## UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS

# MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO Comportamento De Ligações Aparafusadas Sem E Com Resina Injetada

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

BRUNO JOSÉ PEREIRA MARINHO CARVALHO

ORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR ABÍLIO MANUEL PINHO DE JESUS COORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR NUNO MIGUEL CORDEIRO CRISTELO



Vila Real, 2013

Em homenagem aos meus avós, Maria de Lurdes dos Santos Teixeira, Artur Pereira de Barros

### AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui expresso o meu sincero agradecimento a todos os familiares, amigos e colegas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e sem os quais esta árdua tarefa estaria mais dificultada. Contudo, gostaria de enviar algumas palavras especiais às pessoas que mais diretamente intervieram na concretização desta dissertação, nomeadamente:

- ao Professor Abílio de Jesus do Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, que desempenhou a sua função com o maior dos profissionalismos, procurando de forma atenta e dedicada, providenciar os meios necessários para a execução deste trabalho. Queria agradecer o tempo disponibilizado na transmissão de conhecimentos e a componente humana que sempre revelou, justificando de forma exemplar a minha escolha como orientador;
- ao Professor Nuno Cristelo do Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, não só pela co-orientação, mas também pelas sugestões que realizou no decorrer do trabalho e pelo apoio concedido;
- à Instituição, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), pela disponibilização das melhores condições para a realização deste trabalho, nomeadamente, o acesso aos laboratórios e o material cedido;
- ao meu amigo e colega Engenheiro David Santos, pela facilidade em fornecer a resina estrutural necessária para a realização dos ensaios experimentais;
- ao meu amigo e colega Engenheiro Luís da Silva, pela ajuda, disponibilidade, dedicação e esclarecimentos demonstrados ao longo deste trabalho;
- aos meus amigos e colegas Engenheiros Edgar Soares, Fábio Pereira, João Pereira, João Inácio, José Correia e Mónica Dias, pela ajuda e disponibilidade demonstrado no decorrer do trabalho;
- aos meus amigos e colegas Engenheiros André Silva, Pedro Batista, Pedro Tomé, Reinaldo Vitulli, Ricardo Lage e Tiago Batista, pelo companheirismo demonstrado no decorrer do trabalho;

- aos amigos e colegas que, apesar de não terem contribuído de uma forma mais direta na realização deste trabalho, foram importantes na sua realização, pela ajuda e companheirismo demonstrados, sempre me apoiaram e incentivaram na realização do mesmo;
- ao Sr. Avelino Cunha agradeço o seu apoio e as palavras amigas e ocasionais que serviram de apoio à concretização do trabalho;
- à Rita, a minha namorada, por todo o apoio e carinho recebido, a sua compreensão, as palavras de incentivo e motivação nos momentos mais difíceis.
   A sua ajuda e dedicação incansáveis;
- ao meu irmão Daniel agradeço o seu apoio e encorajamento incondicional à concretização deste trabalho;
- aos meus Pais agradeço o seu apoio incondicional e presença ao longo da minha vida. As suas sugestões e conselhos sábios, a sua infinita paciência durante os momentos de maior nervosismo. Este trabalho a eles também é dedicado;

### **RESUMO**

A presente dissertação de mestrado tem como principal tema de estudo a análise do comportamento de ligações metálicas aparafusadas sem e com resina injetada submetidas a carregamentos monotónicos, através do uso de modelos numéricos.

Sabendo que as ligações aparafusadas permitem acelerar os processos construtivos e, tendo em conta que, num mundo cada vez mais competitivo e globalizado em que os custos são um fator decisivo na conceção de um projeto, o uso de métodos computacionais na análise destas ligações vai-se tornando cada vez mais imperioso, sobretudo quando se tratam de novas soluções ainda pouco referidas em termos de códigos de projeto.

As ligações aparafusadas têm vindo, ao longo dos anos, a sofrer alterações resultantes das investigações que os vários intervenientes foram realizando. Os rebites foram substituídos pelos parafusos que, por sua vez, foram evoluindo até se começar a aplicar pré-esforço. Posteriormente, novas técnicas permitiram a injeção de resina como alternativa ao uso de parafusos ajustados. Desta forma, os engenheiros estruturais preocupam-se cada vez mais em estudar estas ligações, com o objetivo de aperfeiçoar estudos já realizados e até possibilitar a criação de novas técnicas.

Dito isto, para a elaboração desta dissertação procurou-se desenvolver metodologias de análise por elementos finitos de ligações aparafusadas sem e com resina injetada. Foram modeladas duas ligações aparafusadas, uma de corte duplo e uma ligação viga-pilar. Para cada uma destas ligações foram modeladas ligações aparafusadas pré-esforçadas com parafusos normais, parafusos ajustados e parafusos com resina injetada. Foram construídos modelos de elementos finitos capazes de simular o comportamento não linear das ligações permitindo a comparação de desempenho de cada solução construtiva.

No presente estudo verificou-se que as ligações aparafusadas com resina injetada produzem um comportamento estrutural próximo dos parafusos ajustados, eliminando os patamares de deslizamento típicos nas curvas de resistência das ligações com parafusos normais com folga.

### ABSTRACT

The main goal of the present master dissertation is to study the behavior of bolted steel connections with and without injected resin submitted to monotonic loads, through the use of numerical models.

Having in mind that bolted connections allow speed up constructive processes and, knowing that in a world each time more competitive and globalized in which the costs are a decisive factor in the development of a project, the use of computational tools in the analysis of these connections becomes determinant, mainly for new solutions or solutions less explored in terms of design codes.

The bolted connections have been, throughout the years, suffering transformations resulting from research activities performed by many authors. The rivets have been replaced by bolts that have evolved, the main achievement being the prestrussed bolts. Following this, new techniques suggested the injection of resin as an alternative to the use of fitted bolts. Structural engineers are each time more concerned with the study of these connections, aiming a better understanding of their performance and the development of new techniques.

In this dissertation, methodologies based on finite element analyses were proposed for bolted connections, with and without injected resin. Two types of bolted joints were investigated, double shear splice and beam-to-column connection. For each joint configuration, standard bolts, fitted bolts and resin injected bolts were simulated. The non linear behavior of these connections was investigated and their performances were compared.

In this study, it was found that the injected resin in bolted connections causes a structural behavior of the fitted bolts, eliminating the levels of sliding in the resistance curves that are typical in the standard bolted connections with clearance.

## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
Resumo	III
Abstract	IV
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tabelas	XIV
NOMENCLATURA	XV
CAPÍTULO I	
Introdução	
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
CAPÍTULO II	7
Comportamento De Ligações Aparafusadas Sem E Com Injeção E	)e Resina. 7
2.1. ESTADO DA ARTE DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS	9
2.1.1. AS LIGAÇÕES APARAFUSADAS NO UNIVERSO DAS ESTRUTURAS METÁL	.ICAS 9
2.1.2. A EVOLUÇÃO DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS	11
2.1.3. LIGAÇÕES APARAFUSADAS COM INJEÇÃO DE RESINA	14
2.1.4. LIGAÇÕES APARAFUSADAS COM PARAFUSOS AJUSTADOS	21
2.1.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS SEM E INJEÇÃO DE RESINA	COM 22
2.2. MODELAÇÃO, ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES	24
2.2.1. MODELAÇÃO	24
2.2.2. ANÁLISE	25
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES	
2.3. PARAFUSOS	
2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	
2.3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	
2.3.3. COMPORTAMENTO DO PARAFUSO NUMA LIGAÇÃO	
2.3.4. APERTO DOS PARAFUSOS	
2.4. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS	

2.4.1. CATEGORIAS DAS LIGAÇÕES 3	88
2.4.2. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INDIVIDUAL DAS PEÇAS DE LIGAÇÃO	39
2.4.3. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA EM PARAFUSOS INJETADOS4	1
2.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA RELATIVA À INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS4	14
CAPÍTULO III	51
MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS	51
3.1. INTRODUÇÃO	53
3.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)5	53
3.2.1. UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS5	57
3.3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS PROPOSTOS PARA CADA LIGAÇÃO APARAFUSADA5	57
3.3.1. LIGAÇÃO APARAFUSADA COM CORTE DUPLO5	59
3.3.2. LIGAÇÃO APARAFUSADA VIGA-PILAR6	57
3.4. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM AS SIMULAÇÕES7	<b>'</b> 5
3.4.1. ALGORITMO DE CONTACTO	'6
3.4.2. FOLGA ENTRE O PARAFUSO E OS FUROS REALIZADOS NOS CORPOS A LIGAR	'6
3.4.3. MODELO CONSTITUTIVO DOS MATERIAIS	7
3.4.4. COEFICIENTE DE ATRITO8	30
3.4.5. PRÉ-ESFORÇO	31
3.4.6. DESLOCAMENTOS IMPOSTOS8	32
	3
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	53
	35
4.2. CALIBRAÇÃO DA TENSÃO DE PRE-ESFORÇO	35
4.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA LIGAÇÃO COM CORTE DUPLO	57
4.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS USANDO PARAFUSOS NORMAIS COM FOLGA - ANÁLISE ELÁSTICA	37
4.3.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS USANDO PARAFUSOS NORMAIS COM FOLGA - ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA9	)8
4.3.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS USANDO PARAFUSOS AJUSTADOS - ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA	11

4.3.4. RESULTADOS DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO DE COF USANDO PARAFUSOS INJETADOS COM RESINA - ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA	TE DUPLO
4.3.5. COMPARAÇÃO DOS COMPORTAMENTOS DA LIGAÇÃO DE CORTE DUPLC RESULTANTES DE SIMULAÇÕES COM OS TRÊS MODELOS NUMÉRICOS PROPOS	) TOS 125
4.3.6. COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PARAFUSOS QUANDO USAE FOLGA, SEM FOLGA E COM RESINA INJETADA	OS COM
4.4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA LIGAÇÃO VIGA-PILAR	129
4.4.1. ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA	129
CAPÍTULO V	135
CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO	135
5.1. INTRODUÇÃO	

- 5.2. CONCLUSÕES FINAIS1375.3. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS140

ANEXO A	•••••				•••••	•••••	•••••	•••••	155
RESULTADOS	Do	FATOR	DE	Concentração	DE	TENSÕES,	Kт,	Ем	REGIME
ELÁSTICO, NA	LIG	AÇÃO CO	ом С	ORTE DUPLO	•••••	•••••	•••••	•••••	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Contenção de fachada do Edifício da Rua Ivens XXI, Lisboa, 2010
Figura 2.2 - Construção em estrutura metálica e mista de um edifício, Londres, 2012
Figura 2.3 - Plataforma petrolífera em estrutura metálica [7]10
Figura 2.4 - Navio de carga em estrutura metálica [8]10
Figura 2.5 - Estrutura metálica de suporte ao lançamento de mísseis [9]10
Figura 2.6 - Torre de telecomunicações em estrutura metálica [10]10
Figura 2.7 - Estrutura metálica de suporte ao lançamento do vaivém [11]10
Figura 2.8 - Estádio de futebol do Newcastle, St. James Park, Inglaterra [12]10
Figura 2.9 - Ligação aparafusada entre duas vigas, por cobre-juntas, usando parafusos da classe 8.8.
Obra – Novo Hospital de Braga12
Figura 2.10 - Reparação com a substituição dos rebites por parafusos injetados, Ponte de Rotterdam,
Holanda, 1970 [25]14
Figura 2.11 - Substituição do rebite por parafuso injetado, Ponte de Rotterdam, Holanda, 1970 [25].
Figura 2.12 - Construção de nova ponte ferroviária com utilização de parafusos injetados, Ponte
ferroviária em Weesp, Holanda, 1971 [25]15
Figura 2.13 - Montagem da ponte rodoviária, com utilização de parafusos injetados nas placas de
amarração dos apoios nas extremidades, Ponte rodoviária em Curação, Holanda [25]16
Figura 2.14 - Reparação da alma da viga principal com injeção de parafusos, Ponte de Oranienburg,
Alemanha, 1996 [24]
Figura 2.15 - Esquema de aplicação de resina estrutural numa ligação aparafusada solicitada ao
corte [23]19
Figura 2.16 - Preparação da cabeça do parafuso [23]19
Figura 2.17 - Preparação da anilha para se usar por debaixo da cabeça do parafuso [23]20
Figura 2.18 - Preparação da anilha para se usar por cima da porca [23]20
Figura 2.19 - Regimes especiais de utilização de parafusos injetados quando a porca não é acessível
[25]
Figura 2.20 - Extensão da rosca na espiga de parafusos ajustados, na zona em esmagamento [29]22
Figura 2.21 - Comparação entre o comportamento do aço e de uma ligação aparafusada num ensaio
monotónico [34]
Figura 2.22 - Comportamento verdadeiro tensão-extensão do aço ao carbono [35]26
Figura 2.23 - Relação entre o momento fletor "M" e o ângulo de deslocamento "ø" entre a viga e o
pilar face à situação inicial [34]27
Figura 2.24 - Classificação das ligações segundo a rigidez [18]27
Figura 2.25 - Exemplo de uma ligação rígida aparafusada entre duas vigas, usando parafusos da
classe 8.8. Obra – Novo Hospital de Braga

Figura 2.26 - Exemplo de uma ligação flexível ou articulada aparafusada de um contraventamento
entre pórticos, usando parafusos da classe 8.8. Obra – CVO - Mirandela
Figura 2.27 - Classificação das ligações segundo a resistência do momento fletor [36]30
Figura 2.28 - Relação de cálculo momento-rotação característica de uma junta viga-pilar num só
lado [35]
Figura 2.29 - Elementos constituintes de uma ligação aparafusada entre duas vigas, por cobre-juntas,
usando parafusos pré-esforçados da classe 10.9. Obra – Novo Hospital de Braga33
Figura 2.30 - Tipos de esforços correntes em ligações aparafusadas [38]
Figura 2.31 - Exemplos de parafusos de rosca total e de rosca parcial
Figura 2.32 - Seção transversal e "seção resistente" de um parafuso [42]
Figura 2.33 - Transmissão de esforços em ligações aparafusadas usando parafusos comuns e de alta
resistência [29]
Figura 2.34 - Esquema do cone e do cilindro de pressão numa ligação de alta resistência [38]
Figura 2.35 - Parafusos de alta resistência numa ligação pré-esforçada [17]37
Figura 2.36 - Coeficiente $\beta$ em função da relação entre as espessuras das chapas ligadas [29]43
Figura 2.37 - Relação entre o comprimento do parafuso e a espessura efetiva da resina tb, resin [23]43
Figura 3.1 - Elemento finito isoparamétrico quadrático com 20 nós, usado nos modelos das duas ligações
aparafusadas [56]54
Figura 3.2 - Graus de liberdade de um nó [57]54
Figura 3.3 - Sequência do pré-processamento para realizar uma análise segundo MEF [53]55
Figura 3.4 - Sequência de modelação em elementos finitos utilizando software Ansys [52]57
Figura 3.5 - Geometria da ligação aparafusada com corte duplo (dimensões em mm)60
Figura 3.6 - Geometria das chapas de 10mm e 20mm usadas na ligação aparafusada com corte duplo
(dimensões em mm)
Figura 3.7 - Discretização do corpo 1 (chapa lateral) e do corpo 2 (chapa central) e pormenor do elemento
finito formado por 20 nós usado na ligação aparafusada com corte duplo61
Figura 3.8 - Discretização do corpo 3 (parafuso M22x70 + anilha) usando elementos finitos sólidos de 20
nós, tal como aplicado na ligação aparafusada com corte duplo
Figura 3.9 - Condições de fronteira e simetria considerados nos modelos numéricos da ligação
aparafusada com corte duplo62
Figura 3.10 - Pares de contacto do 1º e 2º modelo numéricos sem injeção de resina, criados no software
ANSYS através da tecnologia Superficie-Superficie, propostos para ligação aparafusada com corte duplo.
Figura 3.11 - Aspeto local das malhas de elementos finitos do 1º e 2º modelo numéricos da ligação
aparafusada com corte duplo sem injeção de resina64
Figura 3.12 - Discretização do corpo 4 (resina), formada por elementos finitos de 20 nós, usada na análise
da ligação aparafusada com corte duplo e com injeção de resina64
Figura 3.13 - Pares de contacto do 3º modelo numérico, criado em ANSYS para simulação da ligação
aparafusada com corte duplo e com injeção de resina65

Figura 3.14 - Discretização geométrica de ¼ da ligação aparafusada com corte duplo e com injeção de
resina
Figura 3.15 - Geometria da ligação aparafusada viga-pilar (dimensões em mm)67
Figura 3.16 - Discretização do corpo 1 (viga IPE140) e do corpo 2 (pilar HEA120) usando elementos
finitos sólidos de 20 nós
Figura 3.17 - Discretização do corpo 3 (Parafuso M12) formado por elementos finitos de 20 nós
Figura 3.18 - Pares de contacto do 1º e 2º modelo numéricos, criados em ANSYS, usando contacto
superfície-superfície, relativos à ligação aparafusada viga-pilar sem injeção de resina70
Figura 3.19 - Discretização da ligação aparafusada viga-pilar sem injeção de resina71
Figura 3.20 - Discretização do corpo 4 (resina), usando elementos sólidos de 20 nós, utilizada na
modelação da ligação aparafusada viga-pilar com resina injetada72
Figura 3.21 - Discretização geométrica da malha do parafuso representativa da ligação aparafusada viga-
pilar com resina injetada
Figura 3.22 - Pares de contacto do 3º modelo numérico com resina, em software ANSYS através
Superfície-Superfície da ligação aparafusada viga-pilar (Sem Escala)
Figura 3.23 - Comportamento tensão-extensão uniaxial do aço S35577
Figura 3.24 - Comportamento tensão-extensão uniaxial adotado para os materiais usados nos parafusos
M22 e M12 da classe de resistência 8.8
Figura 3.25 - Ensaios de compressão realizadas em provetes hexaédricos de resina Sikadur-30
Figura 3.26 - Registos tensão-extensão obtidos para a resina Sikadur-30 com base em ensaios de
compressão
Figura 3.27 - 1ª e 2ª Hipóteses de endurecimento à compressão da resina: relação tensão-extensão
uniaxiais
Figura 3.28 - Ensaios em laboratório à tração em provetes de resina, Sikadur-30 [62]80
Figura 4.1 - Relação entre a tensão de pré-esforço, $\sigma pe$ , e a variação de temperatura, $\Delta T$ , aplicada no
corpo do parafuso
Figura 4.2 - Campo de tensões da ligação na direção do carregamento, em MPa, para $\delta$ =0.1mm: a) $\mu$ =0.2;
σpe = 400MPa; b) μ=0.2; $σpe = 480MPa; c)$ μ=0.2; $σpe = 560MPa; d)$ μ=0.2; $σpe = 640MPa; e)$
$\mu$ =0.2; $\sigma$ pe = 720MPa; f) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 400MPa; g) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 480MPa; h) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 560MPa;
i) μ=0.5; σpe = 640MPa; j) μ=0.5; σpe = 720MPa88
Figura 4.3 - Campo de tensões da ligação na direção do carregamento, em MPa, $\delta$ =1mm: a) $\mu$ =0.2; $\sigma$ pe =
400MPa; b) $\mu$ =0.2; $\sigma$ pe = 480MPa; c) $\mu$ =0.2; $\sigma$ pe = 560MPa; d) $\mu$ =0.2; $\sigma$ pe = 640MPa; e) $\mu$ =0.2;
σpe = 720MPa; f) μ=0.5; $σpe = 400MPa; g)$ μ=0.5; $σpe = 480MPa; h)$ μ=0.5; $σpe = 560MPa; i)$
$\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 640MPa; j) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 720MPa90
Figura 4.4 - Campo de tensões da ligação na direção do carregamento, em MPa, $\delta$ =10mm: a) $\mu$ =0.2;
σpe = 400MPa; b) μ=0.2; $σpe = 480MPa; c)$ μ=0.2; $σpe = 560MPa; d)$ μ=0.2; $σpe = 640MPa; e)$
$\mu$ =0.2; $\sigma$ pe = 720MPa; f) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 400MPa; g) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 480MPa; h) $\mu$ =0.5; $\sigma$ pe = 560MPa;
i) μ=0.5; σpe = 640MPa; j) μ=0.5; σpe = 720MPa91

Figura 4.5 - Evolução da concentração de tensões em regime elástico para um coeficiente de atrito igual a
0.2, em função da variação da tensão de pré-esforço e do deslocamento imposto à ligação com corte duplo
(1º modelo numérico)
Figura 4.6 - Evolução da concentração de tensões em regime elástico para um coeficiente de atrito igual a
0.5, em função da variação da tensão de pré-esforço e do deslocamento imposto à ligação com corte duplo
(1º modelo numérico)
Figura 4.7 - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico, para deslocamento até
10mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico)96
Figura 4.8 - Pormenor A do comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico para
deslocamento até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo
numérico)
Figura 4.9 - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico para deslocamento até 10mm,
coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico)97
Figura 4.10 - Pormenor B do comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico para
deslocamento até10mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo
numérico)
Figura 4.11 - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento
até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico)100
Figura 4.12 - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento
até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico)100
Figura 4.13 - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento
máximo até 13mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo
numérico)
Figura 4.14 - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b)
obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com $\mu$ =0.2 e $\sigma$ pe = 560MPa (1°
modelo numérico), correspondentes aos pormenores C
Figura 4.15 - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento
máximo até13mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo
numérico)
Figura 4.16 - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b)
obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com $\mu$ =0.5 e $\sigma$ pe = 560MPa (1°
modelo numérico), correspondentes aos pormenores D
Figura 4.17 - Distribuição das deformações plásticas equivalentes segundo Von Mises, na ligação com
corte duplo e com folga no parafuso (1º modelo numérico), ( $\sigma pe = 560MPa$ , $\delta=13mm$ ): a) $\mu=0.2$ ; b)
μ=0.5
Figura 4.18 - Comportamento estrutural da ligação com corte duplo para um deslocamento até 10mm e
uma tensão de pré-esforço de 400MPa, em função dos vários coeficientes de atrito (1º modelo numérico).

Figura 4.19 - Comportamento estrutural da ligação com corte duplo para um deslocamento até 10mm e uma tensão de pré-esforço de 560MPa, em função dos vários coeficientes de atrito (1º modelo numérico). Figura 4.20 - Comportamento estrutural da ligação com corte duplo para um deslocamento até 10mm e uma tensão de pré-esforço de 720MPa, em função dos vários coeficientes de atrito (1º modelo numérico). Figura 4.21 - Comportamento da ligação com corte duplo com parafusos ajustados, em regime elastoplástico, com coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (2º modelo numérico). Figura 4.22 - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.2 e  $\sigma$ pe = 560MPa (2° Figura 4.23 - Comportamento da ligação com corte duplo com parafusos ajustados em regime elastoplástico, com coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (2º modelo numérico). Figura 4.24 - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.5 e  $\sigma$ pe = 560MPa (2° modelo numérico), correspondentes aos pormenores H. .....115 Figura 4.25 - Distribuição das deformações plásticas equivalentes segundo Von Mises, na ligação com corte duplo e com parafuso ajustado (2º modelo numérico), ( $\sigma pe = 560MPa, \delta=13mm$ ): a)  $\mu=0.2$ ; b) Figura 4.26 - Comparação das respostas F- $\delta$  entre a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> hipóteses de endurecimento da resina usadas no 3° modelo numérico, com os restantes modelos numéricos (1° e 2°), ( $\sigma pe = 560 MPa$ ,  $\mu=0.2$ )......118 Figura 4.27 - Comportamento da ligação com corte duplo com resina injetada em regime elasto-plástico para um coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (3º modelo numérico)......120 Figura 4.28 - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.2 e  $\sigma$ pe = 560MPa (3° Figura 4.29 - Comportamento da ligação com corte duplo com resina injetada em regime elasto-plástico para um coeficiente de atrito igual a 0.5e variando a tensão de pré-esforço (3º modelo numérico).......122 Figura 4.30 - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.5 e  $\sigma$ pe = 560MPa (3° Figura 4.31 - Distribuição das deformações plásticas equivalentes segundo Von Mises, na ligação com corte duplo e com folga no parafuso (3º modelo numérico), ( $\sigma pe = 560MPa$ ,  $\delta=13mm$ ): a)  $\mu=0.2$ ; b) Figura 4.32 - Comparação dos comportamentos da ligação com corte duplo com parafusos normais, ajustados e injetados com resina para uma, tensão de pré-esforço igual a 560MPa e coeficiente de atrito 

Figura 4.33 - Comparação dos comportamentos da ligação com corte duplo com parafusos normais,
ajustados e injetados com resina para uma, tensão de pré-esforço igual a 560MPa e coeficiente de atrito
igual a 0.5
Figura 4.34 - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) no parafuso para as três soluções investigadas,
considerando $\sigma pe = 560$ MPa, $\delta = 13$ mm e coeficiente de atrito, $\mu = 0.2$ , na ligação com corte duplo129
Figura 4.35 - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) no parafuso para as três soluções investigadas,
considerando $\sigma pe = 560$ MPa, $\delta = 13$ mm e coeficiente de atrito, $\mu = 0.5$ , na ligação com corte duplo 129
Figura 4.36 - Comportamento da ligação viga-pilar com parafusos normais com folga, considerando
$\sigma pe = 560 MPa$ , e coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5
Figura 4.37 - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) da ligação viga-pilar obtidas com parafusos
normais com folga, com $\sigma pe = 560$ MPa e $\delta = 100$ mm
Figura 4.38 - Comportamento da ligação viga-pilar com parafusos ajustados, considerando σpe =
560MPa, e coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5
Figura 4.39 - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) da ligação viga-pilar obtidas com parafusos
ajustados, com $\sigma pe = 560$ MPa e $\delta = 100$ mm
Figura 4.40 - Comportamento da ligação viga-pilar com parafusos com resina injetada, considerando
$\sigma pe = 560 MPa$ , e coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5
Figura 4.41 - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) da ligação viga-pilar obtidas com parafusos com
resina injetada, com $\sigma pe = 560$ MPa e $\delta = 100$ mm
Figura 4.42 - Comparação do comportamento da ligação viga-pilar usando soluções distintas de ligadores
com pré-esforço de 560MPa e coeficiente de atrito igual a 0.2
Figura 4.43 - Comparação do comportamento da ligação viga-pilar usando soluções distintas de ligadores
com pré-esforço de 560MPa e coeficiente de atrito igual a 0.5

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.2. - Resultados do fator de concentração de tensões, Kt, em regime elástico, nas chapas de10mm e 20mm usando parafusos normais com folga na ligação com corte duplo para, o coeficiente deatrito de 0.5, em função da tensão de pré-esforço.157

### NOMENCLATURA

### **ABREVIATURAS**

UTAD	Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;
EUA	Estados Unidos da América;
MEF	Método dos Elementos Finitos;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
NP	Norma Portuguesa;
EN	Norma Europeia;
EC	Eurocódigo;
ECCS	The European Convention for Constructional Steelwork;
MIT	Massachusetts Institute of Technology;
HSFG	High Strength Friction Grip;
DTI	Método Direto Indicador de Tensão;
FRP	Fibre Reinforced Plastic;
DIN	Deutsches Institut für Normung;
APDL	ANSYS Parametric Design Language;

### SIMBOLOGIA

Α	área da secção lisa do parafuso.
A <sub>net</sub>	área resistente da ligação na amarra da aplicação da força F.
A <sub>s</sub>	área da secção resistente do parafuso.
<i>B</i> p,Rd	valor de cálculo da resistência ao punçoamento da cabeça do parafuso
	e da porca.
$d_0$	diâmetro do furo da ligação.
D	diâmetro nominal do parafuso.

