



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Ana Castro Martins

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E CUSTO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, na especialidade de Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto e pelo Engenheiro Rui Pedro da Silva Reis e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Julho de 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Estudo do comportamento mecânico e custo de ligações aparafusadas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Produção e Projeto

Study of the mechanical behaviour and cost of bolted joints

Autor

Ana Castro Martins

Orientadores

Rui Pedro da Silva Reis

Diogo Mariano Simões Neto

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Orientador	Engenheiro Rui Pedro da Silva Reis Engenheiro da Vesam Engenharia
Vogal	Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes Professor Associado da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Vesam Engenharia
S.A.**

Coimbra, julho, 2023

Agradecimentos

Agradeço a toda a equipa da Vesam Engenharia S.A., em especial ao meu orientador Engenheiro Rui Reis e ao Engenheiro Filipe Santos, pela partilha de conhecimento, pela disponibilidade e por me terem acolhido durante a realização deste trabalho.

Agradeço também ao meu orientador Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto do Departamento de Engenharia Mecânica da FCTUC, pela acompanhamento, orientações e incentivos prestados ao longo do trabalho.

Numa nota mais pessoal, agradeço à minha família e amigos por todo o apoio que, de forma indireta ou direta, me ajudou a chegar até aqui.

Resumo

As ligações aparafusadas têm uma grande importância nas estruturas metálicas utilizadas na construção de novos edifícios. O objetivo do presente trabalho é o estudo do comportamento mecânico de ligações metálicas aparafusadas em estruturas metálicas. Além disso, pretende-se realizar uma análise dos custos das ligações, numa perspectiva de custos de matéria-prima, custos de fabrico e custos de montagem/transporte. Foram criadas normas a nível europeu para fazer o dimensionamento, fabricação e construção de estruturas metálicas, conhecidas como “Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço”. Essas regras para a análise e dimensionamento de elementos em estruturas foram alvo de revisão aprofundada neste estudo. O dimensionamento neste trabalho foi feito no *Robot Structural Analysis*, programa de análise estrutural que assenta nas regras definidas no Eurocódigo 3.

Selecionaram-se quatro formas de ligação: (i) ligação viga-coluna com chapa de extremidade; (ii) ligação viga-viga com chapa de extremidade; (iii) ligação viga-viga com chapa de *gousset*; (iv) base de coluna. Além disso foram consideradas diferentes combinações de secções. Para a secção em “I” foi considerada a gama entre IPE 80 e IPE 600, enquanto para a secção em “H” foi considerada a gama entre HEA 120 e HEA 400. Para cada caso, foi avaliada a resistência mecânica e a rigidez, as quais aumentavam com o aumento da dimensão das secções envolvidas, permitindo à ligação ter uma maior capacidade de suportar os esforços aplicados. No entanto, a razão entre custo e resistência diminui porque o aumento do custo associado ao aumento da dimensão das ligações é inferior ao aumento de resistência verificado.

Palavras-chave: Ligação aparafusada, Rigidez, Resistência, Dimensionamento, Custo

Abstract

Bolted joints have a great importance in metallic structures used in the construction of new buildings. The objective of this work is to study the mechanical behaviour of bolted joints in steel structures. Furthermore, it is intended to perform a cost analysis of the connections, from a raw material cost, manufacturing cost and assembly/transportation cost perspective. Rules were created at European level to do the mechanical design, manufacturing, and construction of steel structures, known as "Eurocode 3 - Design of steel structures". These rules for the analysis and design of elements in structures were thoroughly reviewed in this study. The mechanical design in this work was done in Robot Structural Analysis, a structural analysis program based on the rules defined in Eurocode 3.

Four forms of joints were selected: (i) beam-column joint with end plate; (ii) beam-beam joint with end plate; (iii) beam-beam joint with gousset plate; (iv) column base. In addition, different combinations of sections were considered. For the "I" section, the interval between IPE 80 and IPE 600 was considered, whereas for the "H" section, the interval between HEA 120 and HEA 400 was considered. For each case, the mechanical strength and stiffness were evaluated, which increased with the increase in the size of the sections involved, allowing the joint to have a greater capacity to support the applied efforts. However, the ratio between cost and resistance decreased because the increase in cost associated with the increase in the size of the joints was less than the increase in resistance.

Keywords: Bolted joint, Stiffness, Strength, Mechanical design, Cost

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
SIMBOLOGIA E SIGLAS.....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação e objetivos.....	1
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Tipos de ligações metálicas	5
2.1.1. Ligações sem transmissão de momento.....	5
2.1.2. Ligações com transmissão de momento	7
2.1.3. Bases de colunas.....	10
2.2. Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço.....	11
2.2.1. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.....	12
2.2.2. Parte 1-8: Projeto de ligações	13
2.3. Custos de uma estrutura metálica	23
3. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	25
3.1. Viga – coluna	26
3.1.1. Resistência da viga pelo regime dos estados limites últimos (ver NP EN1993-1-1: 2010)	27
3.1.2. Resistência pelo método das componentes (ver NP EN 1993-1-8: 2010).....	28
3.1.3. Rigidez de rotação (ver cláusula 6.3 da NP EN1993-1-8:2010)	42
3.1.4. Capacidade de rotação (ver cláusula 6.4 da NP EN1993-1-8:2010)	43
3.2. Viga – viga.....	44
3.2.1. Viga – viga com chapa de <i>gousset</i>	44
3.2.2. Viga – viga com chapa de extremidade e esquadro de reforço	47
3.3. Base de Coluna	48
3.4. Método de cálculo de custos	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1. Dimensionamento das ligações.....	55
4.2. Análise dos custos.....	59
5. CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO A	67
APÊNDICE A	71
APÊNDICE B.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ligações aparafusadas estudadas: (1) Ligação viga-coluna com chapa de extremidade; (2) Ligação viga-viga com chapa de extremidade; (3) Ligação viga-viga com chapa de <i>gousset</i> ; (4) Base de coluna.....	2
Figura 2 - Curva momento-rotação. Fonte: Simões Da Silva & Santiago, 2003.	10
Figura 3 - Fixação dos chumbadouros. Fonte: NP EN 1993-1-8:2010.	10
Figura 4 - Base de coluna: a) sem transmissão de momento; b) com transmissão de momento.....	11
Figura 5 - Perfis. Fonte: ArcelorMittal, 2021.....	13
Figura 6 - Distribuição das forças internas em ligações aparafusadas. Fonte: Simões Da Silva & Santiago, 2003.....	14
Figura 7 - Distribuição das características das ligações baseada no tipo de análise global. Adaptado da fonte: Simões Da Silva & Santiago, 2003.....	16
Figura 8 - Classificação das ligações segundo a rigidez. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010... ..	18
Figura 9 - Ligação rígida, articulada e semi-rígida. Fonte: Rodrigues, 2007.....	19
Figura 10 - Relação de cálculo momento-rotação característica de uma ligação. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	20
Figura 11 - Dimensões e eixos da secção de um perfil IPE. Fonte: ArcelorMittal, 2021... ..	25
Figura 12 – Ligação viga-coluna com chapa de extremidade.	26
Figura 13 - Modelo T-stub equivalente. Fonte: Vieito, 2015.....	28
Figura 14 - Modos de rotura de uma peça em T-stub equivalente. Adaptado da fonte: Joints in Steel Construction: Moment Connections, 1995.....	29
Figura 15 - Dimensões do banzo de uma peça em T equivalente. Fonte: NP EN 1993-1-8:2010.....	30
Figura 16 - Ordem de cálculo a seguir para a determinação da resistência à tração de cada linha de parafusos. Fonte: Vieito, 2015.....	32
Figura 17 - Esforços atuantes numa ligação viga-pilar. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	33
Figura 18 - Modelação de um banzo de coluna reforçado sob a forma de peças em T separadas. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.	37
Figura 19 - Nomenclatura utilizada no afastamento dos parafusos. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	39
Figura 20 - Tensões no plano que define um cordão de soldadura. Fonte: Vieito, 2015.	41
Figura 21 - Ligação viga-viga com chapa de <i>gousset</i>	45
Figura 22 - Exemplo de rotura por bloco. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	46
Figura 23 - Ligação viga-viga com chapa de extremidade.....	47

Figura 24 - Base de coluna.	48
Figura 25 - Classificação da rigidez: Ligação aparafusada viga-coluna com chapa de extremidade, sem esquadro de reforço.	56
Figura 26 - Classificação da rigidez: Ligação aparafusada viga-coluna com chapa de extremidade, com esquadro de reforço.	56
Figura 27 - Ligação viga-coluna com chapa de extremidade: resistência e rigidez inicial.	57
Figura 28 - Ligação viga-viga com chapa de extremidade: resistência e rigidez inicial. ...	58
Figura 29 - Ligação viga-viga com chapa de gousset: resistência.	59
Figura 30 - Base de coluna: resistência.	59
Figura 31 - Ligação viga-coluna com chapa de extremidade: análise de custos.	60
Figura 32 - Ligação viga-viga com chapa de extremidade: análise de custos.	61
Figura 33 - Ligação viga-viga com chapa de gousset: análise de custos.	61
Figura 34 - Base de coluna: análise de custos.	62
Figura A. 1 - Valores de α para banzos reforçados de colunas e para chapas de extremidade. Fonte: NP EN 1993-1-8:2010	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de ligações aparafusadas sem transmissão de momento. Fonte: Joints in Steel Construction: Simple Connections, 2009.....	7
Tabela 2 - Exemplos de ligações com transmissão de momento. Fonte: Joints in Steel Construction: Moment Connections, 1995.....	8
Tabela 3 – Valores nominais da tensão de cedência, <i>fy</i> , e da tensão última à tração, <i>fu</i> , para os aços estruturais laminadas a quente mais correntes. Fonte: NP EN 1993-1-1: 2010.....	12
Tabela 4 - Valores nominais da tensão de cedência, <i>fyb</i> , e da tensão de rotura à tração, <i>fub</i> , para parafusos. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	13
Tabela 5 - Categorias das ligações metálicas. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	15
Tabela 6 - Tipos de modelos de ligação. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	16
Tabela 7 - Componentes básicos das ligações. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	21
Tabela 8 - Comprimentos efetivos para o banzo reforçado de uma coluna. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	36
Tabela 9 - Comprimentos efetivos de uma chapa de extremidade. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	38
Tabela 10 - Espaçamento dos parafusos. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.....	39
Tabela 11 - Geometria do cordão de soldadura.....	41
Tabela 12 - Matéria-prima e respetivos custos.....	51
Tabela 13 - Processos de fabrico, unidades dos tempos de fabrico e respetivos custos.....	52
Tabela 14 - Processos de transporte e montagem, meios e respetivos custos.....	54
Tabela A. 1 - Centro de compressão, braço do binário <i>z</i> e distribuição dos esforços para a determinação do momento resistente <i>Mj</i> , <i>Rd</i> para ligações com chapa de extremidade. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8:2010.....	67
Tabela A. 2 – Coeficientes parciais de segurança para as ligações. Adaptado das fontes: NP EN 1993-1-1:2010; NP EN 1993-1-8:2010.....	68
Tabela A. 3 - Valores aproximados para o parâmetro de transformação β . Fonte:NP EN 1993-1-8:2010.....	68
Tabela A. 4 – Coeficiente <i>ab</i> e <i>k1</i> . Adaptado da fonte:.....	70
Tabela A. 5 - Coeficientes de rigidez dos componentes básicos para a determinação de <i>keq</i> . Adaptado da fonte:	70

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área da secção

A_{net} – Área da zona de tensão útil da secção bruta

A_{nt} – Área útil solicitada à tração

A_{nv} – Área útil solicitada ao corte.

A_v – Área de corte

A_{vb} – Área de corte da viga

A_{vc} – Área de corte da coluna

A_s – Área da secção resistente do parafuso ou do chumbadouro

A_w – Área efetiva do cordão de soldadura

$B_{p,Rd}$ – Resistência ao punçoamento da cabeça do parafuso e da porca

E – Módulo de elasticidade

$F_{b,Rd}$ – Resistência ao esmagamento por parafuso

$F_{c,fb,Rd}$ – Resistência à compressão do banzo e da alma da viga combinados

$F_{f,Rd}$ – Resistência à força de atrito entre a chapa de base e a argamassa

$F_{t,Ed}$ – Esforço de tração por parafuso no estado limite último

$F_{t,Rd}$ – Resistência à tração por parafuso

$F_{t,ep,Rd}$ – Resistência à tração da chapa de extremidade sujeita à flexão

$F_{t,fc,Rd}$ – Resistência à tração do banzo de coluna em flexão

$F_{t,wb,Rd}$ – Resistência à tração da alma de viga

$F_{t,wc,Rd}$ – Resistência da alma de uma coluna

$F_{v,Ed}$ – Esforço transversal por parafuso no estado limite último

$F_{v,Rd}$ – Resistência ao corte por parafuso

$F_{vb,Rd}$ – Resistência ao corte por chumbadouro

$F_{T,Rd}$ – Resistência à tração de um banzo de uma peça em T

$F_{T,1,Rd}$ – Resistência à tração de um banzo de uma peça em T no modo de rotura 1

$F_{T,2,Rd}$ – Resistência à tração de um banzo de uma peça em T no modo de rotura 2

- $F_{T,3,Rd}$ – Resistência à tração de um banzo de uma peça em T no modo de rotura 3
- L_b – Comprimento do parafuso sujeito a alongamento
- M_0 – Momento fletor residual
- M_{Ed} – Momento fletor atuante na secção transversal
- $M_{c,Ed}$ – Momento fletor atuante na coluna
- $M_{c,Rd}$ – Momento resistente
- $M_{j,Rd}$ – Momento resistente de uma ligação viga-coluna
- $M_{pl,1,Rd}$ – Momento resistente plástico para o modo de rotura 1
- $M_{pl,2,Rd}$ – Momento resistente plástico para o modo de rotura 2
- $M_{pl,3,Rd}$ – Momento resistente plástico para o modo de rotura 3
- $M_{pl,Rd}$ – Momento resistente plástico
- $M_{pl,fc,Rd}$ – Momento resistente plástico de um banzo de coluna
- $M_{pl,st,Rd}$ – Momento resistente plástico de um reforço
- $M_{y,v,Rd}$ – Momento fletor resistente plástico reduzido em relação ao eixo y-y
- $N_{c,Ed}$ – Esforço axial atuante
- $N_{j,Rd}$ – Resistência ao esforço axial de uma ligação base de coluna
- $N_{pl,Rd}$ – Esforço axial resistente plástico
- V_{Ed} – Esforço transversal atuante na secção transversal
- $V_{c,Rd}$ – Resistência ao esforço transversal
- $V_{eff,Rd}$ – Resistência ao destacamento em bloco
- $V_{pl,Rd}$ – Esforço transversal resistente plástico
- $V_{wp,Ed}$ – Esforço transversal resultante que atua no painel de alma da coluna
- $V_{wp,Rd}$ – Esforço transversal resistente do painel de alma da coluna
- $W_{el,y,c}$ – Módulo de flexão elástico da coluna em torno do eixo y-y
- $W_{pl,y}$ – Módulo de flexão plástico em relação ao eixo y-y
- W_{pl} – Módulo de flexão plástico
- S_j – Rigidez de rotação de uma ligação
- $S_{j,ini}$ – Rigidez de rotação inicial de uma ligação
- a – Espessura do cordão de soldadura
- b – Largura da secção transversal

-
- b_b – Largura da secção transversal da viga
 b_c – Largura da secção transversal da coluna
 $b_{eff,c,wc}$ – Largura efetiva da alma comprimida da coluna
 $b_{eff,t,wb}$ – Largura efetiva da alma tracionada da viga
 $b_{eff,t,wc}$ – Largura efetiva da alma tracionada da coluna
 d – Altura livre da alma
 d – Diâmetro nominal do parafuso
 d_0 – Diâmetro do furo
 d_b – Altura livre da alma da viga
 d_c – Altura livre da alma da coluna
 d_m – Diâmetro médio da parte roscada do parafuso
 d_s – Distância entre os eixos dos reforços laterais na alma de coluna
 e – Distância entre o centro do parafuso e a extremidade adjacente
 f_u – Tensão de rotura no estado limite último das superfícies ligadas
 f_{ub} – Tensão de rotura do parafuso
 f_y – Tensão de cedência do material
 f_{yb} – Tensão de cedência do parafuso
 h – Altura da secção transversal
 h_b – Altura da secção transversal da viga
 h_c – Altura da secção transversal da coluna
 h_i – Altura total da alma
 $k_{eff,r}$ – Coeficiente de rigidez efetiva da linha r
 k_{eq} – Coeficiente de rigidez elástica equivalente
 k_i – Coeficiente de rigidez elástica do componente i
 $k_{i,r}$ – Coeficiente de rigidez do componente i relativo à linha r
 l_{eff} – Comprimento efetivo de um cordão de ângulo
 $l_{eff,1}$ – Comprimento efetivo de uma peça em T aplicado ao modo de rotura 1
 $l_{eff,2}$ – Comprimento efetivo de uma peça em T aplicado ao modo de rotura 2
 $l_{eff,3}$ – Comprimento efetivo de uma peça em T aplicado ao modo de rotura 3
 m – Distância entre o centro do parafuso e o limite do raio de concordância
 n – Número de parafusos em tração
-

- p – Distância entre os centros dos parafusos
 r – Raio de concordância
 r_b – Raio de concordância da viga
 r_c – Raio de concordância da coluna
 t_f – Espessura do banzo
 t_{fb} – Espessura do banzo da viga
 t_{fc} – Espessura do banzo da coluna
 t_p – Espessura da chapa
 t_w – Espessura da alma
 t_{wb} – Espessura da alma da viga
 t_{wc} – Espessura da alma da coluna
 z – Braço binário
 z_{eq} – Braço binário equivalente
 ϕ_{Ed} – Ângulo de rotação entre os elementos ligados
 γ_{M0} – Coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
 γ_{M1} – Coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
 γ_{M2} – Coeficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação

Siglas

- EN 1992 – Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
HEA – Perfil em forma de “H”
IPE – Perfil em forma de “I”
NP EN 10025-2 – Norma Portuguesa para Produtos laminados a quente de aços de construção; Parte 2: Condições técnicas de fornecimento para aços de construção não ligados
NP EN 1993-1-1: 2010 – Norma Portuguesa do Eurocódigo 3: Projeto de estruturas em aço; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios; Edição de Março de 2010
NP EN 1993-1-8: 2010 – Norma Portuguesa do Eurocódigo 3: Projeto de estruturas em aço; Parte 1-8: Projeto de ligações; Edição de Março de 2010

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O estudo apresentado nesta dissertação foi maioritariamente desenvolvido na empresa Vesam Engenharia S.A., cuja sede está sediada em Cantanhede. É uma empresa portuguesa inserida no setor da engenharia civil, nomeadamente na construção de estruturas em aço. Atualmente, esta empresa desenvolve a sua atividade industrial em 5 áreas negócio, nomeadamente a reabilitação, edifícios, indústria, pontes e mais recentemente *live structure*. Nesta empresa procuram-se criar projetos que sejam praticáveis e eficientes de fabricar e montar, começando por otimizar as ligações metálicas.

O trabalho realizado no âmbito deste projeto está inserido no sector dos edifícios, onde as estruturas metálicas utilizadas na construção de novos edifícios são concebidas, projetadas, fabricadas e posteriormente montadas. As ligações aparafusadas têm uma grande importância nestas estruturas, não só do ponto de vista da resistência mecânica, mas também do ponto de vista do custo. Este método de ligação é amplamente utilizado nestas estruturas pela sua versatilidade de soluções, garantia de resistência mecânica e relativamente baixo custo.

1.2. Motivação e objetivos

Uma estrutura deve ser dimensionada e executada de forma a desempenhar com eficácia as funções para as quais foi concebida, durante um período de vida útil pré-estabelecido. Para isso devem ser verificadas condições que impeçam o seu colapso (estados limite últimos), condições que assegurem um adequado desempenho em serviço (estados limites de utilização) e ainda condições relativas à sua durabilidade (Santos & Silva, 2014).

As ligações em estruturas metálicas têm uma influência significativa no seu comportamento global, pelo que, devem ser estudadas com muito rigor. A vantagem de recorrer a ligações aparafusadas, em relação a ligações soldadas, neste tipo de construções, deve-se à sua capacidade de fornecer resistência, flexibilidade, montagem e desmontagem fácil, distribuição de carga uniforme, tolerância a choques e vibrações, e facilidade de inspeção e manutenção.

O surgimento de programas de dimensionamento de ligações metálicas tornou possível ter um processo de projeto e detalhe muito mais eficiente e livre. No entanto, houve um fator importante que se perdeu, a repetibilidade e com isto uma maior dificuldade em industrialização dos processos de fabrico e montagem. Ainda na perspectiva de fabrico e montagem, outra carência que a empresa sentiu, foi a falta de uma metodologia de avaliação do custo real de uma ligação.

A realização deste trabalho irá permitir à empresa ter um processo de projeto e detalhe ainda mais rápido e a correta escolha da ligação adaptada a cada situação, pois terá como resultado um repositório de ligações que irá garantir uma perspectiva de fabrico e montagem no processo de decisão.

Como tal, este trabalho será dividido em duas fases:

- Fase 1: Estudo do comportamento mecânico e dimensionamento de um conjunto de ligações;
- Fase 2: Cálculo do custo de cada ligação.

Cada forma de ligação pode sofrer inúmeras adaptações, conforme as necessidades de cada projeção. Deste modo, decidiu-se focar este trabalho nas formas de ligações aparafusadas mais comuns, apresentadas na Figura 1. As mais comuns são: (i) ligação entre uma viga e uma coluna, com chapa de extremidade e esquadro de reforço; (ii) ligação entre vigas, com chapa de extremidade e esquadro de reforço; (iii) ligação entre vigas, com chapa de *gousset*; (iv) base de coluna.

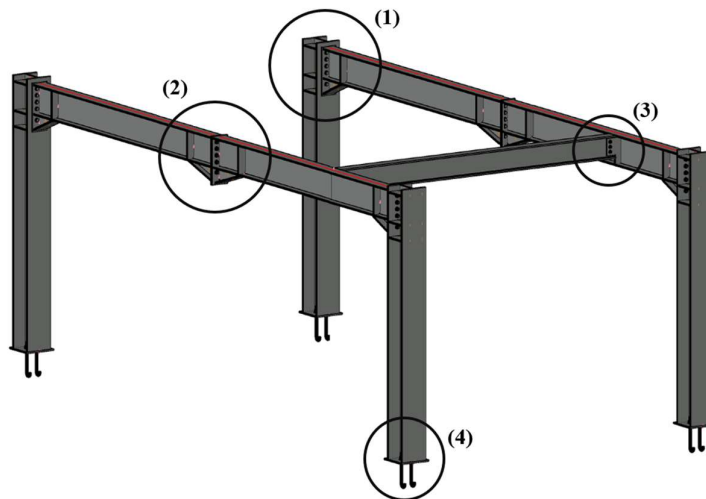


Figura 1 - Ligações aparafusadas estudadas: (1) Ligação viga-coluna com chapa de extremidade; (2) Ligação viga-viga com chapa de extremidade; (3) Ligação viga-viga com chapa de *gousset*; (4) Base de coluna.

1.3. Estrutura da dissertação

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 pretende introduzir a temática da dissertação e apresentar os objetivos da mesma.

