Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

João de Jesus dos Santos

Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável

Rio de Janeiro
2008

João de Jesus dos Santos

Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Coorientador (es): Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Rio de Janeiro

2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237 Santos, João de Jesus dos.
Comportamento estrutural de elementos em aço inoxidável/ João de Jesus dos Santos . – 2008.
185 f. : il.

Orientador : Pedro C. Gonçalves da Silva Vellasco.
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
Bibliografia: f.146-148

1. Aço inoxidável. 2. Ligações metálicas. 3. Resistência a tração. 4. Análise estrutural. I. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 669.14

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

João de Jesus dos Santos

Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, ao PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: _____

Banca Examinadora: _____

_____
Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco, PhD – Presidente/Orientador
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

_____
Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, DSc – Co-Orientador
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

_____
Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade, PhD - Co-Orientador
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

_____
Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc
Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

_____
Prof. Eduardo de Miranda Batista, PhD
COPPE-UFRJ

Rio de Janeiro
2008

DEDICATÓRIA

A Deus, por ter iluminado meu caminho ao longo de todos estes anos, e a minha família, pelo carinho, paciência e incentivo ao meu trabalho.

.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro de tudo, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof. Doutor Pedro Vellasco, Prof. Doutor Luciano Lima e Prof. Doutor Sebastião Andrade por toda a ajuda, orientação e amizade fortalecida durante a realização deste trabalho.

Aos Laboratoristas Euclides (Vavá) e José do Laboratório de Materiais da PUC, pela ajuda e orientação sempre oportuna.

Ao Eng. Antonio Inácio por ter ajudado na realização de toda a parte experimental da dissertação no Laboratório de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aos Professores Doutores Vitor Oguri e Marcia Begalli pelo incentivo e indicação para o Mestrado.

Aos meus amigos de trabalho pela paciência com os meus estudos.

A ACESITA e USIMINAS pelo fornecimento do material para realização dos ensaios experimentais desenvolvidos neste trabalho.

A METALFENAS pelo empréstimo dos equipamentos para execução dos corpos-de-prova e dos espécimes utilizados nos ensaios das ligações aparafusadas.

Ao Professor Doutor Biondi que soube reconhecer a minha potencialidade e pela grande amizade que estará comigo para sempre.

Aos meus colegas de mestrado que compartilharam comigo os estudos e a amizade.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

“Criar o que não existe
ainda deve ser a pretensão
de todo sujeito que está vivo”
Paulo Freire

RESUMO

Santos, João de Jesus dos. **Comportamento estrutural de elementos em aço inoxidável**. Rio de Janeiro, 2008. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008

Atualmente, a utilização do aço inoxidável em elementos estruturais ainda é por muitos engenheiros e arquitetos, considerada uma solução extravagante para os problemas da engenharia. Todavia, mudanças de atitudes dentro da construção civil e uma transição global para um desenvolvimento sustentável e redução em impactos ambientais tem seguramente provocado um aumento no uso do aço inoxidável. A maioria das normas de projeto de aço inoxidável atuais ainda são baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Todavia, o aço inoxidável apresenta quatro curvas tensão versus deformação não-lineares sem patamar de escoamento e região de encruamento claramente definidos (tração e compressão, paralela e perpendicular a direção de laminação), modificando assim, seu o comportamento global. Na presente investigação foram utilizados o aço inoxidável austenítico 304, e o aço carbono USI 300, ambos com tensão de escoamento similares, mas com tensões últimas e ductilidades distintos. Em elementos estruturais submetidos a tensões normais de tração, usualmente a ruptura da seção líquida representa um dos estados limites últimos a serem verificados. Com o objetivo de se avaliar a resistência a tração de elementos estruturais aparafusados em aço inoxidável, este trabalho executou um programa experimental inovador envolvendo ligações aparafusadas defasadas sob tração. O programa experimental foi executado em peças de aço carbono e aço inoxidável de forma a comparar as principais semelhanças e diferenças entre estes dois tipos de aços estruturais. O programa experimental possibilitou que conclusões significativas no comportamento a tração destas ligações pudessem ser observadas. Dentre outras variáveis que controlam estes estados limites últimos foi verificada a influência significativa da espessura da placa de aplicação do carregamento, disposição, configuração e número de parafusos da ligação e propriedades do aço inoxidável como ductilidade e razão entre suas tensões de escoamento e de ruptura.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Ligações aparafusadas; Resistência a tração; Análise experimental; Dimensionamento estrutural.

ABSTRACT

Santos, João de Jesus dos. **Structural behaviour of stainless steel.elements.** Rio de Janeiro, 2008. 185p. MSc. Dissertation – Civil Engineering, State University of Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2008.

The use of stainless steel in structural engineering applications is still seen by many architects and engineers as an extravagant solution. However attitude changes in the construction market and the natural transition to a sustainable development reducing environment impacts have boosted the use of stainless steel structures. A substantial majority of stainless steel structural design codes is still based on carbon steel analogies. Despite this fact the stainless steel presents four non-linear tension versus strain curves (tension and compression, parallel and perpendicular to the rolling direction) without a defined yield plateau snf strain hardening zones substantially altering its global structural response. The present investigation adopted the austenitic stainless steel grade 304 and the carbon steel USI300, both with similar yield stresses but with different tension stresses and ductility capacities. Structural elements subjected to tension axial forces usually presents the net section rupture as one of its controlling ultimate limit states. The present study performed an innovative experimental programme to evaluate and investigate the tension capacity of staggered bolted members. The experiments were made with carbon and stainless steels to compare and access their similarities and differences in terms of structural performance. The experimental results enable the observation of significant conclusion concerning the tension response of the investigated bolted staggered members. The controlling ultimate limit states were significantly influenced by various parameters like: the loading plate thickness, the layout, configuration and number of bolts adopted in the joint, and stainless steel properties like ductility capacity and the ratio between the yield and ultimate stresses.

Keywords: Stainless steel; Bolted joints; Tension strength; Experimental analysis; Structural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Stonecutters Bridge - China (www.nickelinstitute.org, 2008).....24
Figura 1.2 – Curva tensão *versus* deformação - aço carbono e aço inoxidável 25
Figura 1.3 – Estudo de ligações - parafusos alternados (Cochrane, 1922).....27
Figura 2.1 – Ligação em aço inoxidável 30
Figura 2.2 – Estados limites últimos em chapa aparafusada 31
Figura 2.3 – Definição dos parâmetros L e t.....32
Figura 2.4 – Definição dos parâmetros e1, e2, s e p.....33
Figura 2.5 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003) 33
Figura 2.6 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003) 34
Figura 2.7 – Gráfico Tensão *versus* Deformação (Souza, 1974) 39
Figura 2.8 – Comportamento do aço carbono e inoxidável 40
Figura 2.9 – Curvas tensão *versus* deformação aço carbono e aço inoxidável 41
Figura 2.10 – Ensaios de corpos-de-prova 42
Figura 3.1 – Interação de parâmetros – Lxt – txd_o - Lxp 44
Figura 3.2 – Interação de parâmetros – Lxd_o– Lxs - txs 45
Figura 3.3 – Interação de parâmetros – $d_o$xs – sxp - txp 46
Figura 3.4 – Interação de parâmetros – $d_o$xp 47
Figura 3.5 – Esquema de ligação.....50
Figura 3.6 – Esquema experimental.....50
Figura 3.7 – Curva tensão *versus* deformação (Dieter, 1981).....51
Figura 3.8 – Tensão *versus* deformação - metal ou liga metálica (Souza, 1974).....55
Figura 3.9 – Curva teórica - limite de escoamento superior e inferior (Souza, 1974)57
Figura 3.10 – Tipos de curvas Tensão *versus* Deformação 58
Figura 3.11 – Curva de Ramberg-Osgood (Ramberg, W., & Osgood, W. R., 1943). 60
Figura 3.12 – Corpo-de-prova (t=3 mm).....61
Figura 3.13 – Corpo-de-prova (t=15mm).....61
Figura 3.14 – Esquema de retirada dos corpos-de-prova e o sentido da laminação.62
Figura 3.15 – Curva tensão *versus* deformação do aço carbono 63
Figura 3.16 – Curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável 64
Figura 3.17 – Evolução de tensões normais – placa sujeita a carregamento axial ...65
Figura 3.18 – Tensões limites do aço carbono.....66

Figura 3.19 – Tensões limites do aço inoxidável 66
Figura 4.1 – Detalhe do parafuso ASTM A325 M12 cl. 8.8 (Lima, 2003) 70
Figura 4.2 – Caminhos de ruptura possíveis para a ligação em estudo 70
Figura 4.3 – Esquema da ligação aparafusada alternada 71
Figura 4.4 – Detalhe do extensômetro 73
Figura 4.5 – Ponte de Wheatstone[6] 73
Figura 4.6 – Célula de carga 74
Figura 4.7 – Localização dos extensômetros da célula de carga 74
Figura 4.8 – Esquema da montagem da célula de carga (PUC-DEC, 1993) 75
Figura 4.9 – Histerese do sistema 76
Figura 4.10 – Fenômeno da "fluência" ou creep[7] 76
Figura 4.11 – Leitura da carga digital e analógica 77
Figura 4.12 – Posicionamento dos extensômetros - Ensaio E3_CARB_S50 78
Figura 4.13 – Cotas dos extensômetros em milímetros - Ensaio E3_CARB_S50 78
Figura 4.14 – Localização do transdutor linear variável diferencial 80
Figura 4.15 – Detalhe de localização do LVDT na máquina de tração 81
Figura 4.16 – Diferentes tipos de configuração de furação das placas 84
Figura 4.17 – Desenho geométrico do Ensaio E1_CARB_S50_a 85
Figura 4.18 – Ensaio E1_CARB_S50_a 85
Figura 4.19 – Ruptura do ensaio 1 - E1_CARB_S50_a 86
Figura 4.20 – Gráfico carga *versus* deformação - E1_CARB_S50_a 86
Figura 4.21 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E1_CARB_S50_a 87
Figura 4.22 – Desenho geométrico do ensaio E2_CARB_S70_a 88
Figura 4.23 – Seqüência de ruina do ensaio E2_CARB_S70_a 88
Figura 4.24 – Gráfico carga *versus* deformação - E2_CARB_S70_a 89
Figura 4.25 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E2_CARB_S70_a 89
Figura 4.26 – Desenho geométrico do ensaio E3_CARB_S50 90
Figura 4.27 – Seqüência de ruptura do ensaio E3_CARB_S50 91
Figura 4.28 – Gráfico carga *versus* deformação - E3_CARB_S50 91
Figura 4.29 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E3_CARB_S50 92
Figura 4.30 – Desenho geométrico do ensaio E4_CARB_S30 93
Figura 4.31 – Ruptura do ensaio E4_CARB_S30 93
Figura 4.32 – Gráfico carga *versus* deformação - E4_CARB_S30 94
Figura 4.33 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E4_CARB_S30 94

Figura 4.34 – Desenho geométrico do ensaio E5_INOX_S50 95
Figura 4.35 – Seqüência de ruptura do ensaio E5_INOX_S50 96
Figura 4.36 – Corte apresentado no parafuso do ensaio E5_INOX_S50.....96
Figura 4.37 – Gráfico carga *versus* deformação - E5_INOX_S50.....97
Figura 4.38 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E5_INOX_S50 97
Figura 4.39 – Desenho geométrico do ensaio E6_CARB_S30_P10.....98
Figura 4.40 – Seqüência de ruptura do ensaio E6_CARB_S30_P10.....99
Figura 4.41 –Furos da placa base do ensaio E6_CARB_S30_P10 99
Figura 4.42 – Gráfico carga *versus* deformação - E6_CARB_S30_P10 100
Figura 4.43 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E6_CARB_S30_P10.....100
Figura 4.44 – Desenho geométrico do ensaio E7_INOX_S30 102
Figura 4.45 – Seqüência de ruptura do ensaio E7_INOX_S30 102
Figura 4.46 – Gráfico carga *versus* deformação - E7_INOX_S30.....103
Figura 4.47 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E7_INOX_S30 103
Figura 4.48 – Desenho geométrico do ensaio E8_CARB_S50_P8.....104
Figura 4.49 – Seqüência de ruptura do ensaio E8_CARB_S50_P8.....105
Figura 4.50 – Gráfico carga *versus* deformação - E8_CARB_S50_P8 106
Figura 4.51 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E8_CARB_S50_P8.....106
Figura 4.52 – Desenho geométrico do ensaio E9_INOX_S23 107
Figura 4.53 – Seqüência de ruptura do ensaio E9_INOX_S23 108
Figura 4.54 – Gráfico carga *versus* deformação - E9_INOX_S23.....108
Figura 4.55 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E9_INOX_S23 109
Figura 5.1 – Análise comparativa - ensaios aço carbono e inoxidável.....112
Figura 5.2 – Disposição dos extensômetros no ensaio E2_CARB_S70_a 113
Figura 5.3 – Curvas carga *versus* deformação dos ensaios E1 e E2 (ext. 2 e 4)....114
Figura 5.4 – Curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios E1 e E2 115
Figura 5.5 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E1 e E2.....116
Figura 5.6 – Localização das seções nas chapas de ensaio 117
Figura 5.7 – Configurações de furação 118
Figura 5.8 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 (ext. 2) .119
Figura 5.9 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E1, E2, E3 e E4.....120
Figura 5.10 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E1, E2, E3 e E4 121

Figura 5.11 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E3 e E8 (ext. 7) 122
Figura 5.12 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E1, E3 e E8 123
Figura 5.13 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E1, E3 e E8.....124
Figura 5.14 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8 (ext. 4)125
Figura 5.15 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E3, E4, E6 e E8.....126
Figura 5.16 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E3, E4, E6 e E8 127
Figura 5.17 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E5, E7 e E9 128
Figura 5.18 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E5, E7 e E9 (ext. 4) 129
Figura 5.19 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E5, E7 e E9.....130
Figura 5.20 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E3, E4, E5, E7 e E9..131
Figura 5.21 – Modos de ruptura - Ensaios E3, E4, E5, E7 e E9.....132
Figura 5.22 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E5, E7 e E9.....133
Figura 5.23 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E3, E4, E5, E7 e E9.....134
Figura 5.24 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9..135
Figura 5.25 – Curvas carga *versus* deformação Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9.....136
Figura 5.26 – Modo de ruptura - Ensaios E5, E6, E7e E8.....136
Figura 5.27 – Modo de ruptura - Ensaio E9.....137
Figura 5.28 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E5, E6, E7, E8 e E9.....138
Figura 6.1 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E1_CARB_S50_a.....149
Figura 6.2 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E2_CARB_S70_a.....149
Figura 6.3 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E3_CARB_S50.....150
Figura 6.4 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E4_CARB_S30.....150
Figura 6.5 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E5_INOX_S50.....151
Figura 6.6 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E6_CARB_S30_P10 151
Figura 6.7 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E7_INOX_S30.....152
Figura 6.8 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E8_CARB_S50_P8 152
Figura 6.9 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E9_INOX_S23.....153
Figura 6.10 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1 e E2.....153
Figura 6.11 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1 e E2.....154

Figura 6.12 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1 e E2 154
Figura 6.13 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 155
Figura 6.14 –Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 155
Figura 6.15 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 156
Figura 6.16 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 156
Figura 6.17 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 157
Figura 6.18 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E3 e E8..... 157
Figura 6.19 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E3 e E8..... 158
Figura 6.20 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E3 e E8..... 158
Figura 6.21 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E3 e E8..... 159
Figura 6.22 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1 e E3 159
Figura 6.23 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8 160
Figura 6.24 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8 160
Figura 6.25 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8 161
Figura 6.26 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8 161
Figura 6.27 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4 e E6..... 162
Figura 6.28 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7e E9..... 162
Figura 6.29 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7 e E9..... 163
Figura 6.30 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7 e E9..... 163
Figura 6.31 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7 e E9..... 164
Figura 6.32 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7 e E9..... 164
Figura 6.33 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4 165
Figura 6.34 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4 165
Figura 6.35 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4 166
Figura 6.36 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4 166
Figura 6.37 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4 167
Figura 6.38 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9 167
Figura 6.39 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9 168
Figura 6.40 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9 168
Figura 6.41 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9 169
Figura 6.42 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E5, E6, E7 e E9 169

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores da significância dos parâmetros e interações do aço carbono 48
Tabela 3.2 – Valores da significância dos parâmetros e interações - aço inoxidável 48
Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros s e p para o aço carbono 49
Tabela 3.4 – Valores dos parâmetros s e p para o aço inoxidável 49
Tabela 3.5 – Tensões limites do aço carbono 63
Tabela 3.6 – Tensões limites do aço inoxidável 64
Tabela 4.1 – A primeira seqüência de ensaios em aço carbono 72
Tabela 4.2 – Configuração dos ensaios experimentais 83
Tabela 4.3 – Resumo dos ensaios experimentais 110
Tabela 5.1 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E1 e E2 115
Tabela 5.2 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E1, E2, E3 e E4 120
Tabela 5.3 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E1, E3 e E8 123
Tabela 5.4 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E3, E4, E6 e E8 126
Tabela 5.5 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E5, E7 e E9 130
Tabela 5.6 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E3, E4, E5, E7 e E9 ... 134
Tabela 5.7 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E5, E6, E7, E8 e E9 ... 137
Tabela 5.8 – Valores teóricos dos ensaios em aço carbono 139
Tabela 5.9 – Valores teóricos dos ensaios em aço inoxidável 139
Tabela 5.10 – Diferença percentual de $A_g x f_y$ e $A_{net} x f_u$ - ensaios em aço carbono ... 139
Tabela 5.11 – Diferença percentual de $A_g x f_y$ e $A_{net} x f_u$ - ensaios em aço inoxidável 140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACESITA	Fábrica de Aço - Inox do Brasil S/A
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A
METALFENAS	METALFENAS Industria da Construção Ltda.
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
EUROCODE	European Committee for Standardisation
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
DEC	Departamento de Engenharia Civil
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padronização
ASCE	American Society of Civil Engineers
NZS	Australian Standard
SEI	Structural Engineering Institute
ITUC	Instituto de Tecnologia da PUC
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung

LISTA DE SÍMBOLOS

A_b	área total da seção transversal da chapa base
A	área do parafuso
A_g	área bruta da seção transversal da chapa experimental
A_l	área instantânea da seção transversal do corpo-de-prova
A_{net}	área total líquida da seção transversal da chapa experimental
b_b	largura da chapa base
c	constante relativa ao valor de p
d	diâmetro do parafuso
d_0	diâmetro do furo
e	deformação convencional
E	módulo de elasticidade
e_1	distância paralela a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_2	distância perpendicular a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_3	distância perpendicular ao furo alongado do seu centro até a borda
e_4	distância paralela ao furo alongado do seu primeiro centro até a borda
F	força aplicada na chapa base
$F_{b.rd}$	resistência ao esmagamento
f	freqüência
f_u	tensão última da placa experimental
f_{up}	tensão última do parafuso
f_{ured}	tensão última da placa inoxidável reduzida
$F_{v,rd}$	resistência ao cisalhamento por cada plano de corte
f_y	tensão limite de escoamento da placa experimental
g	distância entre linhas de parafusos no sentido transversal ao da força aplicada
k	constante que depende do tipo de material
k_r	fator de redução para o aço inoxidável
k_1	fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
k_2	fator de correção em função da escariação do parafuso
L	largura da chapa experimental
L	largura da placa

L_0	comprimento inicial do corpo-de-prova
L_f	comprimento final do corpo-de-prova
m_1	índice não linear
n	número de parafusos
n_p	número de placas
$N_{pl,rd}$	força última de projeto de escoamento da seção bruta
$N_{u,rd}$	força última de projeto de ruptura da seção líquida
$N_{t,rd}$	força normal de tração de projeto da ligação
p	distancia entre linhas de parafusos no sentido perpendicular ao da força aplicada
p_1	distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
p_2	distância entre furos de mesma linha na direção transversal a força
$p_{1,0}$	primeira distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
$p_{1,i}$	distâncias seguidas entre furos, mesma linha e direção da força
P	força tração aplicada
r	número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u, dado por $2e_2$
s	distância entre linhas de parafusos no sentido paralelo ao da força aplicada
S	Desvio padrão
t	espessura da chapa experimental
t_b	espessura da chapa base
u	constante usada no cálculo da ligação inoxidável, cujo valor é igual a $2e_2$
w	valor diminuído da área transversal de ligações aparafusadas alternadas
$\overline{X}$	média das amostras
X_i	valor de uma amostra
α	constante que determina deformação além do escoamento
α_b	fator de correção em função da tenção última e posicionamento dos parafusos
α_d	fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
α_v	fator que depende da classe do aço
ε	deformação
$\varepsilon_{0,2}$	deformação a 0,2%

ε_1	deformação a 0,1%
ε_2	deformação a 1%
σ	tensão
σ_0	tensão elástica
$\sigma_{0,2}$	tensão a 0,2%
σ_r	tensão
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M1}	coeficiente de resistência
γ_{M2}	coeficiente de resistência
μ	média
υ	coeficiente de variação
dM	diferença das médias
SQ	desvio padrão ao quadrado
GL	grau de liberdade
QM	variância
ρ	significância

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO 23

INTRODUÇÃO 23

1.2 Motivação 26

1.2.1 Análise do parâmetro $s^2/4p$ 26

1.3 Objetivos 28

1.4 Escopo 28

2 LIGAÇÕES APARAFUSADAS 30

2.1 Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada 32

2.2 Dimensionamento de ligações aparafusadas segundo a norma EUROCODE 3 (EUROCODE 3, 2003) 34

2.2.1 Dimensionamento de Ligações com Aço Carbono 34

2.2.2 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável 37

2.2.3 Diferença entre o aço carbono e o aço inoxidável 38

3 ANÁLISE e avaliação TEÓRICa das ligações aparafusadas 43

3.1 Introdução 43

3.2 Avaliação das interações entre os parâmetros analisados 43

3.3 Justificativas para a configuração da ligação 49

3.4 Apresentação dos Ensaios de Tração 51

3.5 Determinação da tensão limite de escoamento 55

3.6 Corpos-de-prova das placas de aço carbono 61

3.7 Corpos-de-prova das placas de aço inoxidável 63

3.8 Critério de dimensionamento 64

3.9 Avaliação da ligação aparafusada para o aço carbono e aço inoxidável 65

4 Descrição dos Ensaios Experimentais 68

4.1 Introdução 68

4.2 Caracterização dos ensaios 68

4.3 Definição dos parâmetros geométricos 71

4.3.1 Preparação dos ensaios 72
4.3.2 Preparação do sistema de aplicação de carga 72
4.3.3 Preparação da célula de carga para a medida e aferição das cargas aplicadas 73
4.3.4 Instrumentação 78
4.3.5 Programação em Labview 81
4.3.6 Sistema de aquisição de dados 82
4.3.7 Dificuldades na preparação dos ensaios 82

4.4 Apresentação dos ensaios experimentais 83
4.4.1 Ensaio E1_CARB_S50_a 84
4.4.2 Ensaio E2_CARB_S70_a 87
4.4.3 Ensaio E3_CARB_S50 90
4.4.4 Ensaio E4_CARB_S30 92
4.4.5 Ensaio E5_INOX_S50 95
4.4.6 Ensaio E6_CARB_S30_P10 98
4.4.7 Ensaio E7_INOX_S30 101
4.4.8 Ensaio E8_CARB_S50_P8 104
4.4.9 Ensaio E9_INOX_S23 107
4.4.10 Quadro resumo dos ensaios 109

5 Avaliação dos Resultados Experimentais 111

5.1 Introdução 111

5.2 Análise dos Ensaios com Aço Carbono 112
5.2.1 Comparação dos ensaios E1_CARB_S50_a com E2_CARB_S70_a 113
5.2.2 Comparação dos ensaios E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a com E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30 117
5.2.3 Comparação dos ensaios E1_CARB_S50_a, E3_CARB_S50 e E8_CARB_S50_P8 121
5.2.4 Comparação dos ensaios E3_CARB_S50, E4_CARB_S30, E6_CARB_S30_P10 e E8_CARB_S50_P8 124

5.3 Ligações com aço inoxidável 127
5.3.1 Comparação dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 128

5.4 Comparação dos resultados do aço carbono com o aço inoxidável 131
5.4.1 Comparação dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 com E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30 131
5.4.2 Comparação dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 com E6_CARB_S50_P10 e E8_CARB_S30_P8 135

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 141

6.1 Introdução 141

6.2 Conclusões 143

6.3 Trabalhos futuros 145

Anexo A - CURVAS DOS ENSAIOS 149

A.1. ENSAIOS INDIVIDUAIS 149
A.1.1. CURVAS CARGA AXIAL MEDIDA *VERSUS* DEFORMAÇÃO 149

A.2. CURVAS COMPARATIVAS 153
A.2.1. CURVAS CARGA *VERSUS* DEFORMAÇÃO 153

APRESENTAÇÃO

INTRODUÇÃO

O aço inoxidável vem sendo utilizado em vários tipos de construções devido as suas características de alta resistência à corrosão, durabilidade, resistência ao fogo (Gardner L, 2006), facilidade de manutenção, aparência e estética, tendo o seu uso nos membros estruturais de uma construção limitado pelo seu alto custo. Como este custo está sendo reduzido devido entre outros motivos, as recentes descobertas na África do Sul, onde foram construídas torres de transmissão em aço inoxidável ferrítico da Linha 400, e instaladas na orla oceânica a 7 anos, não apresentando nenhum grau de corrosão. Seu custo hoje é estimado no dobro do custo do aço carbono (ACESITA - Fábrica de aço - Inox do Brasil S/A), corroborando para que o estudo mais profundo do comportamento mecânico do aço inoxidável sob os diversos aspectos seja cada vez mais relevante.

Considerando, também, a recente mudança na tendência do comportamento social em relação à produção em massa e o abundante consumismo, e devido a consciência ecológica e o desenvolvimento do que é natural, o conceito de durabilidade e sustentabilidade na construção ganhou muito mais importância. Neste contexto, o aço inoxidável é o material promissor para as construções que requeiram esta característica, conforme pode ser observado na Ponte de Stonecutters, localizada na cidade de Hong Kong na China (Figura 0.1 a), onde foram gastos 2000 toneladas de aço austenítico S322 em chapa de 20 a 30 mm de espessura e 2880 toneladas do aço austenítico S304 em barra de 50 mm de diâmetro, com previsão de durabilidade, ou seja, de dispensa de manutenção, por um período de 120 anos. Na Figura 0.1b observa-se a peça em aço inoxidável que envolve a estrutura de concreto dando lhe mais rigidez e na Figura 0.1c pode se ver a mesma peça pelo lado interno, mostrando as barras que garantirão a união com o concreto armado que será jogado no seu interior.

a)

b)

c)

Figura 0.1 – Stonecutters Bridge - China (www.nickelinstitute.org, 2008)

O desenvolvimento dos processos construtivos e as novas tendências na elaboração de projetos arquitetônicos têm trazido a necessidade por materiais que combinam versatilidade com durabilidade. Novamente, o aço inoxidável apresenta-se como um material promissor para as construções que requeiram estas características, principalmente no que tange a alta resistência a corrosão evitando a necessidade de manutenção em intervalos muito curtos.

O aço inoxidável é indicado, como elemento estrutural, em construções por múltiplas razões. A sua característica de alta ductilidade permite que seja usado em estruturas submetidas a carregamentos cíclicos, permitindo a dissipação da energia deste tipo de carregamento, através da redistribuição do carregamento antes da ruína da estrutura. Com uma redução do custo de manutenção em estruturas, e o

aumento da capacidade de absorção do impacto, através da dissipação de energia, aumenta-se a confiabilidade da estrutura.

As normas de projeto de aço inoxidável atuais (Eurocode 3, part 1.4, 2003) são em grande parte baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Todavia, o aço inoxidável, quando submetido a esforços axiais de tração e compressão, apresenta curvas tensão *versus* deformação não-lineares sem patamar de escoamento, diferentemente das curvas apresentadas pelo aço carbono, conforme Figura 0.2, mostrando assim, um comportamento global diferente, e conseqüentemente, modificando o comportamento global das estruturas que o utilizam.

Como o aço carbono, existe uma grande variedade de tipos de aço inoxidável devido a variação da composição química e o tratamento térmico aplicado na sua fabricação. Pode-se classificar em cinco principais grupos: Austenítico, Ferrítico, Martensítico, Duplex e Precipiation Hardening (Euro Inox, 2006).

Neste trabalho será usado o aço inoxidável austenítico S304[1], com uso mais freqüente na construção. Este grupo de ligas de aço inoxidável contém níquel em um intervalo 8-20%, com vários elementos adicionais para alcançar as desejadas propriedades, tais como: dobramento, soldagem e de boa resistência à corrosão As propriedades mecânicas podem ser aumentadas com a conformação à frio. As soldas deste grupo devem ser realizadas com o método correto, mas o baixo teor de carbono resulta em menos problemas do que os tipos Ferríticos e Martensíticos.

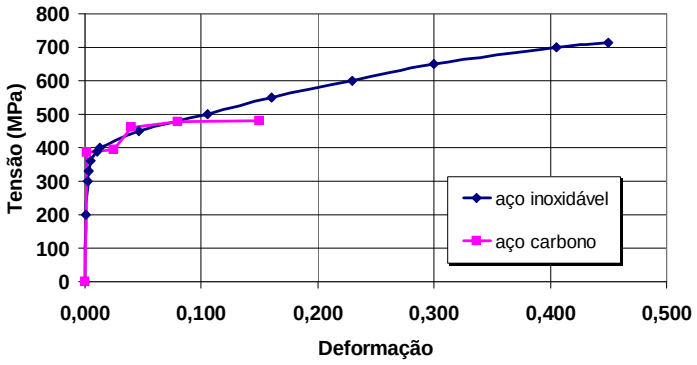


Figura 0.2 – Curva tensão *versus* deformação - aço carbono e aço inoxidável

[1] www.chasealloys.co.uk/steel/austenitic/, 2008

1.1 Motivação

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Buscando se entender o comportamento real de uma ligação aparafusada constituída em aço inoxidável, muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos (Burgan BA,2000), (Kouhi J, 2000), (Van Den Berg GJ, 2000), (Gardner L, 2004), (Graham Gedge, 2008) e (A. Bouchaïr, 2008). A principal motivação destes trabalhos de pesquisa tem caráter científico, com o objetivo de buscar a estrutura mais econômica resultante de um projeto mais coerente das ligações, bem como a melhoria dos processos de fabricação com respectiva redução dos custos de execução. Com o entendimento do comportamento real das ligações aparafusadas constituídas de aço inoxidável, torna-se possível o desenvolvimento de novas recomendações de projeto. Estes fatos motivaram a presente investigação, que envolve o estudo de uma ligação aparafusada mais econômica, ou seja, a ligação aparafusada com furos alternados muito utilizada em estruturas metálicas.

1.1.1 Análise do parâmetro $s^2/4p$

Um dos primeiros métodos teóricos que assumia o efeito de parafusos alternados, considerava que os efeitos da resistência na seção transversal e na sessão dos parafusos alternados eram iguais quando a máxima tensão era atingida (Crochane, 1908).

Confirmado através de testes experimentais, este efeito de cisalhamento, calculado através do método das tensões iguais, que considera outra regra em comum, ou seja, uso da igualdade da resistência quando a seção transversal bruta e a líquida de parafusos alternados são de mesma área, ou seja, método das áreas iguais (C. R. Young, 1922).

No mesmo ano, verifica-se que a regra de tensões iguais dá excessivas deduções de área de seção da peça e que testes feitos mostraram ser menos correta que a regra de áreas iguais (Edward Godfrey, 1922).

Uma proposta generalizada é apresentada para ser usada com segurança, simplificando as regras, através do método de deduções fracionadas (Cochrane, 1922). Uma simples fórmula ($s^2/4p$) poderia ser escrita para ambos os casos. Para

chegar a esta fórmula, fez-se a seguinte consideração, conforme apresentado na Figura 0.3. Quando o valor do parâmetro s (distância entre centro de furos na direção da aplicação da força) for zero a dedução seria o próprio furo, conforme fórmula $\left(\sqrt{p^2+s^2}-d_0\right)$. Já quando o parâmetro s cresce a dedução decresce muito rapidamente podendo assim considerar a seguinte formula: $w=d_0-cs^2$, onde w é o valor que deve ser retirado da área transversal.

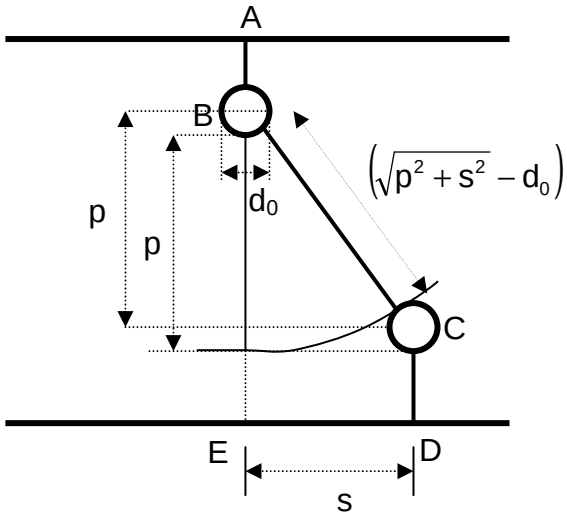


Figura 0.3 – Estudo de ligações - parafusos alternados (Cochrane, 1922)

Esta mesma fórmula é usada em diversas normas de projeto para determinar a dedução a ser feita quando se usam furos alternados na avaliação da área líquida.

Parece provável que esta regra tenha sido desenvolvida quando o aço usado era de resistência moderada sendo este único tipo de aço estrutural que estava em uso na maioria dos países. Não está claro até que ponto os efeitos do endurecimento do aço e o valor da relação de tensão limite de escoamento para resistência à tração podem ter sido já cobertos pela fórmula, pois seu caráter é empírico. Porém, há poucos testes disponíveis na literatura para se conferir este efeito.

O cálculo de uma ligação deste tipo constituída de aço inoxidável tem a mesma forma que a do aço carbono, embora o comportamento mecânico dos dois aços sejam inteiramente diferente, com curvas tensão *versus* deformação totalmente diferentes. Ressalta-se que o aço carbono tem patamar de escoamento e o aço inoxidável não possui patamar de escoamento, e por outro lado a razão entre os

valores da tensão limite de escoamento (f_y) e a tensão limite de ruptura (f_u) são muito diferentes nos dois materiais.

1.2 Objetivos

Como objetivo principal, este trabalho busca analisar, através da realização de vários ensaios experimentais, o comportamento estrutural de ligações aparafusadas alternadas, em placas formadas a frio de aço inoxidável e aço carbono, ambos com espessura de 3 mm. Esta investigação visa obter dados para recomendações que melhor quantifiquem a resistência à ruptura da seção líquida de ligações aparafusadas alternadas. Além de verificar a validade da utilização da mesma formulação para o dimensionamento de uma ligação aparafusada em aço carbono e a ligação similar em aço inoxidável, analisando a utilização do fator de redução k_r e a redução da tensão última (f_u) na análise do esmagamento. A realização destes ensaios fornece, também, informações fundamentais para a calibração de modelos numéricos de elementos finitos, pois levam em consideração as situações reais de execução das estruturas e as características específicas dos materiais utilizados no país.

1.3 Escopo

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo do estado da arte para as ligações aparafusadas e especificou os principais objetivos deste trabalho, além de apresentar uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo desta dissertação, conforme pode ser observado a seguir.

