



**Sérgio
Calado Martins**

**Estudo de ligações por encaixe em estantes
industriais convencionais**



**Sérgio
Calado Martins**

**Estudo de ligações por encaixe em estantes
industriais convencionais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor FRANCISCO JOSÉ MALHEIRO QUEIRÓS DE MELO, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri/the jury

presidente/president

Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais/examiners committee

Professor Doutor Abel Dias dos Santos

Professor Associado Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia(Arguente)

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado da Universidade de Aveiro (Orientador)

**agradecimentos /
acknowledgements**

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu pai Abílio e minha mãe Zulmira, que foram os meus "alicerces" para que eu pudesse construir todo este percurso académico.

Um agradecimento também ao meu irmão, cunhada e sobrinhos pelo apoio demonstrado.

Quero agradecer ao Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, que me ajudou na parte experimental deste trabalho.

Quero agradecer ao Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo orientador desta tese que me ajudou e deu forças na concretização deste trabalho.

Também quero agradecer ao Professor Doutor Alfredo Balacó de Morais pela ajuda e apoio para este trabalho.

Palavras-Chave

Estruturas do tipo *rack*, estantes industriais, simulação numérica, momento-rotação, perfis finos, aço S355

Resumo

Os sistemas de estruturas do tipo *rack* para armazenamento de produtos industriais, conhecido na terminologia inglesa como Storage Steel Rack Systems, são conjuntos resistentes de configuração tridimensional para ambientes industriais, apresentando um desenho muito funcional e robusto. Estas estruturas modulares permitem a sua montagem rápida através de um sistema de ligações por encaixe, conectores soldados nas extremidades das vigas, que precisam de cumprir exigentes normas de segurança a fim de evitar acidentes. Estes acidentes podem ser causados por empilhadoras ou outro tipo de máquinas os quais ocorrem durante ações de armazenamento ou de procura de artigos manualmente guardados nas estantes (denominada esta ação de *picking*).

Este tipo de estruturas é constituído por um conjunto de perfis (habitualmente laminados em frio), que são montados por ligações de encaixe, dando origem à de estrutura para armazenamento já mencionada. O material utilizado para fabrico destes perfis é o aço podendo ser de vários tipos com propriedades diferentes podendo ser classificadas em tabelas AISI, ASTM e normas EN. Estas estruturas estão montadas com perfis de aço dúctil (S355, ST52, etc.), de baixo teor de carbono (entre 0,16% e 0,18%) o que lhe confere excelente soldabilidade uma vez conformado a frio, este tipo de aço apresenta uma tensão de cedência entre 300 a 400 MPa e tensão de rotura entre 500 a 600 MPa. O tipo de trabalho de conformação a frio, para se obterem os perfis, são efetuados pela técnica de perfilagem. Existem vários sistemas de estrutura para armazenamento, como por exemplo, estruturas Drive-in/Drive Through, estruturas do tipo *picking*, estruturas de suporte de paletes e estruturas com sistemas automatizados, consoante o que as entidades empresariais pretendam para os seus armazéns. A norma que é utilizada para o projeto deste tipo de estruturas, é a EN 15512:2009, em que nesta tese se vai ter em conta partes desta norma, podendo também ter-se a necessidade de recorrer a outras normas que a EN 15512:2009 especifique.

Simulações de elementos Finitos de elementos montados para construir uma ligação no espaço, foram realizada malhas geométricas e materiais não-lineares com os resultados para o momento de flexão em função do ângulo de rotação da ligação em comparação com a literatura específica e/ou resultados experimentais.

Keywords

rack system structure, industrial shelves, finite elements simulations, moment-rotation, thin profiles, steel S355

Abstract

The structure rack system for storage of industrial goods, known in English terminology as Steel Storage Rack Systems, are resistant sets of three-dimensional configuration for industrial environments, presenting a very functional and robust design. These modular structures enable quick assembly through a system of connections per socket, connectors welded to the ends of the beams, and they need to meet stringent safety standards in order to avoid accidents. These accidents can be caused by forklifts or other machinery which actions occur during storage or manually search for items stored on shelves (called this action of picking).

This type of structure is constituted by a set of profiles (usually cold rolled), which are assembled by snap connections, leading to the storage structure mentioned above. The material used to manufacture these profiles is steel and may be of various types with different properties can be classified in tables AISI ASTM, and EN standards. These structures are assembled with profiles of ductile steel (S355, ST52, etc.), low carbon content (from 0.16 % and 0.18 %) giving it excellent weldability once conformed to cold, such steel has a yield strength between 300 and 400 MPa and tensile strength of 500 to 600 MPa. The type of cold forming work to obtain the profiles are made by profiling technique. The mechanical properties are certified according to AISI, ASTM and EN standards. There are various systems for storage structure, such as, drive-in/drive-through structures, picking type structures, support structures pallet and structures with automated systems, according the business entities that wish to its warehouses. The standard that is used for the design of this type of structures, is EN 15512:2009 European Standards, where in this thesis will take into account parts of this standard and may also have the need to use other standards that EN 15512:2009 specify.

Finite Elements Simulations of assembled elements to build a spatial connection were performed with high order non-linear geometric and material meshes, having the results for the bending moment versus rotational angle of the connection compared with specific literature.

| | |
|---|-----------|
| Lista de Tabelas | iv |
| Lista de Figuras | v |
| Nomenclatura | ix |
| 1 Estado Da Arte | 1 |
| 1.1 As Origens do Armazenamento | 1 |
| 1.2 Surgimento dos sistemas de armazenamento industriais | 2 |
| 1.3 Sistemas de Armazenamento Industrial | 2 |
| 1.3.1 Paletização | 2 |
| 1.3.1.1 Convencional | 2 |
| 1.3.1.2 <i>Drive-in/Drive Through</i> | 4 |
| 1.3.1.3 Dinâmico e <i>Push-Back</i> | 4 |
| 1.3.1.4 Autoportante | 5 |
| 1.3.1.5 Automático | 5 |
| 1.3.2 Picking | 6 |
| 1.3.3 Cantiléver | 7 |
| 1.3.4 Estantes simples | 7 |
| 1.3.5 Arquivo | 7 |
| 1.3.6 Plataformas | 8 |
| 1.4 Paletes | 8 |
| 1.5 Trabalhos relacionados com estudos sobre ligações por encaixe | 9 |
| 1.6 Ligações Semi-Rígidas | 10 |
| 2 Objetivos e Organização do Trabalho | 11 |
| 2.1 Objetivos do Trabalho | 11 |
| 2.2 Organização do Trabalho | 11 |
| 3 Revisão Bibliográfica e Modelos de dano | 13 |
| 3.1 Introdução | 13 |
| 3.2 Ensaio de Tração Uniaxial | 13 |
| 3.2.1 Curva Tensão-extensão nominal | 13 |
| 3.2.1.1 Resistência do Material | 15 |
| 3.2.1.2 Tensão de cedência | 16 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.1.3 | Tensão de rotura | 17 |
| 3.2.1.4 | Resiliência | 17 |
| 3.2.1.5 | Tenacidade | 18 |
| 3.2.2 | Curva da tensão-deformação verdadeira | 19 |
| 3.3 | Teoria da Plasticidade | 21 |
| 3.3.1 | Critérios de Plasticidade | 21 |
| 3.3.1.1 | Critério de Tresca | 21 |
| 3.3.1.2 | Critério de von-Mises | 22 |
| 3.3.2 | Modelos de Plasticidade | 23 |
| 3.3.2.1 | Plasticidade Perfeita | 23 |
| 3.3.2.2 | Plasticidade com encruamento linear | 24 |
| 3.3.2.3 | Plasticidade com encruamento não linear | 25 |
| 3.3.3 | Encruamento | 25 |
| 3.4 | Teoria do Método dos Elementos Finitos | 26 |
| 3.4.1 | O que é o MEF? | 26 |
| 3.4.2 | Revisão Histórica | 26 |
| 3.4.3 | Programas de simulação numérica | 27 |
| 3.4.4 | Tipos de elementos finitos | 28 |
| 3.4.5 | Análise de uma simulação numérica | 29 |
| 3.4.6 | Equações genéricas do MEF | 29 |
| 3.4.7 | Elementos finitos e suas características | 29 |
| 4 | Ensaaios Experimentais | 33 |
| 4.1 | Introdução | 33 |
| 4.2 | Parte I - Ensaaios Experimentais para a caracterização do material | 33 |
| 4.2.1 | Procedimentos experimentais | 34 |
| 4.2.1.1 | Fase I - Conceção dos provetes | 34 |
| 4.2.1.2 | Fase II - Preparação dos provetes | 35 |
| 4.2.1.3 | Fase III - Preparação dos Equipamentos utilizado nos ensaios | 35 |
| 4.2.1.4 | Fase IV - Tratamento de dados e Resultados | 36 |
| 4.3 | Parte II - Ensaaios Experimentais das ligações por encaixe | 41 |
| 4.3.1 | Norma EN 15512:2009 | 41 |
| 4.3.2 | Procedimentos Experimentais | 42 |
| 4.3.2.1 | Fase I - Montagem dos ensaios | 44 |
| 4.3.2.2 | Fase II - Preparação dos ensaios | 45 |
| 4.3.3 | Ensaio A2.5 para medição da folga das ligações | 49 |
| 4.3.3.1 | Tratamento de dados e Resultados | 49 |
| 4.3.4 | Ensaio A2.4 para estudo da resistência e rigidez das ligações | 54 |
| 4.3.4.1 | Preparação dos ensaios - Outros Aspectos | 54 |
| 4.3.4.2 | Sobre a Carga Aplicada | 55 |
| 4.3.4.3 | Tratamento de dados e resultados | 56 |
| 4.3.5 | Modos de Falha | 60 |
| 4.3.6 | Discussão de Resultados | 63 |
| 5 | Modelo de Simulação Numérica | 65 |
| 5.1 | Introdução | 65 |
| 5.2 | Sobre o Abaqus | 65 |
| 5.2.1 | Etapas do funcionamento do Abaqus | 65 |
| 5.3 | Modelos de Simulação Numérica | 66 |
| 5.3.1 | Procedimentos (Pré-Processamento) | 66 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.1.1 | Modelação | 66 |
| 5.3.1.2 | Discretização: Construção da Malha | 67 |
| 5.3.1.3 | Material Para o Modelo Numérico | 68 |
| 5.3.1.4 | Montagem do Modelo | 69 |
| 5.3.1.5 | Etapas da Simulação | 70 |
| 5.3.1.6 | Interações de Contatos e Condições Fronteira | 73 |
| 5.3.1.7 | Simulação das Garras | 76 |
| 5.3.1.8 | Aplicação da Força | 76 |
| 5.3.2 | Resultados (Pós-processamento) | 77 |
| 5.3.3 | Discussão de resultados | 82 |
| 6 | Conclusões Finais e Possíveis Trabalhos Futuros | 83 |
| | Referências Bibliográficas | 85 |
| | Apêndice | 87 |
| | Anexos | 93 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Nome dos provetes ensaiados e suas condições iniciais. | 37 |
| 4.2 | Valores médios da curva nominal das propriedades mecânica do material . . | 38 |
| 4.3 | Valores médios da curva verdadeira das propriedades mecânica do material | 38 |
| 4.4 | Propriedades material | 39 |
| 4.5 | Medidas dos provetes testados | 43 |
| 4.6 | Folgas Médias | 53 |
| 4.7 | Resultados dos ensaios das ligações | 58 |
| 4.8 | Rigidez das Ligações | 59 |
| 4.9 | Expressões $M(\theta)$ resultante dos gráficos médios das curvas experimentais . | 60 |
| 5.1 | Comparação Resultados dos ensaios com Resultados do Modelo Numérico | 81 |
| 5.2 | Comparação da Rigidez Ensaio experimentais com a rigidez das simulações das ligações | 82 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Estantes convencionais para armazenamento de paletes | 3 |
| 1.2 | Componentes que constituem a estrutura convencional de estantes de pale- tização. | 3 |
| 1.3 | Sistema: (a) <i>Drive-in</i> , (b) <i>Drive-Through</i> | 4 |
| 1.4 | (a)Sistema Dinâmico (b)Sistema Push-Back. | 5 |
| 1.5 | Sistema Autoportante. | 5 |
| 1.6 | Sistemas Picking. | 6 |
| 1.7 | Sistema cantiléver. | 7 |
| 1.8 | Exemplo de Plataforma | 8 |
| 1.9 | Dimensões das europaletes | 8 |
| 1.10 | Artigos que envolvem estudos sobre ligações por encaixe. | 9 |
| 1.11 | Ligações por encaixe: (a)3 garras, (b)4 garras. | 10 |
| 3.1 | Gráfico Tensão-Extensão típico de um material dúctil. [8] | 14 |
| 3.2 | Tipos de fraturas: (a) Fratura frágil, (b) Fratura completamente dúctil, (c) Fra- tura dúctil. [8] | 15 |
| 3.3 | Tipos de cedência: (a) com patamar de cedência; (b) sem patamar de cedên- cia [8] | 16 |
| 3.4 | Patamar de cedência ou deformação de Lüders. [8] | 16 |
| 3.5 | Determinação do modulo de resiliência através do gráfico | 18 |
| 3.6 | Determinação do modulo de tenacidade através do gráfico (a)para um mate- rial dúctil,(b) para um material frágil | 18 |
| 3.7 | Exemplo de um gráfico de comparação entre a Tensão-deformação nominal e verdadeira. | 19 |
| 3.8 | Representação gráfica dos critérios de plasticidade de Tresca e von Mises no estado biaxial de tensão | 23 |
| 3.9 | Modelo de plasticidade perfeita(material-elastico-perfeitamente plástico) . . . | 24 |
| 3.10 | Modelo de plasticidade com encruamento linear | 24 |
| 3.11 | Modelo de plasticidade com encruamento não linear | 25 |
| 3.12 | Representação gráfica do fenómeno de encruamento | 25 |
| 3.13 | Representação do processo de discretização num modelo ou domínio por elementos finitos [11] | 28 |
| 3.14 | Elementos finitos:(a) unidimensional (b) bidimensional (c) tridimensional [11] | 28 |
| 3.15 | Elementos Finitos genéricos: (a)Triangular, (b)Retangular. [11] | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.16 | Representação genérica de um elemento axissimétrico [11] | 31 |
| 3.17 | Elementos finitos tridimensionais: (a)Hexaédrico de 8 nós, (b)tetraédrico de quatro nós, (c)pentaédrico de 6 nós, (d) elemento do tipo pirâmide. [11] | 31 |
| 3.18 | Representação do conceito de degeneração de um elemento tridimensional num elemento finito de superfície. [11] | 32 |
| 4.1 | Nomenclatura dos provetes para os ensaios de tração uniaxial | 34 |
| 4.2 | Desenho do provete rectangular. | 34 |
| 4.3 | Marcas Retangulares na área útil do provete | 35 |
| 4.4 | Equipamentos utilizados nos ensaios: (a) Máquina Universal Shimadzu 50kN-AG, (b) Vídeo Extensómetro Messphysic ME 46 NG | 35 |
| 4.5 | Ilustração do posicionamento do vídeo extensómetro para aquisição de imagem do provete | 36 |
| 4.6 | Antes e depois dos ensaios: (a) Provede inicial e provede após ser submetido ao ensaio, (b) Após o ensaio visto a partir da imagem captada pelo vídeoextensómetro | 36 |
| 4.7 | Gráfico tensão-deformação nominal resultante dos ensaios | 37 |
| 4.8 | Gráfico tensão-deformação verdadeira resultante dos ensaios | 38 |
| 4.9 | Curva tensão-deformação verdadeira para ambas orientações de laminagem e os respetivos gráficos da equação de Swift. | 40 |
| 4.10 | Nomenclatura dos provetes das ligações | 42 |
| 4.11 | Esquema de montagem dos ensaios das ligações por encaixe. [13] | 42 |
| 4.12 | Dimensões genéricas dos componentes | 43 |
| 4.13 | Equipamentos utilizados nos ensaios | 44 |
| 4.14 | Montagem dos ensaios das ligações por encaixe. | 45 |
| 4.15 | Colocação das marcas óticas nas vigas | 46 |
| 4.16 | Encaixe da viga no pilar | 47 |
| 4.17 | Calibração do vídeoextensómetro | 47 |
| 4.18 | Ensaio A2.5: Seta a vermelho - Compressão; Seta a verde - Tração | 49 |
| 4.19 | Gráfico genérico para a determinação da folga em ligações por encaixe. [13] | 50 |
| 4.20 | Cálculo do ângulo através dos declives das retas e determinação do centro médio | 51 |
| 4.21 | Ilustração da medição do ângulo através da expressão A.8 da norma EN 15512:2009 | 52 |
| 4.22 | Ilustração da medição da folga. Esquerda: Força vs Deslocamento; Direita: Momento vs Rotação | 52 |
| 4.23 | Ensaio A2.4 | 54 |
| 4.24 | Comportamento da força | 55 |
| 4.25 | Determinação de um gráfico corrigido $M_n(\theta_n)$ | 57 |
| 4.26 | Cálculo da rigidez kn | 58 |
| 4.27 | Determinação do gráfico médio | 60 |
| 4.28 | Modo de falha P47VF903G | 61 |
| 4.29 | Modo de falha P75VC903G | 61 |
| 4.30 | Modo de falha P100VC903G | 61 |
| 4.31 | Modo de falha P100VC903G | 62 |
| 4.32 | Modo de falha P100VC904G | 62 |
| 4.33 | Modo de falha P100VF903G | 62 |
| 4.34 | Modo de falha P114LVC903G | 63 |
| 5.1 | Etapas da Simulação. | 66 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.2 | Partes do Modelo | 67 |
| 5.3 | Discretização do Modelo (Construção da Malha) | 67 |
| 5.4 | Dados da caracterização do material | 68 |
| 5.5 | Montagem Geral do Modelo. | 69 |
| 5.6 | Montagem de todos os provetes | 70 |
| 5.7 | Definição da Etapa | 71 |
| 5.8 | Condições iniciais da etapa | 71 |
| 5.9 | Incrementação da etapa | 72 |
| 5.10 | Definição de Variáveis de saída | 72 |
| 5.11 | Partições no pilar e viga para definir áreas de contato | 73 |
| 5.12 | Áreas de contato dos provetes | 73 |
| 5.13 | Condições de Fronteira | 74 |
| 5.14 | Elementos "Weld" | 75 |
| 5.15 | Encastramento do Pilar | 75 |
| 5.16 | Simulação das Garras | 76 |
| 5.17 | Aplicação da Força | 76 |
| 5.18 | P47VF904G | 77 |
| 5.19 | P75VC903G | 77 |
| 5.20 | P83SVC903G | 78 |
| 5.21 | P100VC903G | 78 |
| 5.22 | P100VC904G | 79 |
| 5.23 | P100VF903G | 79 |
| 5.24 | P114LVC903G | 80 |
| 5.25 | Determinação do ângulo de rotação através da equação 4.7 | 80 |
| 5.26 | Determinação do ângulo através do método dos declives. | 81 |

| | |
|-----------------------|---|
| A | Alongamento após a fratura |
| F | Força |
| ν | Coefficiente de Poison |
| σ_r | Tensão de rotura |
| σ_c | Tensão limite de escoamento ou tensão de cedência |
| $\bar{\sigma}$ | Tensão verdadeira |
| σ_{eqT} | Tensão equivalente do critério de Tresca |
| σ_{eqVM} | Tensão equivalente do critério de von Mises |
| $\bar{\sigma}_r$ | Tensão verdadeira no ponto de força máxima |
| τ_{oct} | Tensão de corte octaedral |
| τ_{mx} | Tensão máxima de corte |
| ε_1 | Deformação longitudinal |
| ε_2 | Deformação transversal 2 |
| ε_3 | Deformação transversal 3 |
| ε_c | Deformação do limite de elasticidade ou de cedência |
| ε_f | Deformação nominal na fratura |
| $\bar{\varepsilon}$ | Deformação verdadeira |
| ε_f | Deformação no ponto de fratura |
| $\bar{\varepsilon}_r$ | Deformação verdadeira no ponto de força máxima |
| A_0 | Área inicial |
| A_f | Área no ponto da fratura |

| | |
|---------------|--|
| A_i | Área instantânea na zona de deformação plástica uniforme |
| A_r | Área da secção no ponto de força máxima |
| D | Diâmetro final instantâneo do provete circular |
| D_0 | Diâmetro inicial do provete circular |
| E | Módulo de Elasticidade |
| F_{max} | Força máxima suportada pelo provete |
| G | Modulo de elasticidade transversal ou módulo de corte |
| J_2 | Segundo invariante do tensor desviador |
| l_f | Comprimento final |
| q | Redução da área na zona da fratura |
| U_r | Módulo de Resiliência |
| U_T | Módulo de Tenacidade |
| Δl | Variação de comprimento |
| σ | Tensão nominal |
| ε | Deformação nominal de Engenharia |
| l_0 | Comprimento inicial |

1.1 As Origens do Armazenamento

A origem do armazenamento remonta aos tempos primitivos onde o Homem primitivo armazenava os seus alimentos, em períodos de abundância, para depois os fornecer e consumir. Hoje em dia o armazenamento envolve muito mais para além do que o simples ato de guardar. À medida que a nossa civilização foi evoluindo o armazenamento ficou mais diversificado e mais complexo. Por palavras mais simples, um armazém é um local onde os produtos ficam depositados em segurança e bom estado, gerando lucros no caso de haver comércio. O armazenamento tem evoluído desde os tempos dos antigos espigueiros até ao armazenamento de produtos manufaturados, nas transportadoras, na comercialização e na produção.

É referido num capítulo da Bíblia do livro do Génesis¹ uma história de um homem chamado José, no antigo Egito, dado como o herói da época, porque mostrava como se armazenava excedentes de comida, derivadas das colheitas agrícolas, durante os tempos de fome. Para além disso, segundo relata a história, os armazéns eram fontes de emergência contra a fome, em situações de guerra por exemplo, ou quando não haviam colheitas.

Quando se desenvolveram os sistemas de transportes os armazéns tornaram-se terminais importantes na maioria das terras e rotas comerciais marítimas. A título de exemplo, na cidade de Veneza, durante a Idade Média, os terminais de armazenamento estavam bem estabelecidos. Veneza tornou-se então o maior centro de comércio por ser uma cidade bem posicionada entre a Europa Ocidental e o Oriente. Ao contrário dos armazenamentos de que a Bíblia nos fala, que eram propriedade dos reis ou governos da época, este exemplo de Veneza servia para gerar lucros para pequenos grupos de comerciantes, as chamadas alianças comerciais. [1]

¹Aqui não é referido o número do capítulo nem dos versículos, pois o capítulo que fala desta história do livro dos Génesis pode não ser o mesmo entre as diferentes edições da Bíblia

1.2 Surgimento dos sistemas de armazenamento industriais

Os sistemas de armazenamento industriais surgiram em 1930. A sua estrutura era composta por cantoneiras de aço conformados a frio para os pilares, apresentando perfurações em todo o seu comprimento. Na altura os projetistas utilizavam ligações aparafusadas nesses sistemas por conterem uma variedade de configurações possíveis. No entanto esse tipo de colunas usadas garantiam uma baixa resistência à torção, e para garantir a estabilidade da estrutura eram necessários muitos contraventamentos. Por essa razão e pelo o facto da utilização de parafusos obterem um custo elevado, começaram a ser desenvolvidas "garras dentadas" restringindo os furos nos pilares. Assim a montagem tornou-se mais fácil e rápida. Foram também criadas posteriormente pilares do tipo U enrijecido, que a dado momento apresentavam uma dificuldade para instalar os contraventamentos, e por essa razão foram criadas outros tipos de pilares ou colunas, como por exemplo as de secção do tipo rack ou garrafa, em que as suas flanges facilitavam a fixação dos contraventamentos. [2]

1.3 Sistemas de Armazenamento Industrial

Os sistemas de armazenamento industrial do tipo *rack* são estruturas muito compactas, de montagem fácil e de baixo custo. São estruturas compostas por perfis habitualmente conformados plasticamente a frio, de variadas secções. As colunas ou pilares possuem perfurações ao longo de seu comprimento para possibilitar o encaixe de vigas que podem ser também de variadas formas, tornando assim, um estudo analítico do comportamento bastante complexo. [2]

Nesta secção descrevemos, resumidamente os diferentes tipos de armazenamento industriais que existem hoje em dia e quais as suas características.

Os diferentes tipos de armazenagem são os seguintes:

- **Paletização:** para cargas pesadas, direcionado para arrumação de paletes. Existem estruturas convencionais, compacta *drive-in/drive through*, autoportante, bases móveis, dinâmico e automático.
- **Picking:** para cargas ligeiras e médias, direcionado para empresas com sistema de *Picking* automático, *Picking* Dinâmico, *Picking* manual e *Picking* Textil.
- **Arquivos:** para otimização de espaço, do tipo Rolante/Deslizante, automático e convencional.
- **Cantiléver:** para cargas longas e volumosas.
- **Estantes Simples:** para todo tipo de espaços, com sistema de cantoneira perfurada, estantes de encaixe, estantes sem parafuso e armários estante.
- **Plataformas:** para aproveitamento do espaço, pisos metálicos.

1.3.1 Paletização

1.3.1.1 Convencional

A Figura 1.1 apresenta um sistema convencional de paletização. Este sistema de estantes são usadas para facilitar o descarregamento das mercadorias sem de se ter a neces-

sidade de movimentar outras paletes, onde os produtos paletizados se encontram devidamente identificados o que facilita no controlo do stock. Normalmente junto às paredes do armazém estes são montados com um bastidor simples e nas zonas centrais do armazém são montados com dois bastidores ligados entre si através de separadores.



Figura 1.1: Estantes convencionais para armazenamento de paletes

Os componentes que constituem este tipo de estruturas são os bastidores, constituído por dois pilares contraventados por travessas dispostos na diagonal, e que são fixados no piso do armazém, através de placas bases, os pilares são os que contem as ranhuras e furos que servem para permitir o encaixe das vigas, colocar o freio de segurança entre outros componentes. As vigas são os elementos horizontais que suportam o peso dos produtos armazenados e são encaixados através de conectores, soldados nas extremidades da viga e que contem os dentes para o encaixe nas ranhuras dos pilares. [3] Estes tipos de encaixes, são as ligações viga+pilar que mais à frente, nesta tese, serão o ponto central e que se irá estudar com mais rigor.

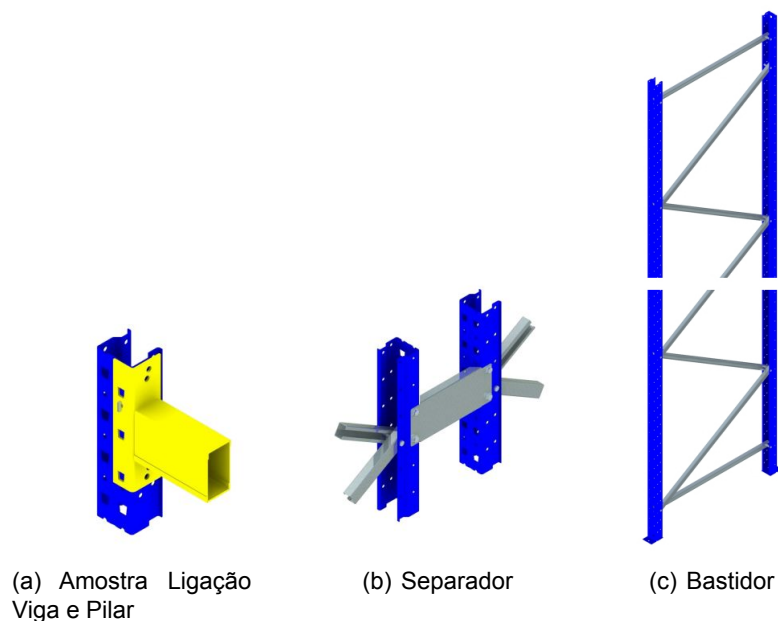


Figura 1.2: Componentes que constituem a estrutura convencional de estantes de paletização.

Existem variados perfis de viga, de modo a satisfazer as necessidades de armazenamento em dimensão como em carga. Também neste tipo de sistemas de armazenamento pode ser adaptado os sistema para *picking* manual.[3] A figura 1.2 mostra alguns componentes deste tipo de estrutura.

1.3.1.2 Drive-in/Drive Through

Como o próprio nome indica, nestes sistemas as empilhadoras circulam por espaços dentro da própria estrutura, reduzindo os corredores centrais entre as estruturas. O sistema *Drive-in* obedece à regra LIFO (*Last-in/First-out*), ou seja, o último a entrar é o primeiro a sair, enquanto que o sistema *Drive-Through* obedece à regra FIFO (*First-in/First-out*), ou seja, o primeiro a entrar pode ser o primeiro a sair; isto deve-se a um apenas ter um lado de acesso às cargas e o outro ter dois lados de acesso às cargas respetivamente. São sistemas que possuem algumas desvantagens, por exemplo, no caso de se pretender alcançar as paletes que estão no meio da estrutura é necessário deslocar primeiro as que estão à frente, e em comparação com a estante de paletes convencional o tempo de operação é mais reduzido. Como vantagens tem um armazenamento muito compacto graças ao reduzido número de corredores centrais e permite, ao mesmo tempo, armazenar o mesmo número de paletes do que uma estante convencional em metade do espaço, o investimento é mais reduzido. Estes sistemas são mais indicados para armazenamento em câmaras frigoríficas e na indústria de bebidas. [4] A figura 1.3 mostra a diferença entre o sistema *Drive-in* e o sistema *Drive-Through*.

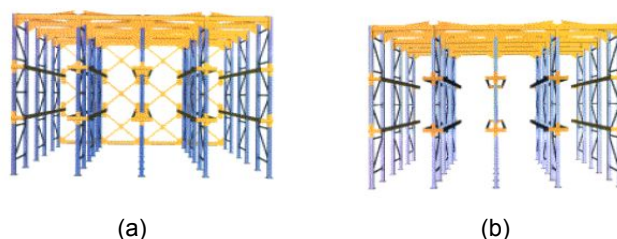


Figura 1.3: Sistema: (a)*Drive-in*, (b)*Drive-Through*

1.3.1.3 Dinâmico e Push-Back

Outra solução é o sistema dinâmico, que pode ser utilizado em qualquer ramo da indústria ou logística, em que requer um grande manuseamento das paletes segundo o princípio FIFO (*First-in/First-out*) e o *Push-Back* é um sistema utilizado para o armazenamento do mesmo tipo de produtos, permitindo armazenar até quatro paletes em profundidade por cada nível usando o princípio de LIFO (*Last-in/First-out*). O sistema de funcionamento dinâmico consiste numa estrutura que tem montados esteiras de rolos ligeiramente inclinadas de modo a permitir um escorregamento suave das paletes por efeito da gravidade e com uma velocidade controlada até ao ponto de recolha. As vantagens que se podem encontrar no sistema dinâmico é o de garantir uma grande economia em espaço e no tempo de manuseamento das paletes, permitindo um rigoroso controlo de stock. O sistema de *Push-Back* consiste em colocar as paletes em cima de um carro, montado na estrutura das estantes, deslocando-se por empurrão das paletes, ficando estas ao mesmo nível à exceção da última. [3]

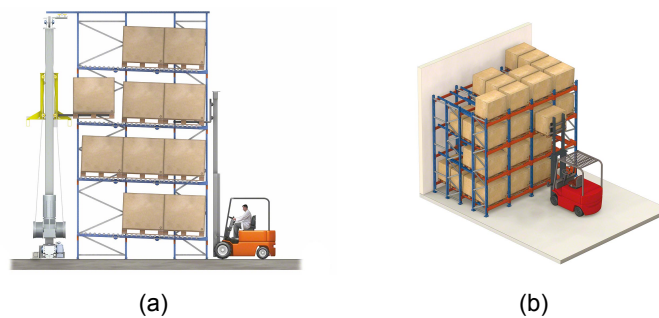


Figura 1.4: (a) Sistema Dinâmico (b) Sistema Push-Back.

1.3.1.4 Autoportante

A paletização autoportante destina-se para o armazenamento em grandes espaços, podendo adaptar os sistemas falados neste capítulo, ou seja, sistemas convencionais, *Drive-in/Drive Through*, cantiléver, etc. A figura 4.8 mostra um exemplo deste sistema. Estas estantes são de grandes dimensões preparadas e aproveitadas para suportar a cobertura e o revestimento do armazém.

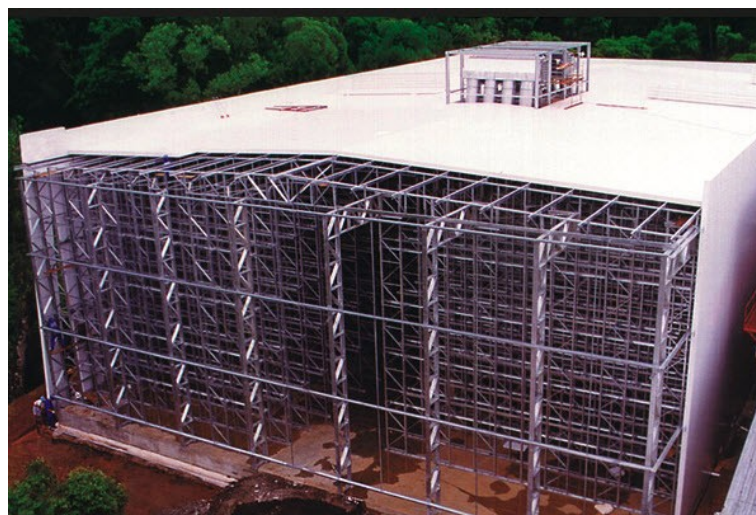


Figura 1.5: Sistema Autoportante.

Este tipo de estrutura depende de algumas forças externas como a força do vento, sobrecarga da neve, sismos, etc. A altura destes armazéns depende muito das limitações que as normas locais impõem, da capacidade de elevação dos empilhadores ou dos transelevadores, podendo-se construir armazéns autoportantes com mais de 30 metros de altura. [5]

1.3.1.5 Automático

O sistema automático consiste na montagem de trans elevadores nos corredores das estantes onde estes se deslocam. Os trans elevadores são criados para automatizar a armazenagem das paletes e são dirigidos através de software de gestão que vai coordenar todos os movimentos e assim garantir uma boa gestão de stocks. Este tipo de sistemas são indicados para armazéns onde as condições de trabalho são difíceis ou até impossíveis

para a ação do ser humano, como por exemplo no caso de espaços com temperaturas de congelação em armazéns frigoríficos, humidades extremas, etc. Os transelevadores são dimensionados e programados consoante as necessidades que o cliente pretenda para o armazém, quanto a alturas de construção, tempos de ciclos de armazenamento, às dimensões e capacidade de carga. [3]

1.3.2 Picking

Os tipos de sistemas picking disponíveis são, o manual, o dinâmico, têxtil e automático. No picking manual a mercadoria movimenta-se manualmente e estas estantes podem atingir até 20 metros de altura, tendo a possibilidade de se colocar passadiços para ter acesso a toda a altura das estantes. O sistema dinâmico assemelha-se ao convencional de paletização só que este está direcionado para armazéns com grande capacidade e diferenciação de produtos de picking, permitindo, um maior numero de linhas a preparar sem a movimentação dos trabalhadores. No setor têxtil também é usado este sistema e permite armazenar todo o tipo de cargas.



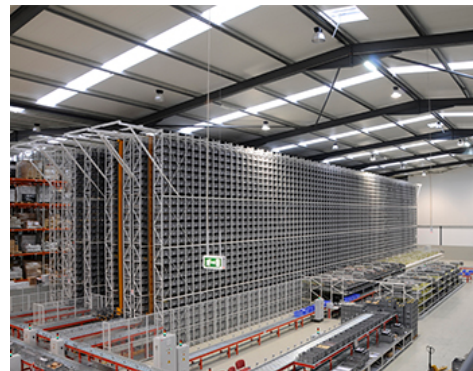
(a) Picking Manual



(b) Picking Dinâmico



(c) Picking Têxtil



(d) Picking Automático

Figura 1.6: Sistemas Picking.

O sistema automático de picking também é semelhante ao convencional para paletes, e baseia-se em armazenar caixas ou bandejas circulando entre as estantes nos corredores centrais, trans elevadores. A função destes é aproximar uma caixa retirada das estantes até ao colaborador, este quando termina o seu trabalho devolve-a ao trans elevador que a vai arrumar nas estantes. A zona de automatização e manipulação, é formada por transportadores, e fica localizada num topo ou lateral da estante. Todo o sistema automático é

manipulado por um software de gestão onde estão registados todos os produtos existentes no armazém, mantendo atualizado um inventário com a máxima rentabilidade do espaço disponível e facilidade de acesso a todas as caixas armazenadas. [3]

1.3.3 Cantiléver

As estruturas de cantiléver são estruturas próprias para armazenar cargas longas e volumosas. Estas estruturas são de fácil montagem e desmontagem, suportam grandes capacidades de carga e podem permitir grande altura. Os Cantiléver são constituídos por bases, em perfis IPE verticais e horizontais, e vigas que podem ser tubos retangulares ou perfis IPN. Os componentes podem ser diferentes tipos e formas diferentes consoante fabricante. As bases podem ser simples que normalmente são colocadas nas paredes e podem ser duplas para dar acesso a cargas e descargas dos dois lados da estrutura e são aparafusadas no piso através de um bucha metálica para maior segurança. [3]

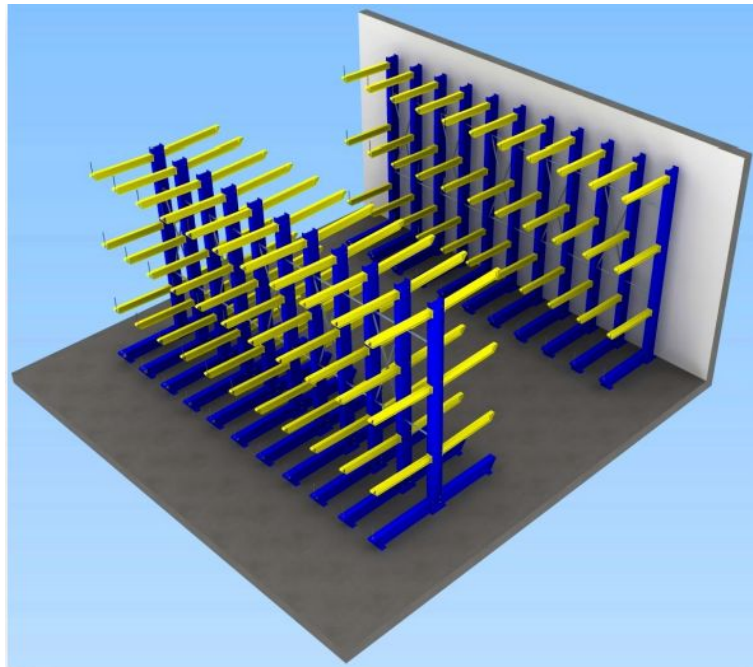


Figura 1.7: Sistema cantiléver.

1.3.4 Estantes simples

Existem alguns tipos de estantes simples, como de cantoneira perfurada, estantes para arquivos, cantoneira de encaixe, estantes de encaixe, etc. Estes tipos de estantes são direcionados para armazenagem manual de cargas médias e ligeiras tem como vantagens a fácil montagem dos elementos. [3]

1.3.5 Arquivo

Na área de armazenagem de arquivos existem o sistema rolante/deslizante, que se destinam ao arquivo de livros e documentos, o sistema automático e convencional também estão presentes neste tipo armazenamento.

1.3.6 Plataformas

As plataformas são estantes que criam mais espaços de armazenamento, podem servir para vestiários, escritórios entre outros possíveis. É uma solução para se poder aproveitar o espaço disponível. Podem ter mais que um piso, podendo os colaboradores circular sobre as plataformas sendo o acesso por escadas, e podem ser montadas de modo a permitir uma fácil circulação de empilhadoras, equipamentos de cargas, etc. É de fácil montagem, podendo adaptar-se às necessidades do cliente, graças à grande possibilidade de se poder ter varias dimensões, tipos de piso, sistemas de construção etc. A figura 1.8 mostra um exemplo de plataforma. [5]

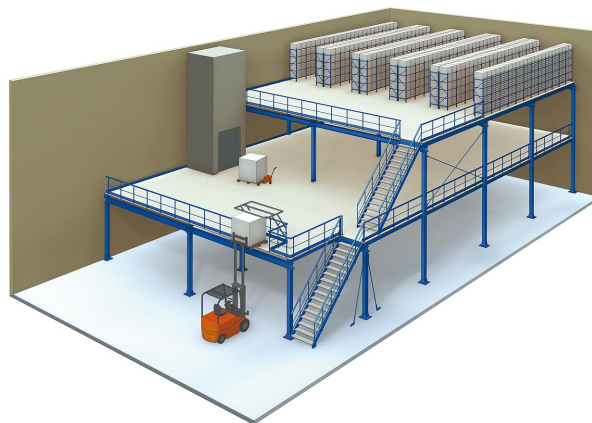


Figura 1.8: Exemplo de Plataforma

1.4 Paletes

As paletes são usadas para depositar as mercadorias para depois serem armazenadas. Os tipos mais comuns de paletes são do tipo europaletes com dimensões *standards* de 800 x 1200 ,1000 x 1200 e 1200 x 1200, com dimensões em milímetros, sendo estas manipuladas no lado mais estreito para se poder assentar os apoios das paletes nas vigas das estantes industriais. A figura 1.9 mostra as dimensões padrão das europaletes,

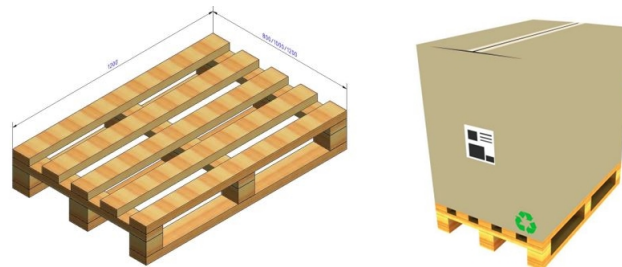


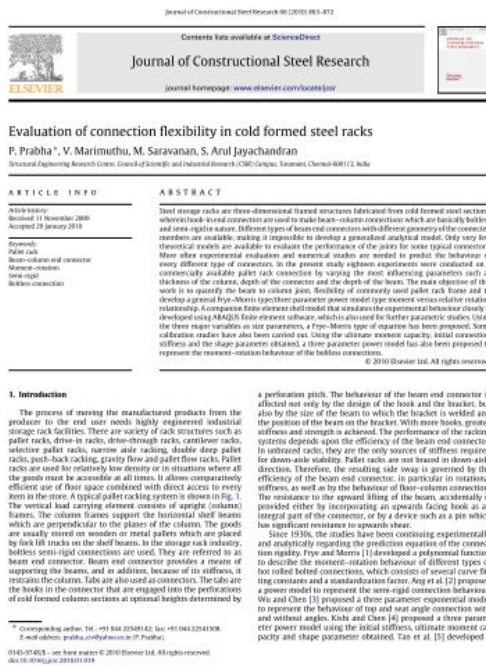
Figura 1.9: Dimensões das europaletes

Existem outros tipos de paletes que poderão ser apresentados, para se desenvolver uma solução de armazenagem adequada, levando assim a um estudo para cada caso em particular. [6]

1.5 Trabalhos relacionados com estudos sobre ligações por encaixe

Existem artigos publicados em que envolvem estudos sobre ligações por encaixe de estantes de armazenamento.

Um desses estudos foi efetuado no centro de pesquisa de engenharia estrutural de Tararani, na Índia, por P. Prabha, V. Marimuthu, M. Saravanan e S. Arul Jayachandran (2010), onde analisaram dezoito provetes de ligação viga-coluna, usados no mercado, variando as características dos perfis, como a espessura, a profundidade do pilar e da viga.



(a)



(b)

Figura 1.10: Artigos que envolvem estudos sobre ligações por encaixe.

O principal objetivo do estudo foi o de quantificar a ligação, viga+coluna, verificar a flexibilidade da estrutura e propôr um modelo analítico com base no polinômio genérico de Frye-Morris de modo a relacionar esse modelo com os gráficos experimentais momento rotação $M(\theta)$. Os autores desenvolveram um modelo de simulação numérica, com o uso do programa Abaqus-Simulia®, que posteriormente foram utilizados para estudos paramétricos.

Um outro trabalho, desenvolvido por Andrew T. Sarawit e Teoman Peköz (2003) (figura 1.10 (b)), e tendo sido este, um projeto de pesquisa apoiado pelo AISI (American Iron and Steel Institute) e pelo RMI (Rack Manufacturers Institute) em que o objetivo de deste projeto era o de verificar e aperfeiçoar as especificações do RMI e AISI. [7]

Sérgio Alves de Miranda (2011), desenvolveu um trabalho em que o principal objetivo era o de avaliar o comportamento, o modo de falha e a rigidez das ligações viga+coluna de sistemas de armazenamento porta paletes, desenvolvendo modelos numéricos que tem por base o método de elementos finitos. Os resultados numéricos que se obtiveram neste trabalho são comparados com os modos de falha, com a carga máxima da ligação e valores de rigidez baseados em testes laboratoriais de outros autores. Também foram avaliadas as

prescrições do RMI para o cálculo da rigidez das ligações viga+coluna e fazendo uma análise à metodologia de determinação dos valores segundo as prescrições do RMI. [2] Muitos outros autores, são referidos nesta obra, acerca de estudos efetuados sobre ligações em estantes industriais bem como outros sistemas existentes.

