão, designadamente, considerando que as vigas tinham um betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Estes acréscimos foram obtidos tendo como base os valores verificados nas respetivas vigas de referência. Os acréscimos ΔF_{sy} e ΔF_{max} para as soluções de reforço com 1, 2 e 3 laminados, em função da classe de resistência do betão, estão representados nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15, respetivamente. Analisando a Tabela 4.10, podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Quanto melhor for a classe de betão, menor será o acréscimo da carga de cedência das armaduras, assim como menor será o acréscimo de início de fendilhação do betão, para a mesma percentagem de reforço, comparativamente com a viga de referência;
- Os acréscimos de carga máxima têm diminuições até à classe de betão C30/37, aumentando apenas para na classe de betão C40/50, comparativamente com a viga de referência. Isto deve-se ao facto do valor de carga máxima da viga de referência, com um betão de classe C40/50, ser um valor relativamente baixo.

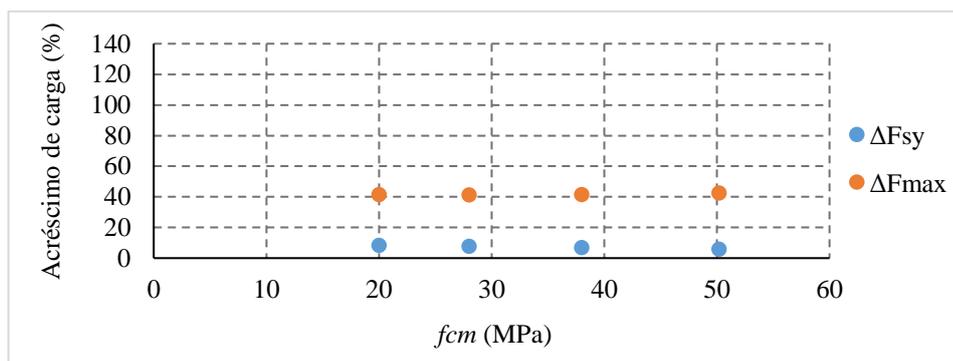


Figura 4.13 - Acréscimos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima resistente da viga S1-M.

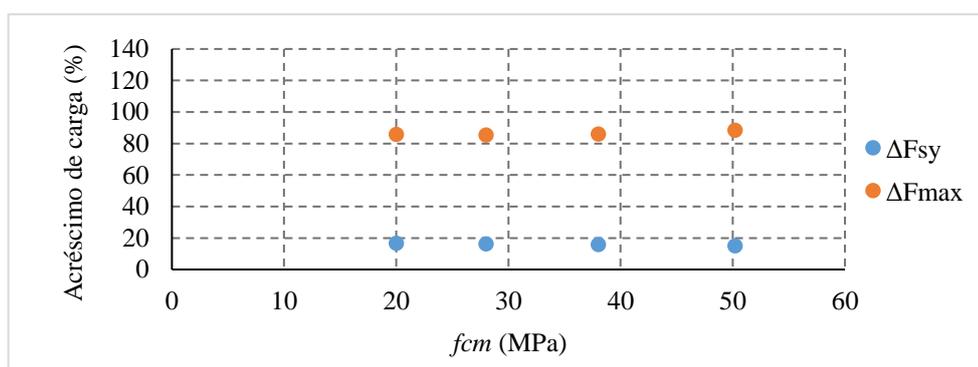


Figura 4.14 - Acréscimos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima resistente da viga S2-M.

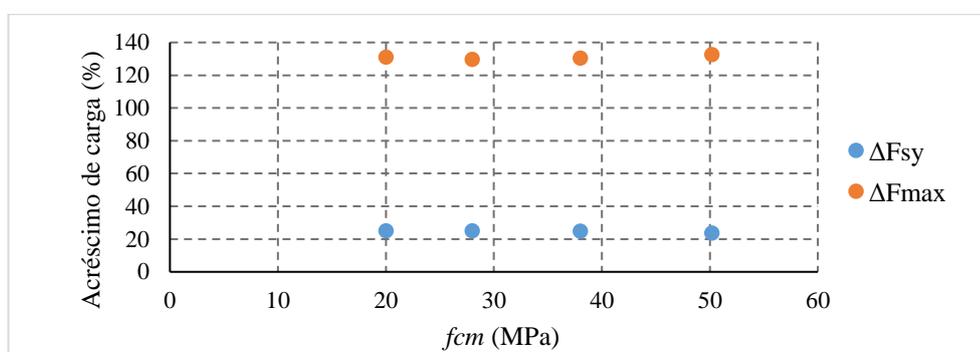


Figura 4.15 - Acréscimos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima resistente da viga S3-M.

Analisando as Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, denota-se que:

- O aumento dos acréscimos de carga máxima são maiores, comparativamente com os acréscimos de cedência das armaduras, quando se aumenta a percentagem de reforço CFRP.

Tabela 4.11 - Acréscimo de carga de início de fendilhação do betão das vigas em percentagem.

f_{cm}	Referência		S1-M		S2-M		S3-M	
	F_{cr} (kN)	ΔF_{cr}						
C12/15	15.18	-	15.34	-	15.80	-	16.16	-
C20/25	18.11	19.29	18.15	18.36	18.99	20.13	19.30	19.39
C30/37	21.48	41.49	21.58	40.73	22.46	42.14	22.78	40.93
C40/50	22.56	48.64	22.67	47.83	24.96	57.91	25.25	56.18

Tabela 4.12 - Acréscimo de carga cedência das armaduras das vigas em percentagem.

f_{cm}	Referência		S1-M		S2-M		S3-M	
	F_{sy} (kN)	ΔF_{sy}						
C12/15	55.77	-	60.47	-	65.09	-	69.75	-
C20/25	57.08	2.36	61.52	1.73	66.31	1.89	71.36	2.30
C30/37	58.26	4.42	62.23	2.90	67.43	3.60	72.73	4.27
C40/50	60.13	7.82	65.39	8.13	69.12	6.20	74.34	6.57

Tabela 4.13 - Acréscimo de carga máxima resistente das vigas em percentagem.

f_{cm}	Referência		S1-M		S2-M		S3-M	
	F_{max} (kN)	ΔF_{max}						
C12/15	61.04	-	86.36	-	113.40	-	140.98	-
C20/25	61.74	1.10	87.22	1.00	114.50	0.98	141.73	0.53
C30/37	61.99	1.60	87.76	1.62	115.30	1.68	142.79	1.29
C40/50	61.11	0.12	87.07	0.83	115.11	1.51	142.17	0.85

Após a apresentação das Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13, é possível avaliar a contribuição de cada classe de betão, para cada viga individualmente, tendo como referência a classe de betão de menor qualidade, a classe C12/15. Relativamente às tabelas apresentadas, podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- O acréscimo de carga necessária para início de fendilhação do betão e o acréscimo carga de cedência das armaduras aumentam, quanto maior for a classe de betão, para as quatro vigas, promovendo então benefícios ao nível de estado limite de serviço (Tabela 4.11 e Tabela 4.12);
- Através da Tabela 4.13, utilizando os modelos numéricos calibrados, é possível concluir que o aumento da qualidade do betão utilizados nas vigas, provoca uma alteração muito reduzida às cargas máximas resistentes das vigas, uma vez que a média de todos os acréscimos de carga máxima calculados é igual a 1.1%.