O capítulo 2 tem como objetivo fazer um enquadramento do trabalho desenvolvido. Inicia-se o capítulo com uma explicação geral do que são ligações metálicas e dos conceitos necessários a reter para uma boa compreensão do trabalho desenvolvido. Seguidamente, passa-se para a apresentação das partes do Eurocódigo 3 a que se recorreu durante a realização deste trabalho. Por fim, abordar a temática de custos direcionada às ligações metálicas.

No capítulo 3 introduz-se os métodos e metodologias utilizados para o dimensionamento e cálculo dos custos, em cada tipo de ligação estudado.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos no dimensionamento e no cálculo dos custos para cada tipo de ligação, e faz-se uma análise dos mesmos.

Por fim, no capítulo 5 retiram-se conclusões acerca de todo o trabalho desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tipos de ligações metálicas

Em estruturas metálicas, as ligações metálicas podem ser soldadas ou aparafusadas, no entanto as ligações por meio de parafusos são mais comuns devido à sua facilidade de fabricação e instalação no local da construção.

As ligações aparafusadas têm como principal objetivo a união de dois ou mais elementos estruturais por intermédio de um conjunto de elementos, assegurando que os esforços relevantes são transmitidos entre eles. As ligações aparafusadas podem ser classificadas de acordo com o método de análise global e o tipo de modelo de ligação. O método de análise global pode ser elástico, rígido-plástico ou elasto-plástico. Por outro lado, o tipo do modelo de ligação estabelece a necessidade de ter em consideração os efeitos da ligação na análise global da estrutura, pode ser um modelo simplificado de uma ligação classificada como articulada, contínua ou semicontínua. Na secção 2.2.2 serão abordados estes temas.

Apresentam-se três modelos simplificados de ligações, que estabelecem a necessidade de ter em consideração os efeitos das ligações na análise global da estrutura. Assim, as ligações podem ser divididas em três categorias:

- Ligações sem transmissão de momento;
- Ligações com transmissão de momento;
- Bases de colunas.

2.1.1. Ligações sem transmissão de momento

As ligações sem transmissão de momento, também designadas por ligações simples, são caracterizadas por apenas transmitirem esforços transversos, ou seja, apresentam uma resistência à rotação desprezável, não transferindo momentos fletores significativos. Neste sentido, podem ser feitas algumas simplificações durante o cálculo global da estrutura: (i) considerar as vigas simplesmente apoiadas; (ii) considerar apenas o esforço axial atuante e pequenos momentos introduzidos pelas reações nas extremidades das vigas no dimensionamento das colunas.

Na Tabela 1 é possível visualizar alguns exemplos de ligações simples. De notar que os exemplos representados são formas genéricas, ou seja, partindo da composição de cada um deles podem fazer-se alterações e modificações conforme as necessidades de cada situação. Os exemplos apresentados de ligações sem transmissão de momento foram divididos em dois grupos: (i) ligações viga-viga e viga-coluna e (ii) emendas de coluna. O primeiro grupo refere-se a ligações de canto entre vigas, ou entre colunas e vigas, com o intuito de realizar uma mudança de direção. Neste caso existem 3 métodos diferentes para realizar a ligação, nomeadamente com recurso a dupla cantoneira, utilizando chapa de extremidade flexível ou chapa gousset. Por outro lado, as emendas de colunas são aplicadas quando existe a necessidade de assegurar tamanhos adequados para efeitos de transporte e montagem.

Tabela 1 - Exemplos de ligações aparafusadas sem transmissão de momento. Fonte: *Joints in Steel Construction: Simple Connections, 2009.*

1. Ligações viga-viga e viga-coluna:	
1.1 Dupla cantoneira de alma;	
1.2 Chapa de extremidade flexível;	
1.3 Chapa de gousset;	
2. Emendas de colunas	

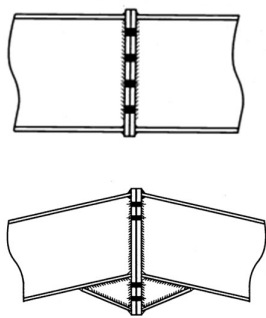
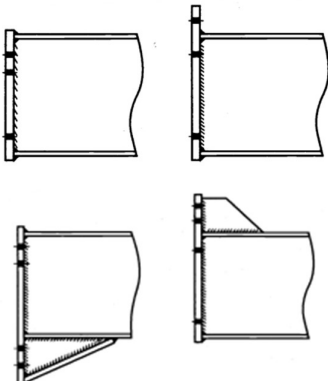
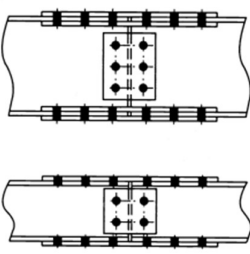
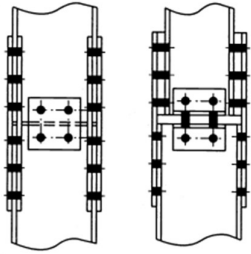
2.1.2. Ligações com transmissão de momento

As ligações com transmissão de momento são caracterizadas pela sua capacidade de transmitir momento fletor, esforço transversal e esforço axial. Estas ligações apresentam um

comportamento descrito por uma curva não-linear momento-rotação (ver Figura 2), que representa a relação entre o momento fletor aplicado a uma ligação, M_{Ed} , e a rotação entre os elementos ligados, ϕ_{Ed} .

Na Tabela 2 é possível visualizar diferentes formas de ligações aparafusadas com a capacidade de transmitir momento fletor, esforço transversal e ao esforço axial. De notar que os exemplos representados são formas genéricas, ou seja, partindo da composição de cada um deles pode fazer-se alterações conforme as necessidades de cada situação. Estas ligações com transmissão de momento podem ser obtidas de duas formas distintas, nomeadamente através da ligação com chapa de extremidade ou recorrendo a chapas sobre juntas aparafusadas.

Tabela 2 - Exemplos de ligações com transmissão de momento. Fonte: Joints in Steel Construction: Moment Connections, 1995.

1. Ligações viga-viga e viga-coluna com chapa de extremidade	
	
2. Ligações viga-viga e coluna-coluna com chapas sobre juntas aparafusadas	
	

A análise do comportamento mecânico deste tipo de ligações é complexa devido aos vários componentes que as constituem, nomeadamente chapas de extremidade, parafusos, cordões de soldadura, reforços, entre outros. Para compreender o seu comportamento é

necessário considerar uma multiplicidade de fenómenos, como a não linearidade do comportamento do material, o contato não-linear e escorregamento, bem como a não-linearidade geométrica, para condições de tensão residual e configurações geométricas complexas. Assim, não é suficiente assumir que uma ligação com transmissão de momento é adequada simplesmente pela sua capacidade de resistir ao momento fletor, ao esforço transversal e ao esforço axial. É também importante ter em consideração a rigidez e a capacidade de rotação da ligação (*Joints in Steel Construction: Moment Connections*, 1995). Devido às dificuldades encontradas no estudo destas ligações ao longo dos anos, procurou-se desenvolver metodologias que viessem simplificar a análise e dimensionamento do comportamento destas ligações. Entre essas metodologias surge o “Método das Componentes”, originado por Zoetemeijer, que se encontra descrito na NP EN 1993-1-8: 2010.

Na Figura 2 apresenta-se uma curva momento-rotação experimental, que representa o comportamento real de uma ligação com transmissão de momento. Nessa curva vê-se um crescimento inicial, aproximadamente linear, seguido de um crescimento não-linear. Na mesma figura, a curva “EN 1993-1-8”, representa uma curva aproximada do comportamento de ligações com transmissão de momento, utilizada no “Método das Componentes”. De acordo com a NP EN 1993-1-8: 2010, o início do comportamento não-linear destas ligações pode ser estimado a $2/3$ do momento plástico resistente máximo, $M_{j,Rd}$. Esta estimativa é conservadora e segura, visto que recorre à tensão de cedência do material para fazer a aproximação. Quando se dá a passagem de limite elástico para plástico, assume-se que a partir daquele ponto de rotura, a deformação da ligação é infinita.

Apesar da curva característica ser não-linear, não invalida que uma ligação com comportamento linear possa suportar transmissão de momentos. No entanto, para que uma ligação possua uma elevada capacidade de transmitir momento é fundamental que o seu comportamento seja dúctil. De acordo com este método, o conhecimento da ductilidade de ligações metálicas requer uma análise não-linear.

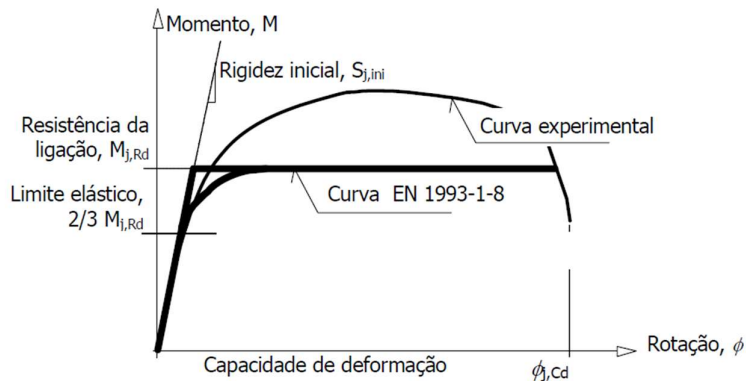


Figura 2 - Curva momento-rotação. Fonte: Simões Da Silva & Santiago, 2003.

2.1.3. Bases de colunas

Uma ligação do tipo base de coluna é constituída por uma coluna, uma chapa de base e dispositivos de ancoragem como chumbadouros/ganchos. Os chumbadouros estabelecem a ligação entra a chapa de base, soldada ao perfil da coluna, e a fundação - bloco maciço em betão, como se mostra na Figura 3 . Durante a montagem deste tipo de ligações procura-se nivelar a folga existente entre a chapa de base e o betão, usando argamassa de selagem, composta por cimento e areia. Essa folga advém de porcas que são posicionadas abaixo da chapa de base, como se pode ver na Figura 3 (b). O objetivo deste tipo de montagem é garantir a possibilidade de nivelar verticalmente a coluna, após o seu posicionamento. Visto que a única função da camada de argamassa de selagem é a de nivelar a ligação, os seus valores resistentes não são considerados na análise e dimensionamento.

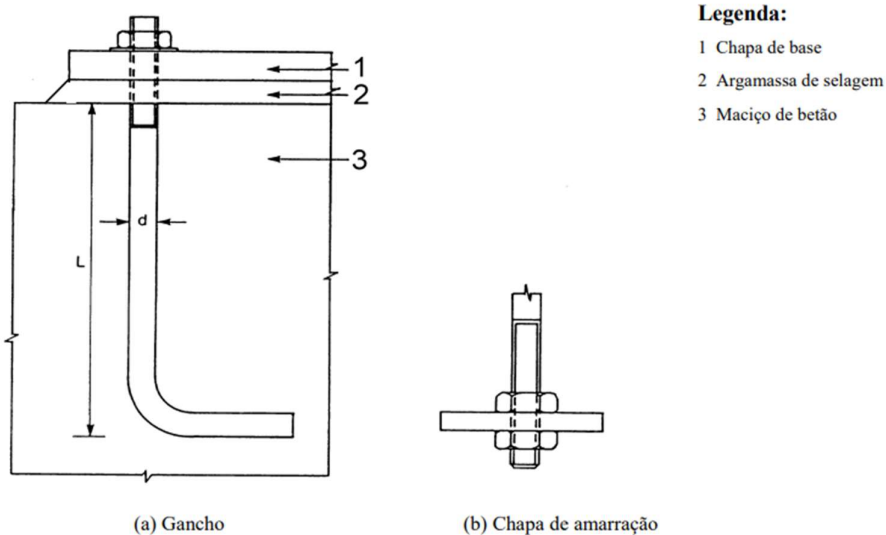


Figura 3 - Fixação dos chumbadouros. Fonte: NP EN 1993-1-8:2010.

As bases de colunas são dimensionadas de maneira a suportar a transmissão do esforço axial e do esforço transversal a que estão sujeitas, independentemente da geometria da ligação. A capacidade de transmissão de momento fletor deste tipo de ligações é ditada pela geometria da ligação.

Geralmente, uma base de coluna sem transmissão de momento é constituída por uma ou duas filas de chumbadouros, no interior do banzo, como se pode ver na Figura 4 (a). Desta forma, garante-se um menor braço, e conseqüentemente menor absorção de momento fletor. Por outro lado, para garantir que uma base de coluna possui capacidade de transmitir momento, as filas de chumbadouros devem ser posicionadas fora dos banzos, como se pode ver na Figura 4 (b), aumentando o braço.

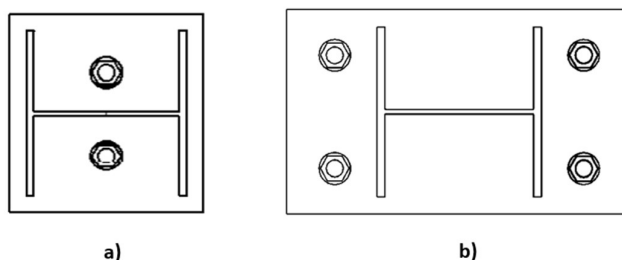


Figura 4 - Base de coluna: a) sem transmissão de momento; b) com transmissão de momento.

2.2. Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço

A União Europeia criou normas de dimensionamento, fabricação e construção de estruturas metálicas, conhecidas como “Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço”. O objetivo da criação destas normas foi tirar partido da diversidade de produtos metálicos, dos avanços tecnológicos e das técnicas disponíveis em diferentes países. Essas normas foram desenvolvidas ao longo de vários anos e visam garantir a segurança e a qualidade das estruturas metálicas na União Europeia, além de promover a harmonização das normas de construção entre os países.

A Parte 1-1 do Eurocódigo 3 inclui regras gerais para a análise e dimensionamento de elementos em estruturas metálicas. A Parte 1-8 do Eurocódigo 3 inclui regras e recomendações, que se baseiam no estudo do comportamento individual de cada uma das componentes que constitui uma ligação.

2.2.1. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios

Os aços macios, laminados a quente, são os aços mais comuns em construções metálicas. Estes aços são caracterizados por baixas percentagens de carbono, geralmente em torno de 0,2%, e são facilmente soldáveis e conformados. Possuem boa resistência mecânica e são relativamente econômicos em comparação com outros tipos de aços. Na Tabela 3 são indicados os valores nominais da tensão de cedência, f_y , e da tensão última à tração, f_u , dos aços mais correntes, de acordo com a NP EN 10025-2 (Produtos laminados a quente de aços de construção; Parte 2: Condições técnicas de fornecimento para aços de construção não ligados).

Tabela 3 – Valores nominais da tensão de cedência, f_y , e da tensão última à tração, f_u , para os aços estruturais laminados a quente mais correntes. Fonte: NP EN 1993-1-1: 2010.

Classe do aço EN 10025-2	Espessura nominal t do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470

Para utilizar métodos de análise e dimensionamento plástico é necessário garantir que os aços utilizados nas estruturas metálicas apresentem ductilidade suficiente. Assim, a conformidade com as classes definidas na Tabela 3 é essencial para garantir que os materiais sejam considerados dúcteis.

Uma das grandes vantagens do uso do aço em construções é a possibilidade de obter peças com diferentes formas, como perfis, chapas espessas, chapas delgadas nervuradas, entre outras. Usualmente, os elementos resistentes principais de uma construção são peças em perfis (ver Figura 5). Os perfis caracterizam-se por apresentarem pesos relativamente menores em relação a outros elementos estruturais, mantendo a resistência. Isto conduz a uma elevada relação inércia / peso, o que leva à possibilidade de construir estruturas com maiores vãos.



Figura 5 - Perfis. Fonte: ArcelorMittal, 2021.

2.2.2. Parte 1-8: Projeto de ligações

2.2.2.1. Ligações aparafusadas

As ligações aparafusadas incluem chapas sobre juntas, chapas de extremidade, cantoneiras, entre outras. Para ligar estes elementos aos perfis estruturais utilizam-se parafusos. De acordo com a norma, a seleção da classe métrica dos parafusos utilizados em ligações metálicas é feita de acordo com o tipo de esforços a que a ligação estará sujeita. Em ligações sujeitas a forças e momentos estáticos, todas as classes de parafusos se aplicam. No entanto, em ligações sujeitas a cargas cíclicas suscetíveis a induzir fenómenos de fadiga, devem-se aplicar parafusos com elevada resistência à fadiga, nomeadamente parafusos de classes 8.8 e 10.9. A Tabela 4 apresenta as classes métricas dos parafusos válidas para a NP EN 1993-1-8: 2010 e os respetivos valores nominais da tensão de cedência, f_{yb} , e tensão de rotura à tração, f_{ub} .

Tabela 4 - Valores nominais da tensão de cedência, f_{yb} , e da tensão de rotura à tração, f_{ub} , para parafusos. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Classe do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

A distribuição de forças internas nos diferentes tipos de ligações aparafusadas mostra-se na Figura 6 de uma forma simplificada. Na Figura 6 (a) representa-se uma ligação ao corte, evidenciando o efeito de esmagamento no parafuso. Neste caso o movimento das placas é restringido essencialmente pelo núcleo do parafuso. Na Figura 6 (b) representa-se

uma ligação pré-esforçada, evidenciando a resistência ao escorregamento. As placas são comprimidas entre si devido às forças de aperto dos parafusos, sendo o seu movimento relativo de deslizamento restringido pelas forças de atrito entre as placas. Por fim, na Figura 6 (c) representa-se uma ligação pré-esforçada com carga de tração aplicada nas placas. Tanto o núcleo do parafuso, como a cabeça do parafuso são os responsáveis por suportar os esforços de tração. Para além destas situações, existem outros tipos de ligações onde os parafusos são solicitados por uma combinação de corte com tração.

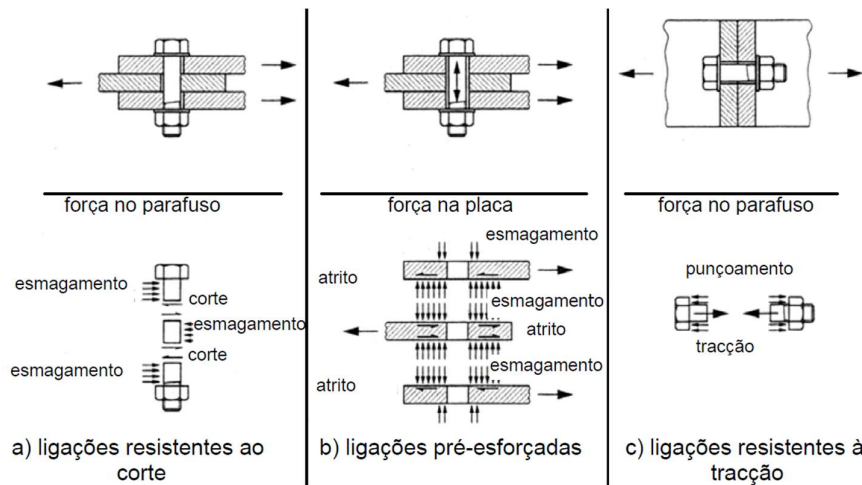


Figura 6 - Distribuição das forças internas em ligações aparafusadas. Fonte: Simões Da Silva & Santiago, 2003.

Na cláusula 3.4 da NP EN 1993-1-8:2010 são definidas cinco categorias de classificação de ligações aparafusadas, em função das possíveis distribuições de forças internas, listadas na Tabela 5. As categorias têm como objetivo servir de orientação às verificações que devem ser feitas no dimensionamento destas ligações. Foram definidas 3 categorias (A, B e C) para ligações ao corte e 2 categorias (D e E) para ligações tracionadas. Em cada uma das categorias é definida a classe métrica dos parafusos a ser utilizados.

Tabela 5 - Categorias das ligações metálicas. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Ligações ao corte	
Categoria A: Ligação resistente ao esmagamento	Parafusos sem pré-esforço. Classes: 4.6 a 10.9.
Categoria B: Ligação resistente ao escorregamento no estado limite de utilização	Parafusos pré-esforçados. Classes: 8.8 ou 10.9.
Categoria C: Ligação resistente ao escorregamento no estado limite último	Parafusos pré-esforçados. Classes: 8.8 ou 10.9.
Ligações tracionadas	
Categoria D: Ligação não pré-esforçada	Classes: 4.6 a 10.9.
Categoria E: Ligação pré-esforçada	Classes: 8.8 ou 10.9.

2.2.2.2. Análise, classificação e modelação

A distribuição dos esforços e deformações numa estrutura pode ser afetada pelo comportamento das ligações. Na cláusula 5.1 da NP EN 1993-1-8: 2010, apresentam-se três modelos simplificados de ligações, estabelecendo a necessidade de ter em consideração os efeitos das ligações na análise global da estrutura. A distinção entre os três modelos pode ser feita da seguinte forma:

- Articulada: quando se assume que a ligação não transmite momentos fletores;
- Contínua: quando se pode considerar que o comportamento da ligação não tem qualquer efeito na análise da estrutura;
- Semicontínua: quando se deve considerar o comportamento da ligação na análise estrutural.

Tabela 6 - Tipos de modelos de ligação. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Método de análise global	Classificação da ligação		
	Elástica	Nominalmente articulada	Rígida
Rígido-plástica	Nominalmente articulada	Resistência total	Resistência parcial
Elasto-plástica	Nominalmente articulada	Rígida e resistência total	Semi-rígida e resistência parcial Semi-rígida e resistência total Rígida e resistência parcial
Tipo de modelo da ligação	Articulada	Contínua	Semicontínua

O modelo de ligação adequado a cada caso deverá ser determinado com base na informação presente na Tabela 6, em função da classificação da ligação e do método de análise global. A relação entre o momento aplicado e a rotação resultante define o método de análise global. Assim, a análise global pode ser elástica, rígido-plástica ou elasto-plástica. Para cada situação a relação é obtida por uma aproximação linear (ver Figura 7), de maneira que esta se situe totalmente sob a curva global característica.

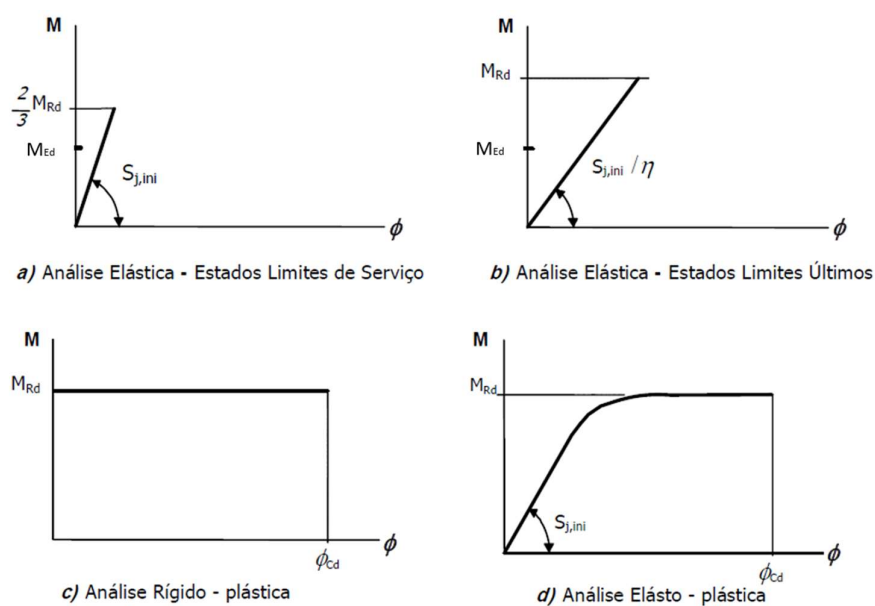


Figura 7 - Distribuição das características das ligações baseada no tipo de análise global. Adaptado da fonte: Simões Da Silva & Santiago, 2003.