1.6 Ligações Semi-Rígidas

As ligações do tipo aparafusado ou não aparafusados podem ser classificados de três tipos: flexíveis, rígidas, semi-rígidas. As ligações flexíveis são aquelas que entre os seus elementos a conetar têm um comportamento estrutural semelhante ao de uma rótula, não gerando qualquer momento resistente. As ligações rígidas são aquelas que tem uma rigidez suficiente de modo não exista rotação ou rotação quase nula entre os seus componentes para qualquer carga que se aplique até atingir o momento máximo da ligação. As ligações semi-rígidas são aquelas que são intermediárias das condições acima referidas. [2]

A ligação por encaixe em sistemas *rack* de armazenamento são consideradas semi-rígidas segundo autores de estudos efetuados descrito na secção 1.5. Consiste numa viga, que pode ter secção variável consoante do que se pretende para a estrutura, sendo soldado nas suas extremidades dois conectores que contém as garras para o encaixe no pilar podendo ser em numero 3, 4 ou até 5 dependendo do fabricante. O pilar contém os furos para permitir o encaixe e que também se utiliza um pino de segurança que serve para evitar o desencaixe da viga de baixo para cima. A figura 1.11 apresenta ligações por encaixe e que será objeto de estudo nesta tese. As ligações por encaixe dos sistemas de armazenamento industrial são as que melhor apresentam as características de uma ligação semi-rígida.

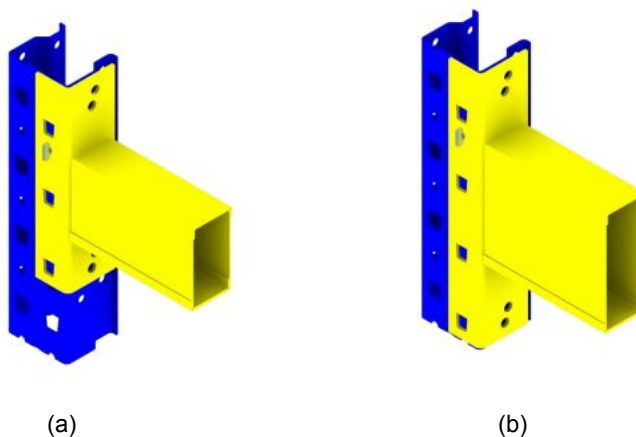


Figura 1.11: Ligações por encaixe: (a)3 garras, (b)4 garras.

2.1 Objetivos do Trabalho

Os objetivos desta dissertação são os de analisar o comportamento mecânico das ligações por encaixe em estantes industriais convencionais quanto à sua relação constitutiva na relação força-deslocamento ou momento-rotação, a qual deixa de ser linear para passar a apresentar uma característica não linear como resultado da cedência plástica de propagação mais ou menos extensa na zona da união em estudo. A fim de investigar com pormenor estes mecanismos de dano serão testadas amostras de provetes do conjunto Viga+Pilar fornecidos pela empresa Kind do Grupo PréBuild, situada em Oiã, Portugal, caracterizar e verificar experimentalmente o comportamento das ligações seguindo os ensaios A.2.4 da norma EN 15512:2009. Nesta tese foi proposto desenvolver um modelo de simulação numérica, através do software comercial Abaqus-Simulia®, que melhor represente o comportamento das ligações em estudo quanto às características já referidas, para comparação dos resultados obtidos nos ensaios.

2.2 Organização do Trabalho

Este trabalho de dissertação está estruturado em 6 capítulos:

- **Capítulo 1:** Refere-se ao estado da arte, apresenta-se como introdução do trabalho, onde se apresenta uma abordagem a alguns sistemas existentes deste tipo de estruturas de perfis, laminados a frio, para armazenamento industrial, uma referência aos trabalhos realizados em que se desenvolveram estudos sobre ligações por encaixe.
- **Capítulo 2:** Objetivos e organização da dissertação.
- **Capítulo 3:** Será feita aqui uma breve revisão bibliográfica necessária a esta tese com abordagem de alguns conceitos no âmbito da mecânica estrutural e sobre o método dos elementos finitos que os programas comerciais tem por base do seu funcionamento.
- **Capítulo 4:** Este capítulo está dividido em duas partes, onde serão apresentados os procedimentos e analisados os resultados dos ensaios experimentais dos provetes

retangulares(Parte I) com o objetivo de caracterizar o material quanto às suas propriedades mecânicas para ser criado e posteriormente usado um modelo de plasticidade para as simulações numéricas. Numa segunda parte serão apresentados os ensaios experimentais das ligações por encaixe recorrendo à norma EN 15512:2009, dos provetes das ligações por encaixe(viga+coluna) fornecidos pela empresa Kind, que é o principal enfoque desta dissertação de modo poder-se ter uma previsão do comportamento deste tipo de ligações, chegando aos gráficos médios Momento-Rotação de modo a se poder determinar a equação($M(\theta)$) e as características de resistência, para cada tipo de ligação testado.

- **Capítulo 5:** Neste capítulo será proposto o modelo de simulação numérica, realizado no software comercial Abaqus-Simulia[®] que melhor exprima o comportamento das ligações durante os ensaios A2.4 da norma EN 15512:2009 do capítulo 4 e serão comparados os resultados.
- **Capítulo 6:**Aqui serão apresentadas conclusões dos resultados obtidos e apresentação de possíveis trabalhos futuros.

3.1 Introdução

Neste capítulo será feita uma breve revisão bibliográfica necessária a esta tese. Como pontos fundamentais neste capítulo dá-se ênfase ao tema de ensaios de tração uniaxial, a teoria da plasticidade e uma abordagem ao método dos elementos finitos ou MEF.

3.2 Ensaio de Tração Uniaxial

O ensaio de tração uniaxial pode ser considerado como sendo um ensaio mecânico de uso universal na caracterização das propriedades mecânicas dos materiais. Os objetivos de um ensaio de tração uniaxial, consistem em quantificar as propriedades mecânicas essenciais ao projeto, como no controle da qualidade dos materiais na forma de produto acabado. Normalmente usam-se provetes de secção transversal circular(tipo varão), tendo a possibilidade de serem usadas com outra configuração. As dimensões que normalmente se usam para os provetes bem como o próprio procedimento do ensaio, estão normalizadas por instituições certificadas e especializadas em cada país, como exemplo temos as normas NP em Portugal, normas DIN na Alemanha, normas ABNT no Brasil, normas BS no Reino Unido ou normas ASTM dos EUA. O ensaio de tração uniaxial consiste em se aplicar uma força de tração, F , segundo o eixo de um provete fixado entre amarras da máquina de ensaio, sendo a velocidade de deformação constante e restrita a valores suficientemente baixos para não induzir alterações térmicas. A variação do comprimento de referencia é medida durante o ensaio, através de extensómetros(que podem ser do tipo indutivo e resistivo) e que são aplicados no provete, em simultâneo é também medido a força exercida pelo travessão da máquina de ensaios que tem montando uma célula de carga. [8]

3.2.1 Curva Tensão-extensão nominal

A curva tensão-extensão nominal é resultado de um ensaio de tração. A tensão nominal é calculada através da expressão

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

onde F , é a força aplicada na direção axial do provete e A_0 a área inicial da secção do provete.

A extensão nominal, e , corresponde à extensão linear média que provem da relação entre a variação do comprimento (Δl), na zona útil do provete e do comprimento inicial (l_0). A expressão que traduz a extensão nominal é

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (3.2)$$

A figura 3.1 representa um exemplo de gráfico tensão-extensão nominal resultante de ensaio de tração, que neste caso é de um material dúctil.

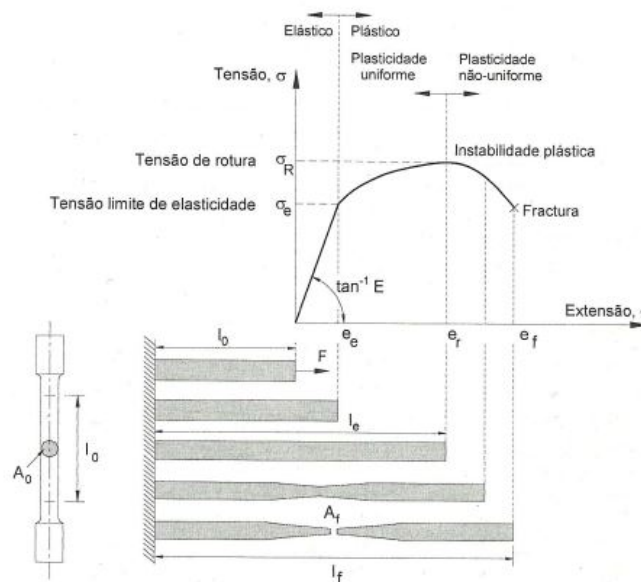


Figura 3.1: Gráfico Tensão-Extensão típico de um material dúctil. [8]

A região linear do gráfico é onde a tensão é proporcional à extensão, onde se pode aplicar a lei de Hooke. O declive da curva, na região linear, dá-nos o módulo de elasticidade ou módulo de Young. O ponto do fim da região linear elástica é onde o material atinge a tensão limite de elasticidade, iniciando-se aí a região plástica do material.

Na região plástica do material, o provete vai aumentar de comprimento em conformidade com a redução da área transversal, a tensão nominal vai crescer com a extensão, em virtude do encruamento do material conseguir superar o efeito que resulta da diminuição da área da secção transversal. Quando num ensaio de tração se atinge a força máxima considera-se o fim da região plástica uniforme começando a região plástica não uniforme ou local (por ser restringida apenas à região onde ocorre a estrição), e é o ponto onde a tensão é máxima, dando-lhe o nome de tensão de rotura do material (σ_r), também conhecida por limite de resistência à tração. Depois de atingir a tensão de rotura começa a existir deformações localizadas numa zona do provete, resultando numa estrição local. A tensão nominal começa a diminuir continuamente, sendo que a área da secção resistente também diminui e esta vai prevalecer sobre o aumento da força imposta. A força no local da estrição

necessária à deformação será cada vez menor, e nessa zona vai-se dar a rotura que está representado no gráfico pelo ponto de fratura. [8]

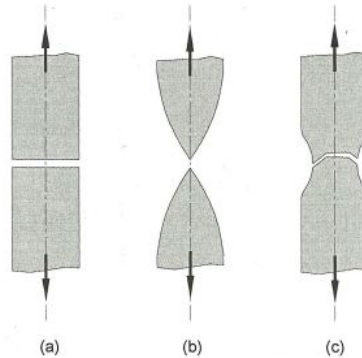


Figura 3.2: Tipos de fraturas: (a) Fratura frágil, (b) Fratura completamente dúctil, (c) Fratura dúctil. [8]

Na figura 3.2, ilustram-se os tipos de fratura que se podem verificar nos ensaios de tração uniaxial, consoante o tipo de material do provete. A fratura frágil ocorre, num provete, com uma quase nula estrição rompendo rapidamente logo após ter atingido a força máxima. A fratura do tipo dúctil distingue-se pelo modo que o material se deforma de uma forma apreciável antes e durante a estrição, momento em que começa a fase de propagação das fissuras. Nesta fase, a tensão verdadeira atinge um valor muito mais elevado do que a tensão de rotura nominal, devido ao facto de na zona de estrição se gerar um estado de deformação axial, promovendo uma rigidez muito maior do que a nominal (dividindo a força pela secção nominal). Existe um outro comportamento em materiais dúcteis, a chamada estrição total, como por exemplo acontece no ouro, chumbo em que a deformação plástica pode alcançar valores muito altos e nestes ocorre a fratura completamente dúctil. Normalmente os materiais dúcteis a fratura tem origem na formação de uma estrição progressiva, que vai alterando o estado de tensão dessa região de comportamento muito complexo, dando origem ao aparecimento de pequeníssimas cavidades na região central. [8]

3.2.1.1 Resistência do Material

Para se poder caracterizar um material, temos que ter em conta dois tipos de parâmetros, os parâmetros de resistência, que são aqueles onde inclui a tensão limite de escoamento ou tensão de cedência, a tensão de rotura; e os parâmetros de ductilidade, como o alongamento após a fratura, A , e a diminuição da área na zona da fratura, q . [8]

A relação entre a tensão e a deformação, na zona linear elástica, é dada pela lei de Hooke e escrita na seguinte forma:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.3)$$

O módulo de elasticidade, E , é entendido como um parâmetro de rigidez do material. Quanto maior o valor do módulo de elasticidade (declive muito grande) menor será a deformação que resulta da aplicação de uma dada tensão. Com o aumento da temperatura este

parâmetro provoca uma diminuição do seu valor. O coeficiente de Poisson, ν , é a relação entre as deformações transversal e longitudinal e é dada pela seguinte expressão:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (3.4)$$

onde ε_2 e ε_3 são negativas e ε_1 é positiva. Para materiais isotrópicos ε_2 e ε_3 são iguais e servem para a definição da equação acima. [8]

3.2.1.2 Tensão de cedência

Pode-se encontrar dois tipos de registo da tensão de cedência, dependendo do material, como se pode ver na imagem seguinte:

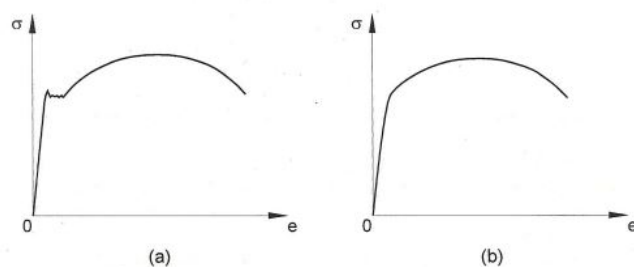


Figura 3.3: Tipos de cedência: (a) com patamar de cedência; (b) sem patamar de cedência [8]

Na curva (a) temos um fenómeno de cedência propriamente dito, que normalmente está associado ao de aços macios e de outros materiais. Na curva (b) não temos fenómeno de cedência que é comportamento de aços de alta resistência, ligas de alumínio, de aços inoxidáveis, austeníticos, entre outros materiais. Quando acontece o fenómeno de cedência, a mudança entre o final da deformação puramente elástica e o início da deformação plástica, é dada pelo valor máximo da tensão, nessa zona, que também é conhecida como a tensão limite de elasticidade superior e é considerada a tensão de cedência, σ_c . Mas antes de chegar ao ponto onde se inicia a deformação plástica, esse espaço entre o ponto A e C do gráfico (figura 3.4) é conhecido como o patamar de cedência ou deformação de Lüders. [8]

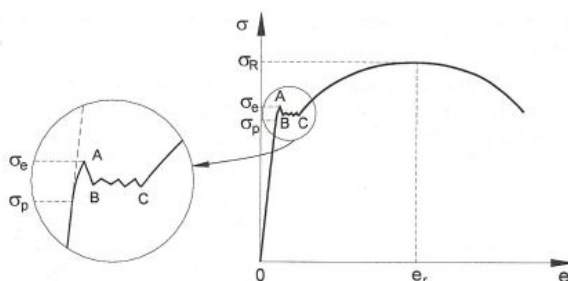


Figura 3.4: Patamar de cedência ou deformação de Lüders. [8]

A causa do patamar de cedência deve-se à origem de impurezas do material, que são de um modo geral muito pequenas, tendo a tendência de se concentrarem na zona das

vizinhanças das deslocamentos que e vão interferir com o movimento e com a deformação plástica. [8]

3.2.1.3 Tensão de rotura

A tensão de rotura acontece quando a força máxima é atingida, correspondendo esta à que o provete pode suportar sem sofrer ruína (fratura ou grande deformação, sendo tal acompanhado de perda de força resistindo às deformações crescentes).

Na região plástica do material, o provete vai aumentar de comprimento em conformidade com a redução da área transversal, devido à praticamente incompressibilidade (deformação a volume constante) a tensão nominal vai crescer com a deformação, em virtude do encruamento do material conseguir superar o efeito que resulta da diminuição da área da secção transversal. Este efeito do encruamento também se deve ao aumento de rigidez a nível micro e nanoestrutural, quando os planos de deslizamento proporcionando considerável deformação, no início da fase plástica, começam a ficar bloqueados, como resultado do bloqueio das deslocamentos na malha cristalográfica. Quando num ensaio de tração se atinge a força máxima considera-se o fim da região plástica uniforme começando a região plástica não uniforme ou local (por ser restringida apenas à região onde ocorre a estrição), e é o ponto onde a tensão é máxima, dando-lhe o nome de tensão de rotura do material (σ_r), também conhecida por limite de resistência à tração,

$$\sigma_r = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (3.5)$$

É necessário verificar que a tensão de rotura não têm qualquer relação com a tensão na fratura e é a fronteira entre as regiões de deformação plástica uniforme e local. A zona de deformação local (não uniforme) normalmente concentra-se numa pequena região de comprimento, onde nessa região se dá origem da estrição. A deformação progressiva nessa zona faz com que a área da secção diminua provocando uma diminuição da força necessária à deformação, mas no entanto o material continua a encruar. [8]

3.2.1.4 Resiliência

No domínios elástico a capacidade de um determinado material de absorver energia quando está sujeito a deformações e de a repor após o descarregamento é chamado de Resiliência, U_r , e é calculado da seguinte forma,

$$U_r = \frac{\sigma_c \varepsilon_c}{2} = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (3.6)$$

onde ε_c é a deformação limite de elasticidade. [8] O modulo de resiliência também pode ser calculado através da área abaixo dos valores da curva elástica como mostra a figura 3.5. Em engenharia o modulo de resiliência traduz as características que um material pode ter, em condições ideais, para suportar forças externas sem que sofra deformação plástica. [8]

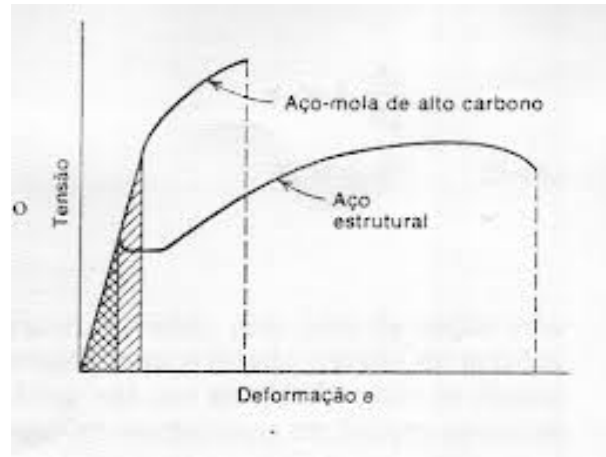


Figura 3.5: Determinação do módulo de resiliência através do gráfico

3.2.1.5 Tenacidade

Do mesmo modo que a resiliência, a tenacidade é a capacidade que um material tem para absorver energia quando sujeito a deformações no domínio plástico, ou seja, acima da tensão limite de elasticidade. [8] O módulo de tenacidade, U_T , é calculado através da seguinte expressão,

$$U_T = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (3.7)$$

e exprime a quantidade de energia por unidade de volume que um determinado material pode suportar até à fratura. [8]

Para materiais dúcteis podemos obter uma estimativa do módulo de tenacidade, como se mostra a seguir,

$$U_T \cong \frac{\sigma_e + \sigma_r}{2} \varepsilon_f \quad (3.8)$$

e este vai corresponder à área do retângulo apresentado na figura 3.6 (a).

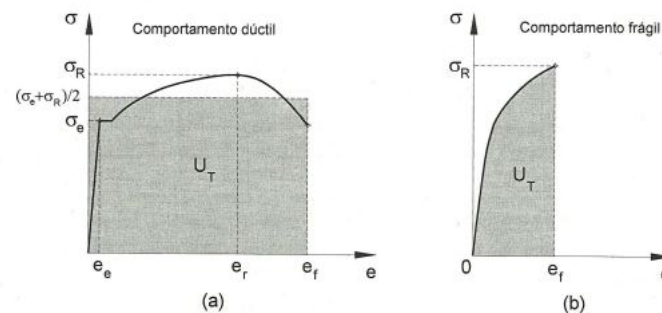


Figura 3.6: Determinação do módulo de tenacidade através do gráfico (a) para um material dúctil, (b) para um material frágil

Para materiais frágeis, o módulo de tenacidade é dado por,

$$U_T \cong \frac{2}{3} \sigma_c \varepsilon_f \quad (3.9)$$

o que vai corresponder à área abaixo da curva entre o ponto de origem até ao ponto de fratura (figura 3.6 (b)).

3.2.2 Curva da tensão-deformação verdadeira

A curva tensão-deformação nominal torna-se inadequada quando se pretende uma relação constitutiva mais realista num determinado material e é determinada com base nos valores iniciais do provete. No momento da deformação não uniforme de um material dúctil, onde se forma a estrição com a coerência da diminuição rápida da secção transversal do provete a curva nominal decresce, como se verifica na figura 3.1, no entanto o material continua a encruar até à fratura e a tensão necessária à deformação deveria aumentar. Então por estes motivos é que se recorre à curva tensão-deformação verdadeira que se baseia nas medidas verdadeiras da tensão e da deformação que são determinadas a partir das dimensões instantâneas da zona útil do provete. Assim vai-se verificar uma curva sempre com um crescimento contínuo até à fratura como mostra a figura a seguir. [8]

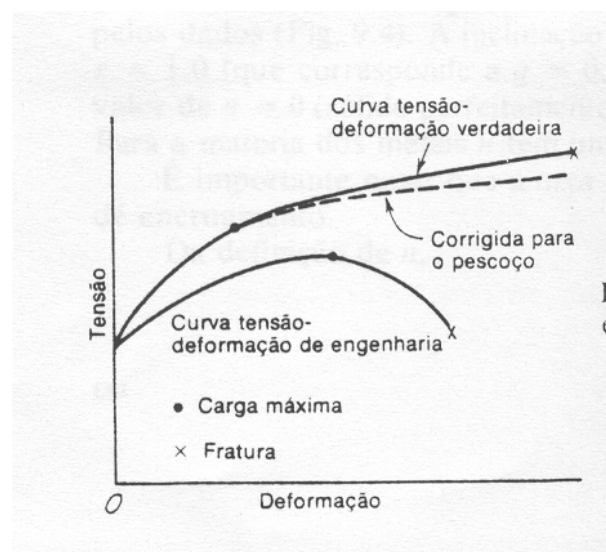


Figura 3.7: Exemplo de um gráfico de comparação entre a Tensão-deformação nominal e verdadeira.

Como se pode ver na figura 3.7 na zona de deformação plástica o encruamento ocorre até ao ponto de fratura, mesmo com a formação do pescoço na zona de estrição a área diminui mas a tensão aumenta, e existe a conservação do volume, ou seja, o volume inicial é igual ao volume final, volume constante. Deste modo a tensão verdadeira, $\bar{\sigma}$, pode vir em função da tensão nominal escrevendo a seguinte equação,

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A} = \frac{F l_f}{A_0 l_0} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.10)$$

Da mesma maneira se consegue relacionar a deformação verdadeira, $\bar{\varepsilon}$, com a deformação nominal, apresentando a expressão do seguinte modo,

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l_f} = \ln \frac{l_f}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.11)$$

as equações acima mencionadas apenas podem ser aplicadas na região de deformação plástica uniforme. É de considerar que na região elástica a deformação é homogénea, mas não existe a conservação de volume, o que nos leva a verificar que nesta região o valores nominais e verdadeiros da deformação não diferem muito. [8]

A tensão e deformação verdadeira na carga máxima, ou seja, consideradas o ponto de rotura do material, para a maioria dos materiais representa a transição entre a deformação plástica uniforme e a não uniforme e é apresentada com a seguinte expressão,

$$\bar{\sigma}_r = \frac{F_{max}}{A_r} = \sigma \frac{A_0}{A_r} \quad (3.12)$$

onde A_r é a área da secção no momento da força máxima. [8] A deformação verdadeira no ponto de força máxima também se pode relacionar com a curva nominal e é dada pela seguinte equação,

$$\bar{\varepsilon}_r = \ln \frac{A_0}{A_r} = \ln(1 + \varepsilon_r) \quad (3.13)$$

e as equações 3.12 e 3.13 podem-se combinar dando a tensão de rotura verdadeira em função da tensão de rotura nominal, vindo da seguinte forma:

$$\bar{\sigma}_r = \sigma_r(1 + \varepsilon_r) \quad (3.14)$$

Na zona de deformação não uniforme, a tensão é calculada dividindo a força pela área da secção do provete instantânea, ($\sigma = \frac{F}{A_i}$), dessa zona. Devido a alterações da geometria no ponto onde se dá a estrição esta tensão deve ser corrigida o que torna difícil a sua determinação com precisão. [8] A deformação verdadeira, nessa zona, pode ser determinada também a partir da área instantânea correspondente a essa região do gráfico, ou até a partir do diâmetro do provete, D , no caso do provete ser de secção circular,

$$\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{A_0}{A_i}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2}{D^2}\right) = 2Ln\left(\frac{D_0}{D}\right) \quad (3.15)$$

onde D_0 e D são os diâmetros inicial e final respetivamente. [8]

No ponto de fratura a tensão verdadeira é calculada de modo semelhante, com já dito acima, para a zona de deformação plástica não uniforme. [8] A deformação verdadeira no ponto de fratura do material é calculada a partir das áreas da secção transversal do provete inicial e após a fratura, como mostra a seguinte expressão,

$$\bar{\varepsilon}_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2}{D^2}\right) = 2Ln\left(\frac{D_0}{D}\right) \quad (3.16)$$

A deformação verdadeira no ponto da fratura é o valor máximo que um determinado material consegue suportar e tem o mesmo significado que a deformação nominal no ponto de fratura, ε_f . Mas no entanto não se pode calcular a deformação verdadeira na zona de deformação não uniforme a partir do valor nominal, como está definido na equação 3.11,

contudo pode-se calcular através do coeficiente de estrição ou redução de área, q , apresentado na seguinte expressão [8],

$$\bar{\epsilon}_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \left(\frac{1}{1-q}\right) \quad (3.17)$$

3.3 Teoria da Plasticidade

A teoria da elasticidade pretende estudar a zona elástica de um material até ao seu limite (limite de escoamento) e em que após aplicado uma força, este recupera a sua forma inicial e as deformações elásticas dependem do estados de tensão inicial e final. A teoria da elasticidade contém todos os conceitos básicos da mecânica dos sólidos da elasticidade, da teoria da plasticidade entre outros aspetos. Já a teoria da plasticidade, pretende estudar a zona do regime plástico do material, onde as extensões quando ultrapassam o limite de escoamento do material em que já não se valida a lei de Hooke, e que o material quando sujeito a forças externas altera o seu comportamento e após o descarregamento as deformações continuam permanentes. [8]

3.3.1 Critérios de Plasticidade

Estes critérios tem como objetivo definir o estado uma combinação de valores no tensor das tensões a partir do qual o material altera o comportamento constitutivo, deixando de ser elástico para passar a obter deformações maiores que na região elástica.

Serão apresentados apenas dois critérios de plasticidade que são mais utilizados, os critérios de Tresca e Von-Mises. Em engenharia estes critérios podem ser usados no cálculo das tensões equivalentes.

3.3.1.1 Critério de Tresca

O critério de plasticidade de Tresca (1864) consiste em que a deformação plástica inicia quando a tensão de corte máxima, τ_{max} , ultrapassa um determinado valor limite, k , então é dada pela seguinte equação,

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq k \quad (3.18)$$

onde σ_1 e σ_3 são as tensões principais, com $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, e o parâmetro k característico do material e que deve ser determinado experimentalmente e que pode vir em função do encruamento. Esse valor, k , pode então ser determinado através de ensaios uniaxiais de tração ou de compressão ou até de torção. Em condições uniaxiais considera-se que $\sigma_1 = \sigma_c$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, e da equação 3.18 podemos relacionar o valor crítico com a tensão limite elástico do ensaio de tração uniaxial, σ_c , da seguinte maneira [8],

$$k = \frac{\sigma_c}{2} \quad (3.19)$$

A tensão equivalente de Tresca é dada por,

$$\sigma_{eqT} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.20)$$

e esta vem implementada na equação do critério de Tresca. No ensaio de tração ou compressão a tensão equivalente de Tresca é igual à tensão limite de elasticidade. [8]

3.3.1.2 Critério de von-Mises

O tensor das deformações pode considerar-se como a sobreposição de um tensor hidrostático e um tensor de distorção (em inglês, *deviatoric tensor*). O tensor hidrostático corresponde a uma energia de deformação muito menor do que a referida ao tensor de distorção (*deviatoric*). O critério de von Mises (1913), consiste em que a deformação do escoamento de um determinado material quando a energia elástica de distorção, w_d^e , atinge um valor limite, $W_{critico}$, ou pela seguinte equação matemática,

$$w_d^e = \frac{J_2}{2G} = \frac{3}{4G}\tau_{oct}^2 \geq W_{critico} \quad (3.21)$$

onde, J_2 , é o segundo invariante do tensor das tensões, que vem da teoria da elasticidade e é dada por,

$$J_2 = \frac{1}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij} = \dots = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (3.22)$$

É de se referir que o critério de von Mises usa apenas a energia de distorção do material na fase de deformação, já que a componente hidrostática é desprezável; deste modo, ao considerar apenas a energia de distorção (relacionada com o tensor das tensões de distorção, ou deviatoric tensor (em inglês)), só se usa o 2º Invariante das tensões geradas no componente para obter a energia de distorção.

A tensão de corte octaédrica, τ_{oct} , com importante interesse para a teoria da plasticidade, e segundo a teoria da elasticidade, esta encontra-se nos planos octaédricos que são planos que coincidem com as faces de um octaedro regular e em que as normais a esses planos fazem ângulos iguais com as direções principais dos tensor das tensões ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) de $54,74^\circ(\alpha, \beta, \gamma)$ [8], e vem escrita da seguinte forma,

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (3.23)$$

Em relação ao valor crítico mencionado na equação 3.21, é determinado considerando-se um estado de tração uniaxial como início de deformação plástica, $\sigma_1 = \sigma_c$ e $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, pode vir em função da tensão limite de elasticidade relacionando com tensão de corte octaédrica, τ_{oct} , como mostra a seguinte expressão,

$$W_{critico} = \frac{1}{6G}\sigma_c^2 \quad (3.24)$$

No entanto, em engenharia o critério de von-Mises pode ser calculado através da tensão equivalente, e a tensão equivalente de von-Mises é dada por,

$$\sigma_{eqVM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (3.25)$$

assim como no critério de Tresca, em ensaios de tração uniaxial a tensão equivalente de von-Mises é igual à tensão limite de elasticidade. [8]

A figura seguinte mostra a representação gráfica dos dois critérios num estado biaxial de tensão, neste estado, e que σ_3 é igual a zero (considerado estado plano ou biaxial), deste modo a equação 3.25 passa a ter $\sigma_3 = 0$,

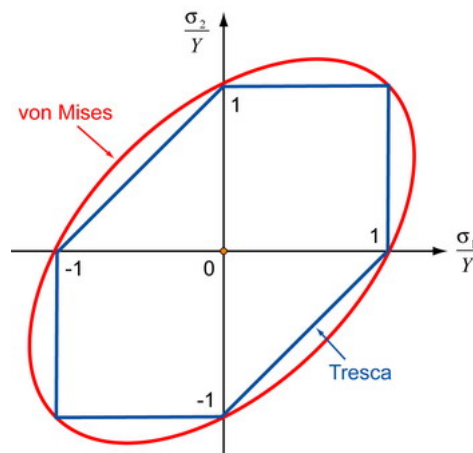


Figura 3.8: Representação gráfica dos critérios de plasticidade de Tresca e von Mises no estado biaxial de tensão

O critério de von Mises não é tão restritivo como o de Tresca em termos de estado limite, pois a sua área de admissibilidade ao estado de tensão antes da plasticidade é maior que o de Tresca.

3.3.2 Modelos de Plasticidade

Os modelos de plasticidade servem para entender a teoria da plasticidade num determinado material e caracteriza um material na região de encruamento. Existem pelo menos três tipos de modelos de plasticidade:

- Modelo de Plasticidade Perfeita,
- Modelo de Plasticidade com encruamento linear,
- Modelo de Plasticidade com encruamento não linear.

Nesta tese estes modelos terão alguma importância para a caracterização do material dos elementos que constituem a ligação por encaixe, e será necessário construir no *software* de elementos finitos um destes modelos.

3.3.2.1 Plasticidade Perfeita

Um modelo de plasticidade perfeita consiste num modelo em que o material não admite tensão acima da tensão limite de escoamento e quando atinge essa tensão considera-se que sofre uma deformação com tensão constante. A figura 3.9 traduz esse tipo de modelo.

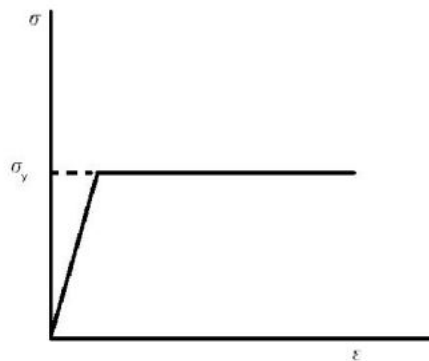


Figura 3.9: Modelo de plasticidade perfeita(material-elastico-perfeitamente plástico)

Como se pode observar na figura não existe encruamento e qualquer trabalho realizado na região plástica consiste apenas em ter uma deformação permanente que corresponde à deformação total menos a deformação limite elástica. Assim sendo só se consideram dois parâmetros, o módulo de elasticidade e a tensão limite elástica. [9]

3.3.2.2 Plasticidade com encruamento linear

A plasticidade com encruamento linear é um modelo um pouco mais completo que o anterior modelo, pois apresenta um progressivo endurecimento do material que vai desde o limite elástico até à tensão de rotura(resistência à tração) como traduz a figura seguinte.

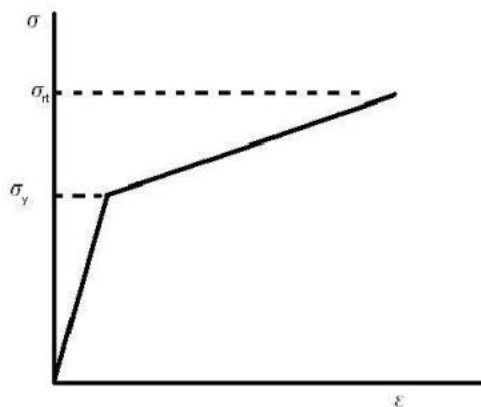


Figura 3.10: Modelo de plasticidade com encruamento linear

O gráfico é composto por duas retas, uma traduz o regime elástico e a outra traduz o regime plástico, daí este modelo também se associar a um modelo bilinear do material. Então para este modelo são considerados quatro parâmetros, o módulo de elasticidade, tensão limite de escoamento(ou tensão de cedência), tensão de resistência à tração (tensão de rotura) e a deformação que a corresponde. [9]

3.3.2.3 Plasticidade com encruamento não linear

O encruamento não-linear é o modelo que se aproxima mais do comportamento real de um determinado material no regime plástico. A figura 3.11 mostra um exemplo deste modelo.

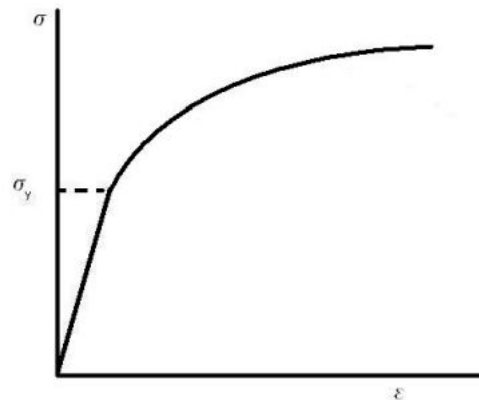


Figura 3.11: Modelo de plasticidade com encruamento não linear

Este modelo apresenta uma maior exatidão do comportamento do material na região plástica, e os valores dos parâmetros a considerar dependem dos dados que queremos para este tipo de modelo, e esses valores são os dados obtidos em ensaios experimentais de tração uniaxial. [9]

3.3.3 Encruamento

O fenómeno de encruamento ocorre na fase pós tensão de cedência (num primeiro ensaio, o primeiro carregamento além do limite elástico): Nesta fase, o material não apresenta um patamar de cedência, mas sim uma tendência para maior endurecimento (chamado encruamento) que resulta do facto das deslocações na malha cristalográfica começarem a ficar restritas e mesmo bloqueadas. A nível macroscópico o que se nota é que na máquina de tração, a resistência do material vá aumentando à medida que aumenta a deformação. A figura 3.12 mostra uma representação gráfica tensão-deformação do fenómeno de encruamento,

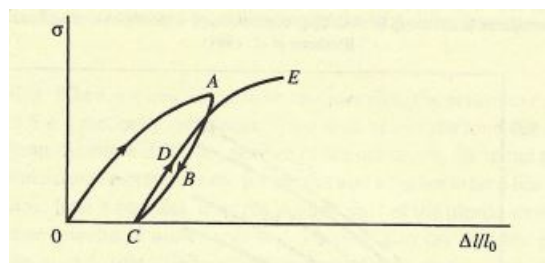


Figura 3.12: Representação gráfica do fenómeno de encruamento

Retirando a carga até total relaxação do componente e voltando a carregá-lo, a nova tensão de cedência é agora praticamente igual à tensão na fase pós-plástica (de encruamento), como se tivesse sido memorizada pelo material aquando da descarga; isto prossegue sempre que se descarregar/carregar o provete. Ao desenharmos o domínio de

tensões de von Mises para o caso de endurecimento de material isotrópico, a elipse de von Mises é maior do que a obtida para o 1º estado limite e assim progressivamente (diremos que a superfície de cedência se expande, em função da tensão limite de encruamento). [10] No caso das estantes industriais poderá haver ciclos de carga gradualmente crescentes e decrescentes, contudo as especificações não permitem que a estrutura seja solicitada além da cedência do material.

3.4 Teoria do Método dos Elementos Finitos

3.4.1 O que é o MEF?

O método dos elementos finitos ou MEF, é um método numérico de análise genérica e com resolução quase sempre aproximada, de problemas científicos e de engenharia. Este método tem suas origens em trabalhos realizados por físicos, matemáticos e engenheiros. Este método pode ser utilizado numa vasta área do conhecimento em problemas complexos em que não se conheçam soluções exatas que possam ser transformadas de uma forma analítica e é de realçar que o MEF é um método numérico e não um método analítico. O MEF pode ser utilizado em diversos problemas desde sistemas vibratórios, mecânicas dos fluídos e condução de calor, comportamento de materiais, estruturas metálicas e não metálicas, impacto, conformação plástica de materiais, hidrodinâmica aerodinâmica, etc. [11]

3.4.2 Revisão Histórica

O Método dos Elementos Finitos, também conhecido como MEF, baseia-se na ideia de se criar um modelo de um determinado problema genérico que envolve meios contínuos e através de suas partes discretas (elementos finitos) desses meios, é possível analisar e estudar o seu comportamento obtendo ou conhecendo uma descrição matemática desse mesmo comportamento. Ao processo deste tipo de análise em que se parte de um todo dividindo-o em partes com menor complexidade é conhecido como discretização. Para cada elemento finito, que são as partes discretas, e as normas matemáticas que regem o seu comportamento, vão contribuir para o conhecimento e a análise do problema em geral. A análise de cada elemento finito como uma entidade individual para análise de um todo é conhecido por *assemblagem* ou agrupamento. Para o utilizador quando confrontado com uma análise de cálculo através do MEF, é o mesmo que resolver um determinado problema complexo ou até mesmo sem solução, através de uma resolução sequencial e estruturada de múltiplos problemas mais simples e com solução matemática exata ou aproximada, que, quando analisados em conjunto levam a uma solução do problema geral inicial. [11]

Em 1960 Ray Clough desenvolveu um trabalho, onde pela primeira vez se faz referência ao método dos elementos finitos, sobre a análise de problemas de elasticidade num estado plano de tensão. Os primeiros elementos finitos foram descritos por Turner em 1956 num trabalho que desenvolveu, e nesse trabalho são desenvolvidos três tipos diferentes de elementos finitos, elemento triangular, elemento quadrilátero genérico e o elemento rectangular. A formulação do elemento triangular baseia-se em três componentes constantes do tensor das deformações e três modos de deformação de corpo rígido, para análise de problemas planos. As seis componentes acima referidas, são identificadas como os graus de liberdade do elemento que são os deslocamentos nos nós. Ao aplicar-se a lei de Hooke permitiu calcular os termos de deformação diretamente a partir dos deslocamentos nodais. O elemento finito genérico quadrilátero é obtido com a introdução de um nó artificial interno

e da divisão do elemento quadrilátero em quatro elementos triangulares discretos segundo Gupta e Meek (1996). Quanto à matriz de rigidez do elemento quadrilátero obtém-se através da soma das matrizes elementares determinadas para os sub-elementos triangulares. O elemento rectangular que foi proposto é definido em cinco componentes do tensor das tensões, sendo este elemento finito de quatro nós, não apresentava continuidade em termos das suas funções de interpolação, tendo sido esta formulação revista por Pian e Tong (1969). Do ponto de vista da engenharia, em particular na indústria aeronáutica, é conveniente realçar trabalhos originais de John Argyris e do seu grupo de investigação na área da engenharia estrutural da década de 50, com vários artigos sobre análise estrutural em regime linear na forma matricial para elementos discretos. A partir destes artigos chegaram-se aos conceitos de matriz de rigidez e matriz de flexibilidade em função de operadores matriciais podendo relacionar deformações e deslocamentos para a matriz de rigidez e relacionando com tensões e forças para a matriz de flexibilidade. A partir desta abordagem matricial nasceu então a metodologia padrão do método dos elementos finitos a problemas genéricos de engenharia.

Outros autores como Zienkiewicz (1965) e Cheung (1967) através de seus trabalhos, o MEF viria a conseguir uma generalidade e projeção significativas, trabalhos estes onde para além da aplicação em problemas de mecânica estrutural estão presentes outras aplicações dentro do contexto da análise por elementos finitos. Existem muitas edições de Olgierd Zienkiewicz juntamente com Robert Taylor em 1989 e 1991, sendo estas obras consideradas, obras de referência para o estudo do método de elementos finitos.

Strang e Fix (1973) também foram contribuidores de novos elementos finitos num ponto de vista matemático. Eduardo de Arantes e Oliveira, foi o impulsionador e pioneiro na divulgação do método dos elementos finitos em Portugal. Desde que começaram os estudos do MEF até aos dias de hoje, muitos trabalhos foram publicados e tem vindo a estabelecer limites e desafios para o MEF, que é aplicado cada vez mais nas áreas da mecânica estrutural em variadas escalas, desde um ponto de vista macroscópico até em aplicações no campo moleculares e atómicos. [11]

3.4.3 Programas de simulação numérica

Hoje em dia existem vários programas comerciais de simulação numérica, tais como:

- **Abaqus-Simulia**
- **Ansys**
- **NSC/NASTRAN**
- **Algor**
- **Femap**
- **etc.**

e a base que os sustenta é o método dos elementos finitos. Podem lidar com vários tipos de problemas das áreas já acima referidas. Existem também programas um pouco mais avançados do qual possam estudar problemas mais particulares como o comportamento de materiais compósitos, estudo do escoamento plástico de materiais metálicos, etc. Podem ser executados em computadores pessoais ou em supercomputadores conforme a complexidade dos problemas. [11]

3.4.4 Tipos de elementos finitos

Aplica-se o MEF a problemas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. No entanto em qualquer um dos casos faz-se uma discretização do modelo em que se está a estudar, modelo esse que normalmente deve ser representado da mesma forma que na realidade ou efetuar uma simplificação viável aproximada em relação ao modelo real. A discretização é uma divisão num número finito de segmentos, áreas ou volumes a que se lhe dá o nome de elementos finitos.

A figura 3.13 mostra uma representação de um modelo ou domínio discretizado.

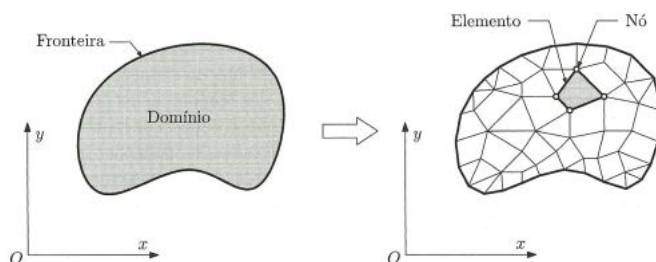


Figura 3.13: Representação do processo de discretização num modelo ou domínio por elementos finitos [11]

Os elementos finitos podem ser de variadas formas de acordo com a modelação estrutural pretendida, como mostra a figura 3.14.