- O facto dos acréscimos das cargas máximas apresentados na Tabela 4.13 de cada viga, terem valores muito semelhantes para as suas respetivas 4 classes de betão analisadas, apenas é possível uma vez que os modelos numéricos estão calibrados de forma a que o modo de rotura seja por rotura do laminado de CFRP e não por destacamento do CFRP. Na realidade, em laboratório, quando a rotura da viga ocorre devido ao destacamento do CFRP do betão de recobrimento (exemplo das vigas S2-M e S3-M), utilizando um betão de classe inferior, o destacamento do laminado de CFRP ocorre prematuramente. Isto é, quando a rotura da viga é por destacamento do laminado de CFRP do betão de recobrimento, quanto maior a classe de betão, maior será o acréscimo de carga máxima, uma vez que o destacamento do laminado acontecerá mais tarde e por sua vez, maior será a flecha a meio-vão.

4.3.2 - Percentagem de CFRP

A percentagem de CFRP referente às soluções de reforço com 1 (viga S1-M), 2 (viga S2-M) e 3 (viga S3-M) laminados com dimensões de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ era de 0.03%, 0.06% e 0.09%, respetivamente. Além destas percentagens de reforço, no presente estudo paramétrico foi analisada mais uma percentagem de reforço correspondente à inserção de quarto laminados com de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ (viga S4-m). A esta solução de reforço corresponde uma percentagem de CFRP de 0.12%. À exceção do número de laminados, todas as restantes características desta viga foram consideradas iguais às vigas S1-M, S2-M e S3-M para efetuar o estudo paramétrico referente à percentagem de CFRP.

Após o cálculo numérico da viga reforçada com 4 laminados de CFRP, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 4.16. Na tabela 4.14 está resumida a informação referente à carga de início de fendilhação do betão, carga de início de cedência das armaduras e carga máxima resistente da viga, assim como os respetivos acréscimos de carga relativos à carga de início de cedência das armaduras e carga máxima resistente da viga.

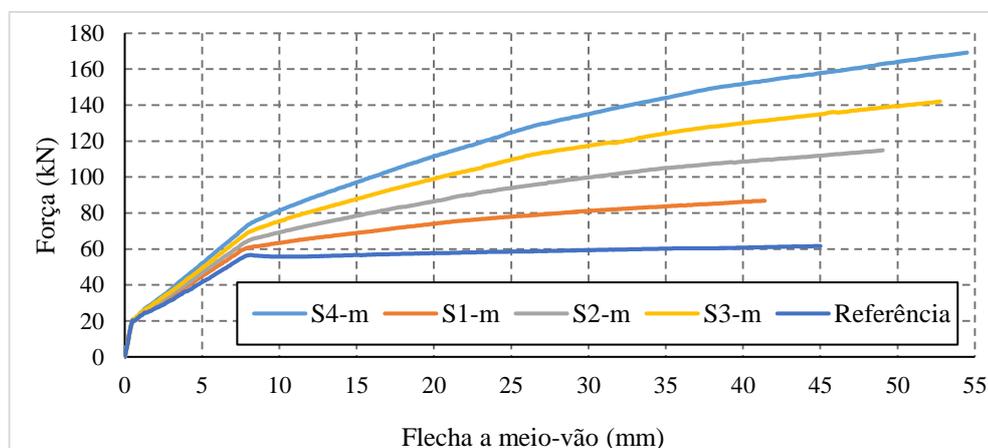


Figura 4.16 - Relação força vs. flecha a meio-vão para diferentes percentagens de CFRP.

Relativamente à Figura 4.16, estão apresentados graficamente os resultados força vs. flecha a meio-vão para as 5 vigas estudadas no âmbito do tópico do estudo paramétrico avaliando a influência da percentagem de CFRP. O modo de rotura utilizado numericamente para as 4 vigas reforçadas foi a rotura dos laminados de CFRP.

Tabela 4.14 - Principais resultados para cada percentagem de CFRP utilizado no reforço das vigas.

Percentagem de CFRP (%)	F_{cr} (kN)	ΔF_{cr} (%)	F_{sy} (kN)	ΔF_{sy} (%)	F_{max} (kN)	ΔF_{max} (%)
0.00	21.36	-	55.76	-	61.60	-
0.03	21.54	0.81	63.39	13.67	86.33	40.14
0.06	22.14	3.65	69.24	24.17	114.84	86.43
0.09	22.54	5.50	75.42	35.26	141.93	130.41
0.12	22.59	5.19	81.32	45.83	169.26	174.76

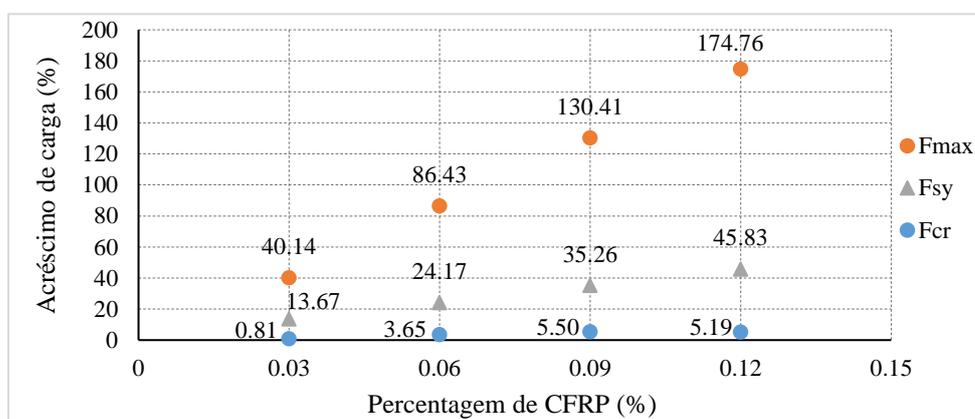


Figura 4.17 - Principais resultados para cada percentagem de CFRP utilizado no reforço das vigas.