No capítulo dois são apresentadas algumas considerações sobre ligações aparafusadas e uma descrição detalhada do dimensionamento das ligações segundo recomendações do Eurocode 3 (EUROCODE 3, 2003). Ainda neste mesmo capítulo, são apresentados alguns dos principais trabalhos que avaliam a influência do esforço axial nas ligações e, conseqüentemente, seu comportamento global.

No capítulo três são descritos os ensaios experimentais realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. A caracterização mecânica e geométrica das peças utilizadas nos ensaios também é apresentada neste capítulo.

No capítulo quatro são apresentados os resultados experimentais obtidos para as ligações aparafusadas através de tabelas e gráficos com as diversas componentes presentes na ligação em estudo.

O capítulo cinco consiste da análise comparativa dos resultados experimentais de ligações aparafusadas utilizando a mesma metodologia mencionada acima.

Finalmente, no capítulo seis, são tecidas as considerações finais com as principais conclusões obtidas além de algumas propostas para trabalhos futuros.

2 LIGAÇÕES APARAFUSADAS

As ligações são importantes elementos estruturais cuja função é transferir carregamentos de um elemento para outro, e que, no caso de ser mal executada ou calculada, pode levar ao colapso de uma estrutura, pois a ligação e o perfil são os pontos críticos de uma obra em estrutura metálica. A Figura 2.1 apresenta um exemplo típico de ligação aparafusada em aço inoxidável realizada no Aeroporto Sá Carneiro, na cidade do Porto, em Portugal.

Figura 2.1 – Ligação em aço inoxidável

O sistema de ligação aparafusada, além de possibilitar a obtenção de benefícios econômicos de execução, apresenta vantagens, como a de dispensa de soldas no local de trabalho e escoramentos, redução do tempo de montagem e de mão-de-obra especializada, redução considerável do consumo de energia elétrica, etc. Estas foram as principais motivações para a avaliação de um sistema de ligação aparafusada com parafusos alternados, fabricado com um material inovador como o aço inoxidável cujo comportamento estrutural será discutido posteriormente.

As ligações aparafusadas, diferentemente das ligações soldadas, tendem a diminuir a resistência à tração das seções, já que, para a instalação de parafusos, torna-se necessário que se façam furos nos elementos a serem unidos, diminuindo a seção transversal resistente destes elementos. Devido à existência destes furos, várias formas ou modos de ruptura podem ocorrer. A Figura 2.2 ilustra, cinco

possíveis modos de ruptura cujo comportamento estrutural e será abordado mais adiante.

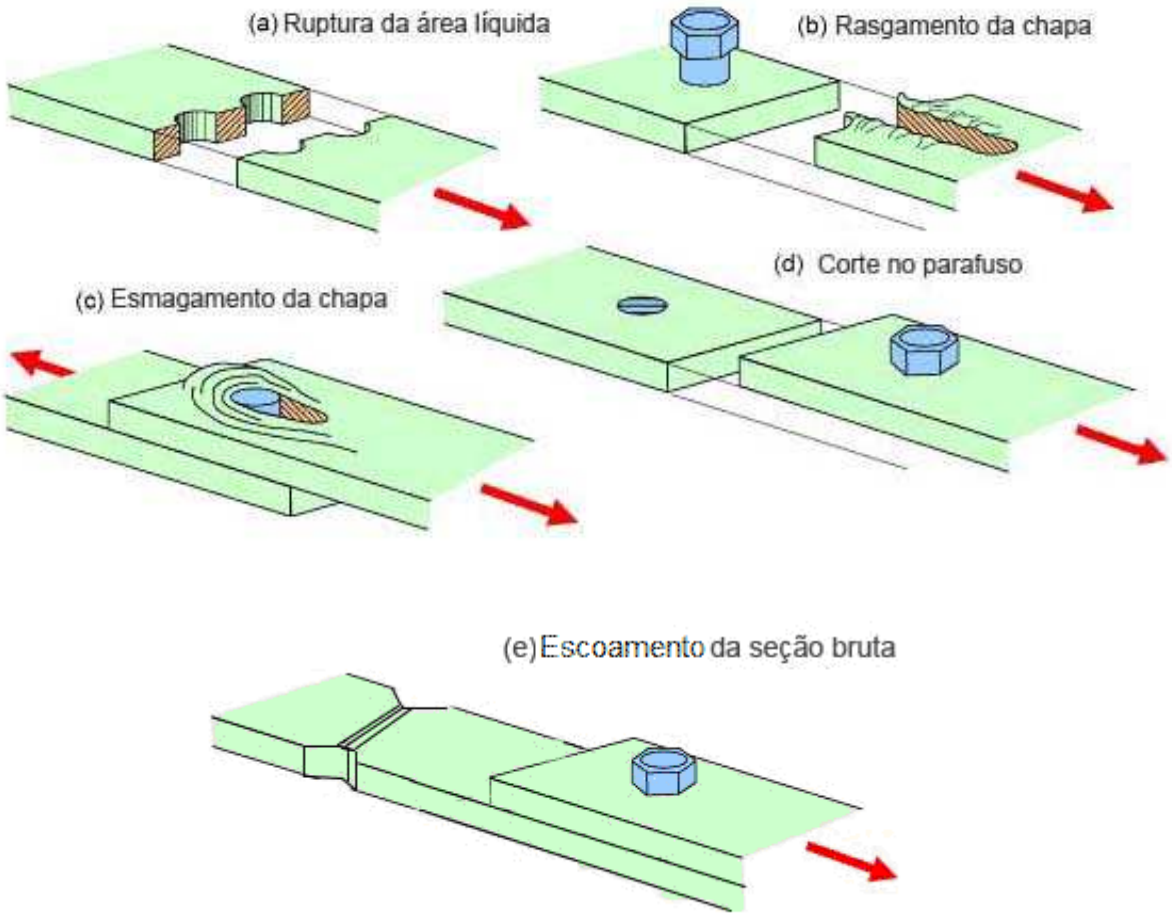


Figura 2.2 – Estados limites últimos em chapa aparafusada[2]

No caso (a) representado na Figura 2.2, ocorre uma ruptura da seção transversal líquida da peça, ou seja, da seção que resulta da subtração da área de furos daquela de sua seção bruta. Quanto mais furos estiverem presentes na seção bruta da peça, menor será a sua seção líquida e, por conseguinte, sua resistência, o que pode levar à ruptura. No caso (b), ocorre uma ruptura por rasgamento da peça devido à presença do parafuso mais resistente, provocando tensões cisalhantes no metal-base da peça. A ruptura só ocorre se, no metal-base, a distância disponível resistente ao rasgamento for insuficiente. Mais a frente, serão mostrados os parâmetros da ligação aparafusada e as suas limitações. No caso (c), ocorre uma ruptura por esmagamento da peça, também devido à presença do parafuso. Este

[2] www.chasqueweb.ufrgs.br

esmagamento ocorre devido às altas tensões de compressão que se processam na superfície de contato do parafuso com o metal-base da chapa. No caso (d) ocorre a ruptura do parafuso por cisalhamento, caracterizada quando um número insuficiente de parafusos é adotado. Finalmente, no caso (e) ocorre a plastificação da seção bruta devido à alta razão entre a tensão limite de escoamento e a tensão limite de ruptura.

Este trabalho trata, especificamente, dos modos de falha onde ocorre a ruptura da seção líquida (Figura 2.2a) em ligações aparafusadas de chapas formadas a frio. Portanto, a seguir, serão apresentados os parâmetros que governam os respectivos estados limites últimos da ligação e os respectivos limites de geometria com as prescrições para o dimensionamento destas ligações aparafusadas, presentes nas principais normas técnicas de estruturas de aço vigentes em diversos países e continentes.

2.1 Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada

Na Figura 2.3 são apresentados os parâmetros geométricos t e L onde representam respectivamente, a espessura e a largura da chapa.

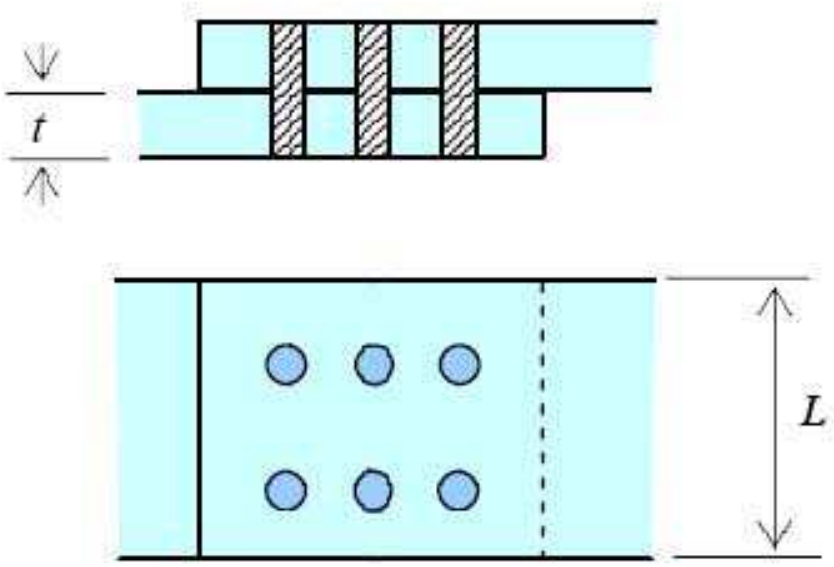


Figura 2.3 – Definição dos parâmetros L e t[3]

[3] www.chasqueweb.ufrgs.br

Na Figura 2.4 são apresentados os parâmetros geométricos s e p e as distâncias à borda e_1 e e_2.

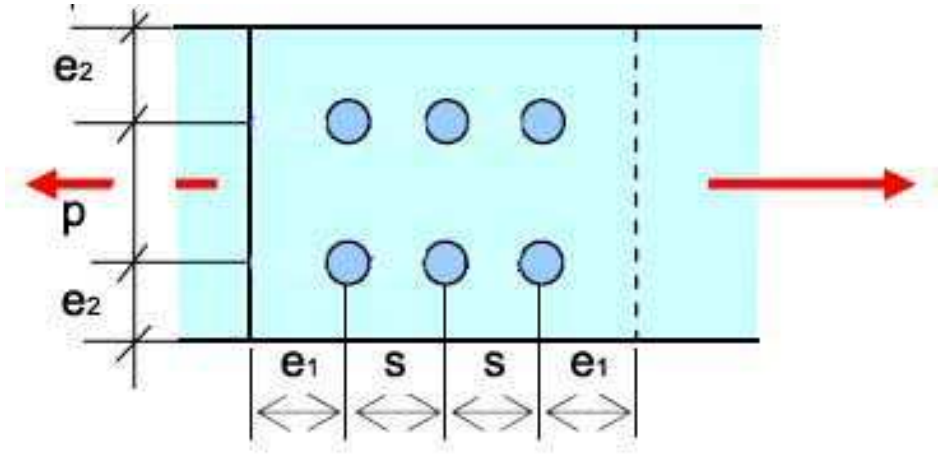


Figura 2.4 – Definição dos parâmetros e1, e2, s e p[4]

E na Figura 2.5 e na Figura 2.6 apresentam-se os limites dos parâmetros geométricos utilizados pela Norma Européia EUROCODE 3 Part 1-8 (EUROCODE 3, 2003).

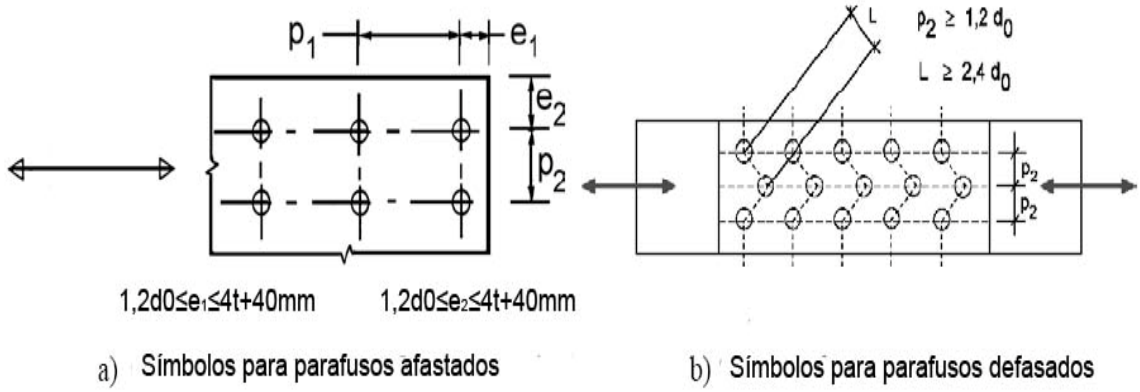


Figura 2.5 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003)

[4] www.chasqueweb.ufrgs.br

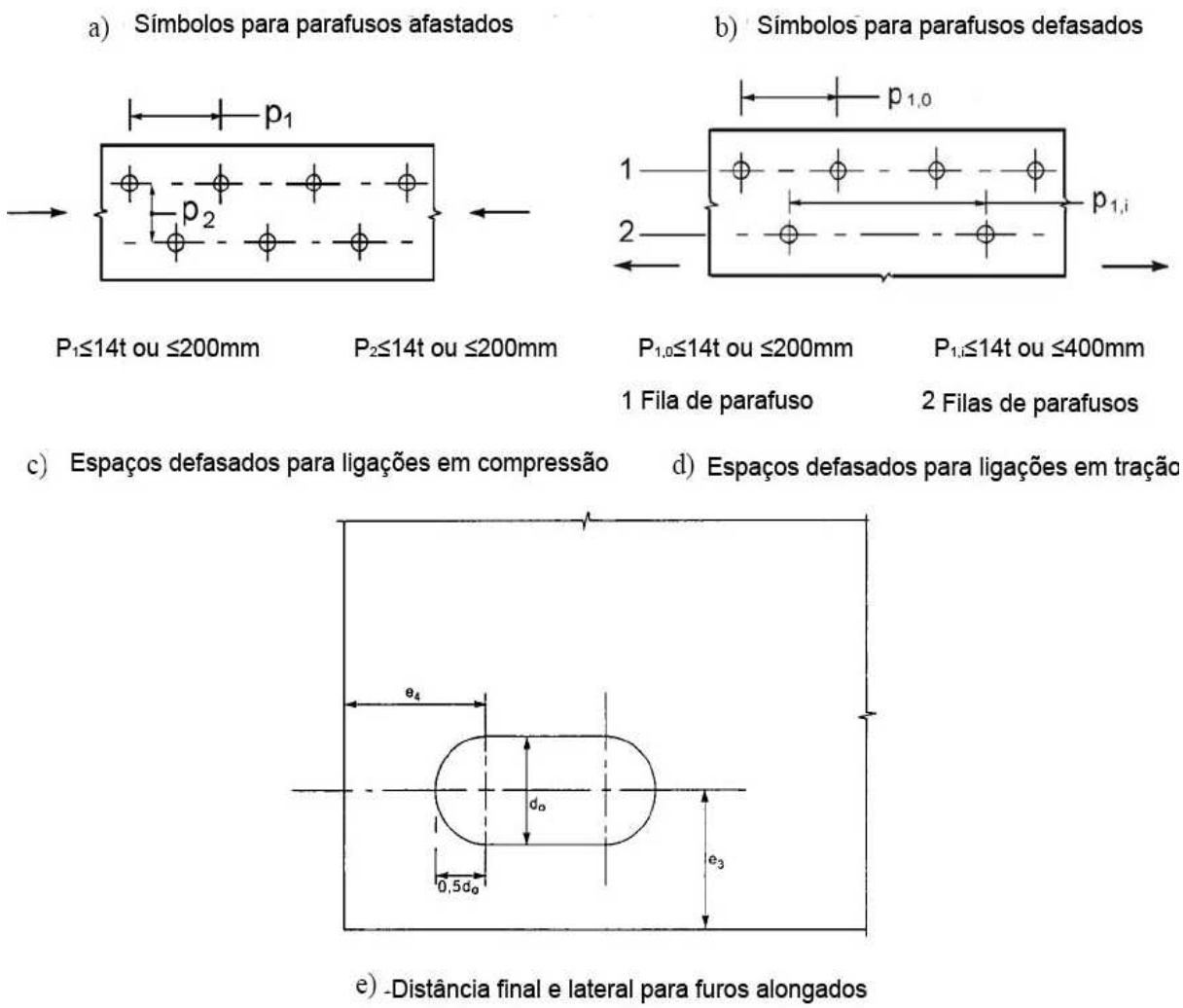


Figura 2.6 – Limitação de parâmetros geométricos (EUROCODE 3, 2003)

2.2 Dimensionamento de ligações aparafusadas segundo a norma EUROCODE 3 (EUROCODE 3, 2003)

2.2.1 Dimensionamento de Ligações com Aço Carbono

A norma européia EUROCODE 3 Parte 1.1 (EUROCODE 3, 2003), para dimensionamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço constituídas de aço carbono, apresentando similar consideração na norma brasileira NBR 8800, estabelece, em seu item 7.2.3, os critérios de avaliação da menor resistência a serem observados no cálculo de ligações aparafusadas submetidas à tração. Esses

critérios abrangem basicamente, dois estados limites últimos: o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção líquida da chapa base da ligação aparafusada, dados, respectivamente, pelas equações (2.1) e (2.2). Deve se ressaltar que a equação (2.3) deve sempre ser atendida:

$$N_{pl,rd} = \frac{(A \times f_y)}{\gamma_{M0}} \qquad (2.1)$$

$$N_{u,rd} = \frac{(0{,}9 \times A_{net} \times f_u)}{\gamma_{M2}} \qquad (2.2)$$

$$\frac{N_{u,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1{,}0 \qquad \frac{N_{pl,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1{,}0 \qquad (2.3)$$

onde:

$N_{t,rd}$ é a força normal de tração de projeto da ligação que deverá ser menor ou igual às duas resistências: $N_{pl,rd}$ e $N_{u,rd}$;

A é a menor área bruta da seção transversal da ligação;

A_{net} é a sua área líquida, 0,9 é o coeficiente de redução da área líquida;

f_y é a tensão limite de escoamento;

f_u é a tensão limite de ruptura a tração da chapa;

γ_{M0} e γ_{M2} são coeficientes de resistência.

Neste trabalho, os coeficientes de resistência foram tomados igual a 1 para dimensionar as ligações aparafusadas a serem utilizadas nos experimentos e, assim, calibrar o real comportamento da ligação aparafusada em estudo.

O coeficiente 0,9 da equação (2.2) é obtido em função do tipo de barra (chapa ou perfil) e do tipo de ligação (soldada ou aparafusada). Para chapas com ligações

aparafusadas, objeto deste trabalho, este coeficiente será mantido. A área líquida da seção transversal é usualmente obtida com a seguinte expressão:

$$A_{net} = A - n \times d \times t \qquad (2.4)$$

onde:

A é a área da seção bruta da peça tracionada;

n é quantidade de furos contidos na linha de ruptura da seção transversal;

d é o diâmetro do furo na direção perpendicular à solicitação;

t é a espessura da parte conectada em análise.

Para ligações aparafusadas com parafusos alternados, utiliza-se a fórmula desenvolvida por Crochane (1922) e ainda presente no EUROCODE 3, Part 1.1, item 6.2.2.2. (EUROCODE 3, 2005):

$$A_{net} = A - t\left[n \times d - \sum\left(\frac{s^2}{4 \times p}\right)\right] \qquad (2.5)$$

onde:

s é a distância entre os centros dos furos na direção de aplicação da força;

p é a distância entre os centros dos furos na direção perpendicular da aplicação da força, Figura 2.4.

A norma européia EUROCODE 3, Parte 1.8 (EUROCODE 3, 2005) para dimensionamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço, também estabelece, os critérios de avaliação da menor resistência na região dos parafusos a serem observados no cálculo de ligações aparafusadas submetidas à tração.

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes critérios para avaliar a resistência dos parafusos: resistência ao cisalhamento por cada plano de corte, equação (2.6) e resistência ao esmagamento, equação (2.7).

$$F_{v,rd} = \frac{(\alpha_v \times f_{up} \times A)}{\gamma_{M2}} \qquad (2.6)$$

$$F_{b,rd} = \frac{(k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t)}{\gamma_{M2}} \qquad (2.7)$$

onde, na equação (2.6):

f_{up} é a tensão última do parafuso;

α_v tem seu valor definido pelo tipo de parafuso e onde ocorre o plano de corte.

Na equação (2.7):

α_b é o menor valor entre:

$$\begin{cases} \alpha_d \\ f_{ub}/f_u \\ 1{,}0 \end{cases}$$

Sendo que:

α_d é analisado na direção da transferência da força:

sendo definido para os parafusos localizados na borda igual a $e_1/3d_0$;

e para os parafusos centrais igual a $p_1/3d_0$-1/4.

k_1 é analisado na direção perpendicular à transferência da força sendo definido: para os parafusos da borda:

$2{,}8e_2/d_0$-1,7 ou;

2,5.

e para os parafusos centrais:

$1{,}4p_2/d_0$-1,7 ou;

2,5.

onde o menor valor é sempre adotado.

2.2.2 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável

Para o dimensionamento de ligações aparafusadas constituídas de aço inoxidável, foi utilizada a norma européia EUROCODE 3, Parte 1.4 (EUROCODE 3, 2005), pois a norma brasileira NBR 8800 não apresenta o cálculo para estruturas em aço inoxidável, a norma européia estabelece, em seu item 5.3.3, que a resistência à tração deverá ser o menor valor entre a resistência plástica da seção bruta, $N_{pl,rd}$ e a resistência última da seção líquida $N_{u,rd}$ obtidas através das equações (2.8) e (2.9), respectivamente.

$$N_{pl,rd} = \frac{(A \times f_y)}{\gamma_{M0}} \qquad (2.8)$$

$$N_{u,rd} = \frac{(k_r \times A_{net} \times f_u)}{\gamma_{M2}} \qquad (2.9)$$

onde

$$k_r = \left(1 + 3r(\frac{d}{u} - 0{,}3)\right) \leq 1{,}0 \qquad (2.10)$$

sendo que r é o número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u, dado por $2e_2$,que é o dobro da distância entre o centro do furo até a borda na direção perpendicular da transferência da carga, porém menor ou igual a p_2 que é a distância entre os centros dos furos na direção perpendicular da transferência da carga.

Embora a resistência ao esmagamento de uma ligação aparafusada em aço inoxidável seja normalmente governada pela necessidade de limitar o alongamento do furo quando solicitada por uma carga de trabalho, uma verificação em separado deve ser feita para prevenir este efeito no seu estado limite último substituindo o f_u por $f_{u,red}$ dado pela equação (2.11) a seguir.

$$f_{u,red} = 0{,}5 f_y + 0{,}6 f_u \qquad (2.11)$$

Assim, são apresentadas as fórmulas necessárias para o cálculo da ligação aparafusada alternada, tendo em vista que não foram utilizados parafusos constituídos de aço inoxidável. Maiores detalhes sobre isto pode ser encontrado no EUROCODE 3, Parte 1.4 (EUROCODE 3, 2005).

2.2.3 Diferença entre o aço carbono e o aço inoxidável

O comportamento da curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável difere do aço carbono em alguns aspectos. A diferença mais importante é na forma da curva tensão *versus* deformação. Enquanto alguns tipos de aço carbono mostram um comportamento linear elástico até o limite de escoamento e um

patamar antes do encruamento, o aço inoxidável tem uma resposta não linear com um limite de escoamento não caracterizado, como mostrado na Figura 2.9.

Analisando-se o gráfico da Figura 2.7 que apresenta uma curva tensão *versus* deformação de um metal ou liga metálica observa-se o domínio elástico (0-A), onde as deformações não são permanentes, ou seja, a cada tensão corresponde uma deformação própria de cada aço. Neste domínio, cessando o esforço, o corpo-de-prova retornaria, teoricamente, às dimensões iniciais.

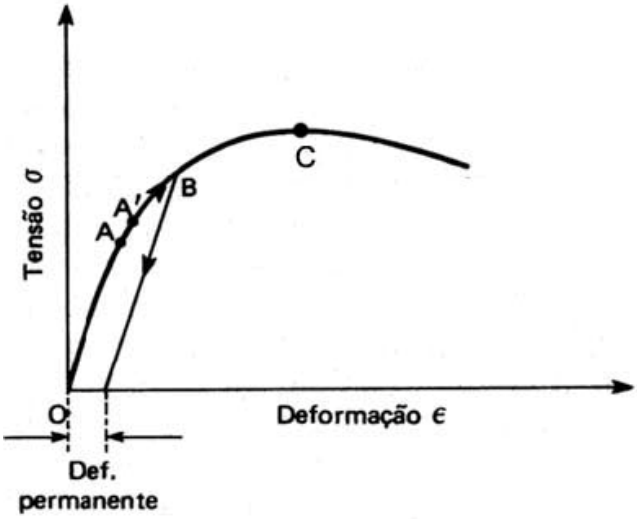


Figura 2.7 – Gráfico Tensão *versus* Deformação (Souza, 1974)

No domínio plástico (B-C) verificam-se deformações permanentes. Uma vez cessado o esforço, em qualquer momento deste domínio, o corpo-de-prova não retorna às dimensões iniciais.

Na transição entre os dois domínios (A-B), existe um ponto A' para o qual o corpo-de-prova sofre deformação sem nenhum acréscimo de tensão. Diz-se que o material atinge o escoamento neste ponto. Nos aços inoxidáveis, esta transição não é tão visível e define-se a tensão limite de escoamento como o ponto na curva determinado pela interseção de uma paralela à reta que define o domínio elástico (0-A) a 0,2% de deformação permanente.

O ponto C determina o fim do ramo plástico e é definido como tensão limite de resistência. A curva tensão-deformação é típica para cada aço como visto anteriormente. A tensão limite de escoamento do aço carbono é ligeiramente mais elevada do que do aço inoxidável (tipos 430 e 304). Porém, a tensão limite de

resistência dos aço inoxidável é superior a do aço carbono. Neste ponto ocorre uma diferença básica, o ramo plástico B-C para o aço inoxidável é muito maior do que para o aço carbono. Isto significa que eles suportam deformações maiores sem ocorrer falha do componente.

Comparando-se as curvas tensão *versus* deformação de alguns tipos de aço inoxidável com aço carbono, observa-se também a diferença na forma destas curvas. Pode-se observar, por exemplo, que os aços austeníticos apresentam o ramo plástico maior do que os aços ferríticos, conforme apresentado na Figura 2.8.

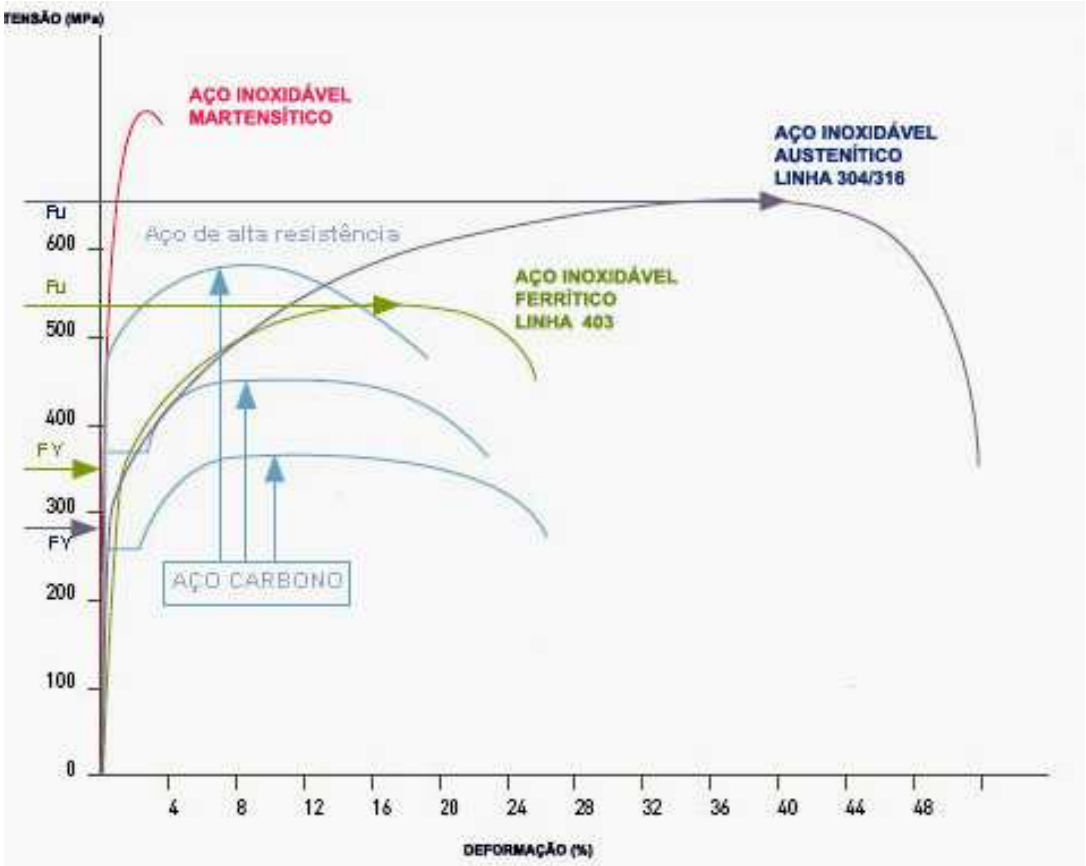


Figura 2.8 – Comportamento do aço carbono e inoxidável[5]

Uma das diferenças marcantes de comportamento às solicitações entre os vários tipos de aço é o encruamento, representado pelo aumento das características (dureza, limites de escoamento, de resistência e de cisalhamento) pelo efeito do trabalho mecânico.

---

[5] http://www.nucleoinox.org.br/new/Artigos_exibe.asp?Codigo=76&Refresh=2008893124

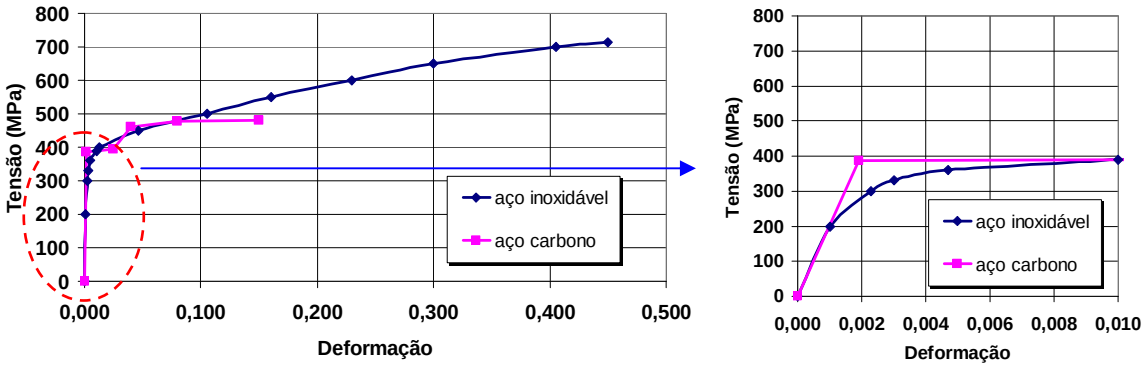
O aço inoxidável pode ser cortado, furado, dobrado e calandrado da mesma forma e com os mesmos equipamentos que conformam os aços carbono. Contudo, algumas modificações no processo são necessárias pela diferença de comportamento mecânico entre os dois materiais.

Uma das diferenças mais marcantes é o fato do aço inoxidável apresentar endurecimento sensivelmente maior que o aço carbono e exigir, para a sua conformação, equipamentos mais robustos para conformar as mesmas espessuras.

Porém, na maioria dos casos, o maior grau de encruamento do aço inoxidável pode ser compensado pela sua excelente resistência à corrosão atmosférica, viabilizando o emprego de espessuras menores do que aquelas especificadas para o aço carbono. Por outro lado, com espessuras reduzidas, os componentes e peças de aço inoxidável ficam mais leves e os esforços de conformação podem se aproximar daqueles exigidos para a conformação do aço carbono.

Neste trabalho foi comprovada a diferença no comportamento mecânico entre os dois aços, conforme curvas tensão *versus* deformação retiradas de um ensaio a tração mostradas na Figura 2.9.

Verificou-se também, a grande ductilidade apresentada pelo aço inoxidável em relação ao aço carbono nos ensaios dos corpos-de-prova, como mostra a Figura 2.10.



a) curvas globais

b) trecho inicial

Figura 2.9 – Curvas tensão *versus* deformação aço carbono e aço inoxidável

Figura 2.10 – Ensaios de corpos-de-prova

Este capítulo apresentou de forma global, os diversos parâmetros que envolvem o dimensionamento de ligações aparafusadas submetidas à tração, bem como as diferenças mais significativas entre os dois materiais utilizados nesta dissertação, nomeadamente o aço carbono e o aço inoxidável. No próximo capítulo será apresentada a análise teórica das ligações aparafusadas.

3 ANÁLISE E AVALIAÇÃO TEÓRICA DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS

3.1 Introdução

O elevado custo na confecção de um ensaio e a mão-de-obra dispensada induzem a busca de parâmetros mais adequados e que produzam resultados satisfatórios. Este capítulo tem o objetivo de descrever o procedimento adotado para a determinação da melhor configuração geométrica a ser usada nos ensaios realizados no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UERJ.

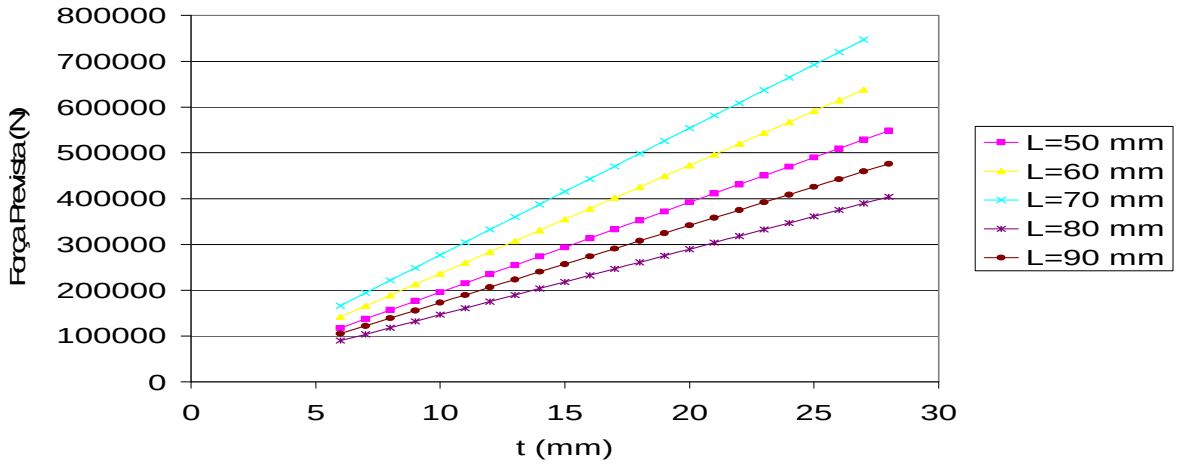
3.2 Avaliação das interações entre os parâmetros analisados

Para se obter uma análise criteriosa dos parâmetros da ligação aparafusada alternada estudada foi utilizado o Método Taguchi (1990), o qual consiste numa abordagem da engenharia de qualidade, ou seja, fora da convenção de variação de todos os parâmetros para sua análise, buscando com a variação de parâmetros mais importantes para aumentar a robustez dos produtos e assim diminuindo os efeitos secundários no seu desempenho, focalizando a investigação nos parâmetros mais significativos.