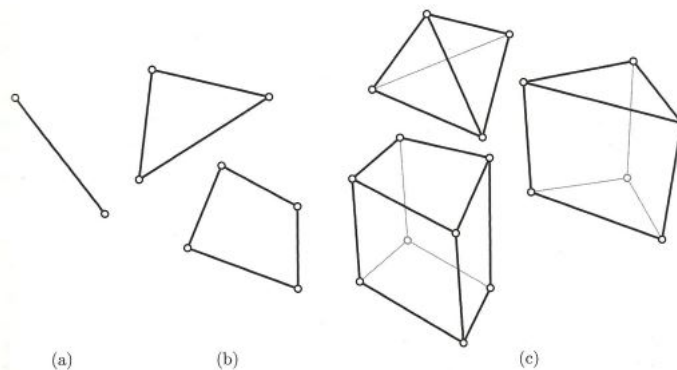


Figura 3.14: Elementos finitos:(a) unidimensional (b) bidimensional (c) tridimensional [11]

Cada tipo de elemento é usado nas condições que se pretende para um determinado problema. Para problemas unidimensionais usam-se elementos finitos unidimensionais, para problemas bidimensionais utilizam-se elementos finitos bidimensionais e para problemas tridimensionais utilizam-se os elementos finitos 3D. Mas a figura 3.14 não refere todos os elementos existentes, existe uma vasta lista de outros tipos de elementos. Em engenharia a primeira variável que se pretende calcular são os deslocamentos nos nós, que são os pontos que estão na malha de elementos finitos que normalmente se encontram nos vértices dos elementos, porém dependendo da formulação do elemento estes podem conter nós a meio das arestas, das faces ou até no seu interior. Existem também os elementos do tipo casca e placa que serão abordados um pouco mais à frente. [11]

3.4.5 Análise de uma simulação numérica

Vai-se agora apresentar de um modo geral os passos para uma análise de uma simulação numérica pelo método dos elementos finitos. Isto será feito de um ponto de vista do utilizador, através da utilização de um programa comercial de simulação numérica. O primeiro passo é o **pré-processamento** que é a fase em que se constrói o modelo geométrico do sistema a analisar, e definem-se os carregamentos e condições iniciais que o modelo em estudo será sujeito. De seguida passa-se à fase de **análise** que é onde se efetuam todos os cálculos, através de programas comerciais de elementos finitos, e que se pode verificar toda a informação nos ficheiros de entrada. Por último procede-se à fase de **pós-processamento** que é a fase de apresentação de resultados, que vem dos ficheiros de saída de diferentes formas gráficas e/ou em forma de tabelas. [11]

3.4.6 Equações genéricas do MEF

A resolução de problemas de engenharia é normal proceder-se em primeiro lugar à análise do tipo linear. A análise linear, assume que os deslocamentos que induzem deformação são infinitesimais, o material tem um comportamento linear elástico e as condições de fronteira são constantes, ou seja, não se alteram, quando se aplicam cargas. Assim, mediante estas três hipóteses, assume-se uma relação linear entre forças e deslocamentos, o que a nível de equações de equilíbrio no âmbito do Método de Elementos Finitos se traduz na equação:

$$F = K a \quad (3.26)$$

onde F representa o vetor de forças externas, K é a matriz de rigidez do sistema e a é o vetor dos deslocamentos nodais. As incógnitas do problema são os deslocamentos nodais, que permite o cálculo dos tensores das tensões e das deformações.

Se considerar-mos que o material tem comportamento linear elástico pode-se utilizar a lei de Hooke de modo a se poder calcular o campo de tensões, e genericamente é apresentada da seguinte forma,

$$\sigma = D \varepsilon \quad (3.27)$$

onde σ é o campo de tensões, ε é campo das deformações e D^1 é a matriz de elasticidade do material.

O campo de deformações pode ser determinado através dos deslocamentos nodais e conhecendo a matriz das derivadas das funções de forma, e é dado pela seguinte equação,

$$\varepsilon = B a \quad (3.28)$$

onde B , é a matriz das derivadas das funções de forma e dependem do elemento finito uma vez que as funções de forma também dependem do elemento finito considerado. [11]
[12]

3.4.7 Elementos finitos e suas características

Nesta secção serão abordados apenas os elementos finitos que mais se utilizam normalmente em programas comerciais, e mencionando suas características. Não serão detalhadas as suas formulações. Para uma abordagem mais aprofundada dos elementos,

¹para não confundir com o diâmetro o parâmetro D no âmbito do MEF, nesta secção refere-se à matriz de elasticidade do material

recomenda-se uma vasta lista bibliográfica, dos autores que foram mencionados na revisão histórica desta secção.

- **Elementos finitos unidimensionais**

Para casos unidimensionais normalmente recorre-se ao Princípio de Trabalho Virtual ou PTV. O princípio dos trabalhos virtuais ou princípio dos deslocamentos virtuais estabelece que o trabalho realizado pelas tensões internas na deformação virtual do corpo é igual ao trabalho realizado pelas forças exteriores nos deslocamentos virtuais dos seus pontos de aplicação. Ou seja, de uma maneira mais simples, o trabalho interno de deformação é igual ao trabalho externo das forças aplicadas. O caso em que se pode utilizar o PTV é o das barras sujeitas a deslocamentos e forças apenas axiais e que se pode traduzir através da igualdade seguinte [11],

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_L \delta u^T p dL \quad (3.29)$$

- **Elementos finitos bidimensionais**

Este tipo de elementos finitos bidimensionais são usados no MEF para resolução de problemas bidimensionais. Os elementos mais inconstante e de simples formulação em aplicações bidimensionais são os elementos triangulares. Para geração de malhas não-estruturadas estes elementos conseguem um refinamento local em zonas com elevados gradientes de tensão ou deformação, mantendo-se, outras zonas com um nível de refinamento mais grosseiro. Este é o motivo para que programas comerciais apresentem nas suas bibliotecas de elementos finitos, elementos triangulares para aplicações bidimensionais e elementos tetraédricos para aplicações tridimensionais. O que se pode encontrar como desvantagem neste tipo de elementos é que em termos de resultados podem apresentar resultados menos fiáveis em relação a, por exemplo, elementos de quatro nós (quadriláteros). [11]

Para se poder conhecer o elemento finito retangular é necessário estudar com mais detalhes a formulação desse mesmo elemento finito, o que não vamos detalhar nesta secção nem nesta tese, e dependem da ordem de integração. [11] A figura seguinte mostra representações genéricas de elemento finito triangular e retangular respetivamente.

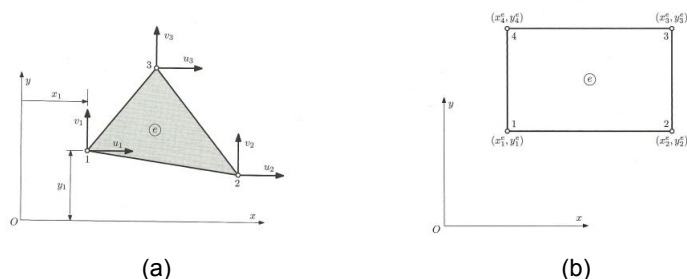


Figura 3.15: Elementos Finitos genéricos: (a)Triangular, (b)Retangular. [11]

- **Elementos finitos Axissimétricos**

Os elementos axissimétricos são muito direcionados a aplicações de corpo com revolução, que apresentam simetria em relação ao seu eixo. Podem estes também serem resolvidos num espaço tridimensional utilizando elementos tridimensionais, mas os

elementos axissimétricos podem realizar a mesma tarefa mas com um peso computacional inferior. As aplicações onde podem ser utilizadas são no estudo de silos, reservatórios sob pressão, tanques atmosféricos, torres de arrefecimento, ou seja, aplicações onde se encontra simetria não só na sua geometria, mas também nos seus carregamentos e condições de fronteira. [11]

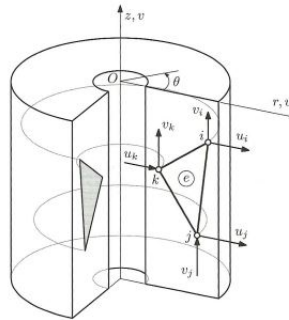


Figura 3.16: Representação genérica de um elemento axissimétrico [11]

A figura 3.16 mostra uma aplicação genérica de elemento axissimétrico. Em particular este tipo de análise tem de se acrescentar mais uma componente no campo das deformações e por isso em relação aos problemas bidimensionais, tem-se que considerar que as deformações e tensões são consideradas fora do plano do elemento finito axissimétrico. [11]

• Elementos finitos tridimensionais

Os elementos hexaédricos são elementos finitos generalizados dos elementos quadriláteros bidimensionais. Existem também os elementos finitos pentaédricos ou do tipo cunha que em termos práticos são uma particularidade dos elementos finitos hexaédricos. Depois temos os elementos tetraédricos que também são uma generalização dos elementos finitos triangulares bidimensionais e à semelhança do que acontece no caso bidimensional estes elementos, em relação ao elementos hexaédricos, tem vantagem na discretização, ou seja, na construção da malha em problemas de geometria complexa. No entanto, os elementos tetraédricos, assim como os triangulares, são muito simplificados na descrição do campo de deformações e de tensões. O elemento tetraédrico apresenta menor exatidão em problemas de complexidade maior exigindo malhas mais refinadas. Por este motivo é que os elementos finitos hexaédricos são mais utilizados quando se pretende obter resultados mais fiáveis. [11] A figura 3.17 mostra alguns tipos de elementos finitos tridimensionais.

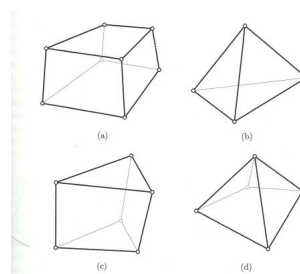


Figura 3.17: Elementos finitos tridimensionais: (a)Hexaédrico de 8 nós, (b)tetraédrico de quatro nós, (c)pentaédrico de 6 nós, (d) elemento do tipo pirâmide. [11]

- **Elementos finitos do tipo placa e casca**

Quando nos deparamos estruturas quem têm a espessura muito menor que as restantes medidas, pode-se considerar que se tratam de estruturas de cascas e estruturas de placa. Podemos exemplificar estruturas do tipo placa como painéis planos em chapa metálica na aplicação da industria automóvel, aeronáutica ou naval. As do tipo casca para além de ter a espessura muito menor que as restantes, tem curvatura, ou seja, não são planas.

Por vezes torna-se necessário recorrer a elementos finitos particulares para a análise das estruturas do tipo placa e/ou casca, ao qual se destacam os elementos finitos degenerados dos elementos sólidos tridimensionais. O conceito de elementos degenerados, como base de elemento finito de placa ou casca, surge segundo um trabalho original de Ahmad e seus co-autores, no final da década de 60 princípios de 70. A ideia da origem dos elementos degenerados, consistia na redução de um elemento finito tridimensional para do tipo casca ou do tipo placa, como por exemplo, a partir de um elemento hexaédrico de oito nós para um elemento de placa ou de casca de quatro nós. Após esta transformação, os nós dos elemento passam a ser representados numa superfície de referencia como mostra a seguinte figura,

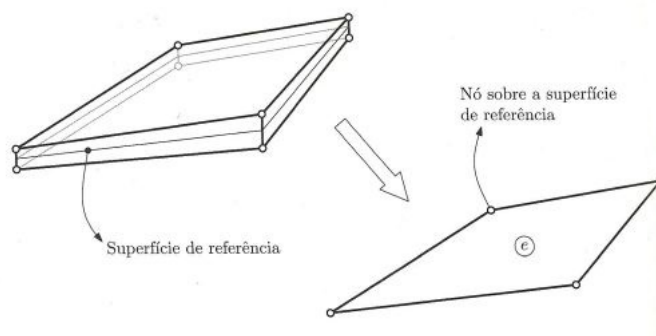


Figura 3.18: Representação do conceito de degeneração de um elemento tridimensional num elemento finito de superfície. [11]

Os elementos do tipo placa ou casca degenerados, tem como vantagem de que a sua formulação não é diretamente obtida a partir de uma teoria particular clássica de placas/cascas. Como já foi dito a metodologia de degeneração é a transformação de elementos tridimensionais para do tipo casca ou placa, e isso leva a uma outra grande vantagem da que o esforço computacional é menor. Pode então ser desprezada a energia de deformação associada às tensões normais à superfície de referencia, e por conta disso obtemos um estado plano de tensão em que as variações de espessura calculadas nos nós do elemento finito podem-se obter diretamente a partir da deformação normal, recorrendo a leis constitutivas apropriadas. [11]

4.1 Introdução

Numa primeira parte serão apresentados os procedimentos e os resultados dos ensaios experimentais de tração uniaxial, realizados nos laboratórios do departamento de engenharia mecânica da universidade de Aveiro, em provetes retangulares, para caracterizar o material quanto às suas propriedades. Os perfis para estantes de armazenamento industrial são fabricados em aço para construção, e em particular para esta tese, todos os provetes fornecidos pela empresa Kind, são fabricados em aço S355.

O aço S355 é um aço estrutural de alta resistência e baixa liga, e suas propriedades mecânicas e químicas estão normalizadas na NP EN 10025-2:2007. Normalmente esta classe do aço é utilizada em todos os aspetos da fabricação estrutural, como em componentes de pontes, em equipamentos de mineração e movimento de terra, em equipamentos de movimentação de carga e em componentes das torres de vento.

Embora se saiba qual o tipo de material que são fabricados os perfis para estantes de armazenamento industrial, o principal objetivo dos ensaios experimentais de tração uniaxial que se apresenta na primeira parte deste capítulo é o de determinar com mais pormenor os valores de deformação das curvas tensão-deformação nominais e verdadeiras, de modo a se poder construir um modelo de plasticidade, necessário para o estudo numérico de elementos finitos, através do software de simulação Abaqus-Simulia®.

Na segunda parte deste capítulo serão apresentados os procedimentos e os resultados dos ensaios experimentais das ligações por encaixe tendo como referência a norma EN 15512:2009.

4.2 Parte I - Ensaio Experimentais para a caracterização do material

Serão, nesta primeira parte, apresentados os procedimentos e resultados dos ensaios experimentais de tração uniaxial sob provetes retangulares que foram realizados nos laboratórios da universidade de Aveiro de modo determinar as deformações dos valores mínimos normalizados da tensão de cedência e da tensão de rotura para o material em estudo neste

capítulo, de modo a permitir que se construa um modelo de plasticidade para ser posteriormente utilizado, no capítulo 5 nas simulações numéricas como já foi referido.

4.2.1 Procedimentos experimentais

4.2.1.1 Fase I - Conceção dos provetes

Os provetes foram obtidos a partir de chapas de aço S355 de 1,5 milímetros de espessura, fornecidas pela empresa Kind. Foram cortados na guilhotina das oficinas do departamento de engenharia mecânica da Universidade de Aveiro, a partir de chapas, peças com 150 milímetros de comprimento e com 24 milímetros de largura e foram também identificados tendo em conta as orientações de laminagem de 0° e 90° . A figura que se segue mostra as siglas usadas na identificação dos provetes.

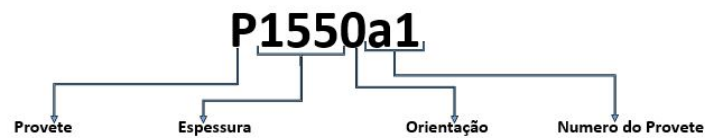


Figura 4.1: Nomenclatura dos provetes para os ensaios de tração uniaxial

Posteriormente as peças de chapa foram concebidos os provetes, num centro de maquinaria (CNC) das oficinas do departamento de engenharia mecânica da universidade de Aveiro, três provetes com a orientação de laminagem a 0° e três provetes com orientação de laminagem a 90° . Na figura 4.2 é representado o desenho do provete e que está também disponível no apêndice 1.

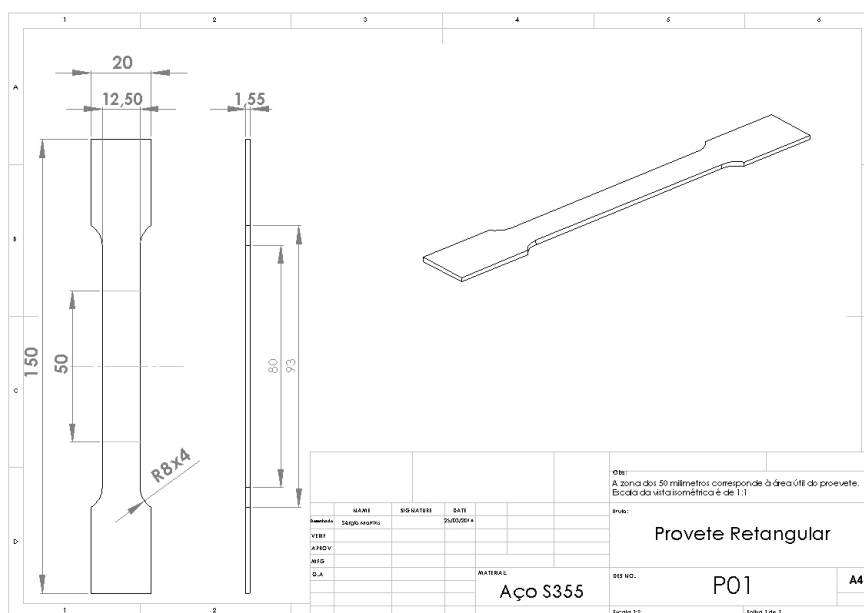


Figura 4.2: Desenho do provete rectangular.

4.2.1.2 Fase II - Preparação dos provetes

Antes de terem sido submetidos aos ensaios de tração, foram colados nos provetes duas tiras retangulares de cartolina na área útil do provete. As tiras retangulares foram distanciadas em relação ao centro do provete de aproximadamente 50 milímetros, sendo este considerado o comprimento inicial, l_0 , do provete como mostra a figura 4.3. A colocação das tiras retangulares foram posicionadas com uma das suas faces transversais o mais retilíneo possível, para posterior medição dos deslocamentos através de um vídeoextensómetro.

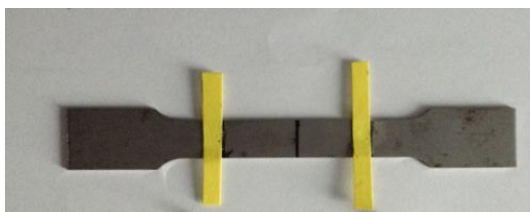


Figura 4.3: Marcas Retangulares na área útil do provete

4.2.1.3 Fase III - Preparação dos Equipamentos utilizado nos ensaios

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram a máquina universal Shimadzu 50kN-AG, que contém uma célula de carga até 50kN e que mede a força exercida no instante em que é aplicada; e o vídeoextensómetro Messphysic ME 46 NG, que é uma câmara de aquisição de imagem com um software integrado (figura 4.4 b) e que serviu para registar os deslocamentos ao longo dos ensaios, para posteriormente no tratamento dos dados, calcular as deformações nominais.



(a)



(b)

Figura 4.4: Equipamentos utilizados nos ensaios: (a) Máquina Universal Shimadzu 50kN-AG, (b) Vídeo Extensómetro Messphysic ME 46 NG

Posicionou-se o vídeoextensómetro de modo a se poder efetuar uma calibração com auxílio de um calibrador próprio. Houve necessidade de se obter boas condições de luminosidade, por isso foi colocado na parte de trás da máquina Shimadzu uma luz artificial de modo a se ter uma boa qualidade de imagem, produzida pelo vídeoextensómetro. A imagem da figura 4.5 ilustra o posicionamento do vídeoextensómetro face à máquina universal Shimadzu 50kN-AG.

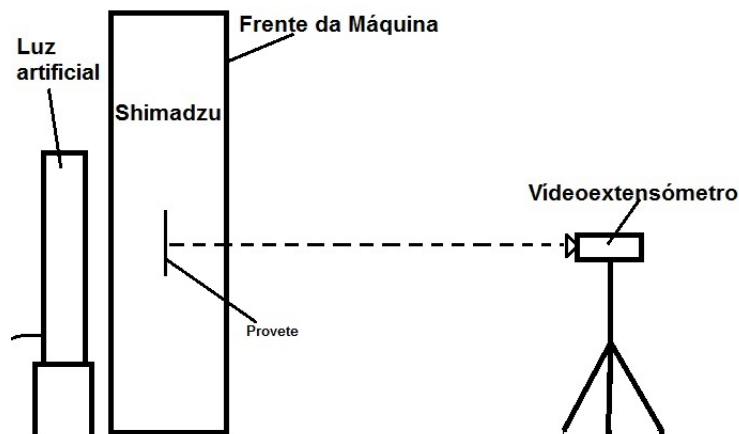


Figura 4.5: Ilustração do posicionamento do vídeo extensómetro para aquisição de imagem do provete

De seguida colocaram-se os provetes nas amarras e teve-se o cuidado de verificar se o provete e as tiras de cartolina apanhavam o campo de visão do videoextensómetro. Os ensaios foram efetuados a uma velocidade de 5 mm/min, e em instantes de tempo de 0,3 segundos. Foram submetidos a ensaios seis provetes, três provetes com orientação de laminação a 0° e três provetes com orientação de laminação a 90° .

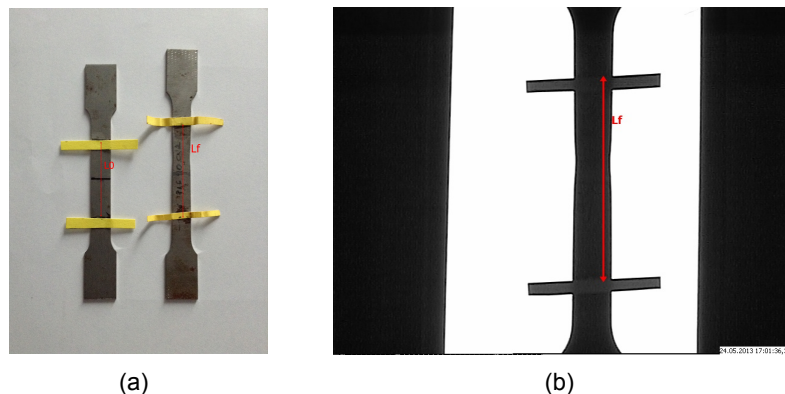


Figura 4.6: Antes e depois dos ensaios: (a) Provete inicial e provete após ser submetido ao ensaio, (b) Após o ensaio visto a partir da imagem captada pelo videoextensómetro

Após os ensaios realizados pode-se observar o alongamento que os provetes sofreram em relação às suas condições iniciais. Na figura 4.6 mostra-se um exemplo do antes e depois do ensaio.

4.2.1.4 Fase IV - Tratamento de dados e Resultados

Depois de efetuados os ensaios de tração, foram descarregados os ficheiros de dados da máquina Shimadzu e procedeu-se ao tratamentos de dados no programa *Excel Microsoft Office*.

Os parâmetros que foram registados nos ficheiros de dados foram o tempo, a carga, e os deslocamentos longitudinais e transversais. A tensão nominal foi calculada com a equação 3.1 e a deformação nominal foi calculada com auxílio da equação 3.2 através dos

deslocamentos longitudinais(direção axial do provete). A partir destes dados foram construídos os gráficos tensão-deformação nominal para cada provete. A tabela que se segue mostra o nome de cada provete com a sigla usada da figura 4.1 bem com as medidas iniciais dos provetes.

Tabela 4.1: Nome dos provetes ensaiados e suas condições iniciais.

| Provetes | L_0 longitudinal(mm) | L_0 transversal(mm) | Espessura(mm) |
|----------|------------------------|-----------------------|---------------|
| P1550a1 | 50 | 12,5 | 1,5 |
| P1550a2 | 50 | 12,5 | 1,5 |
| P1550a3 | 50 | 12,5 | 1,5 |
| P15590a1 | 50 | 12,5 | 1,5 |
| P15590a2 | 50 | 12,5 | 1,5 |
| P15590a3 | 50 | 12,5 | 1,5 |

A partir dos dados registados nos ensaios de tração uniaxial, representou-se então o gráfico tensão-deformação nominal para cada provete que é mostrado na figura seguinte,

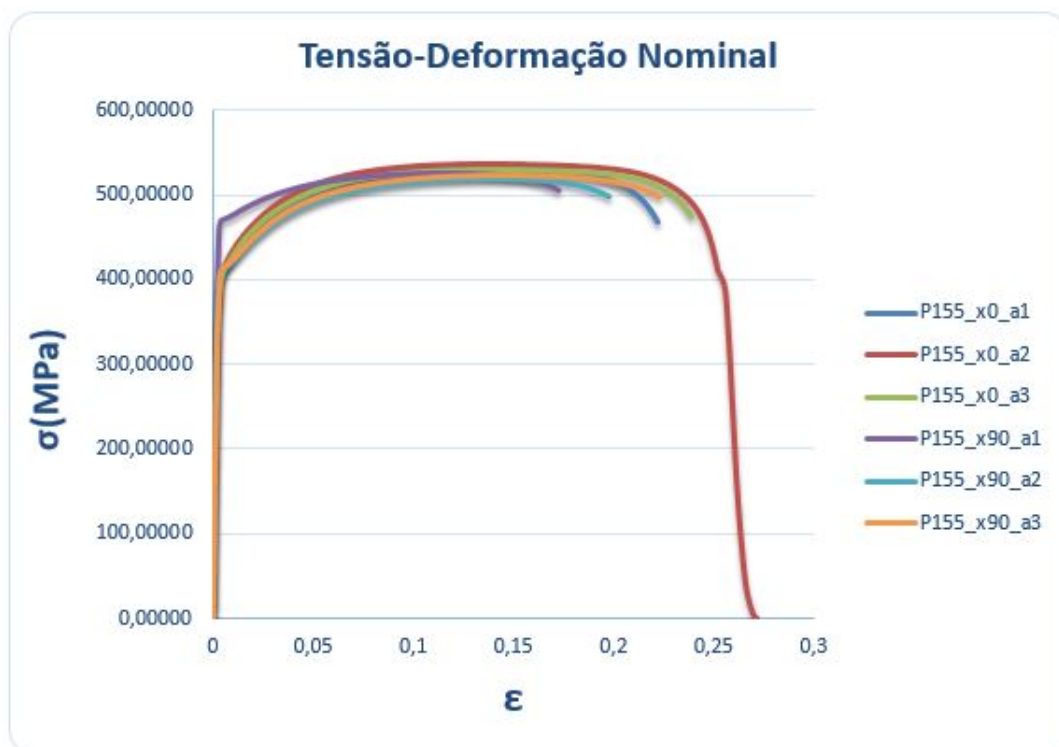


Figura 4.7: Gráfico tensão-deformação nominal resultante dos ensaios

e partir daqui obtiveram-se os parâmetros do material. Primeiro obtiveram-se as curvas corrigidas para determinar a tensão de cedência através da interseção da linha a 0,2% de deformação. A tensão de rotura é o valor máximo das tensões nominais. Para efeitos de projeto o módulo de elasticidade foi considerado 210000 MPa e o coeficiente de Poisson 0,3.

Tabela 4.2: Valores médios da curva nominal das propriedades mecânica do material

| Provetes | $\sigma_{c0.2}$ (MPa) | σ_r (MPa) | ε_r | e (%) |
|---------------|-----------------------|------------------|-----------------|-------|
| P1550 | 404 | 533 | 0,131 | 24 |
| P15590 | 430 | 522 | 0,127 | 22 |

De seguida, a partir dos dados das curvas corrigidas, trataram-se os dados de modo a se obter os gráficos de tensão-deformação verdadeira através das equações 3.10, 3.11, 3.13 e 3.14.

A figura 4.7 representa a curva tensão-deformação verdadeira resultante dos ensaios de tração uniaxial.

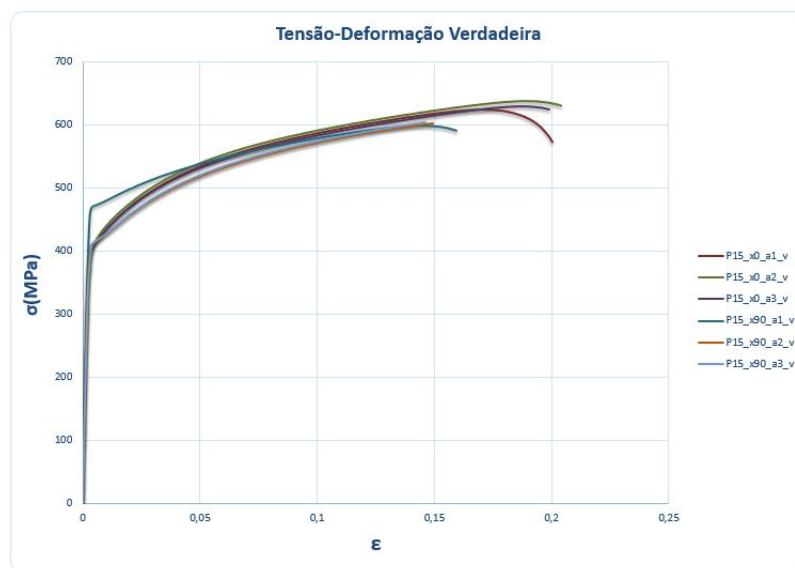


Figura 4.8: Gráfico tensão-deformação verdadeira resultante dos ensaios

De seguida calcularam-se os valores verdadeiros das propriedades mecânicas do material que se apresentam na seguinte tabela.

Tabela 4.3: Valores médios da curva verdadeira das propriedades mecânica do material

| Provetes | $\sigma_{c0.2}$ (MPa) | σ_{vr} (MPa) | ε_{vr} (MPa) |
|---------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| P1550 | 404 | 603 | 0,121 |
| P15590 | 430 | 588 | 0,119 |

Após obter os resultados experimentais, recorreu-se a um modelo de plasticidade, para utilizar posteriormente no capítulo 5 nas simulações numéricas. Recorreu-se então à equação da lei de Swift para se obter a curva de encruamento, em que foi necessário estimar três constantes: K , que representa o coeficiente de resistência, para o coeficiente de encruamento n , ε_0 considerou-se o valor de deformação 0,2% no limite elástico. A variável ε é o valor das deformações plásticas. A equação seguinte mostra a lei de Swift,

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (4.1)$$

O método do qual são obtidos as constantes da equação de Swift, considera-se a equação acima nas condições iniciais de plasticidade considerando ε_0 da equação, o valor lido de deformação para a tensão de cedência, que foi considerado 0,2%, e considerando as condições finais dos ensaios de tração utilizando a deformação máxima e a sua respetiva tensão, o que nos leva a um sistema de equação,

$$\begin{cases} \sigma_0 = K(\varepsilon_0 + 0)^n \\ \sigma_{mx} = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_{mx})^n \end{cases} \quad (4.2)$$

Do sistema de equação 4.2, despreza-se ε_0 face a ε_{mx} originando o seguinte sistema de equação,

$$\begin{cases} \sigma_0/K = (\varepsilon_0)^n \Leftrightarrow \ln(\sigma_0) - \ln(K) = n \ln(\varepsilon_0) \\ \sigma_{mx} = K(\varepsilon_{mx})^n \Leftrightarrow \ln(\sigma_{mx}) = n \ln(\varepsilon_0) + \ln(K) \end{cases} \quad (4.3)$$

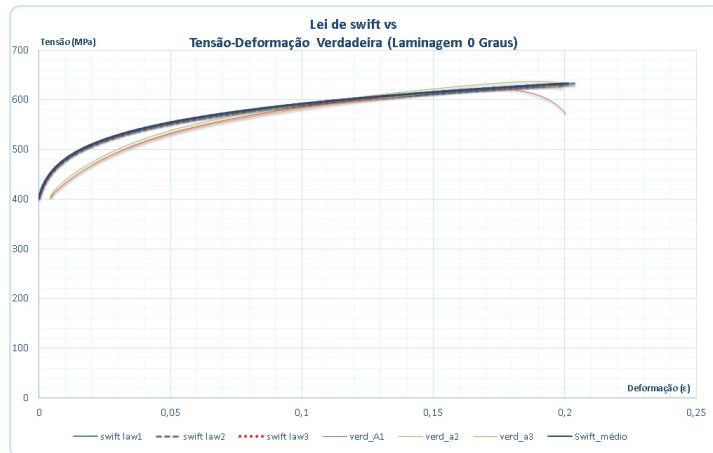
As constantes da equação de Swift foram calculadas a partir dos valores (necessários para o sistema de equação 4.3) das curvas tensão-deformação verdadeiras, obtidas a partir dos ensaios de tração uniaxial.

As propriedades elásticas do material e a equação de Swift, que dita a curva de encruamento, para o aço laminado a 0° e 90° apresentam-se na seguinte tabela.

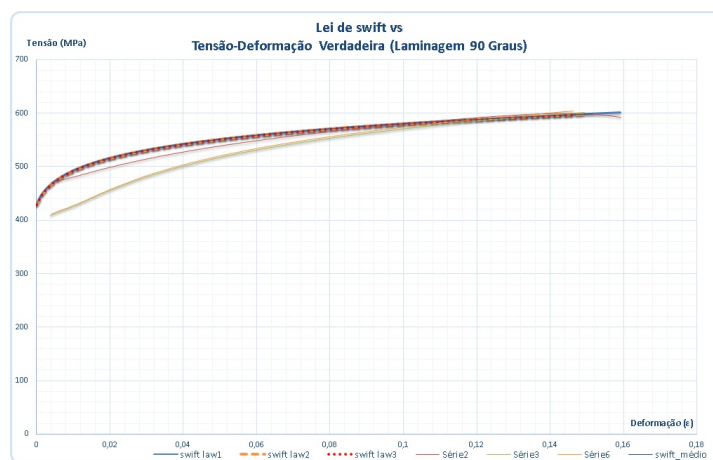
Tabela 4.4: Propriedades material

| Material | | Aço S355 (Laminado 0°) | Aço S355 (Laminado 90°) |
|--|-----------------|------------------------|-------------------------|
| Modulo de Young E (MPa) | | | 210000 |
| Coefficiente de Poisson ν | | | 0,3 |
| Equação de Swift ($\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$) | K | 739 | 691 |
| | ε_0 | 0,002 | 0,002 |
| | n | 0,0972 | 0,0765 |

Na figura seguinte mostram-se os gráficos tensão-deformação verdadeira com as respetivas curvas derivadas das equações de Swift da tabela 4.4 para cada orientação de laminação.



(a) Aço S355 laminado 0°



(b) Aço S355 laminado 90°

Figura 4.9: Curva tensão-deformação verdadeira para ambas orientações de laminagem e os respectivos gráficos da equação de Swift.

4.3 Parte II - Ensaio Experimentais das ligações por encaixe

Nesta secção será apresentada a segunda parte deste capítulo, onde serão descritos os procedimentos e apresentados resultados experimentais dos ensaios das ligações por encaixe, em provetes (viga+pilar) fornecidos pela empresa KIND, que asseguram a montagem das estantes de armazenamento industrial convencionais. Os ensaios que serão apresentados nesta secção seguem a norma EN 15512:2009, particularmente os anexos A2.4 para testes de flexão determinando a resistência e rigidez das ligações e A2.5 para determinação das folgas.

Este tipo de ensaios devem ser realizados, para se poder prever o comportamento dos diferentes tipos de ligações por encaixe, viga+pilar, uma vez que para estruturas de componente finos, o comportamento é instável e não se consegue prever com rigor o comportamento, neste caso, das ligações.

Para este estudo foram considerados sete tipos de ensaios de ligações por encaixe viga+pilar, diferenciando-se entres eles os seguintes aspetos:

- Espessura e largura do pilar
- Número de garras de encaixe
- Posicionamento da viga no conector

O posicionamento da viga no conector, refere-se ao facto da viga estar soldada a meio do conector ou soldada à face do topo do conector.

4.3.1 Norma EN 15512:2009

A norma EN 15512:2009 especifica todos os requerimentos para projeto de estruturas de sistema armazenamento industrial, fabricados em aço, que tem como objetivo de suportar unidades de cargas, predominantemente estáticas. Os requerimentos que se apresentam nesta norma, acerca do projeto deste tipo de estrutura, não se encontram na norma EN de 1993.

A EN 15512:2009, não é aplicável aos sistemas moveis de estruturas de armazenamento, como o *drive-in/drive-through*, cantiléver e a sistemas estáticas de prateleiras em aço, nem apresenta regras específicas para o projeto para avaliar este tipo de estruturas em zonas sísmicas. Esta norma apresenta apenas os princípios de projeto de estruturas de armazenamento industrial do tipo *rack*. Existem outras normas que estão referidas na introdução da EN 15512:2009 que se direcionam para outros aspetos e especificações para este tipo de estruturas.

No âmbito desta tese, foram adotados os procedimentos experimentais, para ensaios de ligações por encaixe, que a norma EN 15512:2009 descreve no Anexo A.2.4 e que será objeto principal nesta secção.

Pretende-se com estes ensaios estudar as ligações por encaixe quanto à rigidez e quanto à resistência à flexão. Para este tipo de estruturas é necessário prever-se o comportamento da ligação (viga+pilar), pois não se consegue prever com precisão como será esse comportamento. Os fatores que podem interferir no comportamento deste sistema de ligação são, o tipo de pilar, a espessura do pilar, o tipo de viga, a posição da viga no conector, o método de como o conector está ligado à viga, o tipo de orifícios do pilar e as propriedades mecânicas do material que são concebidos os componentes que constituem a ligação.

No Anexo A2.5 apresenta-nos o método que permite determinar folgas das ligações sujeitas a ensaios. [13]

4.3.2 Procedimentos Experimentais

Os provetes que aqui foram sujeitos a ensaios foram selecionados e fornecidos pela empresa KIND, de modo a se estudar o seu comportamento. Foram sujeitos a ensaios sete provetes aleatoriamente escolhidos, do conjunto viga+pilar, para se determinar qual a sua resistência à flexão e sua rigidez. Os provetes foram identificados de modo análogo que foram os provetes dos ensaios de tração uniaxial. A figura seguinte mostra a nomenclatura adotada para identificação dos provetes das ligações quanto às suas características,



Figura 4.10: Nomenclatura dos provetes das ligações

Como já foi dito anteriormente o experimento que normalmente se deve realizar para as ligações por encaixe é o que está apresentado na norma EN 15512:2009, anexo A.2.4. No entanto existem algumas particularidades que foram adotadas no método de medição do ângulo de rotação da viga como veremos mais à frente nesta secção, entre outros aspetos.

A figura 4.11 mostra um esquema de montagem dos ensaios do qual se deve adotar, segundo a norma anteriormente referida, para o estudo das ligações por encaixe,

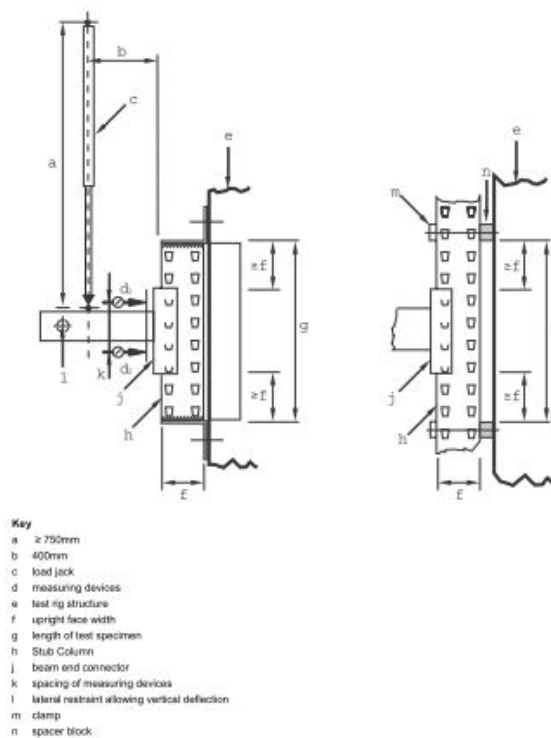


Figura 4.11: Esquema de montagem dos ensaios das ligações por encaixe. [13]

Na tabela seguinte apresentam-se as características de cada provete dos conjuntos viga+pilar que foram sujeitos a ensaios,

Tabela 4.5: Medidas dos provetes testados

| Provete | Viga | | | Conetor | | | Pilar | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--|
| | a (mm) | L (mm) | e (mm) | b (mm) | Garras | c (mm) | t (mm) | L (mm) | |
| P75VC903G | 90 | 500 | 1,5 | 220 | 3 | 75 | 1,8 | 525 | |
| P100VC903G | 90 | 500 | 1,5 | 220 | 3 | 100 | 1,8 | 525 | |
| P100VF903G | 90 | 500 | 1,5 | 220 | 3 | 100 | 1,8 | 525 | |
| P83SVC903G | 90 | 500 | 1,5 | 220 | 3 | 83 | 2,0 | 525 | |
| P114LVC903G | 90 | 500 | 1,5 | 220 | 3 | 114 | 2,0 | 525 | |
| P47VF904G | 90 | 500 | 1,5 | 198,5 | 4 | 47 | 1,8 | 600 | |
| P100VC904G | 90 | 500 | 1,5 | 275 | 4 | 100 | 1,8 | 600 | |

Os valores das medidas dos provetes da tabela 4.5 têm como base em desenhos técnicos (Anexo 3) e em modelos 3D fornecidos pela empresa KIND, onde a é a altura da viga, e a espessura da viga, b altura do conetor, c a largura do pilar e t a espessura do pilar. Genericamente, a seguinte figura mostra as dimensões dos componentes que constituem a ligação e se relacionam com algumas medidas apresentadas na tabela 4.5.

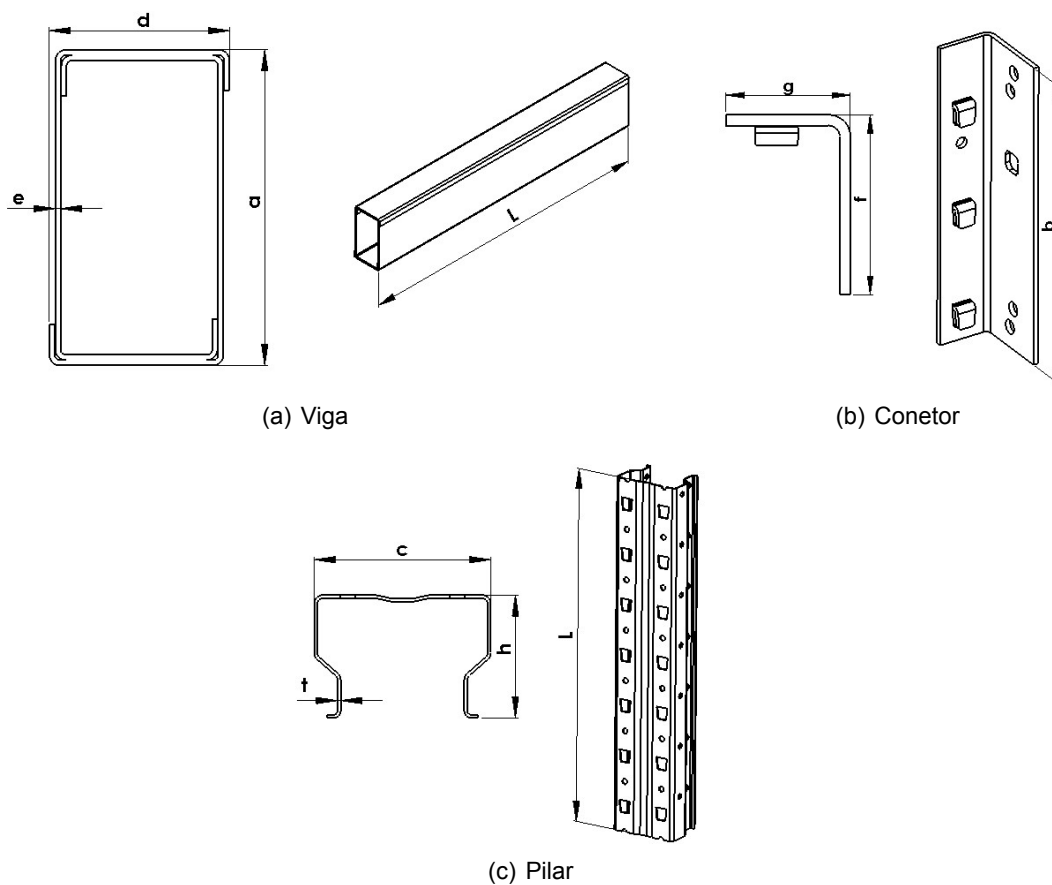


Figura 4.12: Dimensões genéricas dos componentes

4.3.2.1 Fase I - Montagem dos ensaios

• Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados na montagem dos ensaios das ligações, foram a máquina universal Shimadzu 50 kN-AG, o vídeoextensómetro Messphysic ME 46 NG, o microscópio, um suporte e um sistema de rolamentos (para usar nos ensaios, no sentido de tração e compressão)¹, tendo sido projetados por alunos da Universidade de Aveiro no âmbito de uma outra unidade curricular e produzidos pela empresa KIND.



(a) Shimadzu 50kN AG



(b) Microscópio



(c) Vídeoextensómetro

Figura 4.13: Equipamentos utilizados nos ensaios

• Montagem do sistema

O primeiro componente a ser montado foi o suporte que foi fixo na base da máquina Shimadzu 50kN AG usando uniões aparafusadas. Na parte traseira do suporte foi colocado um apoio para garantir a estabilidade do suporte de possíveis movimentos ao qual também se nivelou o suporte de acordo com as necessidades pretendidas.