Numa análise global elástica, a ligação deve ser classificada em função da rigidez de rotação e ter resistência suficiente para transmitir os esforços atuantes que resultam da análise estrutural. No caso de uma ligação semi-rígida, deverá, em geral, ser utilizada na análise a rigidez de rotação S_j correspondente ao momento fletor atuante M_{Ed} . Se M_{Ed} for menor ou igual a dois terços do momento fletor resistente, poderá adotar-se a rigidez de rotação inicial $S_{j,ini}$ na análise global (ver Figura 7 (a)). Como simplificação, poderá considerar-se a rigidez de rotação igual a $S_{j,ini}/\eta$ para todos os valores do momento M_{Ed} , em que η é o coeficiente de modificação da rigidez indicado no Quadro 5.2 da NP EN 1993-1-8: 2010 (ver Figura 7 (b)). No caso de uma análise rígido-plástica, as ligações devem ser classificadas em função da resistência enquanto a capacidade de rotação deverá ser suficiente para assegurar as rotações resultantes da análise estrutural (ver Figura 7 (c)). Na análise global elasto-plástica as ligações deverão ser classificadas em função da rigidez de rotação e da resistência. A determinação dos esforços atuantes, através deste tipo de análise deverá ser feita com base na curva momento fletor – rotação característica de cada ligação (ver Figura 7 (d)). Como simplificação, poderá adotar-se uma curva bilinear aproximada, situada na zona inferior da curva característica momento fletor – rotação, onde se considera a rigidez de rotação igual a $S_{j,ini}/\eta$ para todos os valores do momento M_{Ed} .

Uma ligação é classificada quanto à rigidez em função da sua rigidez de rotação, através da comparação da sua rigidez de rotação inicial, $S_{j,ini}$, com os limites de classificação indicados na Figura 8. Esses limites dependem das características globais da estrutura (como por exemplo a existência de mais do que um andar), das dimensões das vigas e das colunas, e também do módulo de elasticidade.

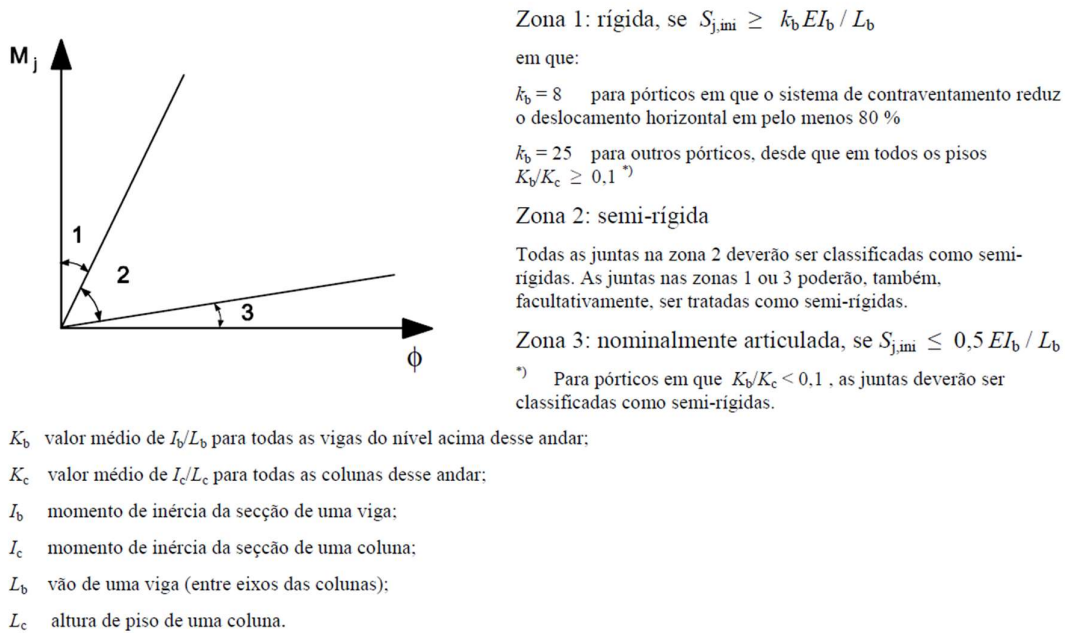


Figura 8 - Classificação das ligações segundo a rigidez. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Uma ligação é classificada como rígida quando é garantida a continuidade da estrutura e as rotações relativas entre os membros ligados são restringidas ao máximo. Pode admitir-se que o ângulo entre os membros ligados permanece constante durante o carregamento, como se pode ver na Figura 9 (a). Uma ligação é classificada como rotulada/articulada quando as rotações relativas entre os membros ligados não são restringidas. O esquema representado na Figura 9 (b) ilustra uma situação de ligação articulada. Não existem condições para se desenvolverem momentos significativos que possam afetar de modo desfavorável os elementos da estrutura no seu todo. Por fim, a classificação de semi-rígida é atribuída quando a rotação entre os membros é restringida em comparação com a rotação que ocorreria numa ligação articulada. Se pelo contrário compararmos a rotação da ligação semi-rígida com a rígida podemos concluir que esta é bastante maior. Portanto, o momento que será transmitido pela ligação semi-rígida vai ser maior que no caso de uma ligação articulada, mas será menor que no caso de uma ligação rígida, conforme pode ser observado na Figura 9 (c).

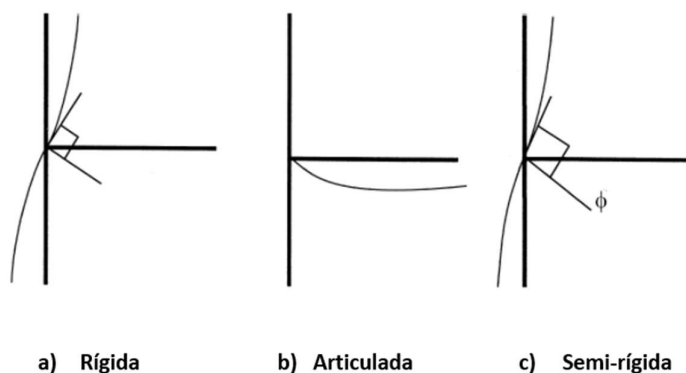
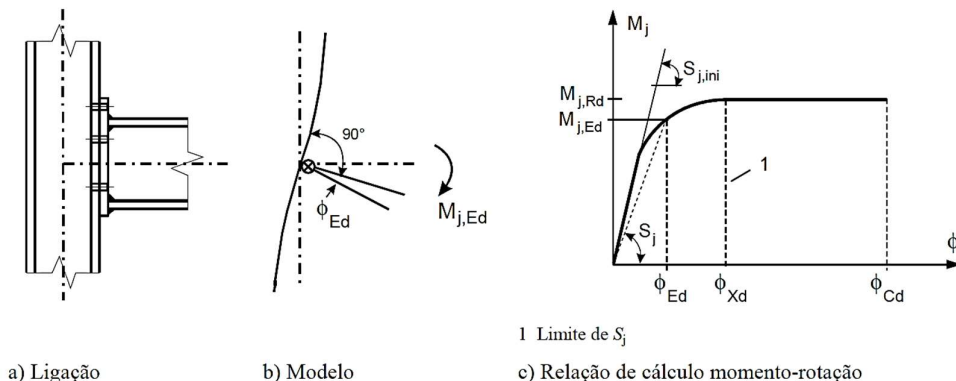


Figura 9 - Ligação rígida, articulada e semi-rígida. Fonte: Rodrigues, 2007.

Quanto à resistência podemos classificar as ligações com resistência total, rotuladas/articuladas ou com resistência parcial. Quando não há transmissão de momentos significativos que possam afetar desfavoravelmente os elementos da estrutura, as ligações são classificadas como articuladas/rotuladas. Quando o momento resistente é pelo menos igual ao momento resistente dos elementos a ligar, as ligações são classificadas como tendo resistência total. Quando as ligações possuem um comportamento intermédio, podendo o momento resistente ser inferior ao dos elementos a ligar, mas igual ou superior ao momento de cálculo atuante, a ligação é classificada como tendo resistência parcial.

2.2.2.3. Ligações estruturais de perfis em H ou em I

O comportamento global de uma ligação é o resultado da interação entre as diversas componentes que a constituem. De acordo com o a NP EN 1993-1-8: 2010, componente é uma parcela de uma ligação que contribui para uma ou mais das suas propriedades estruturais. Uma ligação pode ser representada por uma mola de torção que une os eixos dos elementos ligados no ponto de interseção, como se pode ver na Figura 10 (b). Ao fazer uma análise do comportamento da mola, surge uma relação entre o momento fletor aplicado a uma ligação, $M_{j,Ed}$, e a correspondente rotação entre os elementos ligados, ϕ_{Ed} , como se mostra na Figura 10 (c). Esta relação define a capacidade resistente, a rigidez e a capacidade de rotação de ligações aparafusadas ou soldadas.



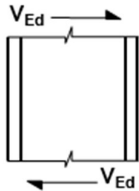
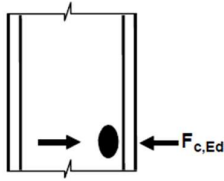
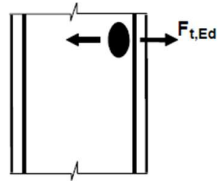
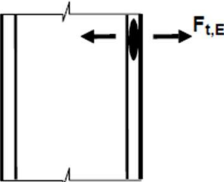
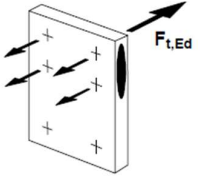
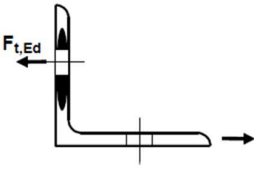
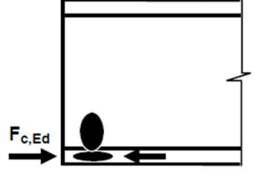
a) Ligação b) Modelo c) Relação de cálculo momento-rotação

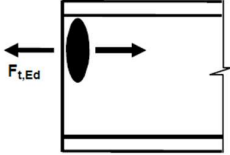
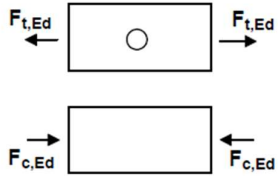
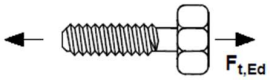
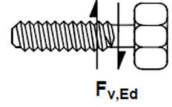
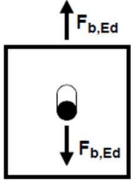
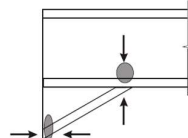
Figura 10 - Relação de cálculo momento-rotação característica de uma ligação. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Numa ligação estrutural com perfis em H ou em I, consideram-se as componentes apresentadas na Tabela 7 para fazer o dimensionamento. As componentes dividem-se por elementos (coluna, viga, chapa de extremidade, parafusos, etc.), e os elementos dividem-se por zonas críticas de esforços (tração, compressão, corte, flexão, esmagamento). Por exemplo, numa ligação viga-coluna com chapa de extremidade, se analisarmos a zona superior da ligação, verifica-se que:

- a alma da coluna estará sujeita a esforços de tração transversal (componente 3 da Tabela 7);
- o banzo da coluna estará sujeito a esforços de flexão (componente 4 da Tabela 7);
- a chapa de extremidade estará sujeita a esforços de flexão (componente 5 na Tabela 7);
- a alma da viga estará sujeita a esforços de tração (componente 8 da Tabela 7);
- os parafusos, localizado nessa zona, também estarão sujeitos a esforços de tração (componente 10 da Tabela 7).

Tabela 7 - Componentes básicos das ligações. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Nº	Componente	Ilustração
1	Painel de alma de coluna solicitado ao corte	
2	Alma de coluna em compressão transversal	
3	Alma de coluna em tração transversal	
4	Banzo de coluna em flexão	
5	Chapa de extremidade em flexão	
6	Cantoneira de banzo em flexão	
7	Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão	

8	Alma de viga à tração	
9	Chapa à tração ou compressão	
10	Parafusos à tração	
11	Parafusos ao corte	
12	Parafusos em esmagamento (no banzo da viga, no banzo da coluna, na chapa de extremidade ou na cantoneira)	
13	Betão à compressão incluindo argamassa de selagem	
14	Chapa de base de coluna em flexão sob a ação de compressão	
15	Chapa de base de coluna em flexão sob a ação de tração	
16	Chumbadouros à tração	
17	Chumbadouros ao corte	
18	Chumbadouros ao esmagamento	
19	Soldaduras	
20	Esquadro de reforço de viga	

A classificação da ligação é condicionada pelo modo de rotura do componente mais fraco, pelo que, durante a aplicação da metodologia de dimensionamento, deve-se evitar que o componente mais fraco seja um componente com um modo de rotura frágil. Os componentes que apresentam um modo de rotura frágil são os parafusos/chumbadouros e o cordão de soldadura, enquanto os restantes componentes apresentam um modo de rotura dúctil (ver Tabela 7).

2.3. Custos de uma estrutura metálica

O processo de execução de uma obra de estrutura metálica é feito essencialmente em três fases, o projeto e detalhe, o fabrico e o transporte e montagem. A primeira fase é o projeto e detalhe, servindo essencialmente para a análise, dimensionamento e cálculo da estrutura, partindo dos requisitos do cliente e das condições do local da construção. Os custos desta fase representam menos de 5% do custo total de uma estrutura metálica (Santos & Silva, 2014). No entanto, esta fase condiciona toda a obra, pelo que um erro feito nesta fase pode desencadear soluções de correção com custos elevados. O projetista deve conhecer bem as especificidades do fabrico e da montagem, de forma a optar por soluções que minimizem os custos dominantes das seguintes etapas do processo (Santos & Silva, 2014). É também na fase de projeção e detalhe que se faz uma análise dos custos das matérias-primas que são necessárias para a execução de uma dada estrutura (perfis, chapas, elementos de revestimento, parafusos).

A segunda fase é o fabrico, que consiste na preparação em fábrica dos elementos que vão constituir a estrutura. É nesta fase que os elementos estruturais são cortados, furados, soldados e pintados. Estas operações são realizadas em fábrica (ambiente controlado) devido à complexidade destes processos. Nesta fase, os custos estão associados aos tempos de corte, armação, soldadura e pintura.

A terceira fase é a de transporte e montagem. A montagem é a operação final no processo de execução da obra, onde se procede à montagem dos elementos estruturais e aparafusamento das ligações. Qualquer erro que tenha sido cometido anteriormente detetado nesta fase. Os custos de transporte dependem do meio de transporte escolhido e da distância entre a fábrica e o local de montagem. Por fim, os custos de montagem dependem da dificuldade e do tipo de obra, pois irá influenciar no tipo e quantidade de equipamentos e também na quantidade de trabalhadores necessários.

O método de cálculo de custos mais comum em estruturas metálicas é o “Cálculo pelo custo por unidade de medida”. Este método parte de um estudo prévio de toda a estrutura e da identificação de todos os elementos estruturais que a constituem. Este processo, apesar de moroso, é bastante preciso visto que se estuda todos os custos (que constituem a construção de um edifício) em detalhe.

3. METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DE CUSTOS

O presente capítulo aborda as metodologias utilizadas neste trabalho, que está dividido em duas fases: (i) estudo e dimensionamento de um conjunto de ligações; (ii) cálculo do custo de cada ligação. A primeira fase do trabalho integra a parte de dimensionamento e cálculo das ligações para as diferentes combinações consideradas, acompanhado de um processo de registo dos parâmetros dimensionais e resultados obtidos para cada uma delas. O dimensionamento, feito no *Robot Structural Analysis*, programa de análise de carga estrutural, verifica a conformidade da metodologia apresentada na NP EN 1993-1-1: 2010 e na NP EN 1993-1-8: 2010. A segunda fase é composta pela aplicação de uma metodologia de cálculo do custo.

A metodologia de dimensionamento segue os princípios de que (i) cada elemento ligado tem de ser capaz de resistir aos esforços atuantes; (ii) a classificação da rigidez da ligação é ditada pelo componente mais fraco. Alguns pressupostos, impostos pela empresa, a ter em conta para a aplicação da metodologia de dimensionamento são:

- Os perfis das secções utilizados para as vigas e para as colunas ser sempre o IPE (perfil em forma de “I”) ou HEA (perfil em forma de “H”), ambos com a geometria semelhante à representada na Figura 11;
- O material das vigas, das colunas, das chapas e dos reforços ser sempre a classe S275 (ver Tabela 3);
- A classe dos parafusos ser sempre 8.8 (ver Tabela 4);

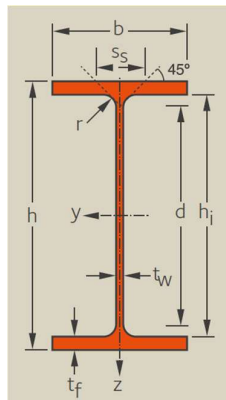


Figura 11 - Dimensões e eixos da secção de um perfil IPE. Fonte: ArcelorMittal, 2021.

Na Figura 11, t_w representa a espessura da alma, t_f representa a espessura do banzo, r representa o raio de concordância, d representa a altura livre da alma, h_i representa a altura total da alma, h representa a altura da secção transversal e b representa a largura da secção transversal.

As formas de ligação aparafusadas estudadas neste trabalho foram: (i) viga-coluna com chapa de extremidade; (ii) viga-viga com chapa de gousset; (iii) viga-viga com chapa de extremidade; (iv) base de coluna.

3.1. Viga – coluna

A ligação viga-coluna estudada inclui uma chapa de extremidade, um esquadro de reforço à viga, e reforços laterais na alma da coluna e na alma da viga, como se pode ver na Figura 12. Na figura, é ainda possível visualizar os esforços aplicados à ligação para a análise do seu comportamento.

Procurou-se que o resultado da classificação fosse sempre ligação rígida e que o componente mais fraco da ligação não fosse um componente com um modo de rotura frágil, ou seja, não fosse nem os parafusos, nem o cordão de soldadura. O método de análise a que se recorreu foi a análise elasto-plástica.

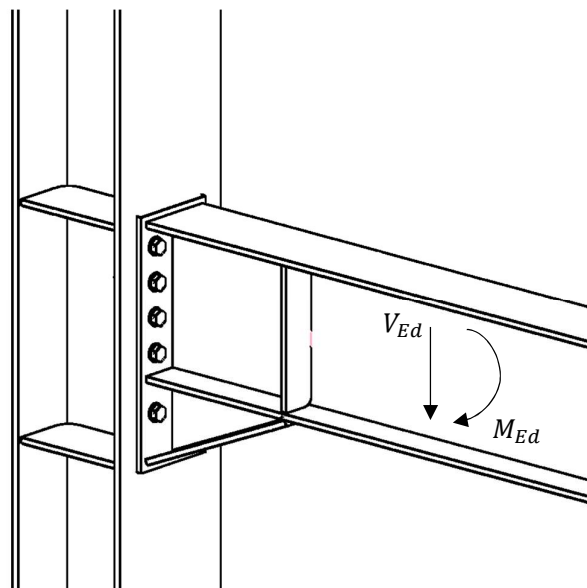


Figura 12 – Ligação viga-coluna com chapa de extremidade.

3.1.1. Resistência da viga pelo regime dos estados limites últimos (ver NP EN1993-1-1: 2010)

3.1.1.1. Esforço transversal (ver cláusula 6.2.6)

A capacidade de resistência da viga ao esforço transversal atuante deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1 \quad (3.1)$$

em que V_{Ed} representa o esforço transversal atuante em cada secção transversal e $V_{c,Rd}$ representa o esforço transversal resistente. Visto que estamos perante o método de análise elasto-plástico, $V_{c,Rd}$ será calculado para o regime plástico, sendo obtido por:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (3.2)$$

onde γ_{M0} representa o coeficiente parcial de segurança (ver Tabela A. 2), e A_v representa a área resistente ao esforço transversal da viga, ou área de corte da viga, e pode ser calculada da seguinte forma:

$$A_v = A - 2 b t_f + (t_w + 2r) t_f \quad (3.3)$$

3.1.1.2. Momento fletor (ver cláusula 6.2.5)

A capacidade de resistência da viga ao momento fletor atuante deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (3.4)$$

em que M_{Ed} representa o momento fletor atuante em cada secção transversal, e $M_{c,Rd}$ representa o momento fletor resistente. Visto que estamos perante o método de análise elasto-plástico e que o perfil da viga está sujeito a flexão pura, $M_{c,Rd}$ é obtido por:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.5)$$

em que W_{pl} representa o módulo de flexão plástico da secção transversal da viga. Como a viga possui reforços transversais (ver Figura 12), o módulo de flexão plástico será maior, e consequentemente o momento fletor resistente irá aumentar.

Os efeitos provocados pela presença de esforço transversal no cálculo do momento fletor resistente poderão ser desprezados caso o esforço transversal seja inferior a metade do

esforço transversal plástico. Caso contrário, o momento fletor resistente plástico deverá ser reduzido de modo a ter em conta os efeitos do esforço transversal (ver cláusula 6.2.8).

Para um perfil I, com secções transversais fletidas em relação ao eixo principal de maior inércia (eixo y-y), o momento fletor resistente plástico reduzido pode ser obtido através da seguinte equação:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho (d t_w)^2}{4 t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.6)$$

em que ρ representa um coeficiente de redução, obtido por:

$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (3.7)$$

No entanto, isto só será válido se o momento fletor resistente plástico reduzido, $M_{y,V,Rd}$, for inferior ao momento fletor resistente plástico, $M_{c,Rd}$. Caso contrário, adota-se o valor de cálculo do momento fletor resistente plástico para efeitos de classificação.

3.1.2. Resistência pelo método das componentes (ver NP EN 1993-1-8: 2010)

3.1.2.1. Peça em T equivalente tracionada (ver cláusula 6.2.4)

O modelo de uma peça em T equivalente tracionada, também designado por modelo T-stub equivalente tracionado, é um modelo de simplificação da ligação. Este modelo é formado por uma série de condições aplicadas exclusivamente à zona da ligação que está a ser tracionada, resultando numa peça em T que equivale à zona do perfil da viga, ou da coluna, que está em tração (ver Figura 13). Recorrendo a este modelo é possível obter o valor da resistência dos seguintes componentes da ligação viga-coluna:

- banzo de coluna em flexão;
- chapa de extremidade em flexão;

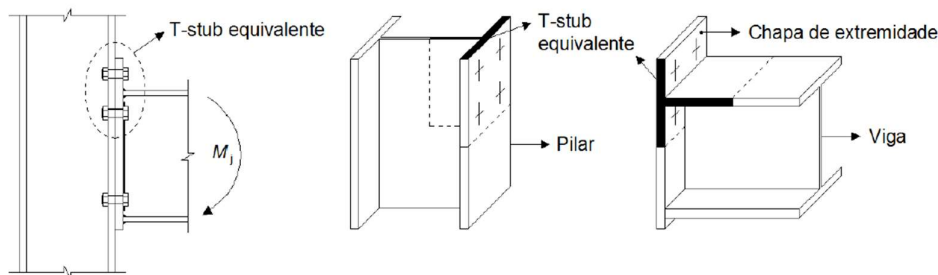


Figura 13 - Modelo T-stub equivalente. Fonte: Vieito, 2015.