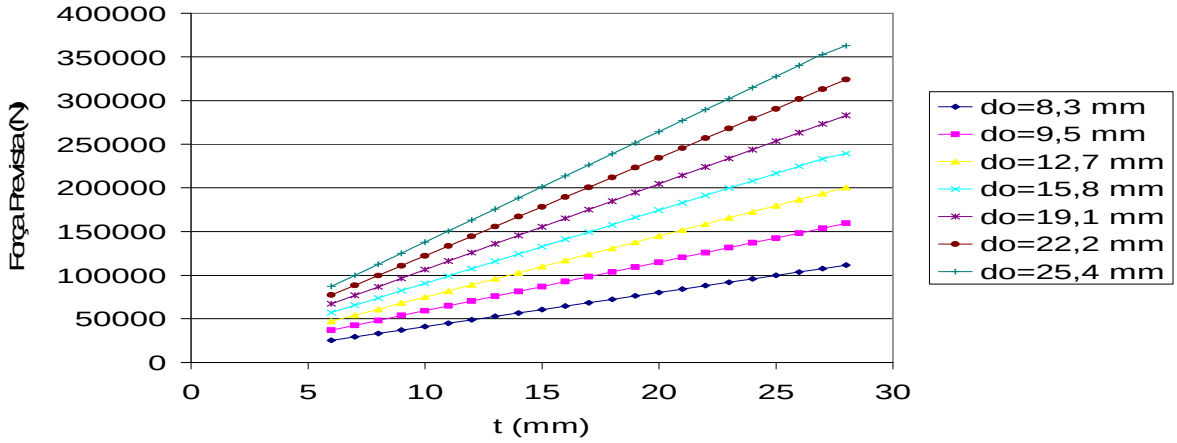
Desta forma, o Método Taguchi (1990) possibilitou determinar quais combinações de parâmetros influenciavam de forma mais incisiva no desempenho da ligação aparafusada alternada.

Para visualizar quais combinações produziriam interação foram elaborados os gráficos das Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4, que mostram os valores de parâmetros combinados, produzindo variação de resistência da ligação aparafusada.

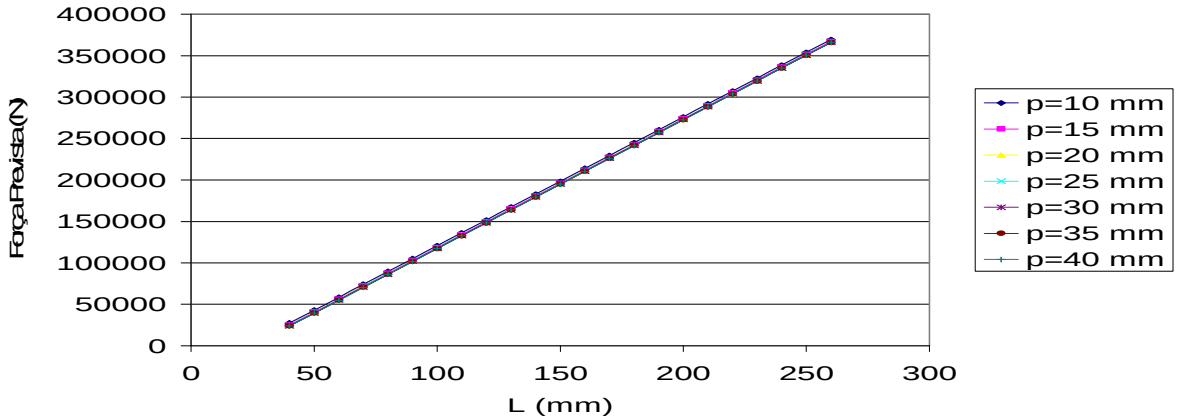
Os resultados das resistências expostos em linhas paralelas, mostra que a variação dos parâmetros daquela interação não influencia no valor da resistência final, enquanto os resultados das resistências expostos em linhas não paralelas, mostra que a variação dos parâmetros daquela interação influência no valor da resistência final.



a) Interação dos parâmetros Lxt

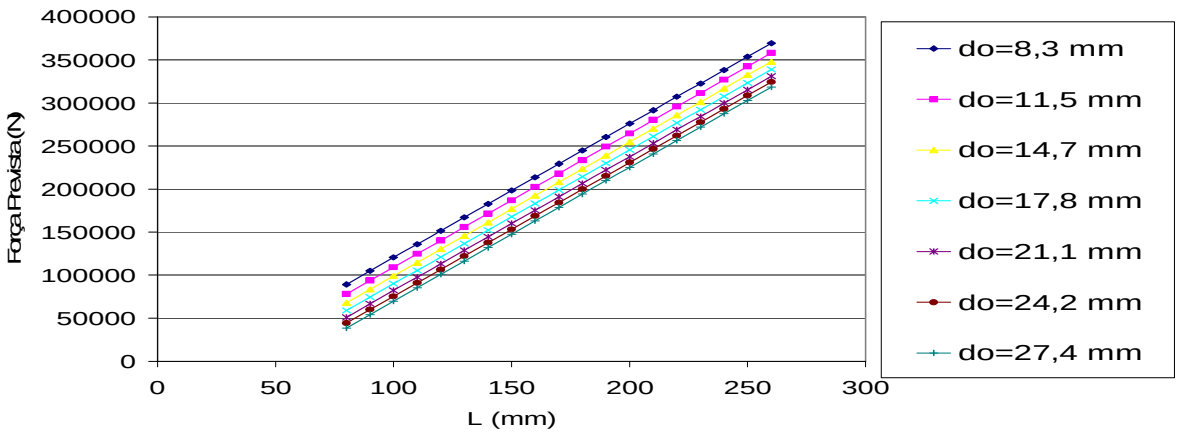


b) Interação dos parâmetros txd_0

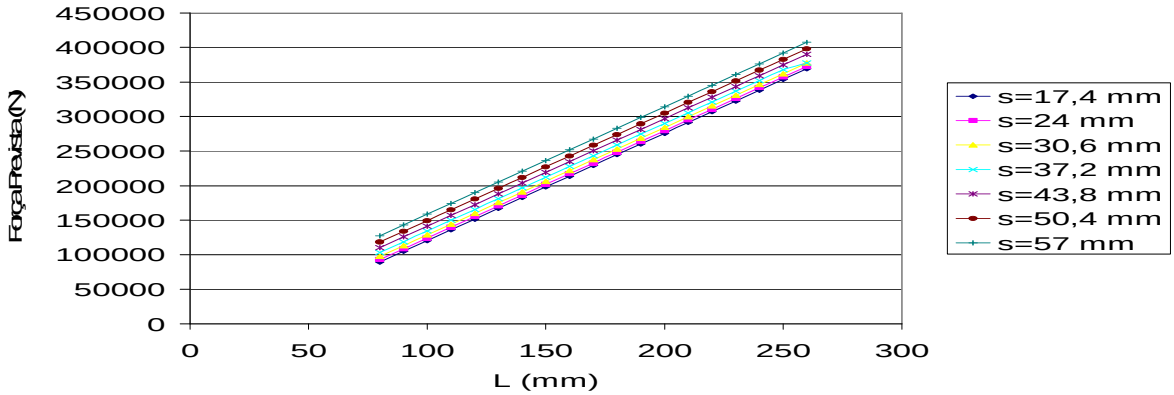


c) Interação dos parâmetros Lxp

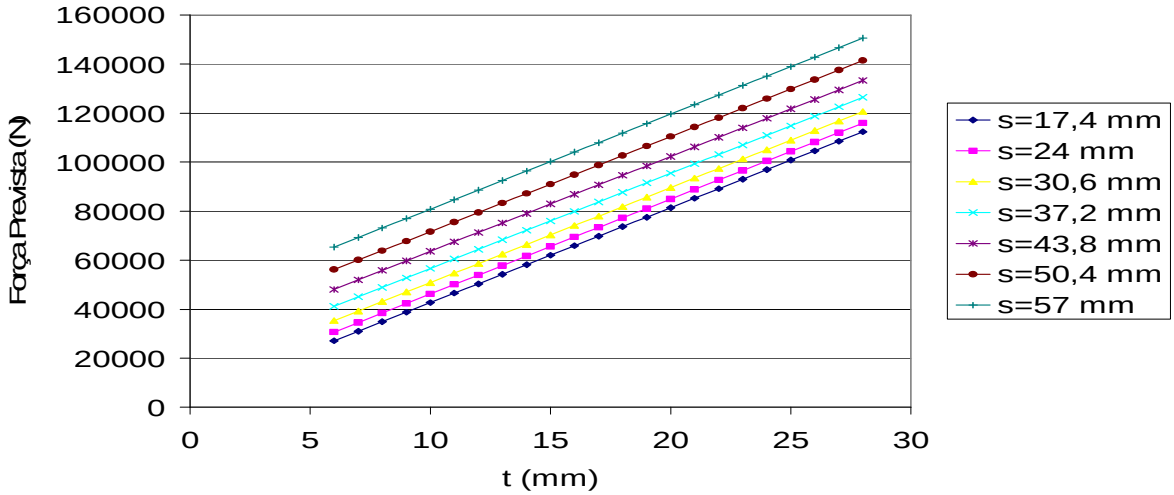
Figura 3.1 – Interação de parâmetros – Lxt – txd_o - Lxp



d) Interação dos parâmetros Lxd_0

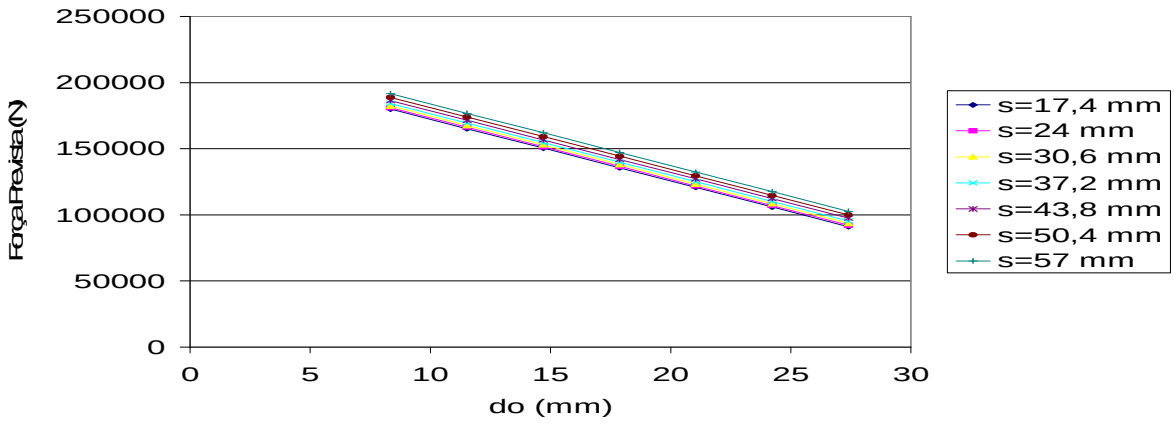


e) Interação dos parâmetros Lxs

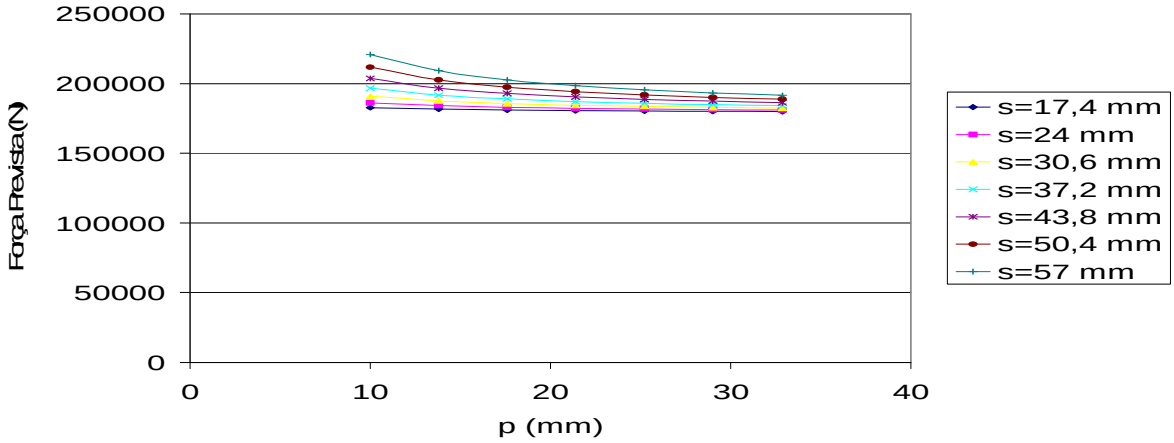


f) Interação dos parâmetros txs

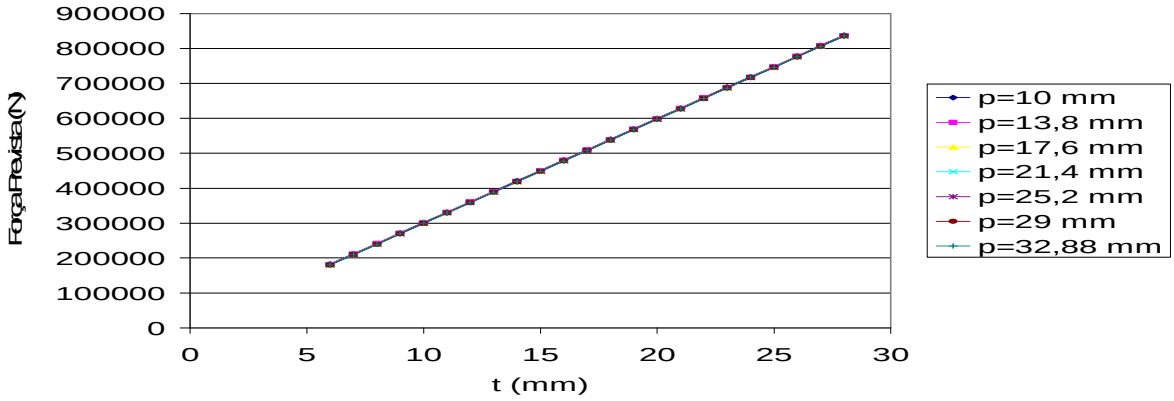
Figura 3.2 – Interação de parâmetros – Lxd_o– Lxs - txs



g) Interação dos parâmetros $d_0$xs

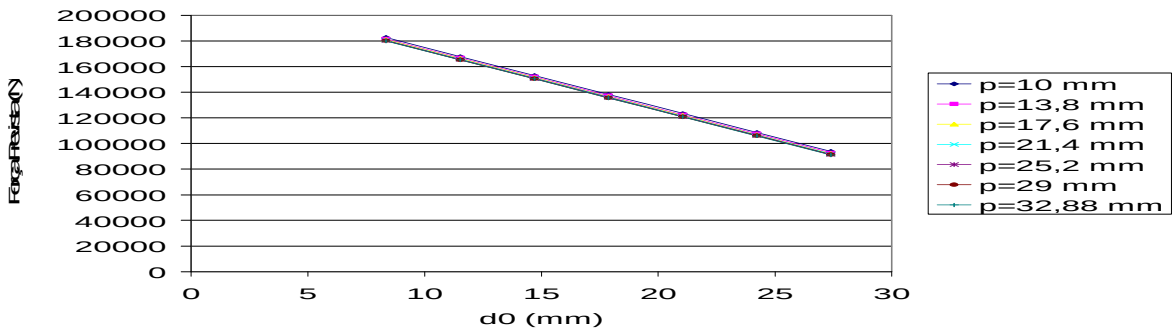


h) Interação dos parâmetros sxp



i) Interação dos parâmetros txp

Figura 3.3 – Interação de parâmetros – $d_o$xs – sxp - txp



j) Interação dos parâmetros $d_0$xp

Figura 3.4 – Interação de parâmetros – $d_o$xp

Uma inspeção destes resultados possibilitou que se concluísse que existe influência nas seguintes interações de parâmetros: L x t, t x d_o e s x p.

Onde, conforme Figura 2.3 e Figura 2.4:

L é a largura da chapa;

d_0 é o diâmetro do furo;

t é a espessura da chapa;

s é a distância entre furos na direção paralela a aplicação da carga;

p é a distância entre furos na direção perpendicular a aplicação da carga.

Considerando que a obtenção de novos resultados experimentais é um processo que envolve tempo e custo, os métodos numéricos podem ser utilizados e se mostram satisfatórios para definir uma primeira análise do problema da resistência à tração na ligação aparafusada.

Foi utilizado o Método Taguchi (1990), para identificar dentre os parâmetros e as combinações de parâmetros já identificadas pelo método da interação feita anteriormente, quais seriam mais importantes, foi, então, construída uma tabela com todos os parâmetros e combinações e através da análise ortogonal desenvolvida por Tagushi (1990), identificou-se quais parâmetros e combinações teriam mais importância na determinação da resistência da ligação aparafusada. E com esses parâmetros e suas interações foi feita análise da significância, como mostrado na Tabela 3.1 para o aço carbono e Tabela 3.2 para o aço inoxidável, verificando que a interação s x p tem o menor valor de significância, ou seja, sendo muito importante na avaliação da ligação tanto na análise da ligação aparafusada constituída de aço carbono, quanto na de aço inoxidável.

Tabela 3.1 – Valores da significância dos parâmetros e interações do aço carbono

Parâmetros/ Interações	Diferença das Médias	(Desvio Padrão)^2	Grau de Liberdade	Variância	Freqüência	Significância
s	1456,366	8484010	1	8484010	17,70475	0,148543
d_0	2090,805	17485859	1	17485859	36,49014	0,104441
dxs	1484,839	8818986	1	8818986	18,40379	0,145794
p	-4387,92	77015254	1	77015254	160,7183	0,050113
sxp	-6801,19	1,85E+08	1	1,85E+08	386,117	**0,03237**
dxp	-485,455	942667,8	1	942667,8	1,967194	0,394312
t	-6467,55	1,67E+08	1	1,67E+08	349,163	0,034037
d	-1042,41	4346504	1	4346504	9,070444	0,204089
fu	386,426	597300,2	1	597300,2	1,246468	0,465007
L	-1755,02	12320417	1	12320417	25,7107	0,123961
Lxt	385,8801	595613,8	1	595613,8	1,242949	0,465454
LERR	-692,238	1916777	4	479194,1		

Tabela 3.2 – Valores da significância dos parâmetros e interações - aço inoxidável

Parâmetros/ Interações	Diferença das Médias	(Desvio Padrão)^2	Grau de Liberdade	Variância	Freqüência	Significância
s	1313,965	6906016	1	6906016	54,36307	0,08582
d_0	1889,614	14282567	1	14282567	112,4301	0,059863
dxs	1358,098	7377717	1	7377717	58,07623	0,083063
p	-3971,06	63077368	1	63077368	496,5351	0,028551
sxp	-6146,74	1,51E+08	1	1,51E+08	1189,669	**0,018452**
dxp	-437,988	767335,1	1	767335,1	6,040341	0,246006
t	-5845,2	1,37E+08	1	1,37E+08	1075,81	0,019403
d	-975,728	3808181	1	3808181	29,9774	0,115006
fu	-97,6234	38121,32	1	38121,32	0,300085	0,680956
L	-1755,02	12320417	1	12320417	96,98439	0,064423
Lxt	385,8801	595613,8	1	595613,8	4,688579	0,275431
LERR	-356,42	508140,2	4	127035,1		

Neste trabalho, devido a restrições de tempo e orçamento, optou-se por analisar somente a interação entre os parâmetros s e p para se estudar a sua influência em termos de diferença de comportamento entre os Estados Limites Últimos associados ao aço carbono e ao aço inoxidável. Isto foi feito, através da

variação dos seus valores, conforme apresentado na Tabela 3.3 e Tabela 3.4, e mantendo a largura (L), a espessura (t) e o furo do parafuso (d_0) constantes.

Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros s e p para o aço carbono

s (mm)	p (mm)
50	55
70	55
30	55

Tabela 3.4 – Valores dos parâmetros s e p para o aço inoxidável

s (mm)	p (mm)
50	55
30	55
23	55

3.3 Justificativas para a configuração da ligação

A escolha da interação s e p e não a variação da espessura da chapa, mostradas anteriormente serem parâmetro e combinação mais significativos, para analisarmos a ligação parafusada e para se estudar a comparação dos limites últimos entre o aço carbono e o aço inoxidável foi determinada, como já comentado por restrições de tempo e orçamento, logo os ensaios foram reduzidos, sendo utilizadas chapas de aço carbono estrutural USI 300 que foram doadas pela USIMINAS com espessura de 15 mm e de 3 mm e com chapas do aço inoxidável S304 pela ACESITA com espessura de 3 mm.

Espessuras iguais foram usadas de forma a possibilitar uma comparação entre os dois tipos de aço.

A escolha do tipo dos aços foi devido a que estas chapas leves estão entre as mais empregadas na construção civil na execução de estruturas em aço, e apresentarem tensões de escoamento similares em torno de 300MPa, sendo estas levantadas do aço carbono, através do patamar de escoamento e no aço inoxidável,

através de reta paralela à inclinação da fase elástica e traçada passando por 0,2% de deformação.

Foram considerados ensaios de ligações aparafusadas sem nenhuma excentricidade em relação ao centro de gravidade da seção transversal, buscando avaliar, sem a sua influência, os limites e efeitos no comportamento da ligação. Para este objetivo foi utilizado o esquema da Figura 3.5.

Para a realização dos ensaios das ligações, utilizou-se uma máquina universal de ensaios Lousenhausen com capacidade de 600kN, disponível no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, conforme pode ser observado na Figura 3.6(a).

A aquisição de dados (deformações, deslocamentos e carga) foi feita através do sistema NI-PXI-1050 da *National Instruments*, conforme apresentado na Figura 3.6(b).

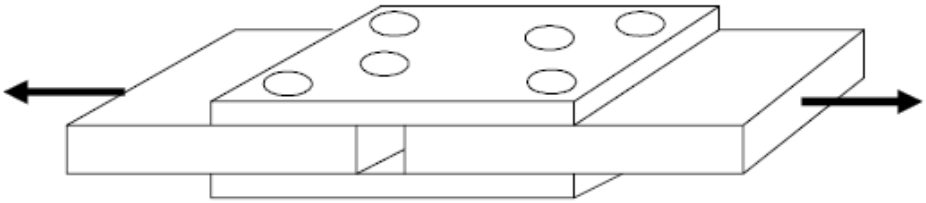
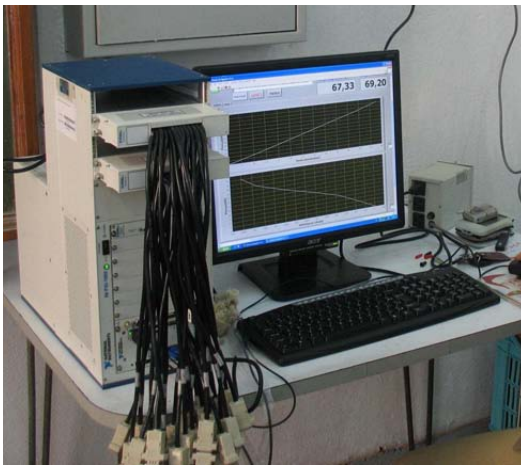


Figura 3.5 – Esquema de ligação

a) máquina universal de ensaios Lousenhausen 600kN



b) sistema de aquisição de dados National Instruments PXI-1050

Figura 3.6 – Esquema experimental

3.4 Apresentação dos Ensaios de Tração

Segundo Dieter (1981), o teste de tração de engenharia é amplamente usado para obtenção de informações básicas sobre a resistência de materiais, e como um teste de controle de especificações. Autores como Schaeffer (1999) e Souza (1974) dizem ser o ensaio de tração, o método mais utilizado para determinação das propriedades mecânicas de chapas metálicas, sendo possível a obtenção do limite de resistência, do limite de escoamento e do módulo de elasticidade.

Schaeffer (1999) define o ensaio de tração como sendo um teste uniaxial e sem atrito, efetuado em máquinas de ensaios que possuem uma garra fixa e outra móvel. Ainda segundo o autor, as máquinas são equipadas com sensores para registrar a força e o alongamento do corpo-de-prova, os quais são confeccionados com diferentes comprimentos, larguras e formatos, definidos pelas normas ABNT NBR 6673 (1997), ASTM E 646 (1984) e DIN EN 10 002-1 (2001). O resultado do ensaio de tração é o diagrama tensão versus deformação, conforme apresentado na Figura 3.7 que, segundo Dieter (1981), corresponde a uma curva de engenharia construída a partir das medidas de carga e do alongamento da amostra submetida ao ensaio. A tensão usada na curva é a tensão longitudinal média do corpo-de-prova, obtida pela divisão da carga pela área inicial da seção do corpo-de-prova, e a deformação usada para a curva de engenharia é a deformação linear média, obtida pela divisão da elongação do comprimento útil do corpo de prova, pelo comprimento original.

Figura 3.7 – Curva tensão *versus* deformação (Dieter, 1981)

A forma e a magnitude de uma curva tensão *versus* deformação de um metal dependerá de sua composição, tratamento térmico, história anterior da deformação plástica e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste. Ainda segundo Dieter (1981), os parâmetros usados para descrever a curva tensão *versus* deformação de um metal são: resistência à tração, tensão limite de escoamento, elongação percentual e redução de área. Os dois primeiros sendo parâmetros de resistência e os dois últimos relativos à ductilidade do material.

Dieter (1981) faz ainda uma descrição do comportamento do material quando este ultrapassa o valor correspondente ao limite de escoamento. Segundo ele, a partir deste ponto, o material está permanentemente deformado se a carga for reduzida a zero, de forma que a tensão para produzir cada vez mais deformação plástica cresce com o aumento desta última, devido ao encruamento do material. Ainda segundo o autor, o volume do corpo-de-prova permanece constante durante a deformação plástica e, conforme se alonga, a área da seção reta transversal decresce uniformemente ao longo do comprimento útil do corpo-de-prova. Inicialmente, o encruamento compensa a diminuição da área da seção transversal, e a tensão continua a aumentar com o aumento da deformação. Eventualmente, atinge-se um ponto onde a diminuição da área da seção reta do corpo-de-prova é maior que o aumento da carga de deformação proveniente do encruamento. Essa condição será atingida primeiramente em algum ponto do corpo-de-prova que é ligeiramente mais fraco que o resto, de forma que toda a deformação plástica posterior estará concentrada nessa região, onde o corpo-de-prova começará a sofrer uma estricção caracterizada pela diminuição de área. Devido ao fato da área da seção reta diminuir agora mais rapidamente do que o aumento da carga de deformação pelo encruamento, a carga necessária para deformar o corpo-de-prova diminuirá e a tensão igualmente continuará a cair até atingir a fratura, conforme descreve Dieter (1981).

A curva tensão *versus* deformação convencional não retrata verdadeiramente o comportamento de cada elemento na amostra. Observando-se a curva, a tensão requerida para continuar a deformação da amostra tracionada parece estar decrescendo após a estricção. Isto ocorre porque a tensão convencional reflete somente a mudança de carga e não a mudança que ocorre na área da seção transversal.

Após o início da estricção, toda deformação fica restrita a uma porção muito pequena do comprimento útil – a área de estricção. Para a estricção iniciar, a redução de carga devido à redução da área da secção transversal precisa ser maior do que o aumento de carga requerido para sustentar cada incremento adicional de alongamento (encruamento do material).

Uma vez que a estricção começa, a carga requerida para manter a deformação decresce e, portanto, a curva tensão *versus* deformação começa a decrescer. Se medidas pudessem ser feitas para elementos independentes do material dentro da região de estricção, a tensão requerida para continuar a deformação aumentaria.

Um modo mais realista de descrever o comportamento do material é plotar a tensão verdadeira (σ) e deformação verdadeira (ε) para cada elemento. Tensão verdadeira é definida como carga dividida pela área instantânea da secção transversal e a deformação verdadeira é o somatório de cada incremento de alongamento dividido pelo comprimento útil instantâneo. Para fins de cálculo conforme Keeler (1968), tem-se,

$$\sigma = \frac{P}{A_I} \qquad (3.1)$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L} \frac{dL}{L_f} = \ln \frac{L_f}{L_0} = \ln(1+e) \qquad (3.2)$$

onde P é a carga requerida para deformar a amostra, A_I é a área instantânea da seção transversal, L_0 é o comprimento antes do alongamento, L_f é o comprimento após alongamento, ln é o logaritmo natural e e é a deformação convencional.

Quando um corpo-de-prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão *versus* deformação, pelas medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que crescem continuamente até quase o fim do ensaio.

Segundo Souza (1974), quando um corpo metálico é submetido a um ensaio de tração, verifica-se inicialmente que o diagrama é linear, sendo representado pela equação (3.3),

$$\sigma = E.\varepsilon \qquad (3.3)$$

que corresponde à lei de Hooke (proposta em 1678 por Sir Robert Hooke), sendo a constante de proporcionalidade E, conhecida por módulo de elasticidade ou módulo de Young. Esta parte linear da curva corresponde a região de deformação elástica do material, onde a tensão é linearmente proporcional à deformação. A linearidade do diagrama termina num ponto denominado limite elástico, definido pelo autor como a maior tensão que o material pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado.

Ainda de acordo com Souza (1974), verifica-se pela Figura 3.8 que, na parte OA da curva o material está dentro de sua zona elástica, isto é, além de obedecer à lei de Hooke, se, em qualquer ponto dentro da linha OA, a carga for aliviada, o descarregamento seguirá também a mesma reta OA e, para um descarregamento total, o metal volta à origem (ponto O), sem apresentar qualquer deformação residual ou permanente. Segundo o autor, a estrutura de um metal no estado sólido é constituída de átomos dispostos segundo um arranjo cristalino uniforme nas três dimensões. Quando o metal é solicitado com um esforço de intensidade tal que a deformação fique no intervalo da linha OA, os átomos são deslocados de sua posição inicial de uma distância muito pequena e, assim que o esforço é retirado, os átomos voltam à sua posição inicial, devido às forças de ligação entre os mesmos, desaparecendo a deformação.

Ao ser atingida uma tensão em que a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto A' denominado limite de proporcionalidade. A posição relativa entre A e A' é muito discutível e alguns autores colocam A' abaixo de A. Na verdade, esses dois pontos muitas vezes se confundem e torna-se muito difícil determiná-los com precisão, devido ao fato de que o desvio da linearidade é sempre gradual e não há precisamente um ponto bem determinado para cada um desses limites mencionados. O limite elástico pode mesmo estar na parte curva do gráfico.

Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade e em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente ou residual. A Figura 3.8 mostra um descarregamento do ponto B na zona plástica até a

linha das abscissas. Nota-se que a linha BC é paralela à linha OA, pois o que se perde é a deformação causada na zona plástica, restando a deformação ocorrida na zona elástica.

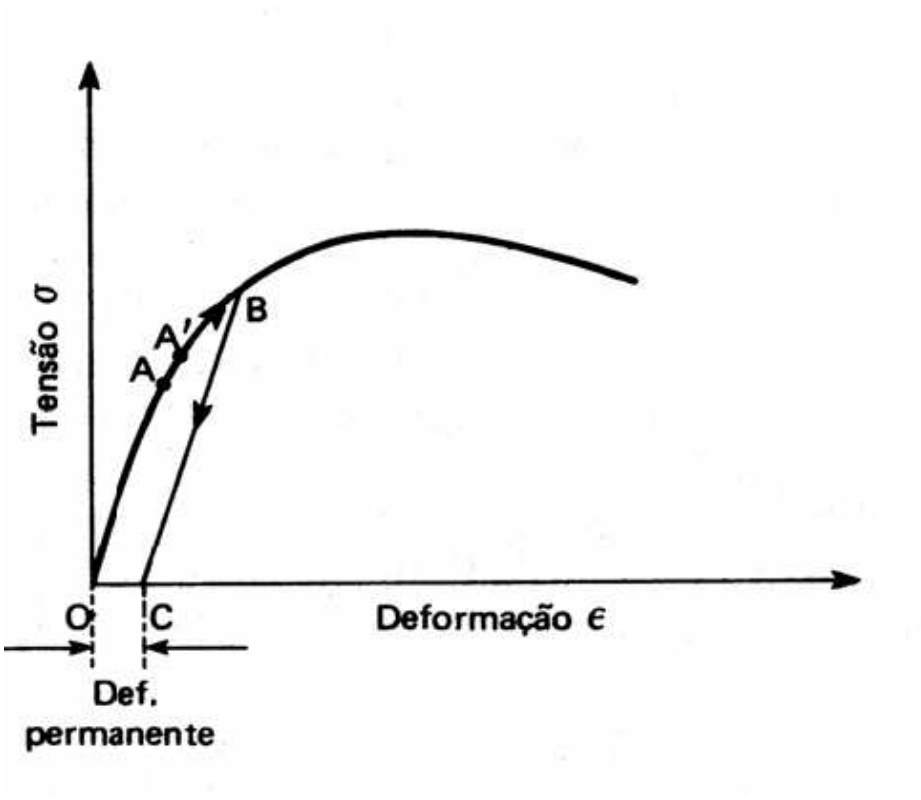


Figura 3.8 – Tensão *versus* deformação - metal ou liga metálica (Souza, 1974)

De uma maneira geral, pode-se dizer que o ensaio de tração é o principal procedimento de ensaio para o levantamento das propriedades mecânicas fundamentais e parâmetros de estampabilidade de chapas metálicas, sendo apreciado não apenas em trabalhos da década de 60 e 70, como os de Keeler (1968) e Souza (1974), mas também em trabalhos recentes, como o de Kumar, (2002), que utiliza o ensaio de tração para avaliação de chapas de aço para estampagem extra profunda.

3.5 Determinação da tensão limite de escoamento

Conforme Souza, (1974), uma propriedade mecânica comum usada para avaliar a conformabilidade é a tensão limite de escoamento. Como regra geral, a conformabilidade decresce com o aumento da tensão limite de escoamento. Apesar

desta informação poder ser verdadeira, para uma variedade de lotes de aços similares processados de uma maneira similar, é uma generalização muito fraca. A tensão limite de escoamento meramente indica a tensão onde se inicia a deformação plástica e não indica a quantidade de deformação plástica permissível antes da estricção. Uma comparação entre um aço baixo carbono e um aço inoxidável é um excelente exemplo. A tensão limite de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a conformabilidade é geralmente melhor.

O início da deformação plástica é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. Segundo Souza, (1974), o escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante a sua maior parte. Depois do escoamento, o metal está encruado.

Quando um projeto requer um metal dúctil, como o aço inoxidável, onde a deformação plástica deva ser evitada, o limite de escoamento é o critério adotado para a resistência do material. Para aplicações estruturais, desde que as cargas sejam estáticas, as tensões de trabalho são geralmente baseadas no valor do limite de escoamento.

Na Figura 3.9 observa-se a caracterização do patamar de escoamento. A tensão A é chamada de limite de escoamento superior, que é a tensão máxima atingida antes da queda repentina da carga (começo da deformação plástica no escoamento). Após a estabilização da carga ou da tensão, o material sofre uma deformação relativamente grande sem aumento da tensão, que é o patamar de escoamento. A tensão B constante estabelecida é o limite de escoamento inferior do material e durante o fenômeno, o alongamento que o metal sofre é chamado alongamento durante o escoamento. Alguns autores, porém, consideram o limite de escoamento inferior como a menor tensão, designada por C na Figura 3.9, atingida durante o escoamento, que pode vir a ser inferior à tensão do patamar.

Estes dois limites não são constantes para um determinado metal, mas dependem de diversos fatores como a geometria e condições do corpo-de-prova, do método de ensaio, da velocidade de deformação e principalmente das características da máquina de ensaio.