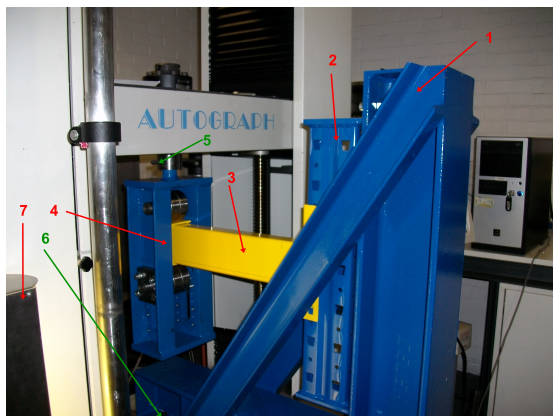
De seguida foi montado o veio de aperto da célula de carga (anexo 4) e também o sistema de rolamentos para gerar a força de flexão dos perfis. Após a montagem do veio de aperto, o sistema de rolamentos é montado através de uma cavilha que liga ao veio de aperto. Após a montagem do veio de aperto, o sistema de rolamentos é montado através de uma cavilha que liga ao veio de aperto.

O passo seguinte foi a montagem da ligação viga² e pilar, o qual será referido a seguir no próximo subcapítulo.

A figura 4.14 apresenta a montagem dos sistema de ensaios em vários ângulos,

¹Os desenhos técnicos estão disponíveis no anexo 4

²Quando se refere à viga, já se considera também o conetor, uma vez que este está soldado à viga.



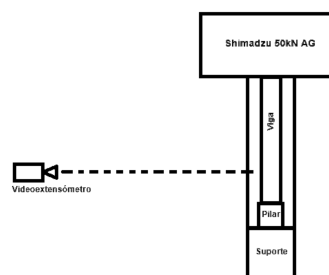
(a) 1-Suporte; 2-Pilar; 3-Viga+Conetor; 4-Sistema de rolamentos; 5-Fixação do sistema de rolamentos por cavilha; 6-Fixação do suporte na base da máquina Shimadzu 50kN-AG por parafuso; 7-Luz artificial



(b) 1-Apoio do Suporte; 2-Vídeoextensómetro



(c) Fixação do Pilar no suporte por parafusos



↑ Vista aproximada da figura 14.3(b)

(d) Representação esquemática da posição do vídeoextensómetro no ensaio (vista de cima)

Figura 4.14: Montagem dos ensaios das ligações por encaixe.

É de referir que na figura 4.14 (a), já se encontra com uma ligação montada. Na subsecção seguinte será apresentado com detalhe a preparação da montagem das ligações sujeitas a ensaios.

4.3.2.2 Fase II - Preparação dos ensaios

Como primeiro passo da preparação dos ensaios, instalou-se o vídeoextensómetro numa posição perpendicular, como refere a figura 4.14(b). Como se pode verificar, na representação esquemática da figura 4.14 (d) para mostrar a posição do vídeoextensómetro face aos provetes viga+pilar.

A próxima etapa foi a montagem da ligação onde em primeiro lugar, se fixou o pilar no suporte, que contém 4 furos, com auxílio de parafusos e porca (figura 4.14 (c)).

Após a montagem do pilar, procedeu-se à preparação e montagem da viga. A norma EN 15512:2009 recomenda, no ponto A2.4.2 alínea d) (ver anexo 1), que os dispositivos de medição que devem ser usados transdutores de deslocamento ou inclinómetros, para posterior cálculo da rotação, que devem ser colocados o mais próximo possível do conetor. Para estes ensaios em particular, foi utilizado um outro método de medição, utilizando um

vídeoextensómetro (como já referido na seção 4.3.2.1) e as marcas óticas, que foram obtidas por impressão, como alternativa de medição da rotação. A figura seguinte mostra a fase de colocação das marcas óticas nas vigas,

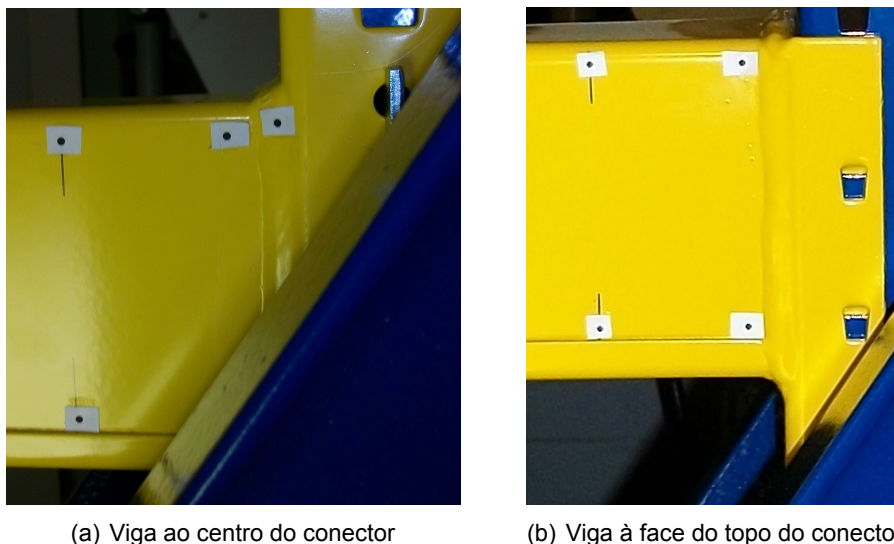


Figura 4.15: Colocação das marcas óticas nas vigas

A colocação das marcas óticas para o caso das vigas ao centro do conector foram apenas considerados dois pontos (marcas óticas mais afastadas do conector da figura 4.15 (a)), uma vez que a área de visão do vídeoextensómetro alcançava parte do suporte e não permitia colocar mais pontos. Para o caso das vigas no topo foram utilizados quatro marcas óticas (mais afastados e mais próximos do conector da figura 4.15 (b)), mas dois deles foram utilizados apenas para comparação, de modo a se querer verificar se havia muitas discrepâncias em relação ao pontos considerados menos próximos do conector, o que se verificou que não havia muita diferença.

Com a colocação dos pontos necessários na viga para posterior medição da rotação, seguidamente foi efetuado uma calibração do vídeoextensómetro.

Antes da calibração, a viga foi encaixada no pilar numa posição central deixando os topos de cima e de baixo do conector a uma distância superior ou igual à largura do pilar (ver figura 4.11). A figura seguinte ilustra a posição da viga no pilar,



Figura 4.16: Encaixe da viga no pilar

Este processo de montagem foi igualmente efetuado para todos os provetes que foram sujeitos a ensaio.

- **Calibração do vídeoextensómetro**

Como já foi referido, nas secções dos ensaios de tração uniaxial, o vídeoextensómetro é um aparelho de aquisição de imagem acompanhado por vários *software* para medição de deslocamentos num eixo ou num plano. Os diferentes *software* são utilizados consoante o tipo de medição que se pretende realizar. Neste caso foi utilizado o *Dotmeas*. O *Dotmeas* serve para medir os deslocamentos de pontos no plano do provete considerado, registando as coordenadas desses pontos. Mas antes de se ter efetuado as medições dos deslocamentos, foi necessário calibrar o vídeoextensómetro com auxílio do *software Dotmeas*. No *software Dotmeas* foi necessário referir a quantidade de marcas óticas (pontos) a considerar assim como o tamanho do quadrado para captar a marca ótica. De seguida criou-se um calibrador em papel com 10 marcas óticas (pontos) impressas. Foi colocado também uma luz artificial (figura 4.14 (a)), para melhorar as condições de luminosidade da imagem captada pelo vídeoextensómetro.

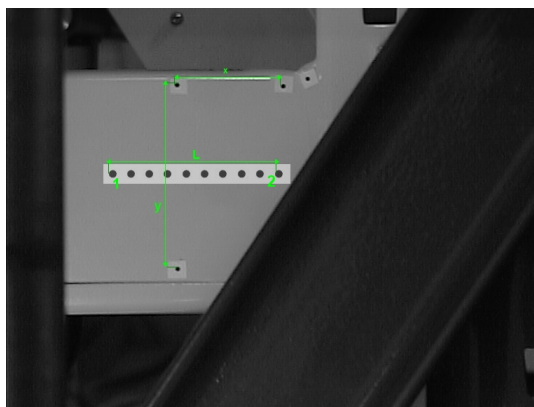


Figura 4.17: Calibração do vídeoextensómetro

No calibrador, mediu-se a distância total centro a centro, entre as marca óticas 1 e 2 da figura 4.17, com auxílio do microscópio disponível no laboratório (figura 4.13(b)), e registou-se a medição. Observou-se no microscópio que a impressão das marcas óticas não estavam perfeitas, o que pode ter levado a erros de medição embora esse seja muito significativo uma vez que o microscópio contém uma resolução na ordem dos 0,001mm (1 μm). O valor medido foi registado no software *Dotmeas* para informar que aquele valor medido, correspondia à distância centro a centro das marcas óticas entre 1 e 2. Após ter-se registado o valor medido, efetuou-se uma medição da distância das marcas óticas em x e em y (figura 4.17), fazendo uma simulação de registo, em ficheiro ".txt", das coordenadas (x,y) das marcas óticas, confirmando a distância de x e y da figura 4.17, através da diferença entre as coordenadas de x das marcas na horizontal e as coordenadas de y das marcas na vertical como ilustra a figura 4.17, confirmando essa medida aproximadamente com uma régua pequena na viga, no espaço real.

Esta calibração era apenas efetuada quando havia alguma mudança de condições do ensaio.

4.3.3 Ensaio A2.5 para medição da folga das ligações

Antes de se proceder ao ensaio A2.4, procedeu-se ao ensaio A2.5 como objetivo de determinar a folga das ligações. A norma EN 15512:2009, recomenda para o ensaio A2.5 que se adote a mesma montagem dos ensaios A2.4, aplicando lentamente uma carga correspondente a pelo menos 10% de M_{rd} (momento limite de projeto) no sentido de tração da máquina, e a 10% de M_{rd} no sentido de compressão da máquina como mostra a seguinte figura,

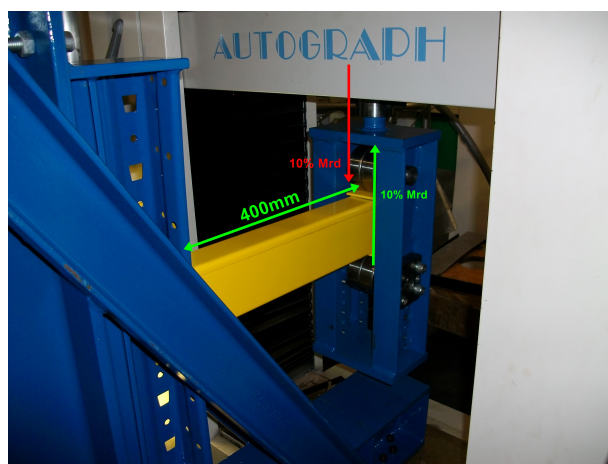


Figura 4.18: Ensaio A2.5: Seta a vermelho - Compressão; Seta a verde - Tração

o que se vai obter nestes ensaios é parte do gráfico resultantes do ensaio A2.4. Os 10% de M_{rd} , referem-se a uma recomendação da norma para a determinação da folga, onde apenas se registam os valores $M(\theta)$, na zona elástica do gráfico, ou seja, sem atingir deformação plástica.

Após a calibração do vídeoextensómetro procedeu-se à realização dos ensaios A2.5. A velocidade que foi adotada nos dois sentidos (tração e compressão), foi de 1 mm/min. Também se calibrou o sistema de rolamentos para que quando estivesse minimamente encostado na viga, essa posição seria a posição zero, ou seja, deslocamento igual a zero.

4.3.3.1 Tratamento de dados e Resultados

Durante a realização dos ensaios A2.5 foram registados no *Dotmeas* as coordenadas das marcas óticas, e no software de compressão e de tração da máquina Shimadzu 50kN-AG, foram registados a força e o deslocamento no ponto de aplicação da força. O ponto de aplicação da força refere-se ao ponto em que os rolamentos tocam na viga. O sistema de rolamentos está montado no travessão da máquina, como já referido anteriormente, onde se encontra a célula de carga com capacidade de 50 kN que regista os valores da carga aplicada ao longo do tempo.

Depois dos dados registados, procedeu-se ao tratamento dos dados, através do software *Microsoft Excel 2013*. No tratamento dos dados foi necessário construir uma macro (ver anexo 6), através do programa *Microsoft Visual Basic for Application*, para fazer o cruzamento dos dados que foram registados na Shimadzu 50 kN AG e dos dados registados no *Dotmeas*. O cruzamento de dados consiste em juntar e considerar apenas os dados que se necessita para chegar a determinado resultado. Nestes ensaios, com o objetivo de determinar a folga das ligações, pretendia-se obter um gráfico semelhante ao da figura 4.19,

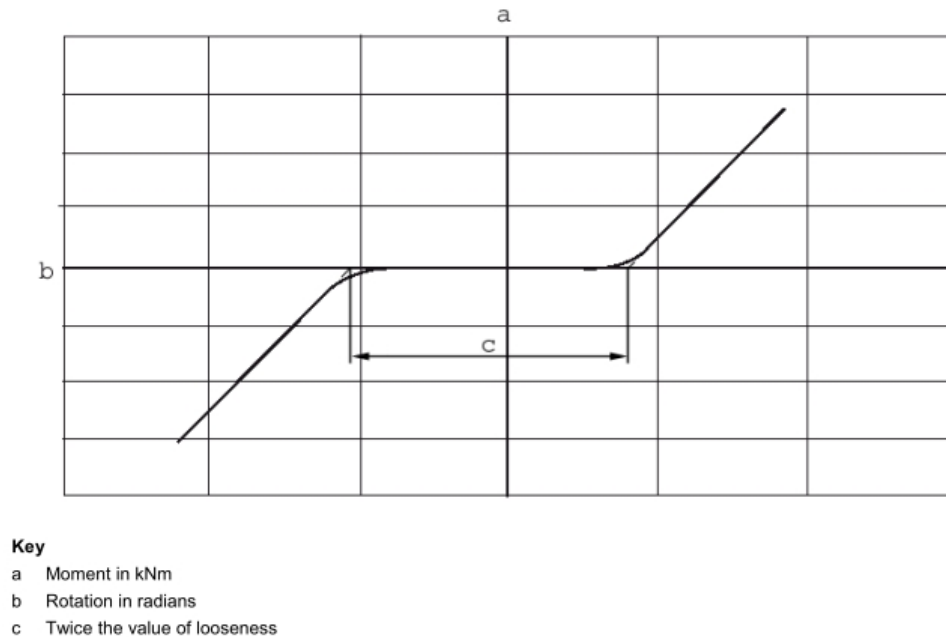


Figura 4.19: Gráfico genérico para a determinação da folga em ligações por encaixe. [13]

que representa os 10% de M_{rd} que a norma refere, no sentido de compressão e no sentido de tração. O valor de a no gráfico representa o Momento, o valor de b representa a rotação em radianos e o valor de c corresponde a duas vezes o valor da folga. O valor da folga é representado por ϕ_{li} e é dado pela seguinte expressão,

$$\phi_{li} = \frac{c}{2} \quad (4.4)$$

onde ϕ_{li} é a folga. O cálculo da folga é necessária para estudar as oscilações imperfeitas das estruturas (capítulo 5.3 da norma EN 15512:2009), que para este trabalho serviram apenas para verificação podendo influenciar nos resultados experimentais referentes ao anexo A2.4 prescrita na norma EN 15512:2009.

• Cálculo do Ângulo e determinação do centro médio

O cálculo do ângulo foi realizado por dois métodos diferentes. No primeiro método recorreu-se ao cálculo dos declives das retas, que são constituídas pelas coordenadas registadas pelo *Dotmeas* e o centro médio. Antes de se calcular o ângulo foi preciso encontrar o centro médio que se refere a aproximadamente ao ponto de rotação de todas as marcas óticas (pontos do gráfico da figura 4.20), que foi verificado após encontrar a reta perpendicular. Para isso foi necessário considerar todas as coordenadas das marcas óticas, que foram registadas através do vídeoextensómetro, e para cada marca ótica determinaram-se as retas às quais pertenciam ao ponto da posição no instante inicial e final. De seguida determinou-se o ponto médio dessas mesmas retas e obteve-se a equação da reta perpendicular à reta acima referida. A figura 4.20 ilustra o processo de determinação do centro médio utilizando o primeiro método acima referido.

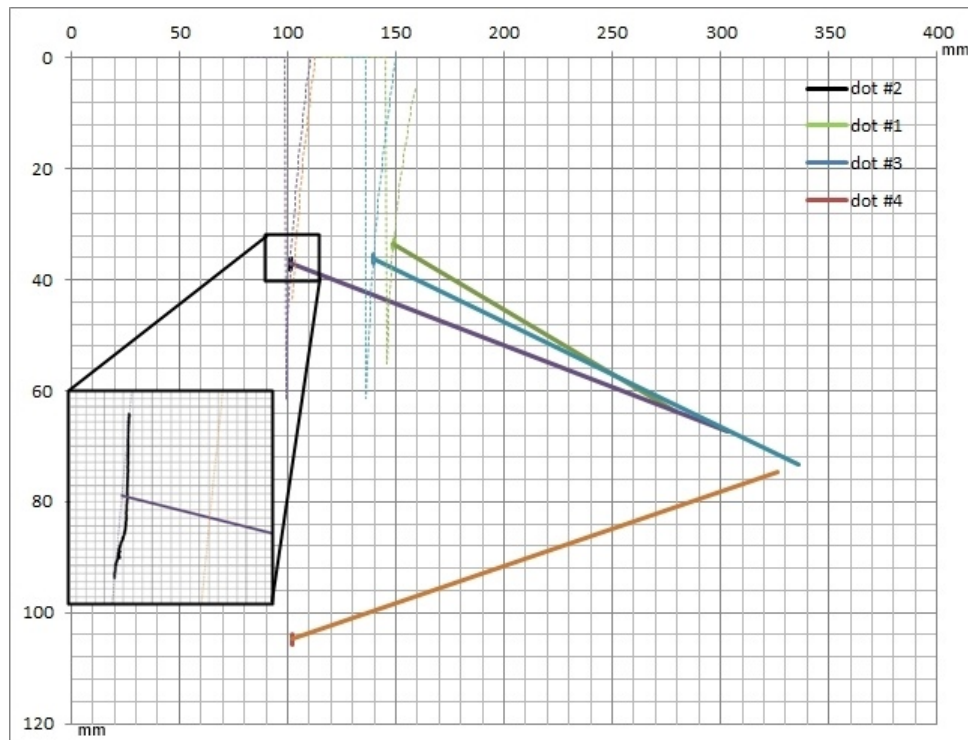


Figura 4.20: Cálculo do ângulo através dos declives das retas e determinação do centro médio

Os declives calculados ao longo de todo o percurso efetuado pelas marcas óticas durante o ensaio, são das retas que contêm os pontos que foram registados ao longo do tempo no *Dotmeas* e o centro médio de rotação, utilizando-se a expressão matemática,

$$m = \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \quad (4.5)$$

onde m é declive da reta, x_i e y_i o ponto no instante i da aplicação da carga, e x_0 e y_0 o ponto do centro médio. O cálculo instantâneo do ângulo de rotação, foi efetuado através da seguinte expressão matemática,

$$\tan \theta = \frac{m_0 - m_i}{1 + m_0 * m_i} \quad (4.6)$$

em que θ é o ângulo de rotação, m_0 e m_i são os declives inicial e final instantâneo respetivamente.

O segundo método utilizado para o cálculo do ângulo, foi efetuado através da utilização da expressão A.8 da norma EN 15512:2009 apresentada como,

$$\theta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{d} \quad (4.7)$$

onde, δ_2 e δ_1 são os deslocamentos na horizontal das marcas óticas (orientação do eixo dos x) e d a distância entre as marcas óticas em análise. Os deslocamentos foram calculados através das coordenadas das marcas óticas em x em cada instante registado e a distância d foi calculada através da diferença entre as coordenadas de y de cada marca ótica em análise. A expressão 4.7 só pode ser usada quando se tratam de ângulos muito pequenos. A seguinte figura mostra uma ilustração do cálculo do ângulo através das marcas óticas.

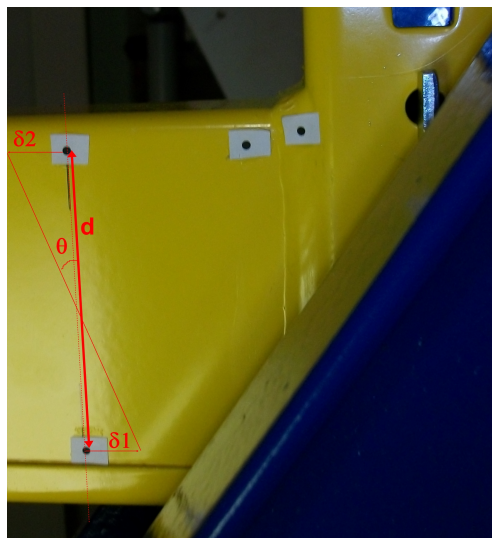


Figura 4.21: Ilustração da medição do ângulo através da expressão A.8 da norma EN 15512:2009

O ângulo foi calculado pelos dois métodos acima descritos, para todos os provetes testados.

Após a realização de todos os ensaios A2.5, construíram-se os gráficos $M(\theta)$ para determinação da folga.

• Cálculo da Folga

Para o cálculo da folga, apenas se consideraram os valores para o qual graficamente se verificou que não houve deformação plástica. Nos gráficos $M(\theta)$ efetuou-se uma regressão linear nessa zona, obtendo-se uma equação da reta resultante da regressão linear efetuada no software *Microsoft Excel 2013*. Foi a partir dessa equação, que se determinou o ponto que intersesta o eixo das rotações, na parte de tração e compressão. A figura 4.22 mostra um exemplo, de como se determinou o valor da folga assim como os gráficos $F(d)$ e $M(\theta)$,

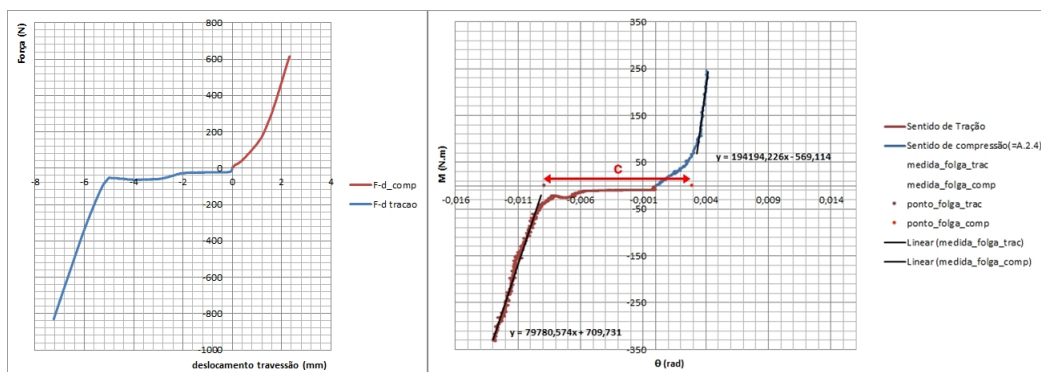


Figura 4.22: Ilustração da medição da folga. Esquerda: Força vs Deslocamento; Direita: Momento vs Rotação

No apêndice 2 encontram-se todos os gráficos, Força x Deslocamento e Momento x Rotação, necessários para o cálculo da folga, bem como os gráficos Momento Rotação onde se efetuou a determinação da folga de cada provete.

O valor final da folga a considerar, é a média das folgas determinadas em cada provete, através da expressão 4.2. Na tabela 4.6, apresentam-se os resultados das folgas de todas as amostras de cada provete assim como a folga média e o seu respetivo erro padrão,

Tabela 4.6: Folgas Médias

| Provetes | Folga das Amostras (Φ_i) | | | | | | Folga média (Φ) | ± | Erro Padrão |
|-------------|---------------------------------|---------|---------|----|----|---------|------------------------|---|----------------|
| | a1 | a2 | a3 | a4 | a5 | a6 | | | |
| P47VF904G | 0,00017 | 0,00145 | 0 | - | - | - | 0,00054 | ± | 0,00046 |
| P75VC903G | 0,00369 | 0,00383 | 0,00387 | - | - | - | 0,00380 | ± | 0,00005 |
| P83SVC903G | 0,00034 | 0,00011 | 0 | - | - | - | 0,00015 | ± | 0,00010 |
| P100VC903G | 0,00599 | 0,00591 | 0,00414 | - | - | - | 0,00535 | ± | 0,00060 |
| P100VF903G | 0,00578 | 0,00547 | 0,00443 | - | - | - | 0,00523 | ± | 0,00041 |
| P114LVC903G | 0,00081 | 0,00041 | 0 | 0 | - | 0,00041 | 0,00033 | ± | 0,00015 |
| P100VC904G | 0,00287 | 0,00316 | 0,00332 | - | - | - | 0,00312 | ± | 0,00013 |

• Discussão dos resultados para determinação das folgas

Pode-se verificar nos resultados apresentados destes ensaios, que as folgas são muito pequenas. Isto verifica-se não apenas nos valores apresentados na tabela 4.6, uma vez que se observou, durante os ensaios, que as vigas encaixavam com aperto nalgumas amostras. O método utilizado para o cálculo da folga, através da regressão linear, em alguns casos não foi possível obter o ponto correto da interseção do eixo das rotações com as retas resultantes da regressão linear que para estes casos considerou-se folga igual a zero.

O ângulo utilizado para estes ensaios, que corresponde ao eixo horizontal dos gráficos $M(\theta)$, foi calculado pelo segundo método através da equação 4.7.

Pelo método dos declives, da figura 4.20, não foi considerado para estes ensaios, uma vez que não se conseguiu considerar um centro de rotação médio, aceitável das marcas óticas, devido a terem-se registados muitos poucos pontos para obtenção das retas perpendiculares, as quais intersectadas dariam-nos aproximadamente o centro de rotação.

4.3.4 Ensaio A2.4 para estudo da resistência e rigidez das ligações

O ensaio do anexo A2.4 da norma EN 15512:2009, tem como objetivo a determinação da rigidez e da resistência à flexão das ligações por encaixe.

Estes ensaios podem ser influenciados por alguns fatores, como o tipo de pilar, a espessura do pilar, o tipo de viga, a posição da viga no conetor, o método em que a viga está ligada ao conetor, o tipo de orifícios do pilar e as propriedades do material. A norma exige que se façam no mínimo três ensaios idênticos para se poder analisar os resultados de acordo com a tabela 13 da secção 13.3.3 da norma EN 15512:2009. [13]

Este tipo de ensaios são efetuados no sentido vertical descendente (sentido de compressão da máquina Shimadzu 50kN), até que se dê o dano da ligação.

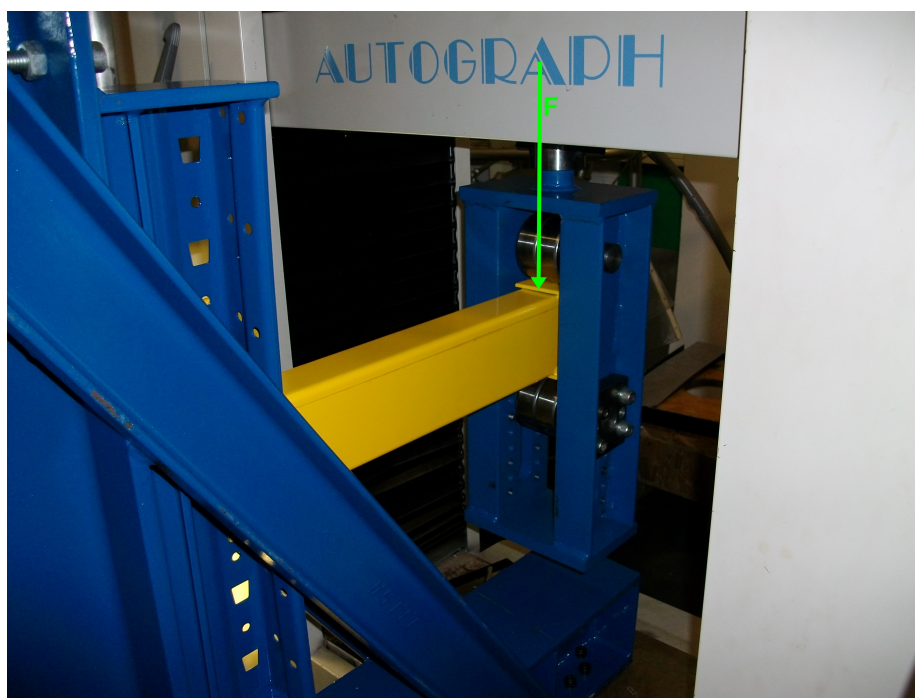


Figura 4.23: Ensaio A2.4

4.3.4.1 Preparação dos ensaios - Outros Aspectos

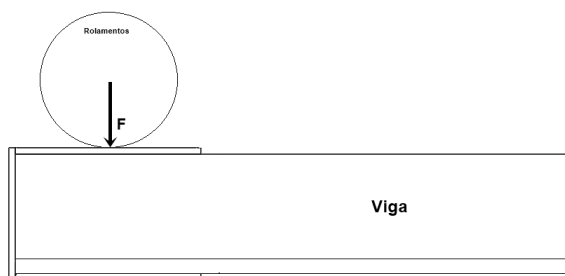
Os procedimentos experimentais para estes ensaios bem como a montagem do sistema, são os mesmos que que estão prescritos na norma, mas não foram referidos alguns aspetos que diferenciam o esquema de montagem proposto pela norma, figura 4.11, e o que foi adotado para estes ensaios. Ao utilizar-se a máquina Universal Shimadzu, o que vai representar a barra que aplica a força ("*Load Jack*"), que está prescrita na norma, é o travessão da máquina. A norma também propõe que se utilize transdutores de deslocamentos ou inclinómetros para o cálculo do ângulo de rotação, no entanto utilizou-se um sistema mais sofisticado, ao qual se utilizou o vídeoextensómetro, e com auxílio deste equipamento procedeu-se à leitura das coordenadas das marcas óticas, como já foi explicado na secção 4.3.3.1, conseguindo-se determinar o ângulo de rotação através de dois métodos diferentes.

Outro aspeto que a norma propõe, é o fato de que a viga não deve ter nenhum movimento lateral, propondo um restringimento lateral que apenas permita o movimento na direção da carga a aplicar. Para este caso, esta ação é garantida quando se procedeu ao aperto do pilar no suporte tentando centrar a viga ao sistema de rolamentos, e no momento

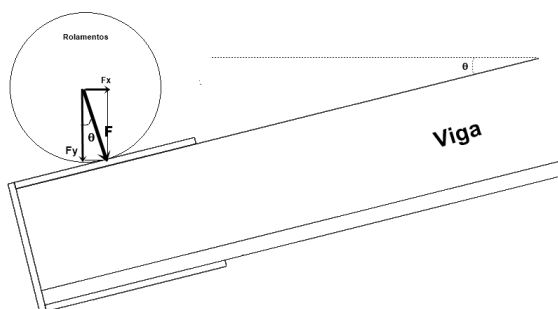
em que os rolamentos entram em contato com a viga, esta permanece imóvel devido ao atrito entre os rolamentos e a face do topo da viga. A velocidade imposta no travessão da máquina foi de 3mm/min para todos os ensaios.

4.3.4.2 Sobre a Carga Aplicada

A força aplicada nos ensaios é medida através da célula de carga de 50kN incorporada na máquina Shimadzu ao qual nela está fixa o sistema de rolamentos. No entanto na utilização do sistema de rolamentos implica que ao longo do tempo o ponto de aplicação da força vai-se deslocando devido a que os rolamentos apresentam um movimento de rotação em torno de seu eixo, a força passará a ter duas componentes a partir de um determinado instante. A seguinte figura mostra uma representação esquemática do que acontece durante a aplicação da força,



(a) Início do Ensaio



(b) Durante o ensaio

Figura 4.24: Comportamento da força

A força medida na máquina Shimadzu 50kN, refere-se à força F , que no entanto, devido à rotação dos rolamentos, obtém valores de F que resultam das duas componentes horizontal e vertical da força, F_x e F_y respetivamente. Graficamente verificou-se que $F = F_y$. Então poderia-se concluir que a força pode ser obtida, pela expressão,

$$F_y = F \cos(\theta) \quad (4.8)$$

sendo que θ é o ângulo de rotação da viga, F a força registada pela máquina e F_y a componente da força vertical. Posteriormente verificou-se graficamente que a força F_y

é igual à força registada pela máquina. Em relação à componente F_x da força F , esta é anulada com a força, que as guias da máquina de ensaios, suportam, caso contrario a máquina de ensaios poderia sofrer danos ou até mesmo podendo tombar no sentido da componente F_x da força. Tendo em consideração esta abordagem, a força considerada para estes ensaios foram os valores lidos diretamente da máquina Shimadzu.

4.3.4.3 Tratamento de dados e resultados

• Cálculo do ângulo e determinação do centro médio

Para o cálculo do ângulo para os ensaios A2.4 do teste à flexão (para determinar a resistência e a rigidez das ligações), usaram-se as mesmas metodologias que estão descritas na subsecção 4.3.3.1. Calcularam-se então o método dos declives e o método da expressão 4.7 prescrita na norma, e que estão ilustradas nas figuras 4.20 e 4.21 respetivamente.

Para estes ensaios poderiam-se escolher os dois métodos acima referidos. Para o método dos declives conseguiu-se determinar, para todos os provetes testados, o centro médio de rotação, como ilustrado na figura 4.20, resultante dos deslocamentos das marcas óticas e obter valores aceitáveis do ângulo de rotação através do método dos declives. Optou-se por utilizar os valores do ângulo pelo método dos declives, uma vez que estes apresentavam valores aproximados em relação da expressão 4.7 prescrita na norma.

• Cálculo do Momento de Projeto M_{r_d}

O momento utilizado em termos projeto, M_{r_d} , é o momento limite que a norma propõe e que nos indica linha limite elástico do material dos componentes composto pela ligação, e que vem descrita pela seguinte expressão,

$$M_{r_d} = \eta \frac{M_k}{\gamma_M} \quad (4.9)$$

onde M_k é o momento característico de falha que é calculado através da equação 46 da secção 13.3.3 da norma EN 15512:2009 (ver Anexo 1), η é o fator de redução do momento e que é imposto pelo projetista ($\eta \leq 1$), tendo sido considerado 1 para estes ensaios, e γ_M o fator de segurança parcial dos conetores definido na tabela 3 da secção 7.5 da norma EN 15512:2009 (ver Anexo 1).

Para o cálculo do momento de projeto M_{r_d} , inicialmente construíram-se os gráficos momento-rotação experimentais ($M_t(\theta_t)$). De seguida foram determinados os gráficos experimentais corrigidos ($M_n(\theta_n)$), que dependem de alguns parâmetros de correção.

Os valores da rotação corrigida vão depender das rotações plásticas θ_p (ver anexo 1 alinea c) da secção A.2.4.4) que se obtêm a partir das curvas experimentais, subtraindo os valores das rotações θ_t com as rotações elásticas $\frac{M_t}{k_0}$, onde k_0 é o declive das curvas experimentais. Também necessitou-se de calcular os momentos corrigidos M_n , através da seguinte expressão,

$$M_n = M_t C \quad (4.10)$$

onde C depende de um fator de correção C_m , dada pela seguinte expressão,

$$C = 0,15 + C_m \quad (4.11)$$

e C_m é dado por,

$$C_m = \left(\left(\frac{f_y}{f_t} \right)^\alpha \left(\frac{t}{t_t} \right) \right)_{max} \quad e \quad C_m \leq 1 \quad (4.12)$$

onde f_t é a tensão de cedência do material do componente mais relevante observada³, f_y a tensão de cedência nominal, t_t é a espessura observada do componente mais relevante, t a espessura designada pelo projetista para o componente mais relevante. O componente mais relevante aqui considerado foi o que sofreu o dano na maior parte dos ensaios, o pilar. O valor de α depende dos valores das tensões de cedência em que é 0 quando $f_y \geq f_t$ ou 1 quando $f_y < f_t$. Para estes ensaios, em particular, definiu-se que a espessura observada t_t igual à espessura projetada t , uma vez que se pretendeu estudar as mesmas ligações que foram sujeitos a ensaios.

Após o cálculo de M_n , procedeu-se ao cálculo de θ_n que vem expressa como,

$$\theta_n = \theta_p + \frac{M_n}{k_0} \quad (4.13)$$

onde θ_p são as rotações plásticas, M_n momento corrigido e k_0 o declive das curvas experimentais $M_t(\theta_t)$. Após os cálculos efetuados foram construídos os gráficos corrigidos $M_n(\theta_n)$. A figura 4.23 mostra um exemplo de um gráfico corrigido de um dos provetes testados.

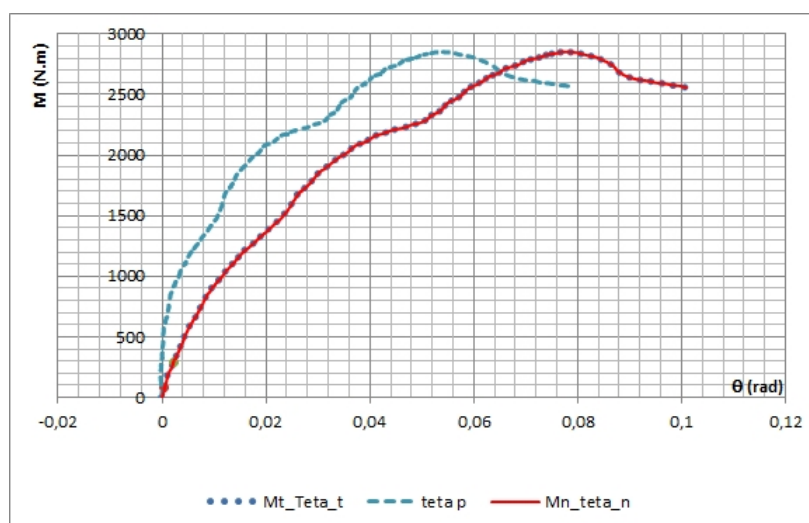


Figura 4.25: Determinação de um gráfico corrigido $M_n(\theta_n)$

Se observarmos o gráfico acima, a curva corrigida coincide com a curva experimental. Isto deve-se ao fato dos fatores de correção terem sido assumidos igual a 1, considerando-se assim a curva final $M(\theta)$ como ideal.

Para cada provete foram calculados os momentos de projeto através da equação 4.9. No apêndice 3 podemos encontrar os gráficos corrigidos, de todos os provetes, com o momento limite MR_d , definida pela norma.

A tabela 4.7 apresenta os resultados dos ensaios das ligações, mostrando a força máxima $F_{máx}$, deslocamento máximo $máx$, momento máximo $M_{máximo}$ e o momento de projeto MR_d , para cada provete testado.

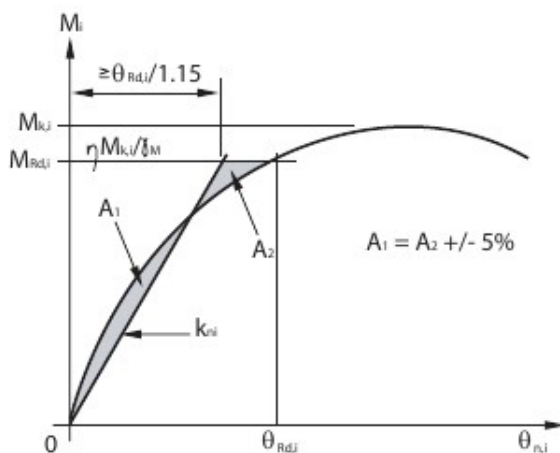
³A tensão de cedência aqui observada, é tensão de cedência , medida nos ensaios de tração uniaxial.

Tabela 4.7: Resultados dos ensaios das ligações

| Provetes | Amostras | Valores Médios | | | | | | |
|-------------|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | F _{máx} (N) | d _{max} (mm) | M _{max} (Nm) | F _{máx} (N) | d _{max} (mm) | M _{max} (Nm) | M _{rd} (Nm) |
| P47VF904G | a1 | 1520,0 | 35,69 | 608,0 | 1547 | 39,01 | 619 | 534 |
| | a2 | 1562,5 | 41,05 | 625,0 | | | | |
| | a3 | 1559,3 | 40,28 | 623,7 | | | | |
| P75VC903G | a1 | 6975,0 | 54,86 | 2790,0 | 6963 | 57,73 | 2785 | 2468 |
| | a2 | 7007,5 | 61,87 | 2803,0 | | | | |
| | a3 | 6905,0 | 56,45 | 2762,0 | | | | |
| P83SVC903G | a1 | 8231,3 | 52,08 | 3292,5 | 8005 | 51,74 | 3202 | 2669 |
| | a2 | 7867,5 | 56,66 | 3147,0 | | | | |
| | a3 | 7917,5 | 46,48 | 3167,0 | | | | |
| P100VC903G | a1 | 7024,2 | 51,37 | 2809,7 | 7067 | 49,46 | 2827 | 2502 |
| | a2 | 7047,5 | 49,04 | 2819,0 | | | | |
| | a3 | 7130,0 | 47,97 | 2852,0 | | | | |
| P100VF903G | a1 | 4172,5 | 84,23 | 1665,0 | 4086 | 67,95 | 1633 | 1390 |
| | a2 | 4020,0 | 71,77 | 1608,0 | | | | |
| | a3 | 4066,3 | 47,85 | 1626,5 | | | | |
| P114LVC903G | a1 | 7229,7 | 41,24 | 2891,9 | 7723 | 49,62 | 2974 | 2320 |
| | a2 | 7290,0 | 44,09 | 2916,0 | | | | |
| | a3 | 8393,8 | 53,73 | 3305,0 | | | | |
| | a4 | 8306,3 | 54,55 | 2891,9 | | | | |
| | a5 | - | - | - | | | | |
| | a6 | 7395,0 | 54,48 | 2866,9 | | | | |
| P100VC904G | a1 | 7577,5 | 61,35 | 3031,0 | 7321 | 60,85 | 2928 | 2387 |
| | a2 | 7222,5 | 66,46 | 2889,0 | | | | |
| | a3 | 7162,5 | 54,74 | 2865,0 | | | | |

• Cálculo da rigidez k_m

Para o cálculo da rigidez das ligações, segundo a norma EN 15512:2009, é necessário que se tenha obtidos os valores do momento limite de projeto M_{rd} das ligações que estão apresentados na tabela 4.7. A rigidez é obtida através do declive da reta, k_{ni} , que passa pela origem e contém o ponto de interseção que esta faz com a linha do momento de projeto M_{rd} , onde essa zona corresponde à zona elástica do gráfico resultante dos ensaios, em que a rigidez se mantém constante. A figura 4.26 mostra teoricamente, através da curva bilinear, prescrita pela norma EN 15512:2009, como obter os valores da rigidez,

Figura 4.26: Cálculo da rigidez k_n

a rotação correspondente à interseção da reta com a linha de Mr_d tem que ser $\geq \frac{\theta_{r,d}}{1,15}$, onde $\theta_{r,d}$ corresponde ao ponto de interseção entre Mr_d e a curva experimental corrigida.

O valor da rigidez k_n tem que obedecer a seguinte expressão,

$$k_{ni} \leq 1,15 \frac{Mr_d}{\theta_{ki}} \quad (4.14)$$

onde k_{ni} é a rigidez de cada amostra e θ_{ki} a rotação correspondente à interseção da reta com a linha de Mr_d .

O valor da rigidez a considerar, para cada provete, é a média das rigidezes, k_{ni} , de cada amostra,

$$k_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ni} \quad (4.15)$$

em que k_m é a rigidez média e n o numero de ensaios por cada provete. A tabela 4.8 apresenta os resultados das rigidez de cada provete testado,

Tabela 4.8: Rigidez das Ligações

| Provetes | Rigidez Média k_m (kNm/rad) | ± | Erro Padrão |
|-------------|-------------------------------|---|-------------|
| P47VF904G | 33,77 | ± | 2,58 |
| P75VC903G | 47,25 | ± | 1,91 |
| P83SVC903G | 71,21 | ± | 2,37 |
| P100VC903G | 50,83 | ± | 2,11 |
| P100VF903G | 41,95 | ± | 1,65 |
| P114LVC903G | 72,72 | ± | 2,41 |
| P100VC904G | 57,72 | ± | 4,58 |

estes valores foram determinados através dos declives das retas, para cada um dos ensaios e que se encontram representadas no apêndice 4.

• Curva Momento Rotação Média dos provetes e equações polinomiais

Após se terem determinado as curvas experimentais corrigidas, procedeu-se à determinação do gráfico médio $M(\theta)$, que é resultado da média das curvas experimentais corrigidas. Essa média foi efetuada com auxílio de uma macro de modo a juntar todos os dados dos gráficos de cada amostra até a aproximadamente 10% acima da linha do momento de projeto Mr_d , e com esses dados criou-se uma linha de tendência para determinar o gráfico médio, para cada ligação, com o auxílio do programa *Microsoft Excel 2013*. A figura 4.26 mostra um exemplo de determinação da curva média.