$d_{\mathrm{m}}$	diâmetro médio da espiga do parafuso.
d <sub>n</sub>	diâmetro do núcleo da espiga do parafuso.
$d_{\rm res}$	diâmetro médio entre o diâmetro do núcleo da espiga e o diâmetro médio da espiga do parafuso.
Ε	módulo de elasticidade ou Young.
F	força.
$f_{b,resin}$	resistência à pressão diametral da resina.
Fb,Rd	valor de cálculo da resistência ao esmagamento por parafuso.
F <sub>b,Rd,resin</sub>	valor de resistência à pressão diametral de um parafuso injetado.
FKN	fator multiplicativo da rigidez de contacto.
F <sub>p,Cd</sub>	valor de cálculo da força de pré-esforço.
F <sub>s,Rd</sub>	valor de cálculo da resistência ao escorregamento por parafuso no estado limite último.
F <sub>s,Rd,ser</sub>	valor de cálculo da resistência ao escorregamento por parafuso no estado limite de utilização.
F <sub>t,Ed</sub>	valor de cálculo do esforço de tração por parafuso no estado limite último.
F <sub>t,Ed,ser</sub>	valor de cálculo do esforço de tração por parafuso no estado limite de utilização.
F <sub>t,Rd</sub>	valor de cálculo da resistência à tração por parafuso.
FTOLN	fator multiplicativo da tolerância à penetração.
Fv,Ed	valor de cálculo do esforço transverso por parafuso no estado limite último.
Fv,Ed,ser	valor de cálculo do esforço transverso por parafuso no estado limite de utilização.
<i>F</i> v,Rd	valor de cálculo da resistência ao esforço transverso por parafuso.
K <sub>b</sub>	valor médio de $I_b/L_b$ .
<i>k</i> <sub>1</sub>	fator definido na norma NP EN 1993-1-8, 2010, Eurocódigo 3.

xvi

k <sub>2</sub>	fator definido na norma NP EN 1993-1-8, 2010, Eurocódigo 3.
K <sub>s</sub>	fator definido na norma NP EN 1993-1-8, 2010, Eurocódigo 3.
K <sub>t</sub>	fator elasto-estático de concentração de tensões.
L	braço da força.
I <sub>b</sub>	momento de inércia da secção de uma viga.
L	comprimento do parafuso.
L <sub>b</sub>	vão de uma viga (entre eixos das colunas).
М	diferença entre as dimensões dos furos normalizados e as dos furos sobredimensionados.
М	momento fletor.
<i>M</i> j,Rd	valor de cálculo do momento resistente de uma junta.
n	número das superfícies de atrito ou número dos furos da ligação no plano de corte.
N <sub>net,Rd</sub>	valor de cálculo do esforço normal resistente plástico de tração da secção transversal útil.
$R_m$	tensão de rotura à tração para os parafusos.
$R_p$	tensão de cedência para os parafusos.
Sj	rigidez de rotação de uma junta.
Sj,ini	rigidez de rotação inicial de uma junta.
t	espessura da secção.
t <sub>b,resin</sub>	espessura de apoio efetiva da resina.
$t_p$	espessura da chapa sob a cabeça do parafuso ou sob a porca.
T <sub>amb</sub>	temperatura ambiente.
T <sub>ref</sub>	temperatura de referência.
$\alpha_X$	coeficiente de expansão térmica na direção radial X.
$\alpha_Y$	coeficiente de expansão térmica na direção radial Y.

$\alpha_Z$	coeficiente de expansão térmica na direção radial Z.
$\alpha_b$	fator definido na norma NP EN 1993-1-8, 2010, Eurocódigo 3.
$\alpha_V$	fator definido na norma NP EN 1993-1-8, 2010, Eurocódigo 3.
β	coeficiente função da relação entre as espessuras das chapas ligadas.
$\Delta T$	variação de temperatura.
$\Delta L$	variação de deslocamento.
Ε	extensão.
Δ	deslocamento.
Ø	rotação de uma junta.
μ	coeficiente de atrito.
<i>v</i> ′	coeficiente de Poisson.
σ	tensão normal.
$\sigma_{max}$	tensão local máxima no ponto crítico da ligação.
$\sigma_{ m pe}$	tensão devido ao pré-esforço aplicado no parafuso.
$\sigma_{nom}$	tensão local resistente no ponto crítico da ligação.
γ <sub>M2</sub>	coeficiente parcial de segurança para a resistência dos parafusos.
$\gamma_{M3}$	coeficiente parcial de segurança para a resistência ao escorregamento
	em estado limite último.
$\gamma_{\rm M3,ser}$	coeficiente parcial de segurança para a resistência ao escorregamento
	em estado limite de utilização.
$\gamma_{M4}$	coeficiente parcial de segurança para a resistência ao esmagamento de
	um paraiuso injetado.

CAPÍTULO I

Introdução

### **1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Ao longo dos tempos, a indústria da construção civil tem vindo a sofrer mudanças, impulsionada pelo avanço científico e tecnológico que possibilita o aumento do conhecimento do Homem.

Com a revolução industrial e com a invenção do elevador, o aço começou a ganhar destaque na construção civil, proporcionando o crescimento vertical dos edifícios com o surgimento dos primeiros arranha-céus [1]. A par destes acontecimentos também a indústria ferroviária foi crescendo com a construção de novas linhas [2]. O mesmo aconteceu posteriormente no sector rodoviário com o nascimento do automóvel e o consequente crescimento desta indústria [3] obrigou a construir cada vez mais pontes metálicas. Primeiro, no século XVIII, com o ferro fundido, em seguida o ferro forjado e finalmente o aço tem vindo a ser cada vez mais utilizado como um material de construção civil e também noutras indústrias [4]. Pelo exposto, houve uma grande necessidade em se iniciar estudos com especial incidência no comportamento de ligações metálicas aparafusadas.

A conjunção do interesse do Homem pelo conhecimento com o avanço científico, permitiu alargar e aprofundar estudos sobre as ligações metálicas aparafusadas a partir de meados do século XX. Com a proliferação de micro-computadores que ocorreu no final da década de 80 e 90, o Método dos Elementos Finitos (MEF) começou a chegar finalmente às mãos da maioria dos projetistas [5]. A melhoria dos sistemas eletrónicos de computação tornou o uso deste método possível nos vários trabalhos que foram desenvolvidos, oferecendo a possibilidade de simulação do comportamento real, a baixo custo, e num período de tempo relativamente curto, em comparação com investigações experimentais.

Atualmente, o estudo das ligações metálicas aparafusadas através da modelação numérica tem vindo a crescer. No entanto, verifica-se que para ligações aparafusadas usando resina estrutural injetada ainda não são alvo de estudos por parte de modelos numéricos. Pelo exposto, o tema da presente dissertação procura modelar ligações aparafusadas sem e com resina estrutural injetada.

#### **1.2. OBJETIVOS**

Um dos principais objetivos da presente dissertação consiste na caracterização do comportamento estático (monotónico) até à rotura, de ligações aparafusadas sem e com resina injetada, recorrendo à simulação por elementos finitos.

Pretende-se avaliar o efeito da resina injetada no comportamento estático de ligações aparafusadas. Para o efeito, deverão ser construídos modelos de elementos finitos capazes de simular o efeito do atrito e pré-esforço nos parafusos assim como simular o comportamento elasto-plástico dos materiais.

Outro objetivo visa estabelecer a comparação entre três soluções alternativas de ligadores nomeadamente usando parafusos standard, sem e com resina e parafusos ajustadas. Pretende-se avaliar a influência das soluções de ligadores no comportamento monotónico de dois tipos de ligação, nomeadamente uma ligação com corte duplo e uma ligação viga-pilar.

Por fim, com este estudo procurar-se-á dar um contributo ao vasto e, até agora, pouco explorado mundo das ligações metálicas aparafusadas sem e com injeção de resina, usando modelos numéricos.

### 1.3. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, incluindo o presente.

No Capítulo 2 irá fazer-se uma revisão ao estado da arte das ligações aparafusadas sem e com resina, abordando alguns estudos realizados no âmbito destas ligações. Serão ainda apresentados os procedimentos necessários para o seu dimensionamento.

No Capítulo 3 serão apresentados os modelos numéricos desenvolvidos para cada ligação aparafusada e os vários parâmetros que integram estes modelos. Será ainda

apresentado o software e uma introdução ao método dos elementos finitos que serviram de base a este estudo.

No Capítulo 4 será apresentada a análise dos resultados das simulações para cada modelo numérico proposto para cada uma das duas ligações aparafusadas e será realizada a respetiva comparação.

Por fim, no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões finais da presente dissertação, assim como sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

Comportamento De Ligações Aparafusadas Sem E Com Injeção De Resina

### 2.1. ESTADO DA ARTE DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS

### 2.1.1. AS LIGAÇÕES APARAFUSADAS NO UNIVERSO DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

Observa-se hoje em dia, que as estruturas metálicas são cada vez mais utilizadas em reabilitações de edifícios (Figura 2.1), em novas construções (Figura 2.2) e em obras de arte. Em reabilitações, as estruturas de aço podem ser usadas a todos os níveis, como escoramento, por forma a garantir a segurança provisória do edifício e também como reforço estrutural [6].



**Figura 2.1 -** Contenção de fachada do Edifício da Rua Ivens XXI, Lisboa, 2010.

**Figura 2.2** - Construção em estrutura metálica e mista de um edifício, Londres, 2012.

Para além do setor da construção civil, outros setores evidenciam a sua preferência pelo uso das estruturas metálicas no desenvolvimento das suas atividades, como por exemplo, setor da indústria do petróleo e gás (Figura 2.3), transporte marítimo (Figura 2.4), forças arma las (Figura 2.5), telecomunicações (Figura 2.6), aeroespacial (Figura 2.7), est ruturas de sportivas (Figura 2.8), entre outros.



**Figura 2.3** - Plataforma petrolífera em estrutura metálica [7].



**Figura 2.5** - Estrutura metálica de suporte ao lançamento de mísseis [9].



**Figura 2.7** - Estrutura metálica de suporte ao lançamento do vaivém [11].



Figura 2.4 - Navio de carga em estrutura metálica [8].



**Figura 2.6** - Torre de telecomunicações em estrutura metálica [10].



**Figura 2.8** - Estádio de futebol do Newcastle, St. James Park, Inglaterra [12].

A utilização de estruturas metálicas está, na sua grande maioria, intrinsecamente ligada ao setor da construção civil [13]. Devido à crise financeira global, verificou-se no ano de 2007, uma forte quebra na produção [14]. A aposta em novos mercados, como o Brasil, a Índia, a China e a Rússia [15], permitiram que esta indústria voltasse a crescer desde 2010. No entanto, nos países europeus e EUA, a incerteza económica continua a ser um fantasma, com tendência a manter-se nos próximos anos.

Num mundo cada vez mais competitivo e globalizado, os custos são cada vez mais um fator decisivo na conceção de um projeto. Os engenheiros estruturais preocupam-se cada vez mais em estudar as ligações aparafusadas, de forma a conseguirem desenvolver novas soluções e melhorar o conhecimento sobre soluções existentes. Imperativamente procura-se retirar o máximo proveito do potencial que as ligações aparafusadas vêm mostrando ao longo dos anos, um dos quais consiste em acelerar ainda mais os processos construtivos.

As ligações metálicas aparafusadas são, portanto, cada vez mais relevantes no universo das estruturas metálicas e é por isso que ocupam um lugar de destaque. Sabe-se que o seu contributo é muito importante e é neste contexto que será o tema principal ao longo deste capítulo, onde se vai analisar o estado da arte das ligações aparafusadas sem e com resina injetada.

### 2.1.2. A EVOLUÇÃO DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS

As ligações são pormenores construtivos que servem para transmitir os esforços entre os vários elementos estruturais e são constituídas pelos elementos de ligação e dispositivos de ligação [16], conforme ilustra a Figura 2.9. Os elementos de ligação têm por finalidade facilitar a transmissão dos esforços gerados na estrutura, como por exemplo, os regidificadores, as placas de base dos pilares, as cantoneiras de ligação, as chapas de topo nos nós, as cobre-juntas de alma e dos banzos, entre outros. Por sua vez, os dispositivos de ligação permitem a união entre os elementos de ligação e as partes da estrutura que se pretende ligar, sendo exemplos destes a soldadura e conectores. Estes conectores, são divididos em parafusos comuns, parafusos de alta – resistência/HSFG (*High Strength Friction Grip*), rebites e barras roscadas [16].



**Figura 2.9**- Ligação aparafusada entre duas vigas, por cobre-juntas, usando parafusos da classe 8.8. Obra – Novo Hospital de Braga.

As ligações aparafusadas fazem parte de um conjunto de ligações usadas em estruturas metálicas e são as mais vulgarizadas pela sua facilidade de fabrico e montagem em obra [17]. Ao longo da história foi sofrendo alterações na conceção e na execução, à medida que a exigência e complexidade dos projetos ia aumentando.

No início da construção em estruturas metálicas, o tipo de ligação frequentemente usada era a ligação com rebites e em geral era visto como a solução satisfatória [18]. Com o passar dos anos estas ligações começaram a ser vistas como um problema, sobretudo quando foi necessário fazer reparações às estruturas metálicas [16]. Estas ligações tornaram-se antieconómicas, devido ao custo elevado da mão-de-obra especializada e respetivos equipamentos [18]. Atualmente apenas são usadas somente na recuperação e no reforço de estruturas antigas rebitadas, permitindo manter a sua arquitetura original [19].

De acordo com Kulak [20], a possibilidade da primeira ligação aparafusada ter sido testada em construção de estruturas metálicas foi relatada por Batho e Bateman em 1934 na Grã-Bretanha. Concluiu-se que neste tipo de ligação podia e devia ser usado um binário de aperto dos parafusos suficiente por forma a garantir a segurança das partes ligadas evitando o seu deslizamento.

De acordo com ensaios realizados pela Universidade de Illinois, Wilson e Thomas [16], relataram em 1938 que as ligações aparafusadas apertadas eram compatíveis com os rebites e podiam substitui-los, na proporção de um para um. O resultado desta conclusão popularizou as ligações aparafusadas durante a década de 50 do século XX,

transformando-as na principal ligação entre os elementos metálicos tanto em fábrica como em obra [21]. De acordo com Salmon [22], estas ligações foram então adotadas para construção de estruturas de edifícios e pontes, quer em ações estáticas quer em ações dinâmicas.

Segundo Kulak [20], durante a década de 50 foram realizados alguns estudos sobre os procedimentos de instalação das ligações, sobre a resistência ao deslizamento em função das superfícies de contato e sobre o comportamento das ligações sob ações dinâmicas. Numa revisão realizada em 1954, referente aos estudos até então realizados, considerouse pela primeira vez necessário incluir anilhas planas em superfícies inclinadas nas ligações aparafusadas [20]. Segundo o estudo realizado por Salmon [22], em 1956 concluiu-se que os parafusos de alta resistência deveriam ter uma elevada tração inicial, para que se tornassem eficientes e económicos. Por volta de 1960, o valor recomendado para a tração mínima no parafuso foi aumentado. Nesse ano, um simples procedimento de instalação, entendido como método da rotação da porca, foi introduzido como alternativa ao método da chave calibrada, previamente requerido.

Com a necessidade de se fazer reparações nas estruturas metálicas com rebites, o uso da soldadura tornou-se impossível em muitos casos, devido às fracas propriedades de soldabilidade. Os parafusos de alta resistência também não eram a melhor solução devido aos materiais metálicos se encontrarem muitas vezes corroídos e as superfícies irregulares [19]. Perante esta realidade, o uso de injeção de resina estrutural foi uma nova prática na ligação aparafusada, que surgiu no início da década de 70.

De acordo com as pesquisas realizadas, constata-se que até ao momento da realização desta dissertação, poucos estudos foram realizados sobre este tipo de ligações aparafusadas com injeção de resina. Contudo foi comprovada a melhoria no comportamento estrutural da ligação com a injeção de resinas. O uso de resinas estruturais injetadas nas ligações aparafusadas metálicas não é vulgar. No entanto, segundo estudos realizados, esta técnica é geralmente usada para reparações de pontes e viadutos antigos [23].

### 2.1.3. LIGAÇÕES APARAFUSADAS COM INJEÇÃO DE RESINA

#### 2.1.3.1. ORIGEM, UM EXEMPLO DE SUCESSO

Em 1970 na Holanda [23], teve-se conhecimento da primeira aplicação de parafusos de injeção usados para reparar pontes ferroviárias rebitadas (Figura 2.10 e 2.11). Surgiu uma nova prática de ligações metálicas aparafusadas, que consistia em preencher com uma resina estrutural a cavidade produzida pela folga entre o parafuso e a parede interior da porca [24].



Figura 2.10 - Reparação com a substituição dos rebites por parafusos injetados, Ponte de Rotterdam, Holanda, 1970 [25].



Figura 2.11 - Substituição do rebite por parafuso injetado, Ponte de Rotterdam, Holanda, 1970 [25].

Muitas das pontes ferroviárias que surgiram no século XIX, com o passar dos anos, foram-se degradando e a sua estrutura foi muitas vezes colocada em risco. A reparação da ponte de Rotterdam, na Holanda, foi portanto uma necessidade em 1970.
O descontentamento que os engenheiros estruturais tinham em relação às ligações com rebites, promoveu a procura de novas ligações. Os rebites tinham custos elevados e a qualidade da substituição não era assegurada da mesma forma por se tratar de montagens complexas. Paralelamente ao nascimento dos parafusos de injeção, no epicentro da engenharia estrutural, surgiu algum ceticismo na sua fiabilidade, a qual perdurou praticamente uma década [23]. Segundo o autor Nikolovski [23], este tipo de desconforto referia-se provavelmente à resistência da resina epóxi. Com o passar do tempo, todos estes sinais de desconfiança foram-se dissipando com a realização de investigações experimentais em laboratórios. Parte destes foram realizados na Universidade de Tecnologia Stevin de Delft, na Holanda, o que permitiu que os seus resultados e conclusões fossem pela primeira vez publicados nas recomendações nº 79, parte 3 da ECCS (The European Convention for Constructional Steelwork), emitido em 1994 e mais recentemente nas normas europeias [24].

#### 2.1.3.2. OUTROS EXEMPLOS DE SUCESSO

Segundo pesquisas efetuadas, após a sua utilização na ponte de Rotterdam, Holanda, as ligações aparafusadas injetadas foram utilizadas em 1971 também na Holanda, para a construção de novas pontes ferroviárias [25], de acordo com a Figura 2.12.



**Figura 2.12** - Construção de nova ponte ferroviária com utilização de parafusos injetados, Ponte ferroviária em Weesp, Holanda, 1971 [25].

O sucesso foi atingido em torres eólicas, onde os problemas mecânicos foram resolvidos utilizando parafusos injetados [25].

A montagem da ponte em Curação, nas ilhas Holandesas, com a utilização de 1500 parafusos injetados M27x180 em apenas seis dias, é outro exemplo de sucesso (Figura 2.13).



**Figura 2.13** - Montagem da ponte rodoviária, com utilização de parafusos injetados nas placas de amarração dos apoios nas extremidades, Ponte rodoviária em Curação, Holanda [25].

Seguiu-se a Alemanha, com o ministério de tráfego do município Brandemburgo, que depois de analisar os bons resultados obtidos na Holanda, decidiu aplicar esta ligação na reparação da ponte em Oranienburg [24] (Figura 2.14). Tratou-se da primeira aplicação de parafusos de injeção neste país [24].



**Figura 2.14** - Reparação da alma da viga principal com injeção de parafusos, Ponte de Oranienburg, Alemanha, 1996 [24].

A solução escolhida foi aplicar parafusos de injeção, dado que as outras soluções de ligações metálicas estudadas apresentavam desvantagens económicas e na execução técnica [24]. Durante a sua reparação as autoridades alemãs quiseram assegurar a viabilidade desta prática estudando o seu comportamento estrutural, nomeadamente a resistência à deformação de longa duração e ensaios à fluência [24].

Em Portugal pouco se conhece de obras onde foi aplicada a injeção de parafusos com resina. Contudo pode-se destacar a ponte da Figueira da Foz, sobre o rio Mondego que foi reparada com sucesso em 1980 através desta solução [3] [26]. A utilização de parafusos injetados não estava prevista no caderno de encargos e foi proposta pela empresa responsável pela estrutura metálica, Sorefame. Esta empresa procedeu a uma série de ensaios experimentais de tração monotónicos e os resultados obtidos demonstraram um bom comportamento [3] [26]. Segundo Mattes [26], até ao ano de 2007, estes parafusos encontravam-se em serviço e cumpriam estruturalmente a função para a qual foram dimensionados.

#### 2.1.3.3. APLICABILIDADE

A reparação de pontes rebitadas ferroviárias impulsionou o surgimento dos parafusos de injeção. De acordo com os estudos realizados, chegou-se à conclusão que esta nova prática pode ser aplicada em qualquer reparação de estruturas antigas, podendo substituir os sistemas de ligação com rebites e também as ligações com parafusos de alta resistência [27]. Demonstrou-se que a sua aplicabilidade se podia estender também a novas estruturas [24], incluindo pontes, guindastes, gruas, outras máquinas de engenharia, antenas de rádio, TV e outros [23]. O autor Mattes [26], refere que em alguns casos funcionam como alternativa à utilização de parafusos ajustados aos furos, *"Fitted Bolts"*, garantindo um preenchimento e estanquidade total do furo. A sua aplicação começou a ser muito abrangente nesta área. O seu crescente interesse deveuse, segundo Nikolovski [23], aos bons resultados estruturais e baixos custos que estas representam comparativamente a outras ligações metálicas, tornando-as atualmente no tipo de ligações mais vulgarmente usadas para reparações de pontes antigas [19].

#### 2.1.3.4. METÓDO DE APLICAÇÃO

A Norma Europeia EN 1090-2 de 2008 [28] descreve alguns cuidados a ter na aplicação deste tipo de ligação aparafusada, nomeadamente:

 São referidas tolerâncias idênticas às dos parafusos ordinários entre o diâmetro do furo e o diâmetro do parafuso. Assume a folga diametral de 2mm para parafusos até 27mm de diâmetro (M27) e de 3mm para diâmetros superiores;

- A injeção da resina é feita através de um furo existente na cabeça do parafuso; do lado da porca deverá existir um pequeno orifício para permitir a saída do ar e controlar o processo de injeção;

- O tipo de porca a utilizar deverá garantir o perfeito estancamento da resina;

- No caso de parafusos sem pré-esforço, pode assumir-se que a porca fica segura pelo efeito de colagem da resina;

- A resina deve ser de dois componentes e o seu tempo de mistura "potlife" à temperatura ambiente não deve ser inferior a 15minutos, de forma a garantir uma boa exequibilidade. Se estes dados não existirem, deverá realizar-se ensaios preliminares para determinar a temperatura apropriada e o tempo de cura;

- A determinação da tensão resistente da resina é realizada através do anexo G da Norma EN 1090-2, tratando-se de procedimento semelhante ao usado para obtenção dos coeficientes de atrito em ligações pré-esforçadas;

- A estrutura só poderá ser carregada após ter passado o tempo de cura e depende da temperatura ambiente;

- Em casos de baixas temperaturas, a redução do tempo de cura pode ser permitido através de um pré-aquecimento no aço até ao máximo de 50°C;

- Antes de se proceder à injeção da resina, todos os materiais devem estar limpos, isentos de humidade e gorduras;

O aperto dos parafusos com e sem pré-esforço deve ser aplicado antes do processo de injeção;

A aplicação de parafusos injetados requer condições climatéricas favoráveis, caso contrário todo o procedimento pode ser inviabilizado.

A realização deste processo deve estar ao abrigo de chuvas para que os furos estejam isentos de humidade durante a injeção da resina de forma a garantir a perfeita coesão entre a resina e o aço. Garantindo as condições ideais, a execução da ligação necessita no mínimo de duas pessoas e uma média de consumo de dois minutos por parafuso [24].

O método de aplicação da resina [28] consiste no enchimento da folga entre o parafuso e os furos com resina estrutural, injetada com equipamento tipo seringa, de acordo com a ilustração da Figura 2.15. A injeção da resina realiza-se através de um orifício situado na cabeça do parafuso que, após injeção e completa cura, torna a ligação mais resistente ao deslocamento [28].



Figura 2.15 - Esquema de aplicação de resina estrutural numa ligação aparafusada solicitada ao corte [23].

De acordo com Nikolovski [23], este tipo de ligação pressupõe a utilização dos seguintes materiais: duas anilhas e uma porca por cada parafuso. Este autor refere um procedimento de aplicação de resina que se encontra ilustrado na Figura 2.16.



Figura 2.16 - Preparação da cabeça do parafuso [23].

Analisando a figura anterior, pode-se verificar que o furo de 32mm de diâmetro é suficiente para permitir a exequibilidade da injeção da resina. No entanto um furo de  $\phi$ 5,5mm serve para permitir a entrada do bocal do dispositivo de injeção.

No mesmo trabalho, Nikolovski [23] estudou o funcionamento da posição da anilha por debaixo da cabeça do parafuso e por cima da porca. A colocação da anilha por debaixo da cabeça do parafuso tem como objetivo escoar a resina em torno do parafuso e permitir vedar completamente a cavidade entre o corpo do parafuso e as paredes do furo [23]. O diâmetro interior da anilha deve ser de pelo menos 0,5mm maior que o diâmetro do parafuso. Na Figura 2.17 ilustra-se geometrias típicas de anilhas.



Figura 2.17 - Preparação da anilha para se usar por debaixo da cabeça do parafuso [23].

Na ligação, a anilha posicionada por cima da porca providencia um canal de saída de ar, permitindo que a resina cure [23]. A anilha deve possuir uma ranhura e ser posicionada com a ranhura virada para a porca, impedindo que o sulco seja preenchido com tinta durante os tratamentos de pintura nas estruturas (Figura 2.18).



Figura 2.18 - Preparação da anilha para se usar por cima da porca [23].

Muitas vezes torna-se difícil realizar o desaperto de parafusos injetados, tornando difícil a sua desmontagem. Para estes casos, deve-se usar um líquido próprio ou adotar outra solução que passa pelo aquecimento do parafuso, com uma "*blow-lamp*" [25].

#### 2.1.3.5. INJEÇÃO ACESSÍVEL APENAS POR UM DOS LADOS

Muitas vezes e por diversas razões, a utilização de soluções aparafusadas só é possível através de um dos lados das peças a ligar. Para estes casos, segundo as recomendações

da ECCS emitidos em 1994 [25], é possível adotar duas soluções com parafusos injetados, conforme a Figura 2.19. A saída de ar pode ser realizada através de um novo furo no eixo da cabeça do parafuso. Outra solução é fazer um furo na anilha que se encontra posicionada por debaixo da cabeça do parafuso, sendo neste caso a injeção realizada pelo eixo da cabeça do parafuso.



i) A saída do ar é feita através da cabeça do parafuso.

ii) A saída do ar é feita através da anilha posicionada debaixo da cabeça do parafuso.