A resistência à tração $F_{T,Rd}$, de um banzo de uma peça em T, depende do modo de rotura da ligação. Na Figura 14 apresenta-se as três possibilidades para o modo de rotura, onde P_r representa a resistência à tração de um banzo de uma peça em T e Q representa uma força de alavanca. Como se pode ver na figura, quanto maior for a espessura da ligação (espessura da chapa de extremidade mais a espessura dos banzos) e menor for a resistência dos parafusos, mais frágil será o modo de rotura.

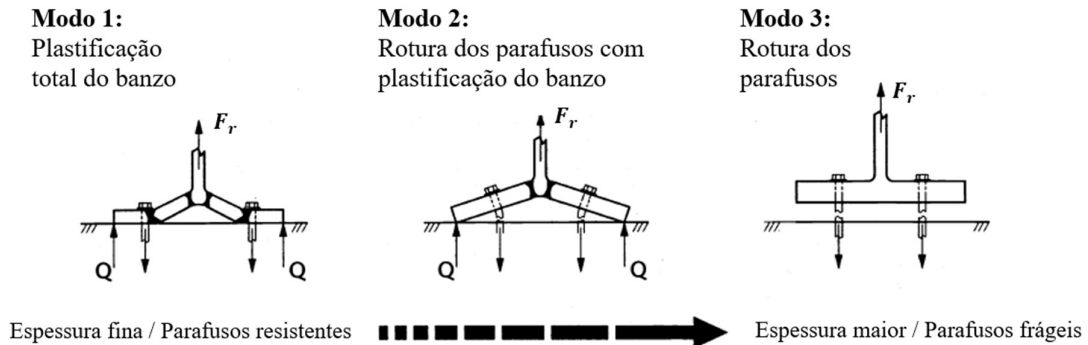


Figura 14 - Modos de rotura de uma peça em T-stub equivalente. Adaptado da fonte: Joints in Steel Construction: Moment Connections, 1995.

Para o modo de rotura 1, a resistência à tração do banzo de uma peça em T, deverá ser determinado em conformidade com a equação (3.8), para a possibilidade de ocorrerem forças de alavanca, ou com a equação (3.9), para a possibilidade de não ocorrerem forças de alavanca.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (3.8)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (3.9)$$

Se $L_b \leq L_b^*$ existe possibilidade de ocorrer forças de alavanca. L_b representa o comprimento do parafuso sujeito a alongamento, considerado igual ao comprimento de aperto (espessura total do material e anilhas), adicionado a metade da soma da altura da cabeça com a altura da porca. L_b^* obtém-se através da seguinte equação:

$$L_b^* = \frac{8,8 m^3 A_s n_b}{\sum l_{eff,1} t_f^3} \quad (3.10)$$

onde $\sum l_{eff,1}$ representa o comprimento total efetivo de uma peça T equivalente aplicado ao modo de rotura 1 (ver Figura 15), e A_s representa a área da secção resistente do parafuso ou do chumbadouro.

O comprimento efetivo é um comprimento teórico e não corresponde necessariamente ao comprimento físico do componente básico da ligação que a peça T equivalente representa. Obtém-se através de equações, consoante o componente em estudo e depende dos modelos de linhas de rotura de parafusos. Nas equações (3.8) e (3.9), $M_{pl,1,Rd}$ representa o momento resistente plástico para o modo de rotura 1, e obtém-se através de:

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.11)$$

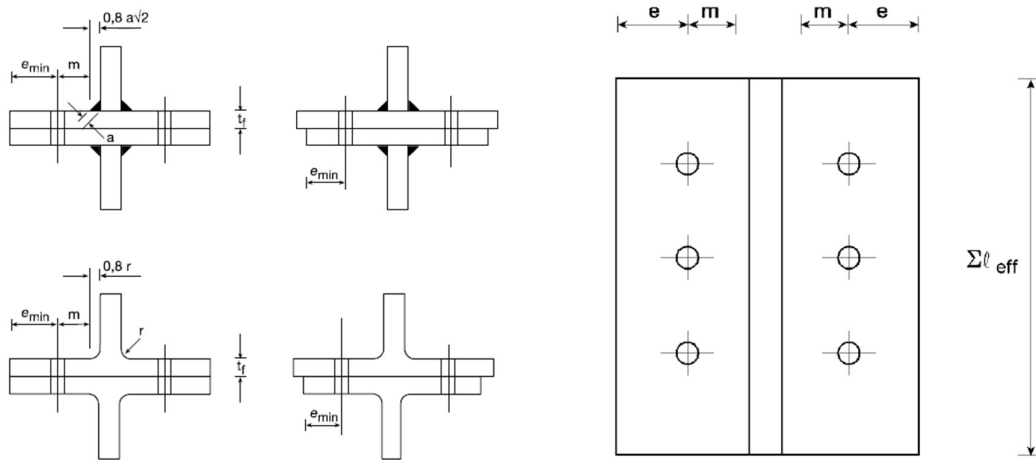


Figura 15 - Dimensões do banzo de uma peça em T equivalente. Fonte: NP EN 1993-1-8:2010.

Para o modo de rotura 2 (ver Figura 14), a resistência à tração do banzo de uma peça em T é dada pela Equação (3.9) no caso de não ocorrerem forças de alavanca. Se ocorrerem forças de alavanca, a resistência à tração do banzo é dada por:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} \quad (3.12)$$

onde $M_{pl,2,Rd}$ representa o momento resistente plástico para o modo de rotura 2, $F_{t,Rd}$ representa a resistência à tração do parafuso (ver Equação (3.34)), e n representa o número de parafusos em tração. $M_{pl,2,Rd}$ obtém-se através de:

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \frac{\sum l_{eff,2} t_f^2 f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.13)$$

em que $\sum l_{eff,2}$ representa o comprimento total efetivo da chapa de extremidade para o modo de rotura 2.

Para o modo de rotura 3 (ver Figura 14), independentemente de haver ou não a possibilidade de ocorrência de forças de alavanca, a resistência à tração do banzo é dada por:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (3.14)$$

Para se obter um comportamento dúctil (comportamento desejável), as ligações devem ser dimensionadas de forma que o modo de rotura condicionante seja o Modo 1, com plastificação total do banzo.

Quando se utiliza este método de uma peça T equivalente, primeiro deve-se ter em conta os diferentes esforços a que cada linha de parafusos em tração está sujeita, e depois a que cada grupo de parafusos estará sujeito. Para compreender melhor este processo, analise-se a Figura 16, que contem uma ligação viga-coluna, com chapa de extremidade e uma linha de parafusos acima do banzo superior da viga. Seguindo a ordem de cálculo:

1. Calcular a resistência à tração na primeira linha de parafusos (linha mais afastada do centro de compressão), e de seguida calcula-se para a segunda linha, terminando com a última linha localizada acima do centro de compressão.
2. A primeira linha corresponde a uma linha de parafusos isolada, ou seja, a resistência à tração desta linha nunca irá depender de um grupo de linhas.
3. Para o cálculo da resistência à tração na chapa de extremidade, o princípio do ponto 2 também se aplica na segunda linha de parafusos. Existe um banzo a fazer uma divisão entre a primeira e a segunda linha, o que impossibilita a formação de um grupo entre elas. Para o cálculo no banzo da coluna em flexão, a segunda linha forma um grupo com a terceira linha, sendo a sua resistência igual à menor resistência da mesma considerada como isolada ou como parte de um grupo.

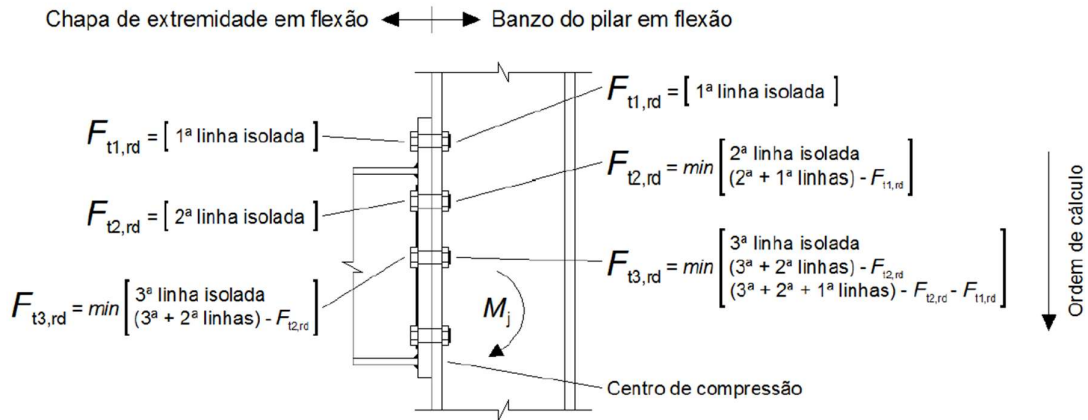


Figura 16 - Ordem de cálculo a seguir para a determinação da resistência à tração de cada linha de parafusos. Fonte: Vieito, 2015.

Ao longo das próximas secções serão indicados os métodos de modelação destes componentes básicos como banzos de uma peça em T equivalente, incluindo os valores a adotar-se para e_{min} , l_{eff} e m .

3.1.2.2. Banzo e alma de coluna (ver cláusulas 6.2.6.1 até à 6.2.6.4)

A capacidade de resistência do painel de alma ao esforço transversal atuante deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{V_{wp,Ed}}{V_{wp,Rd}} \leq 1 \quad (3.15)$$

em que $V_{wp,Ed}$ representa o esforço transversal resultante que atua no painel de alma da coluna e $V_{wp,Rd}$ representa a resistência plástica ao esforço transversal do painel de alma da coluna. Os métodos de cálculo indicados na presente secção, são válidos se a esbelteza da alma da coluna respeitar a seguinte condição:

$$\frac{d}{t_w} \leq 69 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.16)$$

Para modelar a deformabilidade de uma ligação deverá ter-se em conta a combinação de todos os esforços a que esta está sujeita (ver Figura 17). O esforço transversal resultante que atua no painel de alma da coluna, resulta da combinação de todos os esforços que atuam na ligação, dado por:

$$V_{wp,Ed} = \frac{M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}}{z} - \frac{V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed}}{2} \quad (3.17)$$

em que z representa o braço do binário. Este pode ser determinado de acordo com as indicações da Tabela A. 1.

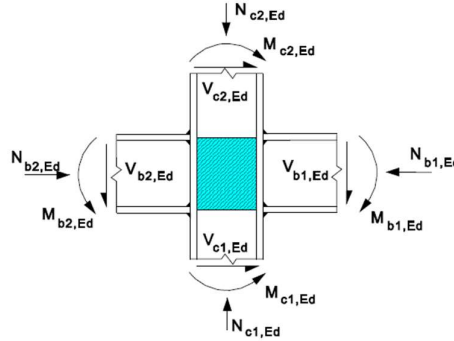


Figura 17 - Esforços atuantes numa ligação viga-pilar. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

A resistência plástica ao esforço transversal do painel de alma da coluna pode ser obtida através de:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 f_y A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (3.18)$$

em que A_{vc} representa a área resistente ao esforço transversal da coluna, ou área de corte da coluna definida na Equação (3.3).

No caso de haver reforços transversais à alma na zona comprimida e na zona tracionada, $V_{wp,Rd}$ poderá ser aumentado. O valor adicional correspondente à resistência que os reforços conferem ao painel de alma, o qual pode ser obtido por:

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4 M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \quad (3.19)$$

onde d_s representa a distância entre os eixos dos reforços e $M_{pl,fc,Rd}$ representa o momento resistente plástico de um banzo de coluna. No entanto, deve-se respeitar a seguinte relação:

$$V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2 M_{pl,fc,Rd} + 2 M_{pl,st,Rd}}{d_s} \quad (3.20)$$

onde $M_{pl,st,Rd}$ representa o momento resistente plástico de um reforço.

A resistência da alma uma coluna, não reforçada, solicitada a uma compressão transversal deverá ser determinado com base nas seguintes equações:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (3.21)$$

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (3.22)$$

em que ω representa o coeficiente de redução para ter em conta eventuais efeitos de interação com o esforço transversal no painel de alma da coluna, k_{wc} representa o coeficiente de redução para ter em conta os efeitos da tensão de compressão longitudinal na alma, $b_{eff,c,wc}$ representa a largura efetiva da alma comprimida da coluna, ρ representa o coeficiente de redução para o enfunamento da chapa, e γ_{M1} representa o coeficiente de segurança a fenómenos de encurvadura.

O coeficiente de redução ω depende do parâmetro de transformação β (ver Tabela A.3). Para esta situação $\beta = 1$, então o coeficiente de redução ω obtém-se da seguinte forma:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc} t_{wc}/A_{vc})^2}} \quad (3.23)$$

Quanto ao coeficiente k_{wc} , este depende da tensão de compressão longitudinal máxima na alma do pilar e obtém-se através das seguintes relações:

$$- \text{ Se } \sigma_{comp,Ed} \leq 0,7f_y : k_{wc} = 1 \quad (3.24a)$$

$$- \text{ Se } \sigma_{comp,Ed} > 0,7f_y : k_{wc} = 1,7 - \sigma_{comp,Ed}/f_y \quad (3.24b)$$

onde a tensão de compressão longitudinal $\sigma_{comp,Ed}$ da peça obtém-se por:

$$\sigma_{comp,Ed} = \frac{N_{c,Ed}}{A} + \frac{M_{c,Ed}}{W_{el,y,c}} \quad (3.25)$$

em que, $N_{c,Ed}$ representa o esforço axial atuante na coluna, $M_{c,Ed}$ representa o momento fletor atuante na coluna, A a área do perfil da coluna, e $W_{el,y,c}$ representa o módulo de flexão elástico da coluna em torno do eixo y-y.

Para uma ligação aparafusada com chapa de extremidade, a largura efetiva da alma comprimida da coluna pode ser obtida por:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2} a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (3.26)$$

em que a_p representa o tamanho do cordão de soldadura do banzo da viga à chapa de extremidade, s representa o raio de concordância do perfil da coluna e s_p representa a espessura da chapa de extremidade.

Finalmente, o coeficiente de redução ρ pode ser obtido de acordo com as seguintes relações:

$$- \text{ Se } \bar{\lambda}_p \leq 0,72 : \rho = 1 \quad (3.27a)$$

$$- \text{ Se } \bar{\lambda}_p > 0,72 : \rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2)/\bar{\lambda}_p^2 \quad (3.27b)$$

em que $\bar{\lambda}_p$ representa a esbelteza da chapa e pode ser obtida por:

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} (h_c - 2(t_{fc} + r_c)) f_y}{E t_{wc}^2}} \quad (3.28)$$

A resistência da alma de uma coluna, não reforçada, sujeita a uma tração transversal deverá ser obtida pela seguinte equação:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.29)$$

em que $b_{eff,t,wc}$ representa a largura efetiva da alma tracionada da coluna. Para uma ligação aparafusada, a largura efetiva da alma tracionada da coluna deve ser considerada igual ao comprimento efetivo da peça em T equivalente que representa o banzo da coluna.

O coeficiente de redução ω deverá ser determinado com a Equação (3.23), utilizando o valor de $b_{eff,t,wc}$.

Para um banzo de coluna reforçado com uma chapa de extremidade aparafusada, a resistência e o modo de rotura do banzo, sujeito a flexão transversal, deverão ser calculados através do modelo peça T-stub equivalente, já abordado na secção 3.1.2.1. O modelo deve ser aplicado para:

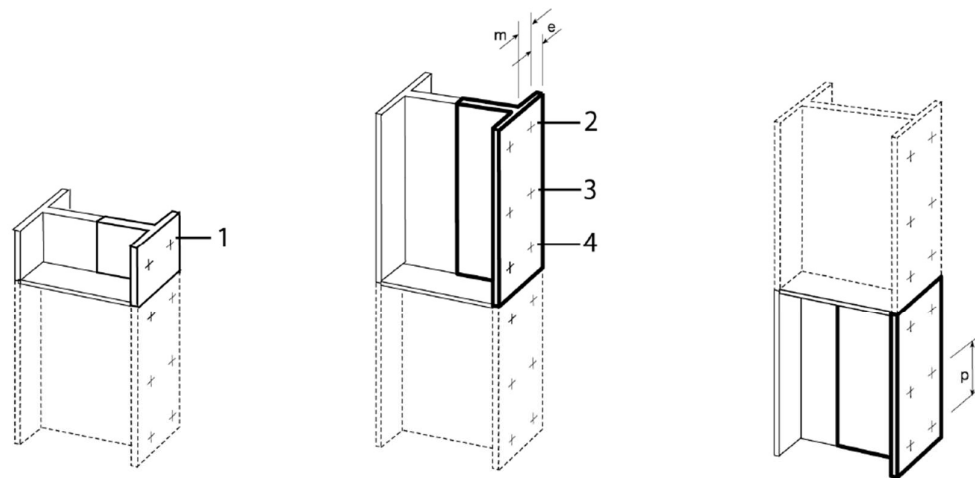
- cada linha isolada de parafusos que tenha de resistir à tração;
- cada grupo de linhas de parafusos que tenha de resistir à tração.

O comprimento efetivo do banzo de uma peça T equivalente, l_{eff} , é determinado de acordo com a Tabela 8.

Na Tabela 8, e_1 representa a distância entre os centros dos parafusos da última linha e o reforço adjacente da banzo da coluna, medida na direção do eixo da coluna, e representa a distância entre o centro do parafuso e a extremidade do banzo (ver Figura 18), p representa a distancia entre os centros dos parafusos na vertical (ver Figura 18), e α determina-se através do diagrama apresentado na Figura A. 1.

Tabela 8 - Comprimentos efetivos para o banzo reforçado de uma coluna. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada isoladamente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de linhas	
	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
Linha de parafusos adjacente a um reforço	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Outra linha de parafusos interior	$2\pi m$	$4m + 1,25e_1$	$2p$	p
Outra linha de parafusos, de extremidade	O menor dos valores: i) $2\pi m$ ii) $\pi m + 2e_1$	O menor dos valores: i) $4m + 1,25e$ ii) $2m + 0,625e + e_1$	O menor dos valores: i) $\pi m + p$ ii) $2e_1 + p$	O menor dos valores: i) $2m + 0,625e + 0,5p$ ii) $e_1 + 0,5p$
Linha de parafusos de extremidade adjacente a um reforço	O menor dos valores: i) $2\pi m$ ii) $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	Não aplicável	Não aplicável
Para o Modo 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ mas $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Para o Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	



Legenda:

- 1 Linha de parafusos de extremidade adjacente a um reforço
- 2 Linha de parafusos de extremidade
- 3 Linha de parafusos interior
- 4 Linha de parafusos adjacente a um reforço

Figura 18 - Modelação de um banzo de coluna reforçado sob a forma de peças em T separadas. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

3.1.2.3. Chapa de extremidade sujeita à flexão (ver cláusula 6.2.6.5)

Para uma chapa de extremidade aparafusada, sem uma linha de parafusos numa parte saliente do banzo tracionado da viga, a resistência e o modo de rotura da chapa, sujeita a flexão transversal, deverão ser calculados através do modelo peça T-stub equivalente.

O comprimento efetivo do banzo de uma peça T equivalente, l_{eff} , é determinado de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Comprimentos efetivos de uma chapa de extremidade. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Localização da linha de parafusos	Linha de parafusos considerada isoladamente		Linha de parafusos considerada como parte de um grupo de linhas	
	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$	Com troços circulares $l_{eff,cp}$	Sem troços circulares $l_{eff,nc}$
Linha de parafusos interior	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Linha de parafusos, de extremidade	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,54p$
Para o Modo 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mas $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ mas $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Para o Modo 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

3.1.2.4. Banzo e alma de viga (ver cláusulas 6.2.6.7 e 6.2.6.8)

A resistência à compressão do banzo e da alma de viga combinados é determinado por:

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{(h - t_{fb})} \quad (3.30)$$

em que h representa a distância entre os centroides dos banzos. Neste caso, h será a distância entre o centroide do banzo superior da viga de perfil I, e o centroide do banzo inferior do esquadro de perfil T. Como a viga é reforçada com um esquadro (ver Figura 12), a resistência à compressão da alma de viga também deverá ser determinada de acordo com as equações (3.21) e (3.22) (ver cláusula 6.2.6.2 da NP EN 1993-1-8: 2010).

A resistência à tração da alma de viga, de uma ligação aparafusada com chapa de extremidade, obtém-se através da seguinte equação:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.31)$$

em que $b_{eff,t,wb}$ representa a largura efetiva da alma tracionada da viga. Para uma ligação aparafusada, a largura efetiva da alma tracionada da viga é igual ao comprimento efetivo da peça em T equivalente que representa a chapa de extremidade sujeita à flexão.

3.1.2.5. Parafusos (ver cláusula 3.6)

O espaçamento mínimo entre os parafusos deve respeitar as indicações da Tabela 10. Na tabela, d_0 representa o diâmetro do furo, e as distâncias e_1 , e_2 , p_1 e p_2 estão representadas na Figura 19.

Tabela 10 - Espaçamento dos parafusos. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Distâncias e entre eixos	Mínimo
Distância à extremidade e_1	$1,2d_0$
Distância ao bordo lateral e_2	$1,2d_0$
Distância entre eixos p_1	$2,2d_0$
Distância entre eixos p_2	$2,4d_0$

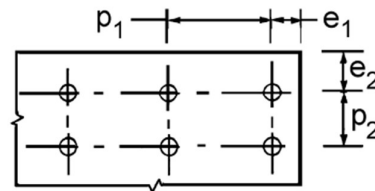


Figura 19 - Nomenclatura utilizada no afastamento dos parafusos. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Para a ligação em estudo não existiu necessidade de empregar qualquer tipo de pré-esforço nos parafusos, pois considerou-se que esta estará sujeita a solicitações estáticas.

Para garantir que uma ligação apresenta resistência ao esmagamento, o esforço transversal no estado limite último $F_{v,Ed}$, a que cada parafuso está sujeito, não deverá exceder a resistência ao corte $F_{v,Rd}$, nem a resistência ao esmagamento $F_{b,Rd}$:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \tag{3.32}$$

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \tag{3.33}$$

em que α_v é uma constante que depende da classe do parafuso e do plano de corte (para este caso $\alpha_v = 0,6$), f_{ub} é a tensão de rotura do parafuso (ver Tabela 4), e A é a área do plano de corte do parafuso. Em relação à resistência ao esmagamento do parafuso, k_1 e α_b determinam-se a partir das indicações da Tabela A. 4, f_u representa a tensão de rotura no

estado limite último das superfícies ligadas (ver Tabela 3), d representa diâmetro nominal do parafuso, e t representa a espessura dos elementos ligados.

De forma a garantir que uma ligação não pré-esforçada apresenta resistência à tração, o esforço de tração no estado limite último $F_{t,Ed}$ a que cada parafuso está sujeito, não deverá exceder a resistência à tração $F_{t,Rd}$, nem a resistência ao punçoamento, $B_{p,Rd}$:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (3.34)$$

$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.35)$$

em que k_2 é uma constante (neste caso $k_2 = 0,9$), e A_s representa a área de secção resistente do parafuso. No caso da resistência ao punçoamento do parafuso, d_m representa o diâmetro médio da parte roscada do parafuso, e t_p representa a espessura da chapa.