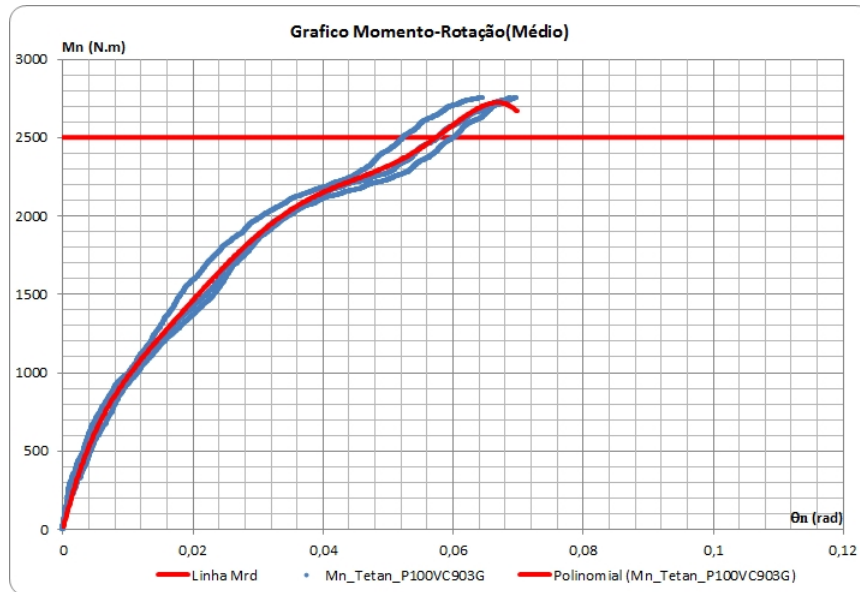


Figura 4.27: Determinação do gráfico médio

Como se pode verificar a curva média corresponde à linha de tendência (a vermelho), resultante dos conjuntos de dados dos gráficos de cada amostra (a azul).

A partir da linha de tendência, determinaram-se os polinómios que representam analiticamente as equações $M(\theta)$ dos gráficos médios.

No apêndice 5 estão representados os gráficos médios de todos os provetes testados já limitados ao até ao momento limite de projeto, M_{rd} .

Na tabela 4.9 apresentam-se as equações polinomiais $M(\theta)$ obtidas a partir da linha de tendência do gráfico médio.

Tabela 4.9: Expressões $M(\theta)$ resultante dos gráficos médios das curvas experimentais

| Provetes | Polinómio do gráfico médio $M(\theta)$ |
|-------------|---|
| P47VF904G | $M(\theta) = -7.7160 \times 10^8 \theta^4 + 8.253 \times 10^7 \theta^3 - 3.434 \times 10^6 \theta^2 + 6.893 \times 10^4 \theta$ |
| P75VC903G | $M(\theta) = 8.611 \times 10^8 \theta^5 - 3.524 \times 10^8 \theta^4 + 5.070 \times 10^7 \theta^3 - 3.418 \times 10^6 \theta^2 + 1.283 \times 10^5 \theta$ |
| P83SVC903G | $M(\theta) = 3.129 \times 10^{10} \theta^5 - 5.198 \times 10^9 \theta^4 + 3.123 \times 10^8 \theta^3 - 8.885 \times 10^6 \theta^2 + 1.737 \times 10^5 \theta$ |
| P100VC903G | $M(\theta) = -8.64 \times 10^{11} \theta^6 + 1.825 \times 10^{11} \theta^5 - 1.473 \times 10^{10} \theta^4 + 5.752 \times 10^8 \theta^3 - 1.187 \times 10^7 \theta^2 + 1.718 \times 10^5 \theta$ |
| P100VF903G | $M(\theta) = 1.794 \times 10^{10} \theta^5 - 2.690 \times 10^9 \theta^4 + 1.493 \times 10^8 \theta^3 - 4.204 \times 10^6 \theta^2 + 9.119 \times 10^4 \theta$ |
| P114LVC903G | $M(\theta) = -9.300 \times 10^{11} \theta^6 + 2.212 \times 10^{11} \theta^5 - 1.956 \times 10^{10} \theta^4 + 8.045 \times 10^8 \theta^3 - 1.629 \times 10^7 \theta^2 + 2.030 \times 10^5 \theta$ |
| P100VC904G | $M(\theta) = 8.517 \times 10^9 \theta^5 - 1.647 \times 10^9 \theta^4 + 1.219 \times 10^8 \theta^3 - 4.877 \times 10^6 \theta^2 + 1.405 \times 10^5 \theta$ |

4.3.5 Modos de Falha

O modo de falha observado nas ligações durante os ensaios experimentais foi o mesmo em quase todos os provetes, em que a primeira garra do conetor rompe o orifício do pilar correspondente a essa garra. Apenas nos provetes da ligação P47VF904G a primeira garra é que sofre o dano. Os conetores sofrem uma deformação similar em todos os provetes, localizada na zona da parte inferior da viga.

Na figura seguinte mostram-se algumas imagens do modo de falha ocorrido nos ensaios das ligações, visto do plano alcançado pelo vídeo extensómetro.

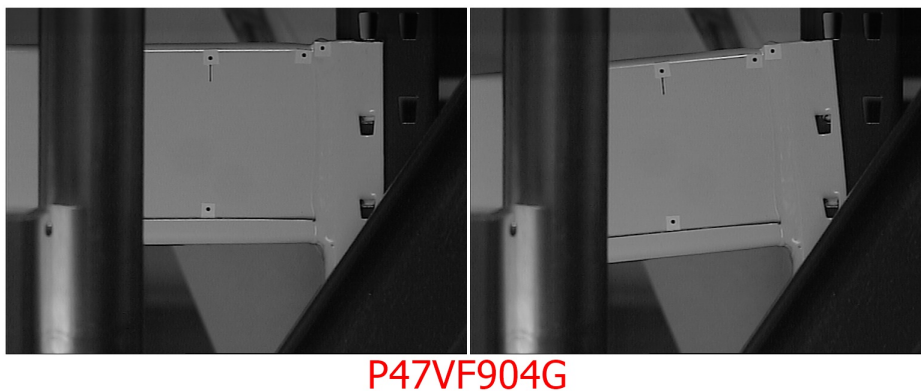


Figura 4.28: Modo de falha P47VF903G

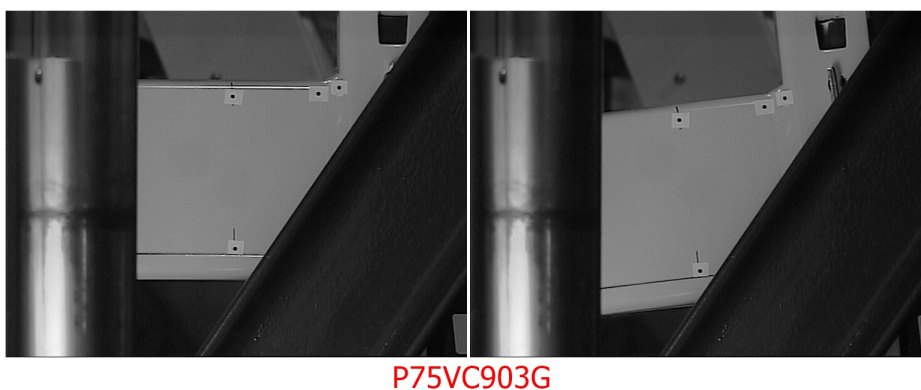


Figura 4.29: Modo de falha P75VC903G

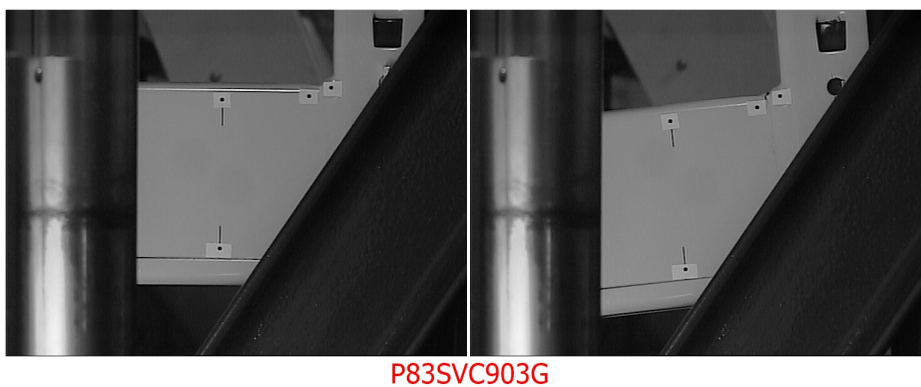
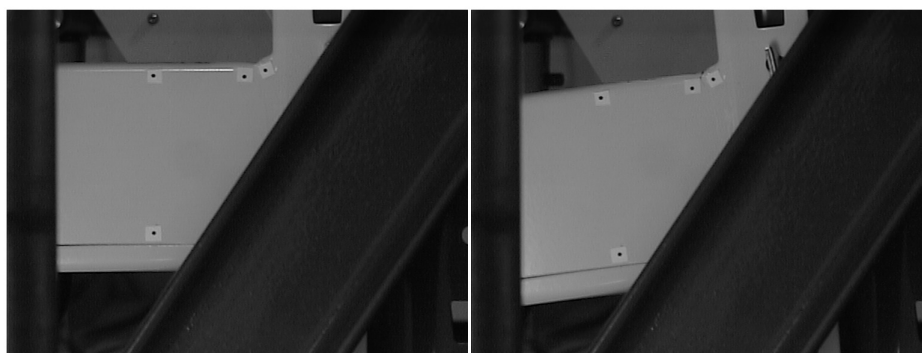
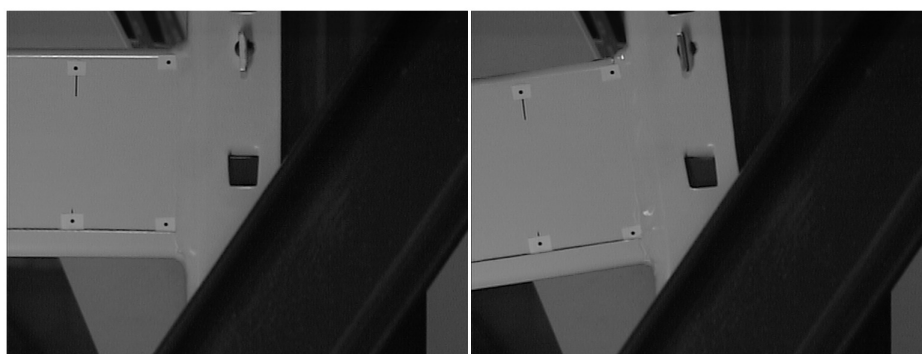


Figura 4.30: Modo de falha P100VC903G



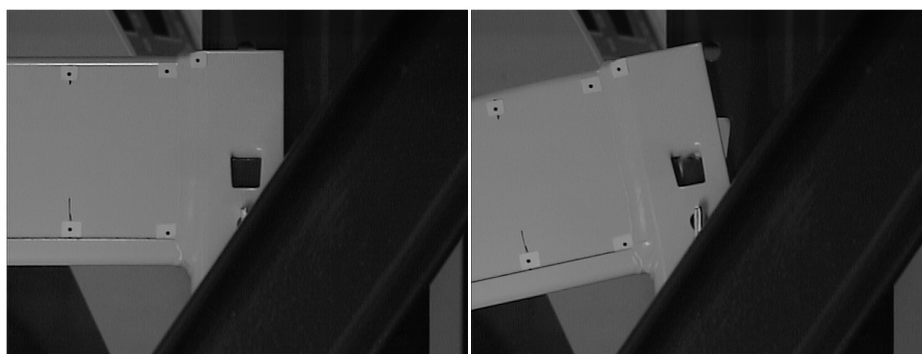
P100VC903G

Figura 4.31: Modo de falha P100VC903G



P100VC904G

Figura 4.32: Modo de falha P100VC904G



P100VF903G

Figura 4.33: Modo de falha P100VF903G

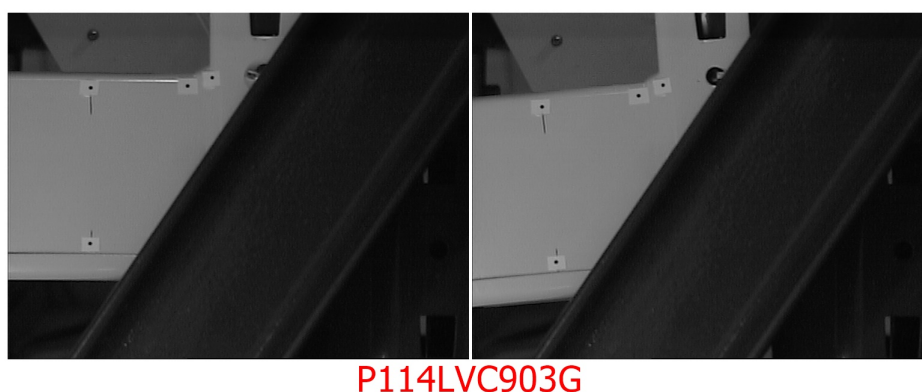


Figura 4.34: Modo de falha P114LVC903G

4.3.6 Discussão de Resultados

Como se pode verificar na tabela 4.7 o provete P47VF904G mostra-nos que tem menor resistência apresentando uma força máxima de 1547 N (cerca de 157 quilos) e um momento máximo de 618 Nm, devendo este tipo de estrutura ser utilizada para cargas ligeiras.

Ao comparar-mos os provetes P75VC903G e P100VC903G tendo a mesma espessura do pilar (1,8 milímetros), concluí-se que ao aumentar a largura do pilar aumenta a resistência da ligação. A rigidez também aumenta.

Quando se realiza uma mudança de posição da viga no conetor, neste caso do centro para o topo do conetor, verifica-se que o sistema de ligação baixa a sua resistência como se pode verificar entre os provetes P100VC903G e P100VF903G, e os valores da rigidez destas ligações diminuem.

Entre os provetes P100VC903G e P100VC904G o conetor é aumentado no número de garras, o que deu origem a um aumento de carga máxima de 7067 N (aproximadamente 721 quilogramas) para 7320 N (aproximadamente 746 quilogramas) respetivamente assim como o valor da rigidez aumenta.

Nos provetes P83SVC903G e P114LVC903G, ambos têm uma espessura do pilar de 2 milímetros, verifica-se que estas ligações apresentam maior resistência em relação a todos os outros provetes. No entanto o que apresenta menor largura do pilar (P83SVC903G) tem uma carga máxima maior. O fator que pode ter ocasionado esse aumento da carga máxima é o fato de se ter verificado durante os ensaios que a ligação não estava bem encaixada. Também aqui se verifica que a rigidez aumenta com o aumento da largura do pilar.

5.1 Introdução

Para finalizar este estudo , neste capítulo apresentar-se-á o modelo de simulação numérica proposto, referente aos ensaios efetuados nos laboratórios do departamento de engenharia mecânica da universidade de Aveiro, descritos na parte II do capítulo 4, efetuadas com auxílio do programa de elementos finitos Abaqus[®], desde o pré processamento até aos resultados finais (pós-processamento).

5.2 Sobre o Abaqus

O software Abaqus, fundado em 1978, é considerado o software líder mundial em problemas de engenharia, de análise avançadas com recurso ao método de elementos finitos. Tem uma grande reputação nas áreas em termos tecnológicos, qualidade e confiabilidade, fornecendo soluções sofisticadas de problemas linear e não lineares de engenharia. O Abaqus é muito utilizado em conceitos de projetos novos, em análises de projetos existentes e também na área dos processos tecnológicos. É composto por três principais produtos - o Abaqus/Standard, que é para o estudo de problemas implícitos, em análise de elementos finitos como problemas estáticos, dinâmicos, térmicos, etc; o Abaqus/Explicit, mais vocacionado para problemas quase-estáticos e dinâmicos transientes usando uma abordagem mais explícita em varias aplicações tais como, testes de queda, *crashing-test* e processos tecnológicos; por fim o Abaqus/CAE que é usado para modelação, para acesso direto ao CAD, e apresenta um ambiente de visualização para os produtos acima referidos, fornecendo sistemas de malhas avançadas com boa qualidade de visualização, sendo este produto o mais requerido pelo maioria dos utilizadores.

5.2.1 Etapas do funcionamento do Abaqus

A primeira etapa de funcionamento do Abaqus passam pela modelação de objetos, montagem de processos de tecnológicos, de projetos, ensaios, etc., que podem abordar varias áreas de engenharia. A etapa seguinte é a do pré-processamento que é quando se

definem todos os dados necessários, desde as características do material até à implementação das condições de fronteira, montagens caso se aplique, definir contactos, entre outras variáveis. Seguidamente executa-se o processamento e por fim o pós-processamento, a etapa final, onde se analisam os resultados da simulação.

A figura seguinte mostra, resumidamente, o funcionamento do Abaqus.

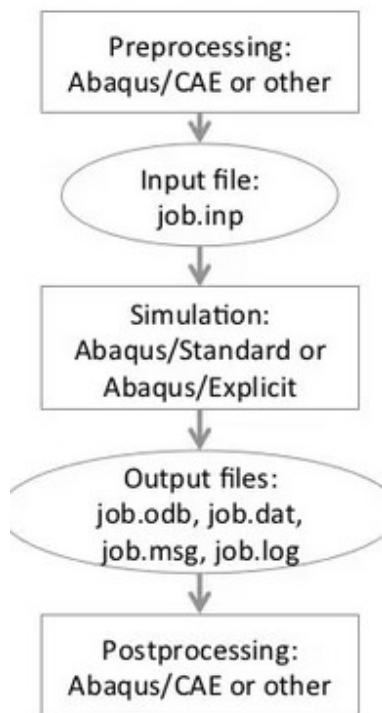


Figura 5.1: Etapas da Simulação.

Nos próximos subcapítulos, vão-se apresentar o pré e pós processamento, relativamente aos ensaios que foram realizados para este trabalho, bem como os resultados.

5.3 Modelos de Simulação Numérica

5.3.1 Procedimentos (Pré-Processamento)

O pré-processamento consiste na preparação do modelo a estudar, descrevendo todos os passos que vão desde a criação do modelo 3D até ao ficheiro de saída (job.odb, job.dat,etc).

O modelo que se construiu para simular os ensaios dos diferentes provetes Pilar+Viga, é um modelo que tende a se aproximar da realidade dos ensaios, e que pretende mostrar a sua compatibilidade com o que foi realizado no capítulo 4 na Parte II.

5.3.1.1 Modelação

Inicialmente foram construídas as partes que constituem o modelo: pilar, viga+conetor e corpo rígido, este último para simular o sistema de rolamentos que foi utilizado na máquina Shimadzu 50kN para aplicação da força.

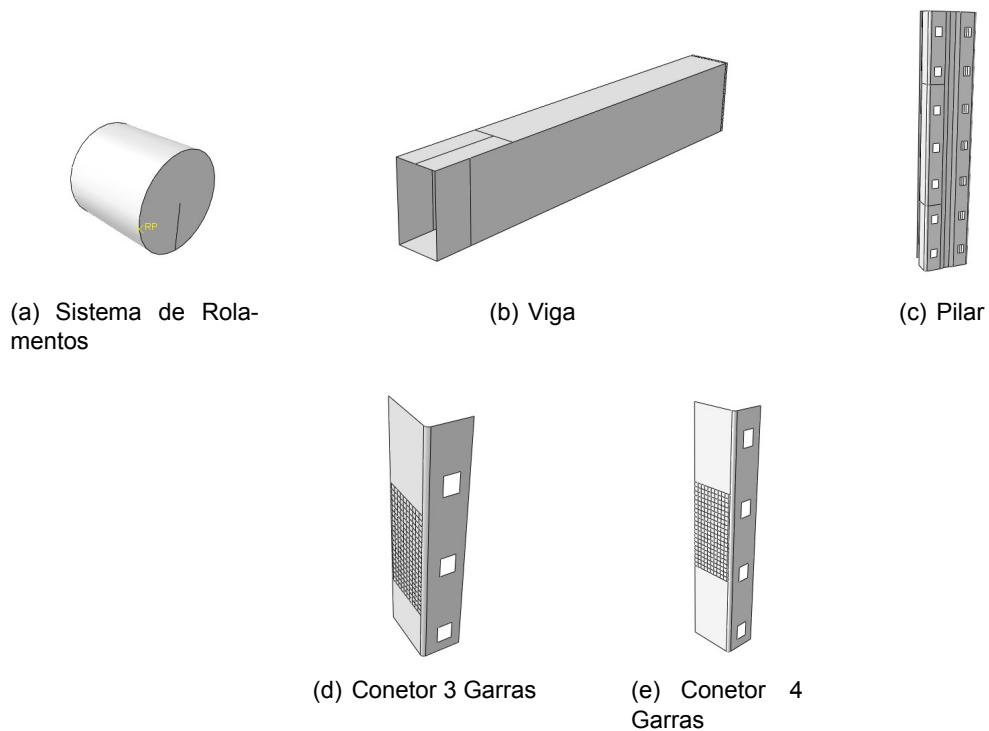


Figura 5.2: Partes do Modelo

As imagens da figura 5.2 mostram as partes que formam o modelo em estudo. As peças estão representadas como casca para simplificar o nosso modelo.

5.3.1.2 Discretização: Construção da Malha

A malha que foi utilizada para o Modelo, foi a malha do tipo casca S4R de 4 nós, com uma distância média entre os nós de 5 milímetros.

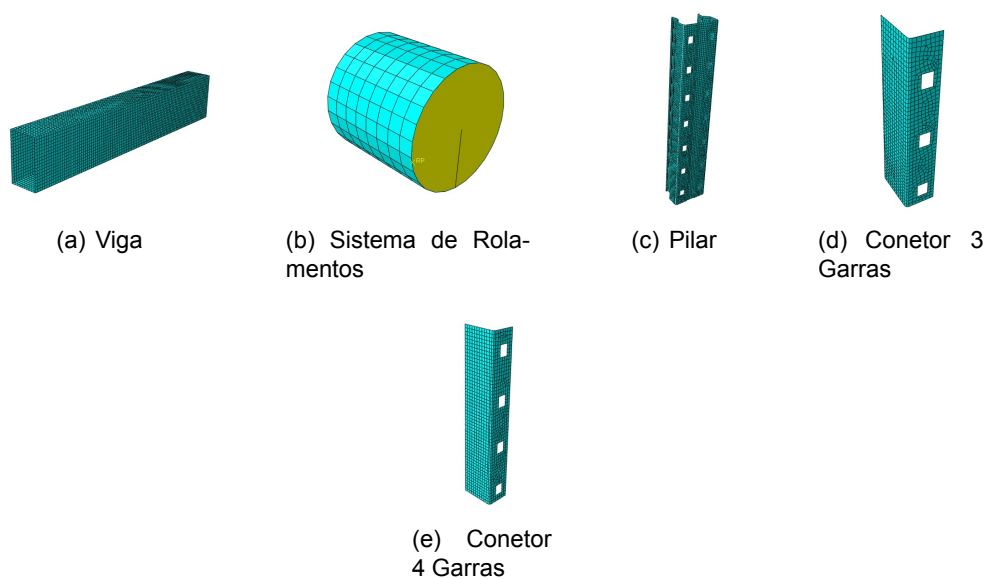


Figura 5.3: Discretização do Modelo (Construção da Malha)

Neste trabalho não foi efetuado a análise da convergência da malha, devido a limitações computacionais não se conseguiu obter um resultado credível para a escolha de uma malha com um numero de nós mínimo que convirja os resultados. Por isso optou-se por escolher uma distância de 5 milímetros entre os nós. Da vasta biblioteca de elementos finitos que o Abaqus contém escolheu-se o elemento de casca S4R, pois permitem uma discretização para perfis de paredes finas conformados a frio, tendo a vantagem de simplificar a construção automática da malha.

5.3.1.3 Material Para o Modelo Numérico

Para a caracterização do material usaram-se os dados dos ensaios de tração unidirecionais a 0° e 90° (direção de laminagem), da parte I do capítulo 4, de provetes do mesmo material do qual as peças do modelo são fabricados, o aço de construção S355.

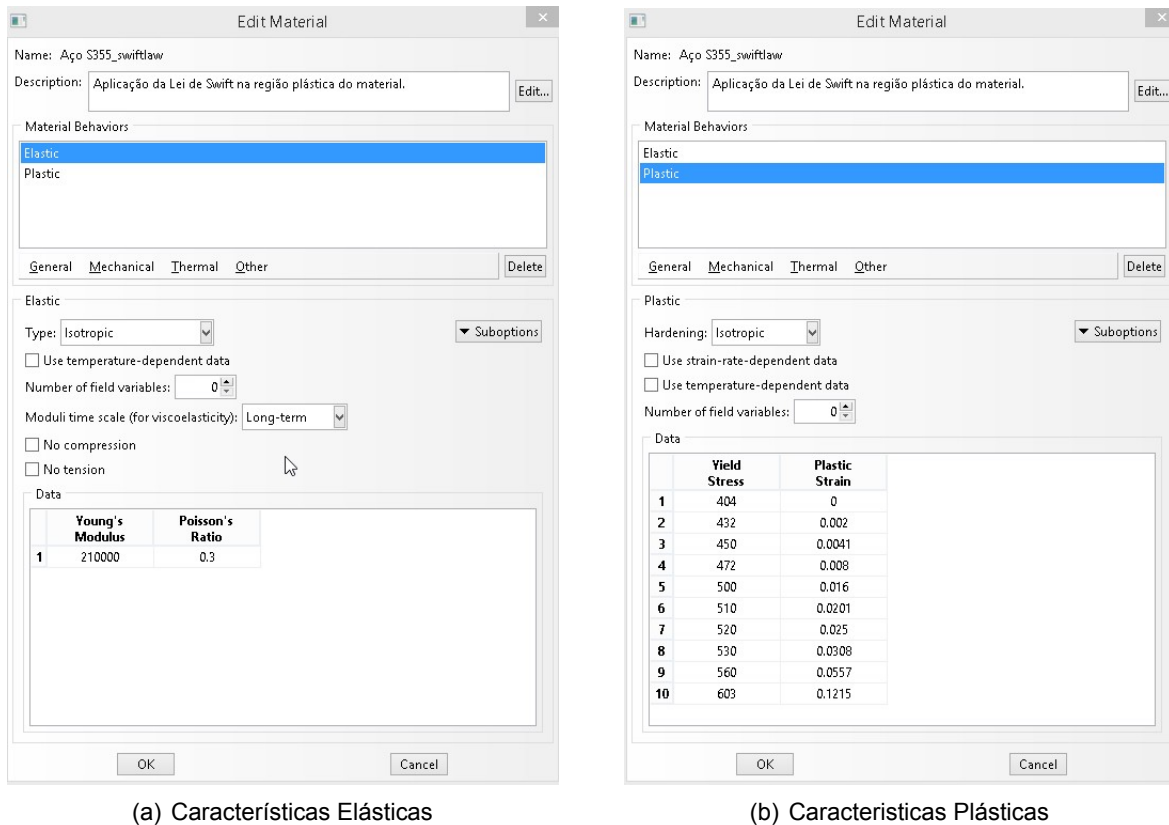


Figura 5.4: Dados da caracterização do material

Para o modelo de simulação numérica, para todos elementos que o constituem, definiu-se o Modulo de Young E de 210000 MPa, um coeficiente de poisson ν de 0,3 para caracterizar a zona elástica do material. Para a caracterização da zona plástica do material, foi considerada a lei de Swift representado pela equação 4.1, utilizando alguns pontos resultantes dos gráficos tensão-deformação verdadeira dos ensaios experimentais de tração uniaxial da parte I do capítulo 4, dando origem às constantes da equação 4.1, descrita na tabela 4.4 com orientação de laminagem a 0° considerando assim o material como isotrópico. Esses dados foram inseridos no Abaqus e estão apresentados na figura 5.4(b).

5.3.1.4 Montagem do Modelo

Para efetuar a montagem do modelo numérico adotado para este trabalho, utilizaram-se as peças da figura 5.2. Todas as peças são consideradas casca, e um é um corpo rígido, identificando-se como o sistema de rolamentos (ver figura 5.2 (b) dos ensaios experimentais, que aplica uma força através do deslocamento do travessão da máquina Shimadzu 50kN. A figura seguinte mostra a ilustração da montagem do modelo.

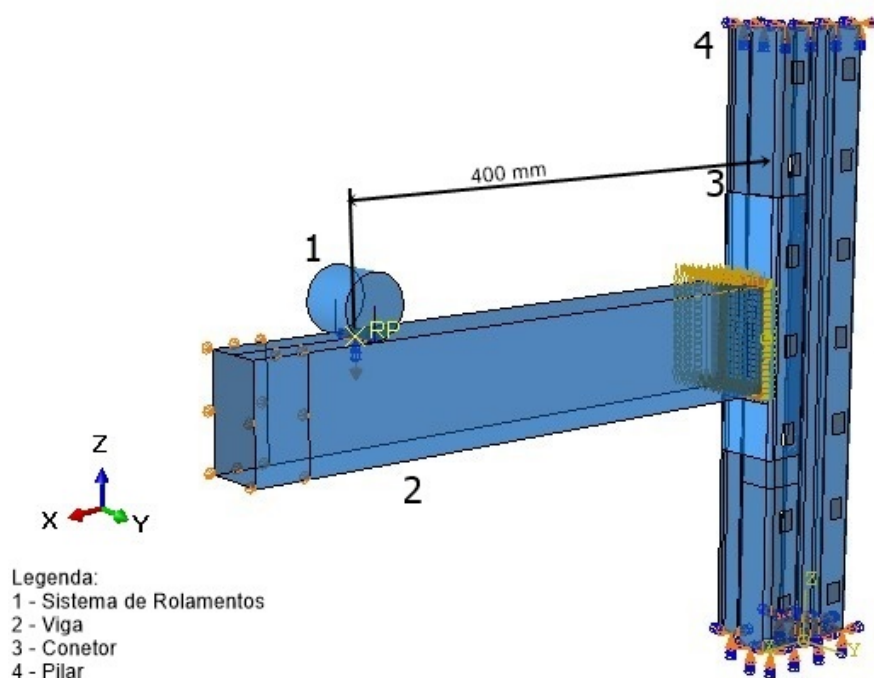


Figura 5.5: Montagem Geral do Modelo.

A peça identificada na figura 5.5 como a numero 1 representa o sistema de rolamentos, considerado um corpo rígido, simulando o travessão da máquina Shimadzu 50 kN aplicando-se-lhe incrementos de deslocamento até ao máximo atingido pelos ensaios, estando o ponto de aplicação dos deslocamentos a 400mm da face do pilar (componente numero 4), para posteriormente ser calculada a carga no ponto "RP". As peças identificadas com a numero 2,3 e 4, são a viga, o conetor e o pilar respetivamente e são corpos deformáveis, ou seja sujeitos a deformação plástica, caracterizados pelo aço de construção S355, que se apresenta no subcapítulo 5.3.1.3. A figura 5.5 é a representação da montagem geral do modelo escolhido para esta dissertação, onde esta foi aplicada a todos os outros conjuntos viga+pilar, que foram sujeitos a ensaios e descritos na parte II de capítulo 4. O conetor tem sempre a posição central do pilar, a viga será sempre o componente horizontal, ligado por soldadura ao conetor, e pode variar de posição consoante os diferentes casos em estudo. As montagens dos modelos em estudo, podem ser visualizados na seguinte figura.

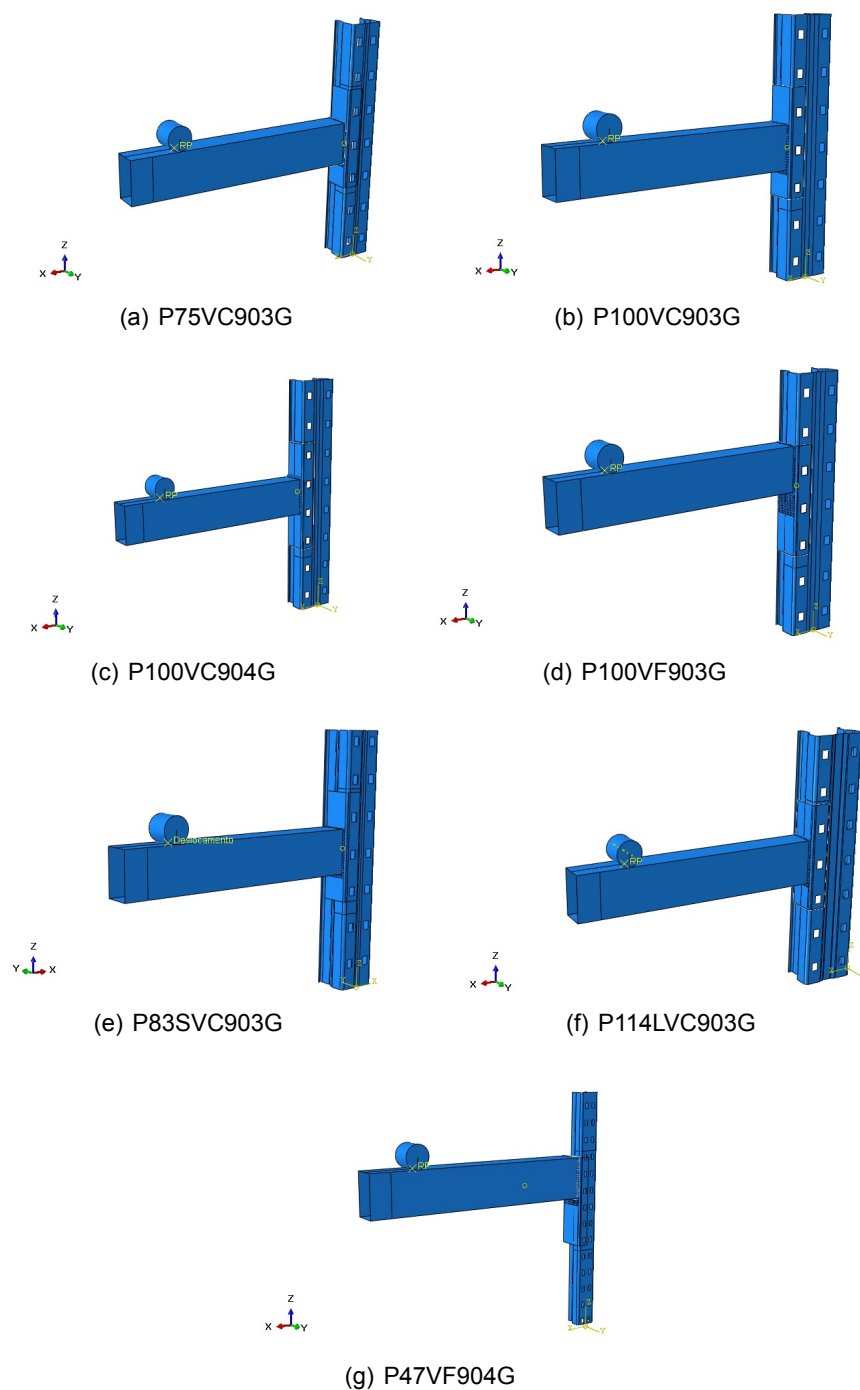


Figura 5.6: Montagem de todos os provetes

5.3.1.5 Etapas da Simulação

Os passos da simulação definem uma sequência, proporcionando convenientemente um ambiente de variação de cargas, condições fronteira, interações entre as partes do modelo, alterações do modelo, adicionando ou retirando partes do modelo, entre outras alterações que se possam fazer durante uma análise. Também pode ser muito útil para fazer alterações dos dados de saída. Com as etapas pode-se definir análises de perturbação linear sobre estados de problemas não-lineares. [14]

No caso em estudo realizou-se apenas uma etapa, simulando o travessão da máquina Shimadzu 50kN.

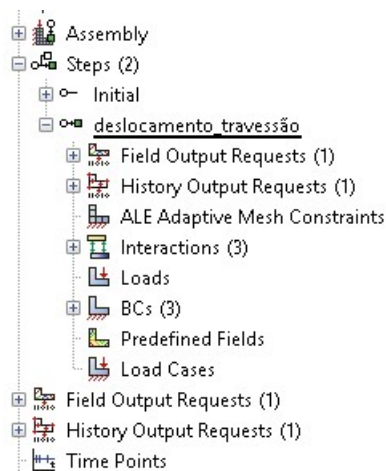


Figura 5.7: Definição da Etapa

Definiu-se apenas para realizar a simulação num segundo, ativando os efeitos de não-linearidade, considerando assim um problema não-linear.

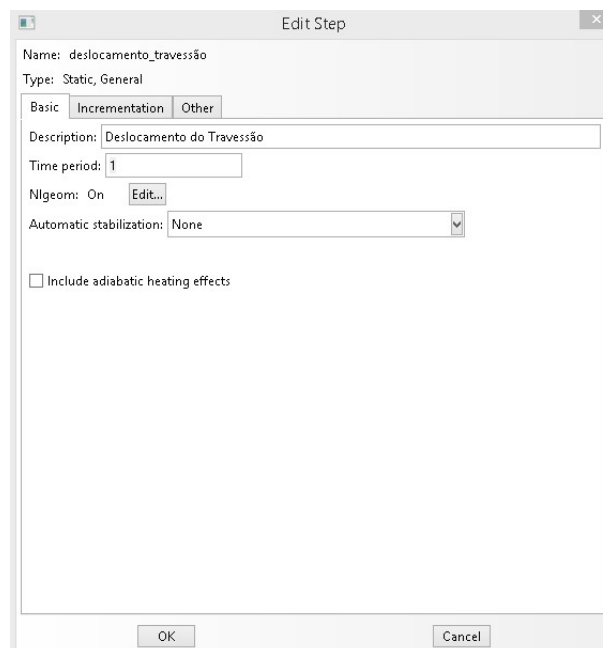


Figura 5.8: Condições iniciais da etapa

Para concluir a definição da etapa, foi atribuído para a etapa 200 incrementos podendo este sofrer alterações entre os diferentes provetes. Todas as outras condições da etapa ("Step") foram consideradas as de padrão ("Default") do Abaqus.

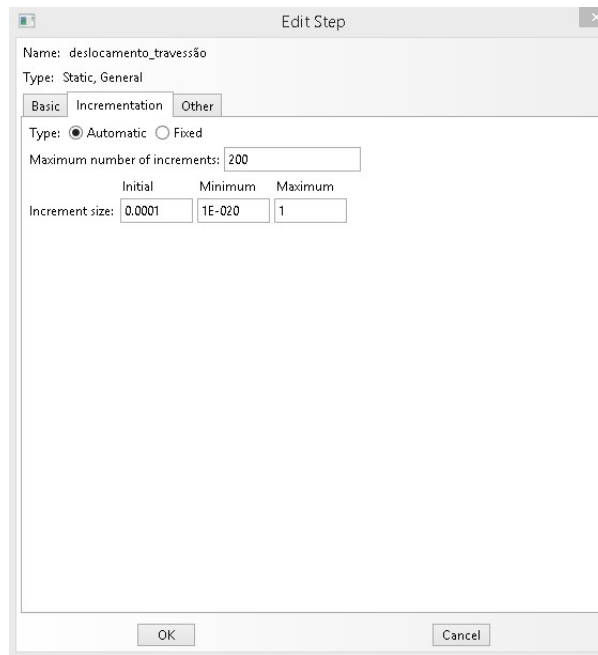


Figura 5.9: Incrementação da etapa

Depois de definida a etapa foram escolhidas as variáveis de saída, o *Field Output*, necessárias para a análise, que criará um ficheiro com os resultados dessas variáveis.

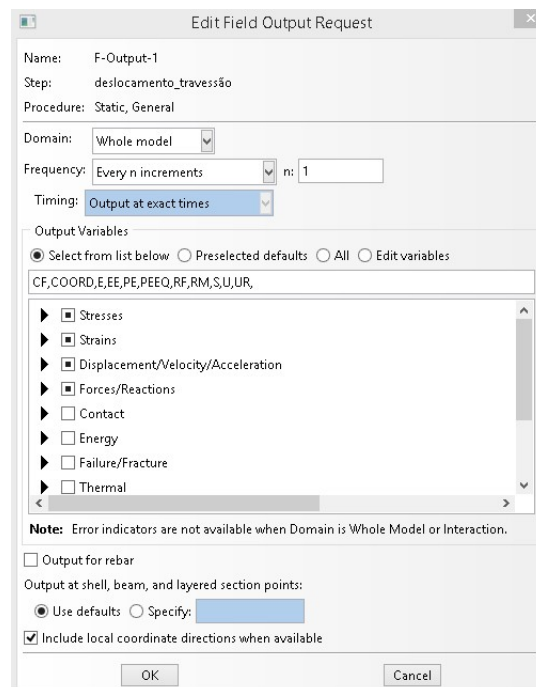


Figura 5.10: Definição de Variáveis de saída

Por fim definiram-se as condições fronteiras, as cargas e/ou deslocamentos, necessárias e aproximadas à realidade dos casos em estudo e que de seguida serão analisadas.

5.3.1.6 Interações de Contatos e Condições Fronteira

Para definir os contatos em que as faces dos elementos do modelo devem interagir, perante a realidade do problema, inicialmente fizeram-se partições nos elementos do Pilar e viga, como mostra a figura seguinte,

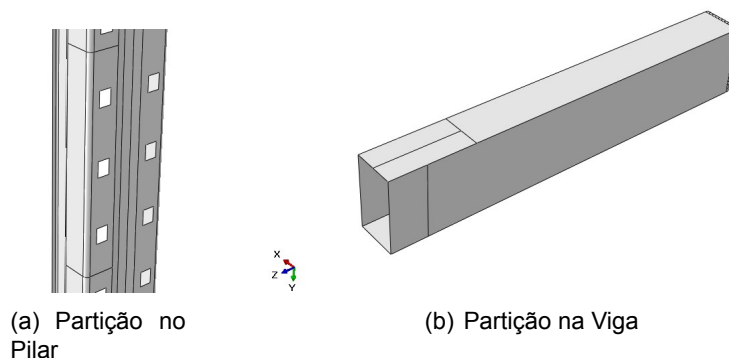


Figura 5.11: Partições no pilar e viga para definir áreas de contato

estas partições foram necessárias para que a área de contato fosse mais reduzida, principalmente no pilar, para simplificação do processo computacional do Abaqus. Na figura 5.12 estão apresentadas as áreas de contato do modelo em estudo.

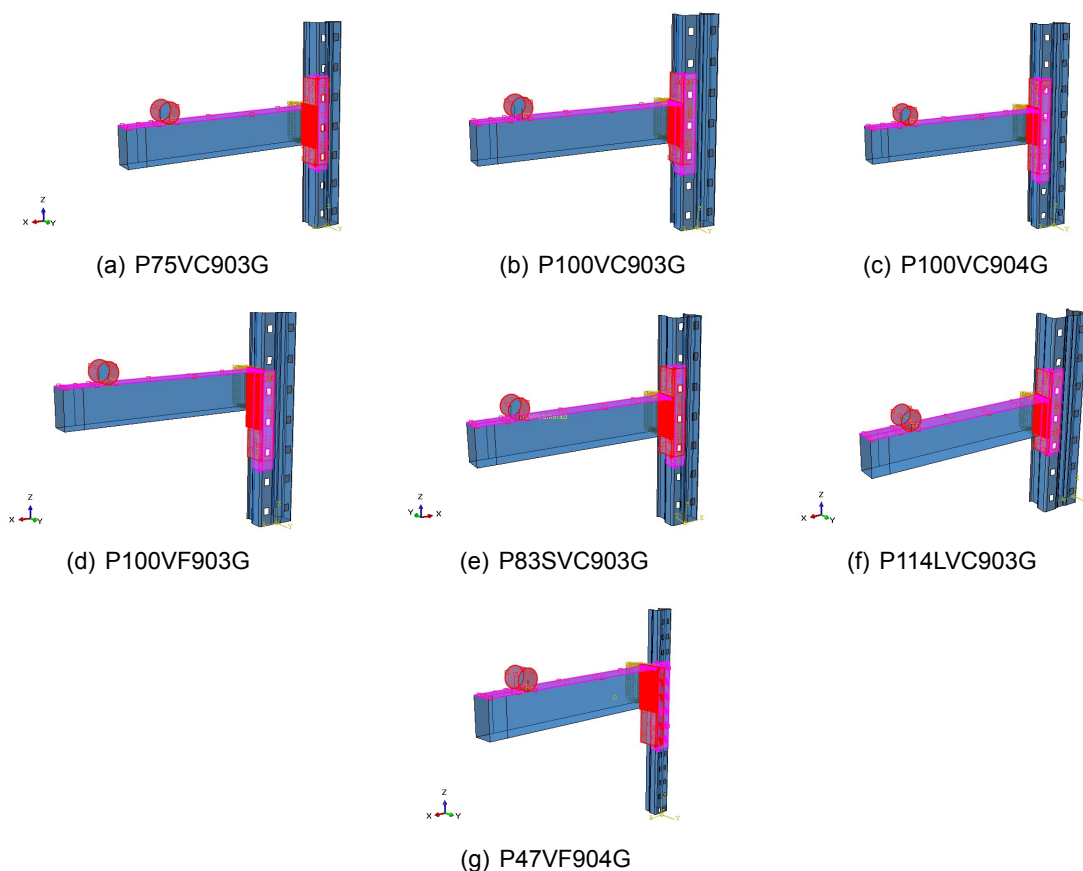


Figura 5.12: Áreas de contato dos provetes

Antes de se ter procedido à criação de interações de contato, criaram-se "Surfaces" nas faces correspondentes às áreas de contato em que se teve que escolher os lados da face da peça como "castanho" ou "purpura" ("Brown" ou "Purple"), para definir o lado da face da peça (nestes casos em estudo a peça é considerada uma casca ("Shell")) que se pretende. [14] A escolha do lado da superfície de casca que se escolhe, para posteriormente ser utilizada como zona de interação de contato, torna-se importante pois este procedimento pode evitar problemas computacionais. Nas faces que correspondem às interações de contato, impôs-se um coeficiente de atrito de 0,74.