**Figura 2.19** - Regimes especiais de utilização de parafusos injetados quando a porca não é acessível [25].

#### 2.1.4. LIGAÇÕES APARAFUSADAS COM PARAFUSOS AJUSTADOS

As ligações metálicas com parafusos ajustados ("Fitted Bolts") é um outro tipo de ligação metálica aparafusada em que o valor da folga é nulo, ou praticamente inexistente, e pode ser aplicado pré-esforço ou não [28]. Dando um exemplo, com um parafuso M22, o diâmetro do furo para a inserção deste parafuso será igual a 22mm. De acordo com o autor Mattes [26], este tipo de ligações é normalmente mais utilizado na reabilitação de estruturas existentes do que em novas construções. As suas maiores dificuldades de utilização ocorrem na construção de novas estruturas, devido à necessidade de conseguir encaixar peças diferentes, enquanto em estruturas a reabilitar, como por exemplo naquelas em que se procede à substituição dos rebites existentes, o problema é simplificado uma vez que as peças a ligar já se encontram devidamente fixadas na sua posição final.

De acordo com a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], os parafusos ajustados deverão ser calculados utilizando o mesmo método dos parafusos aplicados em furos

normalizados. Estas tolerâncias para os furos deverão respeitar a cláusula 1.2.7 - Norma de referência, Grupo 7. No entanto, a norma alerta para o facto do comprimento da rosca que fica dentro dos furos, dever ser inferior a 1/3 da espessura da chapa de ligação, conforme exemplifica a Figura 2.20.



Figura 2.20 – Extensão da rosca na espiga de parafusos ajustados, na zona em esmagamento [29].

# 2.1.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS SEM E COM INJEÇÃO DE RESINA

De modo geral, as ligações aparafusadas apresentam diversas vantagens de utilização. As principais são [24] [30]: permitem montagens mais rápidas, desmontagens para alteração e reparação, inspeções mais fáceis, economia de energia, utilização de mãode-obra menos qualificada, são uma boa alternativa aos rebites e possuem boa capacidade de resposta à fadiga, em especial os parafusos de alta resistência préesforçados.

Para além destas vantagens, acarretam menores riscos, durante a sua aplicação, para os operários, como por exemplo, o risco de incêndio [31].

Apresentam-se como principais desvantagens [30] [32] [33]: a necessidade de maior controle para verificação das seções líquidas, necessidade de perfuração de todas as peças a ligar, verificação da coincidência dos furos em fábrica envolvendo por vezes uma pré-montagem, necessidades de pré-reserva da quantidade de parafusos por tipo e risco de desaperto quando submetido a vibrações ou choques, nomeadamente os parafusos comuns.

Por sua vez, as ligações aparafusadas com injeção de resina apresentam uma série de vantagens de aplicação em estruturas existentes e em novas estruturas [24]. Na

aplicação de reforço e reparação de estruturas existentes, as vantagens são [24] [25]: baixo risco em poder haver qualquer deslizamento das estruturas, a sua aplicação pode realizar-se em furos padrão de 2mm a 3mm maior do que o diâmetro nominal do parafuso e boa capacidade de resistência a carregamentos dinâmicos. Para além destas vantagens, ainda promove a resistência à corrosão interna, visto que a resina preenche completamente a cavidade entre o furo e o parafuso.

As vantagens de ser aplicado em novas estruturas metálicas são [24] [25]: ausência de corrosão interna, impossibilidade de haver deslizamento repentino das peças estruturais, quando comparado com os parafusos de alta resistência devido à sobrecarga provocada por estes, boa capacidade de resistência aos carregamentos dinâmicos e inexistência de procedimentos de aperto. Para além destas vantagens, apresentam ainda uma otimização em relação ao número total de parafusos a usar, possibilita ligações compactas com acabamentos perfeitos e não são influenciadas pelo tipo de tratamento de pintura resistência à corrosão que a estrutura deve obedecer, ao contrário dos parafusos de alta resistência.

As desvantagens destas ligações quando usadas tanto em novas estruturas, como em estruturas existentes, são [24] [25]: a influência das condições climatéricas (necessidade de abrigo de chuva), proporciona montagens/desmontagens mais demoradas, necessidade de preparação dos materiais (parafusos e anilhas) antes de os aplicar caso não existam no mercado já preparados e por fim apresentam custos superiores.

O custo final é influenciado pelos custos de materiais, de equipamentos e de mão-deobra. O custo dos materiais refere-se à compra dos parafusos, da resina estrutural e líquido especial, se necessário, para desmontagem da ligação. O custo de equipamentos traduz-se apenas na compra do equipamento de injeção da resina estrutural. Por fim, o custo de mão-de-obra está associado ao custo de montagem, onde o fator tempo é importante durante a sua execução. Segundo o ECCS [25], e regra geral, o tempo de injeção de resina varia entre 1 e 2 minutos por parafuso, sendo precisos em média duas pessoas. Uma ficará encarregue de colocar, posicionar e apertar o parafuso e a outra pessoa terá a responsabilidade de injetar a resina. Sendo os custos cada vez mais um fator preponderante na conceção/realização de um projeto, o tipo de ligação metálica aparafusada a usar deve inicialmente ser bem estudado. Para além do comportamento estrutural da ligação a empregar, deve ser estudada e analisada a quantidade total de parafusos a injetar resina, a acessibilidade dos parafusos por ligação e a eventualidade de possíveis atrasos, nomeadamente devido às condições climatéricas.

Tendo em conta que não existem estudos que comparem o comportamento estrutural, através de modelos numéricos, destes três tipos de ligação (parafusos ajustados, parafusos standard e com injeção de resina), as conclusões da presente dissertação poderão ser usadas na avaliação do comportamento de cada solução e assim possibilitar uma análise mais fundamentada do custo/benefício destas soluções.

### 2.2. MODELAÇÃO, ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

O comportamento das ligações provocam efeitos secundários na resposta global da estrutura. Desta forma, a modelação do comportamento estrutural dos materiais que fazem parte da ligação deve ser o mais credível e aproximado da realidade possível [17]. A modelação influência o comportamento global da estrutura e de modo geral, todos os efeitos provenientes dos esforços que as ligações proporcionam devem ser tidos em conta [29]. Contudo estes poderão ser desprezados quando são suficientemente reduzidos [29].

#### 2.2.1. MODELAÇÃO

Para avaliar se é necessário ter em conta na análise da estrutura os efeitos do comportamento das ligações, a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], resume os três tipos de comportamento das ligações em: comportamento contínuo, semi-contínuo e simples ou articulado.

O comportamento simples ou articulado considera que a ligação não transmite momentos fletores [17]. No comportamento contínuo admite-se que a ligação não tem qualquer efeito na análise da estrutura [17]. O comportamento semi-contínuo da ligação

tem de ser levado em consideração na análise estrutural [17]. Segundo a cláusula 5.1.1 da norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], o tipo de modelo a adotar para simular o comportamento da ligação deverá ser determinado em função da classificação da ligação e do método de análise da estrutura escolhido.

### 2.2.2. ANÁLISE

De acordo com a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], podem ser realizadas as seguintes análises estruturais: análise global elástica, análise rígido-plástica e elásto-plástica. Martins [34], definiu a análise estrutural da seguinte forma: - No caso de uma análise global elástica, o conhecimento da rigidez das ligações é fundamental e é caracterizada por ter um comportamento linear. Existe uma relação entre o esforço atuante e o deslocamento correspondente, que permite o conhecimento da deformação dos vários elementos que compõem a ligação; - Na fase plástica, não existe o controlo total da deformação dos materiais e a segurança relaciona-se com a garantia de que a secção pode aceitar a deformação plástica e tem resistência mecânica suficiente e compatível.

Na análise de uma ligação com transmissão de momentos, a relação momento-rotação pode ser simplificada adotando-se uma aproximação linear, bilinear ou trilinear, desde que essa curva simplificada se situe totalmente sob a curva momento-rotação de cálculo característica [29].

Num ensaio monotónico sabe-se que o material (aço) e a ligação têm comportamentos globais diferentes, conforme a Figura 2.21 ilustra [34]. Na ligação existem uma interação de vários corpos, com contacto e materiais que podem ser distintos (parafuso, chapas). Cada corpo, na ligação está sujeito a estados de tensão multiaxiais distintos.



**Figura 2.21** - Comparação entre o comportamento do aço e de uma ligação aparafusada num ensaio monotónico [34].

Para a modelação do comportamento não linear das ligações, podem ser adotadas várias aproximações para o material de acordo com a precisão e a tensão admissível necessárias para a análise. Segundo Vrakas [35] existem quatro tipos de modelo com plasticidade crescente: a) elástico-plástico sem endurecimento por deformação, b) elástico-plástico com uma inclinação planalto nominal *("nominal plateau slope;")*, c) elástico-plástico com endurecimento de tensão linear e d) curva de tensão-extensão com endurecimento de tensão não linear, conforme a Figura 2.22.



1 - Curva Tensão - Extensão verdadeira.

2 - Curva Tensão - Extensão de engenharia.

Figura 2.22 - Comportamento verdadeiro tensão-extensão do aço ao carbono [35].

Na presente dissertação, será utilizado para modelar o comportamento do aço um endurecimento isotrópico multilinear, idêntico ao da Figura 2.22. No Capítulo 3, será apresentado para cada material, com as curvas tensão-extensão usadas na simulação das ligações.

### 2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES

As propriedades estruturais das ligações devem permitir que sejam satisfeitas as hipóteses inicialmente formuladas na análise da estrutura e no dimensionamento dos seus elementos a ligar. As ligações metálicas podem ser classificadas segundo [17] [29] [34] [36] [37]:

- A rigidez, e

- A resistência.

O comportamento das ligações metálicas com transferência de momentos são caracterizadas por curvas momento fletor-rotação, não lineares, sendo "M" o momento fletor atuante e "Ø" a rotação correspondente, conforme a Figura 2.23 apresenta.



**Figura 2.23** - Relação entre o momento fletor "M" e o ângulo de deslocamento "ø" entre a viga e o pilar face à situação inicial [34].

#### 2.2.2.1. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A RIGIDEZ

As ligações aparafusadas devem ser devidamente projetadas e dimensionadas de forma a garantir o comportamento da estrutura em termos de deslocamentos e de rotações [17]. A rigidez das ligações é definida pela sua capacidade de impedir a rotação relativa, medida no local onde as peças estão ligadas, sendo responsável pelo comportamento final da estrutura, conforme ilustrado na Figura 2.23 [17].

Desta forma, as ligações metálicas aparafusadas podem ser classificadas em ligações rígidas, flexíveis ou articuladas e semi-rigídas, em função da sua rigidez de rotação inicial,  $S_{i,ini}$ , conforme a Figura 2.24 apresenta [18].



Figura 2.24 - Classificação das ligações segundo a rigidez [18].

As ligações flexíveis ou articuladas, permitem o maior movimento rotacional e são as mais simples de serem construídas e economicamente mais baratas; por outro lado, as ligações rígidas permitem rotações muito pequenas e são economicamente mais dispendiosas [20] [35].

#### LIGAÇÃO RÍGIDA

Uma ligação é considerada rígida quando o ângulo entre os elementos estruturais que se intercetam permanece essencialmente o mesmo após o carregamento da estrutura, com uma restrição à rotação da ordem de 90% ou mais necessária à ocorrência de nenhuma rotação [37] [38] (Figura 2.25). A deformação no nó é pequena e portanto praticamente não influência a distribuição de momentos [29] [37], sendo a rigidez da ligação dada por:

$$S_{i.ini} \ge K_b E I_b / L_b \tag{2.1}$$

Onde,

 $K_b$ , valor médio de  $I_b/L_b$ ;

E, módulo de elasticidade;

 $I_b$ , momento de inércia da secção de uma viga;

 $L_b$ , vão de uma viga (entre eixos das colunas);



**Figura 2.25** - Exemplo de uma ligação rígida aparafusada entre duas vigas, usando parafusos da classe 8.8. Obra – Novo Hospital de Braga.

### LIGAÇÃO FLEXÍVEL OU ARTICULADA

Uma ligação é considerada flexível ou articulada quando permite rotação no mínimo 80% entre as partes a ligar [37] [38] (Figura 2.26). Estas ligações devem ser dimensionadas de modo a impedirem o aparecimento de momentos significativos e que possam afetar desfavoravelmente os elementos da estrutura [29] [37] conforme a seguinte equação (2.2):

$$S_{j,ini} \le 0.5 E I_b / L_b \tag{2.2}$$

Onde,

E, módulo de elasticidade;

*I<sub>b</sub>*, momento de inércia da secção de uma viga;

 $L_b$ , vão de uma viga (entre eixos das colunas);



**Figura 2.26** - Exemplo de uma ligação flexível ou articulada aparafusada de um contraventamento entre pórticos, usando parafusos da classe 8.8. Obra – CVO - Mirandela.

### LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA

Uma ligação é considerada semi-rígida quando a restrição à rotação está entre 20% e 90% [37] [38]. O momento transmitido não é zero ou próximo de zero como é no caso das ligações flexíveis e nem é momento máximo ou próximo disso como é o caso das ligações rígidas [38].

### 2.2.2.2. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A RESISTÊNCIA DO MOMENTO

A classificação das ligações quanto à sua resistência está relacionada com a resistência ao momento fletor. Assim as ligações podem ser classificadas em ligações rotuladas ou articuladas, ligações de resistência total e ligações de resistência parcial [36] [37] [38] [39]. A Figura 2.27 faz essa distinção segundo a resistência do momento fletor.



Figura 2.27 - Classificação das ligações segundo a resistência do momento fletor [36].

#### LIGAÇÕES ROTULADAS OU ARTICULADAS

As ligações rotuladas ou articuladas são ligações que apenas transferem esforços normais e esforços transversos e não são capazes de transmitir momentos significativos: O momento resistente da ligação deve ser inferior ou igual a 25% do momento resistente dos elementos a ligar [29] [37], conforme a seguinte equação (2.3):

$$M_{rd,Liga,\tilde{a}o} \le 0.25 M_{rd,Elementos a \ ligar}$$

$$\tag{2.3}$$

#### LIGAÇÕES DE RESISTÊNCIA TOTAL

As ligações de resistência total são ligações em que a resistência ao momento fletor é igual ou superior ao momento dos elementos a ligar [29] [37], conforme a seguinte equação (2.4):

$$M_{rd,Ligação} \ge M_{rd,Elementos \ a \ ligar} \tag{2.4}$$

A sua resistência deve ser tal que permita que, sob as ações de cálculo, as rotações nas rótulas plásticas previstas não excedam as suas capacidades de rotação [34].

#### LIGAÇÕES DE RESISTÊNCIA PARCIAL

As ligações de resistência parcial são ligações que estabelecem um comportamento intermédio, em que a resistência ao momento fletor é inferior ao momento resistente dos próprios elementos da ligação, mas igual ou superior ao momento de cálculo atuante, levando à formação de rótulas plásticas [29] [37], conforme a seguinte equação (2.5):

$$0,25 M_{rd,Elementos a ligar} < M_{rd,Ligação} < M_{rd,Elementos a ligar}$$
(2.5)

#### 2.2.2.3. RELAÇÃO DE CÁLCULO MOMENTO - ROTAÇÃO

De acordo com a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29] e o autor Vrakas [35], uma junta poderá ser representada como uma mola rotacional unindo os eixos dos elementos ligados no ponto de intersecção, tal como representado na Figura 2.28.

Esta propriedade estrutural representa a relação entre o momento fletor atuante,  $M_{j,Ed}$ , aplicado a uma junta e a correspondente rotação,  $\emptyset_{Ed}$ , entre os elementos ligados.

Numa relação de cálculo momento-rotação, deverá definir-se três principais propriedades estruturais, e conforme a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29] representam as seguintes cláusulas:

- momento resistente 6.2.7 e 6.2.8;
- rigidez de rotação 6.3.1;
- capacidade de rotação 6.4;

Conforme se pode observar na Figura 2.28 (c), esta relação de cálculo é não linear.

O valor de cálculo do momento resistente,  $M_{j,Rd}$ , é igual ao momento máximo da relação de cálculo momento-rotação (c). Para a relação de cálculo momento-rotação característica de uma junta, a definição de rigidez de rotação,  $S_j$ , aplica-se até à rotação,  $\emptyset_{Xd}$ , em que  $M_{j,Ed}$  atinge o mesmo valor  $M_{j,Rd}$ , mas não a rotações superiores. Toda a junta apresenta uma rigidez de rotação inicial,  $S_{j,ini}$ , e que traduz a inclinação da relação de cálculo momento-rotação na zona elástica (c). O valor de cálculo da

capacidade de rotação final,  $\emptyset_{Cd}$ , de uma junta, é igual à rotação máxima da relação de cálculo momento-rotação (c).



**Figura 2.28** - Relação de cálculo momento-rotação característica de uma junta viga-pilar num só lado [35].

Poderá considerar-se que uma junta com uma chapa de extremidade aparafusada ou com cantoneira de ligação dos banzos, tem uma capacidade de rotação suficiente para realizar uma análise plástica, desde que sejam satisfeitas as duas condições seguintes:

 a) o valor de cálculo do momento resistente da junta é condicionado pelo valor de cálculo da resistência:

- à flexão do banzo da coluna; ou

- à flexão da chapa de extremidade da viga ou da cantoneira do banzo tracionado;

 b) a espessura t do banzo do pilar ou da chapa de extremidade da viga ou da cantoneira do banzo tracionado (não necessariamente o mesmo componente básico de a) satisfaz a seguinte condição:

$$t \le 0.36 \, d\sqrt{f_{ub}/f_y} \tag{2.6}$$

Onde:

d, é o diâmetro nominal do parafuso;

 $f_{ub}$ , resistência última à tração do parafuso;

f<sub>v</sub>, tensão de cedência do componente básico considerado;

### 2.3. PARAFUSOS

### 2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os parafusos são dispositivos de ligação que tem por finalidade fazer a ligação entre os vários elementos de ligação, conforme evidencia a Figura 2.29 [38].



**Figura 2.29** - Elementos constituintes de uma ligação aparafusada entre duas vigas, por cobrejuntas, usando parafusos pré-esforçados da classe 10.9. Obra – Novo Hospital de Braga.

A Figura 2.30 descreve o tipo de solicitação que ao longo do tempo uma ligação aparafusada pode estar sujeita. Desta forma, os parafusos podem ser solicitados com esforços de tração, de corte e também pela sua combinação [40].



**Figura 2.30** - Tipos de esforços correntes em ligações aparafusadas [38].

Em estruturas metálicas, os parafusos usados são designados por parafusos comuns e por parafusos de alta resistência. De acordo com a Figura 2.31, os parafusos podem ser de rosca total ou de rosca parcial, consoante a sua norma. Por fim, apresentam os seguintes tamanhos, M12, M14, M16, M18, M20, M22, M24, M27, M30 e M36, de acordo com a norma EN 14399-3 de Março de 2005 [41].



a) Parafuso sextavado de rosca parcial, DIN 931.

b) Parafuso sextavado de rosca total, DIN 933.

Figura 2.31 - Exemplos de parafusos de rosca total e de rosca parcial.

### 2.3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 2.1 resume as classes de parafusos disponíveis para ligações metálicas. De um modo geral, nas ligações sujeitas a forças e momentos estáticos, podem ser utilizadas todas as classes de parafusos. Nas ligações sujeitas a forças cíclicas, suscetíveis de induzir fenómenos de fadiga, devem utilizar-se parafusos com elevada resistência a este fenómeno e com deformabilidade reduzida, nomeadamente os parafusos de classes 8.8 e 10.9 ou superiores [17] [42]. Estes parafusos de elevada resistência são usualmente utilizados em ligações de maior responsabilidade, tendo em vista os carregamentos dinâmicos, onde a probabilidade de haver qualquer deslizamento entre as partes ligadas é enorme, podendo mesmo comprometer a estrutura [38]. As vantagens de aplicação traduzem-se no aumento da rigidez da ligação, maior capacidade de resistir aos esforços periódicos e um melhor comportamento da estrutura à fadiga [34].

 Tabela 2.1. - Valores nominais da tensão de cedência,  $\mathbf{R}_p$ , e da tensão de rotura à tração,  $\mathbf{R}_m$ , para parafusos [43].

Classe de resistência do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$R_p$ (MPa)	240	320	300	400	480	640	900
$R_m$ (MPa)	400	400	500	500	600	800	1000

Segundo a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], o anexo nacional pode excluir algumas classes de resistência de parafusos, nomeadamente as classes 4.8 e 5.8.

#### 2.3.3. COMPORTAMENTO DO PARAFUSO NUMA LIGAÇÃO

Numa análise estrutural ao parafuso, constata-se que a parte roscada é considerada a zona mais fraca. Na avaliação da resistência de um parafuso é usada a "seção resistente à tração", e é definido como a média entre o diâmetro do núcleo da espiga "d<sub>n</sub>" e o diâmetro médio "d<sub>m</sub>" [17], conforme a expressão (2.7) e a Figura 2.32.

$$d_{res} = \frac{d_n + d_m}{2}$$
(2.7)

O tamanho do parafuso é definido em função do seu diâmetro nominal, do comprimento abaixo da cabeça e do comprimento da parte roscada [17] [42].



Figura 2.32 - Seção transversal e "seção resistente" de um parafuso [42].

Numa ligação aparafusada podem-se desenvolver um conjunto de forças internas como forças de corte, de esmagamento e de tração [17] [42]. A resistência última de uma ligação aparafusada é avaliada assumindo simplificações na redistribuição das forças internas, comprovadas experimentalmente [17]. De acordo com a Figura 2.33, as diversas transmissões de forças possíveis ao longo de uma ligação, faz com que os parafusos possam ser solicitados como: 1) parafusos ao corte, 2) parafusos de alta resistência em ligações pré-esforçadas resistentes ao escorregamento e 3) parafusos tracionados [42].



Figura 2.33 - Transmissão de esforços em ligações aparafusadas usando parafusos comuns e de alta resistência [29].

Resumidamente, as forças internas de corte, tração e esmagamento, podem ser transmitidas usando parafusos standards, e por atrito entre as chapas, usando parafusos de alta resistência [42]. Designa-se de cones de pressão ou cilindro de pressão, o volume de material das chapas sujeitas a esforços de compressão transversais que são gerados pelos parafusos de alta resistência, ao aplicar-se o pré-esforço [38], conforme apresenta a Figura 2.34.



Figura 2.34 - Esquema do cone e do cilindro de pressão numa ligação de alta resistência [38].

#### 2.3.4. APERTO DOS PARAFUSOS

Como citado anteriormente, os parafusos standards são usados geralmente para carregamentos predominantemente estáticos e o eventual deslize dos elementos ou peças ligadas não afetará a vida útil dos parafusos, da própria ligação ou da estrutura global [38]. O aperto pode ser aplicado manualmente através de uma chave "snug-tight" ou "spanner-tight" [17]. Este aperto é considerado suficiente para garantir força de atrito

entre as placas ligadas. Na eventualidade de existirem forças superiores à força de atrito ocorrerá um deslizamento devido à folga entre o parafuso e o furo [17]. Este deslizamento terminará quando o núcleo do parafuso entra em contacto com a placa. Se continuarmos a aplicar forças superiores, verifica-se uma resposta elástica até que o núcleo do parafuso ou a placa de ligação entrem em fase plástica. A deformação plástica pode iniciar-se no parafuso e na placa de ligação em simultâneo. A rotura pode tornar-se iminente num dos seguintes modos: corte no parafuso, ou esmagamento da placa de ligação ou rotura em bloco [17].

Em ligações pré-esforçadas resistentes ao escorregamento, os parafusos de alta resistência devem ser apertados, no mínimo, com 70% da sua tensão última [17]. De acordo com a cláusula 3.4.1 da norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], são definidas três categorias de ligações resistentes ao escorregamento, sendo a resistência da ligação em função do coeficiente de atrito das superfícies em contacto ( $\mu$ ) e da força de aperto ( $F_{p,Cd}$ ) introduzida [17], conforme ilustração da Figura 2.35.



Figura 2.35 - Parafusos de alta resistência numa ligação pré-esforçada [17].

Os parafusos de alta resistência requerem cuidados especiais por serem montados com pré-esforço. Estes cuidados especiais são em relação às anilhas e ao acabamento das superfícies em contato das partes ligadas [40]. Em ligações usando estes parafusos, a resistência é obtida por atrito ou por tração dos parafusos. O seu aperto deve ser em conformidade com os requisitos 1.2.7 da norma de referência, Grupo 7 do Eurocódigo 3 e pode ser realizado de quatro formas: pelo método de torque, método combinado,

método de aperto HRC e método direto indicador de tensão (DTI). Devido ao aperto da porca, é gerada uma força de compressão alta, que impede que os elementos metálicos ligados não se movimentam entre si devido à ação do atrito gerado [42].

#### 2.4. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS

As ligações aparafusadas devem ser projetadas segundo os critérios estipulados no Eurocódigo 3. A disposição dos furos para parafusos tem por objetivo impedir a corrosão, a encurvadura local e facilitar a colocação dos parafusos. Para isso, deve obedecer a determinadas regras que são utilizadas para determinar as resistências de cálculo dos parafusos [34]. As distâncias máximas e mínimas entre os eixos dos parafusos, quer aos bordos quer às extremidades das peças a ligar, devem respeitar a cláusula 3.5 da norma NP EN 1993-1-8 [29].

### 2.4.1. CATEGORIAS DAS LIGAÇÕES

O dimensionamento de uma ligação aparafusada sujeita a um esforço de corte ou de tração deve ser realizado após a determinação dos esforços atuantes no nó da ligação [29]. Segundo a cláusula 3.4 da norma NP EN 1993-1-8 [29], as ligações devem ser projetadas de acordo com a sua classificação segundo as categorias da Tabela 2.2, que dependem do tipo de esforço atuante.

### CAPÍTULO II Comportamento de Ligações Aparafusadas Sem e Com Injeção de Resina

CATEGORIA	CRITÉRIOS	OBSERVAÇÕES				
LIGAÇÕES AO CORTE						
А	$F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$	Não é necessário qualquer pré- esforço. Poderão utilizar-se as				
resistente ao esmagamento	$F_{V,Ed} \leq F_{b,Rd}$	classes de parafusos 4.6 a 10.9.				
В	$F_{V,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$	Deverão utilizar-se parafusos pré-esforçados das classes 8.8 ou				
resistente ao escorregamento	$F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$	10.9. Para a resistência ao escorregamento no estado limite				
no estado limite de utilização	$F_{V,Ed} \leq F_{b,Rd}$	de utilização, ver 3.9.				
С	$F_{V,Ed} \leq F_{s,Rd}$	Deverão utilizar-se parafuso pré-esforçados das classes 8.8 ou				
resistente ao escorregamento	$F_{V,Ed} \leq F_{b,Rd}$	10.9. Para a resistência ao escorregamento no estado limite				
no estado limite último	$\sum F_{V,Ed} \leq N_{net,Rd}$	último, ver 3.9. $N_{net,Rd}$ ver 3.4.1(1) c).				
	LIGAÇÕES À TRAÇÃO					
D	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	Não é necessário qualquer pré- esforço. Poderão utilizar-se as				
não pré – esforçada	$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	classes de parafusos 4.6 a 10.9. $B_{p,Rd}$ ver o Quadro 3.4.				
E	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	Deverão utilizar-se parafusos pré-esforçados das classes 8.8 ou				
pré – esforçada	$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	10.9. $B_{p,Rd}$ ver o Quadro 3.4.				

Tabela 2.2. - Diferentes categorias de ligação [29].

## 2.4.2. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INDIVIDUAL DAS PEÇAS DE LIGAÇÃO

Os cálculos das resistências aplicam-se a parafusos normalizados, desde a classe resistência 4.6 a 10.9 e obedecem à cláusula 3.6.1, da norma NP EN 1993-1-8 [29], conforme a Tabela 2.3.

**Tabela 2.3.** - Valor de cálculo da resistência individual de peças de ligação, consoante o tipo de solicitação, corte e/ou tração [29].