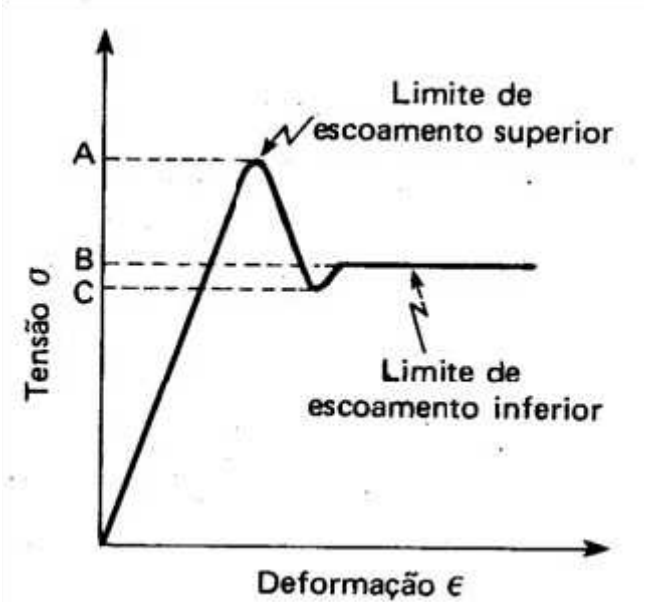


Figura 3.9 – Curva teórica - limite de escoamento superior e inferior (Souza, 1974)

O limite de resistência (σ_r) é calculado pela carga máxima atingida no ensaio. Para os materiais dúcteis, o valor do limite de resistência dá a medida da carga máxima que o material pode atingir sob a restrita condição de carregamento uniaxial. Mesmo neste caso, a tensão que o material sofre ao ser atingida a carga máxima é maior que o limite de resistência, devido à diminuição da área, que não é computada naquela fórmula.

O limite de escoamento hoje em dia, é mais usado nos projetos, do que o limite de resistência, para os metais dúcteis. Entretanto, o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material. Por ser fácil de se calcular, o limite de resistência é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas. Para os metais frágeis, porém, o limite de resistência é um critério válido para projetos, pois nesse caso, o escoamento é muito difícil de ser determinado (como por exemplo, para os ferros fundidos comuns) e a diminuição da área é desprezível por causa da pequena zona plástica que esses materiais apresentam. Deste modo, o limite de resistência para os metais frágeis caracteriza bem a resistência do material, conforme apresentado na Figura 3.10.

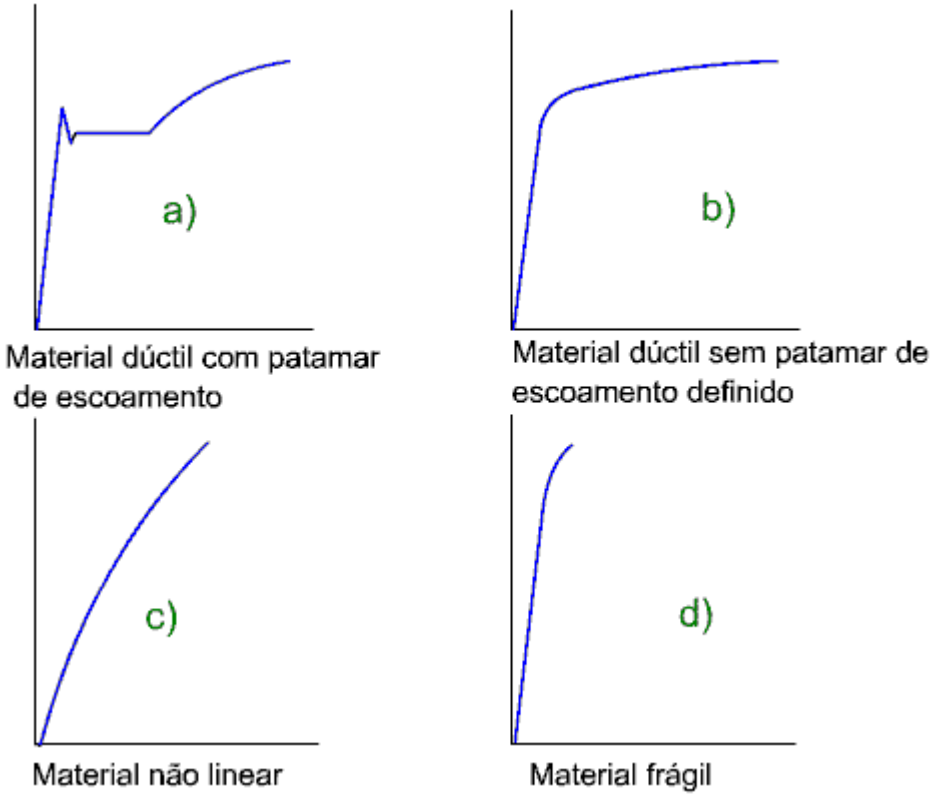


Figura 3.10 – Tipos de curvas Tensão *versus* Deformação[6]

O aço inoxidável apresenta uma curva tensão *versus* deformação não linear o que torna difícil identificar a sua tensão limite de escoamento. A tensão limite de escoamento é definida por uma reta com a mesma inclinação do módulo de elasticidade passando por 0,2% da deformação.

A equação (3.4) de Ramberg-Osgood (1943) representa o comportamento da curva não linear da tensão *versus* deformação de aços de alta resistência apresentando grande deformação plástica, podendo ser usada para o aço inoxidável.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k\left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \qquad (3.4)$$

onde ε é a deformação, σ é a tensão, E o módulo de elasticidade ou módulo de Young e n e k constantes que dependem do tipo de material, geralmente calibrados a parte de resultados de ensaios experimentais. O primeiro termo da equação

representa a parte elástica da curva enquanto o segundo representa a parte plástica. Introduzindo a tensão limite de escoamento do material σ_0, tem-se um novo parâmetro α proporcional à k, onde:

$$\alpha = k\left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^{n-1} \qquad (3.5)$$

Segunda parte da equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha\frac{\sigma_0}{E}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n} \qquad (3.6)$$

O valor de $\alpha\frac{\sigma_0}{E}$ pode ser visto como uma deformação além do escoamento da curva, sendo aceitável o valor de 0,2%, pois ao igualar a tensão σ, à tensão elástica σ_0, obtém-se a equação (3.7)

$$\varepsilon = (1+\alpha)\frac{\sigma_0}{E} \qquad (3.7)$$

O valor de α pode ser adequado aos dados experimentais, porém para alguns materiais pode ser adotado o valor de 0,2%, ou seja:

$$\alpha\frac{\sigma_0}{E} = 0{,}002 \qquad (3.8)$$

Desta forma obtém-se a curva apresentada na Figura 3.11.

---

[6]http://www.cimm.com.br

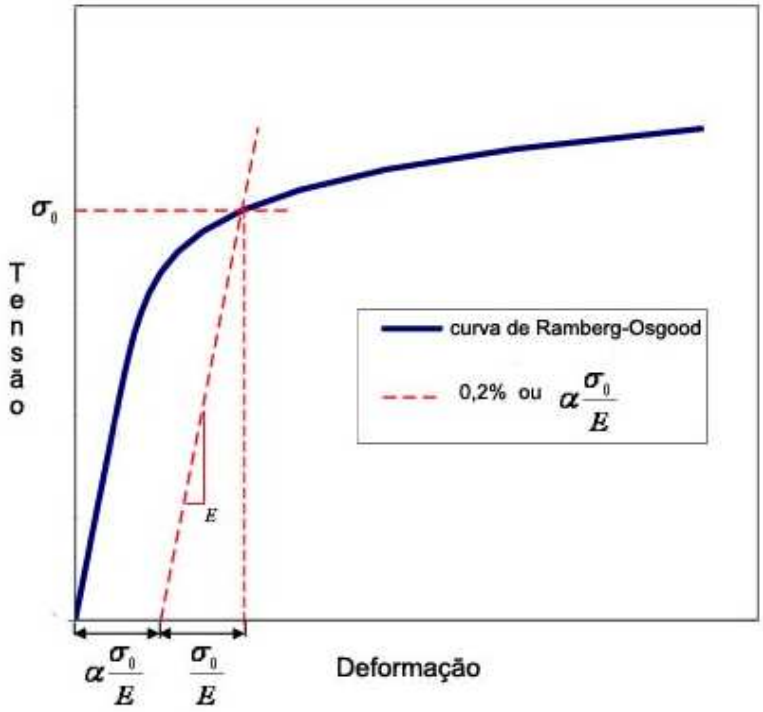


Figura 3.11 – Curva de Ramberg-Osgood (Ramberg, W., & Osgood, W. R., 1943).

Esta equação apresenta bons resultados para a primeira etapa da curva, porém prevê altas tensões na sua parte final. Recentemente Gardner and Nethercot (2004) propuseram uma modificação nesta equação, baseado em 1% da prova de carga que estendeu a validade da equação de Ramberg-Osgood além do seu limite de escoamento. A formulação de Gardner e Nethrcot (2004) apresenta dois estágios no modelo apresentado, conforme equação (3.9), com resultados mais apurados na resposta de níveis de tensão em estruturas

$$e = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{E_0} + 0{,}002\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{0,2}}\right)^n & \sigma \le \sigma_{0,2} \\ \varepsilon_{0,2} + \dfrac{\sigma - \sigma_{0,2}}{E_2} + \left[\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \dfrac{\sigma_1 - \sigma_{0,2}}{E_2}\right] x \left(\dfrac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\sigma_1 - \sigma_{0,2}}\right)^{m1} & \sigma \succ \sigma_{0,2} \end{cases} \qquad (3.9)$$

Onde:

σ_1 é a tensão limite de escoamento correspondendo a deformação total de ε_1 = 0,1%;

m_1 é o índice não linear representando a curva passando através dos pontos $(\varepsilon_{0,2}, \sigma_{0,2})$ e $(\varepsilon_1, \sigma_1)$.

3.6 Corpos-de-prova das placas de aço carbono

A fim de levantar a tensão limite de escoamento e a tensão limite de ruptura dos aços utilizados nos ensaios dessa dissertação foi utilizada a Norma Brasileira NBR 6673 (1981) e foram fabricados corpos-de-prova conforme a Figura 3.12 para espessura de 3 mm e Figura 3.13 para a espessura de 15 mm, respectivamente, retirados no sentido contrário ao da laminação conforme Figura 3.14. Foram utilizados os equipamentos do laboratório do ITUC – Instituto de Tecnologia da PUC-Rio para a obtenção dos dados.

Os testes de tração uniaxial foram realizados na PUC em temperatura ambiente, a uma velocidade de 2,25 mm/minuto, a fim de verificar as propriedades mecânicas das chapas de acordo com as normas do INMETRO.

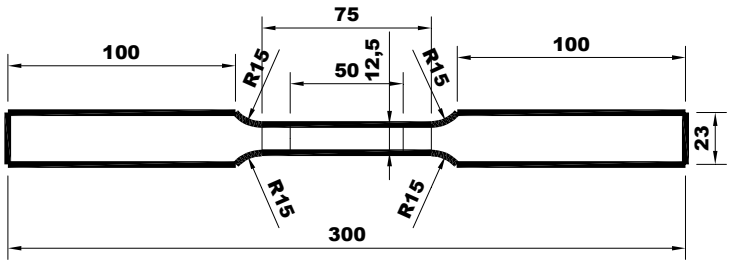


Figura 3.12 – Corpo-de-prova (t=3 mm)

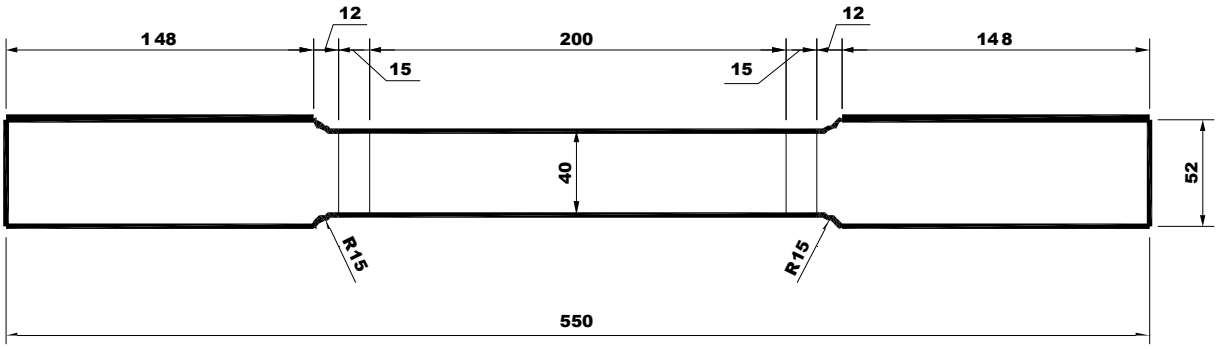


Figura 3.13 – Corpo-de-prova (t=15mm)

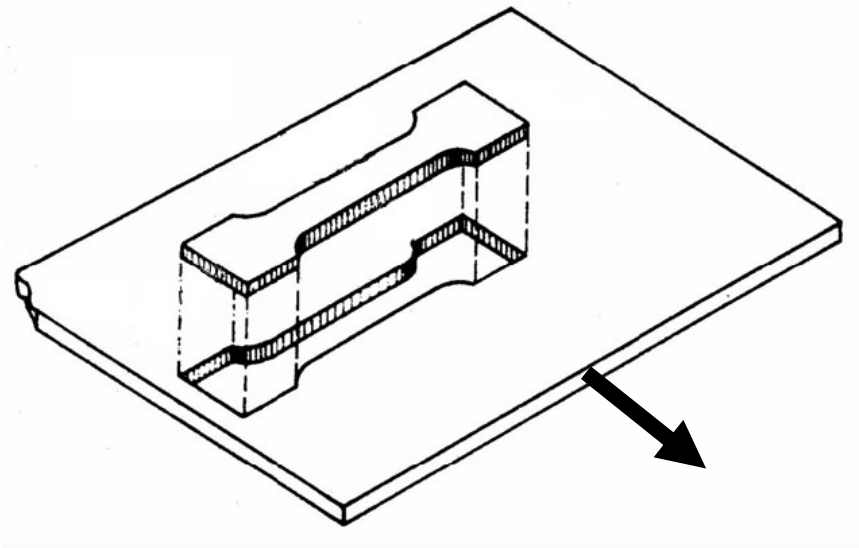


Figura 3.14 – Esquema de retirada dos corpos-de-prova e o sentido da laminação

O valor da tensão limite de escoamento (f_y) para o aço carbono foi obtido, através do patamar de escoamento, conforme gráfico da Figura 3.15, e o valor da tensão limite de ruptura (f_u) foi fornecido pela máquina de tração.

Foram realizados 6 testes de tração, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.5, obtidos através da média aritmética fornecendo os valores médios de tensão limite de escoamento e tensão última para o aço carbono de 386,79 MPa e 478,68 MPa, respectivamente.

Os resultados das amostras apresentaram um desvio padrão de 20,34 para as leituras da tensão limite de escoamento e 16,02 para as leituras da tensão limite de ruptura. A fórmula aplicada para achar o desvio padrão com o fator de correção de Bessel é apresentada na equação (3.10).

$$S = \sqrt{\frac{\sum \left(Xi - \overline{X}\right)^2}{n-1}} \qquad (3.10)$$

Os resultados das amostras apresentaram um coeficiente de variação de 0,05 (5%) para as leituras da tensão limite de escoamento e 0,03 (3%) para as leituras da tensão limite de ruptura. Onde o coeficiente de variação (υ) é uma medida adimensional da dispersão que pode ser expressa em porcentagem $\upsilon = \frac{S}{\mu}$, onde μ é a média.

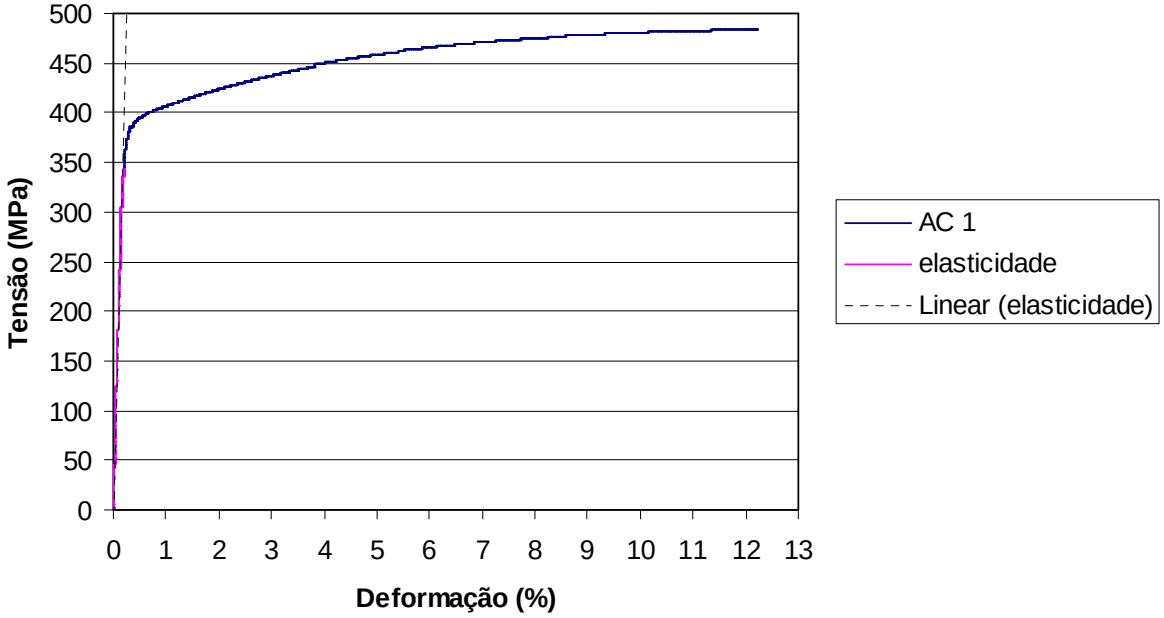


Figura 3.15 – Curva tensão *versus* deformação do aço carbono

Tabela 3.5 – Tensões limites do aço carbono

Corpo-de-prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)
AC 1	388,97	485,97
AC 2	383,77	478,43
AC 3	348,29	450,55
AC 4	404,39	495,91
AC 5	401,31	488,81
AC 6	394,01	472,43
Média	386,79	478,68

3.7 Corpos-de-prova das placas de aço inoxidável

Da mesma forma foram determinadas as tensões de escoamento e de ruptura do aço inoxidável. A obtenção da tensão limite de escoamento para o aço inoxidável foi feita através da reta paralela ao trecho inicial correspondente a uma deformação de 0,2%, conforme pode ser observado na Figura 3.16.

Foram realizados também, seis ensaios cujos resultados são apresentados na Tabela 3.6, os valores médios para a tensão limite de escoamento e para a tensão última foram iguais a 350,62 MPa e 710,72 MPa, respectivamente.

Os resultados apresentaram um desvio padrão de 3,70 para a tensão limite de escoamento e 15,10 para a tensão limite de ruptura.

Os resultados das amostras apresentaram um coeficiente de variação de 0,01 (1%) para as leituras da tensão limite de escoamento e 0,02 (2%) para as leituras da tensão limite de ruptura.

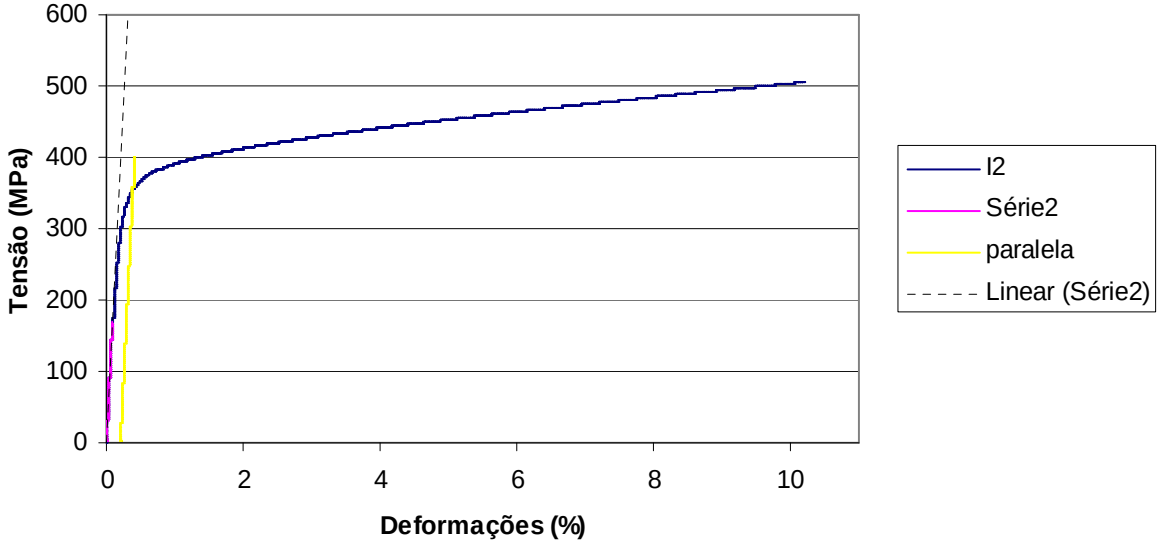


Figura 3.16 – Curva tensão *versus* deformação do aço inoxidável

Tabela 3.6 – Tensões limites do aço inoxidável

Corpo-de-prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)
I 1	388,97	485,97
I 2	383,77	478,43
I 3	348,29	450,55
I 4	404,39	495,91
I 5	401,31	488,81
I 6	394,01	472,43
Média	350,62	710,72

3.8 Critério de dimensionamento

Conforme citado anteriormente, este trabalho utilizou a norma européia para o dimensionamento da ligação aparafusada. Para a ligação constituída de elementos

de aço carbono, utilizou-se o EUROCODE 3, part 1-8 (2005) e para elementos de aço inoxidável o EUROCODE 3, part 1.4 (2003).

Conforme mencionado anteriormente em uma chapa com presença de furo, o colapso é caracterizado quando ocorre o escoamento da área bruta ou a ruptura da área líquida. Na Figura 3.17, apresenta-se o comportamento de chapas com furo sujeita a um esforço de tração devido a uma carga axial crescente monotônica.

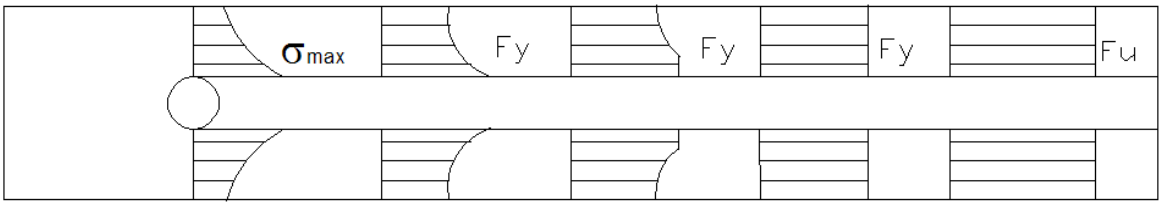


Figura 3.17 – Evolução de tensões normais – placa sujeita a carregamento axial

Com o furo, a área bruta diminui, provocando assim um escoamento precoce da seção da chapa, porém a carga que leva a estrutura a ruína será a mesma. Com a presença de mais furos na seção transversal, e estes com defasagem como mostrado na Figura 3.5, dificulta-se a identificação da seção mais crítica da peça.

3.9 Avaliação da ligação aparafusada para o aço carbono e aço inoxidável

Antes da realização de ensaios com aplicação de esforço axial, foi necessário avaliar a ligação aparafusada. Desta forma, foram verificados os seguintes estados limites últimos: a plastificação da área bruta, o rompimento na seção líquida passando em dois furos e três furos, o esmagamento da placa na área dos parafusos e o cisalhamento dos parafusos.

Esta análise foi feita tendo em mente a variação dos parâmetros s e p e a limitação da capacidade de carga da máquina de tração.

Assim, foi possível escolher a melhor configuração geométrica, que proporcionasse um melhor aproveitamento dos dados coletados para avaliação da ligação aparafusada alternada.

Para atingir o objetivo exposto acima foi escolhido o valor para o parâmetro p de 55 mm, e com a utilização das equações fornecidas pela Norma e utilizando o programa Excel foram construídas as curvas apresentadas na Figura 3.18 de tal

forma que o limite para a ruptura da seção líquida em dois ou três furos fosse identificado. Uma análise similar feita para o aço inoxidável gerando os limites identificados pelas curvas da Figura 3.19.

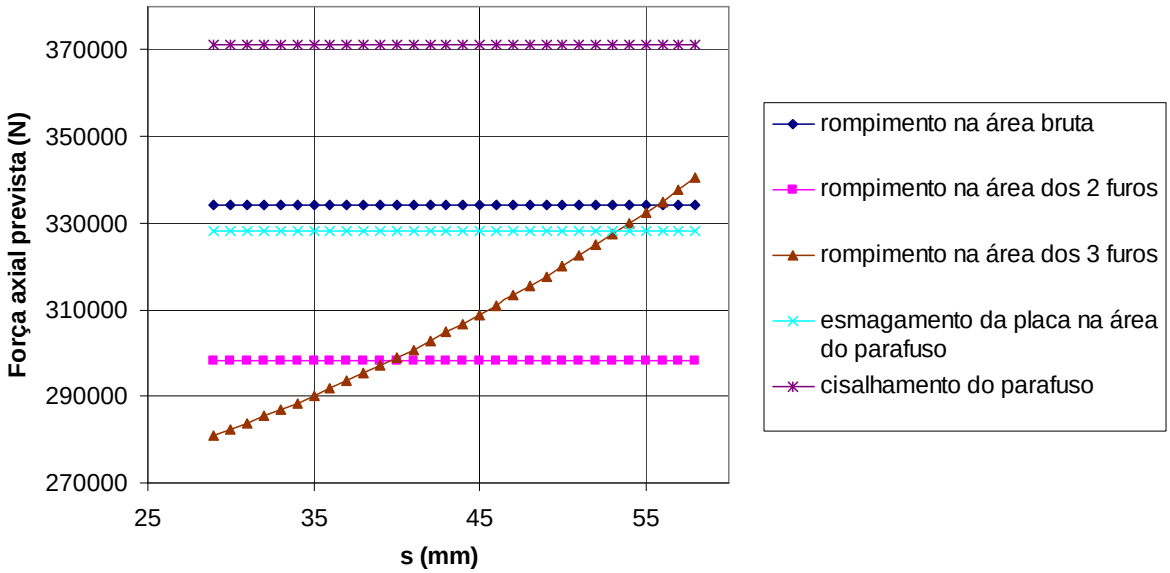


Figura 3.18 – Tensões limites do aço carbono

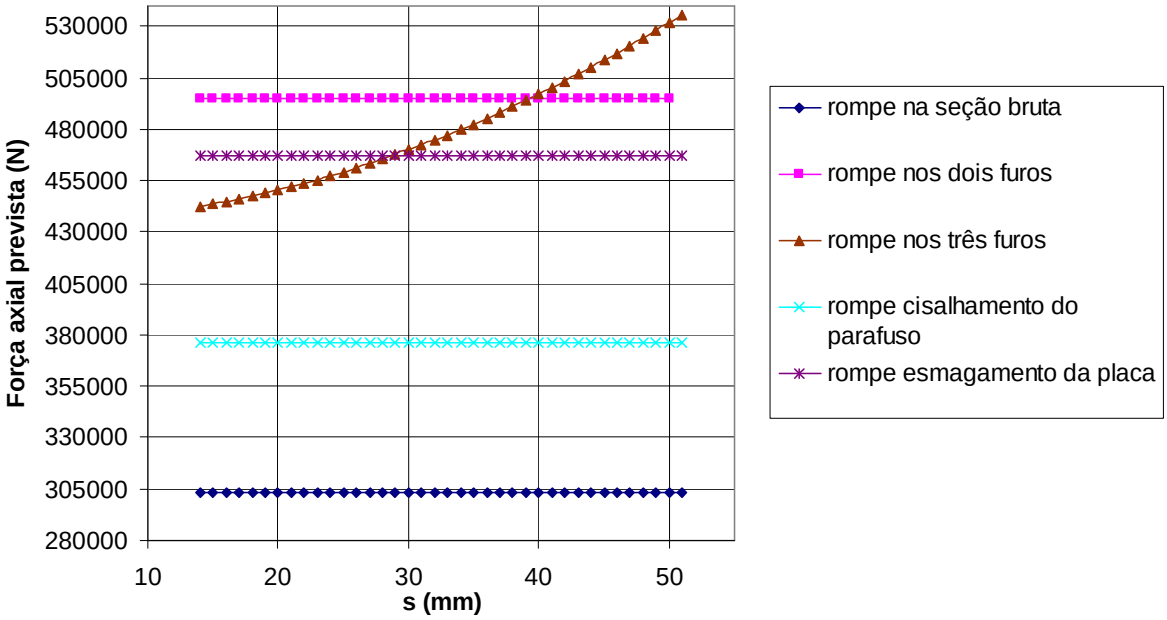


Figura 3.19 – Tensões limites do aço inoxidável

Este capítulo apresentou de forma global, a significância dos principais parâmetros e suas interações, que influenciam o comportamento da ligação aparafusada alternada, também foram apresentados alguns trabalhos existentes na área teórica do comportamento do aço à tração, e a diferença do comportamento teórico entre o aço carbono e o aço inoxidável. O próximo capítulo conterá a descrição de como foram feitos os ensaios experimentais

4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 Introdução

Conforme citado em capítulos anteriores, a caracterização da resistência das ligações aparafusadas alternadas, submetidas à tração é representada, basicamente, pela curva tensão *versus* deformação ou da curva tensão *versus* deslocamento, que foram dados importantes para o projeto e análise destas ligações.

A melhor forma de se obter estas curvas é através de ensaios experimentais realizados em laboratório. Com estes ensaios, torna-se possível avaliar os resultados para determinação da rigidez da ligação e encontrar a sua capacidade última de carga, a partir destes dados é possível analisar e comparar as propriedades mecânicas e geométricas das ligações investigadas.

Todavia, o planejamento dos ensaios a serem realizados deve ser feito de forma bastante criteriosa para que se consiga extrair todas as informações necessárias para a avaliação do fenômeno em questão.

Entretanto, o elevado custo destes ensaios e a dificuldade de medição dos resultados experimentais fazem com que esta não seja uma técnica adotada correntemente na prática.

4.2 Caracterização dos ensaios

Para o dimensionamento de ligações submetidas a esforços de tração, consideram-se alguns critérios:

a) usualmente em ligações aparafusadas, a largura dos furos deve ser considerada 2,0 mm maior que a dimensão nominal desses furos, perpendicular à direção da força aplicada (EUROCODE 3, 2003);
b) no caso de uma série de furos distribuídos transversalmente ao eixo da barra, em diagonal a esse eixo ou em ziguezague, a largura líquida desta parte da barra deve ser calculada deduzindo-se da largura bruta a soma das larguras de todos os furos em cadeia. A este resultado se soma, para cada linha

ligando dois furos, a uma parcela igual ao resultado da razão $s^2/4p$, as grandezas s e p, representam respectivamente, os espaçamentos longitudinal e transversal entre os dois furos considerados;

c) a largura líquida crítica da barra sob tração considerada será obtida pela cadeia de furos que produza a menor das larguras líquidas, para as diferentes possibilidades de linhas de ruptura analisadas;
d) para cantoneiras, o gabarito, p, dos furos em abas opostas deve ser considerado igual à soma dos gabaritos, medidos a partir da aresta da cantoneira, subtraída de sua espessura adotando assim uma largura medida na espessura média do elemento analisado;
e) na determinação da área líquida de uma seção que compreenda soldas de tampão ou soldas de filete em furos, a área do metal da solda deve ser desprezada;
f) não havendo furos a área líquida A_n, se torna igual a área bruta, A_g.

De forma a atingir os objetivos propostos, algumas especificações de chapas, tipos de materiais e arranjos de parafusos das ligações aparafusadas tiveram que ser definidas e são apresentadas a seguir:

a) Foram utilizadas chapas de aço carbono do tipo USI 300, doadas pela USIMINAS e chapas de aço inoxidável austenítico da linha S304, doadas pela ACESITA, devido ao seu uso corrente na construção civil;
b) Uso de parafusos de alta resistência ASTM A325, de ½ polegada com rosca em toda sua extensão, conforme Figura 4.1, e sendo garantido que sua resistência ao corte não seria ultrapassada, de modo a poder avaliar insistentemente os efeitos das diferentes configurações de parafusos possíveis, ou seja, variando os valores de s e p, para que produzindo diferentes áreas líquidas, os caminhos A, B e C de rupturas, pudesse ser avaliados conforme Figura 4.2;
c) Garantia de nenhuma excentricidade em relação ao centro de gravidade da seção transversal da ligação aparafusada, utilizado o esquema de ligação da, Figura 4.3, buscando avaliar, sem a influência de momentos indesejáveis, o comportamento da ligação.

d) Definição de valores limites de afastamento dos furos à borda das chapas, na direção do carregamento, e na direção transversal ao carregamento, de modo a garantir as menores dimensões das peças e conseqüentemente menores placas, para que o conjunto estivesse ajustado ao espaço útil e a capacidade de carga da máquina de tração;

e) Utilização de corpos-de-prova para caracterização do comportamento dos materiais aço carbono e aço inoxidável através de ensaios de tração;

f) uso de broca para furar as chapas finas com a utilização de líquido resfriante, impedindo assim o surgimento de tensões residuais nos furos;

g) Uso de chapa base super dimensionada com espessura de 15 mm, de modo a garantir uma faixa de regime elástico, posicionadas com um afastamento mínimo de 10 mm uma da outra;

h) A não utilização de valores específicos de torque durante aperto dos parafusos, de modo a se desprezar o efeito do atrito no resultado final das cargas de escoamento e ruptura;

i) O uso de arruelas junto às porcas do parafuso, proporcionando apenas um ajuste mais suave ao leve aperto dado às mesmas.