As condições de fronteira consideradas nestes casos de estudo, tendem a aproximar-se da realidade dos ensaios realizados com base na norma EN15512:2009.

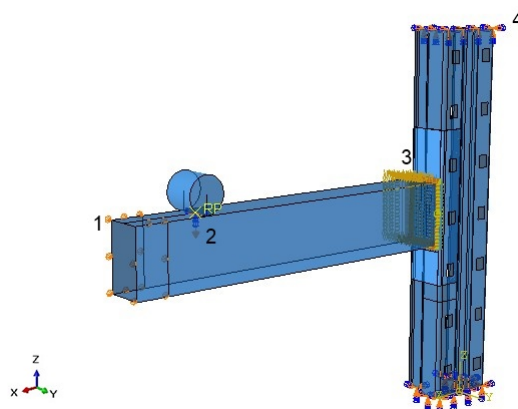


Figura 5.13: Condições de Fronteira

A figura 5.13 ilustra as condições fronteiras do modelo. O numero 1 é uma imposição de deslocamento em y, para evitar que a viga contenha algum deslocamento nesse sentido mantendo um percurso no sentido vertical (eixo z do sistema coordenadas do Abaqus).

O numero 3 da figura 5.13 representa a soldadura que liga a viga ao conector, construído através de elementos de soldadura ("Weld"), construindo fios ("Wires") e criando uma partição no conector e na viga, para obter pontos de ligação entre a viga e o conector (ver figura 5.14), e assim ligar os elementos ("Wires Weld") o que implica que nesses nós, os deslocamentos e rotações sejam nulos.

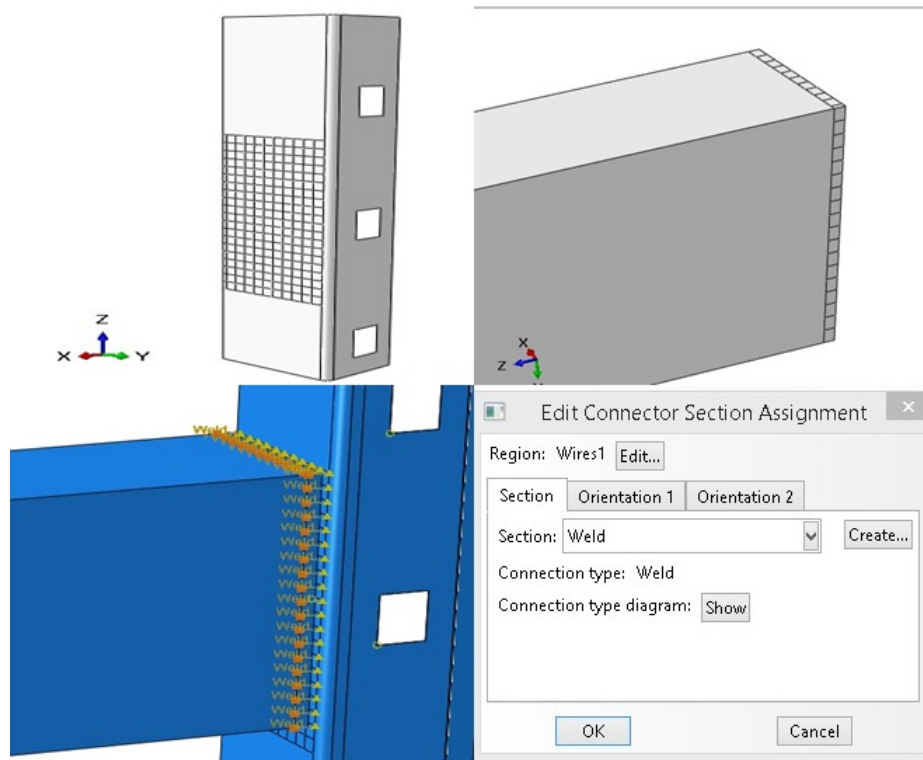


Figura 5.14: Elementos "Weld"

Por fim, a condição fronteira numero 4, é um encastramento que simula a zona fixa do pilar. A zona fixa que se refere é a zona onde o pilar se encontra fixo no suporte aparafusado (ver figura 4.14 (c)).

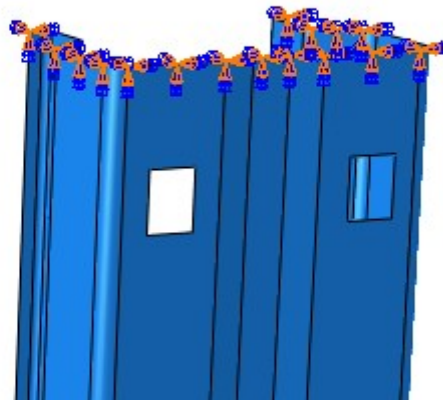


Figura 5.15: Encastramento do Pilar

5.3.1.7 Simulação das Garras

Para a simulação das garras optou-se por gerar "Sets" nodais entre o conetor e o pilar, exatamente na zona onde se verificou o dano nos ensaios descritos na parte II da capítulo 4.

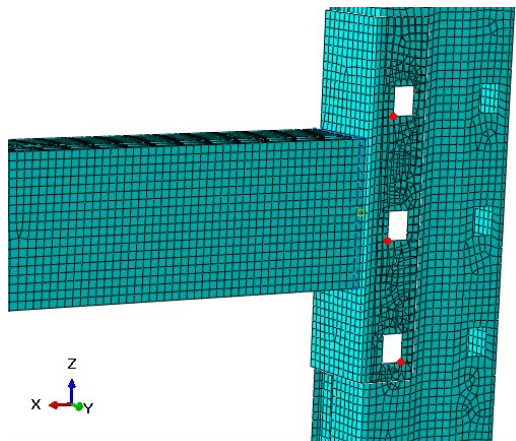


Figura 5.16: Simulação das Garras

Os pontos nodais escolhidos, foram os inferiores esquerdos e direitos dos orifícios do pilar e do conetor alinhados entre si, porque são as zonas onde se verifica o dano, ao atingirem a carga máxima, observados nos ensaios da parte II do capítulo 4. O recurso do Abaqus que foi utilizado para simulação das garras, foram os acoplamentos entre os nós do conetor e do pilar conhecidos em ambiente abaqus como ("*Tie Constraint*"). A todos os provetes aplicou-se o mesmo método.

5.3.1.8 Aplicação da Força

Para simular a aplicação da força, definiu-se um ponto de referencia (*reference point*) no corpo rígido que representa o sistema de rolamentos, e se situa na zona de contato entre a viga e o corpo rígido, onde esse ponto posiciona-se a 400mm da face do pilar que está em contato com o conetor.

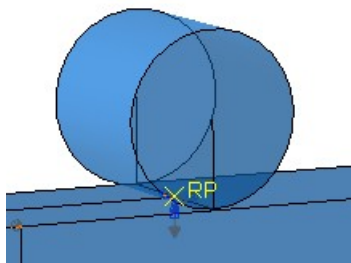


Figura 5.17: Aplicação da Força

No ponto de referência "RP", como mostra a figura, impôs-se um deslocamento, até a um valor máximo aproximado ao obtido nos ensaios experimentais, onde se retiraram os deslocamento e a força exercida.

5.3.2 Resultados (Pós-processamento)

Construído o modelo, para todos os provetes viga+pillar em estudo, este foi submetido a análise. Neste subcapítulo vão ser apresentados os resultados gráficos provenientes das simulações numéricas por elemento finitos, bem como todos os parâmetros analisados nos ensaios, carga máxima, Momento máximo, rotação máxima e a rigidez; em comparação com os ensaios realizados.

Os gráficos que se determinaram para cada provete, através modelo numérico já descrito anteriormente, são a Força-Deslocamento e Momento-Rotação.

Abaixo seguem as imagens que mostram os gráficos $F(d)$ e $M(\theta)$ que resultaram do modelo de simulação numérica, comprando-os com os gráficos experimentais.

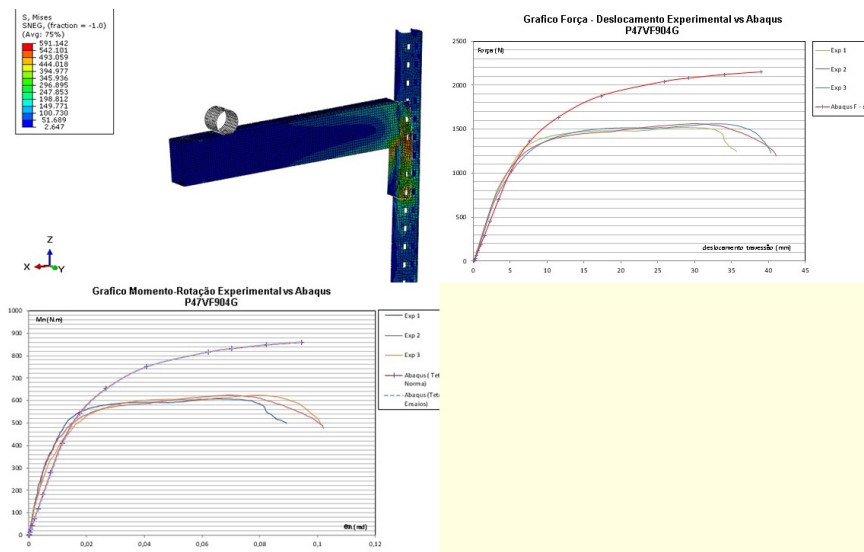


Figura 5.18: P47VF904G

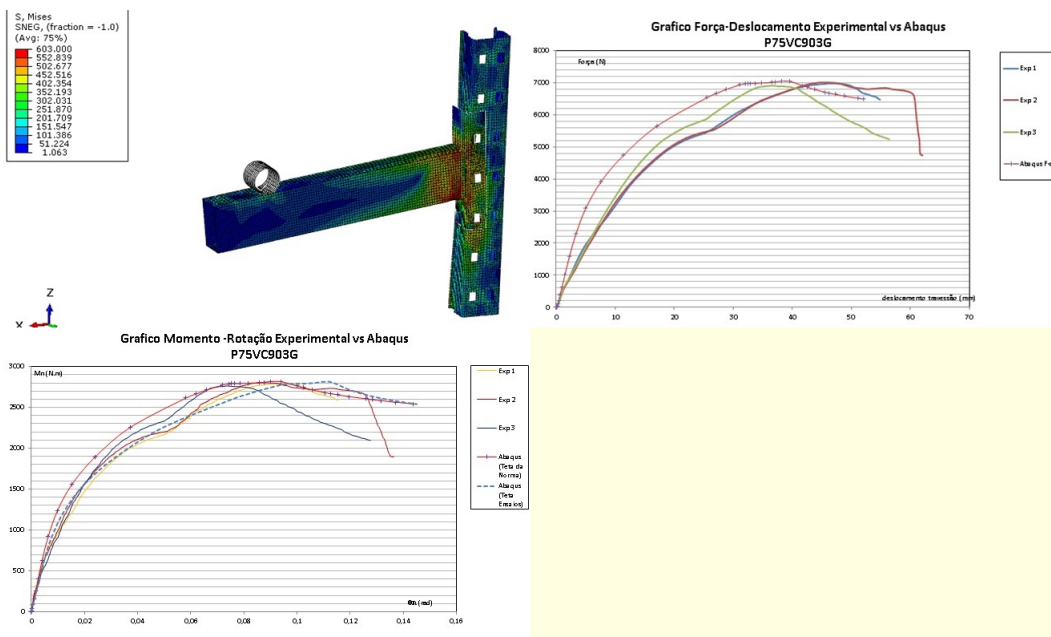


Figura 5.19: P75VC903G

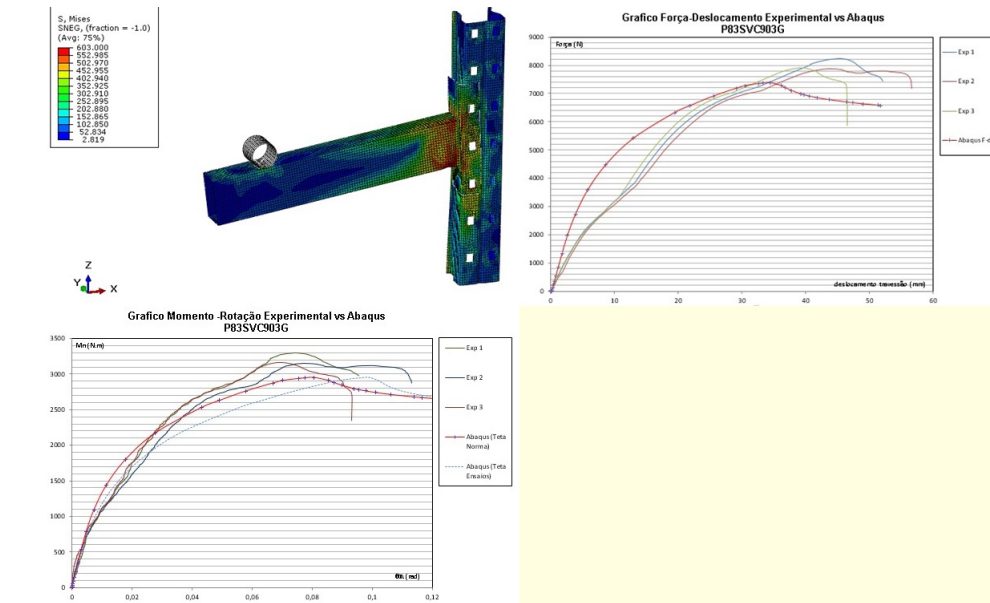


Figura 5.20: P83SVC903G

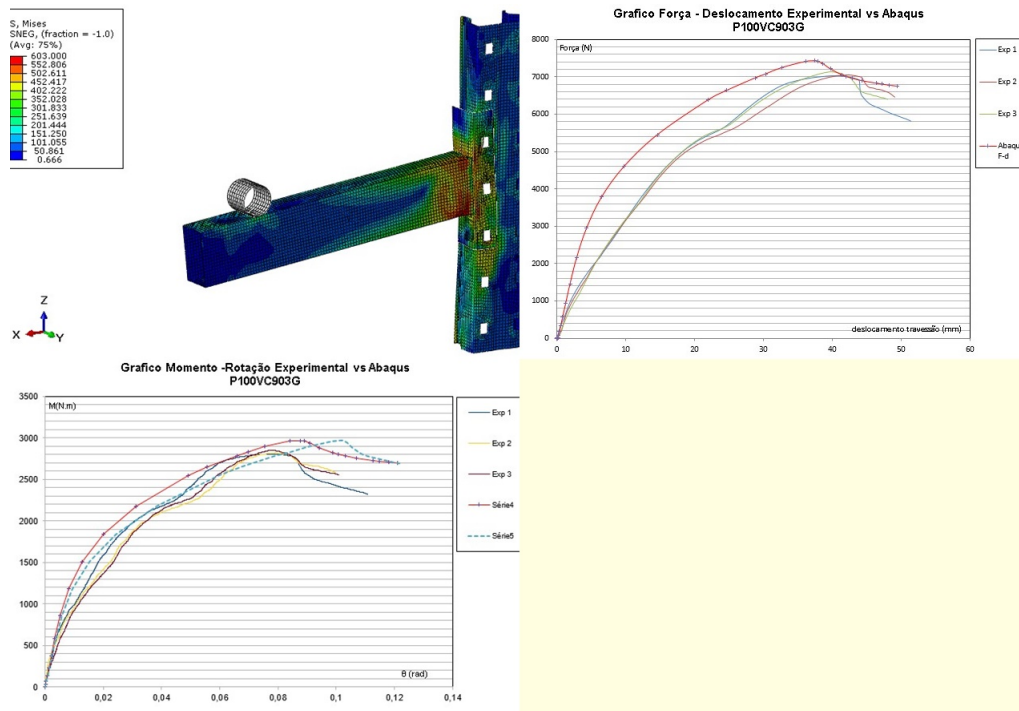


Figura 5.21: P100VC903G

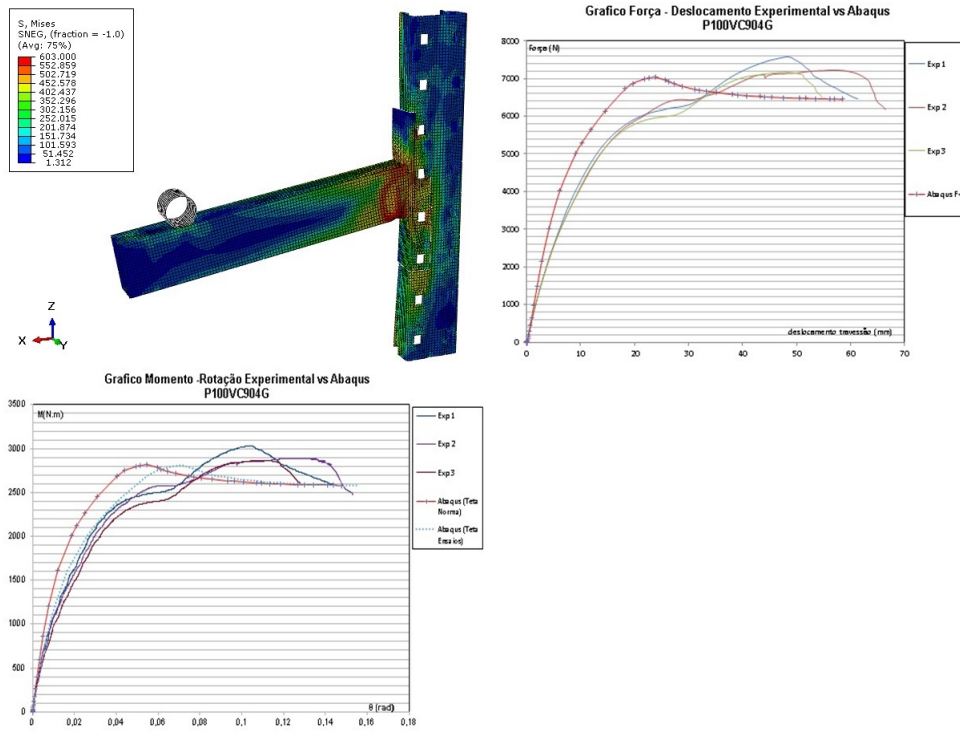


Figura 5.22: P100VC904G

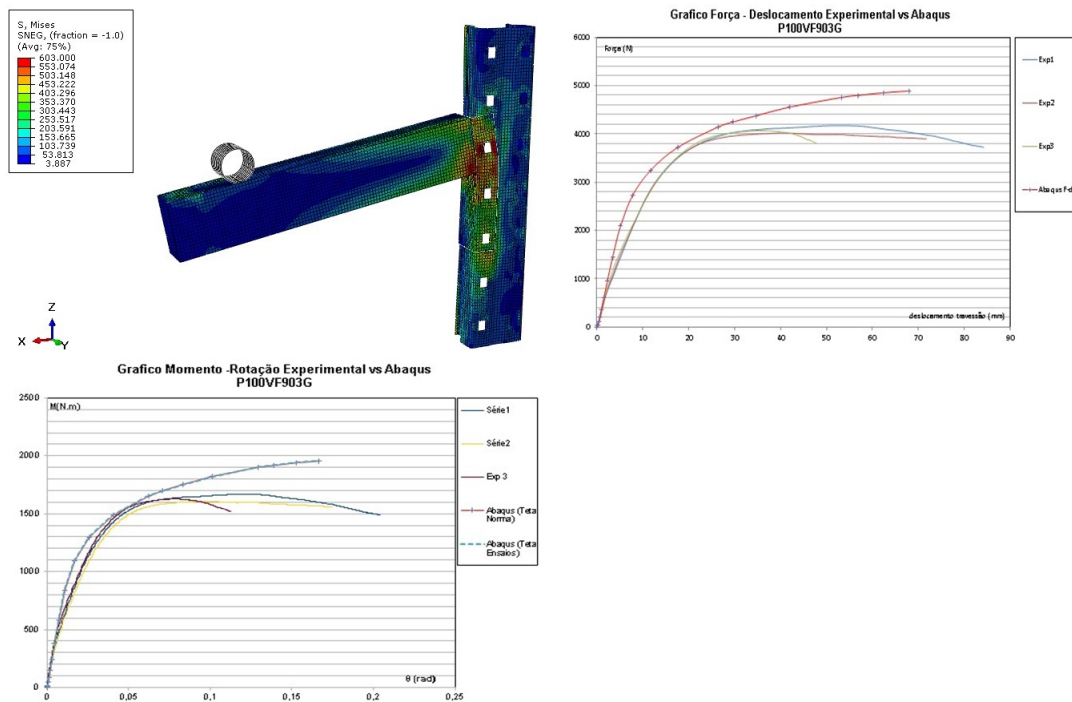


Figura 5.23: P100VF903G

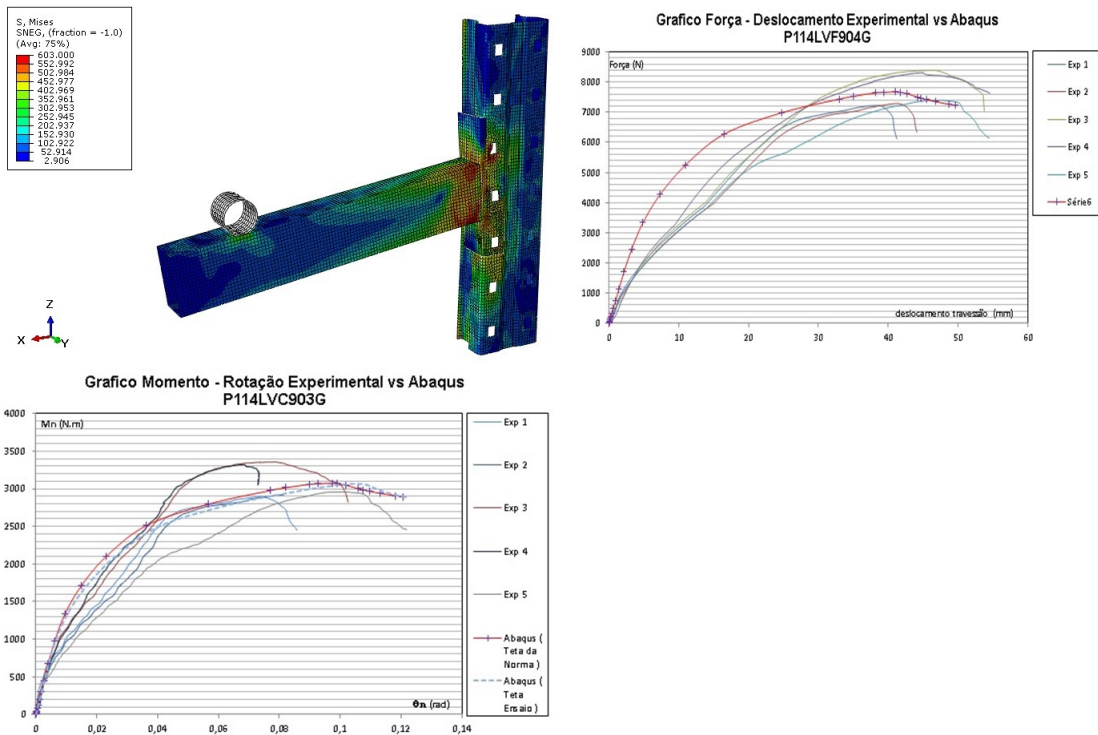


Figura 5.24: P114LVC903G

Como se pode verificar nas imagens acima, existem mais dois gráficos de Momento-Rotação ($M(\theta)$). O que diferencia dos gráficos, são o cálculo do ângulo de rotação. A medição do ângulo de rotação foi efetuada através dos dois métodos diferentes descritos na Parte II do capítulo 4, através da expressão 4.7, que a norma EN15512:2009 prescreve (gráfico a vermelho), e através do método dos declives das retas utilizando as equações 4.5 e 4.6, realizado nos ensaios (gráfico a tracejado azul). Esses métodos estão ilustrados nas figuras 5.25 e 5.26.

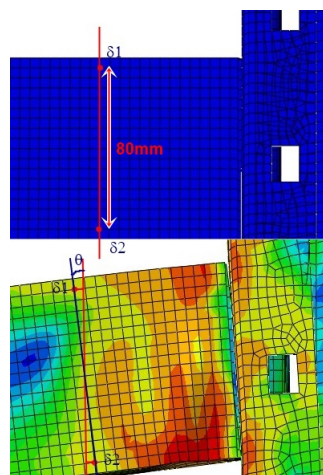


Figura 5.25: Determinação do ângulo de rotação através da equação 4.7

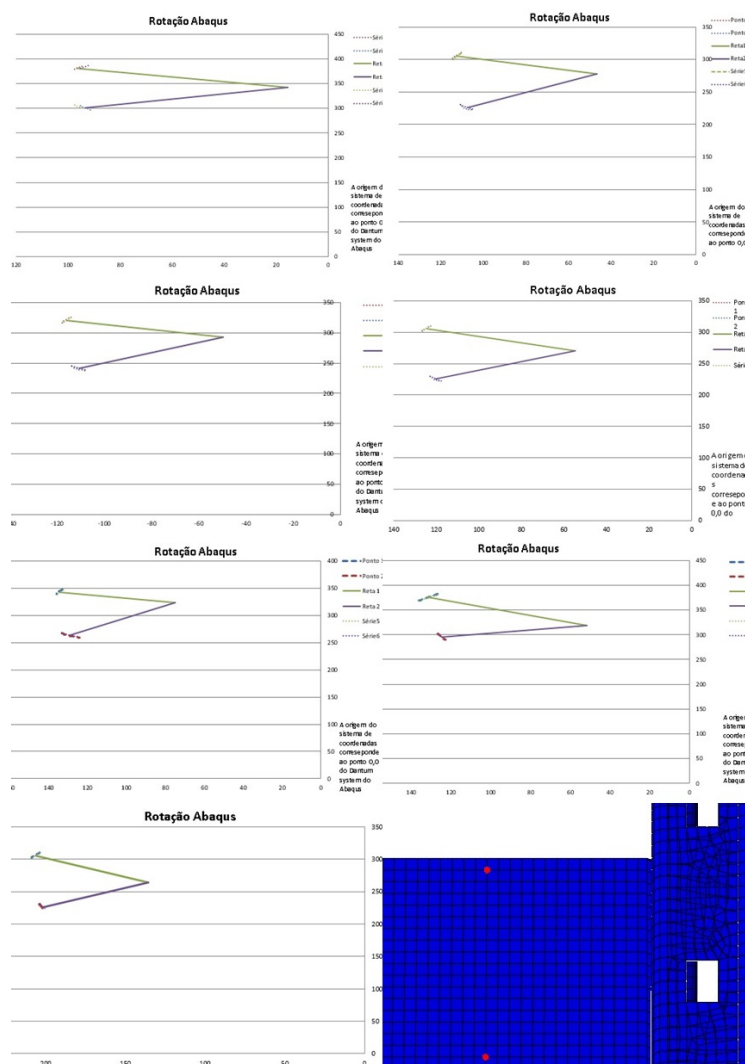


Figura 5.26: Determinação do ângulo através do método dos declives.

Na tabela que se segue apresentam-se os valores de força máxima, momento máximo, ângulo de rotação máximo do modelo numérico em comparação com os resultados experimentais. Os valores de deslocamento da simulação numérica, foram impostos e incrementados igualmente até ao máximo obtido nos ensaios experimentais.

Tabela 5.1: Comparação Resultados dos ensaios com Resultados do Modelo Numérico

| Provetes | Resultados Experimentais (Valores médios) | | | Resultados Modelo Numérico | | | | |
|-------------|---|-----------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | F _{máx} (N) | M _{max} (Nm) | $\theta_{máx}$ (rad) | D _{max} (mm) | D _{max} (mm) | F _{máx} (N) | M _{max} (Nm) | $\theta_{máx}$ (rad) |
| P47VF904G | 1547 | 619 | 0.097 | 39,01 | 39,01 | 2149 | 860 | 0.094 |
| P75VC903G | 6963 | 2785 | 0.126 | 57,73 | 57,73 | 7045 | 2818 | 0.144 |
| P83SVC903G | 8005 | 3202 | 0.100 | 51,74 | 51,74 | 7384 | 2954 | 0.128 |
| P100VC903G | 7067 | 2827 | 0.104 | 49,46 | 49,46 | 7424 | 2970 | 0.121 |
| P100VF903G | 4086 | 1633 | 0.164 | 67,95 | 67,95 | 4890 | 1956 | 0.166 |
| P114LVC903G | 7723 | 2974 | 0.093 | 49,62 | 49,62 | 7200 | 3070 | 0.121 |
| P100VC904G | 7321 | 2928 | 0.140 | 60,85 | 60,85 | 7036 | 2815 | 0.154 |

Na tabela seguinte apresentam-se os valores da rigidez das ligações do modelo simulado para cada um dos diferentes gráficos $M(\theta)$ (cálculo do ângulo diferentes). O método utilizado para o cálculo da rigidez, para cada ligação do modelo simulado, foi o mesmo adotado nos ensaios experimentais, através do declive das retas resultante do gráfico bi-linear, como ilustra a figura 4.26, tendo em conta o mesmo momento limite, M_{rd} , calculado nos ensaios.

Tabela 5.2: Comparação da Rigidez Ensaios experimentais com a rigidez das simulações das ligações

| Provetes | Rigidez Média (kNm/rad) | Rigidez Abaques (km/rad) | Rigidez Abaques (kNm/rad) |
|-------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | Ensaio experimentais | Ângulo norma | Ângulo método dos declives |
| P47VF904G | 33,77 | 53,21 | 52,01 |
| P75VC903G | 47,25 | 109,29 | 78,98 |
| P83SVC903G | 71,21 | 62,74 | 48,63 |
| P100VC903G | 50,83 | 91,77 | 75,01 |
| P100VF903G | 41,95 | 61,33 | 62,13 |
| P114LVC903G | 72,72 | 115,26 | 102,59 |
| P100VC904G | 57,72 | 109,29 | 78,98 |

5.3.3 Discussão de resultados

Os resultados sob forma gráfica do modelo de simulação numérica, para os diferentes provetes viga+pilar, apresentam sob forma gráfica boa concordância com a dos ensaios experimentais. Comparando os resultados da força máxima (F_{\max} (N)) e momento máximo (M_{\max} (Nm)), da tabela 5.1, os resultados obtidos do modelo apresentam uma diferença entre 1% a 28%, relativamente aos resultados dos ensaios experimentais. Para os provetes viga+pilar P47VF904G, P75VC903G, P100VC903G, P100VF903G do modelo numérico apresentam uma carga máxima superior e conseqüentemente os seus momentos também são superiores em relação aos valores experimentais. Para os restantes os valores numéricos são inferiores em relação aos resultados experimentais.

O facto de se ter simulado as garras apenas com nós acoplados influenciou nos resultados finais. Este modo de se simular as garras, também teve influencia nos valores de rigidez do modelo apresentado em relação aos valores experimentais, sendo que na maioria dos casos são muito superiores.

Os elementos de soldadura "weld", no modelo, contribuíram também para uma grande concentração de tensões na junção entre a viga e o conetor. Estes tipo de elementos utilizados contribuíram, na maioria dos casos, para uma encurvadura diferente das que se observaram nos testes experimentais. As maiores tensões também se verificam na zona da primeira garra dos conectores confirmando assim uma representação do dano verificado nos ensaios.

Conclusões Finais e Possíveis Trabalhos Futuros

Os testes experimentais realizados no Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro, no âmbito deste estudo de simulação numérica, tiveram sempre a estrita preocupação de seguir os procedimentos integrados nas normas de dimensionamento/desempenho estrutural. Os sistemas experimentais foram desenhados por forma a cumprir a geometria dos provetes de teste e aplicação de forças/momentos previstos nos referidos deslocamentos.

Embora tivesse havido a preocupação em reproduzir sempre os procedimentos integrados nas normas de dimensionamento/teste, o facto é que se trabalha com perfis reais, em que defeitos estruturais (distorções geométricas, efeito de tensões residuais, fissuras resultantes de deformações de conformação plástica) condicionam em considerável grau, o comportamento da relação tensão-deformação prevista com simulações por elementos finitos de formulação avançada, como foi o caso do procedimento levado a cabo nesta tese.

De um modo global, foi possível verificar que a simulação numérica efetuada com elementos finitos ABAQUS, apresentou uma concordância bastante boa com os resultados equivalentes obtidos pelos testes experimentais aqui apresentados.

No entanto, essa concordância não significa que não sejam necessários a realização de mais modelos de simulação numérica juntamente fazendo comparação de resultados com ensaios experimentais.

Por esta razão propõe-se como futuro desenvolvimento, a simulação de modelações numéricas e ensaios experimentais correspondentes a casos em que a flexão dos perfis em uniões, tivesse o efeito de esforços axiais principalmente de compressão, sobretudo, por serem mais frequentes, e de efeito mais danoso.

Outro possível trabalho futuro propõe-se avaliar o comportamento das tensões e deformações localizadas com mais pormenor na zona das garras dentadas onde ocorre o dano, simulando as garras dentadas com mais precisão.

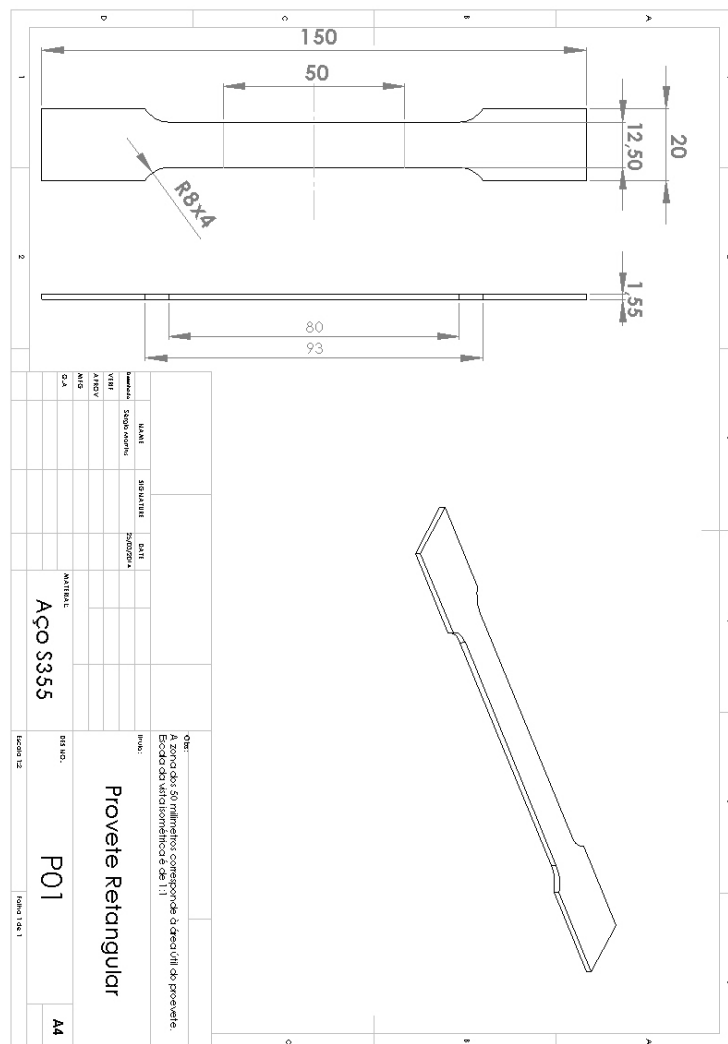
Ainda como possível trabalho futuro deveria-se melhorar o modelo de simulação numérica selecionando elementos sólidos combinados com elementos de transição, permitindo a compatibilidade nodal e paramétricas com elementos de casca, inicialmente utilizados neste estudo. Os elementos de casca têm menos graus de liberdade e a constrição da incompressibilidade segundo a espessura evita fenómenos numéricos como o *"hourglass"* que são distorções de energia nula, resultantes do uso de integração reduzida com elementos sólidos. Os elementos sólidos modelam com maior realismo os problemas de contacto

(caso das garras no encaixe) do que os elementos de casca, embora a utilização destes elementos torna-se computacionalmente muito exigentes em CPU o que torna o calculo muito demorado, com elevados custos informáticos.

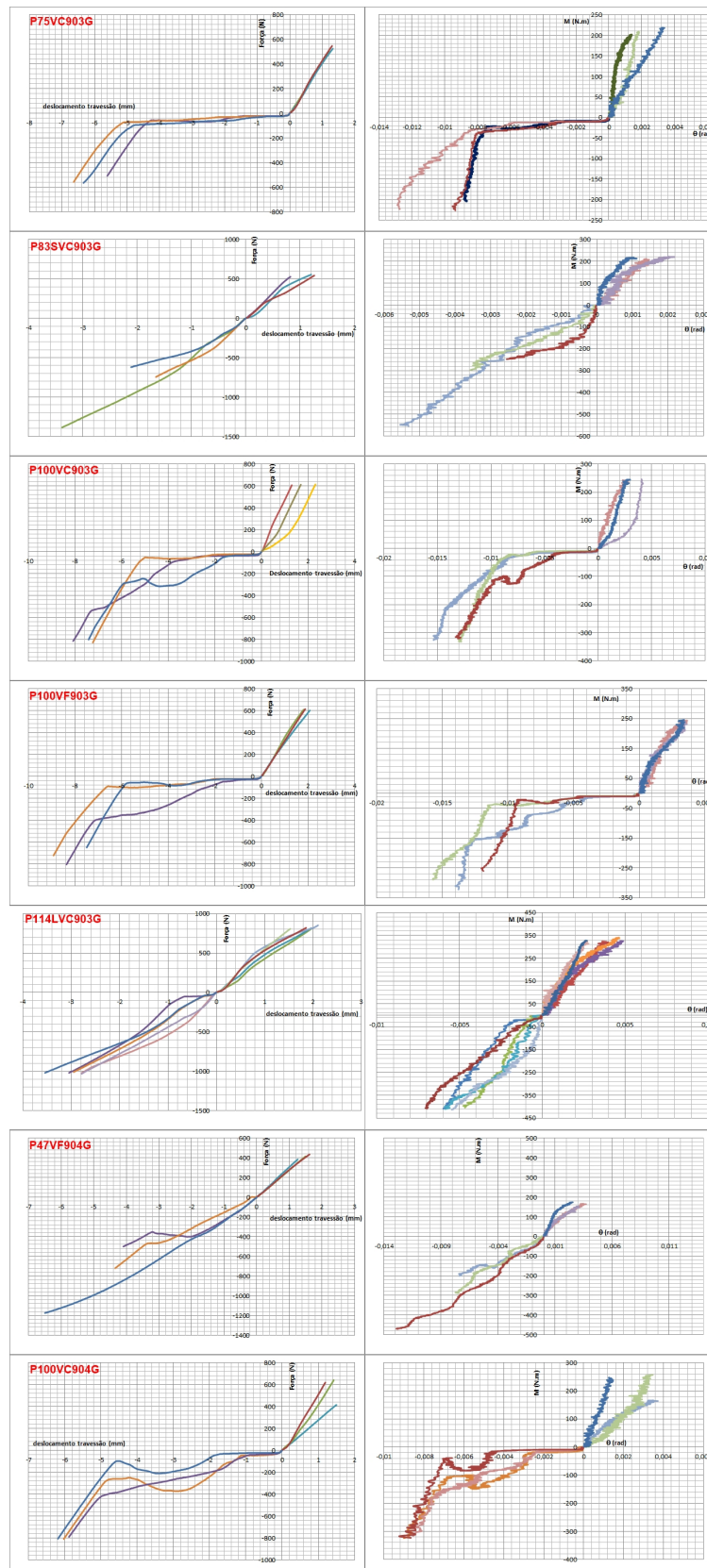
Referências Bibliográficas

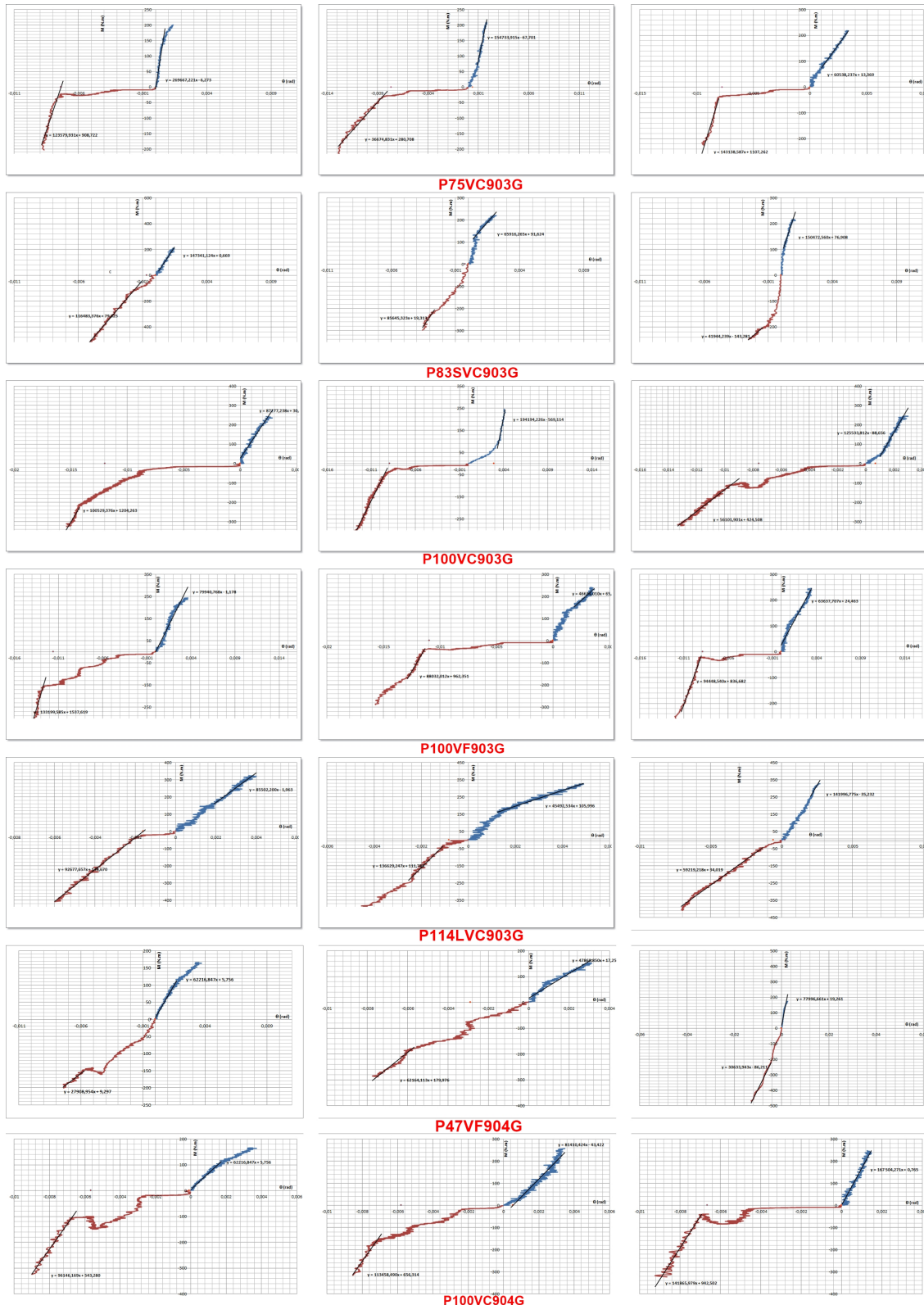
- [1] Kenneth B. Ackerman. *Warehousing: Origins, History and Development*. Springer US, 1990.
- [2] Sérgio Alves de Miranda. *Análise de ligações de sistemas de armazenagem industrial tipo porta-pallets*. Dissertação do departamento de engenharia civil da escola de minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.
- [3] <http://www.kind.pt/>. Consultado em 28/2/2014.
- [4] Engº Cláudio Sei Guerra. *Manual de Sistemas de Armazenagem*, Fevereiro 2014.
- [5] <http://www.mecalux.pt/estantes-paletizacao/armazens-autoportantes>. consultado em 28/2/2014.
- [6] Kind, Soluções de Armazenagem, Arrumação e Arquivo. *Manual de Paletização KD*, Janeiro 2013.
- [7] Andrew T Sarawit and et al. Cold-formed steel frame and beam-column design. 2003.
- [8] Jorge Rodrigues, Paulo Martins. *Tecnologia Mecânica, Tecnologia da deformação Plástica*, volume I Fundamentos Teóricos. Escolar Editora, 2005.
- [9] Ana Carolina Caldas Aguiar. *ANÁLISE ESTRUTURAL DE TUBOS EXPANSÍVEIS PARA POÇOS DE PETRÓLEO*. Projeto final de engenharia do petróleo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- [10] Gérard A. Maugin. *The thermomechanics of plasticity and fracture*, volume 7. Cambridge University Press, 1992.
- [11] Filipe Teixeira Dias, et al. *Métodos de Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. ETEP, 1ª edição edition, 2010.
- [12] E. Hinton, et al. *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. NAFEMS, 1992.
- [13] EN 15512 : 2009. Steel static storage systems - adjustable pallet racking systems-principles for structural design, March.
- [14] <http://abaqusdoc.ualgary.ca/books/usi/default.htm>. Consultado em 24/10/2015.