Analisando a Tabela 4.14 e a Figura 4.17, é possível retirar as seguintes conclusões:

- O aumento da percentagem de reforço de CFRP, provoca uma alteração muito reduzida na carga de início de fendilhação do betão, obtendo valores de acréscimo entre 0.81% e 5.50%, respetivamente a viga S1-M e a viga S3-M. Com o aumento de um quarto laminado (viga S4-M) o acréscimo de carga de início de fendilhação foi ainda inferior ao acréscimo da viga S3-M (5.19%).
- Quando se aumenta a percentagem de reforço CFRP, o acréscimo de carga de cedência das armaduras e o acréscimo de carga máxima aumentam;
- Quanto maior é a percentagem de reforço de CFRP, o aumento do acréscimo para a carga máxima é maior que o aumento do acréscimo da carga de início de cedências das armaduras e muito maior para o aumento do acréscimo de carga de início de fendilhação.

Na Figura 4.18 será apresentada a informação referente aos acréscimos relativos de carga máxima. Os acréscimos relativos de carga máxima referem-se à percentagem de acréscimo que cada laminado de CFRP acrescenta quando adicionado a viga de betão armado. Desta forma, será possível analisar qual a

percentagem de reforço que tem maior influência na carga máxima resistente da viga. De seguida será apresentada a equação que calcula os acréscimos relativos de carga máxima (4.2), em que i representa o número de laminados de reforço da viga, variando entre 0 e 3 (nota: $\Delta F_{max,(i)}$ para $i=0$, representa o acréscimo de força máxima da viga de referência):

$$\Delta_{relativo,Fmax(i+1)} = \Delta F_{max,(i+1)} - \Delta F_{max,(i)} \quad (4.2)$$

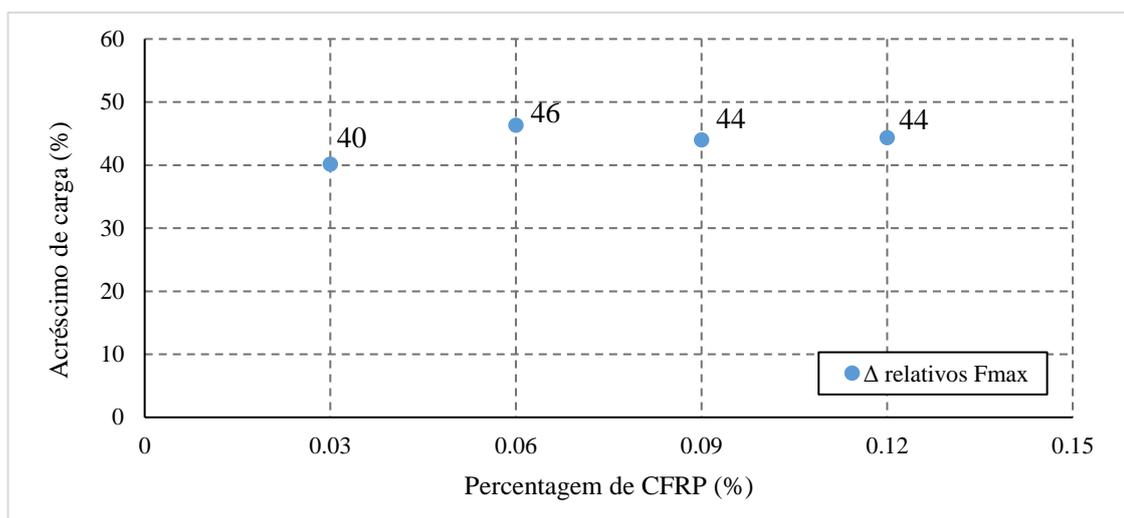


Figura 4.18 - Acréscimos relativos de Fmax para as quatro vigas reforçadas com CFRP.

Analisando a Figura 4.18, podem ser retiradas as seguintes conclusões relativas aos acréscimos relativos de carga máxima:

- A viga com uma percentagem de reforço de CFRP de 0,06% (S2-M) é a viga que obteve o maior acréscimo de força máxima resistente relativamente às restantes vigas (Figura 4.18) com 46%, o que indica que o reforço com dois laminados de CFRP, para a geometria da viga em estudo, é o que mais influência tem para o acréscimo de carga máxima;
- Ao acrescentar um quarto laminado como reforço, a carga máxima resistente da viga aumentou, mas o acréscimo relativo de carga máxima entre a viga S3-M e a viga S4-m foi igual ao acréscimo relativo entre a viga S2-M e a viga S3-M (44%), como se pode observar na Figura 4.18. Com isto, é possível concluir que ao adicionar mais laminados de CFRP, o acréscimo relativo da carga máxima não aumenta, mas sim tenderá a diminuir (sendo o modo de rotura da viga a rotura do laminado de CFRP). Caso o modelo numérico pudesse simular o destacamento dos laminados de CFPR do betão de recobrimento, os acréscimos relativos da carga máxima seriam cada vez menores, à medida que se aumentava a percentagem de reforço de CFRP nas vigas em estudo.

4.3.3- Percentagem de armadura longitudinal

A percentagem de armadura longitudinal (ρ_s) utilizada nas vigas ensaiadas é de 0.38%, que representa 2 varões de 10mm de diâmetro para as armaduras longitudinais de tração. Para o caso de estudo 1, será simulada uma percentagem de armadura longitudinal de tração igual a 0.249%, que representam 2 varões de 8mm e para o caso de estudo 2 será utilizada uma percentagem de armadura longitudinal de 0.561%, que representa 2 varões de 12mm para as armaduras longitudinais de tração. Para a escolha das percentagens de armadura longitudinal a avaliar, foi necessário calcular a armadura longitudinal mínima da viga, para que a menor percentagem avaliada fosse superior à armadura mínima. Para o cálculo foi utilizada a expressão 4.3, presente no Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1, 2004).

$$A_{s,min} = 0.26 * f_{cm} / f_{yk} * b_t * d \geq 0.0013 * b_t * d \quad (4.3)$$

Na expressão 4.3 têm-se que:

- $A_{s,min}$ é a área mínima de armadura longitudinal de uma viga (mm^2);
- f_{cm} é o valor médio da tensão de rotura à tração do betão (MPa);
- f_{yk} é o valor característico da tensão de cedência do aço (MPa);
- b_t é o valor da largura da secção transversal da viga (m);
- d é o valor da distância da fibra de betão mais comprimida ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração (m).

Na Tabela 4.15 apresentam-se os valores das grandezas necessárias para o cálculo da armadura mínima da viga em estudo.

Tabela 4.15 - Dados para cálculo da armadura longitudinal mínima para a viga em estudo.

f_{cm} (MPa)	f_{yk} (MPa)	d (m)	b_t (m)
3.2	500	0.269	0.150

De acordo com os dados da Tabela 4.15, a área de armadura longitudinal de tração mínima, para a viga em estudo, era de $6,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. A área de armadura longitudinal utilizada para a menor percentagem de armadura longitudinal (0.249%) foi de $10,05 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, logo pode-se concluir que a menor percentagem de armadura utilizada neste estudo é superior à armadura mínima e desta forma pode ser simulada nos estudos paramétricos desta dissertação.