Por fim, de modo a garantir que a ligação tem a capacidade de resistir à combinação de corte com tração, deve-se verificar a seguinte condição:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.36)$$

3.1.2.6. Cordão de soldadura (ver cláusula 4.5)

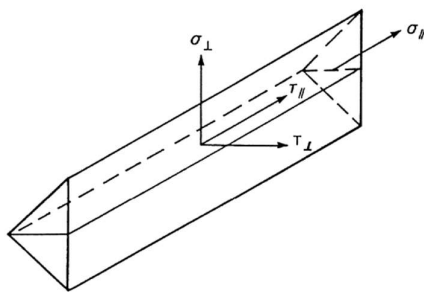
A resistência do cordão de soldadura pode ser determinada a partir de dois métodos: (i) método direcional; (ii) método simplificado. O método adotado neste trabalho foi o método direcional, que consiste na decomposição dos esforços nas soldaduras em componentes paralelas e transversais ao eixo longitudinal da soldadura e, posteriormente, nos componentes perpendiculares e transversais ao plano que define a espessura do cordão.

As características geométricas do cordão de soldadura encontram-se descritas na Tabela 11.

Tabela 11 - Geometria do cordão de soldadura.

Espessura máxima	$a_{m\acute{a}x} = 0,7 \times (\text{menor espessura dos elementos ligados})$
Espessura mínima	$a_{m\acute{i}n} = 3$
Comprimento mínimo	$l_{m\acute{i}n} = \text{m}\acute{a}x[30 \text{ mm}; 6a]$
Comprimento efetivo	$l_{eff} = l - 2a$
Área efetiva	$A_w = \sum a l_{eff}$

Admitindo que a distribuição de tensões no cordão de soldadura é uniforme, consideram-se as tensões normais e tensões de corte apresentadas na Figura 20 para a aplicação do método simplificado.



σ_{\perp} → Tensão normal perpendicular à espessura;
 σ_{\parallel} → Tensão normal paralela ao eixo da soldadura;
 τ_{\perp} → Tensão de corte (no plano da espessura) perpendicular ao eixo da soldadura;
 τ_{\parallel} → Tensão de corte (no plano da espessura) paralela ao eixo da soldadura.

Figura 20 - Tensões no plano que define um cordão de soldadura. Fonte: Vieito, 2015.

Considera-se que a resistência do cordão de soldadura é suficiente se forem respeitadas simultaneamente as seguintes condições:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_W \gamma_{M2}} \quad (3.37)$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.38)$$

em que f_u representa o valor nominal da tensão de rotura à tração da peça ligada mais fraca, e β_W representa o fator de correlação que depende da classe do aço (para um aço S275, $\beta_W = 0,85$).

3.1.2.7. Momento resistente de ligações viga-coluna (ver cláusula 6.2.7.2)

Como já referido, a razão entre o momento aplicado e o momento resistente de uma ligação deverá ser inferior a 1. Para esta condição, em ligações viga-coluna com chapa de

extremidade, o momento resistente geral do conjunto que compõe a ligação, pode ser determinado a partir de:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (3.39)$$

em que r representa o número da linha de parafusos, h_r representa a distância entre a linha de parafusos r e o centro de compressão, e $F_{tr,Rd}$ representa a resistência à tração efetiva da linha de parafusos r .

A resistência à tração efetiva $F_{tr,Rd}$ da linha de parafusos r , considerada como uma linha isolada, deve ser igual à menor resistência à tração, para uma linha isolada de parafusos dos seguintes componentes básicos:

- alma da coluna sujeita à tração $F_{t,wc,Rd}$;
- banzo da coluna em flexão $F_{t,fc,Rd}$;
- chapa de extremidade sujeita à flexão $F_{t,ep,Rd}$;
- alma da viga sujeita à tração $F_{t,wb,Rd}$.

3.1.3. Rigidez de rotação (ver cláusula 6.3 da NP EN1993-1-8:2010)

A rigidez de rotação de uma ligação é determinada com base no comportamento dos seus componentes básicos. Cada componente possui uma determinada rigidez, que é representada por um coeficiente de rigidez elástica, k_i .

Os componentes básicos a considerar no cálculo da rigidez depende do tipo de ligação e do número de parafusos em tração. Para uma ligação viga-coluna com chapa de extremidade e esquadro de reforço, haverá sempre duas ou mais linhas de parafusos tracionados, pelo que, a rigidez da ligação determina-se através de:

$$S_j = \frac{E z_{eq}^2}{\mu \sum_i \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)} \quad (3.40)$$

em que z_{eq} representa o braço binário equivalente, μ representa a relação de rigidez $S_{j,ini}/S_j$, k_1 representa o coeficiente de rigidez elástica do painel de alma da coluna solicitado ao corte, k_2 representa o coeficiente de rigidez elástica da alma da coluna comprimida, e k_{eq} representa o coeficiente de rigidez elástica equivalente.

A relação de rigidez μ é determinada do seguinte modo:

$$- \text{ Se } M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd} : \mu = 1 \quad (3.41a)$$

$$- \text{ Se } 2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd} : \mu = (1,5 M_{j,Ed}/M_{j,Rd})^\psi \quad (3.41b)$$

em que o coeficiente ψ depende do tipo de ligação (neste caso, $\psi = 2,7$).

O braço binário equivalente z_{eq} determina-se a partir de:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (3.42)$$

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (3.43)$$

em que $k_{eff,r}$ representa o coeficiente de rigidez efetiva da linha r, o qual pode ser determinado por:

em que $k_{i,r}$ é o coeficiente de rigidez do componente i relativo à linha r. Por fim, os coeficientes de rigidez elástica presentes na Equação ((3.40)) determinam-se a partir das seguintes equações:

$$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z} \quad (3.44)$$

$$k_2 = \frac{0,7b_{eff,c}w_c t_{wc}}{d_c} \quad (3.45)$$

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (3.46)$$

Para este caso, o coeficiente de rigidez elástica equivalente k_{eq} é baseado no coeficiente de rigidez elástica relativo à alma da coluna tracionada k_3 , no coeficiente de rigidez elástica relativo ao banzo da coluna em flexão k_4 , no coeficiente de rigidez elástica relativo à chapa de extremidade em flexão k_5 , e no coeficiente de rigidez elástica relativo aos parafusos tracionados k_{10} . As equações destes coeficientes estão apresentadas na Tabela A. 5.

3.1.4. Capacidade de rotação (ver cláusula 6.4 da NP EN1993-1-8:2010)

Para uma análise global rígido-plástica, não é necessário verificar a capacidade de uma ligação se a seguinte relação for válida:

$$M_{j,Rd} \geq 1,2M_{pl,Rd} \quad (3.47)$$

em que $M_{j,Rd}$ representa o momento resistente da ligação, e $M_{pl,Rd}$ o momento plástico resistente da secção transversal do elemento ligado.

Como alternativa, existe um método de verificação que só será válido se as classes do aço forem S 235, S 275 e S355 e para as ligações nas quais o esforço normal N_{Ed} , no elemento ligado não excede 5% do valor da resistência plástica $N_{pl,Rd}$ da sua secção transversal. O método de verificação é dividido em três condições:

1. Numa ligação viga-coluna, em que o seu momento resistente $M_{j,Rd}$ é condicionado pela resistência do painel de alma da coluna solicitado ao corte, pode-se considerar que a ligação possui uma capacidade de rotação adequada a uma análise global plástica se a condição (3.16) se verificar.
2. Uma ligação com chapa de extremidade tem uma capacidade de rotação suficiente para uma análise plástica se o momento resistente da ligação $M_{j,Rd}$ for condicionado pela resistência à flexão do banzo da coluna, ou pela resistência à flexão da chapa de extremidade da viga. Ainda para este tipo de ligações, deve-se verificar a condição (3.48).
3. Uma ligação aparafusada na qual o momento resistente $M_{j,Rd}$ é condicionado pela resistência dos seus parafusos solicitados ao corte, não deve ser considerada como tendo uma capacidade de rotação suficiente para a análise global plástica.

$$t_p \geq 0,36d \sqrt{f_{ub}/f_y} \quad (3.48)$$

3.2. Viga – viga

3.2.1. Viga – viga com chapa de *gousset*

Uma ligação viga-viga com chapa de *gousset* consiste numa placa soldada à alma da viga de suporte e aparafusada à alma de uma viga suportada, como se pode ver na Figura 21. Este tipo de ligação é classificado como articulada, pelo que não deverá absorver momento, servindo essencialmente para resistir a esforços transversos. O método de análise a que se recorreu foi a análise elasto-plástica.

Na prática, a ligação absorve alguns momentos residuais, e como tal há certas medidas que se devem adotar de maneira a diminuir esses momentos, tais como: (i) a chapa deve ser posicionada o mais acima possível; (ii) o banzo da viga suportada nunca deverá tocar no perfil da viga de suporte; (iii) sempre que possível, utilizar apenas uma fila vertical de parafusos.

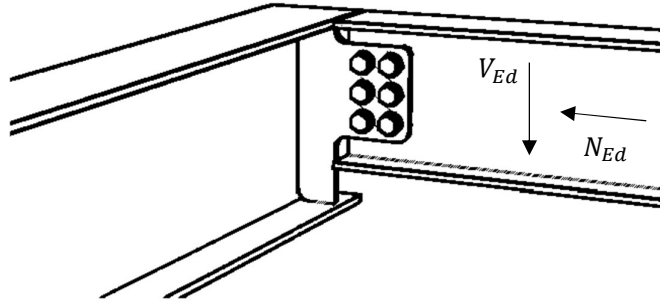


Figura 21 - Ligação viga-viga com chapa de gousset.

De forma a garantir que não ocorre rotura dos parafusos, deve-se verificar as seguintes relações:

$$F_{Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (3.49)$$

$$F_{x,Ed} \leq F_{x,b,Rd} \quad (3.50)$$

$$F_{z,Ed} \leq F_{z,b,Rd} \quad (3.51)$$

Na relação (3.49), F_{Ed} representa o esforço transversal resultante a que cada parafuso estará sujeito. Este valor surge da combinação do momento fletor residual com o esforço transversal atuante na vida. Nas relações (3.50) e (3.51), $F_{x,Ed}$ e $F_{z,Ed}$ representam o esforço transversal resultante por parafuso decomposto na direção do eixo x-x e do eixo z-z. $F_{x,b,Rd}$ e $F_{z,b,Rd}$ representam a resistência ao esmagamento decomposta na direção do eixo x-x e o eixo z-z, sendo calculados através da equação (3.33) aplicada à menor espessura dos elementos ligados.

O momento fletor residual obtém-se através da equação:

$$M_0 = eV_{b,Ed} \quad (3.52)$$

em que e representa a distância entre o eixo de centro da viga de suporte e o centro geométrico do grupo de parafusos.

Nas secções de ligação ou chapas de ligação pode verificar-se uma redução da resistência, devido à redução da área da secção e concentração de tensões junto aos furos.

Os furos das ligações na chapa e na alma da viga poderão ser ignorados desde que se verifique a seguinte condição para ambas:

$$\frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.53)$$

em que A_{net} representa a área da zona de tensão útil da secção bruta, e A representa a área da zona de tensão da secção bruta. A área útil de uma secção transversal deverá ser igual à sua área bruta deduzida de todas as parcelas relativas a furos e a outras aberturas. Para a geometria utilizada no tipo de ligações estudadas nesta secção pode-se considerar:

$$A_{net} = A - ntd_0 \quad (3.54)$$

Quando não se verifica a condição (3.53), deverá fazer-se a verificação das condições:

$$M_0 \leq M_{c,Rd} \quad (3.55)$$

$$V_{b,Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad (3.56)$$

usando as equações (3.5) para $M_{c,Rd}$ e (3.2) para $V_{pl,Rd}$, adaptadas à zona de tensão útil da secção bruta.

A resistência relativa à rotura em bloco é determinada pela interação entre dois mecanismos de falha possíveis: cedência por corte combinada com rotura por tração ou rotura por corte combinada com cedência por tração (Simões Da Silva & Santiago, 2003). Na Figura 22 é possível visualizar um exemplo da linha de rotura, que é a linha que separa a zona a sombreado da restante peça.

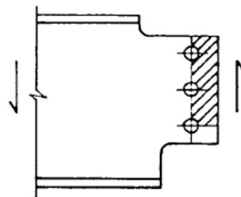


Figura 22 - Exemplo de rotura por bloco. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Para um grupo de parafusos sujeito a um carregamento excêntrico, como um esforço transversal atuante $V_{b,Ed}$, deve-se verificar a seguinte relação por forma a garantir que não haja rotura em bloco:

$$V_{b,Ed} \leq V_{eff,2,Rd} \quad (3.57)$$

em que $V_{eff,2,Rd}$ representa a resistência ao destacamento em bloco, obtido por:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{(1/\sqrt{3})f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (3.58)$$

em que A_{nt} representa a área útil solicitada à tração, e A_{nv} representa a área útil solicitada ao corte.

Para um grupo de parafusos simétricos sujeito a um carregamento centrado, como um esforço axial atuante $N_{b,Ed}$, deve-se verificar a seguinte relação por forma a garantir que não haja rotura em bloco:

$$N_{b,Ed} \leq V_{eff,1,Rd} \quad (3.59)$$

em que $V_{eff,1,Rd}$ representa a resistência ao destacamento em bloco, obtida por:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{(1/\sqrt{3})f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (3.60)$$

3.2.2. Viga – viga com chapa de extremidade e esquadro de reforço

Este tipo de ligação é também designado por ligação de continuidade de viga, contendo duas chapas de extremidade soldadas aos perfis das vigas. Estas chapas são aparafusadas uma à outra e a ligação ainda possui um esquadro de reforço em cada viga, como se pode ver na Figura 23. Na figura, é ainda possível visualizar os esforços aplicados à ligação para a análise do seu comportamento.

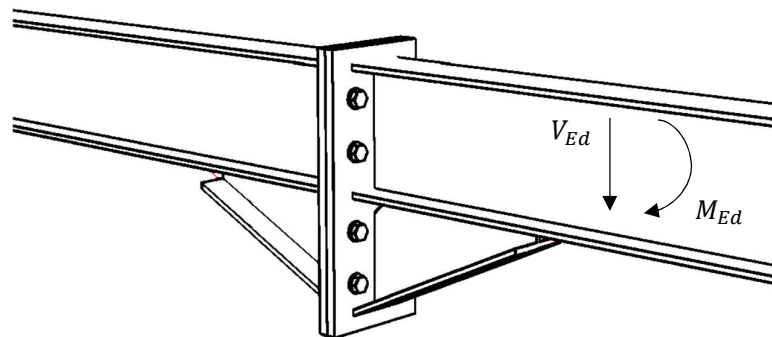


Figura 23 - Ligação viga-viga com chapa de extremidade.

Procurou-se que o resultado da classificação fosse sempre ligação rígida e que o componente mais fraco da ligação não fosse um componente com um modo de rotura frágil, ou seja, não fosse nem os parafusos, nem o cordão de soldadura. O método de análise a que se recorreu foi a análise elasto-plástica.

Este tipo de ligação apresenta um comportamento muito semelhante ao comportamento observado na ligação viga-coluna (secção 3.1). Portanto, o programa *Robot Structural Analysis* adota o mesmo método de dimensionamento e análise de comportamento para a ligação viga-coluna e para esta ligação, sofrendo pequenas alterações que se adequem ao facto de serem entre vigas em vez de entre uma coluna e uma viga.

Os métodos descritos na secção 3.1.1, 3.1.2 e na 3.1.4 aplicam-se a este tipo de ligações, no entanto omite-se os aspetos que se referem à coluna. Na secção 3.1.3, existem algumas alterações significativas a fazer. A equação para o cálculo da rigidez da ligação passa a ser:

$$S_j = \frac{Ez_{eq}^2}{\mu \sum_i \left(\frac{1}{k_{eq}} \right)} \quad (3.61)$$

sendo que o coeficiente de rigidez elástica equivalente k_{eq} , para esta ligação, é baseado apenas no coeficiente de rigidez elástica relativo às chapas de extremidade em flexão k_5 , e no coeficiente de rigidez elástica relativo aos parafusos tracionados k_{10} .

3.3. Base de Coluna

Na Figura 24 está representada um exemplo de uma ligação de base de coluna e os esforços aplicados à ligação para a análise do seu comportamento. Procurou-se fazer o dimensionamento desta ligação numa análise elasto-plástica, pois foi imposto que seria sempre articulada. A seleção da combinação de esforço axial em tração com esforço transversal deveu-se ao facto de ser a situação mais crítica que este tipo de ligações poderá estar sujeito.

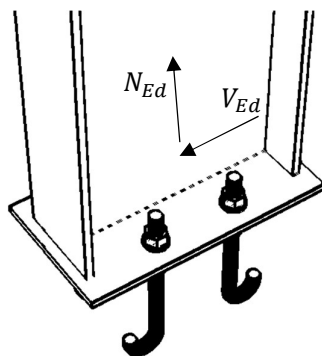


Figura 24 - Base de coluna.

A resistência ao esforço transversal entre a chapa de base e o seu apoio deverá ser garantida por um dos seguintes métodos:

- resistência por atrito na superfície de contacto entre a chapa de base e o seu apoio, adicionada à resistência ao esforço transversal dos chumbadouros;
- resistência ao esforço transversal das zonas da fundação envolventes.

Como se utilizam chumbadouros para assegurar a transmissão de esforços cortantes entre a chapa de base e o seu apoio, deverá também verificar-se se há possibilidade de rotura do betão por esmagamento, de acordo com a EN 1992.

A resistência ao esforço transversal de um chumbadouro é dada por:

$$F_{vb,Rd} = \min (F_{1,vb,Rd}; F_{2,vb,Rd}) \quad (3.62)$$

em que $F_{1,vb,Rd}$ representa a resistência ao esmagamento do chumbadouro, obtida através da equação (3.33), e $F_{2,vb,Rd}$ representa a resistência ao corte do chumbadouro, dada por:

$$F_{2,vb,Rd} = \frac{\alpha_{bc} f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (3.63)$$

em que f_{ub} representa a tensão de rotura do chumbadouro, A_s representa a área de secção resistente do chumbadouro, e α_{bc} representa o coeficiente de resistência, dado por:

$$\alpha_{bc} = 0,44 - 0,0003 f_{yb} \quad (3.64)$$

em que f_{yb} representa a tensão de cedência do chumbadouro.

Assim, a resistência ao esforço transversal entre uma chapa de base de uma coluna e uma camada de argamassa determina-se do seguinte modo:

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} + n F_{vb,Rd} \quad (3.65)$$

onde $F_{f,Rd}$ representa a resistência à força de atrito da chapa de base.

Nas chapas de base, se não forem colocados quaisquer elementos específicos para assegurar a resistência ao esforço transversal, tais como conectores rígidos ou pernos de cabeça, deverá demonstrar-se que a soma da força de atrito da chapa de base com a resistência ao corte dos chumbadouros é suficiente para transmitir o esforço transversal aplicado. No entanto, como a coluna é solicitada por um esforço normal de tração, considera-se que a força de atrito da chapa de base é nula.

De forma a garantir que a ligação está corretamente dimensionada, deve-se verificar a seguinte relação:

$$V_{Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (3.66)$$

A resistência do chumbadouro deverá ser considerada igual ao menor dos valores de cálculo da resistência à tração do chumbadouro, e da resistência ao escorregamento entre o betão e o chumbadouro, de acordo com a EN 1992-1-1. O valor de cálculo da resistência à tração do chumbadouro resulta da multiplicação de 0,85 pelo valor obtido através da equação (3.34).

Na análise da resistência e do modo de rotura da chapa de base deve-se ter em consideração diferentes tipos de falha, como a resistência dos parafusos e a resistência da placa contra efeitos de alavanca.

A resistência à tração de uma chapa de base sujeita a um esforço axial pode ser determinada por zonas. Divide-se a ligação em duas zonas de tração, passando a ter duas peças em T. Para situações de tensão pura, assume-se que a resistência em ambas as zonas é a mesma (ligação com geometria simétrica). Usando este método, a resistência à tração em cada zona será igual ao menor valor de cálculo das resistências dos seguintes componentes básicos:

- alma da coluna tracionada sob o banzo da respetiva zona da coluna, $F_{t,wc,Rd}$;
- chapa de base sujeita à flexão sob o banzo da respetiva zona da coluna, $F_{t,pl,Rd}$.

A primeira condição mencionada não se aplica quando os chumbadores estão posicionados fora do perfil, pois eles não exercerão tensão diretamente na alma da peça. Assim, assume-se que a capacidade de ligação contra a tensão é:

$$N_{j,Rd} = 2 * \min (F_{t,wc,Rd}; F_{t,pl,Rd}) \quad (3.67)$$

uma vez que somamos dois valores iguais.

A resistência da alma tracionada da coluna $F_{t,wc,Rd}$, determina-se seguindo as orientações apresentadas na secção 3.1.2.2. A resistência de uma chapa de base sujeita à flexão por efeito da tração, $F_{t,pl,Rd}$, poderá ser determinada seguindo as orientações apresentadas na secção 3.1.2.3, que por sua vez estão associadas às orientações da secção 3.1.2.1.

De notar que para este tipo de ligação deve-se calcular a resistência do banzo da peça em T equivalente para os três modos de rotura. A resistência da chapa de base $F_{t,pl,Rd}$ será igual à menor resistência obtida nos três modos de rotura.

Na relação de verificação de ocorrerem forças de alavanca, $L_b \leq L_b^*$, L_b passa a representar o comprimento do chumbadouro sujeito a alongamento, considerado igual à soma de 8 vezes o diâmetro nominal da rosca do chumbadouro com as espessuras da camada de argamassa de selagem, da chapa, da anilha e, ainda, com metade da altura da porca.

Para a verificação da resistência dos cordões de soldadura, aplicam-se os métodos descritos na secção 3.1.2.6.

3.4. Método de cálculo de custos

O método de cálculo criado consistiu num método dividido em custos de matéria-prima, custos de fabrico e custos de montagem. Para os custos de matéria-prima, procurou-se obter a massa de cada elemento que constitui a ligação, visto que os preços dos fornecedores de matéria-prima são dados em €/kg. Na Tabela 12 apresenta-se a matéria-prima necessária para a construção de uma ligação e os respetivos custos usados como referência.

Tabela 12 - Matéria-prima e respetivos custos.

Matéria-prima	Chapa	Perfis	Parafusos	Chumbadouros
Preços	1,45–1,30 €/kg	0,88–0,99 €/kg	0,30–8,2 €/uni	8,32 €/uni

No fabrico, é importante haver uma separação dos processos visto que diferem nos tempos de execução, e conseqüentemente nos custos. Na Tabela 13 apresentam-se os processos de fabrico que uma ligação necessita de passar, as unidades dos tempos utilizados como referência em cada processo e os respetivos custos por hora usados como referência. Os tempos utilizados como referência foram obtidos através de várias medições feitas em diferentes fábricas e confirmados pelos trabalhadores dos processos. De notar, que se trata de valores aproximados.

Tabela 13 - Processos de fabrico, unidades dos tempos de fabrico e respetivos custos.