Apêndice 1: Desenho Técnico do Provette dos ensaios uni-axiais de tração

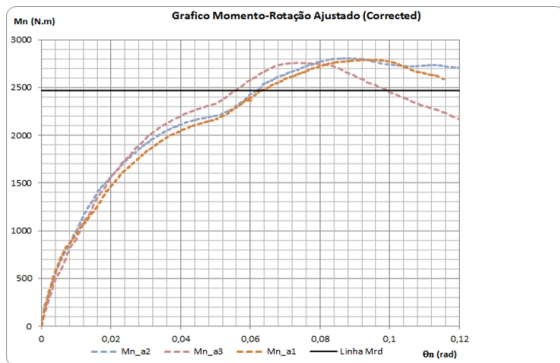


Apêndice 2: Gráficos gerados para cálculo da folga das ligações em estudo

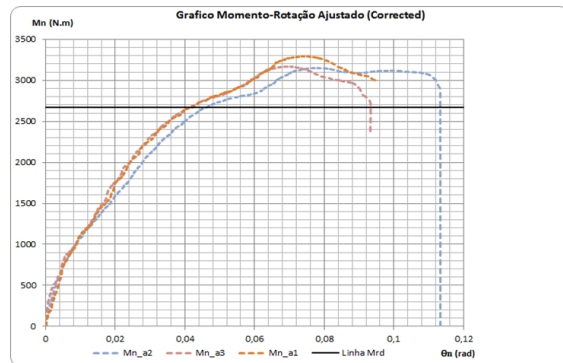




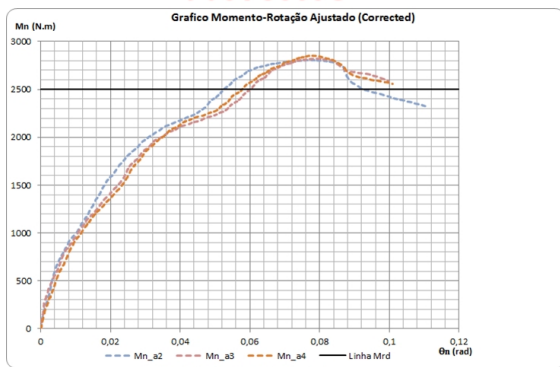
Apêndice 3: Gráficos Momento Rotação experimentais corrigidos



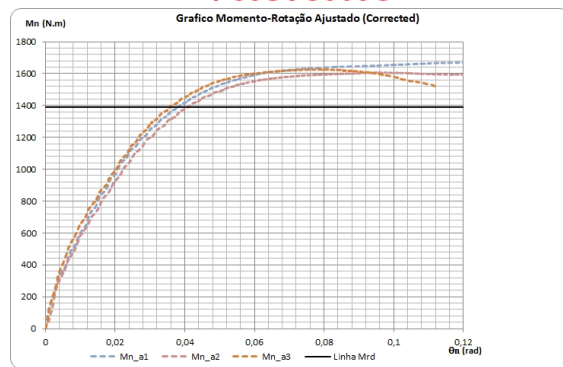
P75VC903G



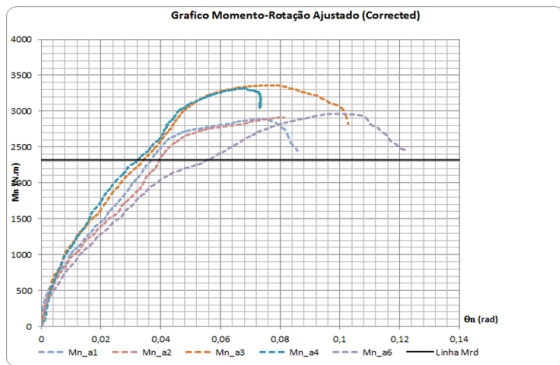
P83SVC903G



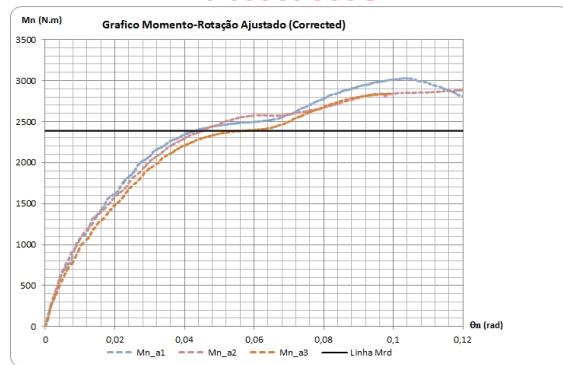
P100VC903G



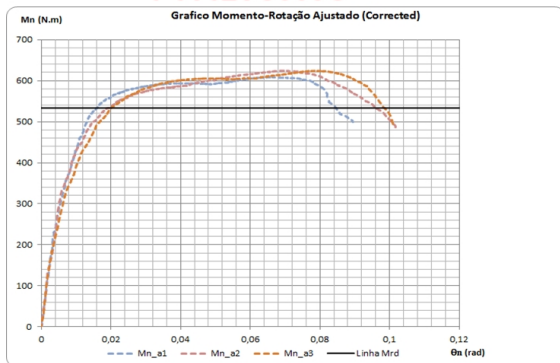
P100VF903G



P114LVC903G

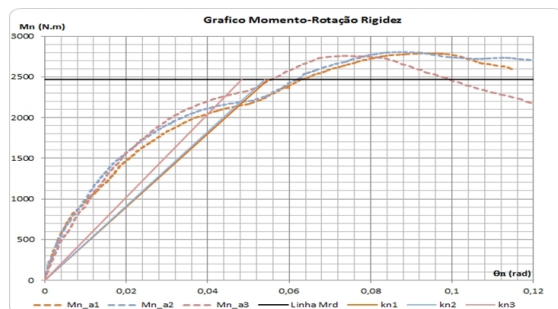


P100VC904G

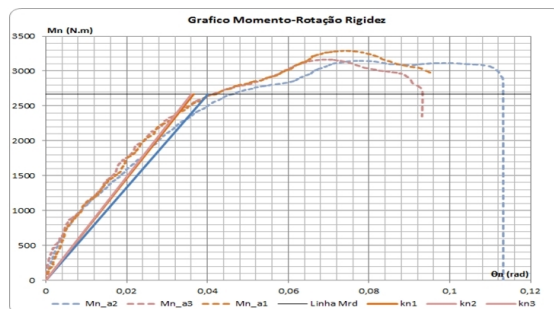


P47VF904G

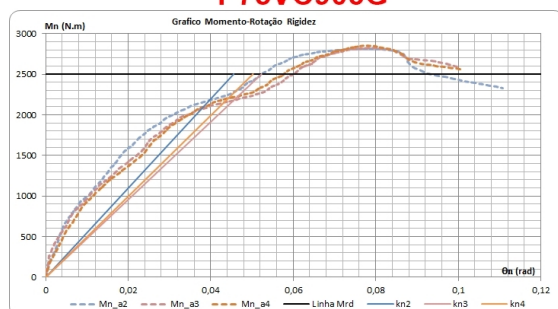
Apêndice 4: Gráficos para o cálculo da rigidez



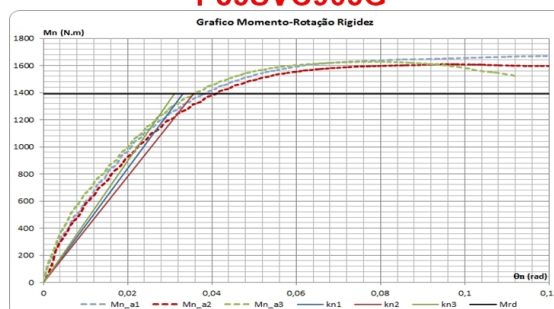
P75VC903G



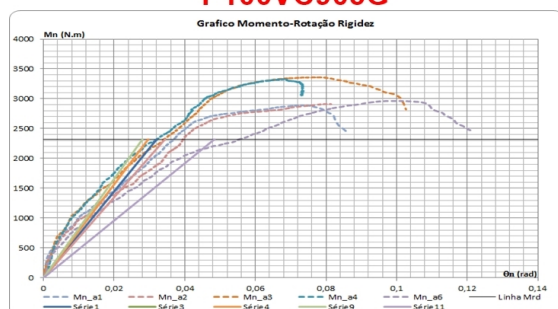
P83SVC903G



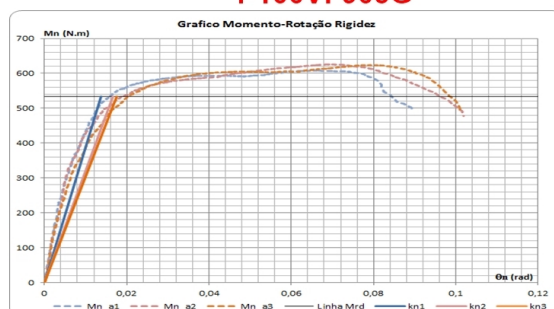
P100VC903G



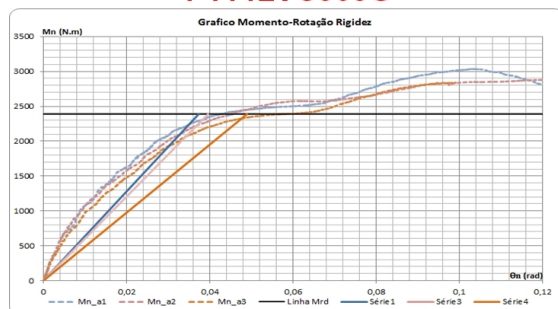
P100VF903G



P114LVC903G

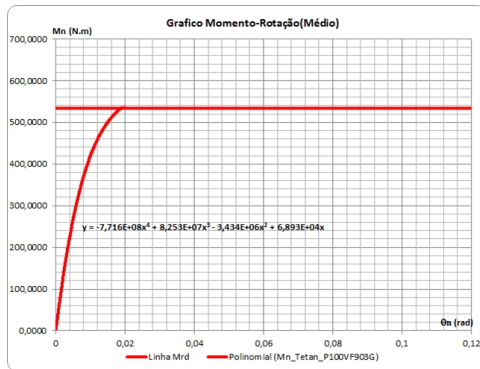


P47VF904G

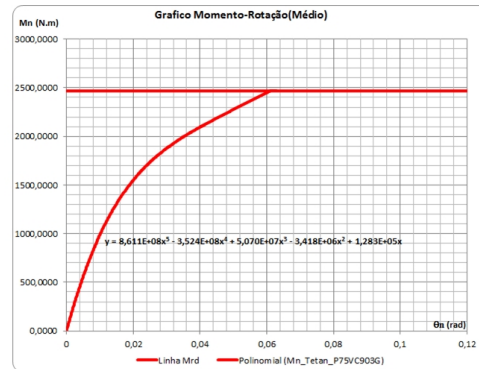


P100VC904G

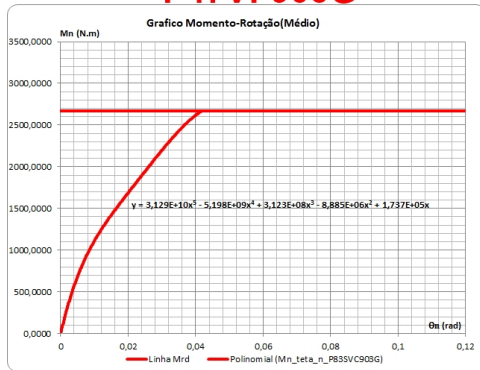
Apêndice 5: Gráficos de Momento-Rotação médios de cada pro- vete



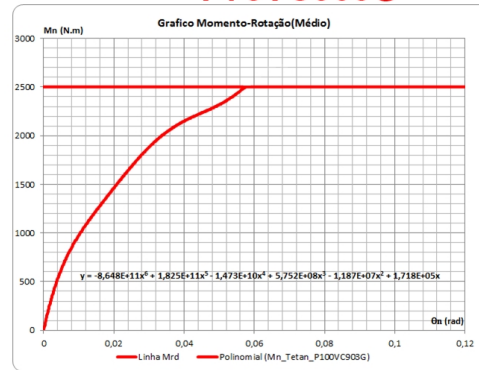
P47VF903G



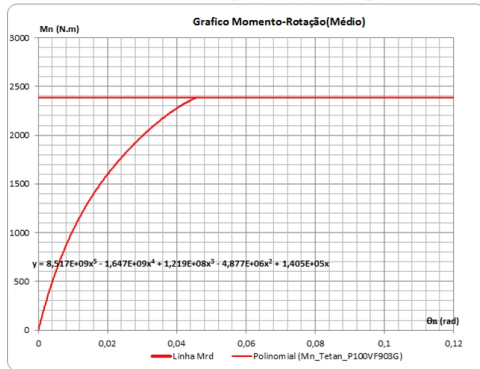
P75VC903G



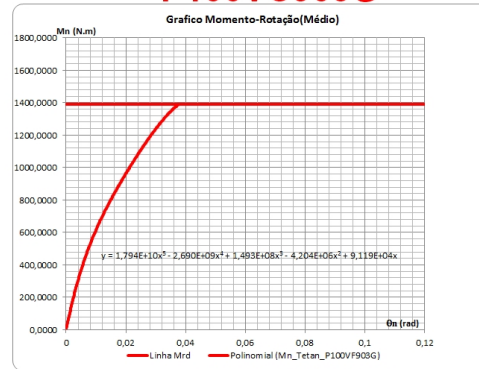
P83SVC903G



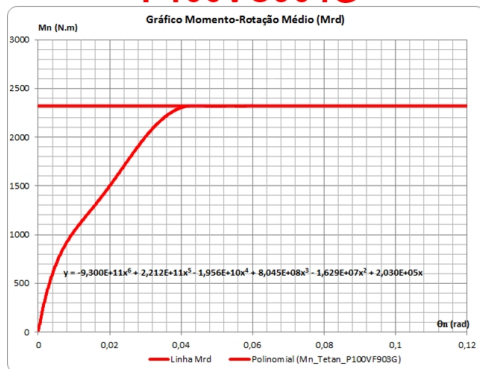
P100VC903G



P100VC904G



P100V90F3G



P114LV90F3G

Anexo 1: Norma EN 15512:2009 (incluí apenas as páginas 34-37, 87-88, 98-106)

EN 15512:2009 (E)

Table 2 — Load factors γ_f

| Actions | Ultimate limit state | Serviceability limit state |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Permanent loads γ_G | | |
| - with unfavourable effect | 1,3 | 1,0 |
| - with favourable effect | 1,0 | 1,0 |
| Variable loads γ_Q | | |
| unit loads | 1,4 | 1,0 |
| unit loads in crane operated systems | 1,4 or 1,3 ¹ | 1,0 |
| placement loads | 1,4 | 1,0 |
| other live loads | 1,5 | 1,0 |
| Accidental loads | | |
| γ_A | 1,0 | |
| γ_{GA} | 1,0 | |
| γ_{QA} | 1,0 | |

¹Applicable for a crane-operated warehousing system including the weighing of all unit loads and the rejection of all unit loads weighing more than the design load of the rack, the load factor for unit loads may be reduced from 1,4 to 1,3.

NOTE The statistical uncertainty regarding the magnitude of weight of unit loads is considerably less than that for the conventional variable actions in building construction (wind, snow, floor load, etc). Furthermore the user exerts a high level of control in the operation of the system. Consequently unit loads have a load factor between that for other live loads and permanent actions. The main uncertainty in the load-related performance of a pallet rack is in the interaction with the loading equipment. It is considered that these effects are incorporated in the accidental loads and placement loads which reflect the likely result of good practice (see 6.3).

7.5 Material factors

The material factors γ_M for ultimate limit state and serviceability limit state verifications are given in Table 3.

Table 3 — Material factors γ_M

| Resistance | Ultimate limit state | Serviceability limit state |
|---|----------------------|----------------------------|
| Resistance of cross-sections | 1,0 | 1,0 |
| Resistance of connections | 1,25 | 1,0 |
| Resistance of connections subject to testing and quality control (e.g. beam end connectors) see Annex A | 1,1 | 1,0 |

7.6 Stability against overturning

Using a load factor corresponding to the ultimate limit state, it shall be verified that the empty rack is stable under the action of a single horizontal placement load in the most unfavourable position.

The horizontal placement load shall be resisted by the self-weight of the rack and the floor anchorages.

In every upright frame the base plates shall be fixed squarely to the uprights and secured to the floor through any shimming material or grouting necessary to ensure that the uprights are solidly supported under the whole area of the base plate. The shimming material shall be steel and shall be prevented from shifting relative to the base plate.

7.7 Racks braced against the building structure

If the racks are braced against the building structure, the two structures can impose forces upon each other. These forces shall be calculated and the owner of the building or his representative shall be informed of these forces and their location.

8 Steel

8.1 General

8.1.1 Preliminary considerations

The nominal values of material properties given in this section should be adopted as characteristic values in design calculations for the manufacture of racking products. Steels shall be suitable for cold-forming, welding and galvanising where appropriate.

Specified steels according to Table 3.1 of EN 1993-1-1:2005, and 3.1a and 3.1b of EN 1993-1-3:2006, the properties and chemical composition of which are in compliance with the relevant standards, fulfil the requirements of this section.

Other steels may be used provided that:

- a) their properties and chemical composition are at least equivalent to steels, for which the standards are listed in Table 3.1 of EN 1993-1-1:2005 and 3.1 of EN 1993-1-3:2006,
- b) if the steel is for cold-forming, it fulfils the requirements of the bend test A.1.2. and the ratio of the characteristic ultimate tensile strength to the characteristic yield strength satisfies $f_u/f_y \geq 1,05$ where f_y , f_u = characteristic tensile yield strength and tensile ultimate strength of the basic material.

NOTE 1 The minimum ratio in 8.1.1 differs from that specified in EN 1993-1-1 but is acceptable for racking products.

NOTE 2 See Annex D relating to research into the use of materials with a close ratio between f_u and f_y

8.1.2 Material properties

The nominal values of the yield strength f_y and the ultimate strength f_u for structural steel shall be obtained by

- a) adopting the values $f_y = R_{eh}$ and $f_u = R_m$ direct from the relevant product standard,
- b) using the simplification given in 8.1.5,
- c) using the testing regime specified in 8.1.4.

8.1.3 Design values of material coefficients (general mechanical properties)

The following properties of steel shall be assumed in design.

- a) Modulus of Elasticity $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$.
- b) Shear Modulus $G = E/[2(1+\nu)] \text{ N/mm}^2$.

EN 15512:2009 (E)

- c) Poisson's Ratio $\nu = 0,3$.
- d) Coefficient of linear thermal expansion $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$.
- e) Density $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

8.1.4 Steels with no guaranteed mechanical properties**8.1.4.1 General**

For steels in this category a series of tensile tests may be used to justify the values to be used or a lower bound value of yield strength may be used.

8.1.4.2 Additional tests on steel

The mechanical properties of basic materials shall be measured from tensile tests according to section A.1.1. The results of tensile tests shall be subject to statistical control, see 13.3.3.

When conducting the following procedures for coils:

- a) testing to determine the minimum guaranteed mechanical properties for the steel used in production;
- b) to justify the use in design of a yield stress higher than the guaranteed value;
- c) to demonstrate adequate ductility.

The minimum frequency of testing shall be one test from each original coil (after slitting and cold-reducing, if cold-reducing is part of the process). Samples shall be taken lengthwise from the middle of the width near the end of the coil.

The results of the mechanical tests shall be statistically analysed in accordance with 13.3.3, in order to derive characteristic values of the yield or ultimate tensile strength of the material for design purposes. Where at least 100 test results have been accumulated over a long period, those in excess of 100 which are more than 12 months old shall be discarded from the analysis (see Annex A)

For sheets and sections, the mechanical properties given in 8.1.5 for unspecified steels shall be used.

8.1.5 Untested steels

The following values of f_{yb} shall be assumed if the steel grade is not specified or if the basic material is not available for testing:

Hot rolled sections 200 N/mm²;

Other steels 140 N/mm².

8.2 Average yield strength of sections

Where required, the average yield strength (f_{ya}) shall be determined for members as defined in EN 1993-1-3.

8.3 Special selection of production material

When a coil of material is specially selected for a particular application, excluding testing material, and the design strength to be used is in excess of the nominal design strength for that material, the maximum value of the design strength shall not exceed 90% of the value given on the test report for the coil.

8.4 Fracture toughness

Brittle fracture of material below 6 mm in thickness need not be considered for temperatures down to -35°C for non hot-dipped steel sheet in accordance with this specification.

For untested steels covered by 8.1.5 the 6 mm thickness limit given above shall be reduced to 2 mm.

NOTE Further guidance on this subject can be found in EN 1993-1-10

8.5 Dimensional tolerances

8.5.1 General

Tolerance limits of sections and members shall be in accordance with EN 10162.

The dimensional and mass tolerances of rolled steel sections, structural hollow sections and plates shall conform to the relevant product standard unless more severe tolerances are specified.

For structural analysis and design the nominal values of dimensions shall be used.

8.5.2 Thickness of material

The design rules given in this document shall be limited to the following core thickness t_c exclusive of coatings unless specified otherwise, where:

$$0,5 \leq t_c \leq 8,0 \text{ mm}$$

The use of thinner steel is not precluded but the load bearing capacity shall be determined by appropriate tests. If components with thicker steels are used they shall be designed in accordance with EN 1993-1-1. Design expressions for base plates (see 9.9) may be used with a material thickness greater than 8 mm.

8.5.3 Tolerances on thickness

The design rules given for cold-formed members have been developed on the basis of thickness tolerances of half the tolerances specified as normal in EN 10326:2004. When larger tolerances are used, the nominal values of thickness shall be adjusted to maintain the equivalent reliability (see EN 1993-1-3).

For continuously hot-dip metal coated material with a nominal thickness $\leq 1,5$ mm supplied with the restricted special tolerances given in EN 10143, the design thickness t shall be taken as equal to the nominal core thickness t_c .

In the case of continuously hot-dip metal coated steel sheet and strip conforming to EN 10147, the core thickness t_c shall be as given in EN 1993-1-3.

NOTE The thickness of the zinc protection is usually a total of 0,04 mm for 275 g/m^2 .

8.5.4 Width and depth of a cold-formed section

The width and depth of plane elements of a section shall fulfil the requirements in Table 4 and 5.

13.3 Interpretation of test results

13.3.1 Definition of failure load

The test component shall be deemed to have failed when:

- a) the applied test loads reach their upper limit;
- b) deformations have occurred of such a magnitude that the component can no longer perform its design function.

13.3.2 Corrections to test results

Raw test results shall be adjusted to account for differences between the actual thickness of the material used in the test and the nominal thickness specified by the manufacturer, and to account for the difference between the yield stress of the material in the test sample and the minimum yield stress guaranteed by the manufacturer. The way in which adjustments are to be made depends upon the nature of the test being made, and is described for each test separately in A.2.

When samples are prepared for tensile tests to determine the yield stress of the material, they shall be cut from an undamaged region of the test piece, away from heat affected zones, and away from bends in the section and from other areas where cold working effects can influence the result.

NOTE Alternatively the test pieces may be cut from the original coil, before cold forming.

13.3.3 Derivation of characteristic values

After the individual results of a group of tests have each been corrected for variations in thickness and yield stress, the characteristic value of the parameter being measured, R_k , shall be calculated as follows:

$$R_k = R_m - k_s s \quad (46)$$

where

R_m = the mean value of the adjusted test results;

$$R_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ni}$$

R_{ni} = individual test result, corrected for thickness and yield stress;

n = number of tests results in the group ($n \geq 3$);

s = the standard deviation of the adjusted test results;

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (R_{ni} - R_m)^2}$$

k_s = coefficient given in Table 13.

EN 15512:2009 (E)

Table 13 — k_s coefficient based on 95 % fractile at a confidence level of 75 %

| n | k_s |
|----------|-------|
| 3 | 3,37 |
| 4 | 2,63 |
| 5 | 2,33 |
| 6 | 2,18 |
| 7 | 2,08 |
| 8 | 2,00 |
| 9 | 1,95 |
| 10 | 1,92 |
| 15 | 1,82 |
| 20 | 1,76 |
| 30 | 1,73 |
| 40 | 1,71 |
| 50 | 1,69 |
| 100 | 1,68 |
| ∞ | 1,64 |

13.3.4 Characteristic values for a family of tests

A family of tests shall consist of a series of tests in which one (normally) design parameter (e.g. span, thickness) is varied. This section enables a family of test results to be treated as a single entity.

In order to carry out the evaluation of the characteristic strength, a suitable expression which defines the relationship between the test results and one or more relevant parameters in the test series shall be used. This design expression may be based on the appropriate equations of structural mechanics or on an empirical basis.

The design expression is considered to be the mean value of the test results. The standard deviation s_n is calculated for the whole test series after first normalising the test results by dividing each result by the corresponding value in the design expression. The characteristic strength R_k for a particular set of parameters within a family is given by:

$$R_k = R_m (1 - k s_n) \quad (47)$$

where

R_m = value given by the design expression;

k = value given in Table 13 with n = total number of tests in the family;

s_n = standard deviation of the normalised test results.

NOTE The more accurately the design expression reflects the mean measured strength, the more favourable the values resulting from the evaluation. The coefficients in the design expression may be adjusted in order to optimise the correlation.

EN 15512:2009 (E)

- c) A suitable algebraic expression shall then be chosen for χ_{cu} ($= \chi_{cu}(\bar{\lambda}_{ni})$) to represent the locus of mean values of the test results, χ_{ni} . This expression shall not have more than five independent coefficients. This may be done by using a least squares curve fitting process or by sketching a best fit smooth curve in by hand.
- d) The individual values, χ_{ni} , should be normalised by dividing each one by the corresponding mean value, χ_{cu} . The standard deviation, s , of these normalised values may then be calculated.
- e) The characteristic value of the stress reduction factor, χ , shall then be determined using:

$$\chi = \chi_{cu} (1 - k_s s) \quad (\text{A.6})$$

where k_s is given in Table 12 based on the total number of test results.

This column curve is valid over the range of column lengths tested. For column lengths outside the tested range, the stress reduction factor should be calculated according to 9.7.4 and 9.7.5, but before this is done, the distortional buckling check in A.2.2 should be carried out using the results from the tests on the single panel frames.

A.2.4 Bending tests on beam end connectors**A.2.4.1 Purpose of the Test**

The purpose of the test is to determine the stiffness and the bending strength of the beam end connector. The structural behaviour of the upright and beam end connector assembly is critical to the behaviour of the complete structure. It is influenced by a large number of factors, particularly:

- a) the type of the upright;
- b) the thickness of the upright;
- c) the type of beam;
- d) the position of the beam on the connector;
- e) the method of connecting the beam to the connector;
- f) the bracket type;
- g) the properties of the materials used.

All combinations of these factors, which occur in the design of the structural system, shall be tested separately, unless it can be reasonably demonstrated that interpolation of results provides a conservative estimate of performance.

For each upright and connector assembly, a minimum of three nominally identical tests shall be made so that the results may be interpreted statistically in accordance with 13.3.3.

Alternatively a family of tests in which only one significant parameter is varied, such as the beam depth, upright thickness, etc, may be tested and treated as a single entity for the purposes of its statistical treatment as set out in 13.3.4. The family should consist of at least 10 tests.

In a large family of uprights, connectors and beams, certain combinations of upright, beam and connector may be omitted at the discretion of the designer, where the results can be reliably predicted by interpolation.

A.2.4.2 Test arrangements

The test arrangement shall be as follows.

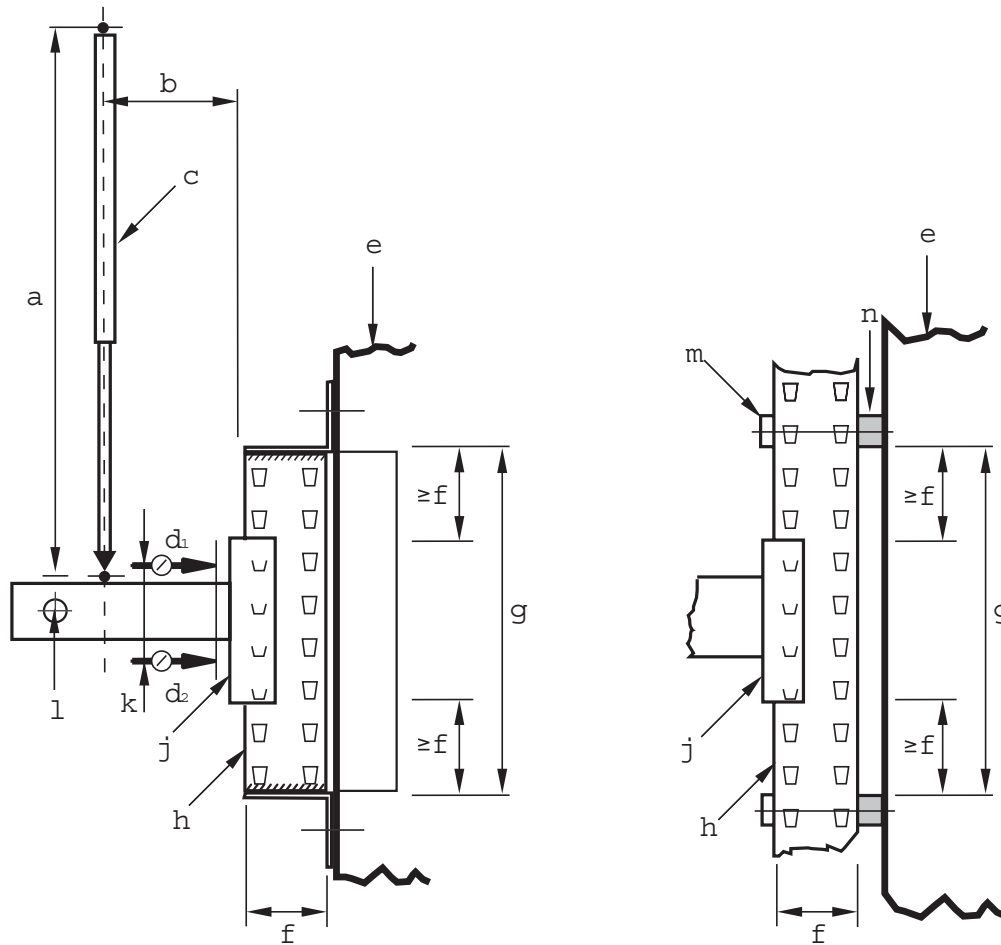
- a) A short length of upright shall be connected to a relatively very stiff testing frame at two points with a clear distance, h , between them where:

$$h_c \geq \text{beam connector length} + 2 \times \text{column face width.}$$

Over this distance there shall be no contact during the test between the upright and the testing frame. A short length of beam shall be connected to the upright by means of the connector to be tested, and beam locks shall be in place. Typical examples of suitable test arrangements are shown in Figure A.5.

- b) Sideways movement and twisting of the beam end shall be prevented by a lateral restraint which, however, allows the beam component to move freely in the direction of the load. Alternatively, a pair of connectors may be tested in parallel.
- c) The load shall be applied at 400 mm from the face of the upright by an actuator at least 750 mm long between pinned ends, as shown in Figure A.5.
- d) The rotation shall be measured by either of the following:
- 1) displacement transducers bearing onto a plate fixed to the beam close to the connector, but with enough clearance to allow for connector distortion (Gauges C_1 and C_2 in Figure A.5);
 - 2) an inclinometer connected to the beam close to the connector.

EN 15512:2009 (E)

**Key**

- a $\geq 750\text{mm}$
- b 400mm
- c load jack
- d measuring devices
- e test rig structure
- f upright face width
- g length of test specimen
- h Stub Column
- j beam end connector
- k spacing of measuring devices
- l lateral restraint allowing vertical deflection
- m clamp
- n spacer block

**Figure A.5. - Arrangement for beam end connector bending test
(alternative methods of supporting the upright are shown)**

A.2.4.3 Test Procedure

The tests described in Figure A.5 load the connector vertically downwards. Separate values for the stiffness and strength shall be obtained for both right and left hand connectors and the mean value used in design.

An initial load, F , equal to 10 % of the anticipated failure load may be applied to the assembly and then removed as a preload in order to bed in the components. The gauges should then be reset. The load, F , shall then be increased gradually until the maximum load is reached and the connection fails. The rotation of the connection shall be observed and, for each test, a plot of the moment M and the rotation θ shall be made, in which:

$$M = a F \quad (\text{A.7})$$

and

$$\theta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{d} \quad (\text{A.8})$$

where

a = lever arm for the load F ;

d = distance between the gauges C_1 and C_2 as shown in Figure A.5;

δ_1 = deflection measured by gauge C_1 ;

δ_2 = deflection measured by gauge C_2 .

A.2.4.4 Corrections to the observations

The yield stress and thickness of the materials of the beam, upright and connector shall be determined and the correction factor C_m calculated where

$$C_m = ((f_y / f_t)^\alpha (t / t_i)_{\max}) \text{ but } C_m \leq 1.0 \quad (\text{A.9})$$

where

f_t = the observed yield stress for the relevant component;

f_y = the nominal yield stress for the relevant component;

t_i = the observed thickness for the relevant component;

t = the design thickness for the relevant component;

$\alpha = 0$ when $f_y \geq f_t$;

$\alpha = 1,0$ when $f_y < f_t$.

Unless the beam fails or the beam yield strength is more than 1,25 times the guaranteed strength, the relevant component is either the beam end connector or the upright end of the two, the one that gives the largest correction to the test values irrespective of which component was observed to fail shall be used. If the beam fails, the correction relating to beam materials shall also be taken into account. Corrections of 15% and below may be ignored.

EN 15512:2009 (E)

In order to make corrections to the observations, the moment rotation (M_i - θ) curve for each test shall be separated into two components, one to represent the elastic deformations and the other the inelastic deformations of the connection.

The procedure shall be as follows.

- a) Plot the unadjusted test results as moment rotation curve (M_i - θ_i).
- b) Measure the slope of this curve, (k_0) at the origin.
- c) From the observed rotations, θ_i , subtract the elastic rotations M_i/k_0 to obtain the plastic rotations θ_p .
- d) Calculate the corrected moments M_n , where $M_n = M_i \times C$. Where $C = 0,15 + C_m$ and C is less than or equal to 1,0.
- e) Add back the elastic rotations, now M_n/k_0 , to give new rotations $\theta_n = \theta_p + M_n/k_0$.
- f) Plot the adjusted moment rotation curve (M_n - θ_n).

NOTE 1 The adjusted moment rotation curve has the same initial slope, k_0 as the original observed curve.

NOTE 2 An algebraic expression may be used to represent the plotted curve of the moment as a function of the rotation. This expression should not have more than 5 independent coefficients. This may be achieved by using a least squares curve fitting process.

A.2.4.5 Derivation of the Results and Procedure to define curves**A.2.4.5.1 General**

The failure moment, M_{ni} , shall be taken to be the maximum corrected moment, as indicated in Figure A.6.

For each upright and connector assembly, the characteristic failure moment M_k shall be calculated in accordance with 13.3.3. The design moment for the connection is then M_{Rd} , where:

$$M_{Rd} = \eta \frac{M_k}{\gamma_M} \quad (\text{A.10})$$

where

γ_M = partial safety factor for connections, defined in 7.5.

η = variable moment reduction factor selected by the designer ≤ 1

NOTE Any value of the design moment may be chosen less than or equal to the allowable maximum in order to optimise the possibly conflicting requirements for stiffness and strength. Thus, by reducing the design strength a greater design stiffness may be achieved.

A.2.4.5.2 Procedure to derive a bi-linear curve.

A bi-linear moment rotation relationship consists of a linear rotational stiffness together with a design strength chosen as described by Equation (A.10).

The rotational stiffness of the connector shall be obtained as the slope k_{ni} of a line through the origin which isolates equal areas between it and the experimental curve, below the design moment corrected for yield and thickness, M_{Rdc} , as shown in Figure A.6, provided that:

$$k_{ni} \leq 1,15 \frac{M_{Rd}}{\theta_{ki}} \quad (\text{A.11})$$

NOTE This provision is designed to limit the difference between the rotation at failure assumed in the model and that indicated by the test, to 15 % in cases where the connector behaves non-linearly.

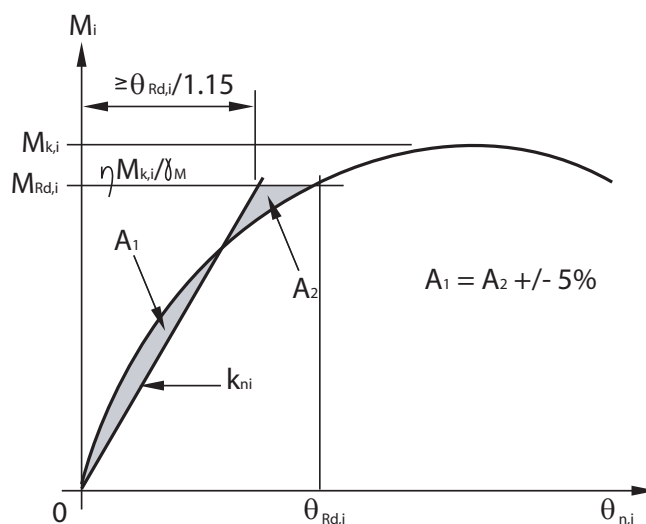


Figure A.6 — Derivation of connector stiffness

The design value, k_d , of the connector stiffness shall be taken as the average value, k_m where:

$$k_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ni} \quad (\text{A.12})$$

A.2.4.5.3 Procedure to derive a multi-linear curve

For a multi-linear moment-rotation curve, the first step is to derive an average curve from the results of the tests on the relevant beam and connector combination. Subject to A.2.4.3, the results for left and right hand connectors may be taken together.

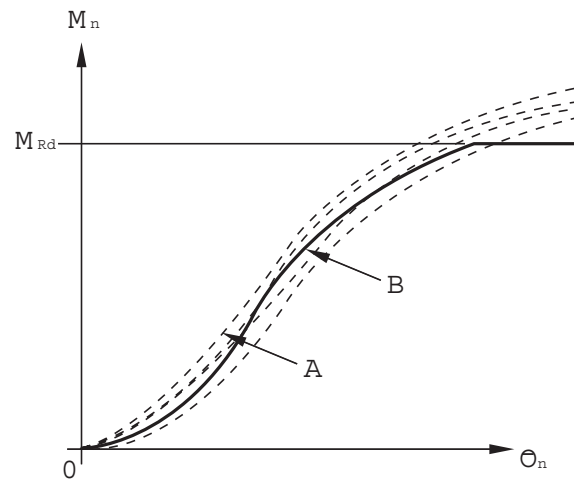
The average curve shall be obtained by plotting the mean value of the rotation at each moment increment up to the value of the design moment M_{Rd} using the moment rotation curves after correction in accordance with A.2.4.4.

This yields a single curve for the connection type, linking moment and rotation as shown by the full line in Figure A.7.

If the looseness is omitted from the calculation of the frame imperfections in 5.3.2, the looseness measured in accordance with A.2.5 shall be added to the average moment rotation curve, obtained as above, as a horizontal or near horizontal line.

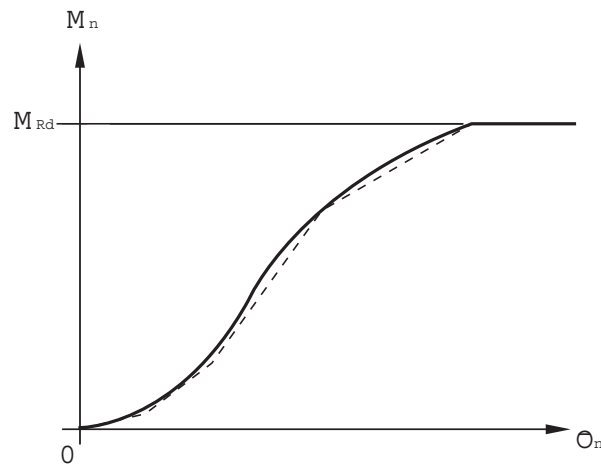
The multi-linear curve may be obtained by replacing the average curve by a series of straight lines which always lie below it, as illustrated by Figure A.8. It may be assumed that the moment-rotation characteristic is also valid for negative rotations.

EN 15512:2009 (E)

**Key**

A is a series of experimental curves (corrected)

B is the derived average curve

Figure A.7 — Derivation of the 'average' moment-rotation curve**Figure A.8 — Typical linearization of the average curve****A.2.5 Looseness tests on beam end connectors****A.2.5.1 Purpose of the test**

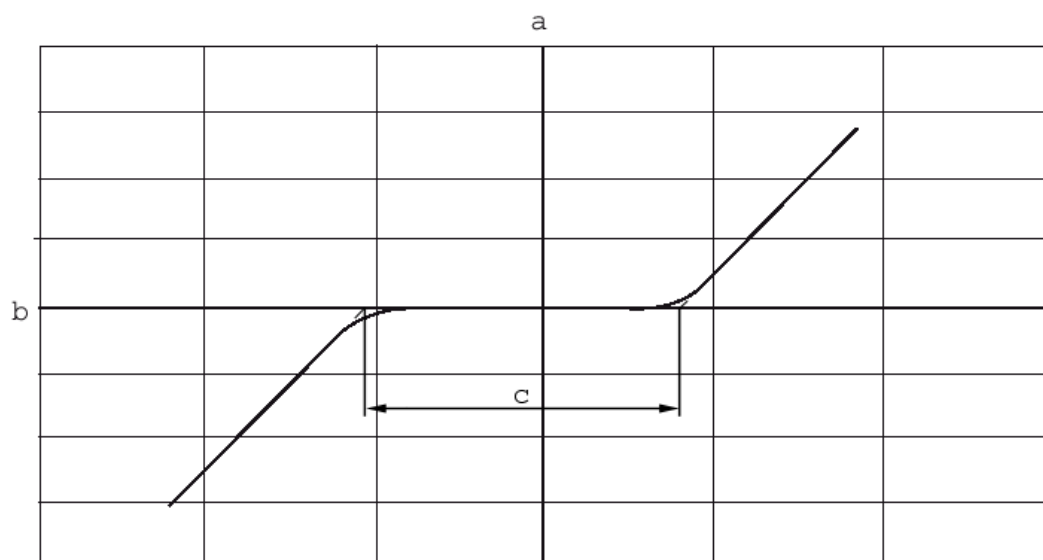
The purpose of the test is to obtain a value of the slackness and looseness of the connection, ϕ_i for use in the design calculations as required in 5.3.2.

A.2.5.2 Test arrangement

The same test arrangement as that used for the measurement of beam end connector strength and stiffness, and described in A.2.4 shall be used, except that the loading jack shall be double acting and capable of applying the load in the reverse direction or counterbalancing dead weights shall be used to obtain the same effect. The connector shall not disengage from the upright during the reversal process. Any measures chosen to ensure that this occurs shall not influence the looseness behaviour.

A.2.5.3 Test Method

The load, F , shall be slowly increased until the moment at the connector ($= 0,4 F$) reaches a value equal to at least 10 % of the design moment M_{Rd} defined in A.2.4. The deflections shall be observed. The load shall then be reduced and then reversed until a negative moment of at least 10 % of M_{Rd} is applied. The load shall then be removed. Figure A.9 shows a typical output from such a test.



Key

- a Moment in kNm
- b Rotation in radians
- c Twice the value of looseness

Figure A.9 — Typical test output

The looseness shall be measured by extrapolating the linear parts of the moment rotation curves towards the origin until they intersect the rotation axis, as shown in Figure A.9. The difference between the two intersection points obtained is equal to twice the looseness of the connector.

EN 15512:2009 (E)**A.2.5.4 Corrections to the observations**

Corrections need not be made to the observations to account for thickness or strength variations.

A.2.5.5 Derivation of results

The looseness shall be taken to be the mean value ϕ_i of at least three test results ϕ_{ij} .

A.2.6 Shear tests on beam end connectors and connector locks**A.2.6.1 Purpose of the test**

The purpose of the test is to measure the shear strength of the connector or of the connector lock. All combinations specified in A.2.4.1 shall be tested.

A.2.6.2 Test arrangement

The test arrangement comprises a short length of upright connected rigidly to a relatively infinitely stiff frame, with a length of beam section attached to it by means of the connection to be tested, as shown in Figure A.10. The load shall be applied to the connection by a pin-ended jack, placed a distance 'a' from the face of the upright and as close to it as possible. The free end of the beam shall be restrained by a pinned support at least 400 mm from the face of the upright, as shown in Figure A.10. This support shall be adjusted in the vertical direction so that the beam remains horizontal during the test.

To test the connector lock, the test piece shall be installed in the inverted position and, in addition to the loading shown in Figure A.10, a constant load of 500 N shall be applied to the top surface of the beam in a direction normal to the face of the upright, such as to pull the beam end connector away from the face of the upright.