TIPO DE RESISTÊNCIA	VALOR DE CÁLCULO
Resistência ao corte por plano de corte	$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$
Resistência ao esmagamento	$F_{b,Rd} = \frac{k_1  \alpha_b  f_u  d  t}{\gamma_{M2}}$

CAPÍTULO II Comportamento de Ligações Aparafusadas Sem e Com Injeção de Resina

Resistência à tração	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$
Resistência ao punçoamento	$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$
Combinação de corte com tração	$\frac{F_{V,ED}}{F_{V,RD}} + \frac{F_{t,ED}}{1.4 F_{t,RD}} \le 1.0$

É de referir que a nomenclatura está de acordo com a norma NP EN 1993-1-8 [29].

A Tabela 2.4 refere-se a uma ligação resistente ao escorregamento também ser submetida a um esforço de tração,  $F_{t,Ed}$ , para além do esforço de corte,  $F_{V,Ed}$ . Desta forma, o valor de cálculo da resistência ao escorregamento por parafuso será igual a:

**Tabela 2.4.** - Valor de cálculo da resistência ao escorregamento, de ligações submetidas à combinação de esforços de tração e corte [29].

CATEGORIA	VALOR DE CÁLCULO
categoria B	$F_{S,Rd,ser} = \frac{K_s \ n \ \mu \ (F_{p,C} - 0.8 \ F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3,ser}}$
categoria C:	$F_{S,Rd} = \frac{K_{s} n \mu (F_{p,C} - 0.8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}}$

Em ligações pré-esforçadas, usando os parafusos da classe 8.8 e 10.9, a sua resistência depende de vários parâmetros, nomeadamente da força do pré-esforço,  $F_{p,C}$  (equação 2.10), do coeficiente do atrito,  $\mu$ , do número de superfícies em contacto, *n* e dos valores  $K_S$  mediante a configuração do furo. Desta forma, o valor de cálculo da resistência ao escorregamento usando parafusos de alta resistência é dado através dos valores,  $F_{S,Rd}$ (equação 2.8) e  $F_{S,Rd,ser}$  (equação 2.9) [29]:

$$F_{S,Rd} = \frac{K_S n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$
(2.8)

$$F_{S,Rd,ser} = \frac{K_s \ n \ \mu}{\gamma_{M3,ser}} F_{p,C}$$
(2.9)

Sendo,

$$F_{p,C} = 0.7 f_{ub} A_s \tag{2.10}$$

Segundo a cláusula 3.9.1 da norma NP EN 1993-1-8 [29], os valores do coeficiente de atrito,  $\mu$ , a usar para este tipo de parafusos de alta resistência são apresentados na Tabela 2.5.

Classe das superfícies de atrito	Coeficiente de atrito µ
А	0.5
В	0.4
С	0.3
D	0.2

**Tabela 2.5.** - Valor de coeficiente de atrito, μ, para parafusos de alta-resistência [29].

Antes da montagem das peças, as superfícies de contacto devem ser preparadas para produzir o atrito necessário entre elas e os seus coeficientes são determinados através de ensaios especificados segundo o Anexo G da norma NP 1090-2 de 2008 [28]. De acordo com esta norma, as classes de atrito são definidas da seguinte forma:

- Classe A, superfícies decapadas a chumbo ou grenalha, por forma a remover toda a ferrugem. O tipo de revestimento a aplicar nas superfícies terá de garantir um coeficiente de atrito,  $\mu$ , não inferior a 0.50.

- Classe B, superfícies decapadas a chumbo ou grenalha por forma a remover todos os pontos de corrosão. O revestimento das superfícies deverá ser à base de tinta de silicato de zinco alcalino e a espessura deve ser entre 50-80  $\mu$  m.

- Classe C, superfícies decapadas manualmente por forma a remover a corrosão.
- Classe D, superfícies não tratadas.

### 2.4.3. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA EM PARAFUSOS INJETADOS

Segundo a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], os parafusos injetados são considerados uma alternativa aos parafusos standards e aos rebites nas ligações de categorias A, B e C, especificadas anteriormente na Tabela 2.2.

Em termos de verificação estrutural, a cláusula 3.6.2, da norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], preconiza:

Deverão ser utilizados parafusos injetados pré-esforçados nas ligações das categorias
 B e C, respeitando os mesmos procedimentos de aplicação para estes tipos de parafusos,
 dos parafusos de alta resistência.

- A capacidade resistente última ao corte do parafuso, em ligações da categoria A, não deve exceder o menor dos seguintes valores de cálculo: da resistência ao corte em parafusos de alta resistência e da resistência ao esmagamento da resina,  $F_{b,Rd,resin}$ , que é obtida a partir da seguinte expressão [26] [29]:

$$F_{b,Rd,resin} = \frac{K_t K_s \ d \ t_{b,resin} \ \beta \ f_{b,resin}}{\gamma_{M4}} \tag{2.11}$$

Sendo:

- $F_{b,Rd,resin}$ , a resistência à pressão diametral de um parafuso injetado.
- β, o coeficiente função da relação entre as espessuras das chapas ligadas, sendo obtido através da Figura 2.36.
- $f_{b,resin}$ , a resistência à pressão diametral da resina, de acordo com o EC3.
- t<sub>b,resin</sub>, a espessura de apoio efetiva da resina, de acordo com a Tabela 2.6 e a Figura
   2.38.
- $k_t$ , é igual a 1.0 para estados limites de utilização e é igual a 1.2 para o estado limite último.
- $k_s$ , é igual a 1.0 para furos com folgas normalizadas ou (1.0 a 0.1) para furos sobredimensionados.
- m, a diferença (em mm) entre as dimensões dos furos normalizados e as dimensões dos furos sobredimensionados. No caso de furos ovalizados curtos é igual a 0. 5 × (a diferença (em mm) entre o comprimento e a largura do furo).
- d, é o diâmetro nominal do parafuso.
- l, é o comprimento do parafuso.



Figura 2.36 - Coeficiente  $\beta$  em função da relação entre as espessuras das chapas ligadas [29].

**Tabela 2.6.** - Valores de  $\beta$  e  $t_{b,resin}$  em função da relação das espessuras das chapas ligadas [29].

t1 / t2	β	t <sub>b,resin</sub>
≥ 2.0	1.0	$2 t_2 \le 1.5 d$
$1.0 < t_1/t_2 < 2.0$	$1.66 - 0.33 (t_1/t_2)$	$t_1 \le 1.5 d$
≤ 1.0	1.33	$t_1 \le 1.5 d$

De acordo com a Figura 2.37, para o cálculo da resistência ao esmagamento de parafusos com comprimentos superiores a 3 vezes o diâmetro do parafuso, o valor da espessura de apoio efetiva da resina,  $t_{b,resin}$ , não deve exceder 3 vezes o diâmetro.



Figura 2.37 - Relação entre o comprimento do parafuso e a espessura efetiva da resina t<sub>b.resin</sub> [23].

- Para qualquer parafuso, a resistência ao corte em cada seu estado limite de uma ligação da categoria B e C devem ser inferiores à soma da resistência por atrito do parafuso com a resistência à compressão da resina, para o estado limite considerado.

# 2.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA RELATIVA À INVESTIGAÇÃO RECENTE SOBRE COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS

O comportamento das ligações metálicas aparafusadas continua a ser um problema de interesse na área das estruturas de aço. Atualmente pode-se verificar que tem vindo a crescer os estudos sobre as ligações aparafusadas. Investigadores, um pouco por todo o mundo, vêm desenvolvendo trabalhos de caracter numérico e experimental em diferentes tipos de ligações metálicas aparafusadas.

Apesar deste crescente trabalho, para o objetivo da presente dissertação constata-se que ainda se desenvolveram muito poucos estudos que permitem comparar o comportamento estrutural das ligações aparafusadas sem e com injeção de resina.

A Tabela 2.7 apresenta um resumo de trabalhos de investigação recentes (experimentais e numéricos) desenvolvidos em ligações aparafusadas que no seu conjunto têm auxiliado na elaboração de procedimentos normativos. Apenas será realizada uma referência à componente experimental do trabalho sempre que não tiverem sido realizados trabalhos numéricos. Sempre que tenham sido realizados trabalhos numéricos, estes merecerão a atenção, pois é a abordagem seguida nesta dissertação.

Trabalho	Investigação	Descrição	Objetivos
A.M. Gresnigt, G. Sedlacek and M. Paschen, [24]. (2000)	Experimental	3 Ensaios de fluência à temperatura ambiente e 1 ensaio à temperatura de 70°C, realizados em laboratório da Universidade de Delft.	Avaliar a resistência à deformação de longa duração dos parafusos injetados da reabilitação da ponte em Oranienburg, Alemanha.
Citipitioglu, A. M., Haj-Ali, R. M., White, D. W., [44] (2001)	Experimental e Numérica	Modelo numérico segundo MEF usando o software ABACUS com os dados experimentais. A malha dos elementos é definido por TRUEGRID e foi usado simetria para modelar metade da ligação. Foi criado pares de contactos entre os diferentes corpos através "master-slave" e usado o $\mu$ =0.33.	Desenvolver um modelo numérico de uma ligação aparafusada tipo viga-pilar. Validação com resultados experimentais.

**Tabela 2.7.** - Resumo dos principais estudos científicos recentes envolvendo as ligações aparafusadas sem e com injeção de resina.

## CAPÍTULO II Comportamento de Ligações Aparafusadas Sem e Com Injeção de Resina

Montgomery, J., [45]. (2002)	Numérica	Análise numérica de um tipo de junta aparafusada segundo o MEF, usando software ANSYS 5.7.	Modelar e interpretar juntas aparafusadas segundo MEF, através de várias abordagens para a simulação dos ligadores: "No Bolt Simulation", "Coupled Bolt", "RBE (Rigid Body Element) Bolt", "Spider Bolt", "Hybrid Bolt" e "Solid Bolt".
Kim, J., Yoon, Joo-Cheol, Kang, Beom-Soo, [46]. (2006)	Numérica	Análise numérica de um tipo de junta aparafusada segundo o MEF, usando software ANSYS. Utilização de pares de contacto tipo Superfície- Superfície.	Modelar e interpretar juntas aparafusadas segundo MEF, através das seguintes simulações: "No Bolt Simulation", "Coupled Bolt", "Spider Bolt" e "Solid Bolt".
Mattes, J., [26]. (2007)	Experimental	• Parafusos M20 8.8 a colocar em furos de 22mm; • Parafusos M20 8.8 a colocar em furos de 22 e 26mm de diâmetro, injetados com resina do tipo Epoxi; • Parafusos M20 8.8 a colocar em furos de 22 e 26mm de diâmetro, injetados com resina do tipo Polyester.	Encontrar a melhor solução resistente à fadiga para substituir rebites por parafusos injetados com resina epóxi ou polyester, mas também com parafusos ajustados onde a folga entre a parede do furo e o parafuso é inferior a 0,5mm.
Silva, J., [3]. (2007)	Experimental e Numérica	O modelo numérico segundo MEF criado em linguagem APDL através do software ANSYS 10.0. A malha da ligação baseada em elementos 3D de 20 nós. Foram criados pares de contacto tipo Superfície-Superfície entre os diferentes corpos; utilização dos valores $\mu$ =0; 0.15; 0,35 e 0.6 para coeficientes de atrito. As ligações duplas em estudo: (1) rebites, (2) parafusos sem e com pré-esforço e (3) parafusos injetados com resina estrutural	Comparar a resistência à fadiga entre ligações rebitadas e aparafusadas, através de ensaios experimentais e modelos numéricos. Não foi modelado o comportamento de ligações com resina injetada.
Gomes, J. M. T., [47] (2007)	Experimental e Numérica	Modelo numérico segundo o MEF, usando o software FEMAP com elementos de 4 nós e simulado no software Mentat MARC.	Estudar uma ligação rígida viga-pilar entre perfis I, comparando a metodologia de projeto do EC3 com modelos de elementos finitos e com resultados experimentais.
Bessa, W. O., [36]. (2009)	Experimental e Numérica	Modelo numérico segundo o MEF, usando o software ANSYS 9.0 e adicionalmente TRUEGRID. Foram adotados diagramas multilinear para a representação do comportamento tensão-extensão do aço e betão A malha de todos os elementos de aço foi criada com 8 nós (SOLID45). O contato foi definido pelos elementos "TARGE170" e "CONTA173".	Analisar e comparar os resultados obtidos experimentais e numéricos de uma ligação aparafusada viga mista-pilar.

## CAPÍTULO II Comportamento de Ligações Aparafusadas Sem e Com Injeção de Resina

Rodrigues, M.C., Lima, L. R. O., Vellasco, P. C. G. da S., Andrade, S. A. L de, Silva, J.G. S. da. [48]. (2010)	Experimental e Numérica	Modelo numérico segundo o MEF, usando o software ANSYS 11.0. Todos os corpos da ligação foram modeladas com 8 nós (SOLID185), enquanto o regidificador da viga com "SHELL181". Os materiais foram modelados estruturalmente segundo uma análise não-linear geométrica. Foram criados os pares de contacto entre os vários corpos através de elementos "TARGE170" e "CONTA173" e utilizado µ=0.25.	Avaliar o comportamento de uma ligação aparafusada tipo viga-pilar, através de modelo numérico.
Jesus, A., Silva, J., Figueiredo, M., et. Al., [19]. (2010)	Experimental	Os provetes ensaiados ao corte compostos por ligações duplas e por ligações simples com e sem injeção de resina.	Avaliar o comportamento à fadiga em ligações aparafusadas com e sem injeção de resina em materiais usados em pontes.
Vrakas, A. A., [35]. (2011)	Numérica	Modelo numérico segundo o MEF, usando o software ABACUS. Foram criados pares de contactos entre os diferentes corpos da ligação e usado o µ=0.30.	Analisar uma ligação aparafusada tipo viga-pilar não linear através de modelo numérico e comparado com resultados experimentais para validação do modelo numérico.
Kortis, J., [27]. (2011)	Numérica	Modelo numérico segundo MEF usando o software CAD ADINA. A malha da ligação 2D foi formada por 4 nós e a malha 3D por 8 nós e definido as condições de fronteira.	Avaliar e comparar as tensões desenvolvidas no primeiro rebite de uma ligação dupla, quando este é simulada em modelo numérico com outras ligações: (1) ligação rebitada com dois rebites, (2) apenas um rebite, (3) um rebite e um parafuso injetado na totalidade e (4) um rebite e um parafuso metade injetado.
Qureshi, J., Mottram, T., [49]. (2012)	Experimental	3 Provetes usando resinas diferentes: Sikadur-30, RenGel SW404 e Empty Perspex. 1 Provete sem qualquer injeção.	Avaliar a resistência à fadiga através da comparação da resistência ao deslizamento segundo variações de cargas nos 4 provetes, usando materiais "Fibre Reinforced Plastic" (FRP) a utilizar em pontes.
Balc, R., Chira, A., Chira. N., [50]. (2012)	Numérica	Modelo numérico segundo MEF usando o software ABACUS com os dados experimentais. Foi considerado a formulação "augmented Lagrange" para simular o contacto entre os vários corpos da ligação; foi assumido coeficiente de atrito, µ=0.3. Os furos têm o mesmo diâmetro que os parafusos.	Comparar resultados obtidos entre o modelo numérico e os ensaios, de uma ligação tipo viga-pilar usando parafusos pré-esforçados sem injeção de resina, afim de validar o próprio modelo.

Eldemerdash, M., Abu-Lebdeh, T., Al Nasra, e M., [51]. (2012)	Numérica	Modelo numérico segundo o MEF, usando o software ANSYS 11.0. A malha dos corpos foi modelada com 8 nós (SOLID185), enquanto a haste do parafuso foi usado o elemento LINK180. Todos os pares de contacto foram definidos por Superficie- Superficie, através de elementos "CONTA174" e "TARGE170". Os materiais foram modelados com curvas tensão-extensão multilineares.	Desenvolver modelos de elementos finitos tridimensionais para estudar o comportamento do parafuso numa ligação tipo viga-pilar.
---	----------	--	---

A análise destes estudos e das principais conclusões permitem referir:

- A maioria dos estudos numéricos referem-se a ligações do tipo viga-pilar.

- Os parafusos injetados com resina são uma excelente alternativa para a substituição de rebites defeituosos em estruturas rebitadas antigas [24] [26].

- Os parafusos injetados com resina podem ser utilizados com sucesso para fortalecer placas corroídas, em especial nas áreas onde a ligação com soldadura ou através de parafusos de alta resistência é de difícil execução [24].

- Uma ligação com dois parafusos injetados com resina epóxida e com uma folga de 2mm nos furos apresenta uma rigidez inicial praticamente idêntica à da ligação rebitada e comparativamente aos rebites, a carga última é superior em pelo menos 60% [26].

- A redução da folga entre a parede do furo e o parafuso contribui para um aumento da rigidez e da carga última da ligação [26].

 À temperatura de 70°C, os parafusos injetados tem apenas uma influência moderada sobre as deformações [24].

- A resina epóxida tem um comportamento melhor que a resina polyester [26].

- A substituição integral de rebites por parafusos injetados com resina epóxida é viável, desde que se respeitam os limites de fadiga para a fase de serviço [26].

 As ligações aparafusadas sem pré-esforço apresentam a menor resistência à fadiga e as ligações com pré-esforço o contrário [3].

- Ligações aparafusadas de corte duplo com injeção de resina apresentaram valores de resistência à fadiga inferiores às ligações sem injeção de resina, encontrando-se a zona crítica da ligação, na superfície do furo da placa central [3].

- As ligações aparafusadas testadas em [19], usando resina estrutural têm uma resistência à fadiga menor que as ligações correntes, sendo este resultado contraditório ao que o Eurocódigo 3 descreve sobre este tipo de ligação, usando resinas estruturais.

 O aumento do pré-esforço traduz uma redução do fator de intensidade de tensões em fendas [3].

- A solução menos resistente em conjunto com os rebites é usando parafusos injetados com resina estrutural até metade [27].

- A resina consegue prevenir o súbito deslizamento nas ligações aparafusadas sujeitas a pré-carregamentos [27].

- A corrosão interna na ligação é evitada quando é usada resina, pois esta preenche todo o espaço entre o corpo do parafuso e as paredes dos furos [27].

- As ligações aparafusadas usando resinas estruturais injetadas oferecem melhor resistência ao deslizamento e à fadiga do que as ligações sem injeção de acordo com a referência [49].

- A simulação usando a abordagem *"Solid Bolt"* é a mais realista para modelar uma ligação aparafusada, obrigando à criação de pares de contacto entre o parafuso e porca e as peças a ligar [45] [46].

- Uma das desvantagens da utilização da abordagem *"Solid Bolt"* é o aumento do tempo de cálculo necessário, devido ao número de elementos sólidos necessários e à não linearidade introduzida pelo contacto [45].

- Numa análise estática, as abordagens "*Coupled Bolt*" e "*Spider Bolt*" podem poupar 62% e 49% do tempo de processamento, e de 21% e 19% do uso da memória em relação ao modelo "*Solid Bolt*" [46].

 O MEF representa-se com uma opção atraente para a simulação de ligações aparafusadas, permitindo simular um comportamento muito real e num período de tempo relativamente curto das ligações [50].

- Existem boas correlações entre os modelos numéricos criados e os resultados obtidos experimentalmente [35] [36] [44] [47] [51].

De acordo com as recomendações europeias [25], as ligações aparafusadas com injeção de resina têm vindo a ser um sucesso em várias vertentes de utilização conforme foi citado anteriormente.

Como se pôde constatar, são poucos os estudos de ligações aparafusadas com injeção de resina, tornando-se ainda mais restrito se se limitar a procura a estudos que incluam simulação numérica. Os poucos resultados que se conhecem foram obtidos, na sua maioria, através de ensaios experimentais e foi apenas realizado um estudo em modelo numérico [27]. No caso das ligações sem injeção de resina, verifica-se que muitos resultados foram já obtidos através de modelos numéricos.

Assim, a presente dissertação procura dar um contributo ao vasto e, até agora, pouco explorado mundo das ligações aparafusadas sem e com injeção de resina usando modelos numéricos. Para além de ligações aparafusadas standard (folgas normais entre furo e parafusos) também são analisadas as ligações aparafusadas com parafusos ajustados.
## CAPÍTULO III

## MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS DE LIGAÇÕES Aparafusadas

## **3.1. INTRODUÇÃO**

O presente capítulo tem como objetivo principal descrever os modelos de elementos finitos propostos neste estudo. No total serão modelados dois tipos de ligações aparafusadas e em cada ligação serão modelados três tipos de parafusos (parafusos standard, parafusos com injeção da resina e parafusos ajustados. Inicialmente será feita uma descrição geral e breve do método numérico utilizado, o método dos elementos finitos. Posteriormente apresentar-se-á o software comercial que permitiu fazer todas as simulações do presente estudo.

Para cada modelo numérico será apresentada a geometria, as malhas, as condições de fronteira, as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, os pares de contacto, e parâmetros importantes neste estudo: algoritmo de contacto, folga entre o parafuso e os elementos de ligação, modelo elasto-plástico dos materiais, modelo de atrito e préesforço no parafuso.

#### 3.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A primeira designação de "elemento finito" foi usada em 1960 por Ray Clough e inicialmente utilizavam-se elementos triangulares e tetraédricos e só mais tarde se começou a utilizar elementos quadriláteros e hexaédricos [5]. O MEF é o mais conhecido, quando se utilizam métodos numéricos avançados [52]. Atualmente a modelação por elementos finitos é uma ferramenta indispensável em todos os ramos da Engenharia [3] [53].

Azevedo. [5] refere que a formulação do MEF pode ser baseada em um dos seguintes métodos: (i) o método dos deslocamentos, (ii) modelos de equilíbrio, (iii) métodos híbridos e (iv) métodos mistos. O mesmo autor afirma que o método que apresenta maior simplicidade e versatilidade é o método dos deslocamentos.

No MEF um corpo ou uma estrutura é representada por um conjunto de subdivisões chamadas de elementos finitos, mantendo as mesmas propriedades da estrutura original

[5] [53]. Este transforma um problema físico num modelo matemático e leva à formulação de uma série de equações diferenciais a serem consideradas para a análise do fenómeno a estudar [5] [53]. Nos trabalhos de Zienkiewicz [54] e Fusco. [55], a aplicação do MEF é explicado em pormenor com alguns exemplos práticos.

Na análise por elementos finitos podem adotar-se distintos elementos finitos, conduzindo a malha de elementos finitos com determinado número de nós. Na presente dissertação, por forma a obter resultados com maior qualidade, os modelos de elementos finitos foram criados com elementos quadriláteros de 20 nós, com três graus de liberdade em cada nó, nomeadamente deslocamentos nodais segundo as direções X, Y e Z, conforme ilustram as Figuras 3.1 e 3.2, respetivamente. No total, estes elementos finitos apresentam 60 graus de liberdade.



Figura 3.1 - Elemento finito isoparamétrico quadrático com 20 nós, usado nos modelos das duas ligações aparafusadas [56].



Figura 3.2 - Graus de liberdade de um nó [57].

A análise segundo o MEF de todos os modelos que foram criados seguiram os procedimentos básicos definidos por Meireles [53]. De acordo com Meireles [53], estes procedimentos são: (i) pré-processamento, (ii) solução e (iii) pós-processamento. O pré-processamento é composto pelos passos ilustrados na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Sequência do pré-processamento para realizar uma análise segundo MEF [53].

De acordo com a Figura 3.3, a sequência do pré-processamento é: 1) definição geométrica do modelo, 2) definição do tipo de elemento, 3) definição das propriedades do material, 4) definição da malha que corresponde à subdivisão do sólido em elementos finitos e 5) definição das condições de fronteira, incluindo a aplicação das cargas.

A solução inclui o agrupamento do sistema de equações, através dos dados de préprocessamento e a sua resolução através de métodos diretos ou iterativos.

O pós-processamento é composto pela determinação das grandezas derivadas do campo de deslocamentos, tais como: o campo das deformações, campo de tensões, reações, etc.

Para cada modelo numérico das ligações aparafusadas a avaliação das localizações críticas, onde se espera iniciar o colapso pode ser realizada através da análise das tensões equivalentes de Von Mises, ou deformações equivalentes de Von Mises definidas do seguinte modo:

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.1)

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu} \left( \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$
(3.2)

onde:

 $\sigma_e$  é a tensão equivalente;

 $\varepsilon_e$  é a extensão equivalente;

v' é o coeficiente de Poison efetivo do material (coeficiente elástico do material para carregamentos elásticos ou 0.5 para solicitações plásticas);

 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  são tensões principais;

 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  são extensões principais;

O MEF, tal como os outros métodos numéricos, também apresenta erros de aproximação que influencia os resultados das análises. O autor Meireles [53] refere que estes erros podem resultar dos seguintes contributos:

- Erros de definição das propriedades mecânicas e físicas dos materiais, bem como a geometria dos corpos. Estes erros devem ser corrigidos ou minimizados quando detetados.

- Utilização indevida de elementos finitos.
- Aplicação das condições de fronteira e cargas de forma incorreta.

- Fraca definição da malha de elementos finitos, por exemplo, tamanho geométrico da malha inadequado.

- Erros de precisão inerentes aos métodos numéricos utilizados na solução das equações de equilíbrio.

O mesmo autor [53] alerta para o facto de numa estrutura de complexidade apreciável, modelada com um número elevado de elementos finitos, por forma a obter-se uma boa descrição geométrica, pode haver acumulação de erros numéricos [53]. Quanto maior for o número de elementos finitos, maior será o número de operações matemáticas envolvidas, traduzindo-se na diminuição da fiabilidade dos resultados finais obtidos, devido aos processos de propagação de erros numéricos, uma vez que se tratam de métodos aproximados [53]. Outra desvantagem dos modelos com um número elevado de elementos finitos é o custo de cálculo computacional que pode ser muito significativo.

# 3.2.1. UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Os modelos de elementos finitos das ligações aparafusadas foram criados ao código comercial ANSYS através da linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language). Trata-se de uma linguagem de programação utilizada para automatizar funções comuns e até mesmo para a construção de um modelo a partir de parâmetros. De acordo com a Figura 3.4, através de variações de parâmetros de entrada é possível lançar simulações por elementos finitos e posteriormente proceder à análise de resultados.



Figura 3.4 - Sequência de modelação em elementos finitos utilizando software Ansys [52].

A parametrização dos modelos permite facilmente modificar as dimensões, propriedades dos materiais, elementos finitos, evita outros parâmetros de interesse. Toda a modelação foi realizada através da ferramenta comercial de elementos finitos ANSYS 14.5. Segundo Meireles [53] o software ANSYS oferece vários tipos de soluções de elementos finitos para problemas físicos diversos, assim como vários métodos de extração de resultados.

## 3.3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS PROPOSTOS PARA CADA LIGAÇÃO APARAFUSADA

Para avaliar e comparar os comportamentos de ligações aparafusadas sem e com injeção de resina, serão analisadas duas geometrias de ligações aparafusadas: (i) ligação aparafusada com corte duplo e (ii) ligação aparafusada viga-pilar.

Para ambas ligações foram desenvolvidos três modelos numéricos, em linguagem APDL, variando a tipologia dos ligadores usados, de acordo com a Tabela 3.1. No final realizaram-se várias simulações para cada um dos modelos criados através do software ANSYS e todos os resultados obtidos serão apresentados no Capítulo 4.

As diferenças entre os três tipos de modelos adotados para cada solução de ligação, resultaram no valor da folga entre o furo das chapas e o parafuso e na possibilidade do seu preenchimento com resina. Desta forma, o 1º modelo proposto para as ligações diz respeito à utilização de parafusos normais com uma folga diametral igual a 2mm, o 2º modelo foram utilizados parafusos ajustados e no 3º modelo foram utilizados parafusos injetados com resina estrutural.