Processo de fabrico	Tempos	Preço
0) Distribuição e organização das peças	$t_{perfil} \approx 300 s$ $t_{chapa,reforço} \approx 60 s$	20 €/h
1) Furação e corte maquinado das chapas e dos reforços laterais	Se $t_p = 15$: $t_{corte} \approx 24,25 mm/s$; $t_{furo} \approx 25 s/furo$	65 €/h
	Se $t_p = 20$: $t_{corte} \approx 24,92 mm/s$; $t_{furo} \approx 25 s/furo$	
	Se $t_p = 25$: $t_{corte} \approx 18,45 mm/s$; $t_{furo} \approx 45 s/furo$	
	Se $t_p = 30$: $t_{corte} \approx 24,17 mm/s$; $t_{furo} \approx 45 s/furo$	
2) Furação e corte maquinada dos perfis	$t_{corte} \approx 16,2 mm^2/s$ $t_{furo} = \text{tempos do processo 1}$	65 €/h
3) Corte do esquadro de reforço	$t_{corte} \approx \text{tempos do processo 2}$	65 €/h
4) Limpeza da chapa, dos reforços laterais e do esquadro	$t_{limpar} \approx 8 mm/s$ $t_{medir} \approx 15 s/marcação$	20 €/h
5) Medição, marcação e limpeza dos perfis	$t_{limpar} \approx 8 mm/s$ $t_{medir} \approx 20 s/marcação$	20 €/h
6) Armação da chapa, dos reforços laterais e do esquadro	$t_{pingar} \approx 20 s/pingo$	20 €/h
7) Soldadura e limpeza do cordão de soldadura	$t_{soldar} \approx 7,08 mm/s$ $t_{limpar} \approx 8 mm/s$	25 €/h
8) Pintura	-	8 €/m ²

O processo 0 tem em conta o tempo que um trabalhador gasta trazer a peça para o local de trabalho, havendo uma diferença de tempo consoante o tamanho. Se for um elemento estrutural (um perfil) terá de recorrer a um meio de transporte maquinado, se for uma chapa, um reforço ou um esquadro poderá ser o próprio trabalhador a deslocar-se. O processo 1, 2 e 3 são maquinados, no entanto o tempo do processo 1, em máquina de corte com plasma e com furação à broca, depende essencialmente do perímetro das chapas/reforços a cortar e o tempo dos processos 2 e 3, em máquina de corte com serrote de fita e furação à broca, depende da área de superfície do perfil do elemento estrutural. De notar, que um esquadro de reforço é feito de perfis, através de um corte na longitudinal dos mesmos. O processo 4 e

5 servem o mesmo propósito, limpar as superfícies onde haverá soldadura. O processo 6 é extremamente importante para tornar o processo seguinte mais eficiente. Este processo trata-se de unir os elementos que irão ser soldados, colocando “pingos” de soldadura nos cantos entre os elementos a ligar por soldadura. O processo 7 consiste na soldadura dos elementos e posterior limpeza do cordão. Por fim, o processo 8 consiste na pintura de proteção da superfície das peças.

Para a obtenção de custos de montagem é também importante fazer uma divisão dos processos e etapas. Nesta fase inclui-se os custos de transporte e os custos dos meios necessários para a montagem das ligações. Na Tabela 14 apresentam-se os custos associados aos transportes usados como referência, as etapas de montagem e os custos dos meios necessários para a montagem. Os custos do transporte dependem essencialmente da capacidade de carga de um camião e do número de viagens necessárias para o transporte de todas as peças. Os custos de montagem dependem do tempo que cada ligação leva a montar e dos custos por hora dos meios necessários à montagem.

Tabela 14 - Processos de transporte e montagem, meios e respectivos custos.

Nº	Processo de transporte e montagem		
1	Transporte		Meio
1.1	Transporte das peças		I
1.2	Transporte das máquinas		II
2	Montagem	Tempo	Meio
2.1	Distribuir/organizar as peças	$t \approx 20 \text{ min}$	III, V
2.2	Trazer o material	$t \approx 10 \text{ min}$	III, V
2.3	Posicionar o material	$t \approx 15 \text{ min}$	III, V
2.4	Posicionar o trabalhador	$t \approx 10 \text{ min}$	IV, V
2.5	Aparafusar a ligação	$t \approx 3 \text{ min/furo}$	V
Nº	Meio		Preço
I	Transporte das peças (capacidade de 25000 kg)		550,00 €/transporte
II	Transporte das máquinas		180,00 €/transporte
III	Multifunções (14 metros)		70 €/dia
IV	Plataforma elevatória (15 metros)		70 €/dia
V	2 pessoas		20 €/h

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela aplicação dos métodos abordados no capítulo anterior são apresentados neste capítulo. A apresentação dos resultados será dividida em duas partes: (i) apresentação e discussão dos resultados obtidos durante o dimensionamento das ligações; (ii) apresentação e análise aos resultados obtidos durante o cálculo dos custos de cada ligação. Os desenhos 2D de todas as geometrias das ligações estudadas estão representados no Apêndice A. O repositório de ligações com os resultados obtidos para a resistência, a rigidez e os custos estão apresentados no Apêndice B.

4.1. Dimensionamento das ligações

Numa fase inicial do trabalho, procurou-se fazer um estudo aprofundado da rigidez ligação viga-coluna. Esse estudo consistiu na comparação do comportamento da ligação com e sem esquadro de reforço. Selecionou-se um vasto número de combinações de secções entre colunas e vigas. Para a secção em “I” foi considerada a gama entre IPE 80 e IPE 600, enquanto para a secção em “H” foi considerada a gama entre HEA 120 e HEA 400.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para o grupo de combinações das ligações viga-coluna sem esquadro de reforço inferior. Já a Figura 26 apresenta os resultados obtidos para o mesmo grupo de combinações e tipo de ligação, mas com um esquadro de reforço inferior, aplicado à viga. A diferença dos resultados é facilmente perceptível, isto é, quando um esquadro de reforço é aplicado à ligação, ocorre uma mudança de classificação de semi-rígida para rígida em muitas combinações. Isto deve-se ao facto de o braço binário aumentar com a aplicação de um esquadro de reforço, resultando num aumento da área de transmissão de esforços atuantes. Como consequência desse aumento, haverá uma redução de concentração de tensões e a ligação torna-se mais rígida.

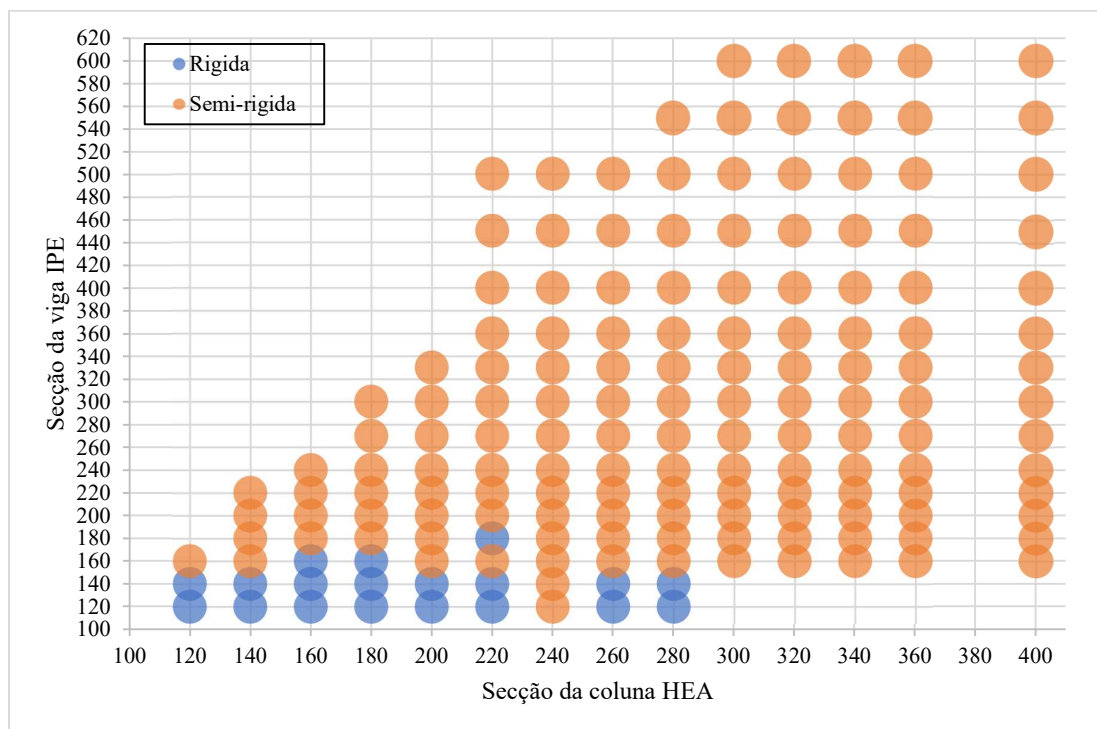


Figura 25 - Classificação da rigidez: Ligação aparafusada viga-coluna com chapa de extremidade, sem esquadro de reforço.

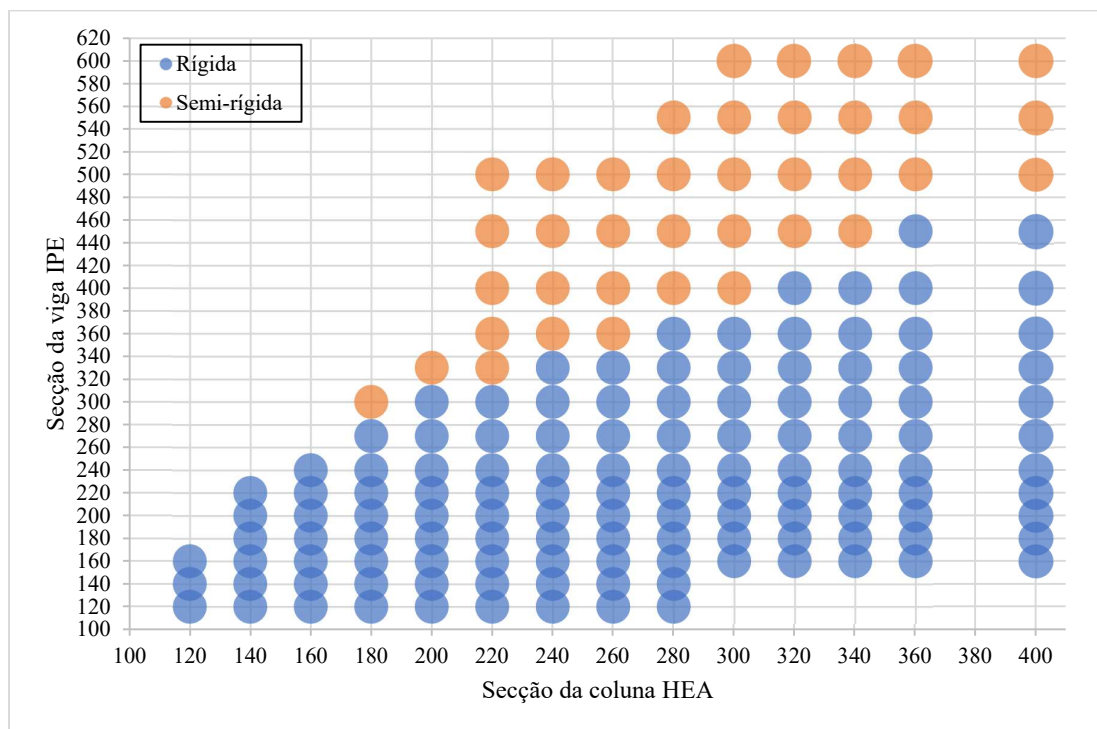


Figura 26 - Classificação da rigidez: Ligação aparafusada viga-coluna com chapa de extremidade, com esquadro de reforço.

Após o estudo aprofundado da ligação viga-coluna passou-se ao dimensionamento dos quatro tipos de ligação selecionados. Definiu-se um grupo de 18 combinações de secções entre os elementos a ligar, para o dimensionamento dos diferentes tipos de ligação aparafusada (ver Apêndice A). A seleção dos parâmetros geométricos, para cada combinação e para cada ligação, foi feita de acordo com portefólios existentes na empresa, e encontram-se representados no Apêndice A.

A análise das ligações viga-coluna e viga-viga, ambas com chapa de extremidade e classificadas como rígidas, é feita com base no momento fletor resistente, no esforço transversal resistente e na rigidez inicial. A geometria da ligação desempenha um papel fundamental na sua resistência e rigidez, especialmente a geometria da seção do elemento que está a ser solicitado. Verificou-se que, à medida que a seção do elemento solicitado aumentava, tanto a rigidez como a resistência da ligação aumentavam, permitindo à ligação ter uma maior capacidade de suportar os esforços aplicados. A evolução dos resultados obtidos pode ser observada na Figura 27 para as ligações viga-coluna, e na Figura 28 para as ligações viga-viga com chapa de extremidade.

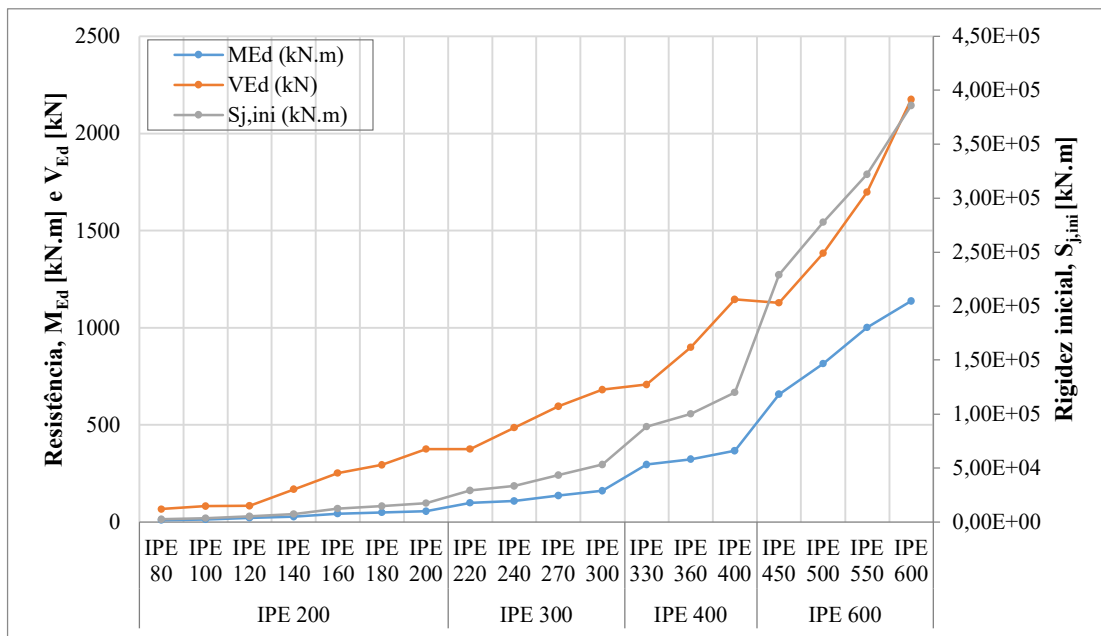


Figura 27 - Ligação viga-coluna com chapa de extremidade: resistência e rigidez inicial.

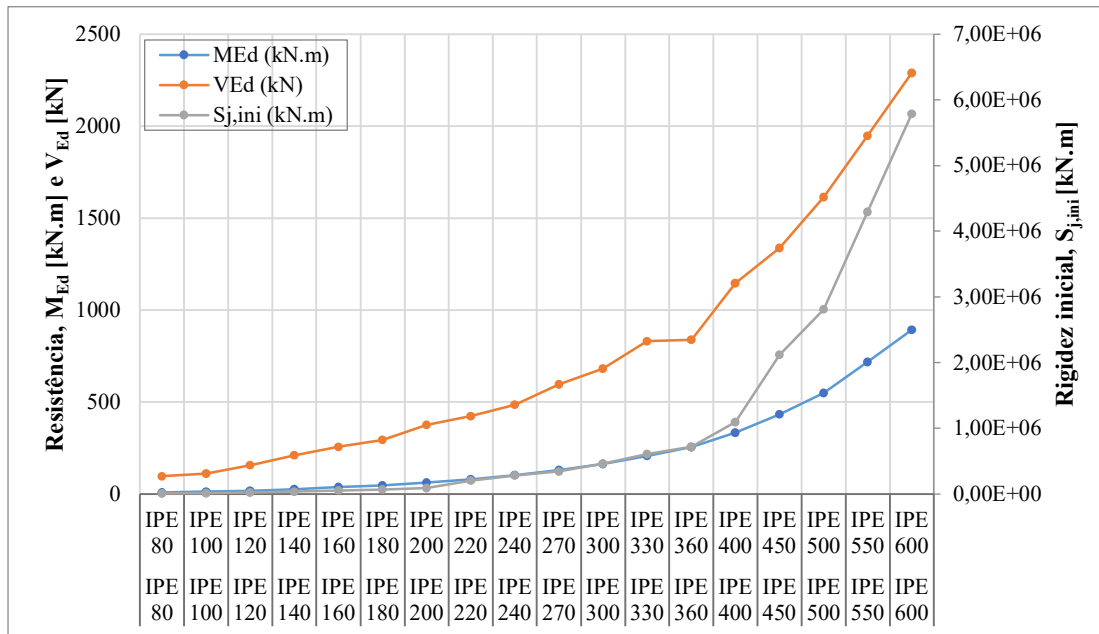


Figura 28 - Ligação viga-viga com chapa de extremidade: resistência e rigidez inicial.

Tanto a ligação viga-viga com chapa de *gousset*, como a base de coluna estudadas são ligações articuladas, ou seja, não possuem a capacidade de resistir a momentos fletores. Assim, os resultados a analisar são o esforço transversal resistente e o esforço axial resistente. Na Figura 29 é possível visualizar a evolução dos resultados para a ligação viga-viga com chapa de *gousset*. Verifica-se que o esforço transversal aumenta, com o aumento das secções, e que o esforço axial, por outro lado se mantém praticamente nulo. Devido ao momento residual criado pelo esforço transversal, os parafusos ficam sujeitos a esforços transversais e axiais residuais, que levam a que os parafusos não tenham capacidade para suportar mais esforços axiais atuantes. Também se verifica um aumento mais acentuado da evolução do valor do esforço transversal, em quatro pontos específicos. Isso deve-se ao facto de o número de parafusos ter aumentado de uma secção para a outra. Aumentando o número de parafusos, reduz-se a concentração de tensões e conseqüentemente torna-se mais resistente. Na Figura 30, por outro lado, verifica-se uma evolução conjunta de ambos os esforços. No entanto, o esforço axial evolui de uma forma gradual enquanto o esforço transversal evolui em degraus. Ao analisar as secções entre as variações em degrau do esforço transversal verificou-se que havia aumento do diâmetro do parafuso em todas elas. Aumentando o diâmetro do parafuso, aumenta-se a resistência do parafuso, logo a ligação torna-se mais resistente.

Conclui-se que, em ligações articuladas, a resistência é maioritariamente influenciada pelos parafusos e pela sua disposição.

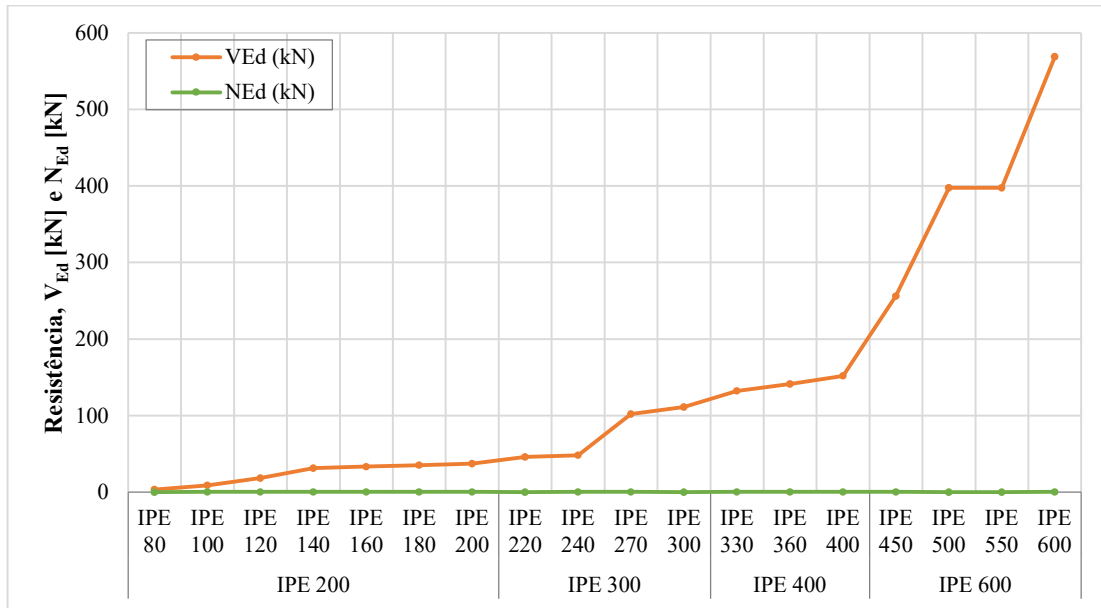


Figura 29 - Ligação viga-viga com chapa de gousset: resistência.

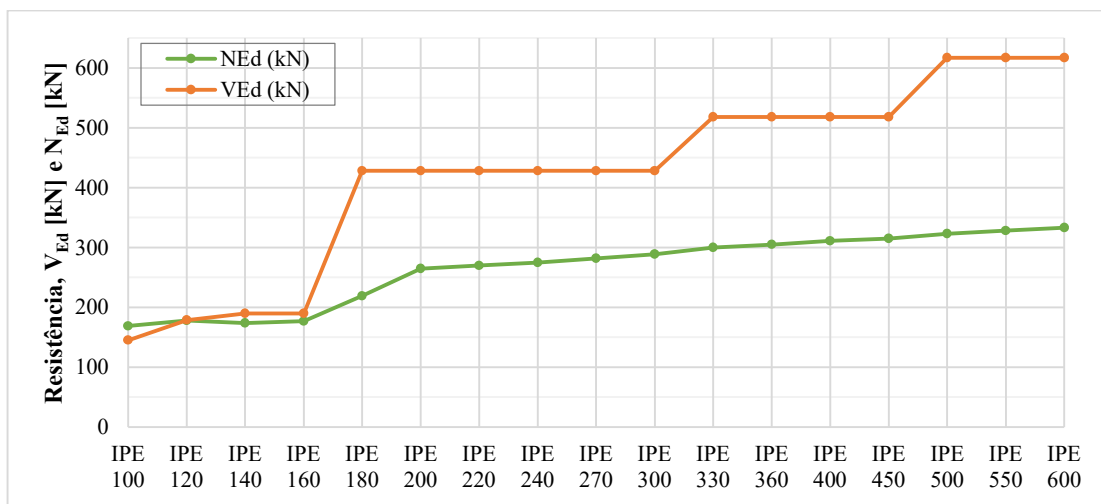


Figura 30 - Base de coluna: resistência.

4.2. Análise dos custos

Utilizando o mesmo grupo de combinações como base, foram obtidos os resultados para a análise dos custos associados à matéria-prima, ao fabrico e à montagem de ligações aparafusadas. Para efeitos de cálculo, adotou-se um comprimento fixo de um metro para todos os elementos estruturais.

Na Figura 31 apresenta-se a evolução dos custos das ligações viga-coluna, Figura 32 na apresenta-se a evolução dos custos das ligações viga-viga com chapa de extremidade, na Figura 33 apresenta-se a evolução dos custos da ligação viga-viga com chapa de gousset e, por fim, na Figura 34 apresenta-se a evolução dos custos da base de coluna. A evolução dos custos é semelhante nas ligações viga-coluna, viga-viga com chapa de extremidade e viga-viga com chapa de gousset. Para secções de menor dimensão, os custos de matéria-prima, fabrico e montagem têm valores semelhantes. No entanto, a partir da secção IPE 200 a matéria-prima passa a ter maior valor percentual no custo final das ligações, e verifica-se um aumento acentuado dos custos entre secções. No caso da base de coluna, só a partir da secção IPE 600 é que se verifica um aumento acentuado do custo da matéria-prima. Posto isto, conclui-se que com o aumento dimensional da ligação, haverá um aumento do custo total.