Os parâmetros das tensões e extensões relacionados com as armaduras longitudinais utilizados no estudo paramétrico relacionado com a percentagem de armadura longitudinal estão apresentados na Tabela 4.16, respetivamente para cada diâmetro utilizado:

Tabela 4.16 - Tensões e extensões dos varões utilizados no estudo paramétrico relativo à percentagem de armadura.

Diâmetro dos varões de aço	8mm	10mm	12mm
ϵ_{sy}	2.67E-03	3.00E-03	3.00E-03
f_{sy} (MPa)	534.5	566.7	600
ϵ_{sh}	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02
f_{sh} (MPa)	550	600	620
ϵ_{su}	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02
f_{su} (MPa)	618.5	661.3	680

A relação força vs. flecha a meio-vão de uma viga é um fator importante que deve ser tido em consideração nas análises dos resultados numéricos. Como se pode observar na Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22, respetivamente para a viga de referência, viga S1-M, viga S2-M e viga S3-M, foram determinadas para cada viga, as quatro curvas *força vs. flecha a meio-vão* associadas a cada diâmetro dos varões utilizados nas armaduras longitudinais de tração, nomeadamente para a armadura mínima, para varões de 8mm, para varões de 10mm e para varões de 12mm. Com estes gráficos será possível comparar o comportamento de cada viga individualmente, fazendo apenas as respetivas simulações de percentagem de armadura longitudinal de tração utilizada.

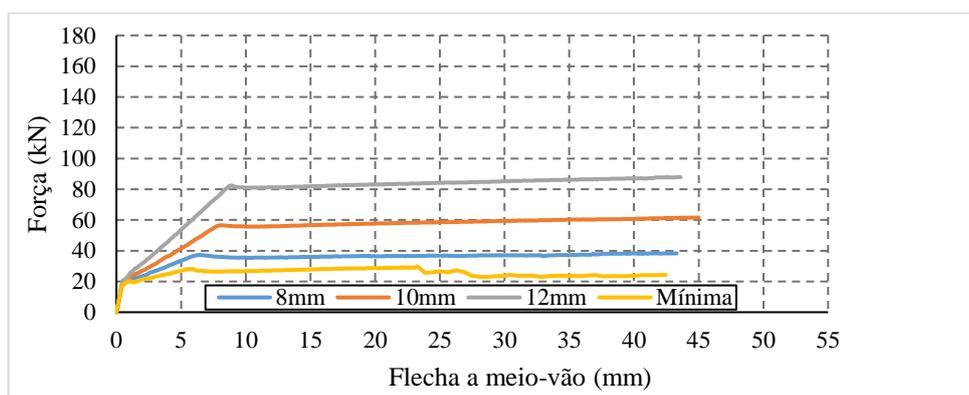


Figura 4.19 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga de referência.

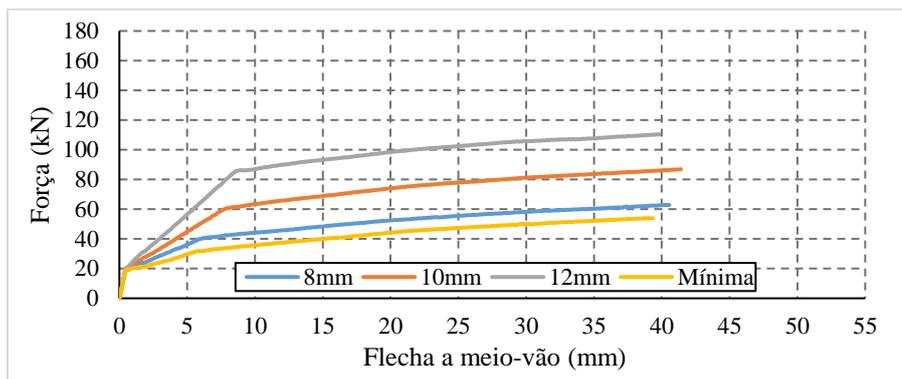


Figura 4.20 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga S1-M.

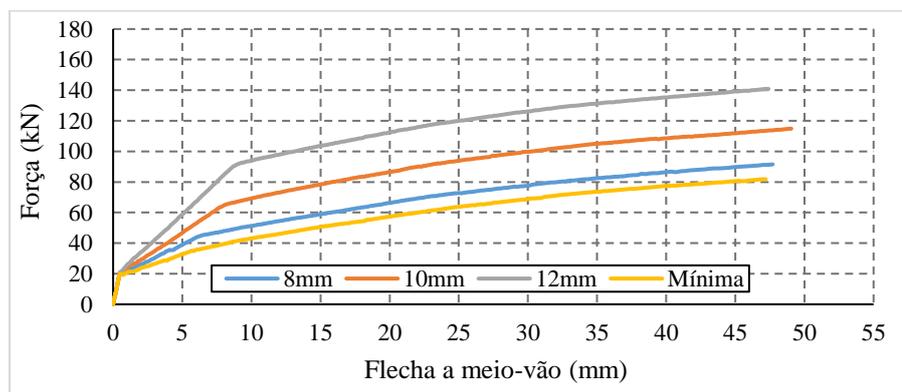


Figura 4.21 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga S2-M.

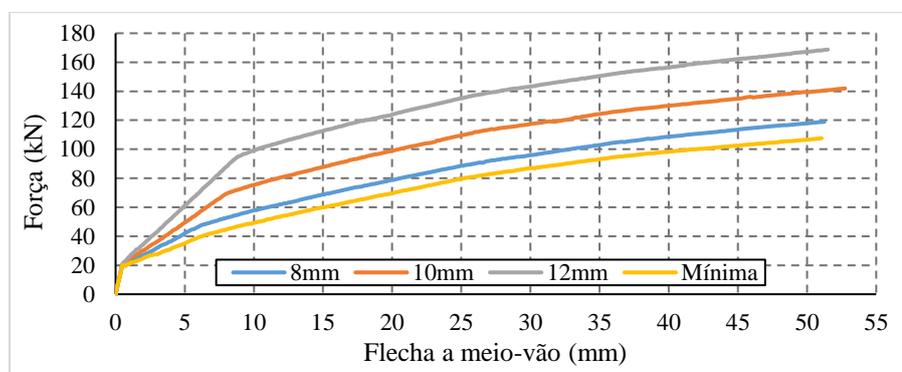


Figura 4.22 - Relação força vs. flecha a meio-vão da viga S3-M.