Número do Modelo	Classificação do Modelo		
LIGAÇÃO APARAFUSADA COM CORTE DUPLO			
1º Modelo	Folga de 2mm sem preenchimento de resin		
2° Modelo	Parafuso ajustado		
3° Modelo	Folga de 2mm preenchida com resina		
LIGAÇÃO	APARAFUSADA VIGA-PILAR		
1° Modelo	Folga de 2mm sem preenchimento de resina		
2° Modelo	Parafusos ajustados		
3° Modelo	Folga de 2mm preenchida com resina		

Tabela 3.1. - Classificação dos três modelos numéricos usados para cada tipo de ligação aparafusada investigada.

No que se refere ao 1° e 2° modelo numérico proposta para cada uma das ligações, pretende-se avaliar o impacto da folga no comportamento estrutural em cada tipo de ligações investigadas. Estes dois modelos permitem comparar uma utilização corrente de parafusos com folga com a utilização especial de parafusos ajustados. No 3° modelo, pretende-se analisar o efeito da injeção de resina, de modo a preencher a folga entre o parafuso e o furo, no comportamento estrutural na ligação.

Antes de desenvolver qualquer análise de elementos finitos, o projetista deve determinar quais são as características da ligação a ser modelada e compreender a capacidade do programa de elementos finitos a usar. As características geométricas da ligação e as propriedades mecânicas dos materiais têm uma influência significativa no comportamento de uma ligação pelo que devem ser claramente definidos [58].

Inicialmente e de acordo com a norma NP EN 1993-1-8 de 2010 [29], definiu-se a geometria de cada uma das ligações. Foi assumida a mesma geometria para as três versões de modelos numéricos, de forma a possibilitar a comparação realista entre os seus comportamentos.

Os conjuntos dos corpos que integram cada uma das duas ligações em estudo foram modelados como materiais isotrópicos.

Para o material aço, foi assumido um módulo de Elasticidade (E) de 210 GPa e um coeficiente de Poisson (v') igual a 0.30, tal como estipulado na norma NP EN 1993-1-1 de 2010 [43].

Relativamente à resina adotada, tem a referência Sikadur-30 [59]. Trata-se de uma resina de dois componentes, baseada numa combinação de resinas epóxidas e cargas especiais para colagem de reforços estruturais [59]. Para este material, foi assumido um módulo de Elasticidade (E) de 12.8 GPa e um coeficiente de Poisson (v') igual a 0.26 [59].

#### 3.3.1. LIGAÇÃO APARAFUSADA COM CORTE DUPLO

#### 3.3.1.1. GEOMETRIA DA LIGAÇÃO E MATERIAIS UTILIZADOS

A geometria da ligação aparafusada com corte duplo assumiu as dimensões, conforme ilustrado na Figura 3.5 e 3.6. A ligação é composta por duas chapas, que têm uma largura de 70mm, um comprimento de 200mm (Figura 3.6), ligadas com um parafuso M22x70 e uma anilha de 3mm de espessura. Na Tabela 3.2 resume-se os materiais e propriedades elásticas consideradas na simulação da ligação aparafusada com corte duplo.



(Vista em planta)

Figura 3.5 - Geometria da ligação aparafusada com corte duplo (dimensões em mm).



**Figura 3.6** - Geometria das chapas de 10mm e 20mm usadas na ligação aparafusada com corte duplo (dimensões em mm).

Tabela 3.2. - Materiais e propriedades elásticas usadas nos materiais da ligação aparafusada com corte duplo.

Descrição do Corpo	Designação ANSYS	Material	Coeficiente de Poison (v)	Módulo de Elasticidade (E) [GPa]	Utilização do Modelo Numérico
Chapa 10mm	Corpo 1	S355	0.30	210	1°, 2° e 3° modelo
Chapa 20mm	Corpo 2	S355	0.30	210	1°, 2° e 3° modelo
Parafuso M22x70 + Anilha	Corpo 3	Classe 8.8	0.30	210	1°, 2° e 3° modelo
Resina	Corpo 4	Sikadur-30	0.26	12.8	3° modelo

#### 3.3.1.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO SEM RESINA

Após a definição da geometria e seleção dos materiais procedeu-se à construção das malhas de elementos finitos para cada corpo constituinte da ligação. Os modelos numéricos sem resina incluem o 1° e 2° modelo numéricos de acordo com a Tabela 3.1. Como se pode constatar na Tabela 3.2, os corpos 1, 2 e 3 são iguais para os três modelos, logo apresentam a mesma malha e propriedades elásticas. Cada corpo foi modelado com uma malha 3D com elementos sólidos quadriláteros de 20 nós (SOLID186) [60]. Para os modelos de ligação sem resina, foram criados apenas três corpos: corpo 1 e 2, representados na Figura 3.7, e o corpo 3 (parafuso+anilha) representado na Figura 3.8.



**Figura 3.7** - Discretização do corpo 1 (chapa lateral) e do corpo 2 (chapa central) e pormenor do elemento finito formado por 20 nós usado na ligação aparafusada com corte duplo.

Uma vez que o material das chapas na proximidade dos furos estará sujeito a maior concentração e gradiente de tensões, procedeu-se a um refinamento da malha de elementos finitos nesta localização.



**Figura 3.8** - Discretização do corpo 3 (parafuso M22x70 + anilha) usando elementos finitos sólidos de 20 nós, tal como aplicado na ligação aparafusada com corte duplo.

Como a ligação aparafusada com corte duplo apresenta dois planos de simetria (ver Figura 3.9), apenas um quarto da ligação foi modelado, visando reduzir o custo computacional das simulações. Este passo foi possível pela imposição de deslocamentos nulos na direção perpendicular aos planos de simetria (Eixos Y e Z), conforme apresenta a Figura 3.9.



Figura 3.9 - Condições de fronteira e simetria considerados nos modelos numéricos da ligação aparafusada com corte duplo.

Após a criação da malha 3D de todos os corpos que constituem a ligação sem resina, foram criados pares de contacto que simulam as interações de contacto entre os vários corpos. Antes de se modelar um problema de contato, deve-se inicialmente identificar as potenciais interações entre os vários corpos. A Figura 3.10, representa para o 1° e 2° modelo numéricos os quatro pares de contacto aço/aço criados (modelo de contacto Standard) e que foram:

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de 10mm) e o corpo 2 (chapa de 20mm). - 1º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 3 (cabeça do parafuso mais anilha) e o corpo 1 (chapa de 10mm).
- 2º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de 10mm) e o corpo 3 (espiga do parafuso). - 3º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 2 (chapa de 20mm) e o corpo 3 (espiga do parafuso). - 4º par de contacto;

O contacto foi modelado aplicando a tecnologia de elementos de contacto disponível no software ANSYS, usando as opções de contacto superfície – superfície e assumindo-se que ambas as superfícies em contacto são flexíveis. Primeiro selecionou-se as superfícies entre os diferentes corpos que poderão potencialmente entrar em contacto e de seguida, geraram-se nessas superfícies elementos de 8 nós (TARGE170 e CONTA174) [60] para modelar respetivamente todos os pares de contacto entre os mesmos corpos.



3º e 4º par de contacto. Modelo Standard.

**Figura 3.10** - Pares de contacto do 1° e 2° modelo numéricos sem injeção de resina, criados no software ANSYS através da tecnologia Superficie-Superficie, propostos para ligação aparafusada com corte duplo.

No final, o 1° e 2° modelo numéricos da ligação aparafusada com corte duplo sem resina, apresentam o aspeto da Figura 3.11.



**Figura 3.11** - Aspeto local das malhas de elementos finitos do 1° e 2° modelo numéricos da ligação aparafusada com corte duplo sem injeção de resina.

## 3.3.1.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO COM CORTE DUPLO COM RESINA INJETADA

Tal como nos modelos numéricos anteriores sem resina, a construção do 3º modelo com resina iniciou-se com a malha 3D de todos os corpos que constituem este modelo, usando elementos quadriláteros de 20 nós (SOLID186) [60]. Para este modelo numérico foram criados os mesmos corpos 1, 2 e 3 conforme foi citado na secção precedente e o corpo 4 (resina), de acordo com a Figura 3.12. A resina foi modelada com a forma de um cilindro com 2 elementos finitos na espessura, 10 elementos finitos na direção longitudinal (Z) e 20 elementos finitos na direção circunferencial.



**Figura 3.12** - Discretização do corpo 4 (resina), formada por elementos finitos de 20 nós, usada na análise da ligação aparafusada com corte duplo e com injeção de resina.

De acordo com a ilustração da Figura 3.12, na modelação da resina foi necessário dividir em duas metades, desprezando a resistência ao corte da resina.

Da mesma forma, depois de criar toda a malha 3D da ligação foram identificados e criados quatro pares de contacto entre os diferentes corpos para poder simular as interfaces aço/aço e aço/resina (ver Figura 3.13):

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de 10mm) e o corpo 2 (chapa de 20mm).
 - 1º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

Contacto entre o corpo 3 (cabeça do parafuso mais anilha) e o corpo 1 (chapa de 10mm).
 2º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

Contacto entre o corpo 3 (cabeça do parafuso mais anilha) e o corpo 4 (resina superior).
 - 3ºpar de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto "No Separation");

- Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso) e o corpo 4 (resina envolvente na chapa de 10mm) mais o corpo 4 (resina envolvente na chapa de 20mm).
- 4º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto Standard);

Uma vez que 1° e 2° par de contacto são iguais aos usados nos modelos numéricos da ligação com parafusos normais com folga e com parafusos ajustados, a Figura 3.13 ilustra apenas os novos pares de contacto usando parafusos com resina injetada.



4º par de contacto. Modelo Standard.

**Figura 3.13** - Pares de contacto do 3º modelo numérico, criado em ANSYS para simulação da ligação aparafusada com corte duplo e com injeção de resina.

Admitiu-se que a adesão é perfeita entre a resina e as paredes dos furos das chapas. Com efeito, a rotura ocorre pela resina (rotura adesiva), quando esta é tracionada.

À semelhança dos modelos numéricos anteriores, também se utilizou a tecnologia de elementos de contacto disponível no software ANSYS, usando a opção de contacto Superfície-Superfície com elementos de 8 nós (TARGE170 e CONTA174) [60] para modelar todos os pares de contacto. Todas estas superfícies de contacto foram consideradas flexíveis.

Também esta ligação aparafusada apresenta dois planos de simetria pelo que apenas um quarto desta foi modelada, conforme ilustra a Figura 3.14. Impôs-se a simetria através de deslocamentos nulos na direção perpendicular aos planos de simetria. No final da geração da malha, a ligação apresentou o aspeto da Figura 3.14.



Preenchimento da folga com resina

Figura 3.14 - Discretização geométrica de ¼ da ligação aparafusada com corte duplo e com injeção de resina.

Os resultados das simulações dos três modelos numéricos, com recurso ao MEF, podem ser largamente influenciados pela malha utilizada. Por esta razão, foi escolhida uma malha que apresentou uma boa relação entre a qualidade dos resultados obtidos e o

tempo de cálculo, procurando-se refinar as malhas em zonas consideradas mais críticas da ligação pela concentração de tensões e gradientes apresentados.

#### 3.3.2. LIGAÇÃO APARAFUSADA VIGA-PILAR

#### 3.3.2.1. GEOMETRIA DA LIGAÇÃO E MATERIAIS UTILIZADOS

Como verificado na revisão bibliográfica, as ligações metálicas viga-pilar fazem parte das ligações usualmente mais estudadas no universo das estruturas metálicas. Neste tipo de ligação é vulgar utilizar-se uma chapa de topo soldada na extremidade da viga que depois será aparafusada ao pilar. No caso prático numérico da presente dissertação realizou-se um estudo pelo MEF de uma ligação aparafusada viga-pilar, conforme representada na Figura 3.15. Esta ligação é composta por uma viga IPE140 e um pilar HEA120. A união dos dois perfis é realizada através de uma chapa de topo de espessura igual a 8mm soldada na extremidade da viga e que depois é aparafusada ao banzo do pilar com quatro parafusos M12. Cada parafuso M12 dispõe de duas anilhas e uma porca. O pilar dispõe de quatro nervuras de rigidez com espessura igual à espessura do banzo da viga.



Figura 3.15 - Geometria da ligação aparafusada viga-pilar (dimensões em mm).

Esta ligação viga-pilar representa uma ligação rígida ou semi-rígida, cuja rigidez, momento resistente e capacidade de rotação derivam do cálculo da relação momento-rotação (M- $\emptyset$ ). A fim de estabelecer paralelismos dos vários comportamentos estruturais, foram criados e simulados novamente três modelos numéricos, conforme se encontra citado na Tabela 3.1. Os materiais e propriedades elásticas utilizados nos vários modelos está de acordo com a Tabela 3.3.

Descrição do Corpo	Designação ANSYS	Material	Coeficiente de Poison (v)	<b>Módulo de</b> <b>Elasticidade</b> (E) [GPa]	Utilização do Modelo Numérico
Viga IPE140+ chapa de topo	Corpo 1	S355	0.30	210	1°, 2° e 3° modelo
Pilar HEA120 + nervuras de rigidez	Corpo 2	S355	0.30	210	1°, 2° e 3° modelo
Parafuso M12x50, incluindo 2 anilhas e 1 porca.	Corpo 3	Classe 8.8	0.30	210	1°, 2° e 3° modelo
Resina	Corpo 4	Sikadur-30	0.26	12.8	3° modelo

Tabela 3.3. - Materiais e propriedades elásticas usadas nos materiais da ligação aparafusada viga-pilar.

As várias curvas momento - rotação  $(M-\emptyset)$  são obtidas a partir da imposição de um deslocamento vertical na extremidade livre da viga. O momento de flexão, M, provocado na ligação corresponde à aplicação de uma carga, F, multiplicada por uma distância, L, entre o ponto de aplicação da carga e a face final da chapa de topo encostada ao pilar.

$$M = F.L \tag{3.3}$$

Neste caso de estudo, o pilar comporta-se como um elemento rígido e de acordo com o autor Vrakas [35], a rotação da ligação é definido como a mudança de ângulo entre as linhas centrais da viga e o pilar e, é dado pela seguinte expressão:

$$\emptyset = \arctan\left(\frac{\delta}{L}\right) - \emptyset_{b.el} \tag{3.4}$$

onde:

δ é deslocamento da viga resultante da aplicação de uma carga na extremidade livre;  $Ø_{b.el}$  é a rotação elástica da viga;

#### 3.3.2.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO SEM RESINA

Tal como na ligação de corte duplo, após a definição da geometria criou-se uma malha 3D com elementos finitos quadráticos de 20 nós (SOLID186) [60], conforme ilustrado nas Figuras 3.16 e 3.17.



Figura 3.16- Discretização do corpo 1 (viga IPE140) e do corpo 2 (pilar HEA120) usando elementos finitos sólidos de 20 nós.



Figura 3.17 - Discretização do corpo 3 (Parafuso M12) formado por elementos finitos de 20 nós.

Novamente, o contacto entre os vários corpos foi modelado aplicando a tecnologia de elementos de contacto disponível no software ANSYS, usando as opções de contacto superfície-superfície. Primeiro analisaram-se todas as potenciais superfícies em contacto e de seguida aplicaram-se elementos de 8 nós (TARGE170 e CONTA174) [60] para modelar os pares de contacto. Ambas as superfícies do par de contacto foram consideradas flexíveis. Para o 1º e 2º modelo numérico foram criados nove pares de contacto, conforme ilustra a Figura 3.18. Fizeram parte destes modelos os seguintes pares de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard) e que foram:

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 2 (banzo do pilar HEA120) -1º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso inferior) - 2º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso superior) - 3º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 2 (banzo do pilar HEA120) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso inferior). - 4º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 2 (banzo do pilar HEA120) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso superior). - 5º par de contacto;

Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso inferior) e o corpo 2 (banzo do pilar HEA120).
 - 6º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso superior) e o corpo 2 (banzo do pilar HEA120).
- 7º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso inferior) e o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140). - 8º par de contacto;

- Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso superior) e o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140). - 9º par de contacto;



**Figura 3.18** - Pares de contacto do 1° e 2° modelo numéricos, criados em ANSYS, usando contacto superfície-superfície, relativos à ligação aparafusada viga-pilar sem injeção de resina.

No final da modelação da ligação aparafusada viga-pilar sem injeção de resina referente ao 1° e 2° modelo numéricos, resultaram as malhas ilustradas na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Discretização da ligação aparafusada viga-pilar sem injeção de resina.

O aperto (pré-esforço) dos parafusos foi realizado impondo uma variação de temperatura à espiga dos parafusos de modo a promover uma contração nestes e assim gerar um pré-esforço. A ligação viga-pilar apresenta apenas um plano de simetria. Devido à aplicação de um deslocamento na extremidade da viga segundo o eixo dos Y, apenas metade da ligação foi modelada visando reduzir o custo computacional das simulações. Este passo foi possível pela imposição de deslocamentos nulos na direção perpendicular ao plano de simetria (eixo X). Foi admitido que o pilar está encastrado quer na secção superior, quer na secção inferior, impondo-se deslocamentos nulos nas direções dos eixos X, Y e Z. No final destas condições impostas, aplicou-se um deslocamento vertical (Y) de 100mm na extremidade livre da viga. O deslocamento foi aplicado ao nó situado no eixo de simetria X=0.

## 3.3.2.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO VIGA-PILAR COM RESINA INJETADA

Relativamente ao modelo numérico da ligação aparafusada viga-pilar injetada com resina, também na modelação do corpo 4 (resina) se utilizaram elementos finitos quadráticos de 20 nós (SOLID186) [60], usando uma malha dividida em 2, 32 e 4 elementos finitos, segundo as direções da espessura, circunferencial e longitudinal, respetivamente (ver Figura 3.20). Tal como no modelo numérico da ligação com corte duplo, também foi admitido que a adesão é perfeita entre a resina e as paredes dos furos das chapas. A ligação entre a resina e o parafuso é realizada através de elementos de contacto.



**Figura 3.20** - Discretização do corpo 4 (resina), usando elementos sólidos de 20 nós, utilizada na modelação da ligação aparafusada viga-pilar com resina injetada.

Para facilitar a discretização do corpo 4, foi adotado um modelo simplificado do parafuso, com cabeças cilíndricas, com uma malha compatível com a chapa de topo e o banzo do pilar, previamente desenvolvidas, conforme ilustra a Figura 3.21. É espectável que esta diferença não tenha influência nos resultados das simulações. As malhas dos restantes corpos mantiveram-se iguais.



Figura 3.21 - Discretização geométrica da malha do parafuso representativa da ligação aparafusada vigapilar com resina injetada.

No 3º modelo numérico da ligação viga-pilar foram criados treze pares de contacto conforme ilustra a Figura 3.22, em particular:

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 2 (banzo do pilar HEA120).
- 1º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso inferior).
- 2º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

- Contacto entre o corpo 1 (chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso superior). - 3º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

Contacto entre o corpo 2 (banzo do pilar HEA120) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso inferior).
 4º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

Contacto entre o corpo 2 (banzo do pilar HEA120) e o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso superior).
 5º par de contacto. Tipo de contacto aço/aço (modelo de contacto Standard);

- Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso inferior do lado da chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 4 (resina inferior do lado da chapa de topo da viga IPE140). - 6º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto Standard);

Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso superior do lado da chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 4 (resina superior do lado da chapa de topo da viga IPE140).
 7º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto Standard);

- Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso inferior do lado do banzo do pilar HEA120) e o corpo 4 (resina inferior do lado do banzo do pilar HEA120).
- 8º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto Standard);

Contacto entre o corpo 3 (espiga do parafuso superior do lado do banzo do pilar HEA120) e o corpo 4 (resina superior do lado do banzo do pilar HEA120).
 9º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto Standard);

- Contacto entre o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso inferior do lado da chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 4 (resina inferior do lado da chapa de topo da viga IPE140).
- 10º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto "No Separation");

- Contacto entre o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso superior do lado da chapa de topo da viga IPE140) e o corpo 4 (resina superior do lado da chapa de topo da viga IPE140). - 11º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto "No Separation");

- Contacto entre o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso inferior do lado do banzo do pilar HEA120) e o corpo 4 (resina inferior do lado do banzo do pilar HEA120). - 12º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto "No Separation");

Contacto entre o corpo 3 (cabeça e anilha do parafuso superior do lado do banzo do pilar HEA120) e o corpo 4 (resina superior do lado do banzo do pilar HEA120).
 13º par de contacto. Tipo de contacto aço/resina (modelo de contacto "No Separation");

Uma vez que os pares de contacto do 1º ao 5º são iguais aos usados nos modelos numéricos da ligação com parafusos normais com folga e com parafusos ajustados, a Figura 3.22 ilustra apenas os novos pares de contacto usando parafusos com resina injetada.



**Figura 3.22** - Pares de contacto do 3º modelo numérico com resina, em software ANSYS através Superfície-Superfície da ligação aparafusada viga-pilar (Sem Escala).

### 3.4. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM AS SIMULAÇÕES

Montgomery [45] refere que as ligações aparafusadas apresentam várias complexidades na modelação por elementos finitos e que são impraticáveis em simulações correntes. O mesmo refere que outros autores também realçam estas complexidades associadas a juntas aparafusadas.

Cada modelo de elementos finitos proposto é diretamente influenciado por um conjunto importante de parâmetros tais como, algoritmo de contacto, folga entre o parafuso e os corpos a ligar, preenchimento da folga com resina, modelo constitutivo dos materiais, coeficiente de atrito, pré-esforço nos parafusos e os deslocamentos impostos.

Com os três modelos numéricos propostos para cada ligação aparafusada, procurou-se perceber a influência destes parâmetros no comportamento global das ligações, procurando ajustá-los o mais possível à realidade.

#### **3.4.1. ALGORITMO DE CONTACTO**

Todas as simulações foram realizadas usando o algoritmo de contacto Lagrange Aumentado. Este requer a definição da rigidez normal de contacto e a tolerância à interpenetração dos pares de contacto, a ser aplicada na direção normal à superfície de contacto. A rigidez de contacto é estimada pelo ANSYS com base nas propriedades elásticas dos corpos em contacto e pode ser afetada por um fator multiplicativo, definido como o parâmetro FKN. A tolerância à penetração é definida à custa da parâmetro FTOLN, sendo também um fator multiplicativo a aplicar à espessura da primeira camada de elementos sólidos dos corpos em contacto. Segundo Silva [3], a quantidade de penetração entre as superfícies de contacto depende do valor da rigidez normal de contacto. Para valores elevados de rigidez há uma redução da penetração, aumentando as dificuldades de convergência do algoritmo de contacto. Valores reduzidos da rigidez de contacto podem conduzir a penetrações elevadas, produzindo assim soluções menos precisas. Desta forma, pretende-se uma rigidez suficientemente elevada para reduzir a interpenetração entre os corpos a valores aceitáveis, garantindo a convergência para a solução em tempo útil. De acordo com o estudo realizado por Silva [3], os valores ótimos para estes parâmetros são os seguintes:

- FKN (fator da rigidez de contacto) igual a 0.1.

- FTOLN (fator de tolerância à penetração) igual a 0.1.

Estes valores foram adotados neste estudo. Para os restantes parâmetros intrínsecos ao algoritmo de contacto Lagrange Aumentado e que não foram referidos explicitamente, foram adotados os valores sugeridos por defeito pelo código comercial ANSYS.

## 3.4.2. FOLGA ENTRE O PARAFUSO E OS FUROS REALIZADOS NOS CORPOS A LIGAR

Outro parâmetro que tem uma influência no comportamento das ligações é a folga entre o corpo do parafuso e os furos nas peças a ligar. A folga é definida a diferença entre o diâmetro do parafuso e o diâmetro dos furos das peças a ligar. Este parâmetro é por excelência a variável que distingue uma ligação com parafusos normais e parafusos ajustados. Nos modelos numéricos sem injeção de resina, o valor da folga assumiu dois valores e que foram 2mm (parafusos standard) e 0mm (parafusos ajustados). No modelo numérico com injeção de resina, a folga entre o parafuso e o furo foi de 2mm, sendo esta folga totalmente preenchida com resina injetada.

Em todos os modelos numéricos da ligação com corte duplo, o diâmetro dos parafusos é constante e igual a 22mm, e apenas para o modelo numérico com parafusos ajustados o diâmetro dos furos é reduzido de 24mm para 22mm. Da mesma forma e para a ligação viga-pilar, o diâmetro dos parafusos é constante e igual a 12mm, e apenas para o modelo numérico com parafusos ajustados o diâmetro dos furos é reduzido de 14mm para 12mm.

#### 3.4.3. MODELO CONSTITUTIVO DOS MATERIAIS

Os materiais apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3 foram modelados com comportamento elasto-plástico. Foi adotado o critério cedência de Von Mises, com endurecimento isotrópico definido através de uma lei multilinear. Para o aço S355 foi adotada a curva tensão-extensão uniaxial de acordo com a Figura 3.23.



Figura 3.23 - Comportamento tensão-extensão uniaxial do aço S355.

Usados nos parafusos foi adotado uma curva tensão-extensão uniaxial representada na Figura 3.24. Adotou-se parafusos de classe 8.8, logo com tensão de rotura de 800MPa e tensão de cedência de 640MPa (0.8\*800MPa).



**Figura 3.24** - Comportamento tensão-extensão uniaxial adotado para os materiais usados nos parafusos M22 e M12 da classe de resistência 8.8.

Com vista à caracterização do comportamento da resina foram realizados sete ensaios de compressão em paralelepípedos de resina (Figura 3.25).



Figura 3.25 - Ensaios de compressão realizadas em provetes hexaédricos de resina Sikadur-30.

Na Figura 3.26 são apresentados os resultados dos ensaios realizados. Os resultados apresentados apenas mostram o comportamento à compressão da resina enquanto a geometria do provete se manteve estável. Não estando confinada lateralmente, assiste-se por volta dos 10% de deformação, a uma desagregação do provete conduzindo a uma redução da resistência.



Figura 3.26 - Registos tensão-extensão obtidos para a resina Sikadur-30 com base em ensaios de compressão.

Na realidade, a resina usada nas ligações aparafusadas encontra-se confinada e quando é solicitada à compressão vai sofrer um endurecimento por densificação. Dado que os provetes de resina que foram ensaiados não foram confinados, não foi possível determinar a lei de endurecimento. Assim foi necessário arbitrar o comportamento de endurecimento da resina. Definiu-se duas hipóteses de comportamento com endurecimento multilinear conforme ilustrado no gráfico da Figura 3.27.



Figura 3.27 - 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> Hipóteses de endurecimento à compressão da resina: relação tensão-extensão uniaxiais.

Ensaios de tração realizados em resina Sikadur-30 por alguns autores (ver Figura 3.28) [61] [62], mostraram um comportamento linear de resina até à rotura. Nestes ensaios avaliou-se o módulo de elasticidade da resina (E=12.8 GPa) e determinou-se a tensão de rotura à tração (32.74GPa). A resina apresenta um comportamento mecânico dúctil à compressão e frágil à tração. A resistência à tração é muito reduzida quando comparada com a resistência do aço. Assim, e visando a modelação do comportamento deste material, considerou-se um modelo de plasticidade com uma lei de endurecimento isotrópico e com o aspeto da Figura 3.27. Esta lei prevê o mesmo comportamento em compressão e tração, sendo assim o comportamento em tração desajustado de realidade do material. Este inconveniente do modelo constitutivo usado para a resina foi superado usando elementos finitos de contacto entre o adesivo e o aço de modo a impedir a solicitação do adesivo à tração. Adicionalmente, o cilindro de adesivo é dividido em duas metades com dimensões iguais às chapas a ligar tal como se ilustra nas Figuras 3.12 e 3.20. Esses dois blocos de adesivo não estão ligadas entre si, conseguindo-se assim ausência de resistência ao corte.