Com base nesta análise, e na análise feita à evolução da resistência, decidiu-se analisar a curva de evolução da razão custos/resistência. Nas ligações da Figura 31 e Figura 32, a resistência da ligação é ditada pelo momento fletor. Por outro lado, na ligação da Figura 33 a resistência da ligação é ditada pelo esforço transversal e na ligação da Figura 34 a resistência é ditada pela combinação do esforço axial com o esforço transversal. Ao contrário do que aconteceu nos outros casos, à medida que a dimensão da ligação aumenta, a razão custo/resistência diminui. Se por um lado maior dimensão de secção, implica maior custo e maior resistência, por outro lado, maior resistência não implica necessariamente maior custo.

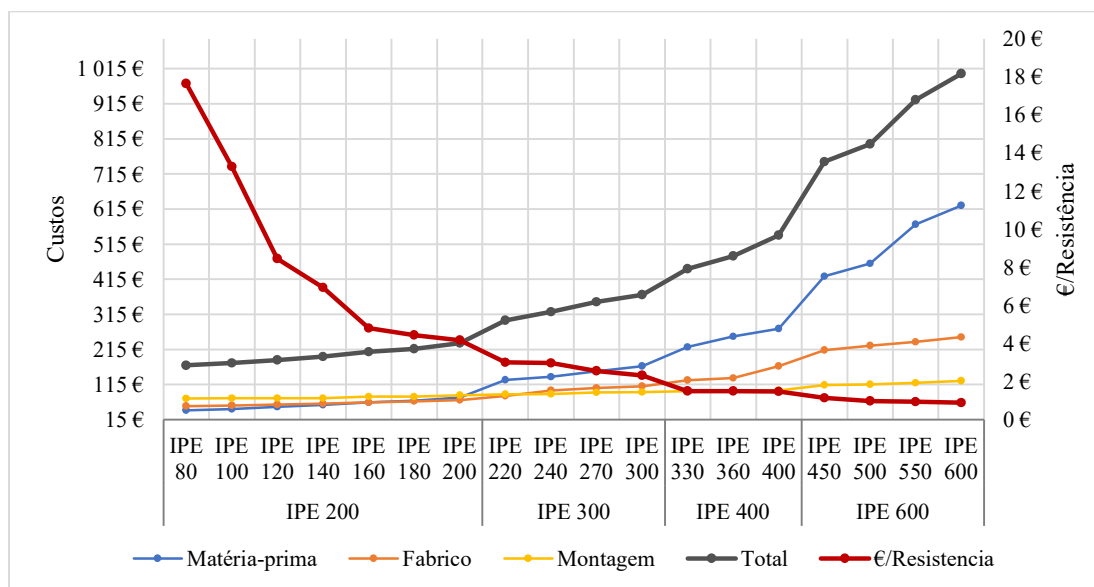


Figura 31 - Ligação viga-coluna com chapa de extremidade: análise de custos.

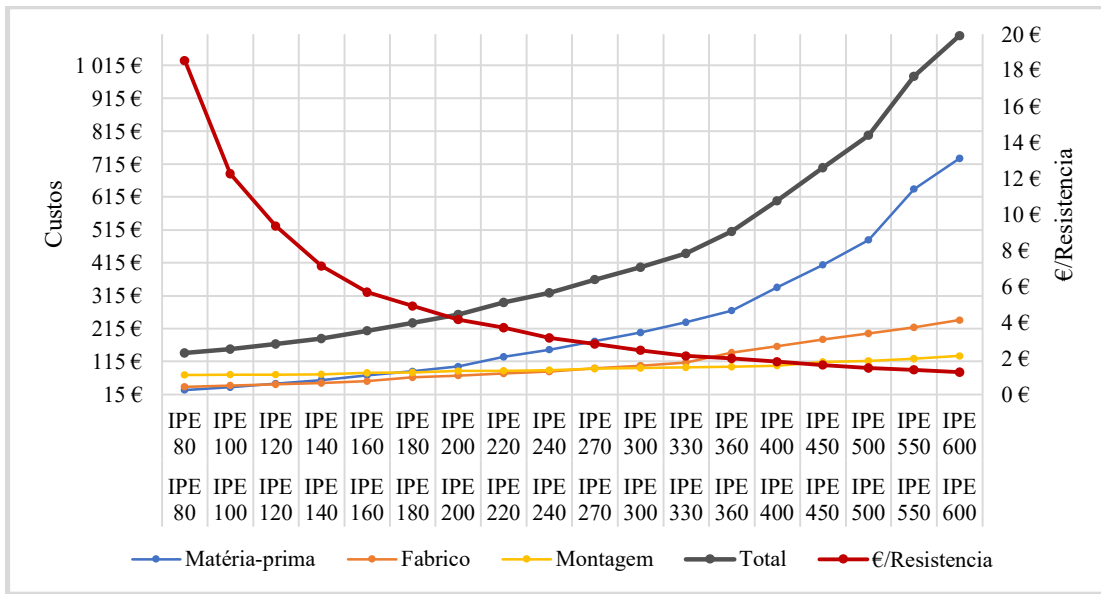


Figura 32 - Ligação viga-viga com chapa de extremidade: análise de custos.

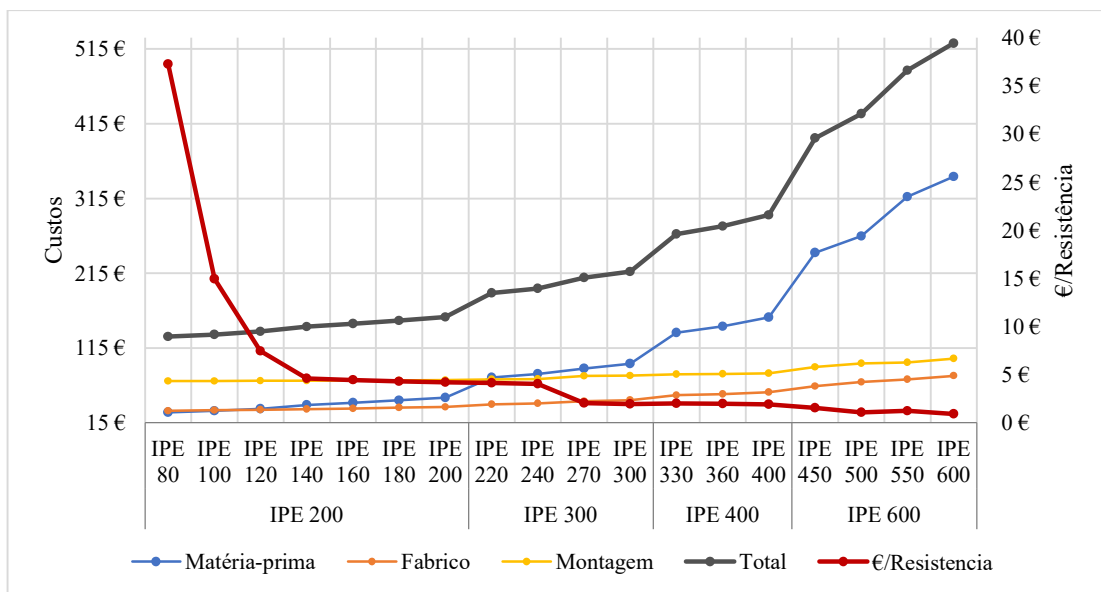


Figura 33 - Ligação viga-viga com chapa de gousset: análise de custos.

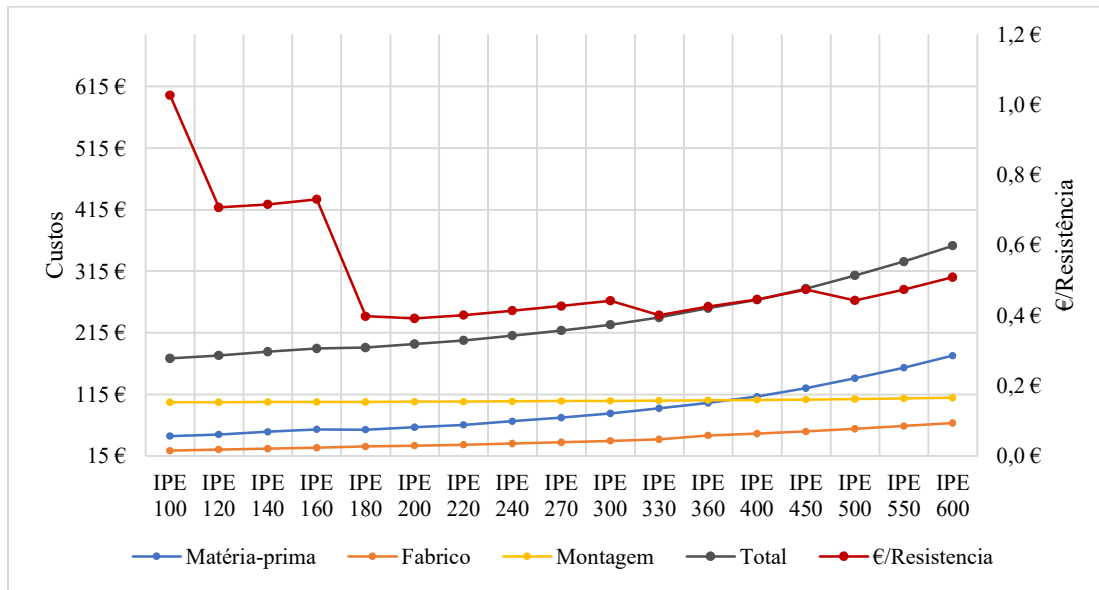


Figura 34 – Base de coluna: análise de custos.

5. CONCLUSÃO

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação está inserido no sector das estruturas metálicas utilizadas na construção de novos edifícios. As ligações aparafusadas têm uma grande importância nestas estruturas, não só do ponto de vista da resistência mecânica, mas também do ponto de vista do custo. Neste sentido, estas ligações foram estudadas em detalhe neste trabalho, nomeadamente as ligações: (i) viga-coluna com chapa de extremidade; (ii) viga-viga com chapa de gousset; (iii) viga-viga com chapa de extremidade; (iv) base de coluna.

De forma a garantir a segurança e a qualidade das estruturas metálicas na União Europeia, foram criadas normas de dimensionamento, fabricação e construção de estruturas metálicas, conhecidas como “Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço”. Neste trabalho foi feita uma revisão aprofundada destas regras para a análise e dimensionamento de elementos em estruturas metálicas, com particular foco nas ligações aparafusadas. O comportamento mecânico das ligações foi analisado com baseado nos resultados fornecidos pelo programa de dimensionamento de ligações *Robot Structural Analysis*. Este programa rege-se pelas regras estabelecidas pelo Eurocódigo 3. Para a análise dos custos das ligações desenvolveu-se uma metodologia de cálculo que permite ter um conhecimento detalhado dos custos envolvidos em cada ligação, os quais são divididos em custos de matéria-prima, custos de fabrico e custos de montagem e transporte. Além disso, dentro de cada categoria, foi feita uma divisão por processos e preços.

Com a realização deste trabalho foi possível concluir que com aumento das secções da ligação, se verifica um aumento da resistência, da rigidez e do custo. Em contrapartida verifica-se uma redução da relação do custo/resistência. Além disso, este trabalho irá permitir à empresa ter um processo de seleção de ligações, durante a fase de projeção de estruturas, mais rápido e rigoroso.

A presente dissertação não abrange todos os tipos de ligações e está restringida a um grupo específico de combinações. Neste sentido, sugere-se que em trabalhos futuros se desenvolva uma metodologia de cálculo que aborde um espectro mais amplo de ligações, onde se faça uma comparação entre ligações do mesmo tipo, mas com classificação de rigidez diferentes. Sugere-se também a criação de um índice de custo, de forma a normalizar

os resultados e a ser possível de apresentar um resultado intemporal. Além disso, há espaço para um refinamento dos parâmetros de tempo e de preço utilizados nos cálculos, sugerindo-se a realização de ajustes nesse sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Nageim, H. (Hassan), MacGinley, T. J. (Thomas J., & MacGinley, T. J. (Thomas J. (2005). *Steel structures : practical design studies*. Taylor & Francis.
- ArcelorMittal. (2021). *Profilés et Aciers Marchands Sections and Merchant Bars Profil- und Stabstahl*. ArcelorMittal.
- Joints in Steel Construction: Moment Connections*. (1995). The Steel Construction Institute.
- Joints in Steel Construction: Simple Connections*. (2009). <http://www.steel-sci.org>
- Marques, S. (2013). *Dimensionamento de bases rígidas de pilares metálicos segundo o Eurocódigo 3* [Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>
- NP EN 1993-1-1:2010. (n.d.). *Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. www.ipq.pt
- NP EN 1993-1-8:2010. (n.d.). *Eurocódigo 3-Projecto de estruturas de aço Parte 1-8: Projecto de ligações*. www.ipq.pt
- Peixoto, N. (2008). *Ligações metálicas de acordo com o Eurocódigo 3*. Universidade de Aveiro.
- Rodrigues, M. (2007). *Avaliação Estrutural de “T-Stubs” em Ligações Viga-Coluna em Estruturas de Aço através do Método dos Elementos Finitos*.
- Santos, F., & Silva, L. (2014). *Manual de Execução de Estruturas Metálicas em África* (1ª). CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- Simões Da Silva, E. L., & Santiago, A. (2003). *Manual de Ligações Metálicas*. CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. <http://www.cmm.pt>
- Simões, R. (2007). *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas* (2ª). CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- Vieito, Â. (2015). *Análise e dimensionamento de ligações viga-pilar com placa de extremidade*. Instituto Politécnico de Viana do Castelo.

ANEXO A

Tabela A. 1 - Centro de compressão, braço do binário z e distribuição dos esforços para a determinação do momento resistente $M_{j,Rd}$ para ligações com chapa de extremidade. Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

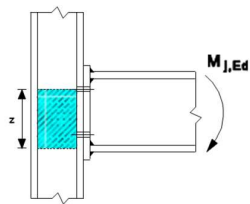
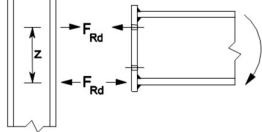
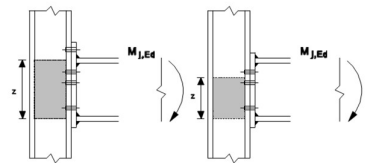
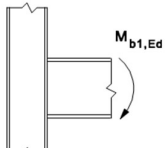
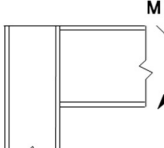
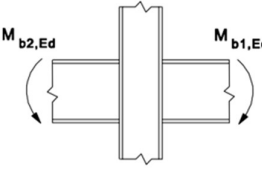
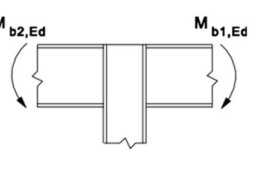
Tipo de ligação	Centro de compressão	Braço do binário	Distribuição dos esforços
<p>c) Ligação com chapa de extremidade aparafusada com chapa de extremidade saliente aparafusada apenas com duas linhas ativas de parafusos tracionados</p> 	<p>Alinhado com o plano situado a meio da espessura do banzo comprimido</p>	<p>Distância entre o centro de compressão e a linha de parafusos tracionados</p>	
<p>e) Outras ligações com chapas de extremidade aparafusadas com duas ou mais linhas de parafusos tracionados</p> 	<p>Alinhado com o plano situado a meio da espessura do banzo comprimido</p>	<p>Poderá obter-se um valor aproximado adotando a distância entre o centro de compressão e um plano situado a meia distância entre as duas fiadas mais afastadas dos parafusos.</p>	<p>Poderá determinar-se um valor mais preciso considerando o braço do binário z igual a z_{eq} obtido utilizando a equação (3.42).</p>

Tabela A. 2 – Coeficientes parciais de segurança para as ligações. Adaptado das fontes: NP EN 1993-1-1: 2010.

Resistência das secções transversais de qualquer classe	γ_{M0}	1
Resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento	γ_{M1}	1
Resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação	γ_{M2}	1,25
Resistência dos parafusos, rebites, cavilhas, soldaduras e chapas de esmagamento		
Resistência ao escorregamento	γ_{M3}	1,25

Tabela A. 3 - Valores aproximados para o parâmetro de transformação β . Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Tipo de configuração da ligação		Ação	Valor de β
		$M_{b1,Ed}$	$\beta \approx 1$
 		$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$	$\beta = 0$ *)
		$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$	$\beta \approx 1$
		$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$	$\beta \approx 2$
		$M_{b1,Ed} + M_{b2,Ed} = 0$	$\beta \approx 2$
*) Neste caso, o valor de β é um valor exato e não um valor aproximado.			

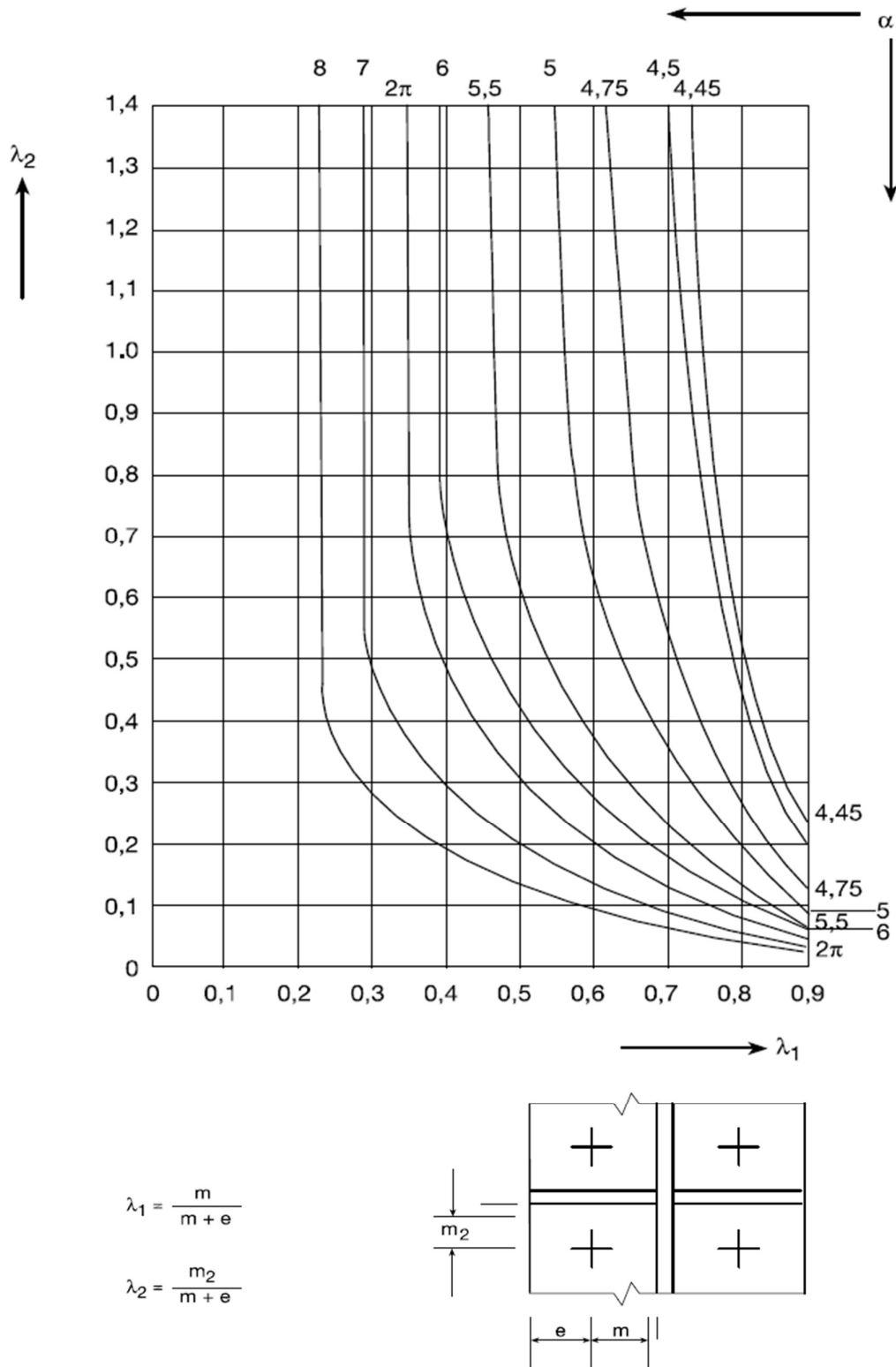


Figura A. 1 - Valores de α para banzos reforçados de colunas e para chapas de extremidade. Fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

Tabela A. 4 – Coeficiente α_b e k_1 . Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

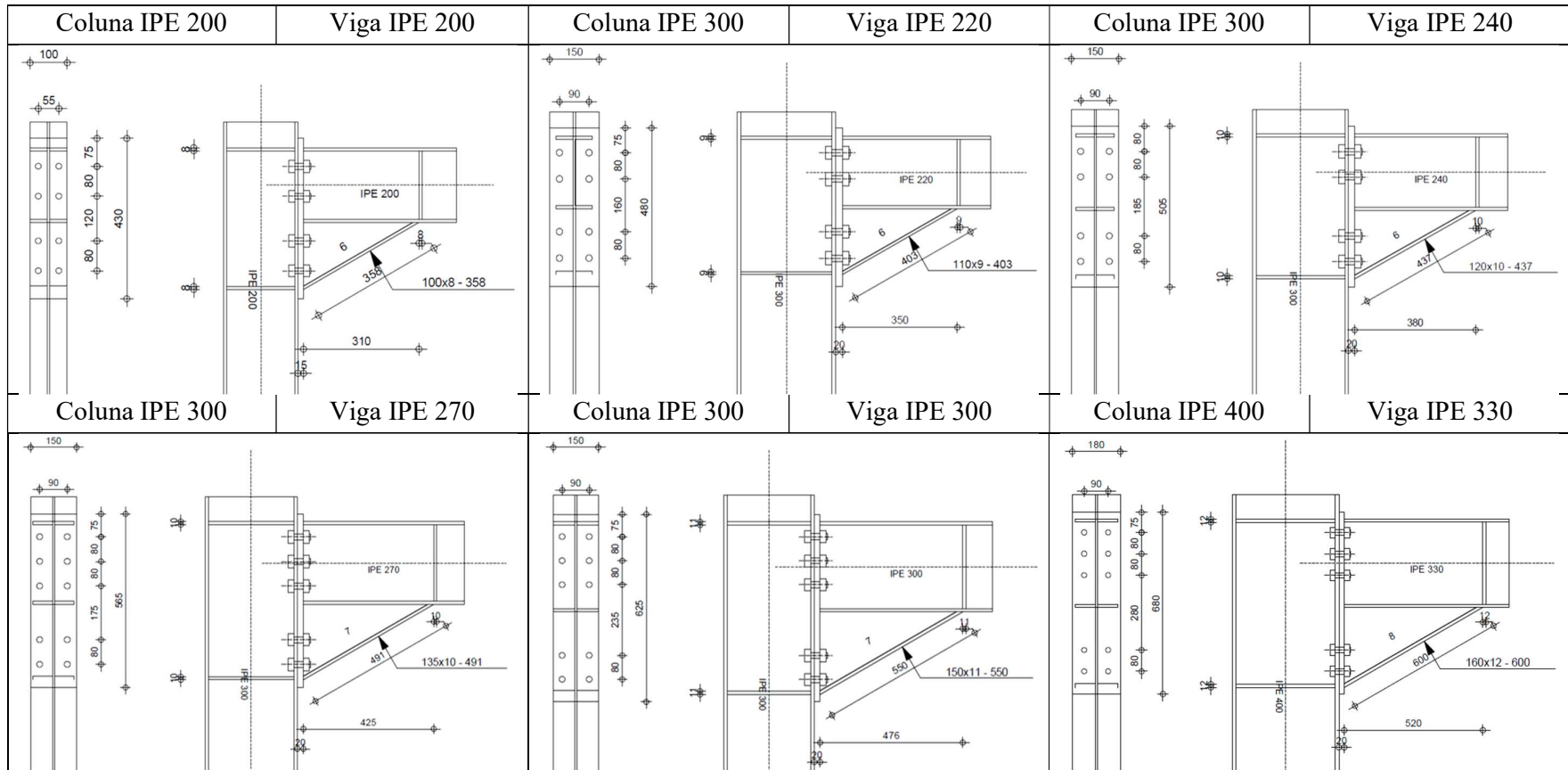
Na direção de transmissão de esforços:	
α_b é igual ao menor dos valores:	α_d^*
	$\frac{f_{ub}}{f_u}$
	1,0
*Para parafusos de extremidade $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$, para parafusos interiores $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$.	
Perpendicularmente à direção de transmissão dos esforços:	
- para parafusos de extremidade, k_1 é igual ao menor dos valores:	$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$
	$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$
	2,5
- para parafusos interiores, k_1 é igual ao menor dos valores:	$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$
	2,5

Tabela A. 5 - Coeficientes de rigidez dos componentes básicos para a determinação de k_{eq} . Adaptado da fonte: NP EN 1993-1-8: 2010.