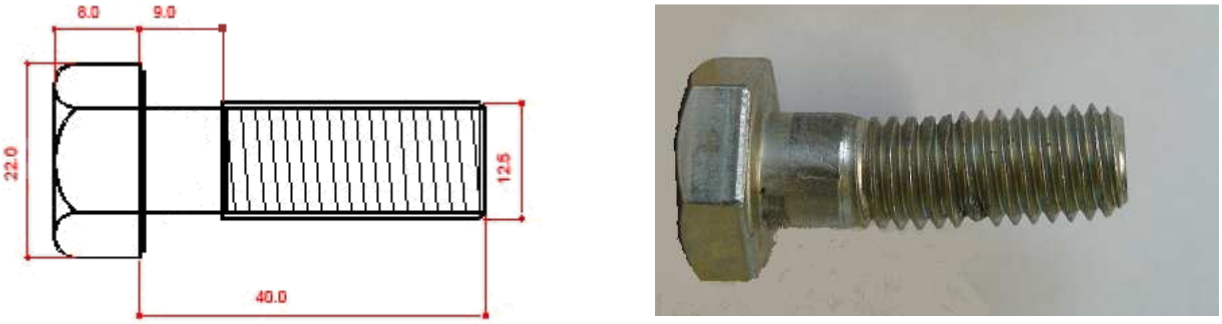


Figura 4.1 – Detalhe do parafuso ASTM A325 M12 cl. 8.8 (Lima, 2003)

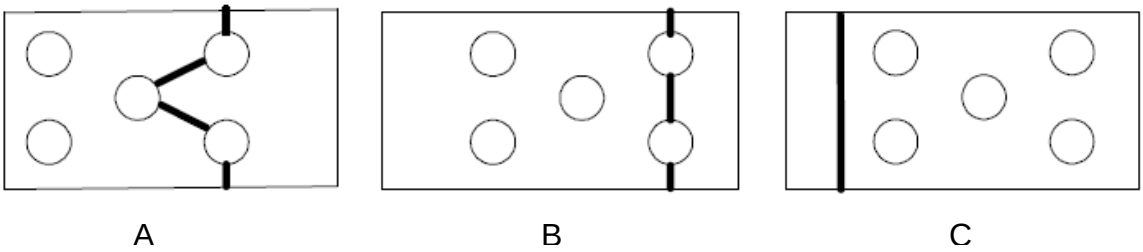
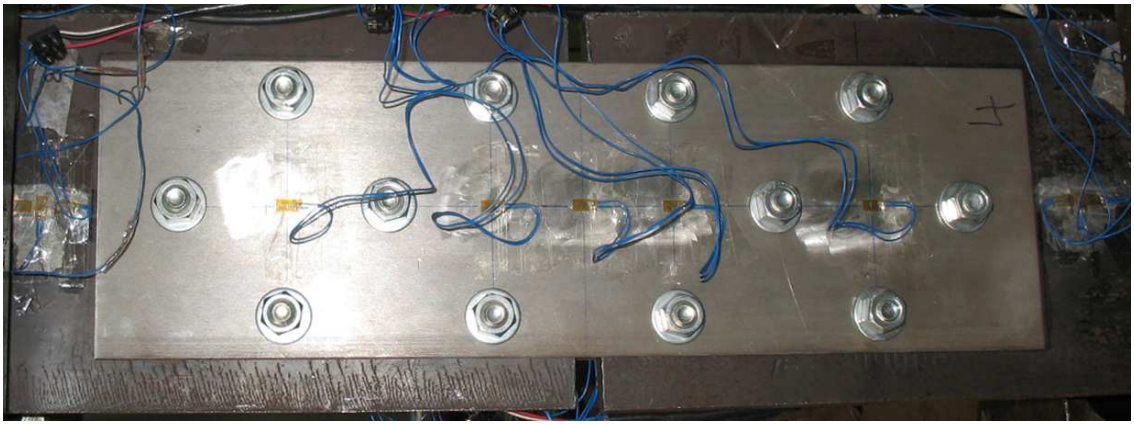
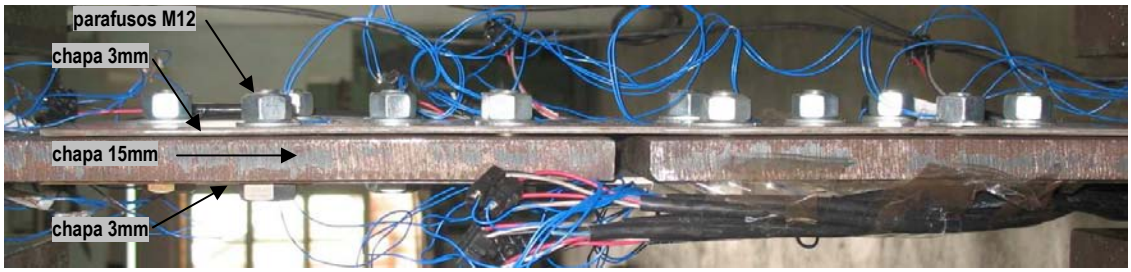


Figura 4.2 – Caminhos de ruptura possíveis para a ligação em estudo



a) vista de frente



a) vista lateral

Figura 4.3 – Esquema da ligação aparafusada alternada

4.3 Definição dos parâmetros geométricos

Considerando-se os gráficos apresentados na Figura 3.18 e na Figura 3.19, e observando-se o menor gasto de material, a capacidade da máquina de tração e o espaço físico para fixação dos espécimes, foi definido um valor da variável p igual a 55 mm e foram escolhidos valores da variável s que caracterizassem, respectivamente, a ruptura da ligação na área líquida passando por dois furos, a ruptura da ligação na área líquida passando por três furos, para após determinar um valor da variável s intermediário caracterizando uma ruptura entre estes dois limites anteriores. Para o início dos ensaios foi construída a Tabela 4.1, com uma previsão da primeira seqüência de testes.

Tabela 4.1 – A primeira seqüência de ensaios em aço carbono

Ordem	Identificação	s (mm)	p (mm)	Carga de ruptura (kN)	Modo de ruptura
1	E1_CARB_S50	50	55	298,3	2F
2	E2_CARB_S30	30	55	282,5	3F
3	E3_CARB_S40	±40	55	297,6	2F ou 3F

onde:

3F – representa a ruptura na área líquida passando por três furos

2F – representa a ruptura na área líquida passando por dois furos

4.3.1 Preparação dos ensaios

As chapas foram cortadas e furadas na fábrica METALFENAS, conforme descrição a seguir: As chapas finas (3 mm) foram marcadas com régua, esquadro e riscador, e cortadas na guilhotina, primeiramente puncionadas para depois serem furadas, inicialmente com broca de 1/4 polegada. Em seguida, os furos foram alargados com broca de 9/16 polegada, sendo utilizado sempre óleo resfriante no processo de furação. As chapas grossas (15 mm) foram marcadas com riscador e cortadas com maçarico e furadas por meio de uma punção com diâmetro de ½ polegada.

Todo o processo foi supervisionado e acompanhado de perto, com gabaritos, paquímetro eletrônico e trena, para que as dimensões das chapas ficassem o mais próximo possível dos valores projetados para a execução dos ensaios.

4.3.2 Preparação do sistema de aplicação de carga

Depois da ligação montada conforme o esquema da Figura 4.3, o conjunto era colocado na máquina de tração, posicionado e centralizado nas garras, com a ajuda de régua milimetrada e nível de bolha, somente após estas etapas as garras eram apertadas.

Devido à grande largura das placas teve que se adaptar o aperto das garras, pois o mecanismo de aperto original da máquina de ensaio teve de ser retirado, pois impedia o posicionamento correto do conjunto de placas.

4.3.3 Preparação da célula de carga para a medida e aferição das cargas aplicadas

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica, de sensores denominados extensômetros elétricos (Figura 4.4), quando submetido a uma deformação. Utilizam-se em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo uma ponte de Wheatstone (Figura 4.5). O desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada.

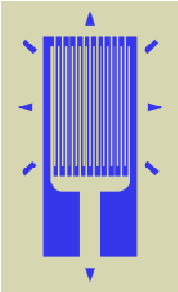


Figura 4.4 – Detalhe do extensômetro[7]

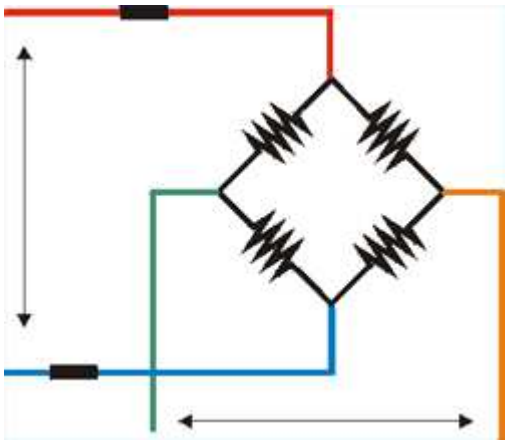


Figura 4.5 – Ponte de Wheatstone[6]

Neste trabalho, os extensômetros foram colados na chapa grossa de 15 mm de espessura, denominada corpo da célula de carga sendo inteiramente solidários à sua deformação.

Para cada ensaio foram colados oito extensômetros, quatro em cada extremidade da chapa grossa, ou seja, dois por face, conforme o detalhe na Figura

---

[7] http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm

4.6, totalizando duas células de carga, segundo o esquema da Figura 4.8. A força atua, portanto, sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é medida pelos extensômetros, que por sua vez produzirão uma variação de voltagem, que será lida no Sistema de Aquisição de Dados, composto por duas placas de captura: uma para deslocamentos e outra para deformações.

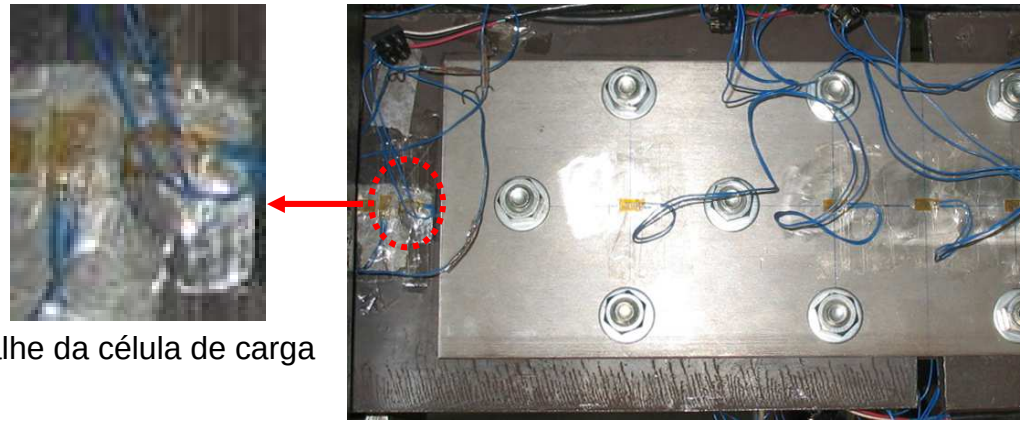


Figura 4.6 – Célula de carga

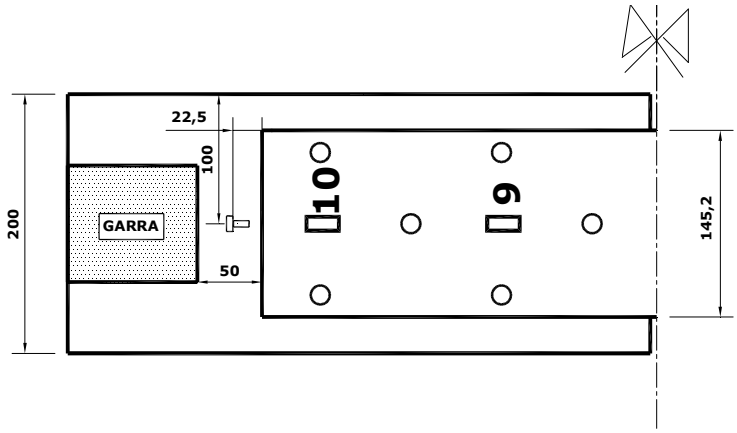


Figura 4.7 – Localização dos extensômetros da célula de carga

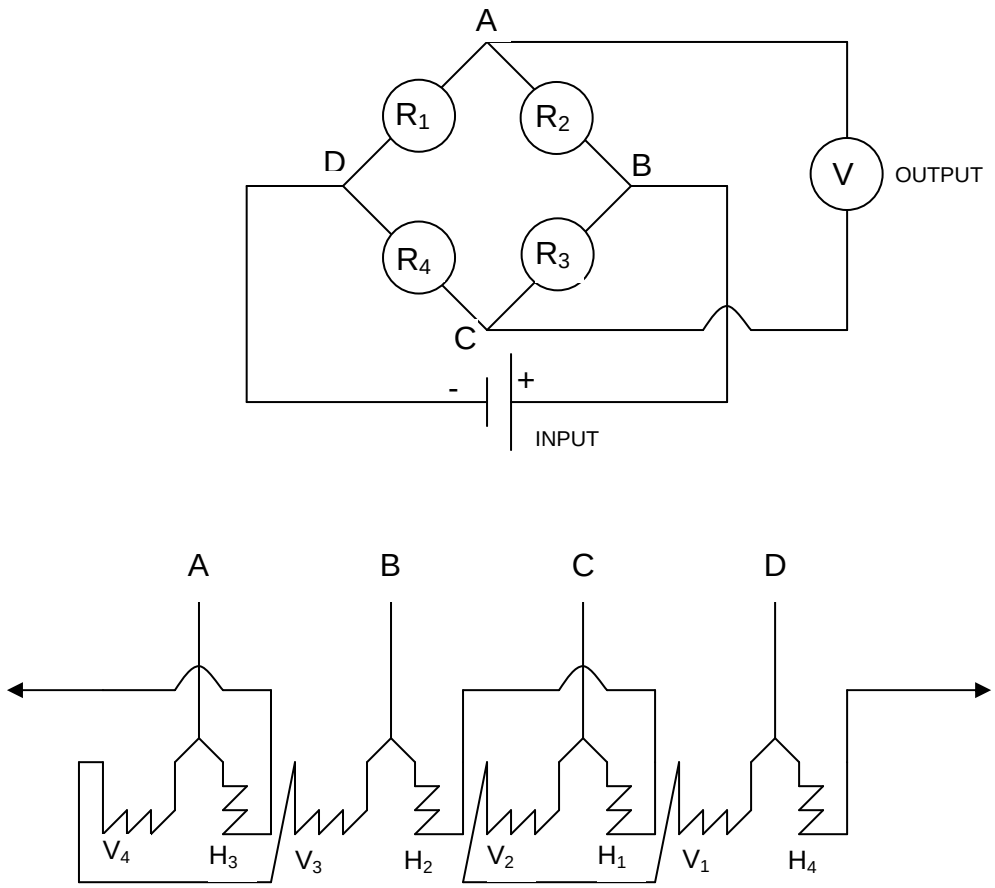


Figura 4.8 – Esquema da montagem da célula de carga (PUC-DEC, 1993)

Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objeto de um meticuloso cuidado, tanto no seu projeto quanto na sua execução. Visando assegurar que a relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a conseqüente deformação medida pelos extensômetros seja preservada, tanto no ciclo inicial de aplicação da força, quanto nos ciclos subseqüentes, buscou-se garantir que a carga de ruptura das chapas finas não ultrapassasse a carga limite de escoamento da placa grossa.

Buscando produzir resultados efetivos e lineares foi observada a forma geométrica do corpo da célula de carga, escolhendo as duas faces mais largas para a colagem dos extensômetros.

Considerando que a carga limite de escoamento das chapas finas calculada de aproximadamente 200 kN, uma carga inicial de 50 kN foi utilizada para efetuar o ajuste dos parafusos na ligação e confirmar o comportamento linear da célula de carga de cada ensaio.

Buscando retirar a histerese do sistema, Figura 4.9, aplicou-se uma carga de 50 kN por repetidas vezes, ou seja, observando a mesma variação de voltagem decorrente da aplicação da mesma carga. Este objetivo foi alcançado, através da utilização do aço, material isotrópico, e da correta aplicação da força sobre a célula de carga.

Finalmente, foi considerado o fenômeno da fluência, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresentam-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma, conforme apresentado na Figura 4.10.

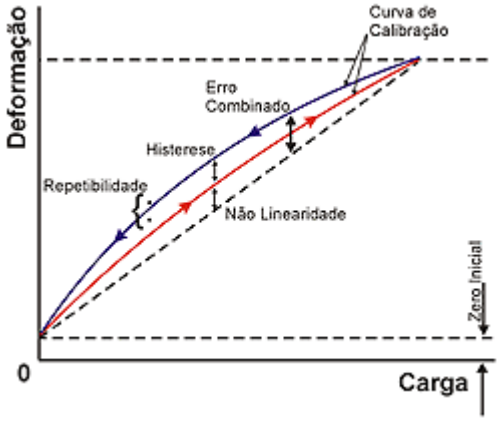


Figura 4.9 – Histerese do sistema[8]

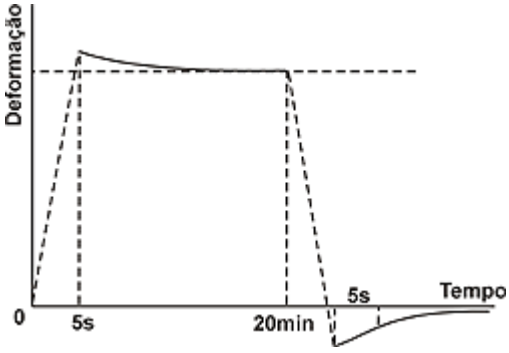


Figura 4.10 – Fenômeno da "fluência" ou creep[7]

Além destes extensômetros, que em conjunto forneciam a carga que estava sendo aplicada em cada instante do ensaio, foi usado mais um extensômetro

---

8 http://www.celuladecarga.com.br/info/definicao.htm

adicional, para confirmar de forma independente, a deformação linear da chapa grossa.

Antes de cada ensaio, estes conjuntos de extensômetros, em cada extremidade da ligação, perfazendo duas células de carga, eram calibrados a fim de se levantar a equação de reta que forneceria o valor da carga durante o ensaio

O levantamento desta equação de reta foi feito através de aplicação de carga crescente, com leituras de variação de voltagem a cada 0,2 kN, até alcançar a carga limite de 50 kN. Este processo foi repetido por quatro vezes, obtendo quatro conjuntos de leituras, onde o primeiro conjunto de leituras sempre foi desprezado, pois neste momento, observou-se que a acomodação dos parafusos ocorria.

Com estes três conjuntos de leituras de variação de voltagem foi possível construir dois gráficos de carga *versus* variação de voltagem e com estes resultados levantar duas equações de reta, que correspondiam às duas células de carga montadas nas extremidades superior e inferior da ligação aparafusada. De posse destas equações foi possível programar o Sistema de Aquisição de Dados, para que este fornecesse instantaneamente a carga que estava sendo aplicada na ligação aparafusada.

Portanto durante cada ensaio tinha-se disponível duas células de carga produzindo duas leituras de carga independentes acompanhadas através do computador, além de uma leitura visual do mostrador analógico da máquina, como pode ser visto na Figura 4.11.

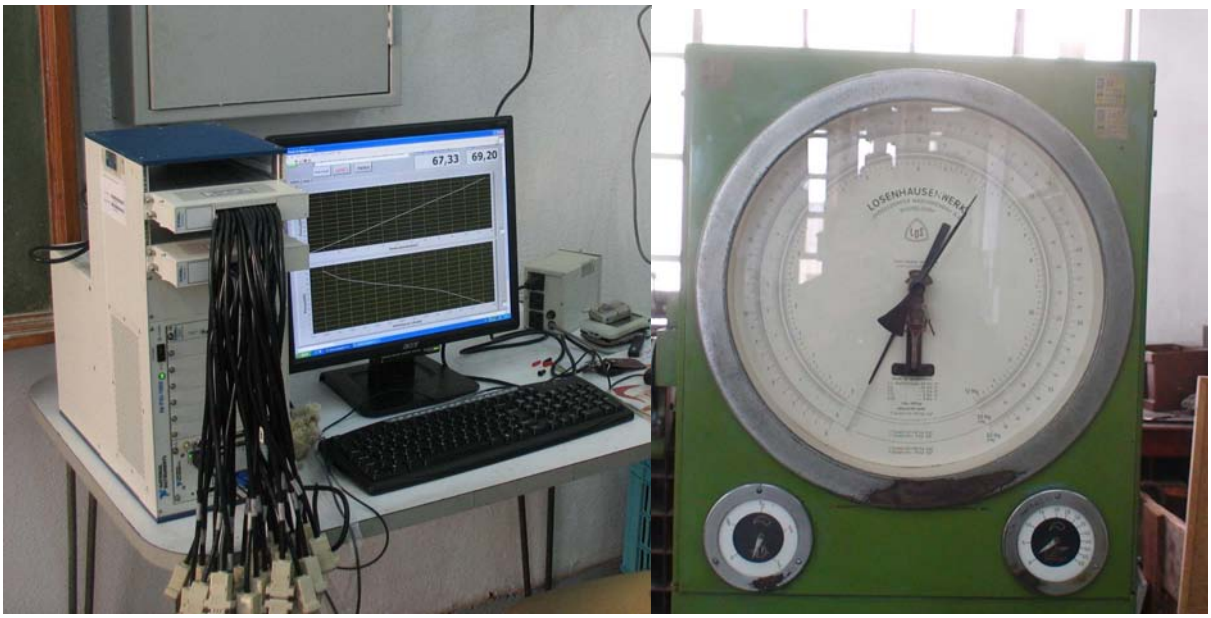


Figura 4.11 – Leitura da carga digital e analógica

4.3.4 Instrumentação

Todos os ensaios tiveram sua própria nomenclatura que é apresentada na Tabela 4.2 na página 83.

Para acompanhar a deformação nas placas de cada ensaio foram colados cinco extensômetros em cada placa, para averiguar a deformação em locais específicos da placa de ensaio, conforme a foto do ensaio E3_CARB_S50, mostrada na Figura 4.12.

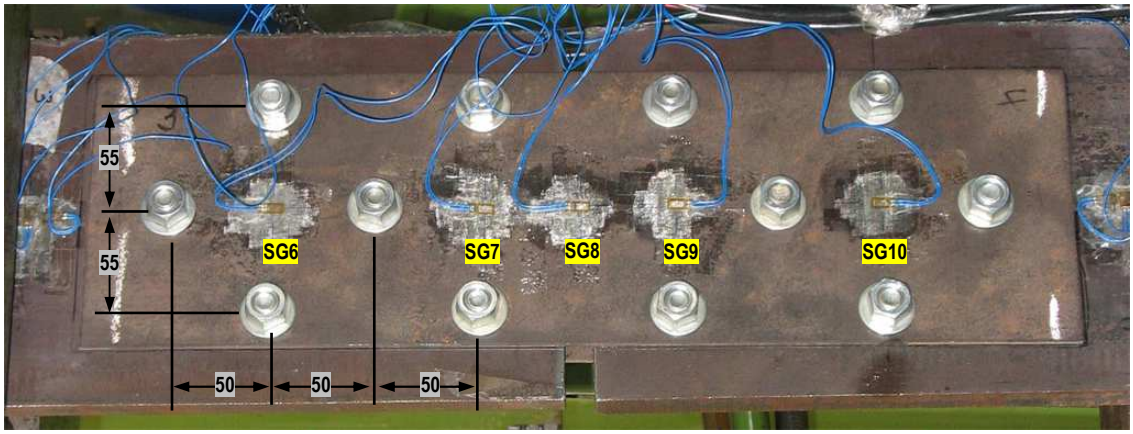


Figura 4.12 – Posicionamento dos extensômetros - Ensaio E3_CARB_S50

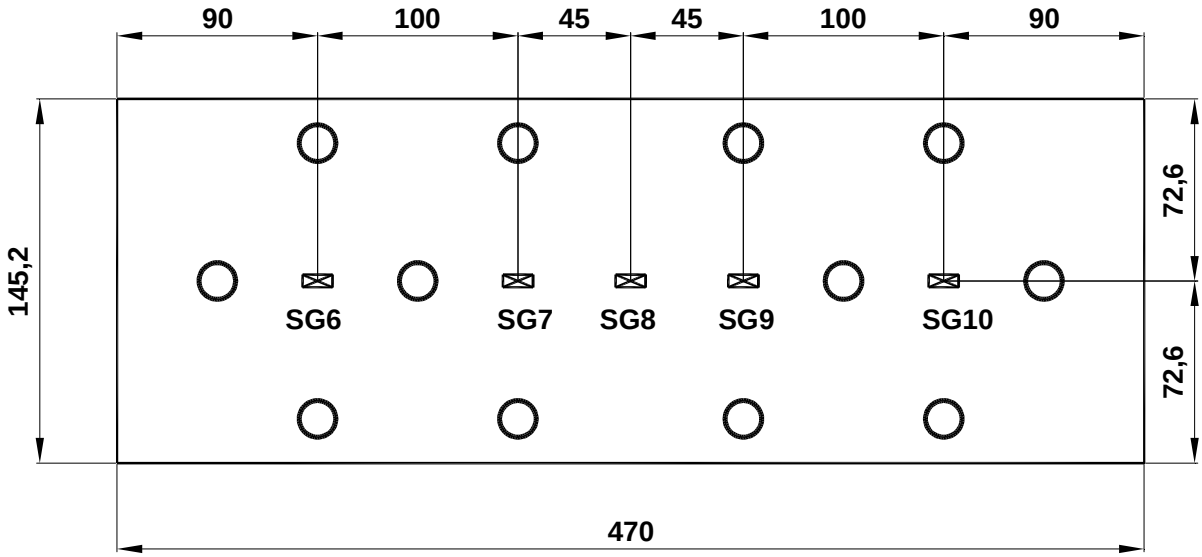


Figura 4.13 – Cotas dos extensômetros em milímetros - Ensaio E3_CARB_S50

O extensômetro é um sensor de deformação que pode ser usado diretamente em peças na avaliação de deformações superficiais ou em diversos sistemas

mecânicos, compondo assim transdutores para grandezas como: deformação, pressão, força, aceleração, etc. Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência de um material metálico depositado sobre um polímero o qual pode ser colado na superfície sob análise. Ao se deformar longitudinalmente, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando assim a deformação da superfície.

São apresentados abaixo os procedimentos típicos de colagem de extensômetros em corpos-de-prova, que foram utilizados neste trabalho.

Primeiramente foi marcada a região na qual seria colado o extensômetro, em seguida a superfície desta região foi totalmente polida, para que se garantisse uma superfície livre de imperfeições, que poderia interferir no funcionamento do extensômetro, além de proporcionar uma boa aderência. Para atingir esse nível de rugosidade, foi utilizada uma máquina tipo “drill” da marca Western, com capacidade de 30.000 rpm, com cabo extensor, efetuando o lixamento da superfície com três tipos de lixas de granulometria diferentes: 200, 150, 100, respectivamente.

A limpeza da região se fez com acetona, uma solução química desengraxante, aplicada várias vezes com utilização de algodão, e com muito cuidado, evitando contato humano com a superfície limpa, ou seja, para não haver contaminação da superfície com gordura das mãos.

Novamente é feita a marcação da superfície da chapa com linhas perpendiculares para se efetuar a colagem precisa do extensômetro. O posicionamento do extensômetro foi feito de modo que houvesse coincidência dessas linhas perpendiculares com marcas próprias do extensômetro. Neste momento foi feita a fixação provisória, com a utilização de fita adesiva. A cola utilizada foi a cola de secagem rápida da marca Loctite 496, aplicada diretamente sobre a superfície do extensômetro que seria colada na placa de ensaio

Com a utilização de uma pinça era levantado extensômetro, e com o cotonete embebido com acetona era retirada a marca feita na placa, com outro cotonete era secada a mesma região, e só então, a cola era aplicada na superfície de aderência do extensômetro.

Após a fixação do extensômetro sobre a superfície da placa, coloca-se uma forte pressão com o próprio dedo sobre o extensômetro para retirar todas as possíveis bolhas de ar que se formam entre o extensômetro e a placa. Estas bolhas também prejudicam as medições, pois introduzem falsas deformações sobre o extensômetro.

Por último foi feita a proteção do extensômetro com camadas de fita adesiva em várias direções para evitar possíveis arranques de fios ou cabos e ou também choques mecânicos. Toda a operação exige bastante cuidado, devido a delicadeza e fragilidade do extensômetro.

Os extensômetros deste trabalho são da marca EXCEL SENSORES, e foram encomendados com fios mais longos com tamanho aproximado de 30 centímetros, para facilitar a união aos cabos do Sistema de Aquisição de Dados, com a utilização de conectores.

Todo o processo foi executado sempre verificando a resistência do extensômetro antes e depois da colagem, evitando a colagem de extensômetro defeituoso e confirmando a funcionabilidade do extensômetro, antes da execução do ensaio.

Um LVDT (transdutor linear variável diferencial) da marca KYOWA, foi fixado na máquina de tração e ligado ao Sistema de Aquisição de Dados NI-PXI-1050 da *National Instruments*, para fazer as leituras de deslocamento, conforme foto da Figura 4.14 e esquema de montagem na Figura 4.15. Após ser calibrado, fornecia instantaneamente o valor do deslocamento ocorrido na ligação aparafusada, em virtude da aplicação da carga.

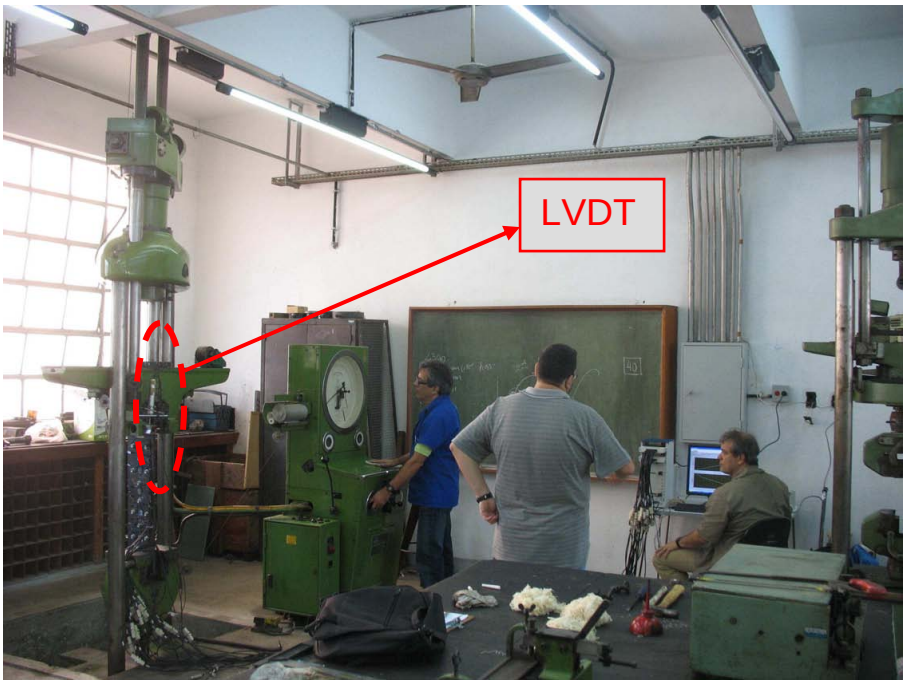


Figura 4.14 – Localização do transdutor linear variável diferencial

Figura 4.15 – Detalhe de localização do LVDT na máquina de tração

4.3.5 Programação em Labview

Para a leitura dos dados foi usado o Programa LabView[9] versão 8.2 da empresa pela *National Instruments*. Foi criada uma tarefa na qual o computador calculava simultaneamente: os valores da célula de carga, o valor do deslocamento e os valores das deformações. Todos estes valores poderiam ser lidos manualmente ou automaticamente. Optou-se pela leitura manual, a cada acréscimo de carga no valor de 10 kN.

Foi criada uma janela de leitura composta de dois gráficos de leituras nos quais apareciam a plotagem, imediata, dos valores de carga *versus* deslocamento e carga *versus* deformação, podendo ser selecionado qual extensômetro deveria ser utilizado em determinado momento. Esta janela mostrava, também, os valores das cargas em kN fornecidas pelas células de carga inferior e superior.

As leituras da máquina foram comparadas com as lidas pelo Sistema e apresentavam, após a ultrapassagem da calibração em 50 kN, uma defasagem média entre as duas células de carga da ordem de 3%, devido ao Fenômeno da fluência, da histerese do sistema e do posicionamento dos extensômetros.

[9] www.ni.com/labview

4.3.6 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados foi composto por um computador e duas placas de captura, que foram ligadas ao experimento, através de cabos, que foram devidamente marcados com números para identificar claramente o posicionamento dos sensores de leitura em relação ao canal de entrada.

Os extensômetros foram calibrados antes do início dos ensaios, garantindo o zero da sua leitura inicial. O mesmo foi feito para o LVDT, porém não foi feito para a célula-de-carga, pois somente a variação da voltagem quando se aplicava determinada carga foi usada.

4.3.7 Dificuldades na preparação dos ensaios

A seguir, a título de experiência, são citadas algumas dificuldades e problemas com as soluções adotadas, que apareceram ao longo do desenvolvimento deste trabalho:

a) O tamanho e o peso das chapas dificultavam a movimentação das mesmas, necessitando de até seis homens para movimentar as chapas grossas de 15 mm de espessura, solução: pedir mais chapas com menores dimensões;
b) O primeiro corte executado nas chapas finas com disco de corte, da marca NORTON, foi muito demorado. A solução foi efetuar o corte em guilhotina.
c) Esta mesma guilhotina tinha que ser supervisionada com muita atenção, pois seu gabarito estava com erro de 1mm, solução: envolveu uma maior atenção na execução dos ensaios;
d) A furação feita inicialmente em máquina de furar de bancada exigia muita precisão e firmeza do operador na execução dos furos, pois não dispunha de área suficiente para prender a chapa, com a segurança necessária para evitar a vibração. A solução foi executar a furação em torno retificador mecânico, produzindo furos muito mais precisos.
e) Os extensômetros confeccionados com fios medindo em média 30 centímetros, apresentavam, no extensômetro, um grande volume de solda, que dificultava a colagem. A solução para este problema foi a diminuição do volume de solda, através da utilização de fios mais finos.

f) Um cabo com mau contato no Sistema de Aquisição de Dados fez, momentos antes do ensaio, com que a numeração tivesse que ser revista na tarefa. Solução: revisar os cabos, com antecedência, antes do início de cada ensaio;

4.4 Apresentação dos ensaios experimentais

Apresenta-se abaixo o quadro resumo dos ensaios experimentais realizados com seguinte nomenclatura:

- E – ensaio;
- 1 – número do ensaio;
- CARB – aço carbono;
- INOX – aço inoxidável;
- S50 – distância em milímetros do parâmetro s, pois o parâmetro p foi fixado em 55 mm;
- P10 – valor da espessura das placas principais utilizadas em substituição às placas principais com 15 mm de espessura.

Cada nomenclatura do ensaio representava as características geométricas, o tipo de aço, a placa base e os parafusos utilizados em cada lado da placa.

Todas as dimensões das figuras desta dissertação estão cotadas em milímetros.

Tabela 4.2 – Configuração dos ensaios experimentais

Ordem	Identificação	s (mm)	p (mm)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	d_0 (mm)	Tipo de aço	Espessura da placa base (mm)	Quantidade de parafusos
1	E1_CARB_S50_a	50	55	40	17,6	14,7	carbono	15	6
2	E2_CARB_S70_a	70	55	40	17,6	14,7	carbono	15	6
3	E3_CARB_S50	50	55	40	17,6	14,7	carbono	15	6
4	E4_CARB_S30	30	55	40	17,6	14,7	carbono	15	6
5	**E5_INOX_S50**	**50**	**55**	**40**	**17,6**	**14,7**	**inoxidável**	**15**	**6**
6	E6_CARB_S30_P10	30	55	40	17,6	14,7	carbono	10	6
7	**E7_INOX_S30**	**30**	**55**	**40**	**17,6**	**14,7**	**inoxidável**	**15**	**6**
8	E8_CARB_S50_P8	50	55	40	17,6	14,7	carbono	8	6
9	**E9_INOX_S23**	**23**	**55**	**40**	**17,6**	**14,7**	**inoxidável**	**15**	**6**

A letra, a, no primeiro e segundo ensaio representa a configuração da furação tipo A, conforme mostrado na Figura 4.16, diferente dos outros ensaios, conforme mostrado na configuração tipo B da Figura 4.16.