Após o cálculo das cargas de início de fendilhamento, das cargas de cedência de armaduras e das cargas máximas resistentes de todas as simulações das quatro diferentes percentagens de armadura longitudinal para as quatro vigas em estudo (Tabelas 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20), os resultados dos acréscimos de carga foram organizados, tendo como ponto de comparação a viga de referência, como se pode observar na Tabela 4.21.

Tabela 4.17 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de referência.

Diâmetro dos varões	Área de armadura (m ²)	ρ_{sl} (%)	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)
Armadura mínima	6.70E-05	0.17	19.29	27.99	24.23	42.45
φ 8	1.01E-04	0.25	20.47	36.70	38.25	43.3
φ 10	1.57E-04	0.38	21.36	56.22	61.60	45
φ 12	2.26E-04	0.56	22.76	82.14	87.79	43.6

Tabela 4.18 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de S1-M.

Diâmetro dos varões	Área de armadura (m ²)	ρ_{sl} (%)	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)
Armadura mínima	6.70E-05	0.17	19.41	31.75	53.94	39.35
φ 8	1.01E-04	0.25	20.71	40.11	62.74	40.55
φ 10	1.57E-04	0.38	21.54	61.41	86.87	41.4
φ 12	2.26E-04	0.56	22.91	86.33	110.34	39.8

Tabela 4.19 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de S2-M.

Diâmetro dos varões	Área de armadura (m ²)	ρ_{sl} (%)	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)
Armadura mínima	6.70E-05	0.17	19.60	35.57	81.73	47.2
φ 8	1.01E-04	0.25	20.64	43.72	91.49	47.7
φ 10	1.57E-04	0.38	22.14	66.13	114.84	49.05
φ 12	2.26E-04	0.56	23.46	91.61	140.81	47.4

Tabela 4.20 - Principais resultados obtidos no estudo paramétrico da percentagem de armadura longitudinal para a viga de S3-M.

Diâmetro dos varões	Área de armadura (m ²)	ρ_{sl} (%)	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)
Armadura mínima	6.70E-05	0.17	19.96	39.34	107.58	51.05
φ 8	1.01E-04	0.25	21.11	46.59	118.91	51.25
φ 10	1.57E-04	0.38	22.54	71.01	141.93	52.75
φ 12	2.26E-04	0.56	23.95	95.50	168.72	51.50

Tabela 4.21 - Resultados dos acréscimos de carga obtidos para diferentes percentagens de armadura longitudinal.

Percentagem de aço (ρ_{sl})	S1-M		S2-M		S3-M	
	ΔF_{sy} (%)	ΔF_{max} (%)	ΔF_{sy} (%)	ΔF_{max} (%)	ΔF_{sy} (%)	ΔF_{max} (%)
0.249	9.30	70.94	19.13	139.17	26.94	210.85
0.38	9.23	54.53	17.64	86.43	26.32	130.41
0.561	5.10	34.34	11.52	60.40	16.27	92.20

Para uma melhor compreensão dos valores descritos na Tabela 4.21, de seguida serão apresentados graficamente as três Figuras (4.23, 4.24 e 4.25), respetivas a cada viga reforçada com CFRP (S1-M, S2-M e S3-M). Será possível analisar quais as alterações que ocorreram nos acréscimos de carga de cedência de armaduras e no acréscimo de carga máxima resistente das vigas, quando é aumentada a percentagem de armadura longitudinal de tração.

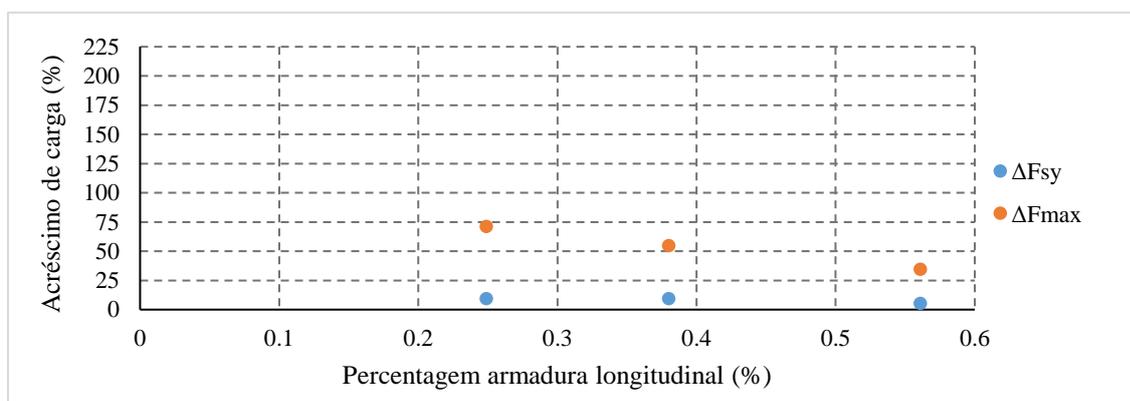


Figura 4.23 - Percentagem de acréscimos de carga de cedência de armaduras e carga máxima da viga S1-M.

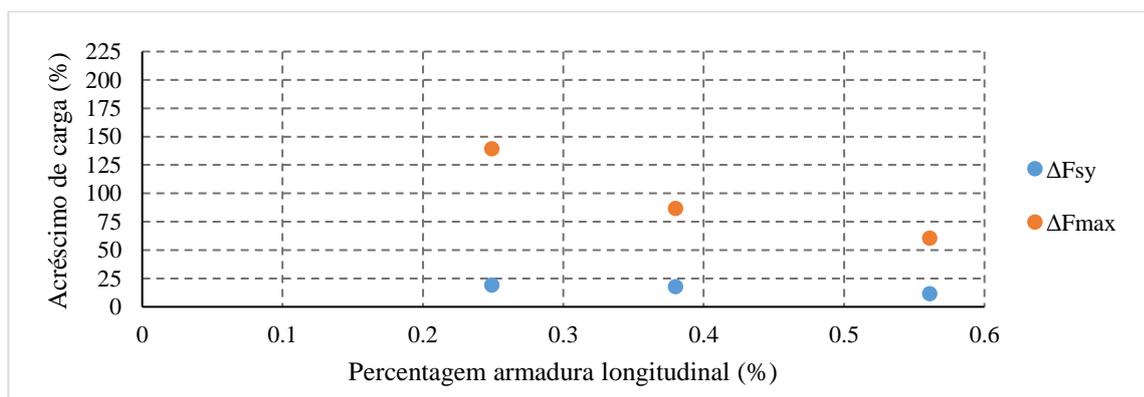


Figura 4.24 - Percentagem de acréscimos de carga de cedência de armaduras e carga máxima da viga S2-M.