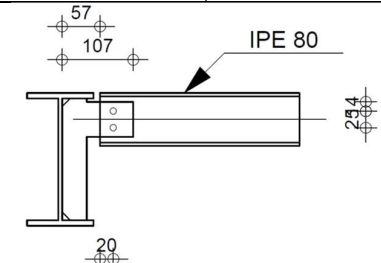
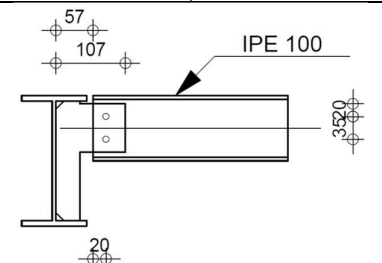
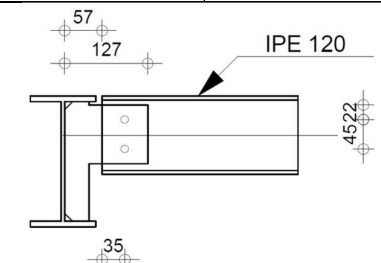
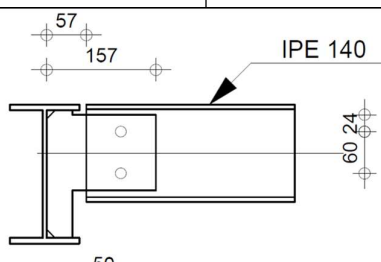
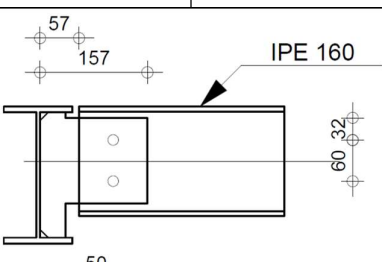
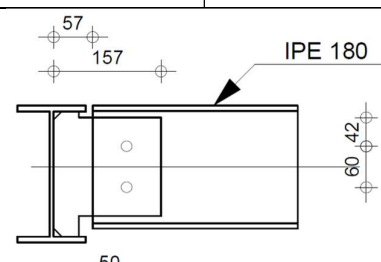
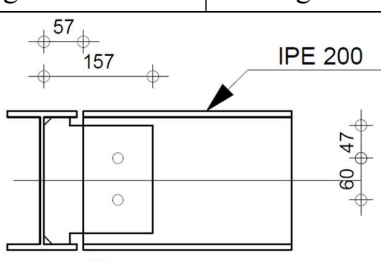
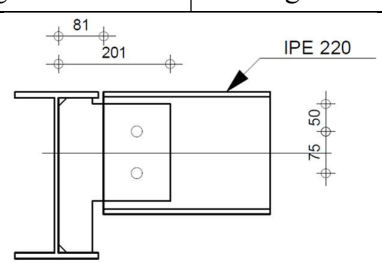
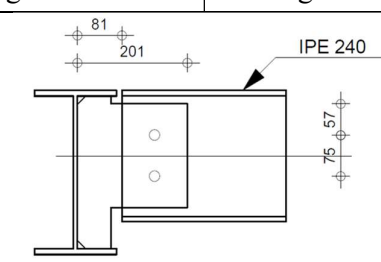
Coeficiente de rigidez elástica relativo à alma da coluna tracionada	$k_3 = \frac{0,7b_{eff,t}w_c t_{wc}}{d_c}$
Coeficiente de rigidez elástica relativo ao banzo da coluna em flexão	$k_4 = \frac{0,9l_{eff}t_{fc}^3}{m^3}$
Coeficiente de rigidez elástica relativo à chapa de extremidade em flexão	$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3}$
Coeficiente de rigidez elástica relativo aos parafusos tracionados	$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b}$

APÊNDICE A

Coluna IPE 200	Viga IPE 80	Coluna IPE 200	Viga IPE 100	Coluna IPE 200	Viga IPE 120
Coluna IPE 200	Viga IPE 140	Coluna IPE 200	Viga IPE 160	Coluna IPE 200	Viga IPE 180



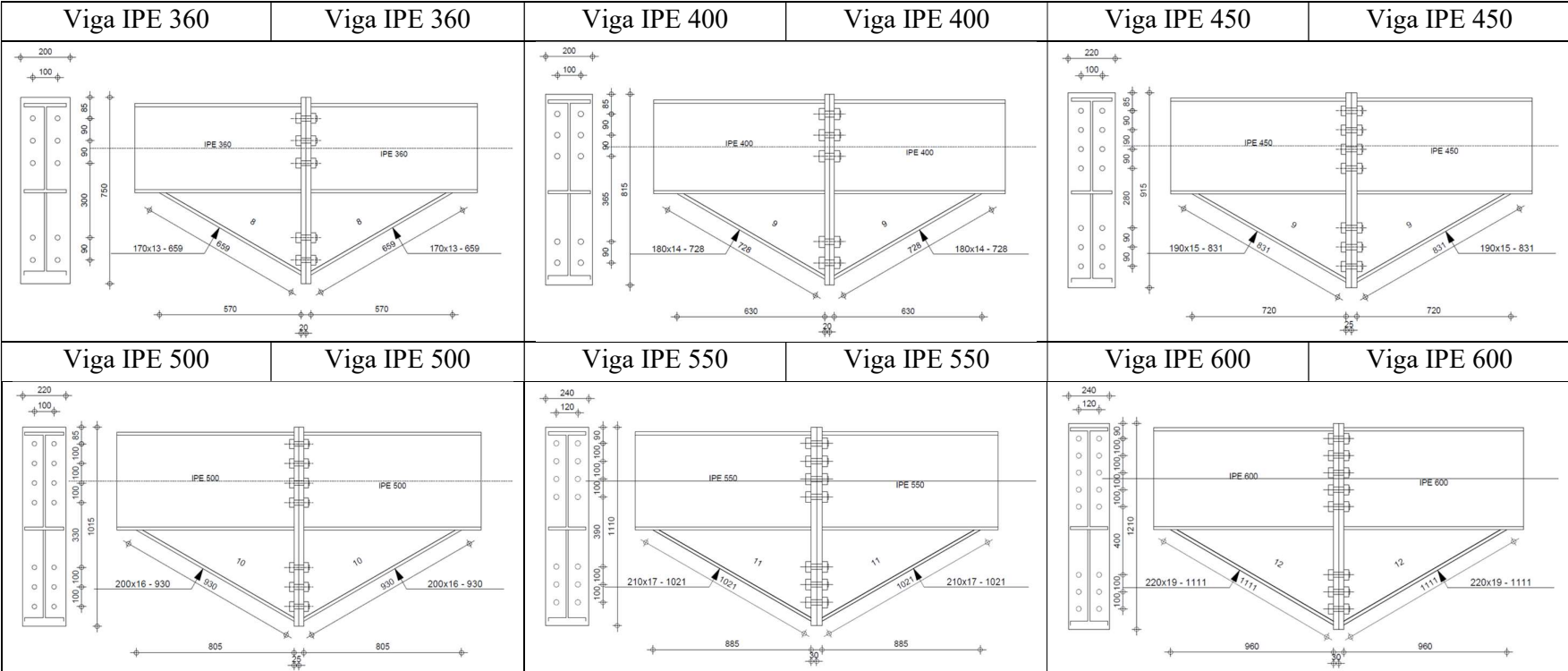
Coluna IPE 400	Viga IPE 360	Coluna IPE 400	Viga IPE 400	Coluna IPE 600	Viga IPE 450
Coluna IPE 600	Viga IPE 500	Coluna IPE 600	Viga IPE 550	Coluna IPE 600	Viga IPE 600

Viga IPE 200	Viga IPE 80	Viga IPE 200	Viga IPE 100	Viga IPE 200	Viga IPE 120
					
Viga IPE 200	Viga IPE 140	Viga IPE 200	Viga IPE 160	Viga IPE 200	Viga IPE 180
					
Viga IPE 200	Viga IPE 200	Viga IPE 300	Viga IPE 220	Viga IPE 300	Viga IPE 240
					

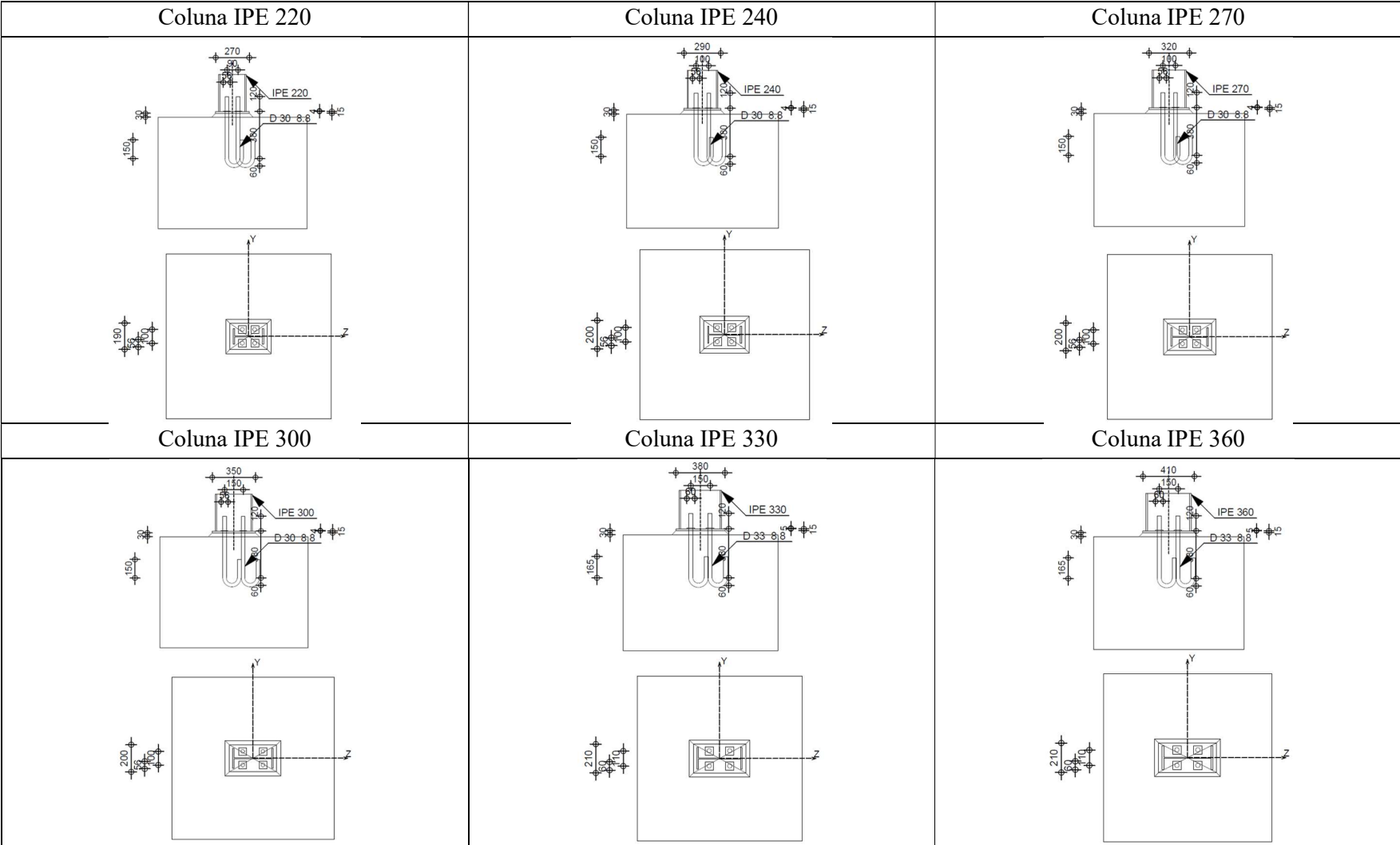
Viga IPE 300	Viga IPE 270	Viga IPE 300	Viga IPE 300	Viga IPE 400	Viga IPE 330
Viga IPE 400	Viga IPE 360	Viga 400	Viga 400	Viga 600	Viga 450
Viga 600	Viga 500	Viga 600	Viga 550	Viga 600	Viga 600

Viga IPE 80	Viga IPE 80	Viga IPE 100	Viga IPE 100	Viga IPE 120	Viga IPE 120
Viga IPE 140	Viga IPE 140	Viga IPE 160	Viga IPE 160	Viga IPE 180	Viga IPE 180

Viga IPE 200	Viga IPE 200	Viga IPE 220	Viga IPE 220	Viga IPE 240	Viga IPE 240

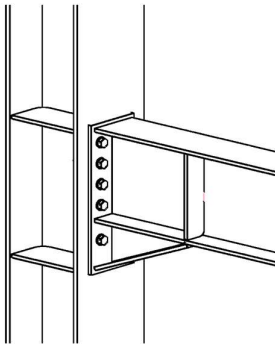


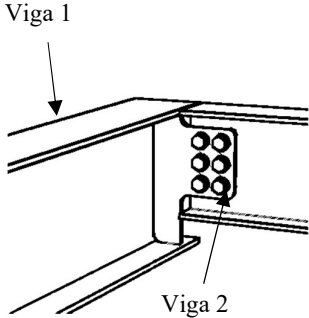
Coluna IPE 100	Coluna IPE 120	Coluna IPE 140
Coluna IPE 160	Coluna IPE 180	Coluna IPE 200



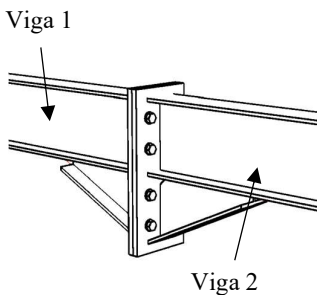
Coluna IPE 400	Coluna IPE 450	Coluna IPE 500
Coluna IPE 550	Coluna IPE 600	

APÊNDICE B

Ligação viga-coluna com chapa de extremidade									
	Secção		M _{Ed} (kN.m)	V _{Ed} (kN)	S _{j,ini} (kN.m)	Custos €			
	Coluna	Viga				Matéria-prima	Fabrico	Montagem	Total
	IPE 200	IPE 80	9,6	66,7	2,51E+03	41,11 €	53,21 €	75,08 €	169 €
		IPE 100	13,2	82,0	3,45E+03	44,99 €	55,57 €	75,32 €	176 €
		IPE 120	21,8	82,6	5,17E+03	51,10 €	57,73 €	75,57 €	184 €
		IPE 140	27,9	168,8	7,54E+03	57,21 €	60,58 €	75,87 €	194 €
		IPE 160	43,3	251,8	1,25E+04	64,00 €	64,13 €	80,03 €	208 €
		IPE 180	48,7	294,1	1,47E+04	69,19 €	66,80 €	80,38 €	216 €
		IPE 200	55,8	376,0	1,75E+04	77,19 €	70,78 €	84,63 €	233 €
	IPE 300	IPE 220	99,1	375,6	2,93E+04	128,15 €	82,64 €	87,10 €	298 €
		IPE 240	108,5	485,8	3,33E+04	136,78 €	97,71 €	87,59 €	322 €
		IPE 270	136,4	595,7	4,34E+04	152,79 €	104,80 €	92,21 €	350 €
		IPE 300	159,8	681,2	5,31E+04	167,19 €	110,35 €	93,04 €	371 €
	IPE 400	IPE 330	295,0	707,4	8,82E+04	221,43 €	127,03 €	95,98 €	444 €
		IPE 360	322,7	898,9	1,00E+05	251,62 €	132,79 €	97,05 €	481 €
		IPE 400	366,8	1145,3	1,20E+05	274,03 €	167,73 €	98,34 €	540 €
	IPE 600	IPE 450	656,8	1128,6	2,29E+05	423,14 €	213,31 €	113,42 €	750 €
		IPE 500	815,7	1383,8	2,78E+05	459,50 €	225,36 €	115,47 €	800 €
IPE 550		1000,7	1697,4	3,22E+05	571,02 €	235,66 €	119,14 €	926 €	
IPE 600		1137,8	2175,3	3,86E+05	625,30 €	250,12 €	125,56 €	1 001 €	

Ligação viga-viga com chapa de gousset								
	Secção		V_{Ed} (kN)	N_{Ed} (kN)	Custos €			Total
	Viga 1	Viga 2			Matéria-prima	Fabrico	Montagem	
	IPE 200	IPE 80	3,5	0	28,81 €	30,84 €	70,71 €	130,36 €
		IPE 100	8,9	0,2	30,70 €	31,61 €	70,83 €	133,14 €
		IPE 120	18,4	0,3	33,50 €	32,45 €	70,98 €	136,93 €
		IPE 140	31,2	0,1	38,87 €	33,36 €	71,16 €	143,39 €
		IPE 160	33,2	0,1	41,81 €	34,24 €	71,34 €	147,39 €
		IPE 180	35,2	0,1	44,88 €	35,12 €	71,53 €	151,53 €
	IPE 300	IPE 200	37,2	0,1	48,42 €	36,10 €	71,74 €	156,26 €
		IPE 220	45,7	0	75,44 €	39,87 €	73,20 €	188,51 €
		IPE 240	48	0,1	80,23 €	40,99 €	73,47 €	194,69 €
		IPE 270	102,2	0,2	87,75 €	43,73 €	77,64 €	209,11 €
	IPE 400	IPE 300	111	0	93,94 €	45,33 €	78,01 €	217,28 €
		IPE 330	132,4	0,1	135,62 €	51,72 €	79,99 €	267,33 €
		IPE 360	141,2	0,2	143,83 €	53,49 €	80,48 €	277,79 €
	IPE 600	IPE 400	151,8	0,1	155,83 €	55,60 €	81,16 €	292,60 €
		IPE 450	256	0,2	242,33 €	63,80 €	89,56 €	395,70 €
		IPE 500	397,7	0	264,44 €	69,65 €	94,41 €	428,51 €
IPE 550		397,7	0	317,36 €	73,18 €	95,79 €	486,33 €	
		IPE 600	569,1	0,1	344,14 €	77,81 €	100,69 €	522,63 €

Ligação viga-viga com chapa de extremidade

	Secção		M_{Ed} (kN.m)	V_{Ed} (kN)	$S_{j,ini}$ (kN.m)	Custos €			
	Viga 1	Viga 2				Matéria-prima	Fabrico	Montagem	Total
	IPE 80	IPE 80	7,6	96,6	7,06E+03	28,31 €	38,23 €	74,34 €	140,88 €
	IPE 100	IPE 100	12,5	111	1,18E+04	36,33 €	42,03 €	74,82 €	153,18 €
	IPE 120	IPE 120	18	156,1	2,03E+04	47,31 €	45,45 €	75,35 €	168,11 €
	IPE 140	IPE 140	25,9	210,6	3,45E+04	58,59 €	49,96 €	75,95 €	184,50 €
	IPE 160	IPE 160	36,8	256,3	5,30E+04	73,04 €	55,23 €	80,55 €	208,81 €
	IPE 180	IPE 180	47,4	294,1	6,55E+04	85,07 €	66,45 €	81,25 €	232,78 €
	IPE 200	IPE 200	62,2	376	8,83E+04	99,69 €	72,73 €	85,90 €	258,32 €
	IPE 220	IPE 220	79,6	422,7	2,04E+05	128,91 €	78,74 €	87,20 €	294,84 €
	IPE 240	IPE 240	102,9	485,8	2,82E+05	150,86 €	84,09 €	88,41 €	323,37 €
	IPE 270	IPE 270	129,7	595,7	3,41E+05	176,55 €	94,10 €	93,63 €	364,28 €
	IPE 300	IPE 300	163,4	681,2	4,61E+05	203,34 €	102,92 €	95,19 €	401,46 €
	IPE 330	IPE 330	207,9	831	6,07E+05	234,51 €	111,86 €	96,92 €	443,30 €
	IPE 360	IPE 360	254,6	839	7,16E+05	270,04 €	141,58 €	98,99 €	510,62 €
	IPE 400	IPE 400	333,6	1145,4	1,09E+06	339,95 €	161,39 €	102,13 €	603,47 €
	IPE 450	IPE 450	432,9	1337,2	2,12E+06	408,97 €	182,06 €	113,48 €	704,50 €
	IPE 500	IPE 500	549,2	1612,9	2,81E+06	484,52 €	200,62 €	117,28 €	802,42 €
	IPE 550	IPE 550	717,9	1947,5	4,30E+06	639,60 €	219,10 €	123,39 €	982,08 €
	IPE 600	IPE 600	892,7	2289,3	5,79E+06	732,54 €	240,98 €	132,05 €	1 105,57 €

Base de coluna							
Secção Coluna	N _{Ed} (kN)	V _{Ed} (kN)	Custos €				
			Matéria-prima	Fabrico	Montagem	Total	
IPE 100	169	145	47,39 €	23,75 €	102,37 €	173,50 €	
IPE 120	178	179	50,07 €	25,88 €	102,53 €	178,49 €	
IPE 140	174	190	54,40 €	27,23 €	102,74 €	184,37 €	
IPE 160	177	190	58,21 €	28,57 €	102,96 €	189,74 €	
IPE 180	219	428	57,72 €	30,57 €	102,98 €	191,27 €	
IPE 200	265	428	61,69 €	32,06 €	103,22 €	196,97 €	
IPE 220	270	428	65,85 €	33,65 €	103,47 €	202,97 €	
IPE 240	275	428	71,42 €	35,42 €	103,78 €	210,62 €	
IPE 270	282	428	77,48 €	37,22 €	104,13 €	218,83 €	
IPE 300	289	428	84,20 €	39,67 €	104,53 €	228,41 €	
IPE 330	300	518	92,77 €	42,30 €	105,00 €	240,08 €	
IPE 360	305	518	101,44 €	48,45 €	105,51 €	255,40 €	
IPE 400	311	518	111,58 €	51,36 €	106,11 €	269,04 €	
IPE 450	315	518	125,28 €	54,88 €	106,84 €	287,00 €	
IPE 500	323	617	141,35 €	59,28 €	107,75 €	308,38 €	
IPE 550	328	617	158,64 €	63,70 €	108,72 €	331,07 €	
IPE 600	333	617	178,09 €	68,65 €	109,83 €	356,56 €	