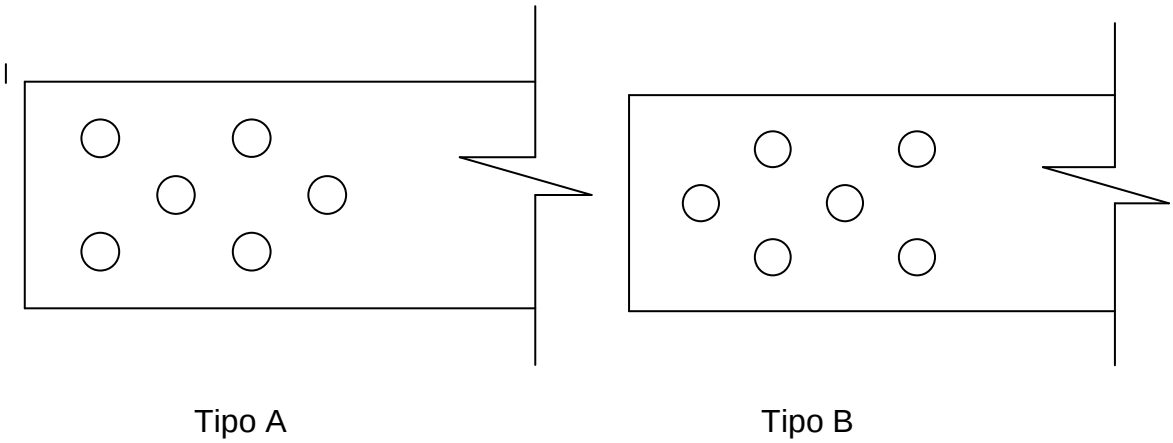


Figura 4.16 – Diferentes tipos de configuração de furação das placas

Todos os ensaios com aço carbono seguiram a seguinte seqüência de aplicação de carga:

1) Aplicação da carga até 100 kN, com leituras de 10 em 10 kN;
2) Retorno da carga até 10 kN com leituras de 20 em 20 kN;
3) Aplicação da carga até 200 kN, com leituras de 10 em 10 kN;
4) Retorno da carga até 10 kN com leituras da carga de 20 em 20 kN;
5) Aplicação da carga até a ruptura, com leituras de 10 em 10 kN.

Abaixo apresenta-se um breve resumo de cada ensaio realizado, definidos na Tabela 4.2, com as fotos e gráficos carga versus deformação do extensômetro mais solicitado, e curva carga versus deslocamento.

4.4.1 Ensaio E1_CARB_S50_a

O primeiro ensaio de uma ligação aparafusada foi feito com placa constituída em aço carbono de espessura de 3 mm, conforme mostrado na Figura 4.18, tinha como valores de s e p, 50 mm e 55 mm, respectivamente.

Este ensaio apresentou ruptura na área líquida dos três furos, com a carga de 312 kN, conforme mostrado na Figura 4.19. Considerando a aplicação de fórmulas

teóricas, mostradas anteriormente, este ensaio tinha como previsão de ruptura na área líquida passando por dois furos, com uma carga última da ordem de 298,3 kN.

Concluiu-se imediatamente que como este valor de s era pequeno, o limite de rompimento na área liquida passando por dois furos ainda não tinha sido alcançado. Para tanto, partiu-se para o segundo ensaio com o valor do parâmetro s aumentado para 70 mm.

Nas Figura 4.20 e Figura 4.21 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o comportamento linear da ligação até a carga de 250 kN, fase elástica da ligação. Pode-se, também, observar os valores de deslocamento e deformação associados a carga última, ≈1800με e ≈14 mm, respectivamente.

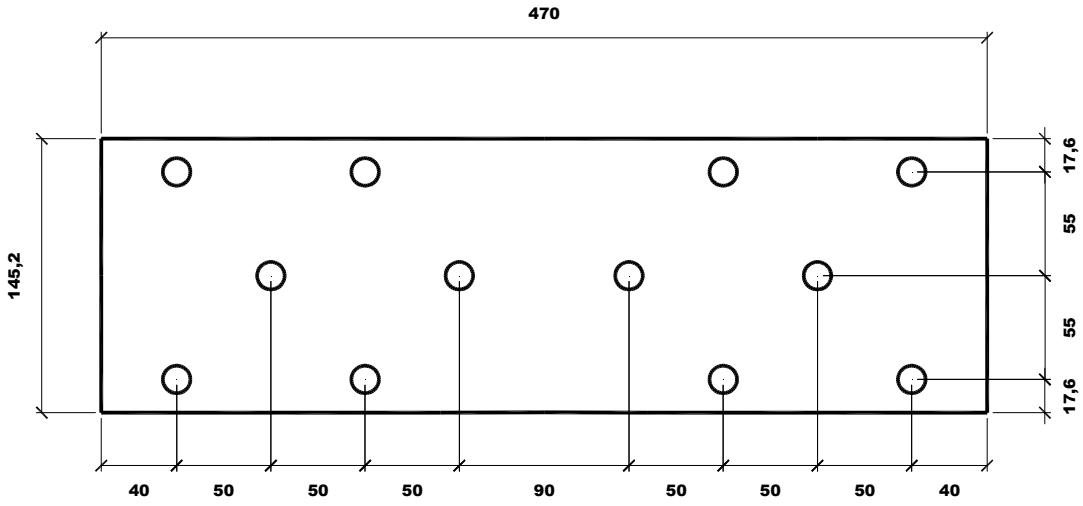


Figura 4.17 – Desenho geométrico do Ensaio E1_CARB_S50_a

Figura 4.18 – Ensaio E1_CARB_S50_a

Figura 4.19 – Ruptura do ensaio 1 - E1_CARB_S50_a

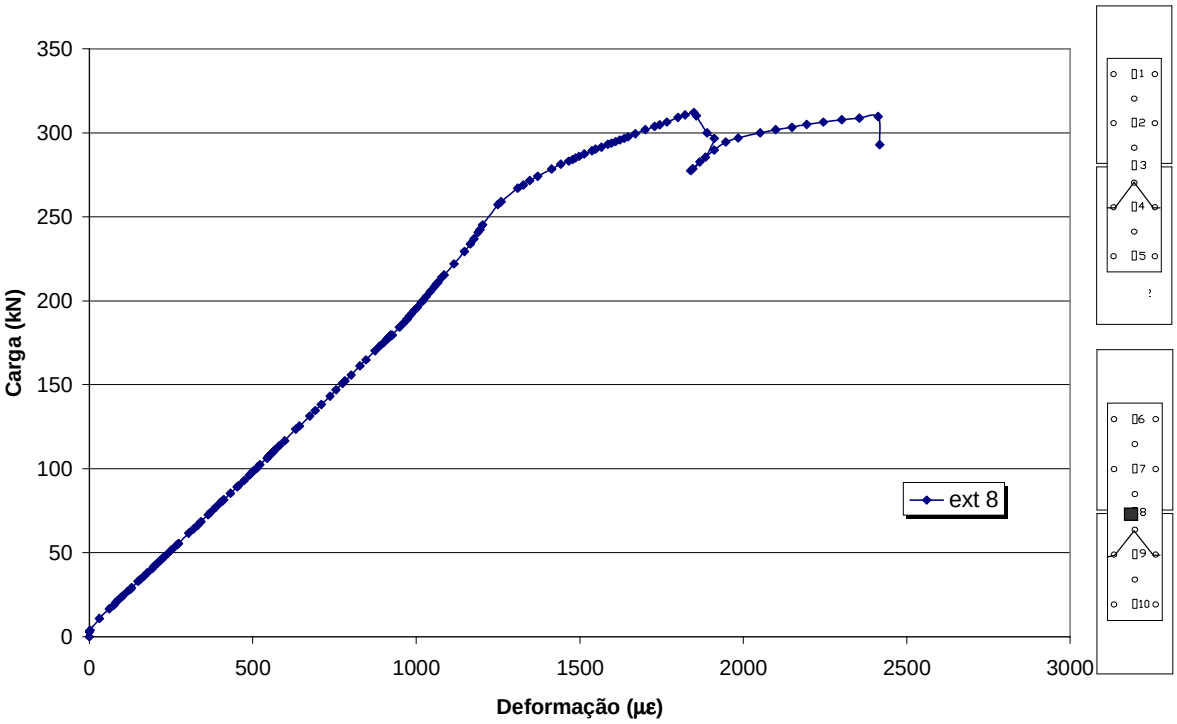


Figura 4.20 – Gráfico carga *versus* deformação - E1_CARB_S50_a

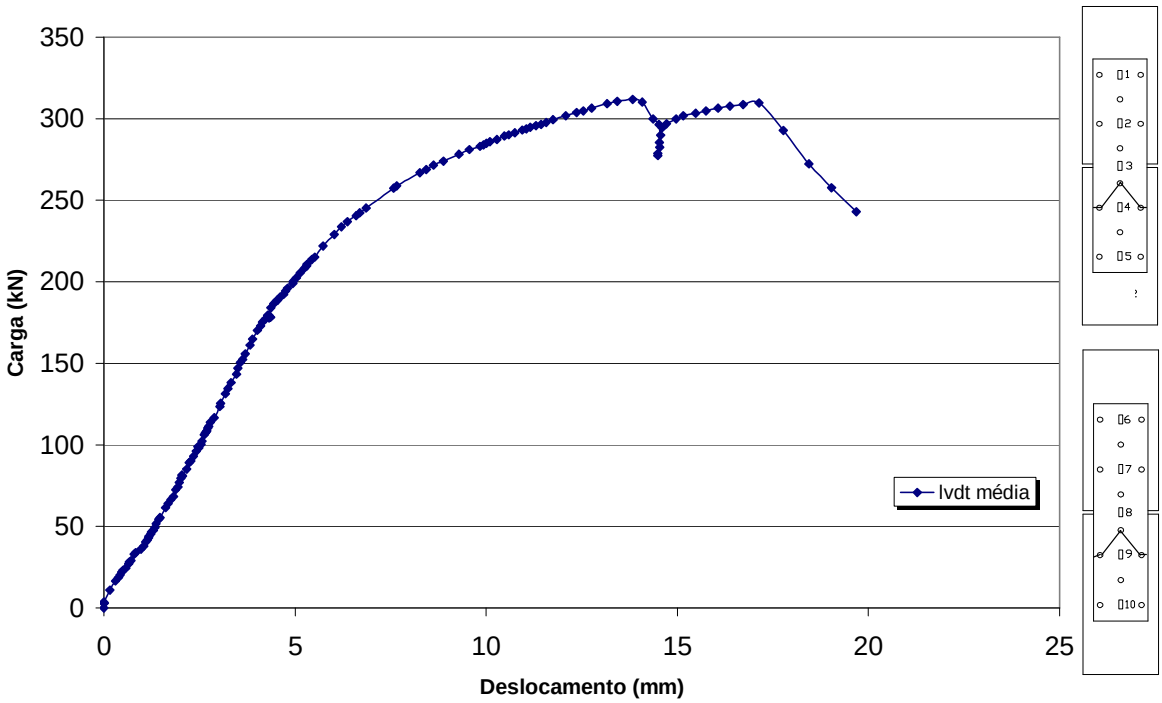


Figura 4.21 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E1_CARB_S50_a

4.4.2 Ensaio E2_CARB_S70_a

O segundo ensaio teve o mesmo tipo de aplicação comum aos ensaios de aço carbono, e apresentou a ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme seqüência de fotos mostrada na Figura 4.23. Através do cálculo teórico era esperada a ruptura na área líquida passando por dois furos com uma carga de 298,3 kN, porém a ligação rompeu na área líquida passando por um furo com a carga de 349,5 kN, mostrando que a ligação aparafusada estava apresentando um comportamento de ruptura diferente do esperado. A carga última de ruptura do ensaio ficou longe da carga teórica, provando a concentração de tensões na área líquida do último furo. Concluiu-se pela influência da rigidez da placa de espessura de 15 mm na distribuição da carga pelos parafusos, e que a ligação poderia estar tendo as suas tensões concentradas nos últimos furos.

Os gráficos deste ensaio são mostrados na Figura 4.24 e Figura 4.25, respectivamente.

Para verificar esta questão foi proposto o próximo ensaio no qual seriam repetidos os valores de s e p do primeiro ensaio, porém com uma configuração

geométrica diferente dos parafusos na ligação em relação aos dois primeiros ensaios.

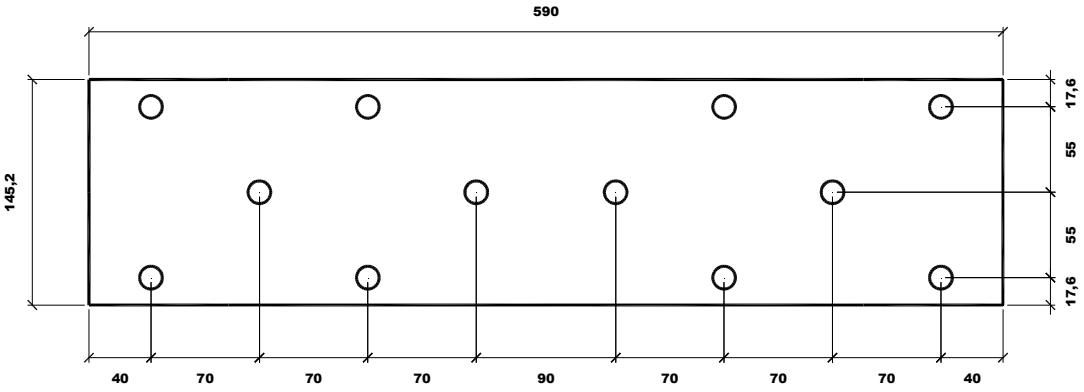


Figura 4.22 – Desenho geométrico do ensaio E2_CARB_S70_a

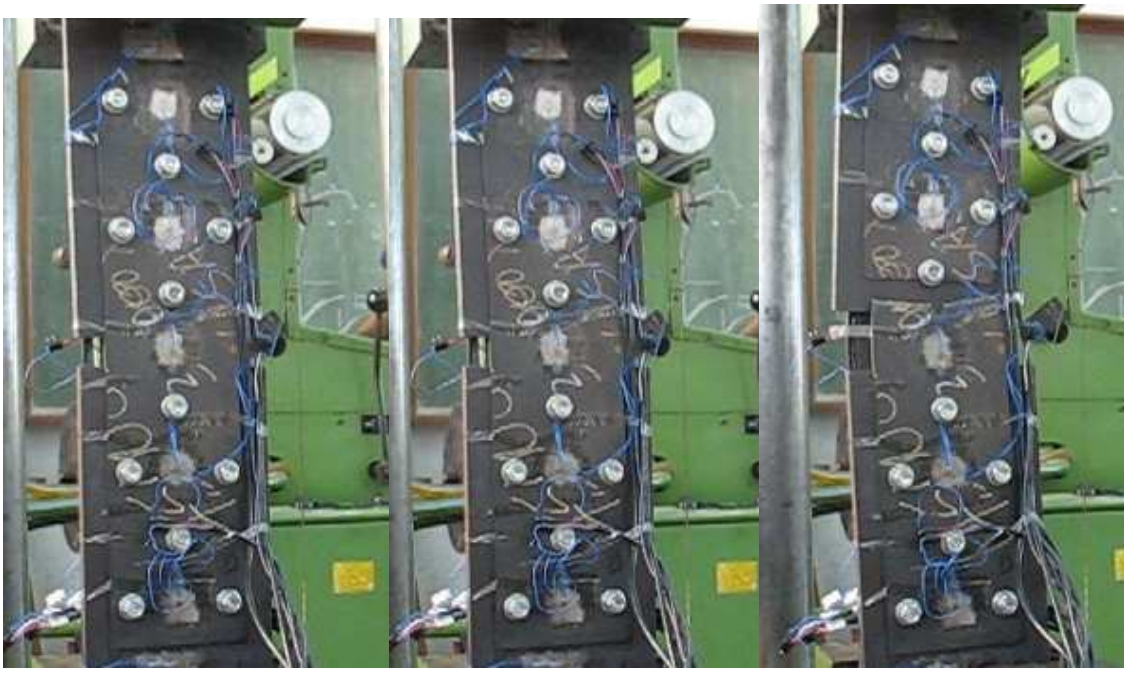


Figura 4.23 – Seqüência de ruina do ensaio E2_CARB_S70_a

Nas Figura 4.24 e Figura 4.25 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o comportamento linear da ligação até a carga de 250 kN, fase elástica da ligação. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 30 mm.

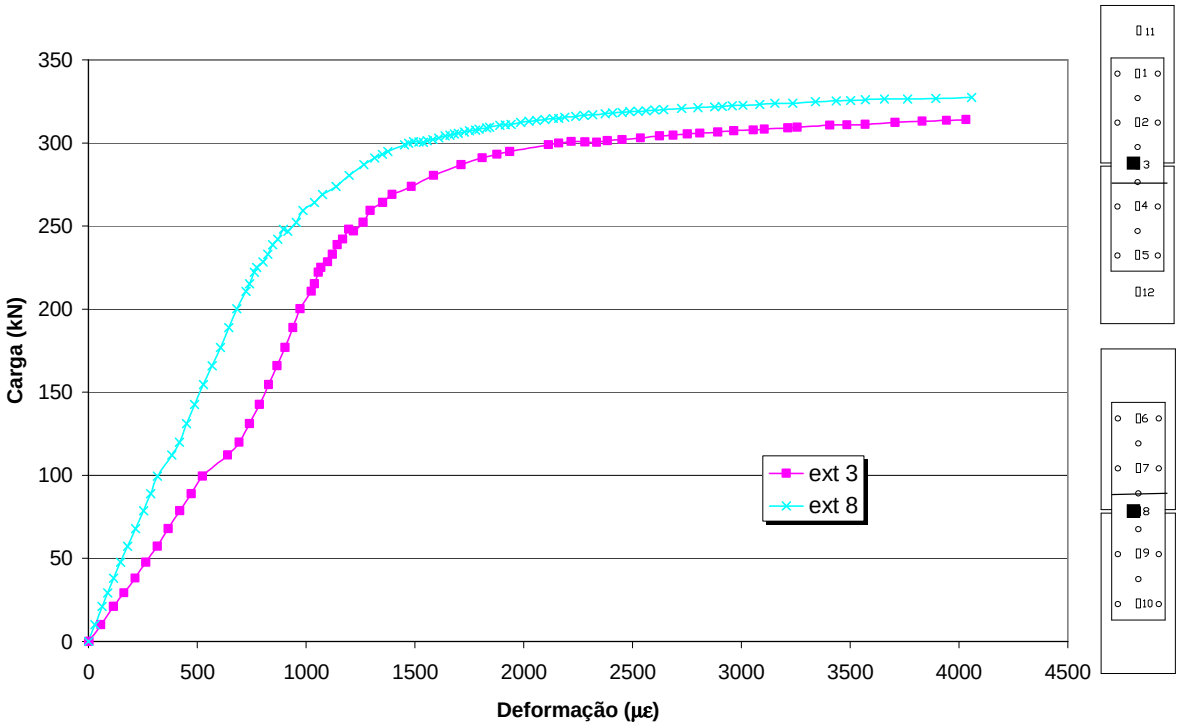


Figura 4.24 – Gráfico carga *versus* deformação - E2_CARB_S70_a

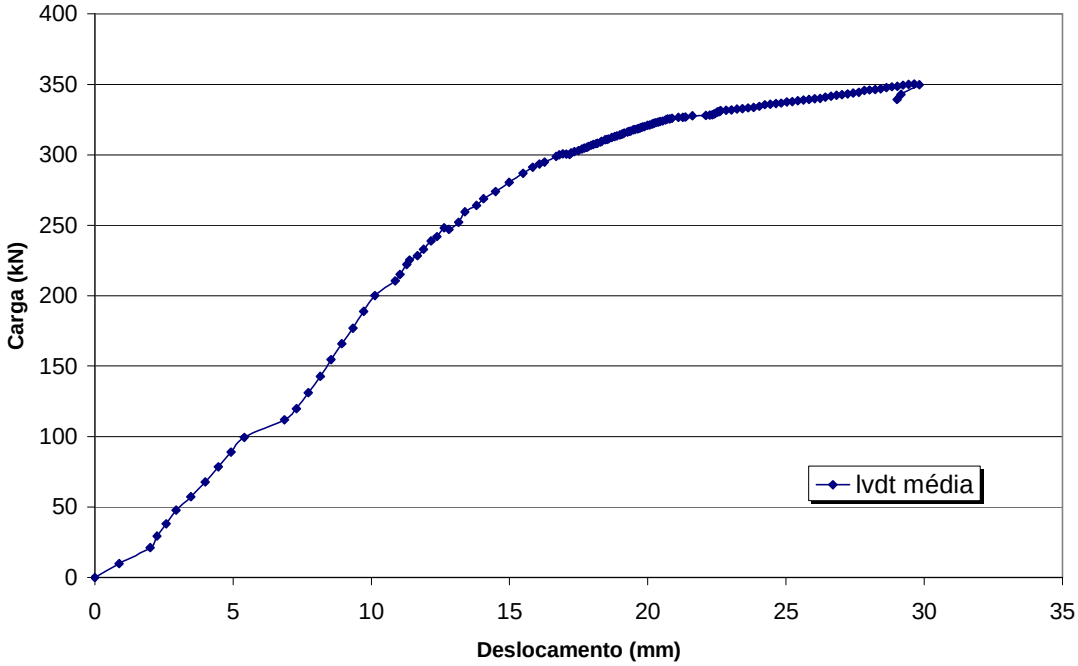


Figura 4.25 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E2_CARB_S70_a

A carga final mostrada do gráfico carga *versus* deformação da Figura 4.24 é diferente da carga final do gráfico carga versus deslocamento da Figura 4.25, porque no os extensômetros usados não suportaram as altas deformações impostas rompendo antes de atingir a carga final de ruptura.

4.4.3 Ensaio E3_CARB_S50

Neste ensaio optou-se por repetir os mesmos valores de s e p do primeiro ensaio, porém com uma configuração geométrica de parafusos diferente do primeiro ensaio, conforme apresentado no desenho da Figura 4.26.

Esta ligação apresentou ruptura na área líquida passando por dois furos com a carga de 310 kN, conforme seqüência de fotos mostrada na Figura 4.27. O tipo de ruptura foi o previsto teoricamente, porém, a carga apresentada era diferente da carga teórica de 298,3 kN. Entretanto, a diferença entre as cargas últimas de ruptura teórica e experimental ficou mais próxima neste ensaio do que no primeiro ensaio.

Este fato indica, que a placa de espessura de 15 mm influenciava na distribuição da carga pelos parafusos. Desta forma para o quarto ensaio buscando-se verificar a ruptura na área líquida passando por três furos, o valor de s, foi substancialmente reduzido para alcançar este resultado, ou seja, 30 mm, valor que garantiria teoricamente este tipo de ruptura.

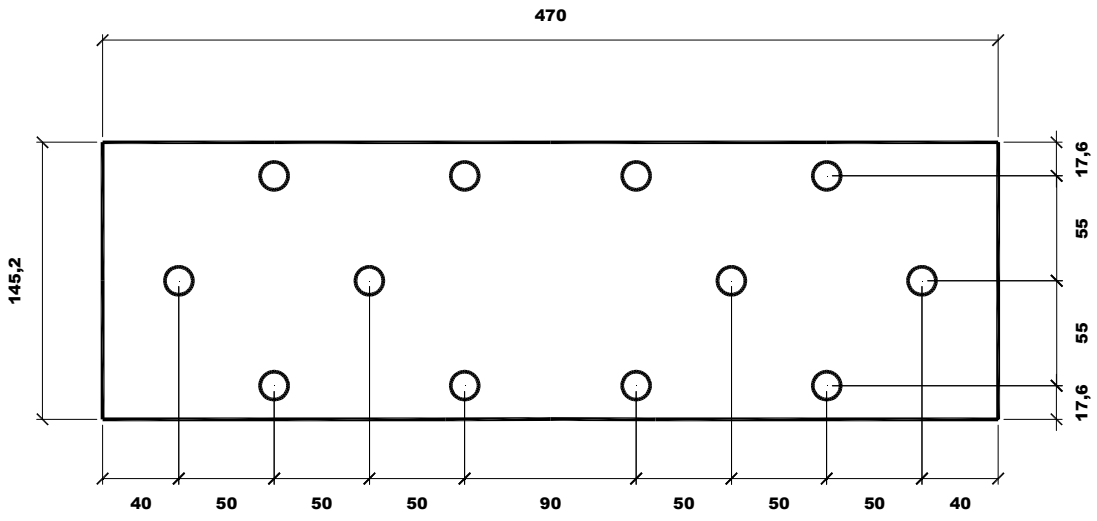


Figura 4.26 – Desenho geométrico do ensaio E3_CARB_S50

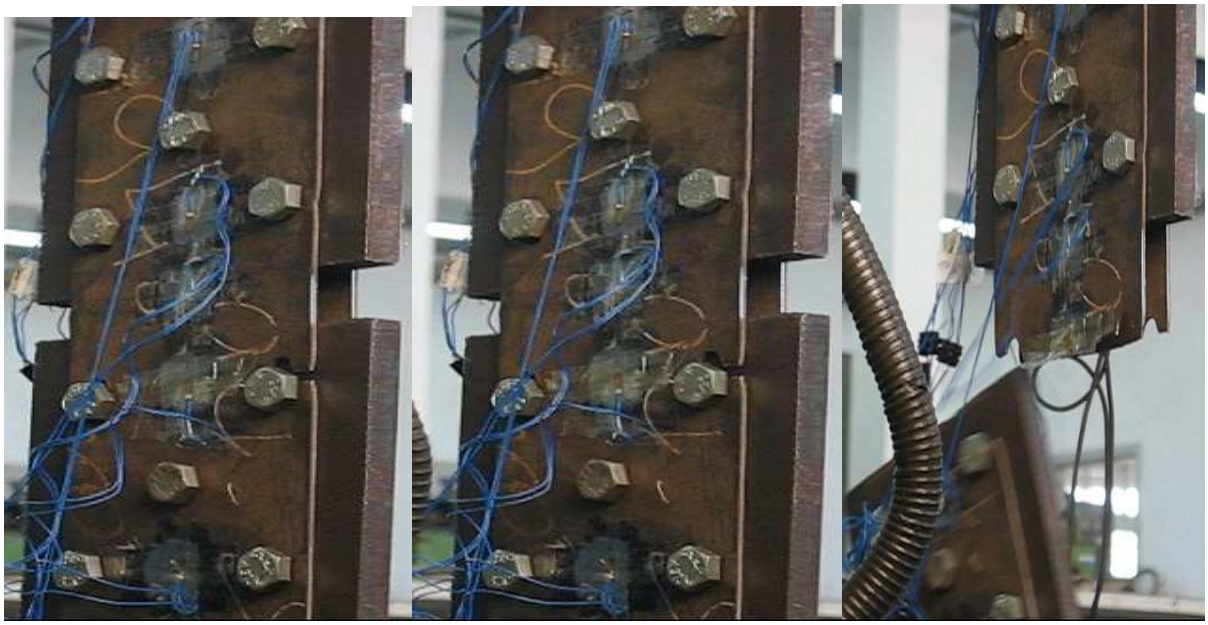


Figura 4.27 – Seqüência de ruptura do ensaio E3_CARB_S50

Nas Figura 4.28 e Figura 4.29 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o comportamento linear da ligação até a carga de 200 kN, fase elástica da ligação. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 16 mm.

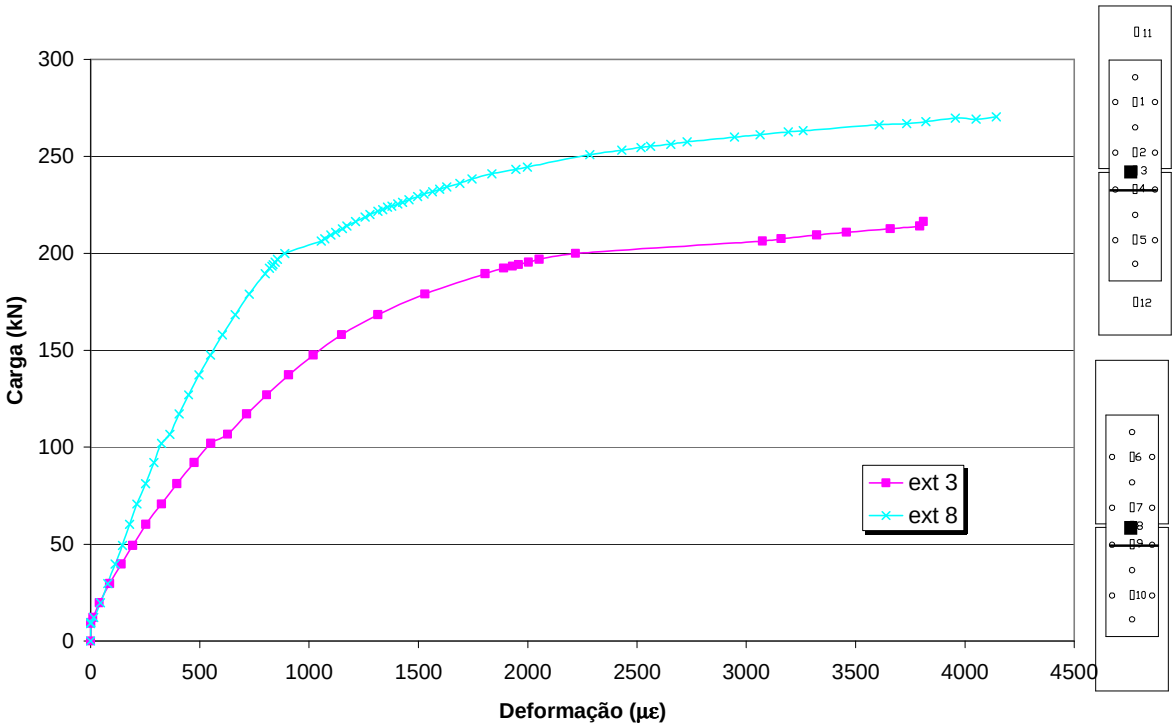


Figura 4.28 – Gráfico carga *versus* deformação - E3_CARB_S50

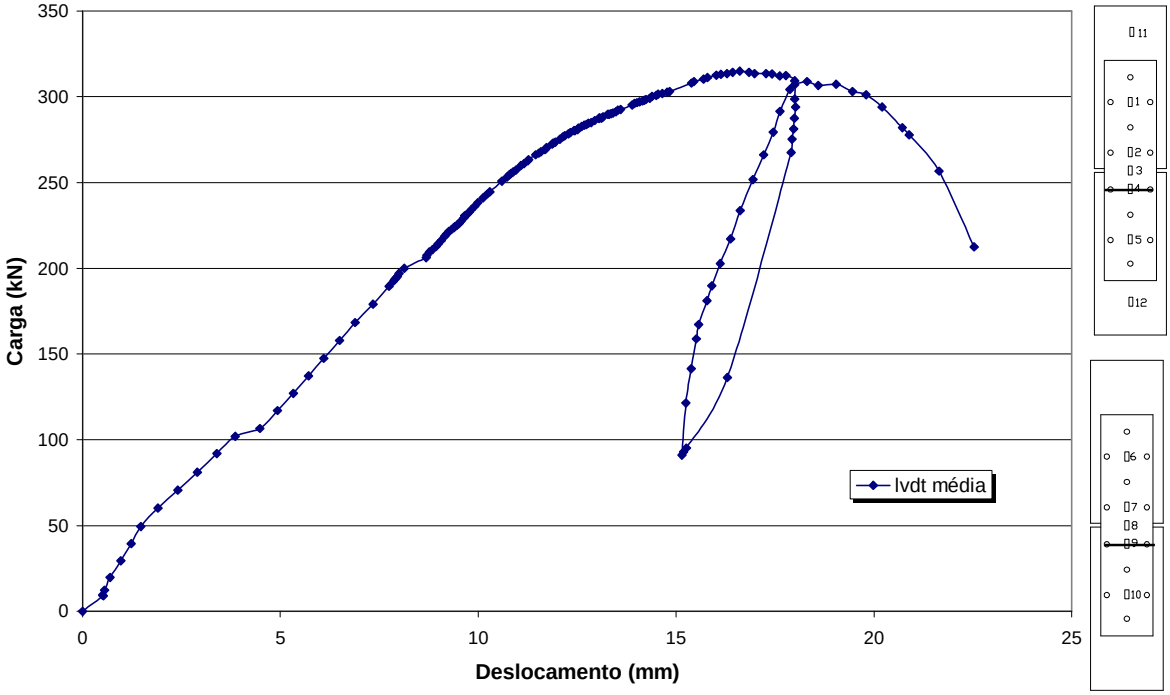


Figura 4.29 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E3_CARB_S50

Novamente a carga final mostrada do gráfico carga *versus* deformação da Figura 4.28 é diferente da carga final do gráfico carga versus deslocamento da Figura 4.29, porque no gráfico carga *versus* deformação os extensômetros, não suportaram as altas deformações rompendo antes de atingir a carga final do ensaio.

Também nota-se a diferença de leitura nos dois extensômetros devido a diferente solicitação sofrida pelas duas placas, além do terceiro canal ter apresentado falhas de leitura.

4.4.4 Ensaio E4_CARB_S30

Este ensaio apresentou ruptura na área líquida passando por dois furos com carga última de ruptura de 296 kN, conforme Figura 4.31, onde o esperado era de ruptura na área líquida passando por três furos com a carga teórica de 282,5 kN. Concluiu-se novamente, que a placa de 15 mm realmente apresentava influência na distribuição de carga pelos parafusos, concentrando a carga nos parafusos das extremidades da ligação.

Pretendendo confirmar e quantificar esta influência, pensou-se em utilizar uma placa mais fina para usar como placa principal. Isto motivou a execução do sexto ensaio com a utilização de outra placa, também constituída de aço carbono, porém com espessura de 10 mm, menor que a placa anteriormente adotada de 15 mm.

Buscando a comparação de resultados do aço carbono com o aço inoxidável foi determinado que o quinto ensaio fosse realizado com este material com os mesmos valores de s e p do primeiro e do terceiro ensaio, respectivamente.

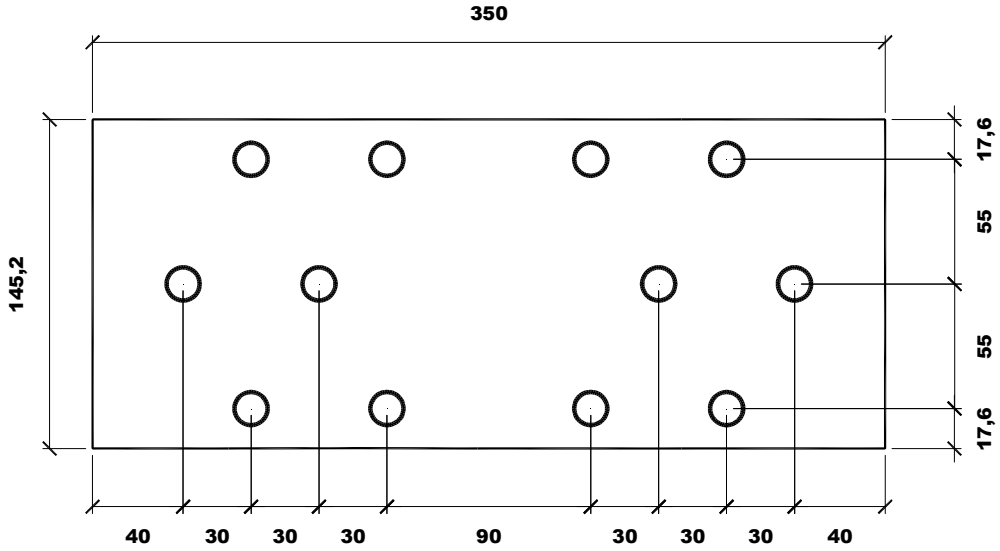


Figura 4.30 – Desenho geométrico do ensaio E4_CARB_S30

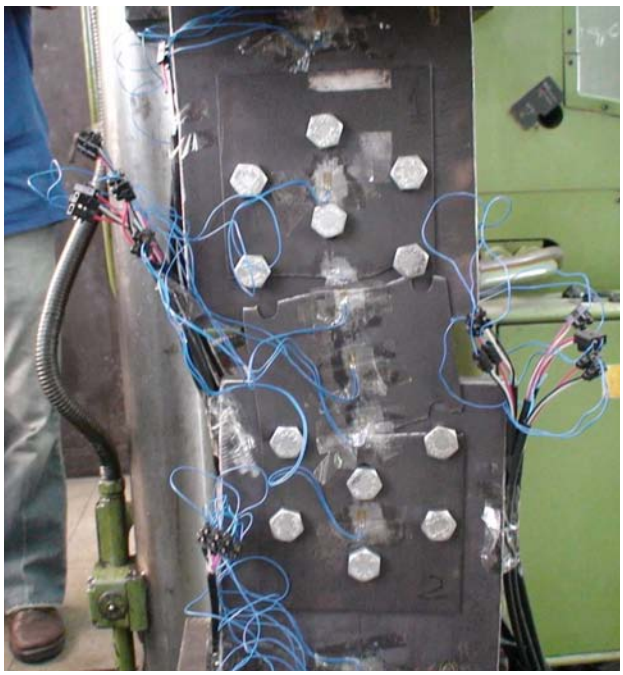


Figura 4.31 – Ruptura do ensaio E4_CARB_S30

Nas Figura 4.32 e Figura 4.33 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o comportamento linear da ligação até a carga de 200 kN, fase elástica da ligação. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 13 mm.