Figura 3.28 - Ensaios em laboratório à tração em provetes de resina, Sikadur-30 [62].

Em suma, e conforme citado na descrição da construção dos modelos, para o estudo desprezou-se a resistência ao corte e à compressão do adesivo.

#### **3.4.4. COEFICIENTE DE ATRITO**

Neste estudo foi adotado o modelo de atrito seco de Coulomb. O coeficiente de atrito necessário neste modelo foi estimado com base nas recomendações do EC3, referidas no Capítulo 2. Conforme foi citado no Capitulo 2, os coeficientes variam entre 0.2 e 0.5,

dependendo de uma diversidade de fatores em que a rugosidade das superfícies em contacto é um dos mais determinantes.

Para a presente dissertação, tomou-se em consideração essencialmente dois coeficientes de atrito distintos,  $\mu$ =0.2 e 0.5. Por seu lado, para se perceber e avaliar a influência do coeficiente de atrito na ligação, considerou-se em alguns casos, todos os valores discretos referidos na legislação.

#### 3.4.5. PRÉ-ESFORÇO

Segundo Montgomery [45] e Kim [46], o pré-esforço em ligações aparafusadas pode ser modelado através de um dos seguintes processos: deformação térmica, com equações de constrangimento ou impondo deformações iniciais.

Segundo o método de deformação térmica, o pré-esforço é gerado atribuindo variações de temperatura virtuais e coeficientes de expansão térmica ortotrópicos para o corpo do parafuso [45] [46]. No caso das equações de constrangimentos, estas são formulados para os nós relevantes do corpo do parafuso [45] [46]. O método das deformações iniciais é a abordagem mais direta, onde o deslocamento inicial é imposto ao corpo do parafuso [45] [46].

Para o estudo da presente dissertação, o pré-esforço na ligação foi criado através da aplicação de uma variação de temperatura,  $\Delta T$ . Através da aplicação de uma redução de temperatura no corpo do parafuso consegue-se induzir a contração do mesmo fazendo com que origine uma força de compressão na ligação (pré-esforço). Para esse efeito, considerou-se que o material do corpo do parafuso possui propriedades de expansão térmica ortotrópicas, particularmente os coeficientes de expansão térmica são nulos nas direções transversais ( $\alpha_x = \alpha_v = 0$ ) e  $\alpha_z = 1.0 \times 10^{-5}$ /°C na direção longitudinal.

Recorrendo ao modelo numérico da ligação com corte duplo e parafusos standard e assumindo comportamento elástico dos materiais, foram testadas as variações de temperatura, 0°C, 100°C, 475°C, 500°C, 700°C e 900°C, por forma a determinar as equações de calibração do pré-esforço,  $\sigma_{pe}$ , em função da variação da temperatura, para os coeficientes de atrito, de 0.2 e 0.5. Estas equações de calibração permitirão estimar as

variações de temperatura a aplicar aos parafusos de modo a resultar em determinado pré-esforço.

Para o método de simulação do pré-esforço utilizado, a variação de temperatura é definida pela diferença entre a temperatura de referência,  $T_{ref}$ , e a temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , de acordo com a seguinte equação:

$$\Delta T = T_{ref} - T_{amb} \tag{3.3}$$

Foi considerada uma temperatura ambiente de 25°C.

Por forma a estudar o efeito da variação do pré-esforço nos parafusos no comportamento da ligação com corte duplo e na ligação viga-pilar, foram simulados nos três modelos numéricos os seguintes valores de pré-esforço: 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da tensão última do parafuso M22 e M12 da classe 8.8.

#### **3.4.6. DESLOCAMENTOS IMPOSTOS**

Sendo um dos objetivos da presente dissertação, analisar o comportamento estrutural de dois tipos de ligações aparafusadas com várias tipologias de ligadores, o parâmetro deslocamento imposto é muito importante, pois a extensão do comportamento não linear vai depender do valor máximo do deslocamento imposto à ligação.

Para a ligação com corte duplo, os valores adotados para estes deslocamentos foram de 0.10mm, 1.0mm e 10mm. Os deslocamentos impostos foram definidos no eixo longitudinal x. Estes deslocamentos foram aplicados nos nós que constituem o volume da amarra do corpo 1 (chapa de 10mm) e no sentido oposto foi adotado deslocamento nulo no volume da amarra do corpo 2 (chapa de 20mm). Em algumas simulações foi alargado o deslocamento até 13mm por forma a evidenciar a carga última da ligação.

Para a ligação viga-pilar impôs-se um deslocamento de valor igual a 100mm, na extremidade livre da viga IPE140, com o objetivo de se determinar a relação entre o momento fletor e a respetiva rotação na ligação. Estas relações são comparadas entre as soluções de ligadores sem e com resina.

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O presente Capítulo destina-se a apresentar e discutir os resultados obtidos nas várias simulações realizadas.

Os resultados estão divididos em duas partes. Inicialmente são apresentados resultados de análise elástica e elasto-plástica da ligação com corte duplo sem resina e posteriormente do modelo com resina injetada. Em seguida, apresentam-se os resultados da simulação elasto-plástica da ligação viga-pilar.

Previamente às simulações elasto-plásticas, foram realizadas análises elásticas na ligação com corte duplo para calibrar as equações do pré-esforço e investigar a distribuição de tensões para diversas combinações de parâmetros.

## 4.2. CALIBRAÇÃO DA TENSÃO DE PRÉ-ESFORÇO

As primeiras simulações visaram a determinação da relação entre a tensão de préesforço e a variação de temperatura aplicada ao corpo do parafuso.

A Figura 4.1, apresenta a evolução da tensão do pré-esforço, para as variações de temperatura de 0°C, 100°C, 475°C, 500°C, 700°C e 900°C e para os coeficientes de atrito, 0.2 e 0.5. Estas simulações foram realizadas em regime elástico para a ligação com corte duplo. Da leitura da figura constatou-se que os valores da tensão de pré-esforço que traduzem o aperto da ligação para os coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5, são praticamente coincidentes (ver Tabela 4.1). Também se verifica que a variação de temperatura e a tensão de pré-esforço estão relacionadas de forma linear. Quanto maior a variação de temperatura, maior será a tensão de pré-esforço nos parafusos.

Tendo em conta que o coeficiente de atrito influencia de forma muito reduzida a relação entre o pré-esforço e a variação de temperatura, optou-se neste estudo pela relação correspondente ao coeficiente de atrito igual a 0.2.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.1** - Relação entre a tensão de pré-esforço,  $\sigma_{pe}$ , e a variação de temperatura,  $\Delta T$ , aplicada no corpo do parafuso.

A Tabela 4.1 lista vários valores de pré-esforço usados neste estudo e as respetivas variações de temperatura necessárias. Os valores do pré-esforço correspondem a percentagens da tensão última dos parafusos da classe 8.8, nomeadamente 50%, 60%, 70%, 80% e 90% desta tensão última.

σ <sub>pe</sub> Aperto	σ <sub>pe</sub> Rm Aperto	Δ <b>T</b> (°C)		<b>Variação</b> Δ <b>T</b> (μ0,2 - μ0,5)	Variação ∆T
(MPa)	(%)	μ=0,2	μ=0,5	(°C)	(%)
720	90%	853.32	844.63	8.69	1.02%
640	80%	756.68	748.95	7.73	1.02%
560	70%	660.04	653.27	6.77	1.03%
480	60%	563.40	557.59	5.81	1.03%
400	50%	466.76	461.91	4.85	1.04%

Tabela 4.1. - Tensões de pré-esforço selecionadas.
# 4.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA LIGAÇÃO COM CORTE DUPLO 4.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS USANDO PARAFUSOS NORMAIS COM FOLGA - ANÁLISE ELÁSTICA

## 4.3.1.1. DISTRIBUIÇÃO DOS CAMPOS DE TENSÕES NA LIGAÇÃO

A análise elástica da ligação com corte duplo foi realizada apenas para o 1° modelo numérico (parafuso com folga). Em seguida apresentam-se os campos de tensões na ligação que foram obtidas em regime elástico. Estes campos de tensões permitiram localizar o ponto crítico da ligação para posteriormente ser determinado o fator de concentração de tensões,  $K_t$ .

Nas Figuras 4.2 a 4.4 ilustram-se os campos de tensões nos corpos 1 e 2 (chapa lateral e central), para vários valores de parâmetros. Através destes campos de tensões pode-se observar a variação da distribuição de tensões com os coeficientes de atrito, 0.2 e 0.5, para vários valores de pré-esforço, nomeadamente, 400, 480, 560, 640 e 720MPa e para deslocamentos iguais a 0.1, 1.00 e 10.00mm.

Como se seria de esperar, o ponto de maior tensão, e por conseguinte o ponto crítico nas chapas ocorre junto aos furos das chapas.



CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.2** - Campo de tensões da ligação na direção do carregamento, em MPa, para  $\delta$ =0.1mm: a)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe} = 400$ MPa; b)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe} = 480$ MPa; c)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe} = 560$ MPa; d)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe} = 640$ MPa; e)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe} = 720$ MPa; f)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe} = 400$ MPa; g)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe} = 480$ MPa; h)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe} = 560$ MPa; i)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe} = 640$ MPa; j)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe} = 720$ MPa.

# CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados

-259.857 -207.081 -154.304 -101.527 -48.7498 4.02707 56.804 109.581 162.358 215.135	-108.685 -64.2199 -59.7546 -35.2894 -10.8241 13.6411 38.1064 62.5716 87.0369 111.502	-310.042 -247.09 -184.139 -121.187 -58.2347 4.71723 67.6692 130.621 193.573 256.525	-130.463 -101.13 -71.7964 -42.4629 -13.1295 16.204 45.5374 74.8709 104.204 133.538	-359.703 -286.588 -213.474 -140.359 -67.2447 5.86987 78.9844 152.099 225.214 298.328	-152.239 -118.048 -83.8558 -49.6641 -15.4724 18.7194 52.9111 87.1028 121.295 155.486
a) ch. lateral	a) ch. central	b) ch. lateral	b) ch. central	c) ch. lateral	c) ch. central
2 ANEX				2 M M M	
-408.942 -325.98 -243.019 -160.057 -77.0959 5.86546 88.8269 171.788 254.75 337.711	-173.926 -134.901 -95.8766 -56.8519 -17.8272 21.1975 60.2221 99.2468 138.271 177.296	-457.762 -365.004 -272.246 -179.489 -66.7313 6.02632 98.7839 191.542 284.299 377.057	-195.22 -151.432 -107.643 -63.8544 -20.0658 23.7228 67.5114 111.3 155.089 198.877	-199.009 -138.643 -78.2774 -17.9115 42.4544 102.82 163.186 223.552 283.918 344.284	-162.291 -117.909 -73.5263 -29.1437 15.2388 59.6214 104.004 148.387 192.769 237.152
d) ch. lateral	d) ch. central	e) ch. lateral	e) ch. central	f) ch. lateral	f) ch. central
-237.426 -165.204 -92.9827 -20.7612 51.4602 123.682 195.903 268.125 340.346 412.567	-196.006 -142.687 -89.3677 -36.0484 17.2709 70.5903 123.91 177.229 230.548 283.868	-275.523 -191.602 -107.68 -23.7581 60.1637 144.085 228.007 311.929 395.851 479.772	-230.356 -168.096 -105.836 -43.5764 18.6836 80.9436 143.204 205.464 267.724 329.983	-313.708 -219.354 -125.001 -30.6466 63.7074 158.061 252.415 346.769 441.123 535.477	-264.143 -192.829 -121.516 -50.2025 21.1108 92.4242 163.737 235.051 306.364 377.677
g) ch. lateral	g) ch. central	h) ch. lateral	h) ch. central	i) ch. lateral	i) ch. central



**Figura 4.3** - Campo de tensões da ligação na direção do carregamento, em MPa,  $\delta$ =1mm: a)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe}$  = 400MPa; b)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe}$  = 480MPa; c)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe}$  = 560MPa; d)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe}$  = 640MPa; e)  $\mu$ =0.2;  $\sigma_{pe}$  = 720MPa; f)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe}$  = 400MPa; g)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe}$  = 480MPa; h)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe}$  = 560MPa; i)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe}$  = 720MPa; j)  $\mu$ =0.5;  $\sigma_{pe}$  = 720MPa.



CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.4** - Campo de tensões da ligação na direção do carregamento, em MPa, δ=10mm: a) μ=0.2;  $\sigma_{pe} = 400$ MPa; b) μ=0.2;  $\sigma_{pe} = 480$ MPa; c) μ=0.2;  $\sigma_{pe} = 560$ MPa; d) μ=0.2;  $\sigma_{pe} = 640$ MPa; e) μ=0.2;  $\sigma_{pe} = 720$ MPa; f) μ=0.5;  $\sigma_{pe} = 400$ MPa; g) μ=0.5;  $\sigma_{pe} = 480$ MPa; h) μ=0.5;  $\sigma_{pe} = 560$ MPa; i) μ=0.5;  $\sigma_{pe} = 640$ MPa; j) μ=0.5;  $\sigma_{pe} = 720$ MPa.

A evolução destas tensões estão representadas em gráficos nas Figuras 4.5 e 4.6 e são analisadas em maior detalhe na secção seguinte.

## 4.3.1.2. DETERMINAÇÃO DO FATOR ELÁSTICO DE CONCENTRAÇÃO DE

## TENSÕES, K<sub>t</sub>

Recorrendo às distribuições de tensões obtidas na secção precedente, através do MEF, determinou-se o fator de concentração de tensões em regime elástico para a ligação de corte duplo com parafusos normais com folga. A análise da evolução do fator de concentração de tensões possibilitou a análise da influência de vários parâmetros que influenciam o comportamento da ligação.

O fator de concentração de tensões foi definido como a razão entre a tensão local máxima, na direção da carga, e a tensão nominal:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{\sigma_{max}}{\frac{F}{A_{net}}}$$
(4.1)

Onde:

 $\sigma_{max}$  é a tensão local máxima na direção da carga;

 $\sigma_{nom}$  é a tensão nominal determinada na secção que contém o eixo do parafuso;

F é a força aplicada na ligação;

Anet é a área resistente da ligação descontando o furo do parafuso;

Nas Figuras 4.5 e 4.6, exibe-se a evolução do fator de concentração de tensões para os corpos 1 e 2 (respetivamente chapa lateral e chapa central), em função da variação da tensão de pré-esforço, dos coeficientes de atrito e dos deslocamentos impostos. Estes resultados foram apenas obtidos para a ligação de corte duplo com folga de 2mm (1° modelo numérico).

Recorrendo à Figura 4.5, pode-se fazer a seguinte análise:

- Para deslocamentos de 0.1mm

- o fator de concentração de tensões aumentou à medida que a tensão de préesforço foi sendo aumentada.

- o fator de concentração de tensões foi maior no corpo1 (chapa lateral) do que no corpo 2 (chapa central).

- Para deslocamentos de 1.0mm

- o fator de concentração de tensões diminuiu à medida que a tensão de préesforço foi sendo aumentada. A variação é muito pequena e portanto não é passível de ser observada através da análise global do gráfico (no anexo A encontram-se os resultados numéricos na forma de tabelas permitindo confirmar esta observação).

- o fator de concentração de tensões foi maior no corpo 1 (chapa lateral) do que no corpo 2 (chapa central).

- Para deslocamentos de 10.00mm

- o fator de concentração de tensões diminuiu à medida que a tensão de préesforço aumenta. A variação é muito pequena e portanto não é passível de ser observada através da análise global do gráfico (ver detalhe no anexo A).

- o fator de concentração de tensões foi maior no corpo 2 (chapa central) do que no corpo 1 (chapa lateral).

Recorrendo à Figura 4.6, pode-se fazer a seguinte análise:

- Para deslocamentos de 0.1mm

- o fator de concentração de tensões aumentou à medida que a tensão de préesforço vai sendo aumentada.

- o fator de concentração de tensões foi maior no corpo 1 (chapa lateral) do que no corpo 2 (chapa central).

- Para deslocamentos de 1.0mm

- o fator de concentração de tensões diminuiu à medida que a tensão de préesforço foi sendo aumentada. No caso do corpo 1 (chapa lateral) a variação é muito reduzida até ao instante da aplicação de tensão de pré-esforço igual a 720MPa em que reduz significativamente. - o fator de concentração de tensões foi maior no corpo 1 (chapa lateral) do que no corpo 2 (chapa central).

- Para deslocamentos de 10.00mm

- o fator de concentração de tensões diminuiu à medida que a tensão de préesforço foi sendo aumentada. A variação é muito pequena e portanto não é passível de ser observada através da análise exclusiva do gráfico (ver detalhe no anexo A).

- o fator de concentração de tensões foi maior no corpo 2 (chapa central) do que no corpo 1 (chapa lateral).

Comparando as duas Figuras 4.5 e 4.6, verificou-se que o fator de concentração de tensões, para os deslocamentos e tensões de pré-esforço impostos, diminuiu com o aumento do coeficiente de atrito. Exceção para o deslocamento de 10mm no corpo 2 (chapa central) em que se verificou um aumento.



**Figura 4.5** - Evolução da concentração de tensões em regime elástico para um coeficiente de atrito igual a 0.2, em função da variação da tensão de pré-esforço e do deslocamento imposto à ligação com corte duplo (1º modelo numérico).



**Figura 4.6** - Evolução da concentração de tensões em regime elástico para um coeficiente de atrito igual a 0.5, em função da variação da tensão de pré-esforço e do deslocamento imposto à ligação com corte duplo (1º modelo numérico).

#### 4.3.1.3.COMPORTAMENTO CARGA-DESLOCAMENTO DA LIGAÇÃO

O comportamento estrutural da ligação em regime elástico é apresentado em seguida através dos respetivos gráficos força versus deslocamento, para os vários coeficientes de atrito e valores de tensão de pré-esforço aplicados.

Segundo as Figuras 4.7 e 4.8, verifica-se que a tensão de pré-esforço retarda o deslizamento entre as chapas da ligação. Para um deslocamento igual a 10mm, a força aplicada na direção do carregamento aumenta com a tensão de pré-esforço instalada. Da Figura 4.8, constata-se para este modelo numérico de ligação a existência de dois patamares de deslizamento, para todas as tensões de pré-esforço. Este deslizamento aconteceu devido à existência da folga (2mm) entre o corpo do parafuso e os furos nas chapas. Na primeira fase de deslizamento, o corpo 2 (chapa central) encosta ao corpo 3 (parafuso), na segunda fase de deslizamento, o corpo 1 (chapa lateral) encosta ao parafuso. Após o deslizamento total das chapas, as várias curvas de tensões de pré-esforço convergem entre si.

Para deslocamento igual a 1mm apenas ocorreu um deslizamento em que o corpo 2 (chapa central) encostou ao corpo 3 (parafuso). A força de carregamento aumentou com a tensão de pré-esforço. A força aplicada na direção de carregamento aumentou com a

tensão de pré-esforço instalada, na zona dos deslizamentos e imediatamente a seguir a estes.



**Figura 4.7** - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico, para deslocamento até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).



**Figura 4.8** - Pormenor A do comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico para deslocamento até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).

Para o valor de coeficiente de atrito igual a 0.5, a leitura do comportamento da ligação em regime elástico é à realizada para um coeficiente de atrito de 0.2. Da análise às Figuras 4.9 e 4.10, constata-se que a ligação apresentou novamente dois patamares de

deslizamento, após os quais as curvas tenderam a convergir, significando que o seu comportamento estrutural já não é influenciado por este parâmetro de forma significativa.

Para um deslocamento igual a 1mm também apenas ocorreu um deslizamento parcial, em que o corpo 2 (chapa central) encostou ao corpo 3 (parafuso). A força aplicada na direção de carregamento aumentou com a tensão de pré-esforço instalada, na zona dos deslizamentos e imediatamente a seguir a estes.



**Figura 4.9** - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico para deslocamento até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).



**Figura 4.10** - Pormenor B do comportamento da ligação com corte duplo em regime elástico para deslocamento até10mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).

#### CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados

Deste modo, constatou-se que o coeficiente de atrito e a tensão de pré-esforço são dois parâmetros muito importantes no comportamento estrutural das ligações metálicas aparafusadas. Ambos estão diretamente relacionados com a extensão da acomodação por deslizamento que ocorre no comportamento da ligação com parafusos standard.

De forma sintetizada, em seguida enumera-se as principais observações retiradas da análise em regime elástico do 1º modelo numérico (parafusos normais com folga):

- (i) Quanto maior é o atrito, maior é a resistência da ligação ao escorregamento;
- Quanto maior é a tensão de pré-esforço, maior é a resistência da ligação ao escorregamento;
- (iii) Neste tipo de ligação usando parafusos com folga, existem dois patamares de deslizamento entre chapas quando submetido a carregamentos monotónicos. O primeiro patamar de deslizamento refere-se ao corpo 2 (chapa central) que encosta ao corpo 3 (parafuso) e o segundo ao corpo 1 (chapa lateral);
- (iv) O ponto crítico da ligação localiza-se junto ao furo das chapas;
- (v) A tensão equivalente de Von Mises máxima ocorre sempre no corpo 2 (chapa central), variando com o atrito;

# 4.3.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS USANDO PARAFUSOS NORMAIS COM FOLGA - ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA

## 4.3.2.1. COMPORTAMENTO CARGA-DESLOCAMENTO DA LIGAÇÃO

A modelação do comportamento de ligação assumindo-se comportamento elástico dos materiais não permite obter uma estimativa das cargas de rotura da ligação. Assim, e depois de definido e introduzido os modelos constitutivos elasto-plásticos dos materiais da ligação, será apresentado o comportamento elasto-plástico global da ligação de corte duplo, na presente secção. Será apresentado o comportamento da ligação em função da tensão da tensão de pré-esforço instalada e do valor do coeficiente de atrito.

Na Figura 4.11 apresentam-se os registos carga-deslocamento da ligação para um coeficiente de atrito igual a 0.2, para vários valores de tensão de pré-esforço. Para todas as tensões de pré-esforço existiram dois patamares de deslizamento na ligação.

Constatou-se que imediatamente após ocorrer o segundo patamar de deslizamento, os valores das cargas resistentes da ligação convergem independentemente dos valores do pré-esforço aplicado.

Na Figura 4.12 são apresentados os registos carga-deslocamento para um valor de atrito igual a 0.5. Para todas as tensões de pré-esforço simuladas também se observaram dois patamares de deslizamento na ligação. Inicialmente, a ligação apresentou um comportamento linear até ocorrer o primeiro deslizamento, instante em que o corpo 2 encostou ao corpo 3. Após este deslizamento, a força aplicada na direção do carregamento voltou a aumentar até voltar a existir um segundo deslizamento, em que o corpo 1 encostou ao corpo 3. No final do deslizamento total da ligação, a resistência aumentou ligeiramente em função da tensão de pré-esforço, até começar a plastificar e atingir a carga do colapso.

No comportamento da ligação até ao deslocamento de 3mm, verifica-se que a tensão de pré-esforço tem uma influência significativa no retardamento dos deslizamentos. Após este deslocamento, os valores da tensão de pré-esforço perdem relevância, pois as curvas  $F-\delta$  convergem entre si.

Em suma, constatou-se que o coeficiente de atrito e a tensão de pré-esforço influenciam significativamente o retardamento do deslizamento das chapas nesta ligação. Quanto maiores são os seus valores, maior é a capacidade de resistência da ligação ao escorregamento e mais se aproximam as resistências ao escorregamento das cargas últimas da ligação.



**Figura 4.11** - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).



**Figura 4.12** - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento até 10mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).

Por forma a confirmar a capacidade de resistência última da ligação, para os mesmos coeficientes de atrito e valores de tensão de pré-esforço, aumentou-se o deslocamento máximo até 13mm. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.13 e 4.14.

Na análise das Figuras 4.13 e 4.15, constatou-se que a ligação com coeficiente de atrito igual a 0.2 e 0.5 manteve o mesmo comportamento quando comparado com os registos anteriores obtidos para um deslocamento até 10mm. Verificou-se novamente que as cargas últimas, para as várias tensões de pré-esforço foram muito próximas umas das outras.

Na Figura 4.13, para o valor de atrito igual a 0.2, verificou-se que as curvas cargadeslocamento convergiram entre os deslocamentos compreendidos entre 2 e 3mm, para qualquer valor de pré-esforço. Já na Figura 4.15, para o valor de atrito igual a 0.5, esta convergência aconteceu mais tarde e para o intervalo de deslocamentos compreendido entre 4 e 5mm. Também se confirma que o coeficiente de atrito teve uma influência significativa no comportamento estrutural da ligação, fazendo retardar os deslizamentos entre as chapas.

Relativamente ao efeito da tensão de pré-esforço, nas Figuras 4.13 e 4.15 também se observa que quanto maior for esta tensão, maior serão as forças aplicadas na ligação para provocar os deslizamentos das chapas. Após o segundo deslizamento, as curvas carga-deslocamento tendem a convergir entre elas, significando que o comportamento estrutural da ligação já não é influenciado por este parâmetro de forma significativa. Constatou-se que a maior influência da tensão de pré-esforço ocorre nos patamares de deslizamento.

Nas Figuras 4.14 e 4.16 os campos de deslocamentos na direção da solicitação e tensões Von Mises foram obtidas para três localizações distintas das curvas cargadeslocamento, referenciadas com os pormenores.

Da análise das Figuras 4.14 e 4.16 observa-se que a localização dos pontos críticos se situa junto ao furo das chapas. Os valores das tensões equivalentes de Von Mises máximas para o corpo 1 e corpo 2 são muito semelhantes.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.13** - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento máximo até 13mm, coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.14** - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.2 e  $\sigma_{pe}$  = 560MPa (1° modelo numérico), correspondentes aos pormenores C.



**Figura 4.15** - Comportamento da ligação com corte duplo em regime elasto-plástico para deslocamento máximo até13mm, coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.16** - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.5 e  $\sigma_{pe}$  = 560MPa (1° modelo numérico), correspondentes aos pormenores D.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores das cargas da resistência referentes ao comportamento não linear da ligação com corte duplo obtidos com o 1º modelo numérico (parafusos normais com folga), sendo as principais observações enumeradas em seguida:

- Após o segundo patamar de deslizamento, o pré-esforço deixa de ter influência significativa no comportamento estrutural da ligação;
- (ii) As cargas de resistência para o segundo patamar de deslizamento estão mais próximo das cargas de rotura, usando o atrito 0.5;
- (iii) O acréscimo intermédio de resistência, entre o 1° e 2° patamares de deslizamento diminui à medida que a tensão de pré-esforço aumenta;
- (iv) O acréscimo final de resistência, entre o 2º patamar de deslizamento e a rotura diminui à medida que a tensão de pré-esforço aumenta;
- (v) A plastificação da ligação ocorre sempre após o 2º patamar de deslizamento;
- (vi) Para o coeficiente de atrito 0.5, o 2º patamar de deslizamento está mais próximo da rotura do que para o coeficiente de atrito 0.2;
- (vii) Neste tipo de ligação com parafusos com folga, existem dois patamares de deslizamento entre chapas. O primeiro patamar de deslizamento refere-se à eliminação da folga entre o corpo 2 (chapa central) e o corpo 3 (parafuso) e o segundo patamar de deslizamento à eliminação da folga entre o corpo 1 (chapa lateral) e o corpo 3 (parafuso);
- (viii) Quanto maior é a tensão de pré-esforço, maior é a resistência da ligação até à rotura;
- (ix) Quanto maior é o coeficiente de atrito, maior é a resistência da ligação até à rotura;

<b>бре</b> (MPa)	μ	1° Desliz. (kN)	2º Desliz. (kN)	Acrés. Interm. 1º e 2º Desliz. (%)	Carga Rotura (kN)	Acrés. Final 2º Desliz. e Rotura (%)
400		59.87	117.73	196.6%	336.41	285.7%
480		71.35	135.49	189.8%	336.43	248.3%
560	0.2	81.97	151.94	185.3%	336.50	221.7%
640		91.69	160.21	174.7%	336.68	210.1%
720		95.61	163.94	171.4%	339.78	207.2%
400	0.5	149.26	257.78	172.7%	375.77	145.7%
480		178.04	283.44	159.1%	376.12	132.6%
560		203.05	297.98	146.7%	376.54	126.3%
640		224.58	307.85	137.0%	377.46	122.6%
720		230.95	310.50	134.4%	377.50	121.4%

**Tabela 4.2.** - Valores de resistência da ligação com corte duplo com parafusos normais, para coeficientes de atrito iguais a 0.2 e 0.5 e vários valores da tensão de pré-esforço (1º modelo numérico).