NOTE The purpose of this force is to take away horizontal freedom of movement in the assembly and to thereby create the worst condition for the connector lock.

Anexo 2: Tensões mínimas do aço S355 da norma NP EN 10025-2:2007

NP
EN 10025-2
2007

p. 25 de 35

Quadro 7 – Características mecânicas à temperatura ambiente para produtos planos e longos de classes e qualidades de aço com valores de resistência ao choque.

| Designação | Tensão de cedência superior mínima R_{eH} ^a MPa ^b Espessura nominal mm | | | | | | Tensão de rotura R_m ^a MPa ^b Espessura nominal mm | | | | | | |
|----------------------------|---|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|--|----------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|
| | ≤ 16 | > 16 ≤ 40 | > 40 ≤ 63 | > 63 ≤ 80 | > 80 ≤ 100 | > 100 ≤ 150 | > 150 ≤ 200 | > 200 ≤ 250 | > 250 ≤ 400 ^c | > 250 ≤ 400 ^c | > 150 ≤ 250 | > 150 ≤ 250 | > 250 ≤ 400 ^c |
| Segundo EN 10027-1 e | 235 | 225 | 215 | 215 | 215 | 195 | 185 | 175 | - | 360 a 510 | 350 a 500 | 340 a 490 | - |
| CR 10260 | 235 | 225 | 215 | 215 | 215 | 195 | 185 | 175 | - | 360 a 510 | 350 a 500 | 340 a 490 | - |
| S235JR | 235 | 225 | 215 | 215 | 215 | 195 | 185 | 175 | 165 | 360 a 510 | 350 a 500 | 340 a 490 | 330 a 480 |
| S235J2 | 235 | 225 | 215 | 215 | 215 | 195 | 185 | 175 | 165 | 360 a 510 | 350 a 500 | 340 a 490 | 330 a 480 |
| S275JR | 275 | 265 | 255 | 245 | 235 | 225 | 215 | 205 | - | 430 a 580 | 400 a 540 | 380 a 540 | - |
| S275J2 | 275 | 265 | 255 | 245 | 235 | 225 | 215 | 205 | - | 430 a 580 | 400 a 540 | 380 a 540 | - |
| S355JR | 355 | 345 | 335 | 325 | 315 | 295 | 285 | 275 | - | 510 a 680 | 450 a 600 | 450 a 600 | - |
| S355J2 | 355 | 345 | 335 | 325 | 315 | 295 | 285 | 275 | - | 510 a 680 | 450 a 600 | 450 a 600 | - |
| S355K2 | 355 | 345 | 335 | 325 | 315 | 295 | 285 | 275 | 265 | 510 a 680 | 450 a 600 | 450 a 600 | 450 a 600 |
| S450J0 ^d | 450 | 430 | 410 | 390 | 380 | 380 | - | - | - | 550 a 720 | 530 a 700 | - | - |

(Continua)

^a Para chapas, bandas e bandas largas com larguras ≥ 600 mm aplica-se a direcção transversal (t) relativamente à direcção de laminação. Para todos os outros produtos os valores são aplicáveis para a direcção paralela (l) à direcção de laminação.

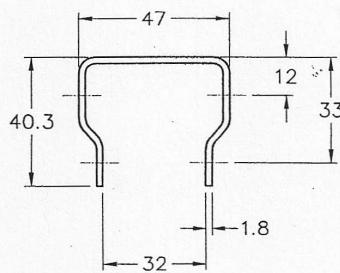
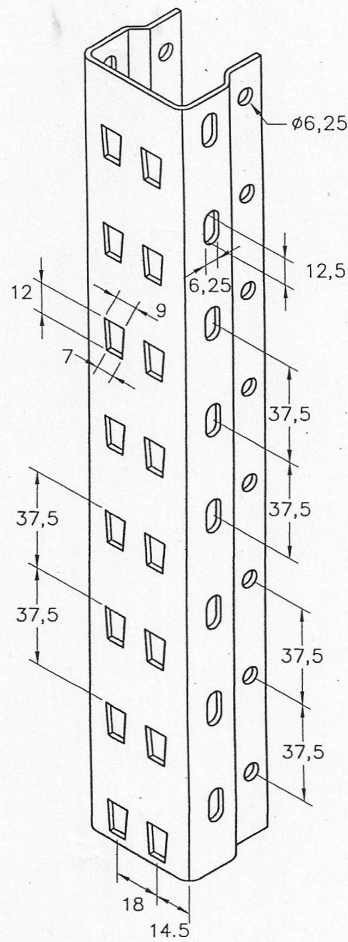
^b 1 MPa = 1 N/mm²

^c Valores aplicáveis a produtos planos

^d Apenas aplicável a produtos longos.

Anexo 3: Desenhos Técnicos KIND

Nota: Qualquer alteração ao desenho, informar Dep. Técnico



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------------|------------|--------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| Projectou | <i>E. Martins</i> | 2001/01/17 | Distribuição | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desenhou | <i>E. Santos</i> | 2008/12/04 | Te | Pl | Pr | L | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 01 | 01 | 02 | |
| Aprovou | <i>Felmo</i> | 2008/12/04 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Escala | Tol não espec. | Material | PILAR KD47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1:2.5 1:2 | DIQ 06-07 | DITe01-04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

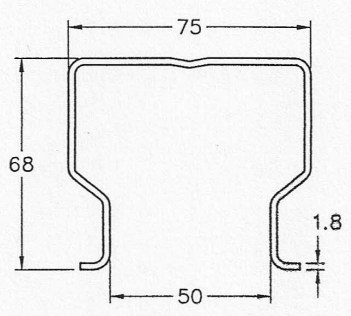
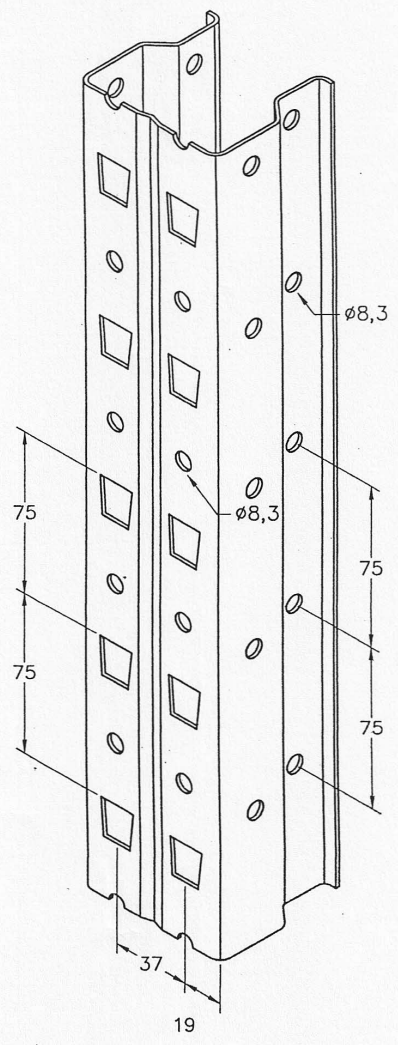
kindsystems

Des.Nº: KD_01101

CÓPIA N.º 1

Nota: Qualquer alteração ao desenho, Informar Dep. Técnico

| | | | |
|----|-----------------|------------|--|
| IN | ALTEROU | DATA | ALTERAÇÃO |
| 01 | <i>E. Matos</i> | 2006/11/02 | Acrescento de furação lateral $\phi 8,3$ |



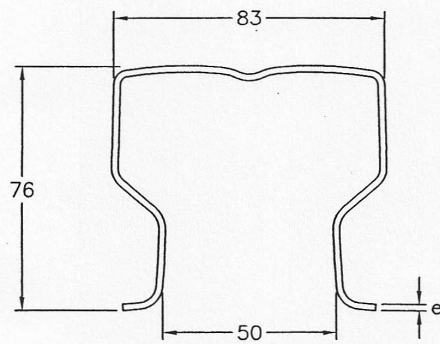
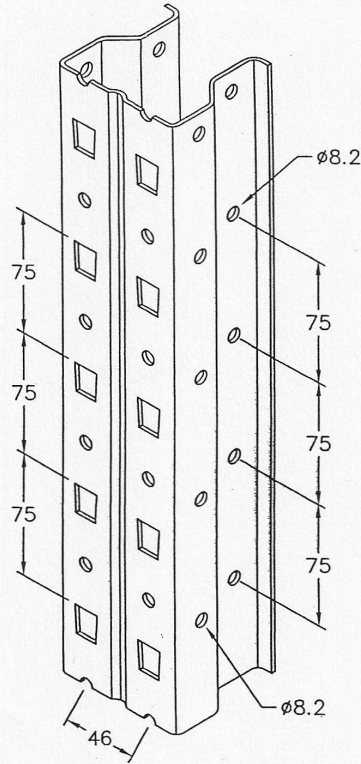
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|------------|--------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| Projectou | <i>E. Matos</i> | 1996/10/08 | Distribuição | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desenhou | <i>E. Matos</i> | 2006/11/02 | Te | Pl | Pr | L | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | | | | | | | |
| Aprovou | <i>R. Amaral</i> | 2006/11/02 | | | | | 01 | 02 | 03 | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 01 | 01 | 02 | | |
| | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |



| | | | | | |
|--------|----------------|----------|------------|-----------|----------|
| Escala | Tol não espec. | Material | PILAR KD75 | Des.Nº | KD_01131 |
| | DIQ 06-07 | | | CÓPIA N.º | |

mod. Te 06/3

Nota: Qualquer alteração ao desenho, informar Dep. Técnico



| | |
|---|-----|
| X | e |
| M | 1,8 |
| S | 2 |

X - Letra de identif. da espessura
e - Espessura do pilar

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------|------------|--------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| Projectou | <i>E. Matos</i> | 2002/07/15 | Distribuição | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desenhou | <i>E. Rodrigues</i> | 2011/01/25 | Te | Pl | Pr | L | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | | | | | | | |
| Aprovou | <i>J. Martins</i> | 2011/01/25 | | | | | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 01 | 01 | 02 | 01 | 01 | 02 | | |
| | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

kind®

| | | |
|--------|----------------|------------|
| Escala | Tol não espec. | Material |
| 1:4 | | DI Te01-04 |
| 1:2 | DIQ | |
| (A4) | 06-07 | |

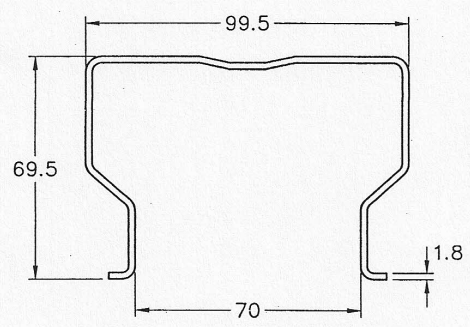
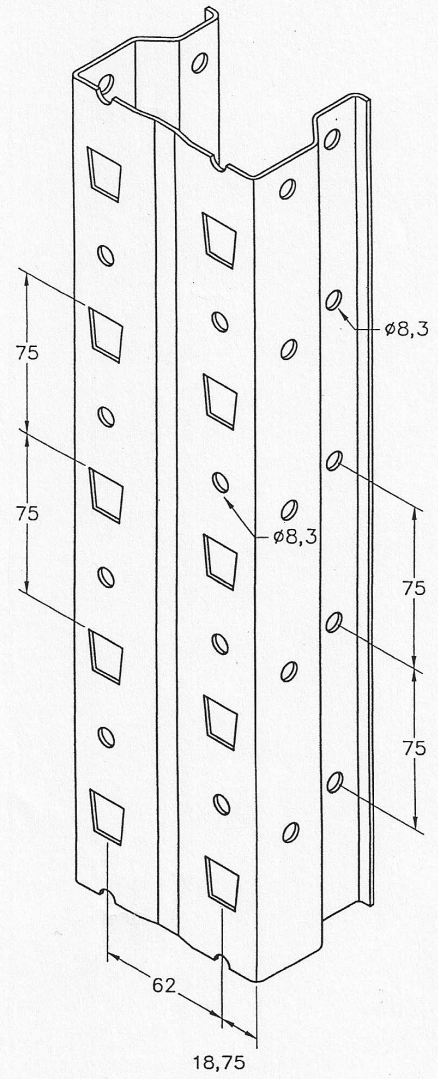
PILAR KD83 M/S

Des.N°. KD_01145

mod. Te 06/3

Nota: Qualquer alteração ao desenho, informar Dep. Técnico

| IN | ALTEROU | DATA | ALTERAÇÃO |
|----|-----------------|------------|---|
| 01 | <i>E. Matos</i> | 2006/11/02 | Acrescento de furação lateral $\varnothing 8,3$ |



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|------------|--------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Projectou | <i>E. Matos</i> | 1996/10/08 | Distribuição | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desenhou | <i>E. Matos</i> | 2006/11/02 | Te | Pl | Pr | L | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | | | | | | |
| Aprovou | <i>R. Amaral</i> | 2006/11/02 | | | | | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 01 | 01 | 02 |



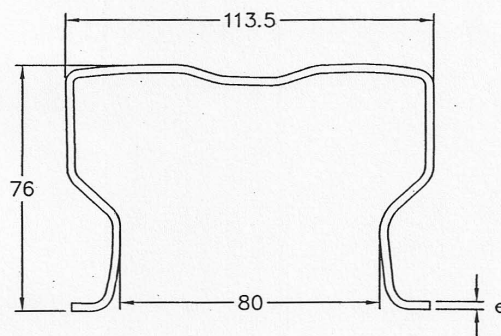
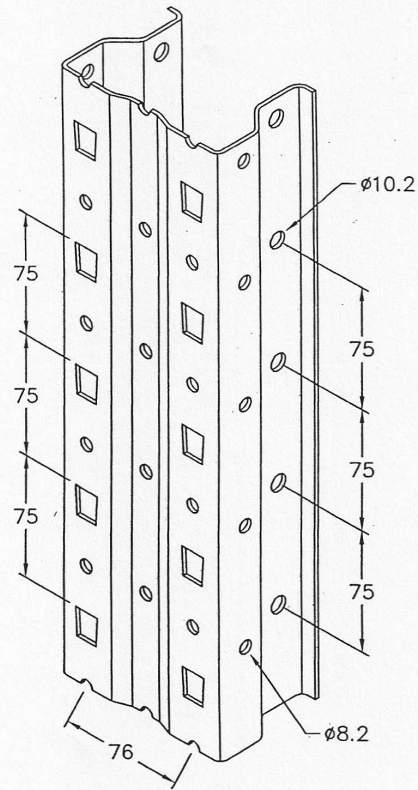
| | | | |
|--------|----------------|----------|-------------|
| Escala | Tol não espec. | Material | PILAR KD100 |
| | DIQ 06-07 | | |

Des.Nº. KD_01152

CÓPIA N.º

mod. Te 06/3

Nota: Qualquer alteração ao desenho, informar Dep. Técnico



| | |
|---|-----|
| X | e |
| L | 2 |
| S | 2,5 |

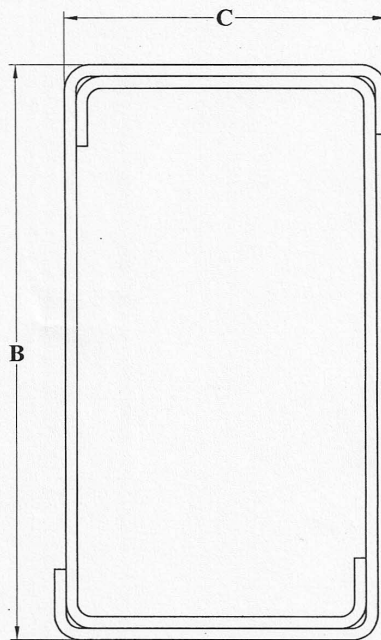
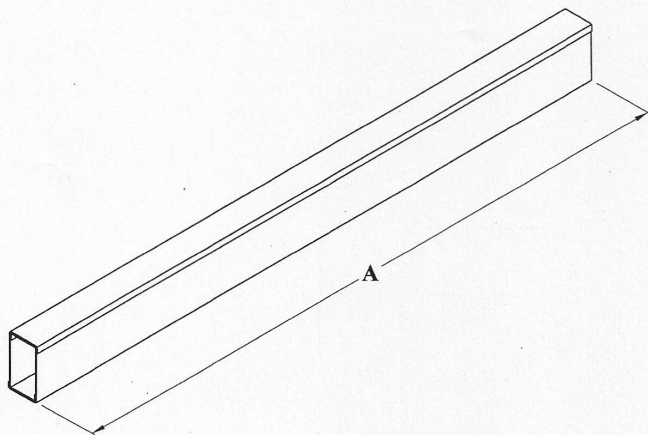
X - letra de identif. de espessura
e - espessura do arco

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|------------|-----------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------------------|----|----|
| Projectou | <i>E. Matos</i> | 2002/07/15 | Distribuição | | | | | | | | | | | | | | kind [®] | | |
| Desenhou | <i>B. Rodrigues</i> | 2011/01/25 | Te | Pl | Pr | L | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | | | | | | |
| Aprovou | <i>F. Martins</i> | 2011/01/25 | | | | | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | | 01 | 01 |
| Escala | Tol não espec. | Material | PILAR KD114 L/S | | | | | | | | | | | | | | Des.N° | | |
| 1:4 | | DITe01-04 | | | | | | | | | | | | | | | KD_01153 | | |
| 1:2 (A4) | DIQ 06-07 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

mod. Te 06/3

Nota: Qualquer alteração ao desenho, informar Dep. Técnico

| IN | ALTEROU | DATA | ALTERAÇÃO |
|----|------------------|------------|--------------------------------|
| 01 | <i>E. Mateos</i> | 2004/01/29 | Nova folha e cotas a controlar |
| 02 | <i>E. Mateos</i> | 2007/04/10 | Incluída a viga KD130/15 |



Nota: A = Comprimento pedido

| VIGA | B | C |
|--------|-------|------|
| 90 | 90 | 50 |
| 90/15 | 89.4 | 49.4 |
| 110 | 110 | 50 |
| 110/15 | 109.4 | 49.4 |
| 130 | 130 | 50 |
| 130/15 | 129.4 | 49.4 |
| 150 | 150 | 50 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|------------|--------------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| Projectou | <i>E. Mateos</i> | 1996/19/09 | Distribuição | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desenhou | <i>E. Mateos</i> | 2007/04/10 | Te | Pl | Pr | L | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | | | | | | | |
| Aprovou | <i>R. Amaral</i> | 2007/04/10 | 1 | 2 | 3 | | 01 | 02 | 03 | 01 | 02 | 03 | 01 | 01 | 02 | 01 | 01 | 02 | | |

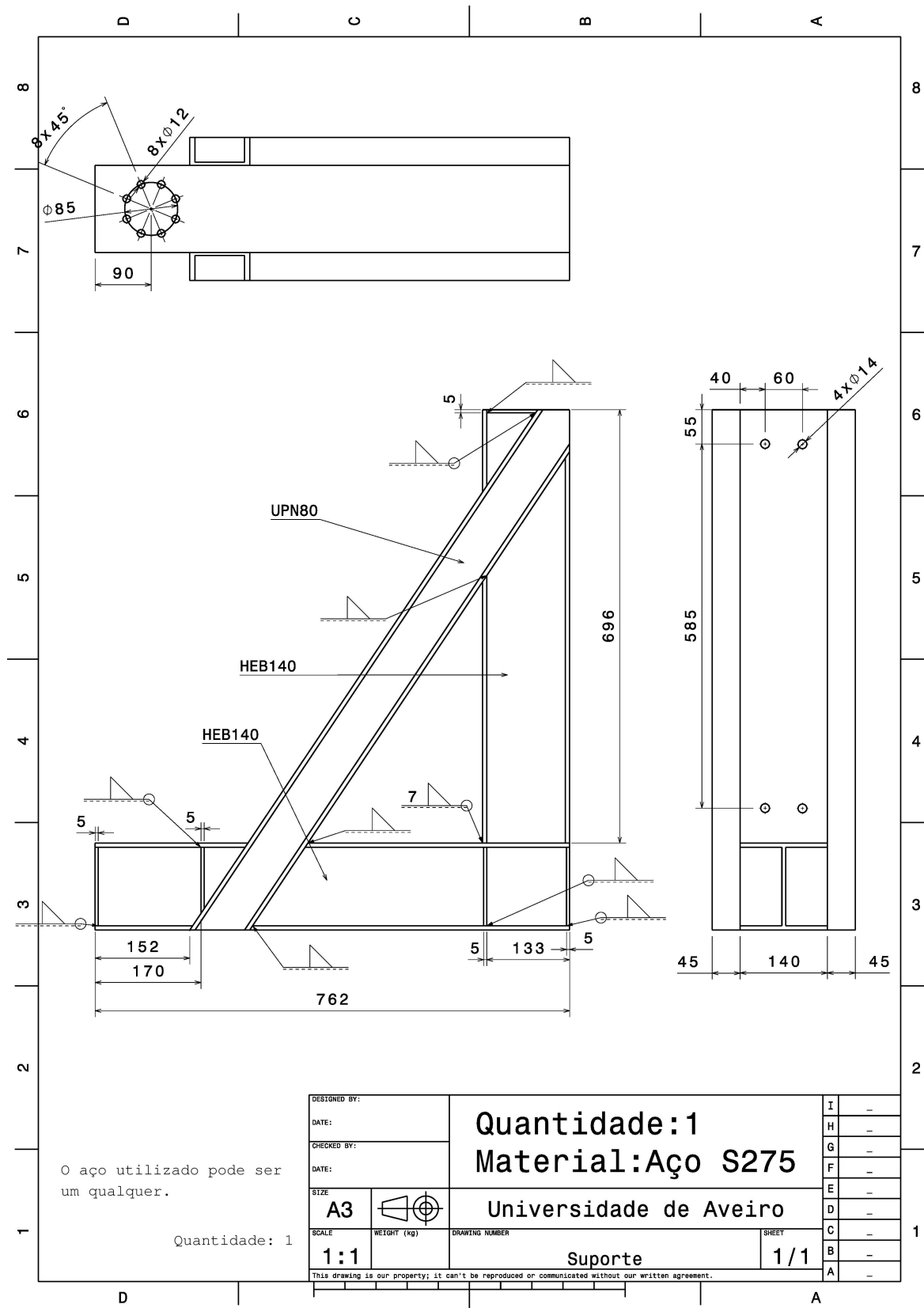
kindsystems

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Escala 1:1 1:10 | Tol não espec. DIQ 06-07 | Material --- | VIGAS KD | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Des.Nº. KD_02130

CÓPIA N.º /

Anexo 4: Suporte, sistema de rolamentos,veio de aperto e viga

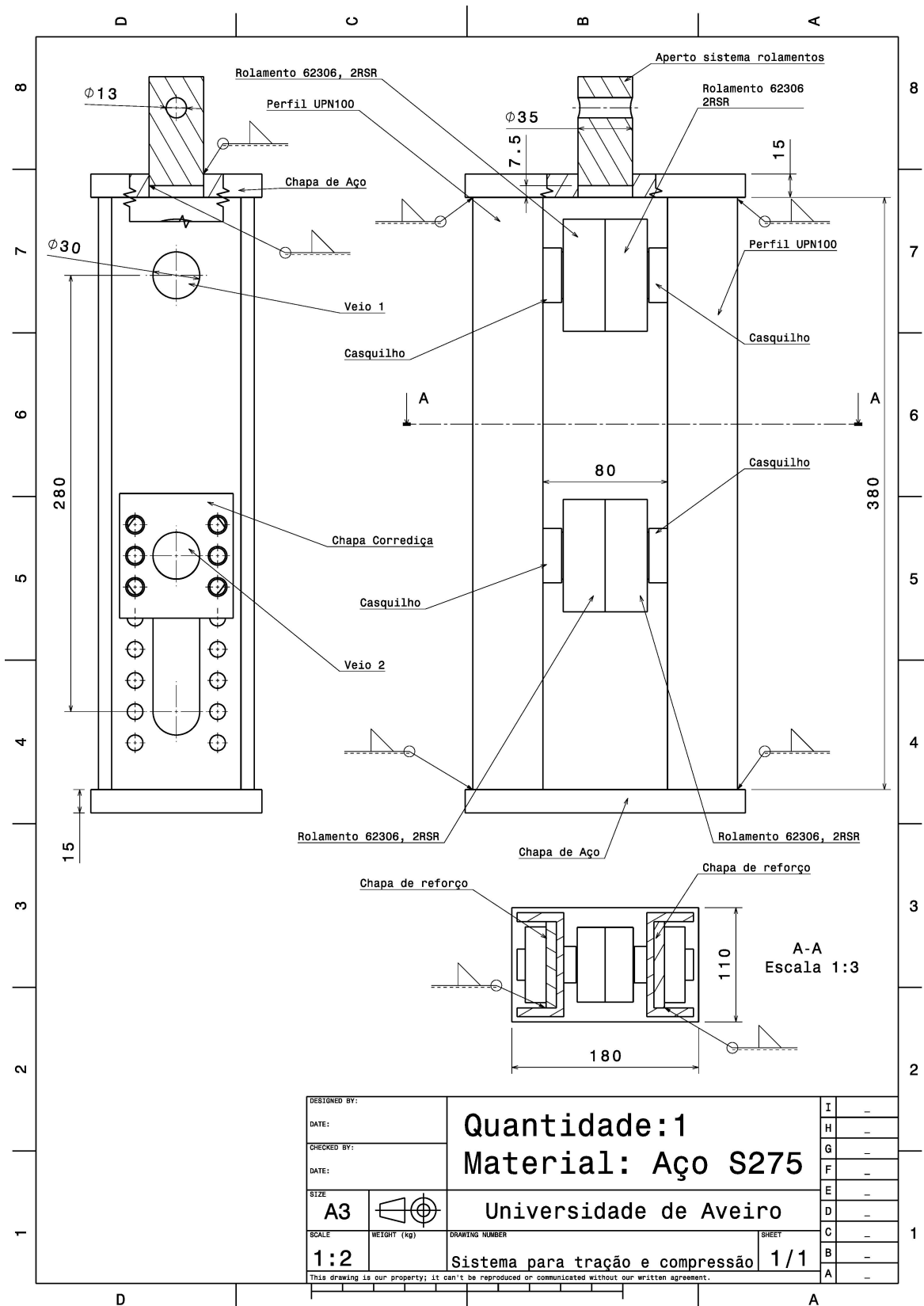


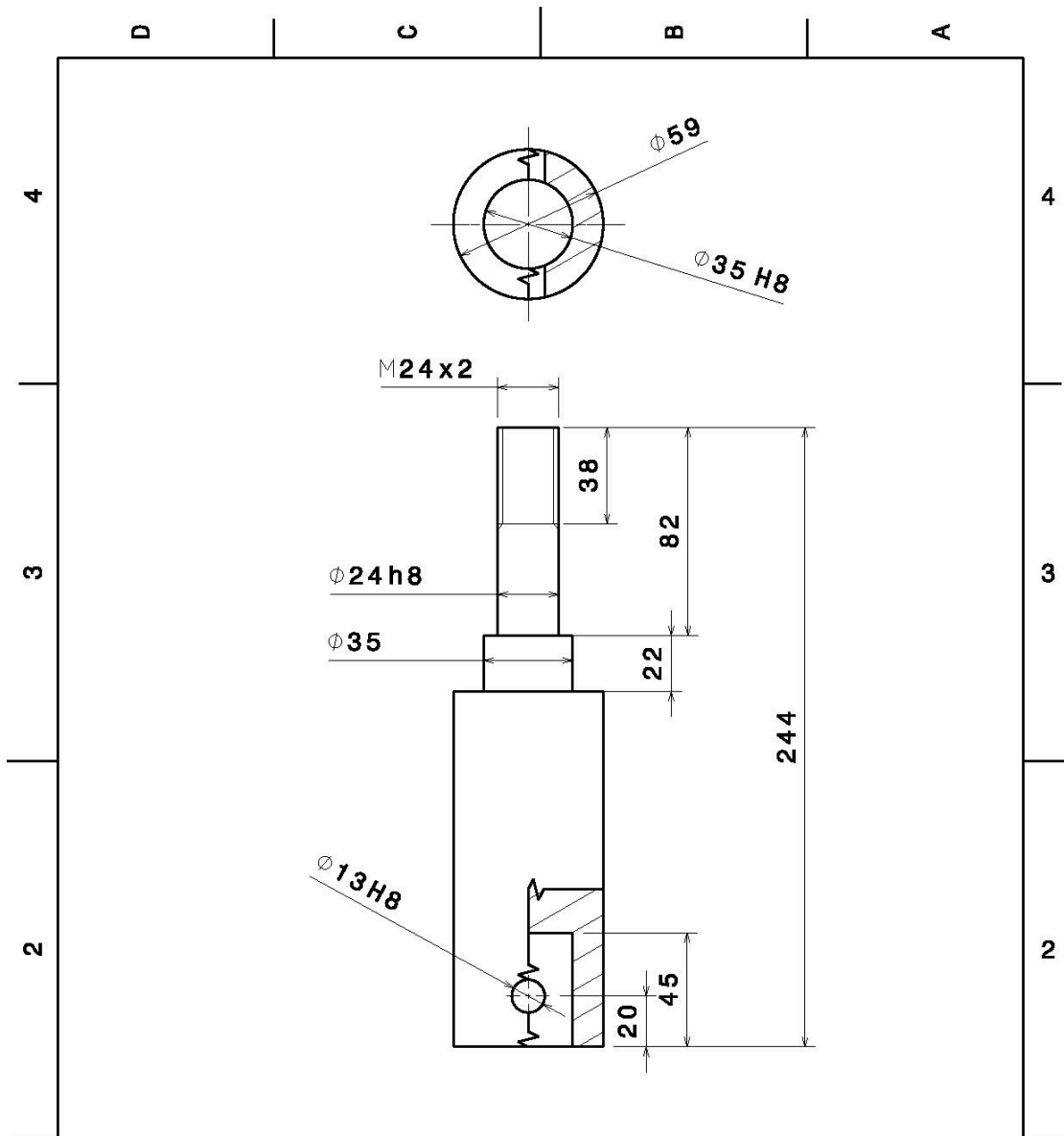
O aço utilizado pode ser um qualquer.

Quantidade: 1

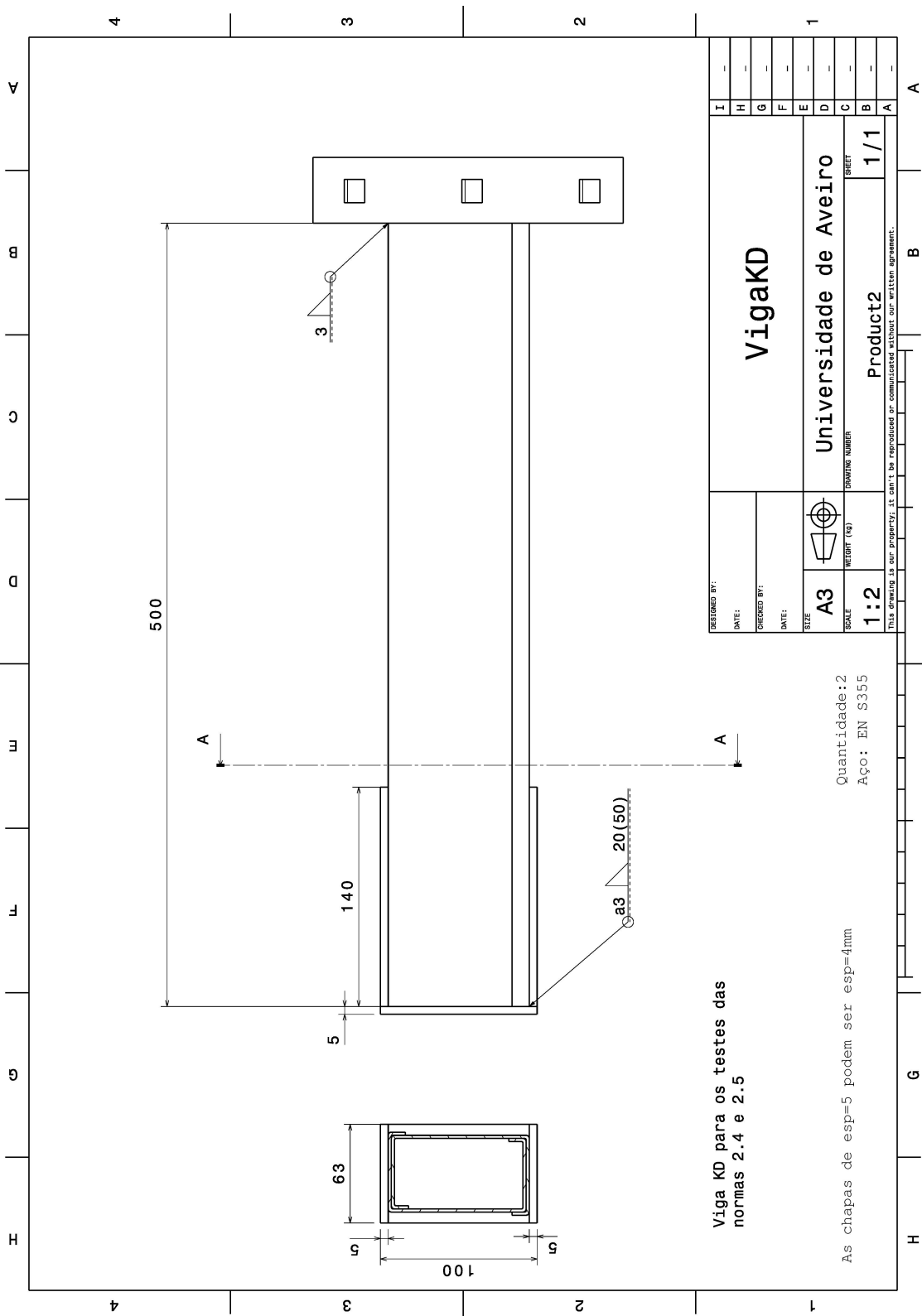
| | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----|---|
| DESIGNED BY: | Quantidade: 1 | | I | - |
| DATE: | Material: Aço S275 | | H | - |
| CHECKED BY: | Universidade de Aveiro | | G | - |
| DATE: | | | F | - |
| SIZE | A3 | | E | - |
| SCALE | 1:1 | DRAWING NUMBER | D | - |
| WEIGHT (kg) | | Suporte | C | - |
| | | | B | - |
| | | | A | - |
| SHEET | | | 1/1 | |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.





| | | | | | |
|---|-------------|---|-------|---|---|
| DESIGNED BY: | | Quantidade: 1 Material: Aço Din CK45 | I | - | |
| DATE: | | | H | - | |
| CHECKED BY: | | | G | - | |
| DATE: | | | F | - | |
| SIZE | | Universidade de Aveiro | E | - | |
| A4 | | | D | - | |
| SCALE | WEIGHT (kg) | DRAWING NUMBER | SHEET | 1 | |
| 1:2 | | veioapertomaquina | 1/1 | | |
| This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | | | A | - |



Viga KD para os testes das normas 2.4 e 2.5

Quantidade: 2
Aço: EN S355

As chapas de esp=5 podem ser esp=4mm

| | |
|-----------------|----------|
| DESIGNED BY: | |
| DATE: | |
| CHECKED BY: | |
| DATE: | |
| SIZE: | A3 |
| SCALE: | 1:2 |
| WEIGHT (kg): | |
| DRAWING NUMBER: | Product2 |
| BRIEF: | 1/1 |
| I | - |
| H | - |
| G | - |
| F | - |
| E | - |
| D | - |
| C | - |
| B | - |
| A | - |

VigaKD

1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

A B C D E F G H

4 3 2 1

Anexo 5: Macros Excel para cruzamento de dados

Módulo1 - 1

```

Sub dotmeas_kind()
' a macro presume que se arranca 1º com o dotmeas e depois, passado um tempo QUALQUER, com o UTM;
' é importante que no final do ensaio, se pare 1º o UTM e depois, passado o menor tempo possível,
' com o dotmeas;
' ou seja, o tempo total dotmeas > tempo total UTM;
' admitindo um tempo reação para parar o dotmeas no FINAL =tf;
tf = 1 'tf=1s

'delta t=0,3s nos 2 programas;
' Quando esta macro der erro "run-time error 13", em principio, deve ser devido ao ficheiro de dados
' ter erros de leitura do videoext - dados com *

' a macro está feita para uma folha com dados a começar na linha 3. A 1ª linha repetida dos dados UT
' M não interfere nos resultados.
' ***** vai à folhal *****
Sheets("Folhal").Select
' ult é a ultima célula com valor>-100, ou seja, é mesmo a ultima *****'2 são as células iniciais em
' branco ou não numericas
tc_ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-100") + 2 'ficheiro load, stroke
tdot_ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("F:F"), ">-100") + 2 'ficheiro dotmeas
npontos = WorksheetFunction.CountIf(Range("I3:TZ3"), "=#*") 'quantidade de pontos de medida x,y no
' ficheiro (o "*" significa "qualquer coisa")
coluna = 11 + npontos * 3 'coluna a partir da qual escreve os resultados

' apagar os resultados anteriores que poderiam estar na folhal
Columns(23).EntireColumn.Value = ""
Columns(24).EntireColumn.Value = ""
Columns(25).EntireColumn.Value = ""
For i = coluna + 8 To coluna + npontos * 2 + 8
    Columns(i).EntireColumn.Value = ""
Next

' If tc_ult > tdot_ult Then
'     Cells(2, 61) = "MUITO ESTRANHO!!!!!! O FICHEIRO UTM DEVIA SER MENOR QUE O dotmeas!!!!!! ESTE
'     PROGRAMA NÃO ESTÁ PREPARADO PARA ESTA SITUAÇÃO E VAI ENCERRAR!!!!!!"
'     GoTo 210
' End If ' isto pode acontecer e não existir erro!!!!!!

' calcula linhasf=nº de linhas a eliminar no final do fich. dotmeas tal que passe =~1s=tf
tdot = tdot_ult
Do While Cells(tdot_ult, 6) - Cells(tdot, 6) < tf
    tdot = tdot - 1
Loop
linhasf = tdot_ult - tdot - 1

' calcula o nº de linhas=tdot, a eliminar no inicio do ficheiro dotmeas tal que os tempos totais nos
' 2 fich. sejam +-iguais
tdot = 3 'contador do fich. dotmeas
Do While Cells(tdot_ult - linhasf, 6) * 1000 - Cells(tc_ult, 1) > Cells(tdot, 6) * 1000
    tdot = tdot + 1
Loop
ttotalcarga = Cells(tc_ult, 1) 'tempo total de duração do ensaio medido pelo software UTM
ttotaldot = (Cells(tdot_ult - linhasf, 6) - Cells(tdot, 6)) * 1000 ' tempo total do dotmeas ajustad
' o para ser =~UTM
ultimalinha = tdot_ult - tdot - linhasf + 3 'última linha nos dados trabalhados, colocados a partir
' da coluna = variável"coluna"

' ***** vai à folha2 *****
Sheets("Folha2").Select
Cells(1, 1) = "tc_ult="
Cells(2, 1) = "tdot_ult="
Cells(3, 1) = "tdot="
Cells(4, 1) = "ttotalcarga="
Cells(5, 1) = "ttotaldot="
Cells(6, 1) = "ultimalinha="
Cells(7, 1) = "npontos="
Cells(8, 1) = "linhasf="
Cells(1, 2) = tc_ult
Cells(2, 2) = tdot_ult
Cells(3, 2) = tdot
Cells(4, 2) = ttotalcarga
Cells(5, 2) = ttotaldot
Cells(6, 2) = ultimalinha
Cells(7, 2) = npontos
Cells(8, 2) = linhasf

```

```

Módulo1 - 2

' ***** vai à folha1 *****
Sheets("Folha1").Select

If ttotaldot < ttotalcarga - 1000 Then
    For i = 1 To 100 Step 10
        MsgBox "MUITO ESTRANHO! VERIFIQUE SE o tempo final (em segundos), É DEMASIADO GRANDE!", vbC
ritical, "Erro - Dotmeas Kind"
        End
    Next
End If

'Esta é a escala de tempo. São o TIME do dotmeas, sem as linhasf (+- 1segundo de tempo de reacção p
ara desligar) finais e sem as várias (calculadas) iniciais
Cells(1, coluna) = "Time"
For j = tdot To tdot_ult - linhasf
    Cells(j - tdot + 3, coluna) = (Cells(j, 6) - Cells(tdot, 6)) * 1000
Next

'copia os valores das coordenadas
For i = 1 To npontos * 3 Step 3
dot_pos = (2 * i + 1) / 3 'fórmula para transformar o i=1,4,7,10,... em 1,3,5,7,... para os pares x
,y se encostarem
Cells(1, coluna + 8 + dot_pos) = "dot " + Cells(tdot, 9 + i - 1)
Cells(2, coluna + 8 + dot_pos) = "x"
Cells(2, coluna + 8 + dot_pos + 1) = "y"
For j = tdot To tdot_ult - linhasf
    'Cells(j - tdot + 3, coluna + 8 + i - 1) = Cells(tdot, 9 + i - 1) 'nº do ponto
    Cells(j - tdot + 3, coluna + 8 + dot_pos) = Cells(j, 9 + i) 'coordenada x
    Cells(j - tdot + 3, coluna + 8 + dot_pos + 1) = Cells(j, 9 + i + 1) 'coordenada y
Next
Next

'copiar os x,y da última linha para facilitar
For i = 1 To npontos * 2
    Cells(3, 41 + i) = Cells(ultimalinha, 31 + i)
Next

'No cruzamento de dados, o primeiro (linha 3) e o último (linha tc_ult) valores são os mesmos
'Os valores restantes são obtidos por interpolação linear
Cells(1, coluna + 1) = "Load"
Cells(3, coluna + 1) = Cells(3, 2) 'load
Cells(ultimalinha, coluna + 1) = Cells(tc_ult, 2)
Cells(1, coluna + 2) = "Stroke"
Cells(3, coluna + 2) = Cells(3, 3) 'stroke
Cells(ultimalinha, coluna + 2) = Cells(tc_ult, 3)
tc = 3
For tdot = 4 To ultimalinha - 1
    Do While Cells(tdot, coluna) > Cells(tc, 1)
        tc = tc + 1
    Loop
    'cruza Load com a recta y=mx+b
    m = (Cells(tc - 1, 2) - Cells(tc, 2)) / (Cells(tc - 1, 1) - Cells(tc, 1))
    b = Cells(tc - 1, 2) - m * Cells(tc - 1, 1)
    Cells(tdot, coluna + 1) = m * Cells(tdot, coluna) + b
    'cruza stroke
    m = (Cells(tc - 1, 3) - Cells(tc, 3)) / (Cells(tc - 1, 1) - Cells(tc, 1))
    b = Cells(tc - 1, 3) - m * Cells(tc - 1, 1)
    Cells(tdot, coluna + 2) = m * Cells(tdot, coluna) + b
    tc = tc - 1
Next

' Mmax
Set re = Range(Cells(3, 26), Cells(tdot_ult - linhasf, 26))
Mmax = WorksheetFunction.Max(re)
Cells(19, 64) = Mmax

' d(Mmax)
i = 3
Do While Cells(i, 26) <> Mmax
    i = i + 1
Loop
i = i - 1
dMmax = Cells(i, 61)
Cells(19, 65) = dMmax

```

```
Módulo1 - 3

' 3% Mmax)
i = 3
Do While Cells(i, 26) < 0.5 * Mmax '0.03 para A.2.4; 0.5 para A.2.5
    i = i + 1
Loop
i = i - 1
M3 = Cells(i, 26)
d3 = Cells(i, 61)
Cells(17, 64) = M3
Cells(17, 65) = d3
i3 = i

' 10% Mmax)
Do While Cells(i, 26) < 0.95 * Mmax '0.1 para A.2.4; 0.95 para A.2.5
    i = i + 1
Loop
i = i - 1
M10 = Cells(i, 26)
d10 = Cells(i, 61)
Cells(18, 64) = M10
Cells(18, 65) = d10

'Declive e correlação entre os pontos 3% e 10% anteriores
Set r1 = Range(Cells(i3, 26), Cells(i, 26))
Set r2 = Range(Cells(i3, 61), Cells(i, 61))
corr = Abs(WorksheetFunction.Correl(r1, r2))
slop = WorksheetFunction.Slope(r1, r2)
intercet = WorksheetFunction.Intercept(r2, r1)
Cells(22, 64) = corr
Cells(22, 65) = slop
Cells(22, 66) = intercet

210 ' fim do programa por erro
End Sub
```


Módulo2 - 1

```
Sub final()
Sheets("Todos os graficos Mn-Tetan").Select

'lult é a ultima célula com valor>-1000, ou seja,
'é mesmo a ultima *****'2 são as células iniciais em branco ou não numericas

cult = WorksheetFunction.CountIf(Range("AB7:AM7"), ">-1000")
Cells(3, 35) = cult

c = 28
cf = 40
ll = 0
For i = 0 To cult - 2 Step 2
    l = 3
    Do While (Cells(l, c + i) < 1.1 * Cells(3, 26))
        Cells(l + ll, cf) = Cells(l, c + i)
        Cells(l + ll, cf + 1) = Cells(l, c + i + 1)
        l = l + 1
    Loop
    ll = ll + 1 - 3
    Cells(4, 35) = ll
Next
End Sub
```