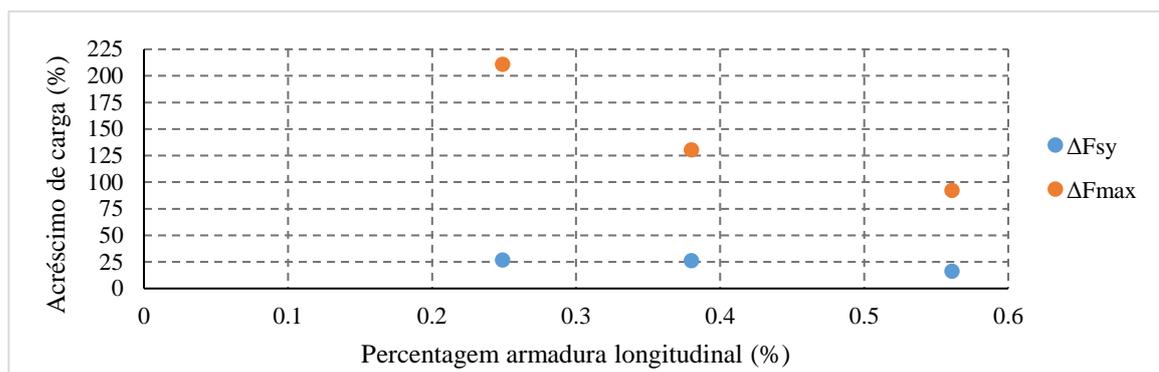


Figura 4.25 - Percentagem de acréscimos de carga de cedência de armaduras e carga máxima da viga S3-M.

Analisando todos os resultados apresentados, podem-se obter as seguintes conclusões relativamente à influência da percentagem de armaduras longitudinais de tração nas vigas de betão armado, reforçadas com laminados de CFRP:

- Quanto maior for a percentagem de armadura longitudinal de tração, maior será a carga de início de fendilhação do betão, maior será a carga de cedência das armaduras e maior será a carga máxima resistente da viga, para as quatro vigas em estudo. (Tabela 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20);
- Quanto maior for a percentagem de armadura longitudinal de tração utilizada, menor serão os acréscimos de carga de cedência das armaduras e carga máxima resistente, comparando os valores das vigas reforçadas com a viga de referência (Figuras 4.23, 4.24 e 4.25);
- Como se pode observar nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, as curvas referentes ao acréscimo de carga máxima tendem para uma assíntota, isto é, a partir de uma determinada percentagem de armadura longitudinal de tração, o acréscimo de carga máxima será constante.

Capítulo 5

Considerações finais

A realização deste trabalho teve como um dos objetivos proceder à modelação do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM), ensaiadas experimentalmente no Laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Para a referida modelação foi usado o software de elementos finitos *femix* e o GID. Além disso, após a calibração do modelo numérico, foi efetuado um estudo paramétrico com o objetivo de avaliar a influência dos seguintes parâmetros na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado: classe de resistência do betão, percentagem de armadura longitudinal existente e percentagem de reforço de CFRP. No âmbito desta dissertação foi também apresentado todo o procedimento realizado relativo à utilização dos softwares anteriormente referidos tendo em conta os objetivos da dissertação.

No presente capítulo são apresentadas as principais conclusões da investigação realizada no âmbito da presente dissertação e algumas sugestões para desenvolvimento futuro.

5.1 - Conclusões Gerais

5.1.1 - Modelação do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos e calibração do modelo numérico

Por forma a modelar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos, houve numa primeira fase, necessidade de definir o nível de refinamento da malha a adotar, tendo sido escolhido o nível de refinamento intermédio dos três que foram analisados (reduzido, intermédio e elevado). O grau de refinamento intermédio foi o que conduziu a menores erros entre valores numéricos e experimentais, assim como obteve um tempo de execução do *femix* aceitável. No entanto, é de referir que o estudo sobre o nível de refinamento da malha permitiu concluir que as diferenças entre os três níveis de refinamento analisados não eram significativas. Com efeito, o erro médio para o nível de refinamento reduzido, intermédio e elevado foi de 2.75%, 1.42% e 2.59%, respetivamente. Tendo como base a malha de elementos finitos referente ao nível de refinamento intermédio, foi definido um critério para a definição do número de elementos finitos a adotar em situações semelhantes às analisadas na presente dissertação.

A calibração do modelo numérico em termos de betão armado foi feita tendo como base o comportamento experimental da viga de referência de betão armado sem CFRP (viga REF), tendo-se obtido uma aproximação muito satisfatória entre o comportamento numérico e o comportamento experimental. No âmbito da modelação do comportamento da viga reforçada à flexão com um laminado de CFRP (viga S1-M) foi introduzido o efeito da ocorrência de algum deslizamento do reforço previamente a ocorrer a sua rotura. A simulação desta ocorrência foi feita por uma redução do valor do módulo de elasticidade do CFRP numa fase já avançada da mobilização do reforço. O nível de aproximação conseguido entre o comportamento numérico e o comportamento experimental desta viga foi muito satisfatório. Assim, foi possível modelar o comportamento de uma viga de betão armado reforçada à flexão com um laminado de CFRP inserido em que o modo de rotura experimental da viga foi a rotura do CFRP. As características do laminado de CFRP usadas na modelação da viga S1-M foram utilizadas nas restantes vigas analisadas: vigas reforçadas com dois (viga S2-M) e três (viga S3-M) laminados de CFRP inseridos, em que o modo de rotura experimental foi o destacamento do CFRP. Esta estratégia não garantiu o mesmo nível de aproximação entre o numérico e o experimental para as vigas S2-M e S3-M. Concretamente, o nível de aproximação entre o numérico registado nestas duas vigas foi muito satisfatório com a exceção da parte final das curvas de comportamento força vs. flecha a meio-vão, que é justificado pelo facto de numericamente o modo de rotura ter sido a rotura do CFRP e experimentalmente o modo de rotura ter sido o destacamento do CFRP. Para simular o destacamento seria necessário elaborar uma micromodelação na zona de interface entre os laminados de CFRP, resina epoxy e betão de recobrimento, que não foi realizado no âmbito desta dissertação.

Em face do exposto, com o estudo realizado foi possível modelar com bastante precisão o comportamento da viga de referência sem CFRP e da viga reforçada com CFRP em que o modo de rotura experimental foi a rotura do CFRP. No caso das vigas reforçadas com CFRP em que o modo de rotura experimental foi o destacamento do CFRP, foi possível ter uma aproximação muito satisfatória em termos de serviço, contrariamente ao que se verificou na fase de rotura, em virtude de numericamente não se ter obtido o modo de rotura experimental (destacamento do CFRP) mas sim a rotura do CFRP.