#### 4.3.2.2. MODOS DE ROTURA

As análises aos possíveis modos de rotura da ligação aparafusada com corte duplo, foi realizada usando este modelo numérico com os seguintes parâmetros:  $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta$ =13mm e os coeficientes de atrito iguais a 0.2 e 0.5. De acordo com a Figura 4.17 e avaliando a distribuição das deformações plásticas nas peças, existem dois possíveis modos de rotura. Pode-se concluir que poderá haver uma rotura plástica na chapa central assim como uma rotura plástica no parafuso. Em ambos os casos trata-se de modos de rotura por corte. Para as dimensões selecionadas da ligação, a rotura por tração na secção resistente não é viável. As deformações plásticas máximas observadas são muito significativas, acima da extensão de rotura típicas dos aços de construção. Convém, no entanto ter em atenção que as deformações obtidas através do MEF são deformações logarítmicas, enquanto os valores da extensão da rotura normalmente referenciados na literatura correspondem a valores de engenharia. A análise da Figura 4.17, mostra uma grande influência do coeficiente de atrito no campo de deformações plásticas equivalentes.



**Figura 4.17** - Distribuição das deformações plásticas equivalentes segundo Von Mises, na ligação com corte duplo e com folga no parafuso (1° modelo numérico), ( $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta=13$ mm): a)  $\mu=0.2$ ; b)  $\mu=0.5$ .

# 4.3.2.3. EFEITO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO COM CORTE DUPLO

Por forma a compreender a influência do coeficiente de atrito no comportamento da ligação, compararam-se os resultados de simulações realizadas com coeficiente de atrito de 0.2, 0.3, 0.4 e 0.5, para alguns valores de tensão de pré-esforço e impondo deslocamentos máximos iguais a 10mm. Os valores assumidos para a tensão de pré-esforço foram de 400, 560 e 720MPa. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20.

A análise das Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, para todos os coeficientes de atrito revela que a ligação apresenta inicialmente um comportamento elástico, até a ocorrência do primeiro deslizamento. Da mesma forma como foi citado anteriormente, no primeiro patamar de deslizamento a força resistente diminui significativamente com a redução do coeficiente de atrito. Após este primeiro deslizamento em que o corpo 2 contacta com o corpo 3, a força volta a aumentar novamente até ocorrer um segundo deslizamento. Nesse instante, o corpo 1 contacta com o corpo 3. Posteriormente a este último deslizamento, a força volta a crescer novamente até a ligação atingir o patamar de plasticidade e consequente rotura.



**Figura 4.18** - Comportamento estrutural da ligação com corte duplo para um deslocamento até 10mm e uma tensão de pré-esforço de 400MPa, em função dos vários coeficientes de atrito (1° modelo numérico).



**Figura 4.19** - Comportamento estrutural da ligação com corte duplo para um deslocamento até 10mm e uma tensão de pré-esforço de 560MPa, em função dos vários coeficientes de atrito (1° modelo numérico).



**Figura 4.20** - Comportamento estrutural da ligação com corte duplo para um deslocamento até 10mm e uma tensão de pré-esforço de 720MPa, em função dos vários coeficientes de atrito (1° modelo numérico).

De forma sintetizada, apresentam-se as principais observações retiradas da análise e discussão das Figuras 4.18 a 4.20:

- (i) O aspeto geral das curvas carga-deslocamento da ligação é similar para os vários valores de atrito;
- (ii) Antes da ocorrência de qualquer deslizamento, o atrito não influência de forma significativa o comportamento da ligação;
- (iii) Os coeficientes de atrito influenciam de forma muito significativa as cargas de deslizamento;
- (iv) Também se constata uma redução das cargas de colapso com a redução do coeficiente de atrito;

# 4.3.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS USANDO PARAFUSOS AJUSTADOS - ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA

#### 4.3.3.1. COMPORTAMENTO CARGA-DESLOCAMENTO DA LIGAÇÃO

Nesta secção apresentam-se os resultados das simulações realizadas nas ligações com corte duplo usando parafusos ajustados, tendo estas simulações sido realizadas em regime elasto-plástico e com os mesmos parâmetros das simulações realizadas com parafusos normais.

A Figura 4.21 apresenta os registos carga-deslocamento obtidos para o valor de atrito igual a 0.2. Verifica-se que a influência da tensão de pré-esforço não é muito significativa no comportamento estrutural da ligação. As curvas, para cada valor de tensão de pré-esforço são praticamente coincidentes. Inicialmente, a resistência aumentou de forma linear até ao início da plastificação (Pormenor G1). Imediatamente a seguir a carga cresce de forma menos acentuada até alcançar um patamar de carga máxima (Pormenor G3). Em todas as simulações, a carga de rotura são semelhantes e o deslocamento máximo alcançado pela ligação foi aproximadamente 8mm. A partir deste instante a ligação iria entrar em rotura com diminuição de resistência e a simulação deixa de convergir.

Na Figura 4.23 apresentam-se os registos carga-deslocamento obtidos para o valor de atrito igual a 0.5. Verifica-se que a tensão de pré-esforço tem uma influência mais significativa no comportamento da ligação, quando comparada com o coeficiente de atrito de 0.2. O efeito da tensão de pré-esforço ocorreu quando a ligação começou a plastificar (Pormenor H1). No domínio linear, o pré-esforço não tem qualquer influência na resposta da ligação. Imediatamente após o início da plastificação (Pormenor H1), as curvas convergem entre si e os valores das forças continuaram ligeiramente a aumentar até ao valor de deslocamento aproximadamente igual a 5.8mm (Pormenor H2). Em seguida, os valores de resistência começam a diminuir até ao último valor de deslocamento imposto. Para todos os valores das tensões de pré-esforço, as cargas de rotura foram muito semelhantes e o seu deslocamento máximo admitido pela ligação foi 13mm.

Nas Figuras 4.22 e 4.24 apresentam-se os campos de deslocamentos na direção do carregamento assim como os campos de tensões de Von Mises, para várias localizações da curva carga-deslocamento da ligação. Observou-se que o ponto crítico na ligação, de acordo com os pormenores G e H, ocorreram junto ao furo nas chapas de ligação e as tensões equivalentes de Von Mises máximas ocorreram sempre no corpo 2.

Da análise dos pormenores G3 e H3 verifica-se, que para o coeficiente de atrito igual a 0.2, a ligação apresenta um deslocamento máximo de 8.022mm e para o coeficiente de atrito igual a 0.5, o valor máximo deste deslocamento é de 13mm. Perante este resultado, constatou-se que o aumento do coeficiente de atrito, resulta num aumento da capacidade de deformação da ligação.



**Figura 4.21**- Comportamento da ligação com corte duplo com parafusos ajustados, em regime elastoplástico, com coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (2º modelo numérico).

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.22** - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.2 e  $\sigma_{pe}$  = 560MPa (2° modelo numérico), correspondentes aos pormenores G.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.23** - Comportamento da ligação com corte duplo com parafusos ajustados em regime elastoplástico, com coeficiente de atrito igual a 0.5 e variando a tensão de pré-esforço (2º modelo numérico).

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.24** - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.5 e  $\sigma_{pe}$  = 560MPa (2° modelo numérico), correspondentes aos pormenores H.

De forma sintetizada, enumeram-se as principais observações retiradas da análise e discussão de resultados relativos às simulações da ligação com corte duplo usando parafusos ajustados (sem folga):

- (i) Quanto maior é o coeficiente de atrito, maior é a resistência da ligação;
- (ii) A variação da tensão de pré-esforço, quando combinada com o coeficiente de atrito igual a 0.2, não influência de forma significativa o comportamento estrutural da ligação;
- (iii) A variação da tensão de pré-esforço quando combinada com o coeficiente de atrito igual a 0.5, tem uma influência no início da plastificação da ligação, retardando este processo com o aumento do pré-esforço;
- (iv) Neste tipo de ligação com parafusos ajustados, não existem patamares de deslizamento entre as chapas;
- (v) O ponto crítico da ligação localiza-se junto ao furo das chapas;
- (vi) A tensão equivalente de Von Mises máxima é sempre na chapa central (corpo 2) variando com o coeficiente de atrito;

#### 4.3.3.2. MODOS DE ROTURA

A Figura 4.25 ilustra a distribuição das deformações plásticas equivalentes de Von Mises para os seguintes parâmetros de simulação:  $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta=13$ mm e coeficiente de atrito igual a 0.2 e 0.5. Também nestas simulações e avaliando a deformação plástica nas peças da ligação vislumbram-se dois possíveis modos de rotura. Pode-se concluir que poderá haver uma rotura plástica quer na chapa central assim como uma rotura plástica no parafuso. Da mesma forma, em ambos os casos trata-se de modos de rotura por corte. Para as dimensões selecionadas da ligação, a rotura por tração na secção resistente não é plausível. As deformações plásticas máximas observadas são muito significativas, acima da extensão de rotura do material. Convém, no entanto, ter em atenção que as deformações obtidas através do MEF são deformações logarítmicas, enquanto os valores da extensão de rotura propostos pelos fabricantes para os aços referem-se a valores de deformação de engenharia.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.25** - Distribuição das deformações plásticas equivalentes segundo Von Mises, na ligação com corte duplo e com parafuso ajustado (2° modelo numérico), ( $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta=13$ mm): a)  $\mu=0.2$ ; b)  $\mu=0.5$ .

# 4.3.4. RESULTADOS DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO DE CORTE DUPLO USANDO PARAFUSOS INJETADOS COM RESINA -ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA

## 4.3.4.1. COMPORTAMENTO CARGA-DESLOCAMENTO DA LIGAÇÃO

A modelação da ligação de corte duplo com parafusos injetados com resina (corpo 4) suscitou algumas dificuldades de convergência nos modelos numéricos. Inicialmente, a ligação foi modelada considerando um modelo constitutivo para a resina simular um modelo proposto para betão, com comportamentos diferentes em tração e compressão. Contudo, verificaram-se problemas de convergência, nomeadamente quando se desenvolvia dano à tração da resina. Em seguida, modelou-se o comportamento da resina com um modelo de plasticidade e assumindo, igual resposta à tração e compressão. Considerando um comportamento plástico perfeito para a resina verificouse que a espessura da resina tendia para valores muito reduzidos e próximo de zero, sendo fisicamente impossível por estar confinada dentro da ligação. Por fim, considerou-se que a resina tem um comportamento elasto-plástico com endurecimento isotrópico multilinear. Considerou-se um endurecimento por densificação do material, situação que ocorre na prática pelo facto da resina se encontrar confinada no interior da ligação. Usando pares de contacto foi possível garantir a transferência de esforços apenas por compressão na resina e desprezando a resistência à tração e ao corte, na interface das duas chapas (planos de corte da ligação).

Conforme citado no capítulo anterior, estudaram-se duas hipóteses de endurecimento da resina e os resultados F- $\delta$  obtidos foram comparados com os resultados do 1° e 2° modelos numéricos, conforme mostra a Figura 4.26. Em ambas as hipóteses para a modelação da resina observou-se inicialmente, em regime elástico, o mesmo comportamento estrutural, ficando os registos F- $\delta$  compreendidos entre os resultados do 1° e 2° modelos numéricos. Durante o comportamento plástico verificaram-se ligeiras diferenças conforme observado para o deslocamento final igual a 13mm. Como referido no Capítulo 2, na sua génese, as ligações com resina funcionaram como uma solução similar às ligações com rebites ou com parafusos ajustados, em que o valor da folga entre o parafuso e as paredes dos furos das chapas é nulo. Através do gráfico seguinte, verificou-se que o comportamento da ligação para a 1ª hipótese de endurecimento do material é o que está mais próximo do comportamento das ligações com resina (3° modelo numérico).



**Figura 4.26** - Comparação das respostas F- $\delta$  entre a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> hipóteses de endurecimento da resina usadas no 3<sup>o</sup> modelo numérico, com os restantes modelos numéricos (1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup>), ( $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\mu=0.2$ ).

Na Figura 4.27 representam-se os registos carga-deslocamento, para o valor de atrito igual a 0.2. Verifica-se que a tensão de pré-esforço não tem uma influência muito

#### CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados

significativa no comportamento da ligação. Observa-se que as curvas para cada tensão de pré-esforço são praticamente coincidentes e que a ligação com resina não apresenta nenhum patamar de deslizamento entre as chapas. A ligação teve um comportamento linear elástico até começar a plastificar (Pormenor I1). Durante a fase de plastificação a força foi crescendo de forma mais ligeira (Pormenor I2) até alcançar um valor máximo por volta de 13.00mm (Pormenor I3).

De igual modo, a Figura 4.29 apresenta os registos carga-deslocamento para o valor de atrito igual a 0.5, verificando-se agora que a influência da tensão de pré-esforço é mais significativa. No início da aplicação do carregamento, na zona linear, não existe ainda influência da tensão de pré-esforço. Os valores para cada tensão de pré-esforço são praticamente coincidentes. O efeito da tensão de pré-esforço ocorreu de forma mais significativa quando a ligação inicia o comportamento não linear (Pormenor J1). Verifica-se nessa zona da resposta, que quanto maior é a tensão de pré-esforço, maior é a resistência da ligação. Imediatamente após o início da fase da plastificação (Pormenor J1), as curvas convergem entre si (Pormenor J2) e os valores da resistência continuaram a aumentar ligeiramente até ao valor de deslocamento aproximadamente igual a 10.00mm (Pormenor J3).

Nas Figuras 4.28 e 4.30 apresentam-se os campos de deslocamentos e tensões Von Mises correspondentes aos pormenores I e J das curvas carga-deslocamento. Observa-se que o ponto crítico na ligação ocorre junto ao furo das chapas. As tensões equivalentes de Von Mises máximas, para o coeficiente de atrito igual a 0.2, ocorreram sempre no corpo 2 e para o coeficiente de atrito igual a 0.5 oscilou entre os corpos 1 e 2.



**Figura 4.27** - Comportamento da ligação com corte duplo com resina injetada em regime elasto-plástico para um coeficiente de atrito igual a 0.2 e variando a tensão de pré-esforço (3º modelo numérico).

## CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.28** - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.2 e  $\sigma_{pe}$  = 560MPa (3° modelo numérico), correspondentes aos pormenores I.



**Figura 4.29-** Comportamento da ligação com corte duplo com resina injetada em regime elasto-plástico para um coeficiente de atrito igual a 0.5e variando a tensão de pré-esforço (3º modelo numérico).
CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.30** - Campo de deslocamentos na direção do carregamento (a) e de tensão de Von Mises (b) obtidos para a ligação com corte duplo, em regime elasto-plástico, com  $\mu$ =0.5 e  $\sigma_{pe}$  = 560MPa (3° modelo numérico), correspondentes aos pormenores J.

As principais observações retiradas da análise e discussão deste 3º modelo numérico usando resina são:

- (i) Quanto maior é o coeficiente de atrito, maior é a resistência da ligação;
- Quanto maior é a tensão de pré-esforço, maior é a resistência da ligação sobretudo para o coeficiente de atrito igual a 0.5 e no início do comportamento não linear;
- (iii) Para o coeficiente de atrito igual a 0.2, a variação da tensão de pré-esforço não tem influência significativa no comportamento da ligação;
- (iv) Neste tipo de ligação com parafusos injetados com resina, não existem patamares de deslizamento entre as chapas, demonstrando que a resina fica confinada dentro da ligação plastificando e endurecendo por esmagamento;
- (v) O ponto crítico da ligação localiza-se junto ao furo das chapas;
- (vi) A tensão equivalente de Von Mises máxima é sempre na chapa central (corpo 2) para o coeficiente de atrito igual a 0.2 e para o coeficiente de atrito igual a 0.5 oscila entre as duas chapas;

### 4.3.4.2. MODOS DE ROTURA

A Figura 4.31 ilustra a distribuição das deformações plásticas equivalentes de Von Mises resultantes de uma simulação com os seguintes parâmetros:  $\sigma_{pe} = 560$ MPa e coeficientes de atrito iguais a 0.2 e 0.5.

Avaliando a deformação plástica nas peças, também nestas simulações da ligação com resina se observam dois possíveis modos de rotura da ligação. Pode-se concluir que poderá haver uma rotura plástica quer na chapa central quer no parafuso. Da mesma forma, em ambos os casos trata-se de modos de rotura por corte. Para as dimensões selecionadas da ligação, a rotura por tração na secção resistente não é viável. As deformações plásticas máximas observadas são muito significativas, acima da deformação de rotura típicas do aço estrutural considerado.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.31** - Distribuição das deformações plásticas equivalentes segundo Von Mises, na ligação com corte duplo e com folga no parafuso (3° modelo numérico), ( $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta=13$ mm): a)  $\mu=0.2$ ; b)  $\mu=0.5$ .

## 4.3.5. COMPARAÇÃO DOS COMPORTAMENTOS DA LIGAÇÃO DE CORTE DUPLO RESULTANTES DE SIMULAÇÕES COM OS TRÊS MODELOS NUMÉRICOS PROPOSTOS

Um dos objetivos da dissertação foi estabelecer uma comparação dos comportamentos de uma ligação com corte duplo com parafusos normais, ajustados e injetados com resina, recorrendo a três diferentes modelos de elementos finitos que possibilitaram a simulação das ligações sob carregamentos monotónicos. As Figuras 4.32 e 4.33 demonstram estas comparações respetivamente para os coeficientes de atrito iguais a 0.2 e 0.5. Para estas comparações foi usado uma tensão de pré-esforço de 560MPa, equivalente ao aperto de 70% referido na norma NP EN 1993-1-8 de 2010, citado no Capítulo 2 e ainda imposto um deslocamento máximo de 13mm.

De acordo com a Figura 4.32, verifica-se que a solução que apresentou maior resistência, quando sujeita a carregamentos monotónicos é a que se baseia no uso de parafusos ajustados, seguida da solução baseada em parafusos com resina injetada e finalmente os parafusos normais com folga. Para o coeficiente de atrito igual a 0.5, e de acordo com a Figura 4.33 verifica-se o mesmo desempenho das várias soluções de ligadores. Para o coeficiente de atrito igual a 0.2 e um deslocamento imposto de 4mm, o uso de parafusos ajustados possibilita um ganho de resistência da ligação em 5% em relação aos parafusos com resina injetada e de 18% em relação aos parafusos normais com folga, conforme evidenciado na Figura 4.32.

Para o coeficiente de atrito igual a 0.5 e um deslocamento imposto igual a 4mm, os parafusos ajustados possibilitam um ganho de resistência da ligação de 4% e 12%, respetivamente em relação aos parafusos com resina injetada e parafusos normais com folga, conforme evidenciado na Figura 4.33.

Relativamente à rigidez da ligação e extensão da zona linear, constata-se que esta varia consoante o tipo de solução adotada para o ligador. A solução que apresentou maior rigidez e extensão da resposta linear na ligação foi a correspondente ao uso de parafusos ajustados. Como se pode observar nos resultados expressos na Tabela 4.3, o atrito influenciou significativamente a rigidez, apresentando uma maior variação para o parafuso com folga, seguido do parafuso com resina injetada e por fim o parafuso ajustado.

A apreciação dos resultados numéricos permite concluir que a ligação com parafusos com resina injetada apresenta um comportamento intermédio relativamente aos parafusos ajustados e aos parafusos com folga, em grande parte do comportamento da ligação. Os deslizamentos observados na ligação com parafusos com folga não são observados quando se usa resina injetada. A injeção de resina conduz a uma carga última da ligação ligeiramente superior à observada com parafusos ajustados, embora este resultado causa de validação experimental.



**Figura 4.32** - Comparação dos comportamentos da ligação com corte duplo com parafusos normais, ajustados e injetados com resina para uma, tensão de pré-esforço igual a 560MPa e coeficiente de atrito igual a 0.2.



**Figura 4.33-** Comparação dos comportamentos da ligação com corte duplo com parafusos normais, ajustados e injetados com resina para uma, tensão de pré-esforço igual a 560MPa e coeficiente de atrito igual a 0.5.

RIGIDEZ DA LIGAÇÃO COM CORTE DUPLO (KN/mm)								
MODELO NUMÉRICO	μ=0.2	μ=0.5	Variação entre Atrito (%)					
Parafusos normais	243.26	429.80	76.68%					
Parafusos ajustados	485.84	561.31	15.53%					
Parafusos injetados com resina	361.96	492.22	35.99%					

**Tabela 4.3.** - Comparação da rigidez da ligação com corte duplo com três soluções de ligadores para, tensão de pré-esforço igual a 560MPa e distintos coeficientes de atrito.

### 4.3.6. COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PARAFUSOS QUANDO USADOS COM FOLGA, SEM FOLGA E COM RESINA INJETADA

Como citado no Capítulo II, o parafuso é um dispositivo de ligação (ligador) que permite unir os vários elementos que compõem a ligação metálica. Conforme observado na ligação com corte duplo, o parafuso M22 da classe 8.8, foi solicitado tendo em conta uma diversidade de parâmetros tais como: atrito, tensões de pré-esforço, valores de folga e preenchimento da mesma com resina. O comportamento dos parafusos, numa ligação metálica, é diretamente influenciado por estes parâmetros, apresentando-se em seguida algumas comparações tendo em conta, os três diferentes modelos numéricos propostos.

Nas Figuras 4.34 e 4.35 apresentam-se as distribuições de tensões equivalentes de Von Mises obtidas para uma tensão de pré-esforço de 560MPa, coeficientes de atrito iguais a 0.2 e 0.5 e deslocamento imposto na ligação de 13mm. Verifica-se que as tensões equivalentes de Von Mises no parafuso obtidas nos três modelos numéricos, para o mesmo valor de atrito, são praticamente iguais. É de referir que em todos os modelos numéricos, as tensões equivalentes de Von Mises de Von Mises máximas ocorreram sempre no perno do parafuso, tendo este sido solicitado ao corte. Além disso, verifica-se que as deformações foram maiores nos parafusos ajustados e que estas deformações aumentam com o aumento do coeficiente de atrito.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.34** - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) no parafuso para as três soluções investigadas, considerando  $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta=13$ mm e coeficiente de atrito,  $\mu=0.2$ , na ligação com corte duplo.



**Figura 4.35** - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) no parafuso para as três soluções investigadas, considerando  $\sigma_{pe} = 560$ MPa,  $\delta=13$ mm e coeficiente de atrito,  $\mu=0.5$ , na ligação com corte duplo.

### 4.4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA LIGAÇÃO VIGA-PILAR

### 4.4.1. ANÁLISE ELASTO-PLÁSTICA

### 4.4.1.1. COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO

Conforme citado no capítulo anterior para a ligação viga-pilar, foi imposto um deslocamento de 100mm na extremidade livre da viga e uma tensão de pré-esforço de 560MPa nos parafusos, procurando-se avaliar e comparar as respostas da ligação quando usadas distintas soluções de ligadores. Assim será apresentada a evolução do momento aplicado e em função da rotação, para cada valor de coeficiente de atrito testado.

Nas Figuras 4.36, 4.38 e 4.40 apresentam-se as respostas momento-rotação obtidas com as três soluções de ligadores, respetivamente parafusos normais, parafusos ajustados e parafusos com resina injetada. Verifica-se, mais uma vez, que o atrito influência

#### CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados

significativamente o comportamento estrutural neste tipo de ligação. Como se pode observar nestas figuras, para todas as soluções de ligador, o aumento do coeficiente de atrito traduziu-se num aumento da resistência da ligação. Como se pode observar nestas figuras, para o valor de rotação de 0.06rad, a variação do coeficiente de atrito tem maior influência no comportamento da ligação para o caso do uso de parafusos ajustados (27%), seguida da situação de parafusos normais (17%) e por fim a de parafusos com injeção de resina (1%).

Nas Figuras 4.42 e 4.43 apresenta-se as comparações do comportamento da ligação viga-pilar entre os três tipos de soluções de ligador, para cada valor de coeficiente de atrito. Em ambos os gráficos constata-se que o uso de parafusos ajustados conduz ao melhor comportamento estrutural da ligação, seguido dos parafusos com resina injetada e por fim os parafusos normais com folga. Pela observação da Figura 4.42 para o mesmo valor de rotação 0.06rad, os parafusos ajustados possibilitam um ganho de momento resistente de 13% e 40% em relação aos parafusos standard e com resina injetada, respetivamente. Para o coeficiente de atrito de 0.5, segundo o mesmo valor de rotação 0.06rad, também os parafusos ajustados possibilitam um ganho de momento fletor da ligação de 53% e 59% em relação aos parafusos standard e com resina injetada, respetivamente.



**Figura 4.36-** Comportamento da ligação viga-pilar com parafusos normais com folga, considerando  $\sigma_{pe} = 560$ MPa, e coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.37** - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) da ligação viga-pilar obtidas com parafusos normais com folga, com  $\sigma_{pe} = 560$ MPa e  $\delta$ =100mm.



**Figura 4.38** - Comportamento da ligação viga-pilar com parafusos ajustados, considerando  $\sigma_{pe} = 560$ MPa, e coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.39** - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) da ligação viga-pilar obtidas com parafusos ajustados, com  $\sigma_{pe} = 560$ MPa e  $\delta$ =100mm.



**Figura 4.40 -** Comportamento da ligação viga-pilar com parafusos com resina injetada, considerando  $\sigma_{pe} = 560$ MPa, e coeficientes de atrito de 0.2 e 0.5.

CAPÍTULO IV Apresentação e Discussão de Resultados



**Figura 4.41** - Tensões equivalentes de Von Mises (MPa) da ligação viga-pilar obtidas com parafusos com resina injetada, com  $\sigma_{pe} = 560$ MPa e  $\delta$ =100mm.



**Figura 4.42 -** Comparação do comportamento da ligação viga-pilar usando soluções distintas de ligadores com pré-esforço de 560MPa e coeficiente de atrito igual a 0.2.



**Figura 4.43** - Comparação do comportamento da ligação viga-pilar usando soluções distintas de ligadores com pré-esforço de 560MPa e coeficiente de atrito igual a 0.5.

Nas Figuras 4.37, 4.39 e 4.41 apresentam-se os campos de tensões de Von Mises obtidos para a ligação viga-pilar, usando soluções com parafusos normais, parafusos ajustados e parafusos com resina injetada, respetivamente. Os campos de tensão estão representados sobre a estrutura deformada, constatando-se que a chapa de topo da viga sofre elevada flexão junto ao parafuso superior. Pelos valores máximos das tensões de Von Mises obtidas constata-se que os parafusos entram em plastificação alcançando a tensão última estimada para estes.