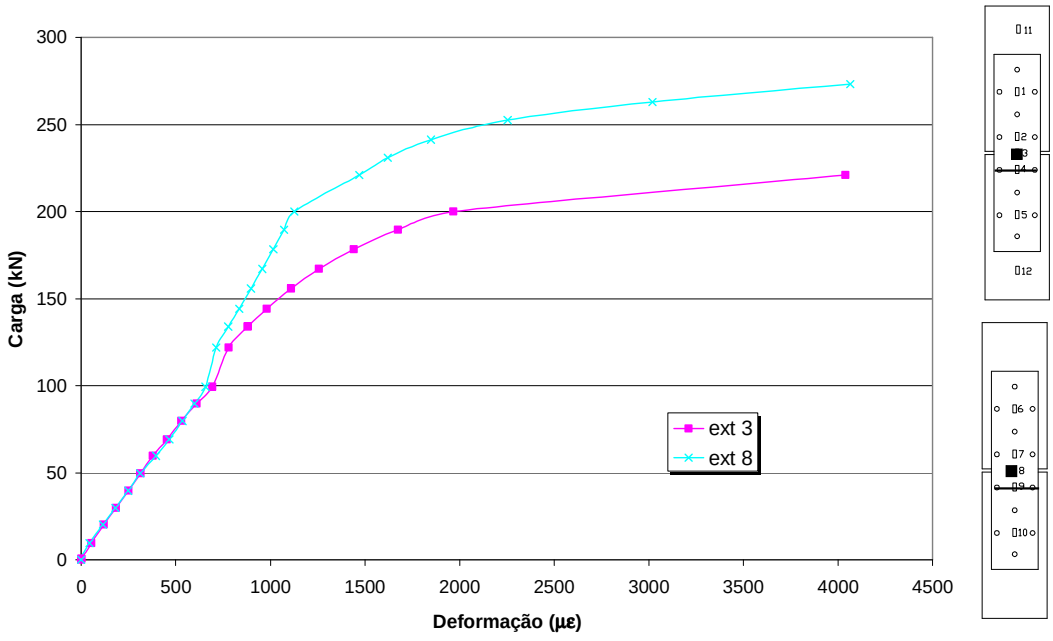


Figura 4.32 – Gráfico carga *versus* deformação - E4_CARB_S30

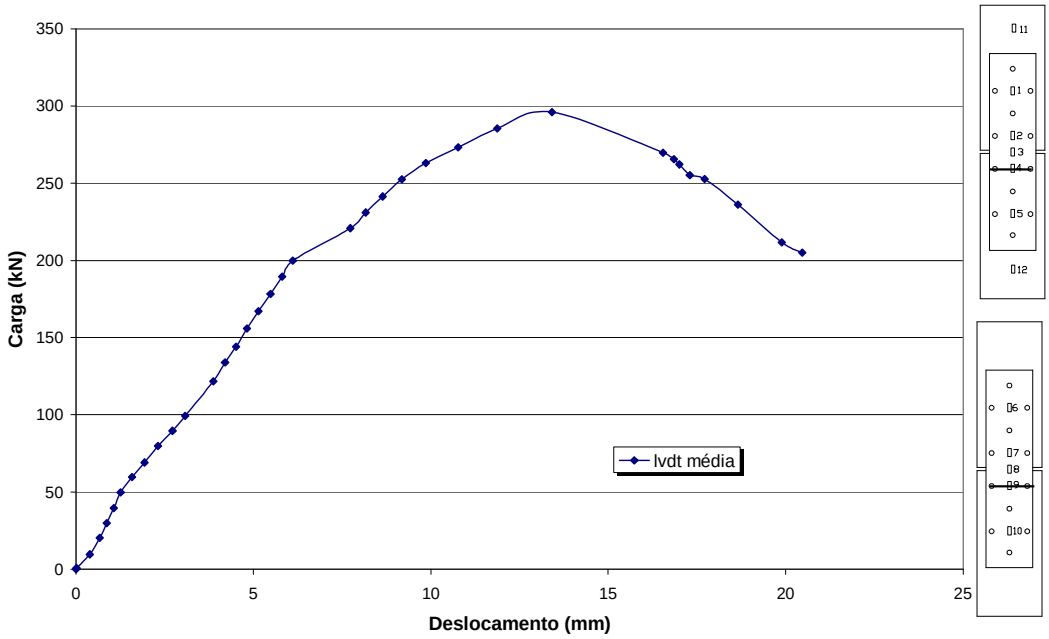


Figura 4.33 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E4_CARB_S30

4.4.5 Ensaio E5_INOX_S50

Este ensaio teve por objetivo a comparação com o primeiro e terceiro ensaios realizados com aço carbono, mantendo-se as mesmas dimensões, ou seja, s igual a 50 mm e p igual a 55 mm, conforme desenho geométrico da Figura 4.34. Mesma seqüência de carga utilizada para o aço carbono foi usada neste ensaio.

O resultado foi a ruptura na área líquida passando dois parafusos com a carga última de 480 kN. Teoricamente, a ruptura deveria ocorrer primeiro na seção bruta de chapas com a carga de 302,9 kN, seguida do corte no parafuso com a carga de 376 kN, mais a frente ter-se-ia o esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente, romperia na área líquida passando por dois furos com a carga de 494,6 kN.

Ocorreu no ensaio, antes da ruptura, o esmagamento da chapa mostrado através da seqüência de fotos da Figura 4.35. Os parafusos localizados na área líquida passando por dois parafusos, onde houve a ruptura, apresentaram deformações associadas ao corte acentuado, conforme apresentado na Figura 4.36.

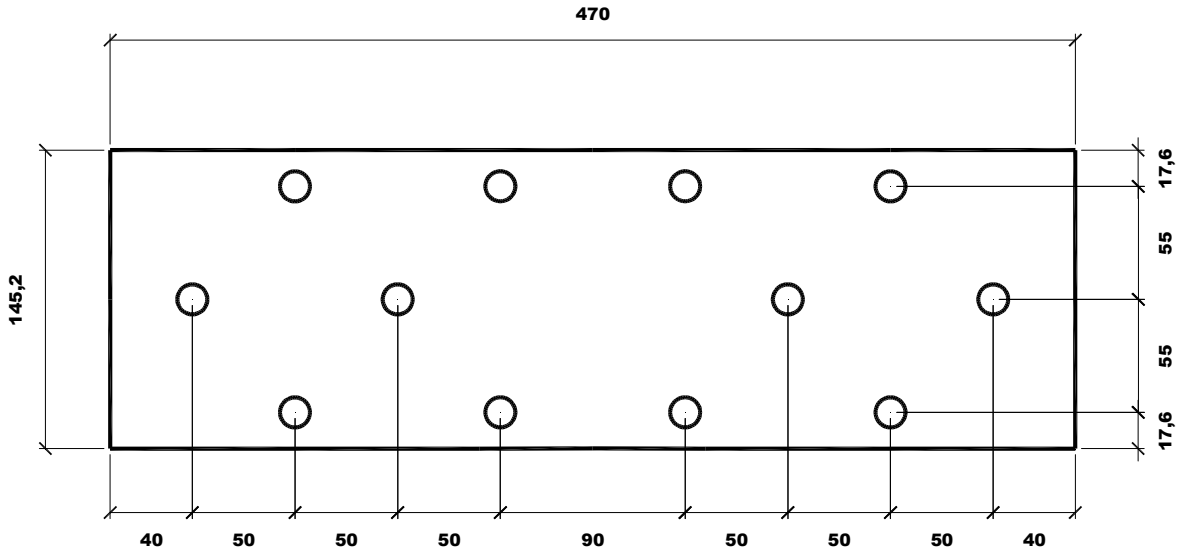


Figura 4.34 – Desenho geométrico do ensaio E5_INOX_S50

Figura 4.35 – Seqüência de ruptura do ensaio E5_INOX_S50

Figura 4.36 – Corte apresentado no parafuso do ensaio E5_INOX_S50

Nas Figura 4.37 e Figura 4.38 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o final do comportamento linear da ligação entre as cargas de 280 kN a 320 kN. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 41 mm.

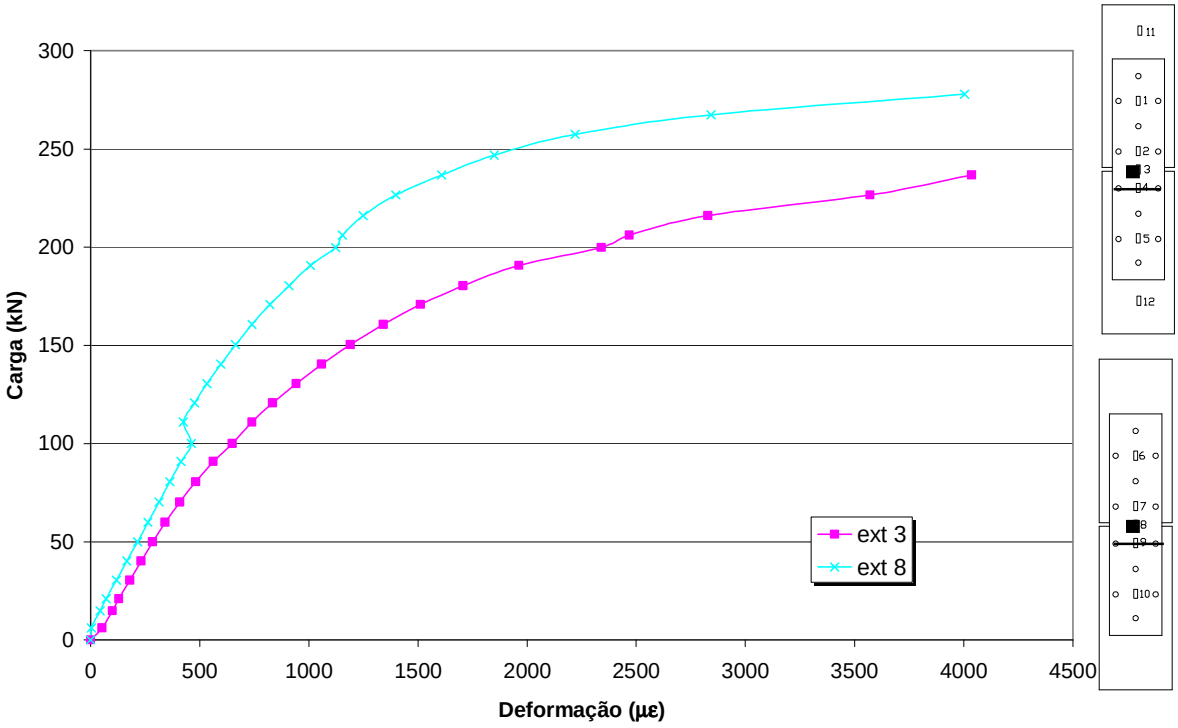


Figura 4.37 – Gráfico carga *versus* deformação - E5_INOX_S50

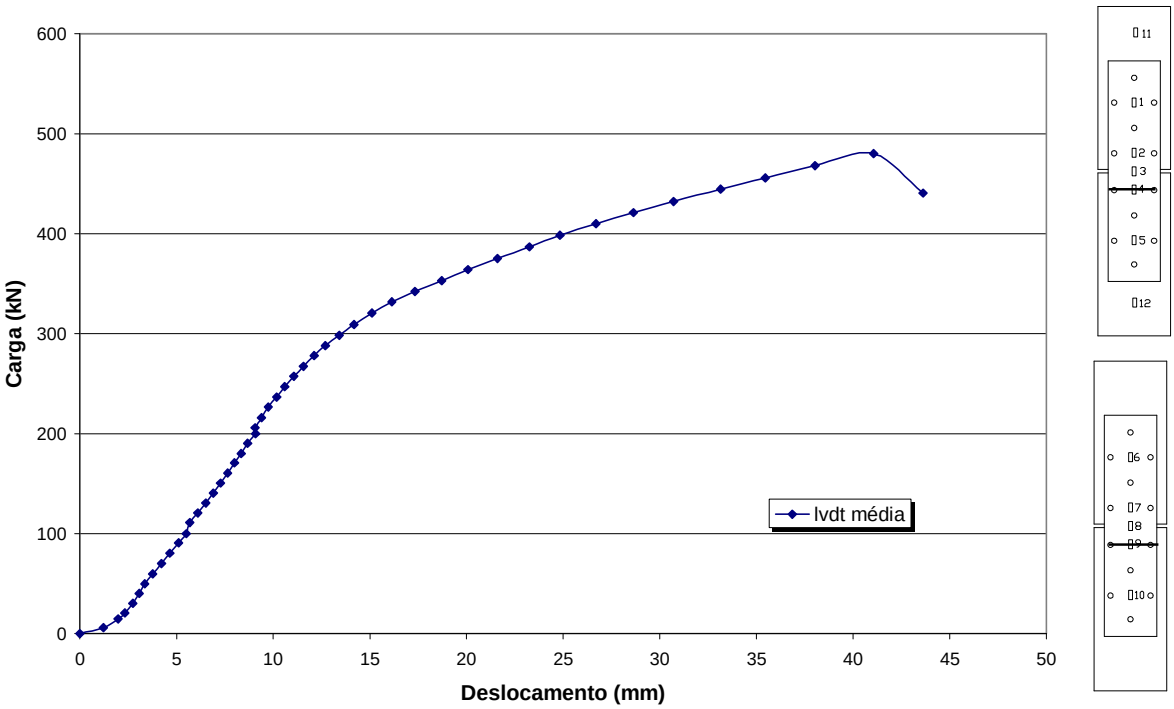


Figura 4.38 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E5_INOX_S50

4.4.6 Ensaio E6_CARB_S30_P10

Neste ensaio, diferentemente dos demais, utilizou-se como placa base, uma chapa de aço carbono de espessura de 10 mm, para analisar a influência da chapa de 15 mm nos ensaios anteriores. Este ensaio apresenta as mesmas dimensões da chapa do quarto ensaio, conforme desenho geométrico apresentado na Figura 4.39.

Este ensaio apresentou o tipo de ruptura na área líquida passando por três furos, conforme Figura 4.40 com a carga última de ruptura de 309,5 kN, enquanto a norma prediz o mesmo tipo de ruptura, porém com a carga última de ruptura de 282,5 kN, resistindo mais que o quarto ensaio. Este fato confirma a influência da placa de 15 mm em não distribuir igualmente a carga por todos os parafusos.

Outra característica foi a apresentação, ao final do ensaio, de discreto alongamento dos furos da placa de 10 mm, , conforme Figura 4.41, diferentemente da placa de 15 mm, que apresentou um alongamento desprezível,

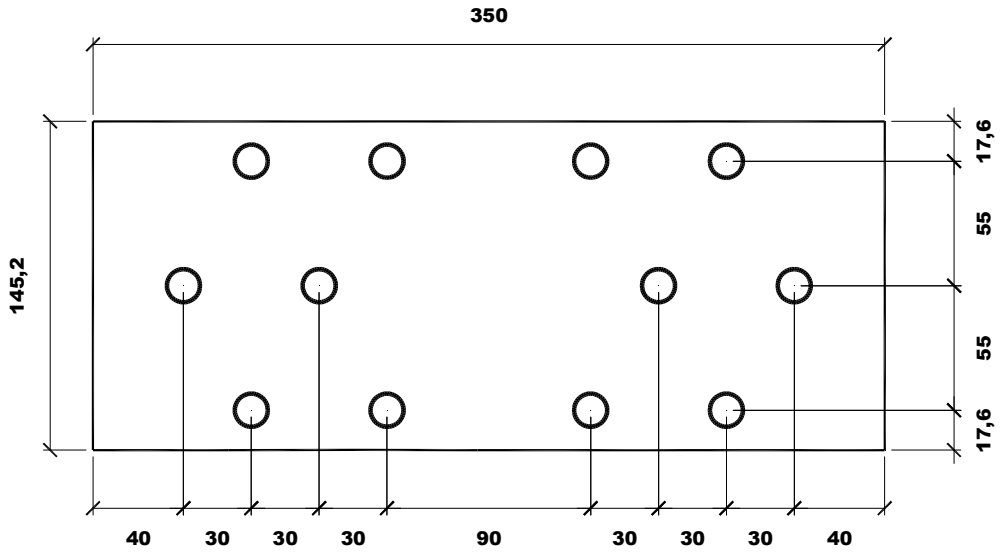


Figura 4.39 – Desenho geométrico do ensaio E6_CARB_S30_P10

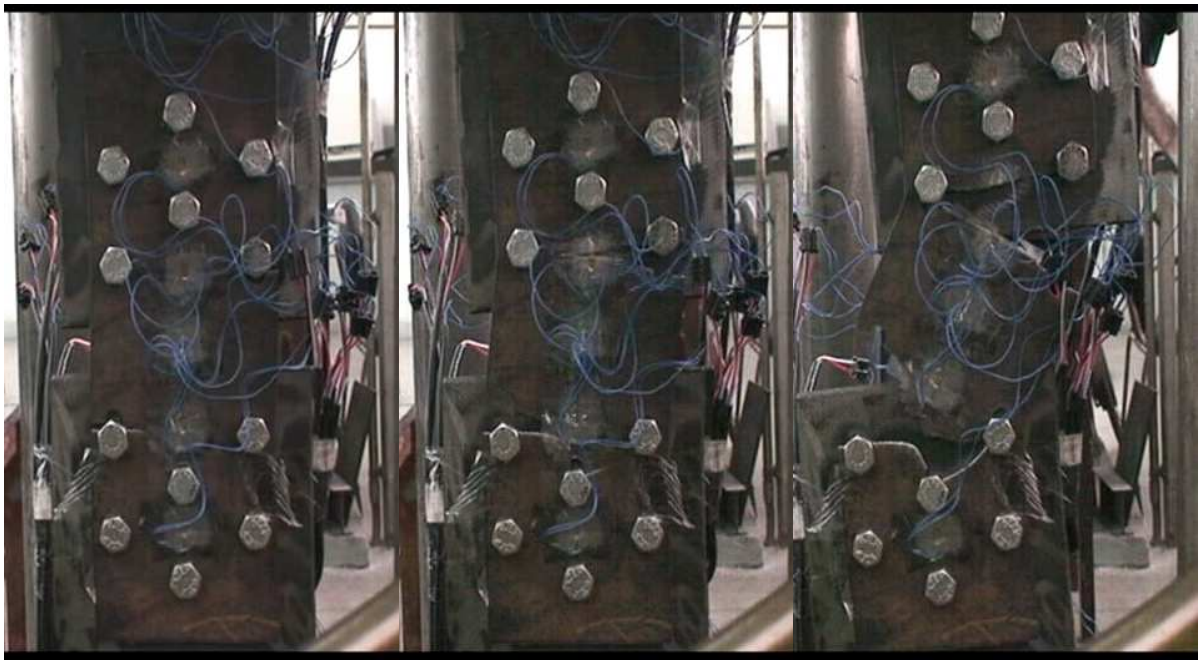


Figura 4.40 – Seqüência de ruptura do ensaio E6_CARB_S30_P10

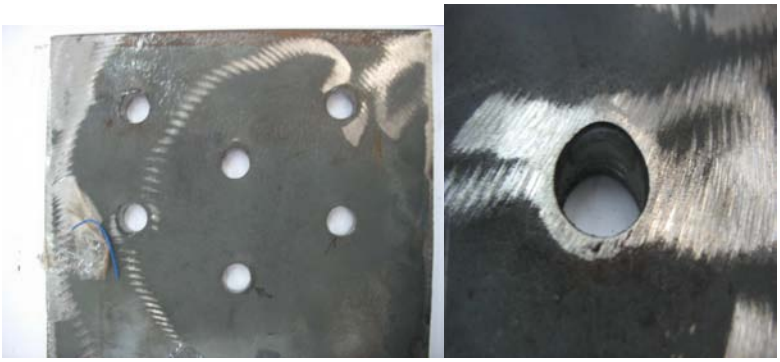


Figura 4.41 –Furos da placa base do ensaio E6_CARB_S30_P10

Nas Figura 4.42 e Figura 4.43 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o comportamento linear da ligação até a carga de 200 kN, caracterizando a fase elástica da ligação. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 18 mm.

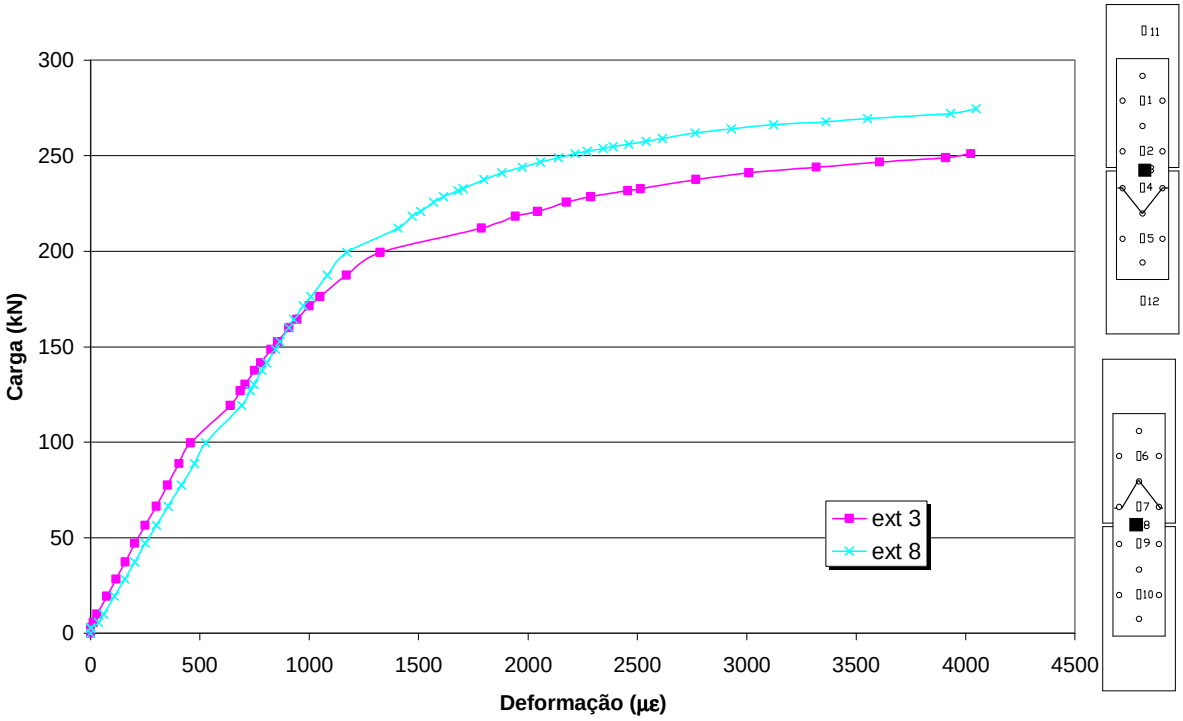


Figura 4.42 – Gráfico carga *versus* deformação - E6_CARB_S30_P10

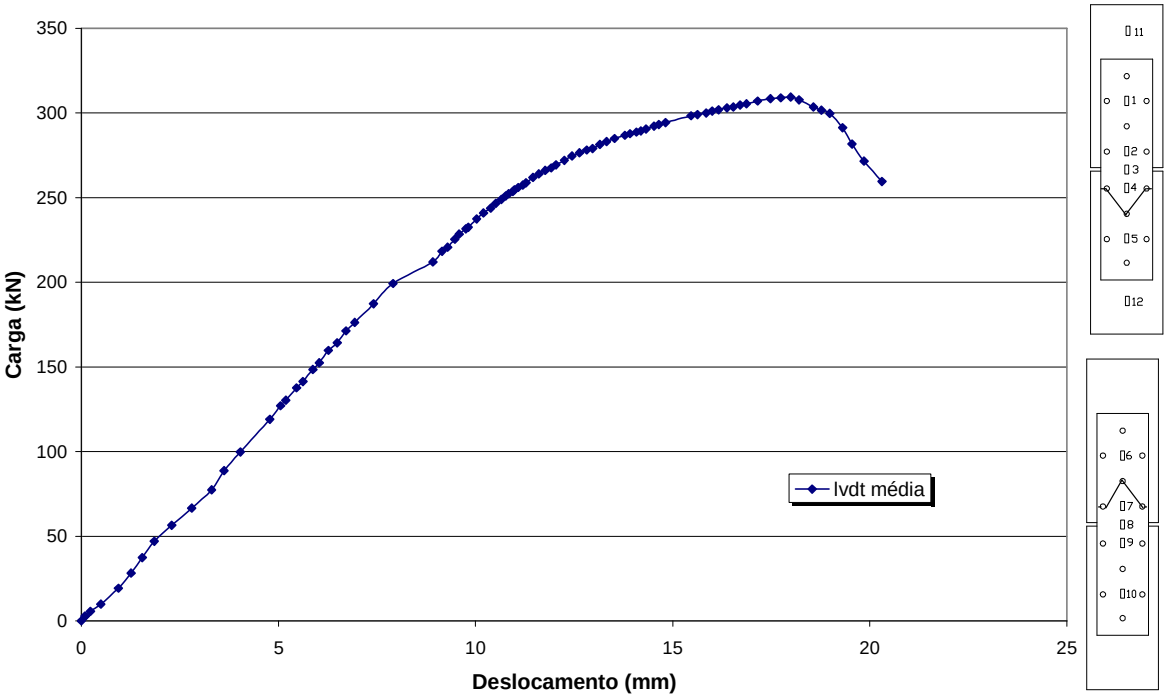


Figura 4.43 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E6_CARB_S30_P10

4.4.7 Ensaio E7_INOX_S30

Este ensaio teve como objetivo avaliar o comportamento do aço inoxidável, ao se reduzir o valor do parâmetro s buscando a ruptura na área líquida passando por três parafusos em comparação com o quarto ensaio, com valores de s e p de 30 mm e 55 mm, respectivamente, conforme desenho geométrico mostrado na Figura 4.44.

A seqüência de aplicação de carga deste ensaio foi diferente do quinto ensaio, o qual repetia a seqüência do aço carbono, sendo executada a seguinte seqüência de carregamento:

1) Aplicação da carga até 150 kN, com leituras de 10 em 10 kN;
2) Retorno da carga até 10 kN com leituras de 20 em 20 kN;
3) Aplicação da carga até 250 kN, com leituras de 10 em 10 kN;
4) Retorno da carga até 10 kN com leituras de 20 em 20 kN;
5) Aplicação da carga até a ruptura, com leituras de 10 em 10 kN.

Este ensaio apresentou ruptura na área líquida passando por dois furos com a carga última de 459,0 kN, enquanto a norma prediz que a ruptura ocorreria primeiro na seção bruta da chapa com a carga de 302,9 kN, seguida do corte no parafuso com carga de 376,0 kN, mais a frente ocorreria o esmagamento da chapa na região dos parafusos com a carga de 466,9 kN e finalmente romperia na área líquida passando por três furos com a carga de 469,8 kN. Ocorreu no ensaio, antes da ruptura, o esmagamento da chapa mostrado através da seqüência de fotos da Figura 4.45. Os parafusos, localizados na área líquida da ruptura, apresentaram, como no quinto ensaio com placas de aço inoxidável, deformações substanciais devido ao corte.

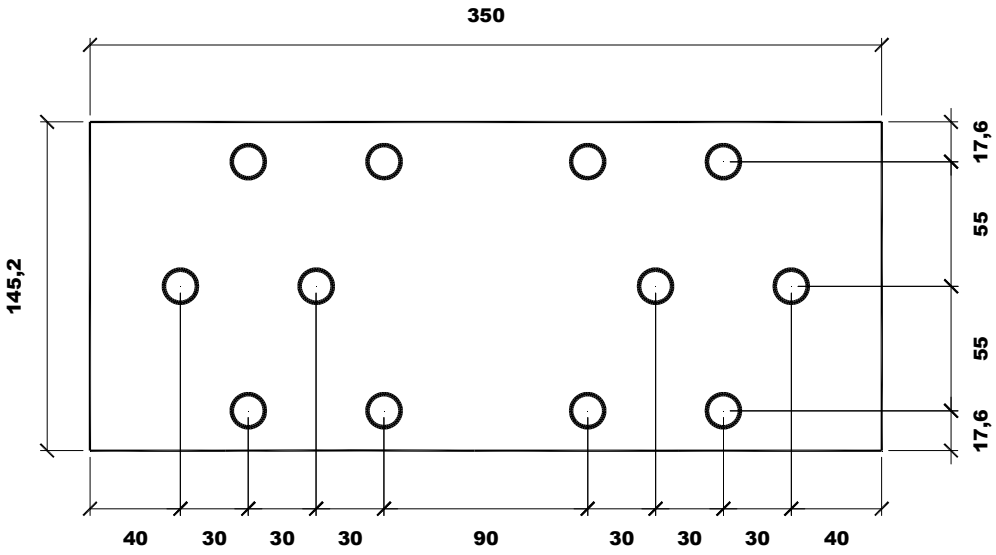


Figura 4.44 – Desenho geométrico do ensaio E7_INOX_S30

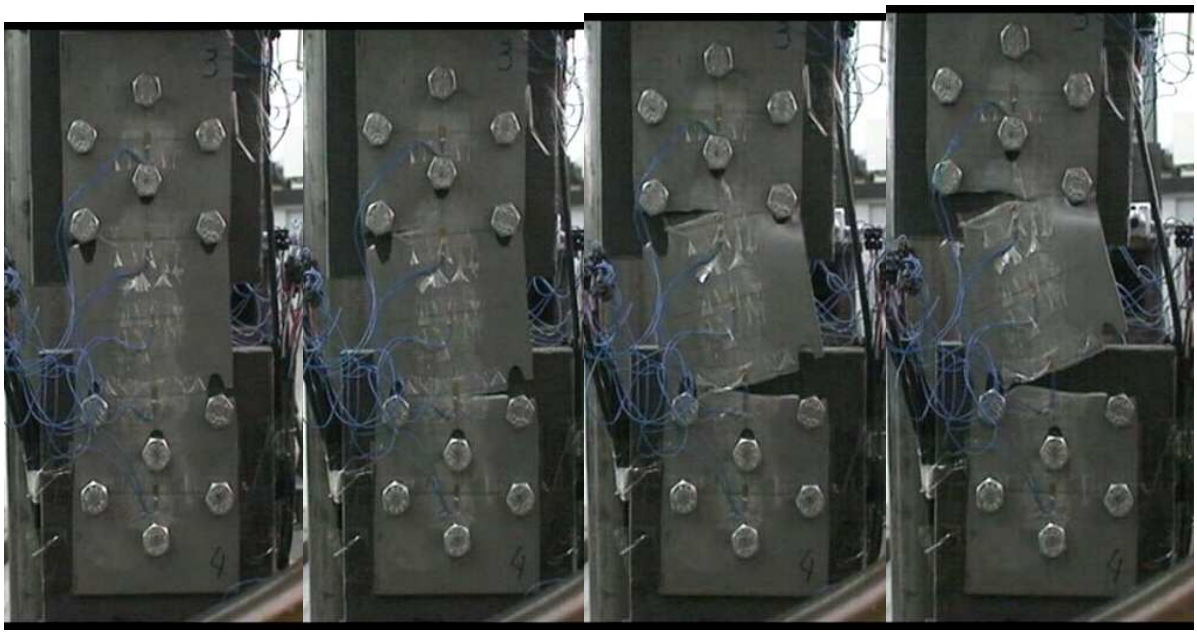


Figura 4.45 – Seqüência de ruptura do ensaio E7_INOX_S30

Nas Figura 4.46 e Figura 4.47 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o final do comportamento linear da ligação entre as cargas de 250 kN a 300 kN. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 36 mm.

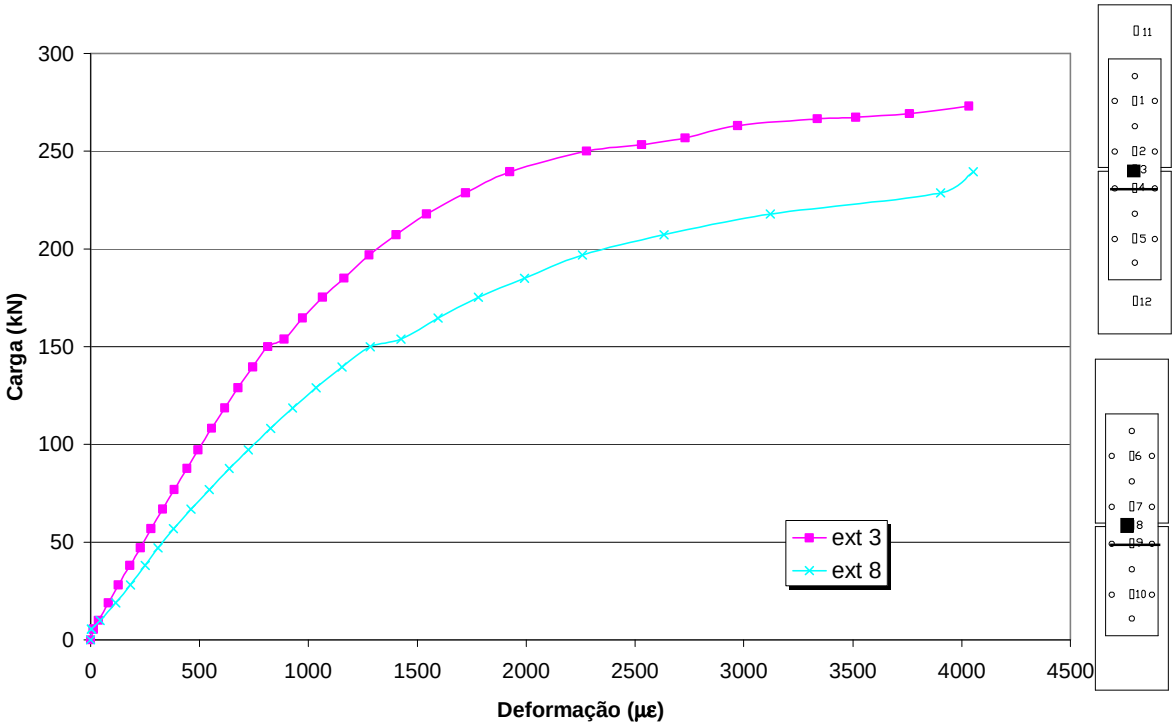


Figura 4.46 – Gráfico carga *versus* deformação - E7_INOX_S30

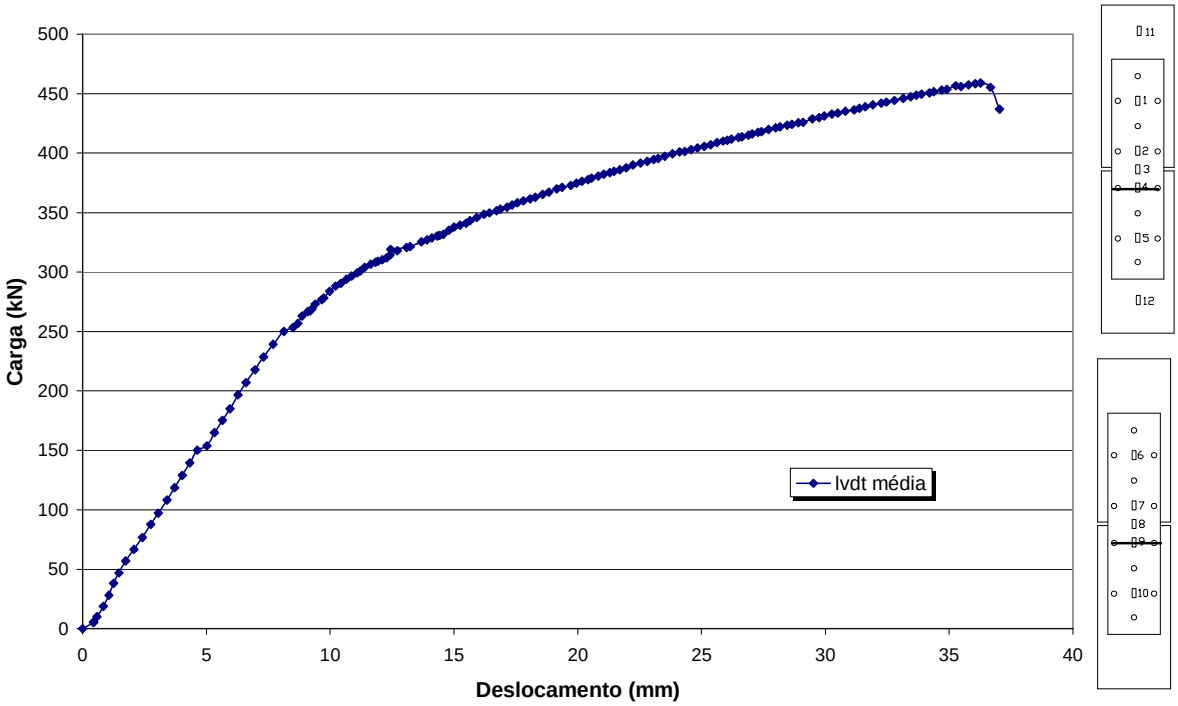


Figura 4.47 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E7_INOX_S30

4.4.8 Ensaio E8_CARB_S50_P8

Neste ensaio, repetiu-se a configuração de parafusos do terceiro ensaio, conforme desenho geométrico apresentado na Figura 4.48, utilizando uma chapa de espessura de 8 mm no lugar da chapa de espessura de 15 mm.