5.1.2 - Estudo paramétrico

Tendo como base a calibração do modelo numérico anteriormente referida foi realizado um estudo paramétrico por forma a avaliar a influência da classe de resistência do betão, da percentagem de armadura longitudinal existente e da percentagem de reforço de CFRP na

eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado. Neste contexto os resultados obtidos devem ser analisados considerando que, numericamente, o modo de rotura registado nas vigas analisadas ter sido a rotura do CFRP e que o modelo não está preparado para captar a rotura por destacamento do CFRP. Assim, os resultados obtidos no estudo paramétrico permitiram concluir o seguinte:

i) Influência da classe de resistência do betão

Para cada uma das quatro classes de resistência do betão analisadas (C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50) foi modelado o comportamento de quatro vigas: a viga de referência e três reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (com 1, 2 e 3 laminados). Assim, em relação às vigas referidas anteriormente (REF, S1-M, S2-M e S3-M), o parâmetro que variou foi a classe de resistência do betão. Os resultados obtidos permitiram concluir que quanto maior for a classe do betão das vigas, maior será a carga de fendilhação do betão e a carga de cedência das armaduras, independentemente da percentagem de CFRP. Em termos dos acréscimos de carga em relação às respetivas vigas de referência, apesar das diferenças não serem significativas, verificou-se que, para cada percentagem de CFRP analisada, quanto maior a classe de betão, menor foram os acréscimos obtidos em termos de carga de início de fendilhação e cedência das armaduras. Para a viga reforçada com um laminado, os acréscimos de carga de início de fendilhação foram 1.56%, 1.52%, 1.15% e 1.16%, respetivamente para as classes de betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Para a viga com dois laminados, os acréscimos de carga de início de fendilhação foram 10.13%, 5.07%, 4.00% e 2.87%, respetivamente para as classes de betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Para a viga reforçada com três laminados, os acréscimos de carga de início de fendilhação foram 15.03%, 6.65%, 5.23% e 6.41%, respetivamente para as classes de betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Para a viga reforçada com um laminado, os acréscimos de carga de cedência das armaduras foram 8.44%, 7.77%, 6.86% e 5.96%, respetivamente para as classes de betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Para a viga com dois laminados, os acréscimos de carga de cedência das armaduras foram 16.71%, 16.18%, 15.79% e 14.95%, respetivamente para as classes de betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50. Para a viga reforçada com três laminados, os acréscimos de carga de cedência das armaduras foram 25.08%, 25.02%, 24.91% e 23.63%, respetivamente para as classes de betão C12/15, C20/25, C30/37 e C40/50.

Atendendo a que o modelo numérico não consegue ter em conta o modo de rotura por destacamento do CFRP e, como neste modo de rotura a resistência do betão é preponderante, os resultados obtidos para a carga máxima estão condicionados por este facto (o modo de rotura

obtido numericamente para todas as vigas, independentemente da classe de resistência do betão) foi a rotura do CFRP.

ii) Influência da percentagem de armadura longitudinal

Para cada uma das três percentagens de armadura longitudinal analisadas (0.249%, 0.38% e 0.561%) foi modelado o comportamento de quatro vigas: a viga de referência e três reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (com 1, 2 e 3 laminados). Assim, em relação às vigas referidas anteriormente (REF, S1-M, S2-M e S3-M), o parâmetro que variou foi a quantidade armadura longitudinal na face tracionada. Os resultados obtidos permitiram concluir que quanto maior for a percentagem de armadura longitudinal de tração, maior será a carga de início de fendilhação do betão, maior será a carga de cedência das armaduras e maior será a carga máxima resistente da viga, independentemente da percentagem de CFRP. Em termos dos acréscimos de carga em relação às respetivas vigas de referência, verificou-se que quanto maior for a percentagem de armadura longitudinal de tração utilizada, menores serão os acréscimos de carga de cedência das armaduras e carga máxima resistente. No caso da viga reforçada com um laminado, para as percentagens de armadura longitudinal de 0.249%, 0.38% e 0.561%, os acréscimos de carga de cedência das armaduras foram 9.30%, 9.23% e 5.10%, respetivamente, e os acréscimos de carga máxima foram 70.94%, 54.53% e 34.34%, respetivamente. No caso da viga reforçada com dois laminados, para as percentagens de armadura longitudinal de 0.249%, 0.38% e 0.561%, os acréscimos de carga de cedência das armaduras foram 19.13%, 17.64% e 11.52%, respetivamente, e os acréscimos de carga máxima foram 139.17%, 86.43% e 60.40%, respetivamente. No caso da viga reforçada com três laminados, para as percentagens de armadura longitudinal de 0.249%, 0.38% e 0.561%, os acréscimos de carga de cedência das armaduras foram 26.94%, 26.32% e 16.27%, respetivamente, e os acréscimos de carga máxima foram 210.85%, 130.41% e 92.20%, respetivamente.

iii) Influência da percentagem de CFRP

Além das vigas com 1, 2 e 3 laminados, neste estudo paramétrico procedeu-se à modelação de uma viga reforçada com 4 laminados. Os resultados obtidos na análise do efeito da percentagem de CFRP permitiram concluir que o aumento da percentagem de reforço de CFRP, provocou uma alteração muito reduzida na carga de início de fendilhação do betão. Em termos dos acréscimos de carga em relação às respetivas vigas de referência, verificou-se que com o aumento da percentagem de reforço CFRP, os acréscimos de carga de cedência das armaduras e os acréscimos de carga máxima também aumentaram. Os acréscimos de carga de cedência

das armaduras foram de 13.67%, 24.17%, 35.26% e 45.83%, respetivamente para valores da percentagem de CFRP de 0.03%, 0.06%, 0.09% e 0.12%. Os acréscimos de carga máxima foram de 40.14%, 86.43%, 130.41 % e 174.76%, respetivamente para valores da percentagem de CFRP de 0.03%, 0.06%, 0.09% e 0.12%.

Independentemente da classe de resistência do betão, da percentagem de armadura longitudinal e da percentagem do reforço de CFRP, os acréscimos de carga máxima foram bastantes superiores aos acréscimos de carga de início de fendilhação e aos acréscimos da carga de cedência das armaduras.

5.2 - Desenvolvimentos Futuros

Após o desenvolvimento desta dissertação, pode-se afirmar que, no geral, os objetivos propostos no planeamento inicial foram devidamente cumpridos. No entanto, em função das conclusões gerais anteriormente referidas devem ser feitas melhorias ao nível da modelação efetuada. Neste contexto apresentam-se sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Definição de modelo numérico que permita considerar a possibilidade de numa viga de betão armado reforçada à flexão com laminados de CFRP inseridos, poder ocorrer a rotura prematura por destacamento do CFRP;
- Avaliar a influência de outros parâmetros na eficácia da técnica de reforço em análise nesta dissertação, como por exemplo as propriedades do CFRP e a existência de um nível de dano na estrutura previamente à aplicação do reforço de CFRP;
- Modelação do comportamento de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP inseridos com um determinado nível de pré-tensão. Realização de estudo paramétrico para avaliar os parâmetros que mais influenciam a técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados.