# CAPÍTULO V

# Conclusões Finais E Propostas De Trabalho Futuro

### 5.1. INTRODUÇÃO

A elaboração da presente dissertação teve como principal objetivo a aquisição de conhecimentos técnicos na modelação por elementos finitos de ligações metálicas aparafusadas sem e com injeção de resina estrutural, quando submetida a ensaios monotónicos. Ao longo da dissertação estudaram-se dois tipos de ligações metálicas aparafusadas, uma ligação com corte duplo e uma ligação viga-pilar. Para cada ligação foram desenvolvidos três tipos de modelos numéricos que se diferenciaram pela existência ou inexistência de folga entre os parafusos e os furos dos elementos a ligar. Foram ainda identificadas e desenvolvidas as metodologias necessárias para a realização da modelação por elementos finitos de cada solução de ligadores. No final realizaram-se comparações entre os resultados numéricos obtidos para cada solução de ligador resultando diversas conclusões sobre a influência do tipo de ligador no comportamento global das ligações.

Nesta secção sistematiza-se a organização da dissertação, apresentando-se as principais conclusões obtidas e formulam-se propostas de desenvolvimentos futuros.

### **5.2. CONCLUSÕES FINAIS**

No Capítulo 1 foi apresentado uma breve introdução à presente dissertação de mestrado, referindo-se os objetivos e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 foi apresentado o estado da arte das ligações aparafusadas, os procedimentos a ter em conta no seu dimensionamento bem como a revisão bibliográfica necessária à realização da mesma.

No Capítulo 3 procedeu-se à construção dos seis modelos numéricos, pelo método dos elementos finitos, referentes a cada uma das ligações em estudo. Para além da descrição da metodologia de construção dos modelos, incluiu-se também a definição geométrica das duas ligações, as propriedades mecânicas dos materiais utilizados e a apresentação de todos os parâmetros que influenciaram a solução das simulações dos modelos. O estudo teve como base a utilização de modelos constitutivos elasto-plástico com endurecimento isotrópico multilinear.

As principais conclusões referentes à modelação por elementos finitos destes dois tipos de ligação metálica apresentada no Capítulo 3 são as seguintes:

- A definição/seleção dos modelos constitutivos adequados para os materiais é sem dúvida a etapa mais importante do processo de modelação pois deve ser baseada em informação experimental e dela depende a qualidade dos resultados obtidos;
- A modelação requer uma sensibilidade sobre a localização onde vão existir o(s) possível(s) ponto(s) crítico(s) que são suscetíveis a maiores picos e gradientes de tensão/deformação. Nestes pontos a malha deve apresentar uma densidade adequada;

No Capítulo 4 foram apresentados todos os resultados obtidos das simulações e posterior discussão dos mesmos. Para cada modelo numérico das ligações efetuou-se uma análise elasto-plástica e no final estabeleceram-se comparações de soluções. Efetuou-se ainda uma análise elástica para a ligação com corte duplo usando parafusos normais com folga, com o intuito inicial de se obter uma maior sensibilidade à influência de parâmetros preponderantes para os resultados.

As principais conclusões do Capítulo 4, podem-se resumir do modo seguinte:

- Para todos os ensaios numéricos realizados tanto no domínio elástico como no domínio elasto-plástico, conclui-se que a simulação do aperto nos parafusos pode ser realizado através de uma variação de temperatura aplicada ao corpo do parafuso;
- A variação de temperatura e a tensão de pré-esforço nos parafusos estão diretamente relacionadas seguindo uma lei linear. Quanto maior é a variação de temperatura maior será a tensão de pré-esforço instalada nos parafusos da ligação;
- Ainda através da análise elástica, conclui-se que a relação entre a tensão de préesforço e a variação de temperatura é praticamente insensível à variação coeficiente de atrito. Na modelação de ligações metálicas aparafusadas foi assumida sempre a mesma relação para estabelecer a tensão de pré-esforço;
- Para todos os modelos numéricos de ambas as ligações aparafusadas em estudo, conclui-se que o ponto crítico localiza-se sempre junto aos furos das chapas;

- Em ambas as ligações em estudo e para todos os modelos numéricos utilizados, conclui-se que quanto maior é o coeficiente de atrito, maior é a resistência da ligação até à rotura, quando sujeitas a carregamentos monotónicos;
- Também, em ambas as ligações em estudo, e para todos os modelos numéricos utilizados, conclui-se que quanto maior é a tensão de pré-esforço, maior é a resistência da ligação quando submetidas a carregamentos monotónicos;
- Na ligação com corte duplo com parafusos normais com folga, conclui-se que existe sempre dois patamares de deslizamento entre as chapas e com cargas de resistência ao deslizamento dependentes do pré-esforço e atrito. Após o deslizamento total, todas as curvas resistência vs deslocamento tendem a convergir entre si;
- Para todos os modelos numéricos utilizados na ligação com corte duplo, concluise que o aumento do coeficiente de atrito e a tensão de pré-esforço permitem retardar os deslizamentos;
- Na comparação das três soluções alternativas de ligadores utilizados na ligação com corte duplo, quando submetida a carregamentos monotónicos, pode-se concluir o seguinte: (i) para o coeficiente atrito de 0.2 e um deslocamento igual a 4mm, o uso de parafusos ajustados possibilita um ganho de resistência da ligação em 5% em relação ao uso de parafusos com resina injetada e 18% em relação ao uso de parafusos com folga; (ii) para o coeficiente de atrito de 0.5 e um deslocamento igual a 4mm, o uso de parafusos com folga; ou so de parafusos ajustados possibilita um ganho de resistência da ligação em 4% em relação ao uso de parafusos com resina injetada e 12% em relação ao uso de parafusos com folga;
- Ainda na comparação das alternativas de soluções de ligadores na ligação com corte duplo variando o coeficiente de atrito, pode-se concluir que a rigidez da ligação é maior com o uso de parafusos ajustados, seguidamente com o uso de parafusos com resina injetada e por fim com o uso de parafusos normais com folga;
- Para todas as alternativas de soluções de ligadores utilizados na ligação com corte duplo quando solicitada a carregamentos monotónicos, conclui-se que as tensões de Von Mises são praticamente iguais entre estes e independentemente do coeficiente de atrito. As tensões máximas ocorrem sempre no corpo do parafuso;

- Na comparação das três soluções de ligadores utilizados na ligação viga-pilar quando submetida a carregamentos monotónicos pode-se concluir que para uma rotação 0.06rad, a influência do coeficiente de atrito é mais significativo usando parafusos ajustados (27%), seguida do uso de parafusos normais com folga (17%) e por fim o uso de parafusos injetados com resina (1%);
- Ainda na comparação da resposta da ligação viga-pilar entre as três soluções de ligadores, e tendo em conta o coeficiente de atrito, pode-se concluir o seguinte:
  (i) para o coeficiente de atrito de 0.2 e uma rotação 0.06rad, o uso de parafusos ajustados possibilita um ganho de momento resistente da ligação em 13% em relação ao uso de parafusos injetados com resina e 40% em relação ao uso de parafusos normais com folga; (ii) para o coeficiente de atrito de 0.5 e uma rotação 0.06rad, também o uso de parafusos ajustados possibilita um ganho de momento resistente da ligação com resina injetada e 59% em relação ao uso de parafusos normais com folga;
- Os possíveis modos de rotura na ligação com corte duplo são os mesmos para as três soluções de ligadores;

### **5.3. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS**

Durante a realização deste trabalho revelou-se uma série de situações que não estavam abrangidas pelas simulações realizadas ou que careciam de uma análise mais aprofundada do ponto de vista experimental. Assim propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Trabalhos experimentais, de forma a se poder validar os resultados obtidos desta dissertação;
- Trabalhos numéricos, nomeadamente a realização de estudos de convergência das malhas;
- Para a resina utilizada Sikadur-30, realizar ensaios de compressão com confinamento do material de forma a determinar a lei de endurecimento válida para um domínio mais abrangente à deformação;
- Estudar outros tipos de resina a utilizar em parafusos injetados;

- Estudos cíclicos de ligações com resina, incluindo ensaios experimentais e simulações numéricas;
- Estudos de fadiga sobre ligações com resina;
- Análise sobre a influência do número de parafusos na rigidez e resistência da ligação.
   Este estudo pode ser realizado combinando diferentes tipos de parafusos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Teobaldo, I., "Estudo do Aço como Objeto de Reforço Estrutural em Edificações Antigas", Tese de Mestrado, 148 pag., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2004.
- [2] Correia, J.A. F.O., "Desenvolvimento de modelos de previsão da vida à fadiga de ligações rebitadas", Tese de Mestrado, 165 pag., Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Dezembro de 2008.
- [3] Silva, J.F. N.da, "Comparação entre o comportamento à fadiga de ligações rebitadas e aparafusadas", Tese de Mestrado, 249 pag., Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Julho de 2009.
- [4] Kühn, B.; et.al., "Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life," JRC Scientific and Technical Reports, vol. First, p. 17 a 19, February 2008.
- [5] Azevedo, A.F.M., "Método dos Elementos Finitos", vol. 1ª Edição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Abril de 2003, p. 11 a 20.
- [6] Campos, L.E.T., "Técnicas de Recuperação e Reforço Estrutural com Estruturas de Aço", Tese de Mestrado, 104 pag., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, Março de 2006.
- [7] "http://www.isiengenharia.com.br/espaco-do-engenheiro/curiosidades/o-mundo-dasplataformas-de-petroleo-2," [Online]. [Acedido em 20 01 2013].
- [8] "http://wave.safety.zip.net/arch2012-01-16\_2012-01-31.html," [Online]. [Acedido em 20 01 2013].
- [9] "http://megaarquivo.com/tag/foguetes/," [Online]. [Acedido em 20 01 2013].
- [10] "http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=319031," [Online]. [Acedido em 20 01 2013].
- [11] "http://ecoturismo-sustentabilidade.com/nasa-permite-acesso-a-areas-restritas-nokennedy-space-center-na-florida/," [Online]. [Acedido em 20 01 2013].
- [12] "http://www.info-stades.fr/fr/stade/52/newcastle-saint-james-park," [Online]. [Acedido

em 20 01 2013].

- [13] Faleiros, J.P.M.; et.al., "O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: um panorama do período 2001-2010," *BNDES*, vol. Setorial 35, p. 47 a 84, 2010.
- [14] Nestour, M.; et.al., "Global Steel 2010 trends, 2011 outlook," Ernst & Young, 2011.
- [15] Agrawal, A.; et. al., "Global Steel 2011 trends, 2012 outlook," Ernst & Young, 2012.
- [16] V. Valenciani, "Ligações em estruturas de aço", Tese de Mestrado, 352 pag., Universidade de São Paulo, Brasil, 1997.
- [17] Silva, L.S. da; et.al, "Manual de Ligações Metálicas", cmm Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra, Novembro de 2003, p. 3 a 14.
- [18] Kulak, G.L., "High Strength Bolting", vol. First Edition, CISC ICCA, September 2005, p. 1 a 38.
- [19] Jesus, A.M.P.de; et. al., "Fatigue behaviour of resin-injected bolts: an experimental approach," em Atas da Conferência Ibérica de Fratura e Integridade Estrutural (CIFIE), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.
- [20] Kulak, G.L.;et. al., "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints", vol. Second Edition, AISC - American Institute of Steel Construction, 2001.
- [21] J. McCormac, "Structural Steel Design", New York: Harper & Row, 1981.
- [22] C. Salmon, "Steel Structures: Design and Behaviour", vol. 4.ed, New York: Harper & Row, 1996.
- [23] Nikolovski, T., "Technical Information 01: Injection Bolts," http://issuu.com/fakom/docs/ti-01-injectbolts-eng, vol. Amended version 2, April 2009.
- [24] A. Gresnigt, G. Sedlacek e M. Paschen, "Injection bolts to repair old bridges," Delft University of Technology, Netherlands, 2000. [Online]. Available: http://www.epicuro.co.uk/uploads/349.pdf.
- [25] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), "European Recommendations for Bolted Connections With Injection Bolts", vol. First Edition, ECCS Publication Nº79, 1994, p. 5 a 41.

- [26] Mattes, J.F., "Substituição de Rebites por Parafusos Injectados com Resina", Tese de Mestrado, 180 pag., Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, Dezembro de 2007.
- [27] J. Kortiš, "The numerical solution of the bolted connection with the low-quality injected bolts," http://svf.uniza.sk/ksm/zamestnanci/kortis/, Proceedings of the 9th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, October 2011.
- [28] EN 1090-2: 2008, "Execution of steel structures and aluminium structures Part 2: Technical requirements for steel structures," COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN), July 2008.
- [29] NP EN 1993-1-8, 2010, "Eurocódigo 3 Projecto de estruturas de aço. Parte 1-8: Projecto de Ligações," Instituto Português da Qualidade.
- [30] M. Aragão, "Estruturas Metálicas Ligações Parafusadas", [Online]. Available: http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/pdf/lig\_paraf\_05.pdf. [Acedido em 17/12/2012].
- [31] [Sem Autor], "Connections in Steel Structures," [Online]. Available: http://www.engineeringsall.com/downloads/pdf. [Acedido em 17/12/2012].
- [32] M. C. Nataraja, "Design of Steel Structures 06CV72," [Online]. Available: http://elearning.vtu.ac.in/13/ENotes/DSS/MCN%2006CV72%20VTU%20notes.pdf. [Acedido em 18/12/2012].
- [33] American Institute of Steel Construction (AISC), "Structural of Everyday Structural Steel Connections," [Online]. Available: https://engineering.purdue.edu/~jliu/courses/CE470/PPT\_PDF/AISC\_ConnectionsJL.pdf. [Acedido em 18/12/2012].
- [34] Martins, J.G., "Estruturas Metálicas EC3 (versão 1993) Ligações", vol. 2.ed., Universidade Fernando Pessoa, Portugal, 2011, p. 24 a 126.
- [35] Vrakas, A. A., "Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Steel Structures with Detailed Finite Element Models", MSc. Thesis, 104 pag., School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece: Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research, 2011.
- [36] Bessa, W. O., "Análise Experimental e Numérica de Ligações Viga Mista-Pilar com

Cantoneiras de Alma e Assento-Pavimento Tipo e Ligações Isoladas", Tese de Douturamento, 278 pag., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, Dezembro de 2009.

- [37] C. Treméa, "A Influência da Consideração da Flexibilidade nas Ligações no Projeto de Estruturas Metálicas", Tese de Mestrado, 136 pag., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, Dezembro de 2010.
- [38] Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), "Ligações em Estruturas Metálicas", Bibliografia Técnica para o Desenvolvimento da Construção Metálica, vol. II, Outubro de 2003.
- [39] T. Abecassis e R. e. a. Simões, "Concepção e Dimensionamento de Ligações em Estruturas Metálicas e Mistas," Lisboa, Portugal, Maio 2009.
- [40] Manson, L., "Analysis and Comparison of Connection in Steel Structures", MsC. Thesis, 55 pag., Massachusetts Institute of Technology, USA, June 2006.
- [41] EN 14399-3: 2005, "High-strength structural bolting assemblies for preloading Part 3: System HR - Hexagon bolt and nut assemblies," COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN), March 2005.
- [42] Building Research Establishment, Ltd. (BRE), "Design of Structural Connections to Eurocode 3 Frequently Asked Questions", Education and Culture - Leonardo da Vinci, September 2003, p. 9 a 20.
- [43] NP EN 1993-1-1, 2010, "Eurocódigo 3 Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios," Instituto Português da Qualidade.
- [44] Citipitioglu, A.M.; et. al., "Refined 3D finite element modeling of partially-restrained connections including slip," *Elsevier Journal of Constructional Steel Research 58 (2002)* 995–1013, 2002.
- [45] Montgomery, J., "Methods for Modeling Bolts in the Bolted Joint," Siemens Westinghouse Power Corporation, Orlando, EUA, [Online]. Available: http://pdfworld.net/pdf/422868/Methods-for-Modeling-Bolts-in-the-Bolted-Joint-pdf.php. [Acedido em 20/01/2013].
- [46] Kim, J.; et. al., "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints,"

Elsevier - Science Direct, 2006.

- [47] J. M. T. Gomes, "Estudo analítico e experimental do comportamento de uma ligação estrutural rígida viga-pilar", Tese de Mestrado, 37 pag., Universidade de Aveiro, Portugal, 2007.
- [48] Rodrigues, M. C.; et. al., "Modelagem Numérica de Ligações Viga-Coluna em Aço com Placa de Extremidade Estendida Submetidas a Momento Fletor e Força Normal," Asociación Argentina de Mecânica Computacional, vol. XXIX, p. 7541 a 7556, 15-18 Noviembre Noviembre 2010.
- [49] Qureshi, J.; et. al., "Resin Injected Bolted Connections: A step towards achieving slipresistant joints in FRP bridge engineering," The University of Warwick, UK, September 2012. [Online]. Available: http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/staff/jtm/frp\_bridges\_2012\_jq\_jtm.\_pdf.pdf. [Acedido em 06/01/2013].
- [50] Balc, R.; et.al., "Finite Element Analysis of Beam to Column End Plate Bolted Connection," http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, July 2012.
- [51] Eldemerdash, M.; Et. Al., "Finite Element Analysis of Large Capacity Endplate Steel Connections," *Journal of Computer Science*, vol. 8 (4), pp. 482-493, Science Publications, 2012.
- [52] P. Nakasone, "Estudo de Viabilidade de uma Bomba de Fluxo Piezelétrica Utilizando Simulação Computacional", Tese de Mestrado, 154 pag., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2006.
- [53] Meireles, J. F.B. de, "Análise Dinâmica de Estruturas por Modelos de Elementos Finitos Identificados Experimentalmente", Tese de Douturamento, 366 pag., Universidade do Minho, Portugal, 2007.
- [54] Zienkiewicz, O.C.; et.al., "The finite element method", vol. 4.th edition, McGraw-Hill Book Company, London, 1994.
- [55] Fusco, A., "The finite element method for engineers", vol. Monograph n.º 21, Barcelona: Centro Internacional de, 1993.

- [56] Sanchez, A.; et.al., "Finite Element Modeling with ANSYS," ETH Zürich, Centre of Structure Technologies, 2010. [Online]. Available: http://www.structures.ethz.ch. [Acedido em 10/01/2013].
- [57] R. Souza, "O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor",40 pag., Universidade Federal do Pará, Brasil, Junho de 2003.
- [58] Ádány, S., "Numerical and Experimental Analysis of Bolted End-Plate Joints Under Monotonic and Cyclic Loading" PhD Thesis, 141 pag., Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 2000.
- [59] Sika Portugal, [Online]. Available: http://prt.sika.com/pt/solutions\_products/documentacao\_sika.html. [Acedido em 08/01/2013].
- [60] ANSYS, Inc., "ANSYS Parametric Design Language Guide, Version 14.5," Canonsburg, EUA, ANSYS, Inc., October, 2012.
- [61] Jesus, A.M.P.de; et. al., "Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths," *Construction and Building Materials, Elsevier*, p. 12, 2012.
- [62] Queirós, E. R. M. de A., "Comportamento de Ligações do Tipo Cavilha Reforçadas com CFRP em Estruturas de Madeira", Tese de Mestrado, 134 pag., Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Setembro de 2009.

### ANEXO A

# RESULTADOS DO FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES, KT, EM REGIME ELÁSTICO, NA LIGAÇÃO COM CORTE DUPLO

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 estão representados os resultados do fator de concentração de tensões, Kt, para as chapas de 10mm e 20mm, em regime elástico, usando parafusos normais com folga na ligação com corte duplo, para coeficientes de atrito iguais a 0.2 e 0.5, em função da tensão de pré-esforço.

### FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES, kt



**Tabela 6.1** - Resultados do fator de concentração de tensões, Kt, em regime elástico, nas chapas de 10mm e 20mm usando parafusos normais com folga na ligação com corte duplo para, o coeficiente de atrito de 0.2, em função da tensão de préesforço.

	μ=0,2									
			CORPO 1 (Chapa lateral de 10mm)							
dmáx	Aperto	σpe	A.rem.	FV,Ed	σrem.	A.net	σnom	σmax	Kt	
(mm)	%	(MPa)	(mm2)	(N)	(MPa)	(mm2)	(MPa)	(MPa)	IXt	
0.10	90.00%	720.000	350.000	6969.900	19.914	230.000	30.304	219.013	7.227	
0.10	80.00%	640.000	350.000	6952.100	19.863	230.000	30.227	199.069	6.586	
0.10	70.00%	560.000	350.000	6921.500	19.776	230.000	30.093	178.460	5.930	
0.10	60.00%	480.000	350.000	6879.600	19.656	230.000	29.911	158.410	5.296	
0.10	50.00%	400.000	350.000	6809.800	19.457	230.000	29.608	142.793	4.823	
1.00	90.00%	720.000	350.000	27028.000	77.223	230.000	117.513	377.057	3.209	
1.00	80.00%	640.000	350.000	23993.000	68.551	230.000	104.317	337.711	3.237	
1.00	70.00%	560.000	350.000	20979.000	59.940	230.000	91.213	298.328	3.271	
1.00	60.00%	480.000	350.000	17976.000	51.360	230.000	78.157	256.525	3.282	
1.00	50.00%	400.000	350.000	14976.000	42.789	230.000	65.113	215.135	3.304	
10.00	90.00%	720.000	350.000	900440.000	2572.686	230.000	3914.957	13301.900	3.398	
10.00	80.00%	640.000	350.000	899920.000	2571.200	230.000	3912.696	13308.500	3.401	
10.00	70.00%	560.000	350.000	899280.000	2569.371	230.000	3909.913	13308.400	3.404	
10.00	60.00%	480.000	350.000	895270.000	2557.914	230.000	3892.478	13332.300	3.425	
10.00	50.00%	400.000	350.000	894853.194	2556.723	230.000	3890.666	13351.500	3.432	

		CORPO 2 (Chapa central de 20mm)							
0.10	90.00%	720.000	350.000	6969.900	19.914	230.000	30.304	93.781	3.095
0.10	80.00%	640.000	350.000	6952.100	19.863	230.000	30.227	86.564	2.864
0.10	70.00%	560.000	350.000	6921.500	19.776	230.000	30.093	80.519	2.676
0.10	60.00%	480.000	350.000	6879.600	19.656	230.000	29.911	74.488	2.490
0.10	50.00%	400.000	350.000	6809.800	19.457	230.000	29.608	69.518	2.348
1.00	90.00%	720.000	350.000	27028.000	77.223	230.000	117.513	198.877	1.692
1.00	80.00%	640.000	350.000	23993.000	68.551	230.000	104.317	177.296	1.700
1.00	70.00%	560.000	350.000	20979.000	59.940	230.000	91.213	155.486	1.705
1.00	60.00%	480.000	350.000	17976.000	51.360	230.000	78.157	133.538	1.709
1.00	50.00%	400.000	350.000	14976.000	42.789	230.000	65.113	111.502	1.712
10.00	90.00%	720.000	350.000	900440.000	2572.686	230.000	3914.957	13644.900	3.485
10.00	80.00%	640.000	350.000	899920.000	2571.200	230.000	3912.696	13642.500	3.487
10.00	70.00%	560.000	350.000	899280.000	2569.371	230.000	3909.913	13631.800	3.486
10.00	60.00%	480.000	350.000	895270.000	2557.914	230.000	3892.478	13570.600	3.486
10.00	50.00%	400.000	350.000	894853.194	2556.723	230.000	3890.666	13569.300	3.488

**Tabela 6.2** - Resultados do fator de concentração de tensões, Kt, em regime elástico, nas chapas de 10mm e 20mm usando parafusos normais com folga na ligação com corte duplo para o coeficiente de atrito de 0.5, em função da tensão de préesforço.

μ=0,5

			CORPO 1 (Chapa lateral de 10mm)							
dmáx (mm)	Aperto %	<b>б</b> ре (Мра)	A.rem. (mm2)	FV,Ed (N)	σrem. (MPa)	A.net (mm2)	σnom (MPa)	σmax (MPa)	Kt	
0.10	90.00%	720.000	350.000	12042.000	34.406	230.000	52.357	235.513	4.498	
0.10	80.00%	640.000	350.000	12089.000	34.540	230.000	52.561	216.980	4.128	
0.10	70.00%	560.000	350.000	12118.000	34.623	230.000	52.687	198.179	3.761	
0.10	60.00%	480.000	350.000	12128.000	34.651	230.000	52.730	179.021	3.395	
0.10	50.00%	400.000	350.000	12097.000	34.563	230.000	52.596	159.558	3.034	
1.00	90.00%	720.000	350.000	67586.000	193.103	230.000	293.852	524.333	1.784	
1.00	80.00%	640.000	350.000	60075.000	171.643	230.000	261.196	535.477	2.050	
1.00	70.00%	560.000	350.000	52395.000	149.700	230.000	227.804	479.772	2.106	
1.00	60.00%	480.000	350.000	44867.000	128.191	230.000	195.074	412.567	2.115	
1.00	50.00%	400.000	350.000	37372.000	106.777	230.000	162.487	344.284	2.119	
					-		-		-	
10.00	90.00%	720.000	350.000	927400.000	2649.714	230.000	4032.174	12481.300	3.095	
10.00	80.00%	640.000	350.000	930850.000	2659.571	230.000	4047.174	12637.700	3.123	
10.00	70.00%	560.000	350.000	928700.000	2653.429	230.000	4037.826	12701.000	3.146	
10.00	60.00%	480.000	350.000	923940.000	2639.829	230.000	4017.130	12669.500	3.154	
10.00	50.00%	400.000	350.000	920530.000	2630.086	230.000	4002.304	12723.300	3.179	
		CORPO 2 (Chapa central de 20mm)								
-------	--------	---------------------------------	---------	------------	----------	---------	----------	-----------	-------	
0.10	90.00%	720.000	350.000	12042.000	34.406	230.000	52.357	112.898	2.156	
0.10	80.00%	640.000	350.000	12089.000	34.540	230.000	52.561	107.909	2.053	
0.10	70.00%	560.000	350.000	12118.000	34.623	230.000	52.687	101.727	1.931	
0.10	60.00%	480.000	350.000	12128.000	34.651	230.000	52.730	96.648	1.833	
0.10	50.00%	400.000	350.000	12097.000	34.563	230.000	52.596	90.960	1.729	
1.00	90.00%	720.000	350.000	67586.000	193.103	230.000	293.852	421.926	1.436	
1.00	80.00%	640.000	350.000	60075.000	171.643	230.000	261.196	377.677	1.446	
1.00	70.00%	560.000	350.000	52395.000	149.700	230.000	227.804	329.983	1.449	
1.00	60.00%	480.000	350.000	44867.000	128.191	230.000	195.074	283.868	1.455	
1.00	50.00%	400.000	350.000	37372.000	106.777	230.000	162.487	237.152	1.460	
10.00	90.00%	720.000	350.000	927400.000	2649.714	230.000	4032.174	14091.000	3.495	
10.00	80.00%	640.000	350.000	930850.000	2659.571	230.000	4047.174	14162.400	3.499	
10.00	70.00%	560.000	350.000	928700.000	2653.429	230.000	4037.826	14148.800	3.504	
10.00	60.00%	480.000	350.000	923940.000	2639.829	230.000	4017.130	14070.100	3.503	
10.00	50.00%	400.000	350.000	920530.000	2630.086	230.000	4002.304	14015.900	3.502	