Quando uma estrutura de betão armado está sujeita a uma pré-tensão nos laminados de CFRP, a melhor opção para introduzir corretamente a pré-tensão nestes elementos, usando o software de cálculo *femix*, é sujeitá-los a uma determinada variação de temperatura, calculada pela expressão 5.1. Esta expressão foi deduzida utilizando as expressões 5.2, 5.3 e 5.4.

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E.\alpha} \quad (5.1)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.3)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.4)$$

Na expressão 5.1 tem-se que:

- ΔT : Variação de temperatura (°C);
- σ : Valor da pré-tensão a instalar nos laminados de CFRP (MPa);
- E : Módulo de elasticidade do CFRP (MPa);
- α : Coeficiente de dilatação térmica (°C).

Exemplo referente às lajes S2L-20 e S2L-40 do estudo de Dias *et al.* (2014): o cálculo da variação de temperatura necessária a utilizar nos laminados CFRP, para aplicar uma pré-tensão de 20% e 40% nas lajes S2L-20 e S2L-40, respetivamente, está representado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Cálculo da variação de temperatura necessária para simular a pré-tensão nos laminados de CFRP.

Lajes	σ (MPa)	E (MPa)	α (°C)	ΔT (°C)
S2L-20	$0.2 \cdot 3165 = 633$	175000	$1 \cdot 10^{-5}$	-361.714
S2L-40	$0.4 \cdot 3165 = 1266$	175000	$1 \cdot 10^{-5}$	-723.429

Para a laje S2L-20, deve ser aplicada uma variação de temperatura nos laminados de CFRP de -361.714 °C, enquanto que para a laje S2L-40, deve ser aplicada uma variação de temperatura de -723.429 °C, de modo a efetuar a simulação da presença de pré-esforço nos laminados de CFRP. As variações de temperaturas referidas serão negativas, uma vez que se trata de pré-esforço.

Capítulo 6

Referências bibliográficas

- ACI 440R-96, 1996, “*State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 68 pp.
- ACI Committee 440, 2002, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 118 pp.
- Alkhrdaji, T., 2015, “*Strengthening of concrete structures using FRP composites*”, Building Blocks.
- Asplund, S.O., 1949, “*Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement*”, Journal of the American Concrete Institute, vol. 20, nº6, pp. 397-406.
- Azevedo, A.F.M. e Barros, J.A.O., 1998, “*Manual de utilização do programa FEMIX-versão 3.0*”, FEMopen Consultoria e Software de Engenharia.
- Barnes, R. e Fidell, J., 2006, “*Performance in fire of small-scale CFRP strengthened concrete beams*”, Journal of Composites for Construction, vol. 10, Issue 6, November/December, pp. 503-508.
- Bettor MBT, 2003, “*BeTTor MBT - MBrace: Sistema integral para refuerzo de estructuras*”, Bettor MBT -Productos Químicos para la Construcción, Abril, 8 pp.
- Bilotta, Antonio, Ceroni, F., Nigro e E., Pecce, M., 2015, “*Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence*”, Composite Structures, Volume 124, pp. 163-175.
- Brito Júnior, C.A.R., 2013, “*Polyacrylonitrile (PAN) Spinning Process*”, Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Universidade CEUMA.
- Carolin, A., 2003, “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, PhD Thesis: Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia, pp. 190.
- Coll, A., Rib, R., Pasenau, M., Escolano, E., Perez, J.S., Melendo, A. e Monros, A., 2016, User Manual, GIDv.13, CIMNE (<http://www.gidhome.com/support/citing-gid/>).
- Costa, A., 2014, “*Reforço com pré-esforço exterior*”, Reabilitação e reforço de estruturas, Instituto Superior Técnico.

- De Lorenzis L. e Teng, J.G., 2006, “*Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*”, Composites Part B, Volume 38, pp. 119-143.
- Dias, S.J.E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica da inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Dias, S.J.E., Barros, J.A.O. e Azevedo, C., 2012, “*Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos*”, Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012, Feup, Porto, 24-26 Outubro.
- Dias, S.J.E., Juvandes, L.F.P. e Figueiras, J.A., 2002, “*Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP do tipo MBrace*”, Relatório Técnico FEUP, Janeiro, 34 pp.
- Dias, S.J.E., Mostakhdemin Hosseini, M.R. e Barros, J.A.O., 2014, “*Comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados*”, 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, 15-17 de Outubro.
- El-Hacha, R. e Riskalla, S.H., 2004, “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº5, September-October, pp. 717-726.
- EN 1992-1-1, 2004, *Eurocode2: “Design of Concrete Structures Parte 1-1: General Rules for Buildings”*, CEN, Brussels, Belgium.
- Eurocomp, 1996, “*Structural design of polymer composites - EUROCOMP design code and handbook*”, the European Structural Polymeric Composites Groups, editado por John L. Clarke, E & FN Spon, ISBN 0419194509, Londres, 751 pp.
- Gouveia A.V., Barros, J.A.O., Azevedo, A.F.M., Sena-Cruz, J., 2006, “*Implementação da técnica do arc-length e métodos relacionados no programa de elementos finitos FEMIX*”, Relatório 06-DEC/E-20 Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Júlio, S. E., 2012, “*Reforço de pilares por encamisamento de betão armado*”, Reabilitação e reforço de Estruturas, Instituto Superior Técnico.
- Juvandes, L., 1999, “*Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Setembro, 400 pp.

- Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., 2003, “*Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, nº52, Setembro, pp. 33-42.
- Juvandes, L.F.P. e Reis, V.L.F., 2012, “*Construção de estruturas de betão armado com varões de FRP*”, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Mecânica Experimental, Vol 20, pp 13-24.
- Kotynia, Renata e Cholostiakow, S., 2015, “*New Proposal for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP T-Shaped Profiles*”, Polymers, 7, pp. 2461-2477.
- Rezazadeh, M., Barros, J.A.O. e Ramezansafat, H., 2016, “*End concrete cover separation in RC structures strengthened in flexure with NSM FRP: Analytical design approach*”, Engineering structures, Volume 128, pp 415-427.
- Rezazadeh, M., Cholodtiakow, S., Kotynia, R., Barros, J., 2016, “*Exploring new NSM reinforcements for the flexural strengthening of RC beams: Experimental and numerical research*”, Composites Structures, Volume 141, pp. 132-145.
- Sena Cruz, J.M, 2004, “*Reforço de estruturas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Sika, 2001, Fichas técnicas 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34, <http://www.sika.pt>.
- Yu, Baolin e Kodur, V., 2014, “*Effect of temperature on strength and stiffness properties of near-surface mounted FRP reinforcement*”, Composites Part B, Volume 58, pp. 510-517.