A ruptura aconteceu na área líquida passando por dois furos com carga última de ruptura de 326,0 kN, conforme mostra a seqüência de fotos da Figura 4.49. Pela utilização de cálculos teóricos sem o uso de fatores de resistência, encontra-se o mesmo tipo de ruptura, porém com carga de 298,3 kN.

Da mesma forma que no sexto ensaio, a ligação suportou mais carga que o terceiro ensaio (310,0 kN) devido a melhor distribuição das cargas pelos parafusos.

Esta melhor distribuição das cargas deve-se ao fato da diminuição da espessura da chapa principal, fazendo com que esta se deformasse e distribuísse melhor o carregamento.

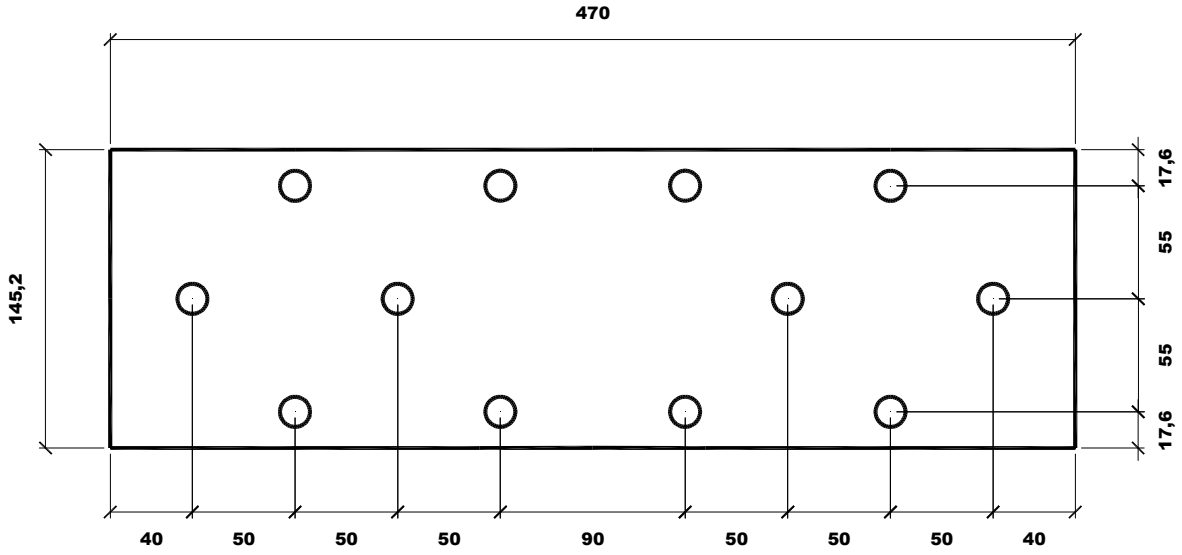


Figura 4.48 – Desenho geométrico do ensaio E8_CARB_S50_P8

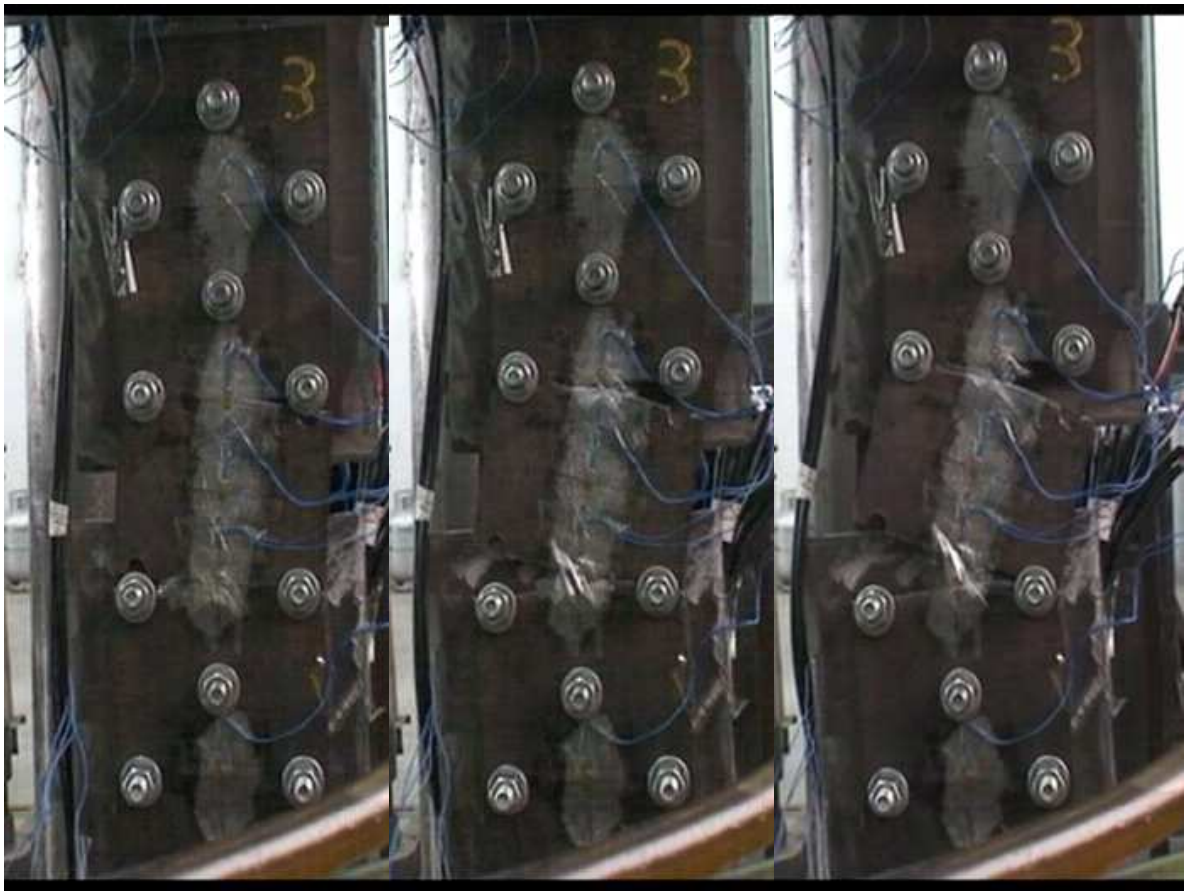


Figura 4.49 – Seqüência de ruptura do ensaio E8_CARB_S50_P8

Nas Figura 4.50 e Figura 4.51 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o comportamento linear da ligação até a carga de 250 kN, caracterizando a fase elástica da ligação. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 17 mm.

.

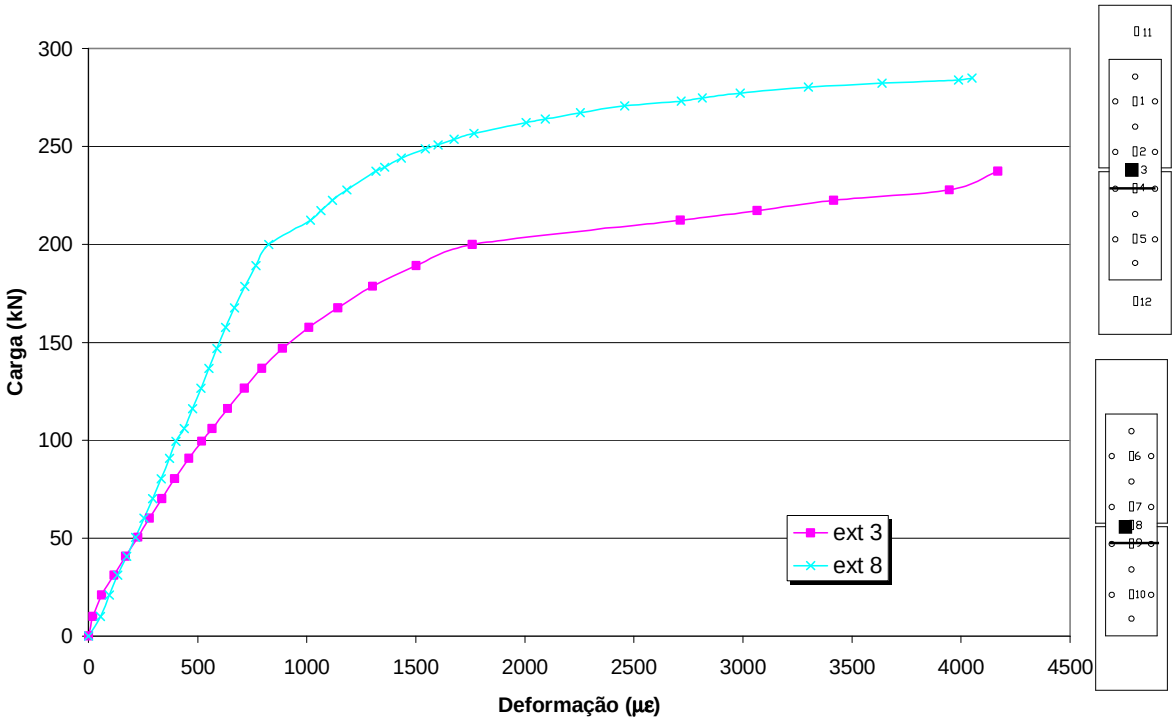


Figura 4.50 – Gráfico carga *versus* deformação - E8_CARB_S50_P8

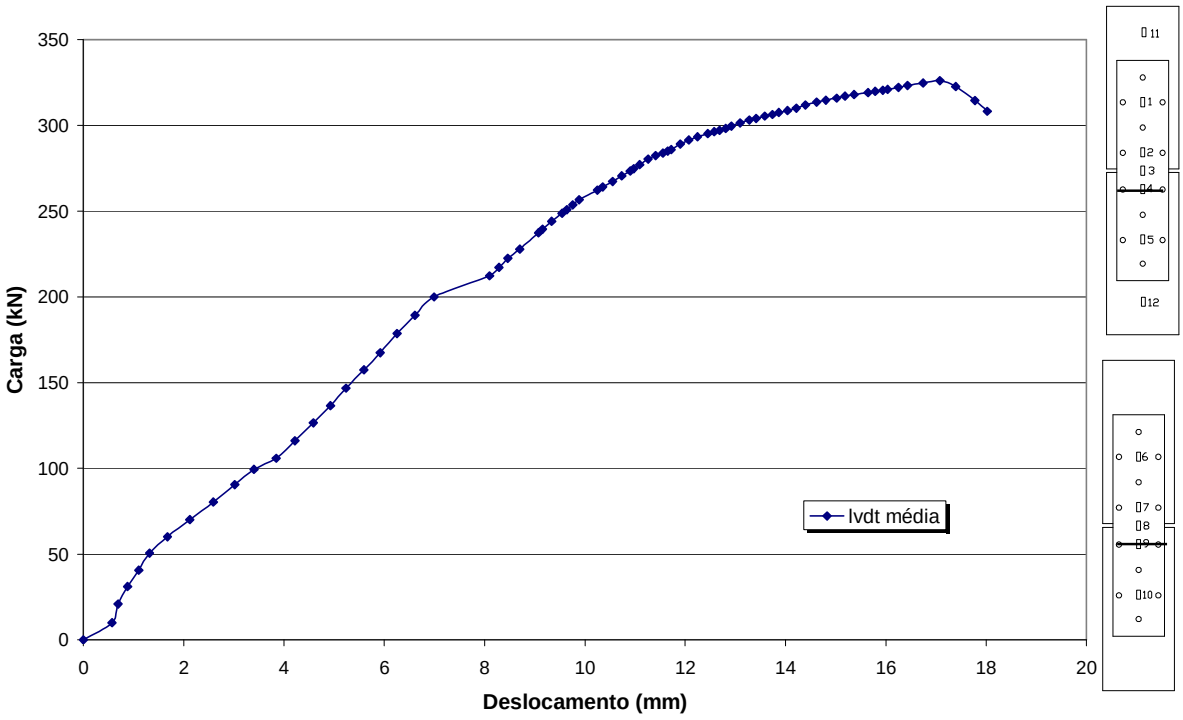


Figura 4.51 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E8_CARB_S50_P8

4.4.9 Ensaio E9_INOX_S23

Neste ensaio diminuiu-se o valor do parâmetro s baseado numa simples consideração dos resultados dos dois últimos ensaios em aço inoxidável e a relação entre áreas líquidas, buscando a ruptura na seção líquida passando por três furos, resultando no desenho geométrico da Figura 4.52. A ligação foi submetida a mesma seqüência de carregamento do aço carbono.

O ensaio apresentou a ruptura esperada na área líquida passando por três furos com a carga última de 436,0 kN. Porém, a norma prediz que a ruptura ocorreria primeiro na seção bruta da chapa com a carga de 302,9 kN, seguida do corte do parafuso com uma carga de 376,0 kN, e finalmente romperia na área líquida passando por três furos com a carga de 455,5 kN. A norma fornece para o esmagamento da placa na região dos parafusos, uma carga de 466,9 kN. Na seqüência de fotos da Figura 4.53 pode ser observado o esmagamento ocorrido na placa antes da ruptura da seção líquida passando por três furos.

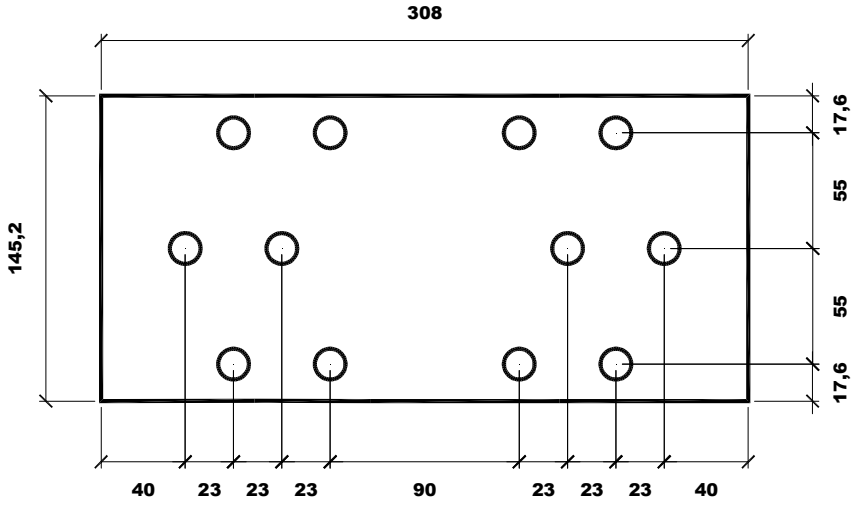


Figura 4.52 – Desenho geométrico do ensaio E9_INOX_S23

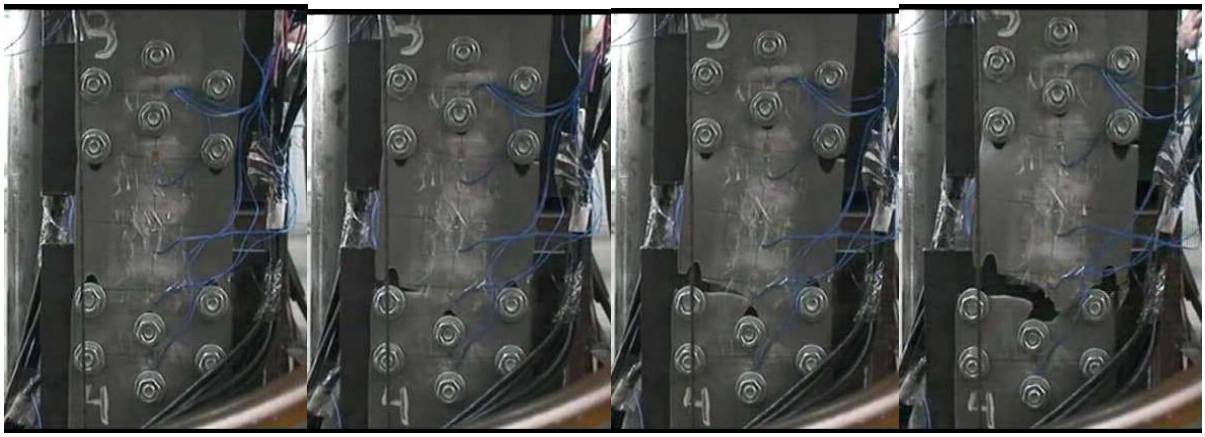


Figura 4.53 – Seqüência de ruptura do ensaio E9_INOX_S23

Nas Figura 4.46 e Figura 4.47 são apresentados os gráficos: carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento, onde pode ser observado o final do comportamento linear da ligação entre as cargas de 230 kN a 280 kN. Pode-se, também, observar o valor de deslocamento associado a carga última, de ≈ 35 mm.

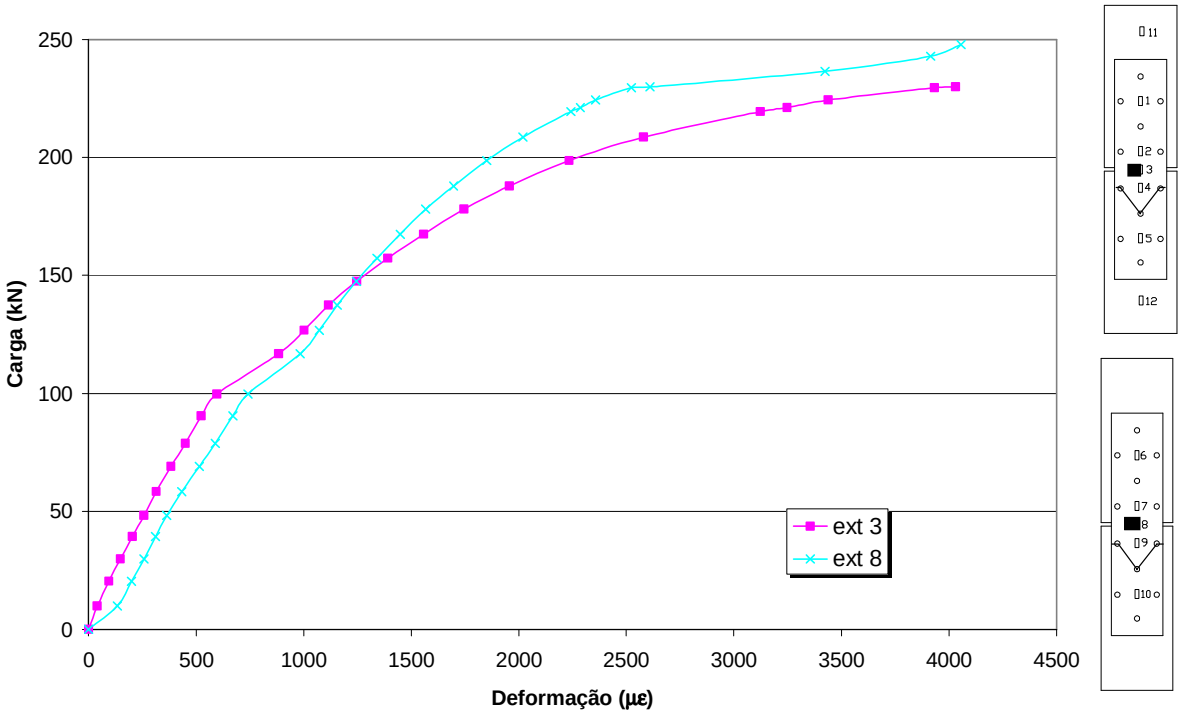


Figura 4.54 – Gráfico carga *versus* deformação - E9_INOX_S23

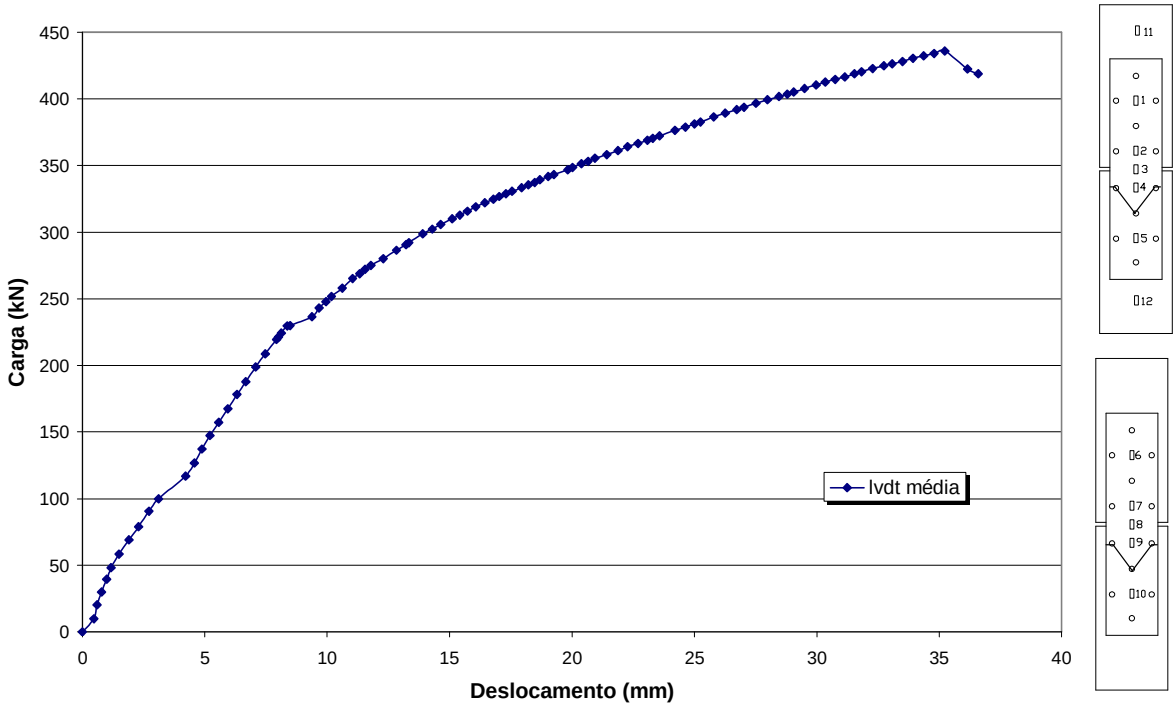


Figura 4.55 – Gráfico carga *versus* deslocamento - E9_INOX_S23

4.4.10 Quadro resumo dos ensaios

Apresenta-se abaixo o quadro resumo dos ensaios experimentais realizados, mostrando os tipos de ruptura e as cargas últimas apresentadas, os tipos de ruptura e as cargas últimas da norma e a diferença em percentual.

Tipos de ruptura:

- AB – ruptura na área bruta;
- 1F – ruptura na área líquida passando por um furo;
- 2F – ruptura na área líquida passando por dois furos;
- 3F – ruptura na área líquida passando por três furos;

Tabela 4.3 – Resumo dos ensaios experimentais

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%) Exp- EC3
E1_CARB_S50_a	3F	312,0	2F	298,3	4,6
E2_CARB_S70_a	1F	349,5	2F	298,3	17,2
E3_CARB_S50	2F	310,0	2F	298,3	3,9
E4_CARB_S_30	2F	296,0	3F	282,5	4,8
E5_INOX_S50	2F	480,0	AB	302,9	58,5
E6_CARB_S30_P10	3F	309,5	3F	282,5	9,6
E7_INOX_S30	2F	459,0	AB	302,9	51,5
E8_CARB_S50_P8	2F	326,0	2F	298,3	9,3
E9_INOX_S23	3F	436,0	AB	302,9	43,9

Neste capítulo foram apresentadas algumas considerações sobre a realização dos ensaios experimentais, obtenção das características mecânicas e geométricas dos ensaios, além da instrumentação dos mesmos. No capítulo seguinte, apresentar-se-á a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios, comparando-se ensaios com características similares.

5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados dos ensaios de ligações aparafusadas alternadas constituídas por aço carbono e aço inoxidável descritos no capítulo anterior. Serão discutidos os comportamentos das ligações aparafusadas observados nos ensaios experimentais, através de suas curvas carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento.

Uma análise comparativa entre os resultados experimentais com a utilização destas curvas, será considerada a fim de se estabelecer uma relação de parâmetros, que justifique o comportamento apresentado.

A análise comparativa de curvas carga *versus* deformação proporciona uma visão global do comportamento da ligação aparafusada, com relação a sua rigidez. Da mesma forma, uma análise comparativa de curvas carga *versus* deslocamento permite, também, uma visão do comportamento da ligação aparafusada, verificando a carga última de ruptura e o deslocamento total apresentado pela ligação.

Em uma primeira análise de comparação da curva carga *versus* deslocamento, verifica-se o maior valor da carga última de ruptura da ligação aparafusada em aço inoxidável do que o valor da carga última de ruptura na ligação aparafusada em aço carbono, conforme a curva carga *versus* deslocamento apresentada na Figura 5.1.

Observa-se também que a ligação aparafusada constituída de aço inoxidável apresenta um maior deslocamento do que a ligação aparafusada constituída de aço carbono, comprovando o seu comportamento mais dúctil.

Estas duas observações nos parágrafos acima com certeza serão os limites de avaliação para a obtenção de nova formulação, mais real, visando um melhor aproveitamento na utilização do aço inoxidável.

Todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais, juntamente com as comparações possíveis podem ser encontradas no anexo A desta dissertação.

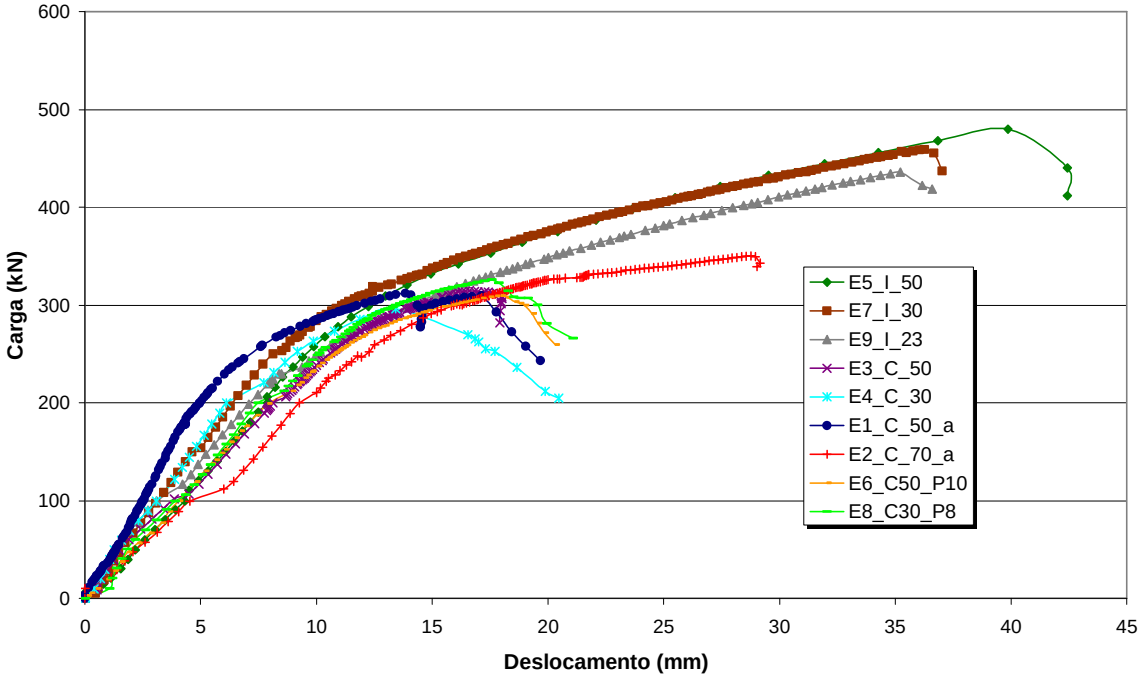


Figura 5.1 – Análise comparativa - ensaios aço carbono e inoxidável

5.2 Análise dos Ensaios com Aço Carbono

Para esta análise, foram utilizados cinco extensômetros elétricos instalados e posicionados simetricamente em cada chapa de 3 mm de espessura. Todavia, os resultados obtidos para os extensômetros 1, 5, 6 e 10 foram inconstantes e por isto foram desprezados, logo, somente são apresentados os dados correspondentes aos extensômetros 2, 3, 4, 7, 8 e 9.

Observando-se a localização dos extensômetros, conforme Figura 5.2, optou-se pelo agrupamento de resultados dos extensômetros 2, 4, 7 e 9, pois apresentam simetria de posições, como também acontece com os extensômetros 3 e 8.

Todas as cotas dos desenhos desta dissertação encontra-se em milímetros.

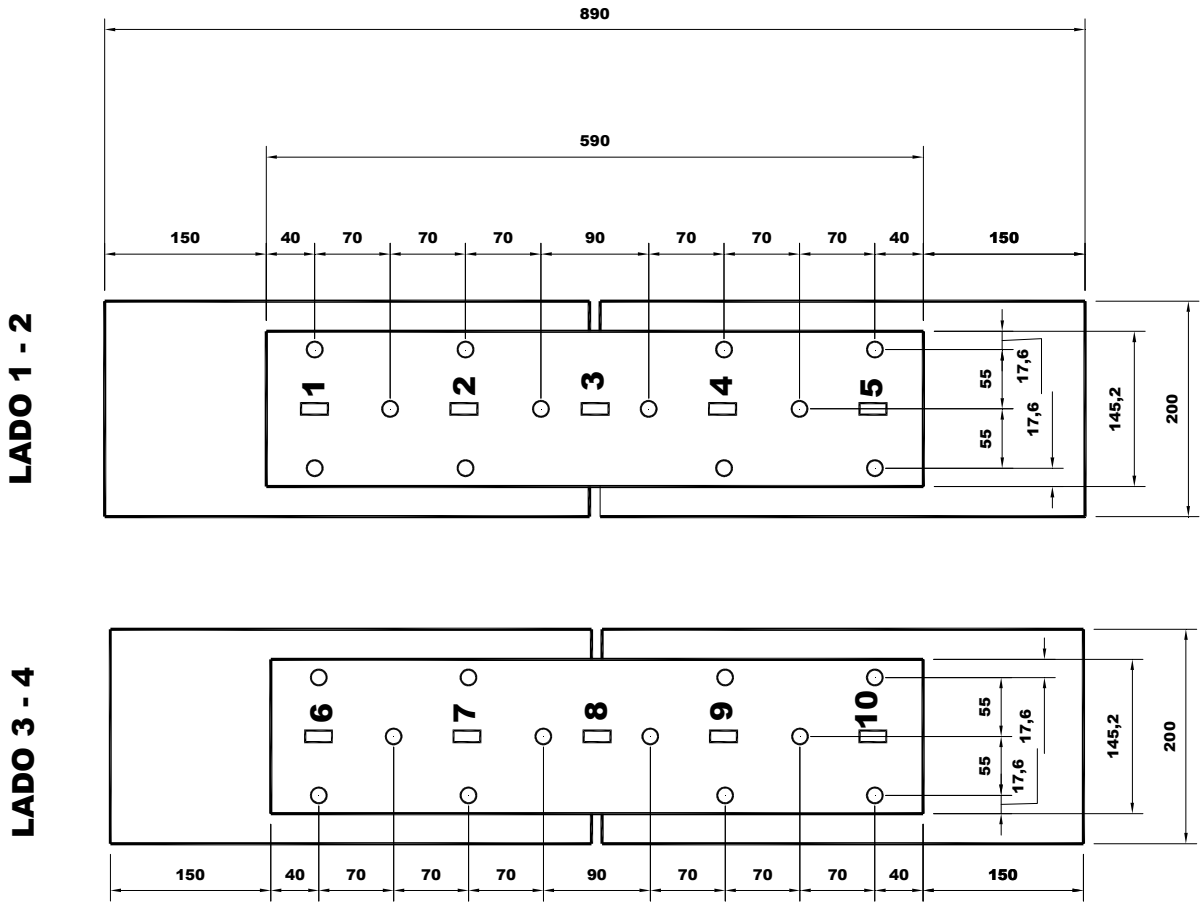


Figura 5.2 – Disposição dos extensômetros no ensaio E2_CARB_S70_a

5.2.1 Comparação dos ensaios E1_CARB_S50_a com E2_CARB_S70_a

Estes ensaios apresentam a mesma configuração de parafusos porém valores diferentes do parâmetro s, permitindo analisar o seu comportamento pela sua simples variação. Para esta análise foram agrupadas as curvas carga *versus* deformação, conforme Figura 5.3, obtidas através dos extensômetros 2 e 4 dos dois ensaios experimentais.

Para melhorar a visualização foi colocado apenas o resultado destes extensômetros e ao lado direito, em cada gráfico, o desenho da posição dos extensômetros observados.

É interessante observar, que no E1_CARB_S50_a ocorreu a ruptura na área líquida passando por três furos, enquanto no E2_CARB_S70_a na área líquida passando por um furo, conforme observado na Figura 5.3 e Tabela 5.1, respectivamente.

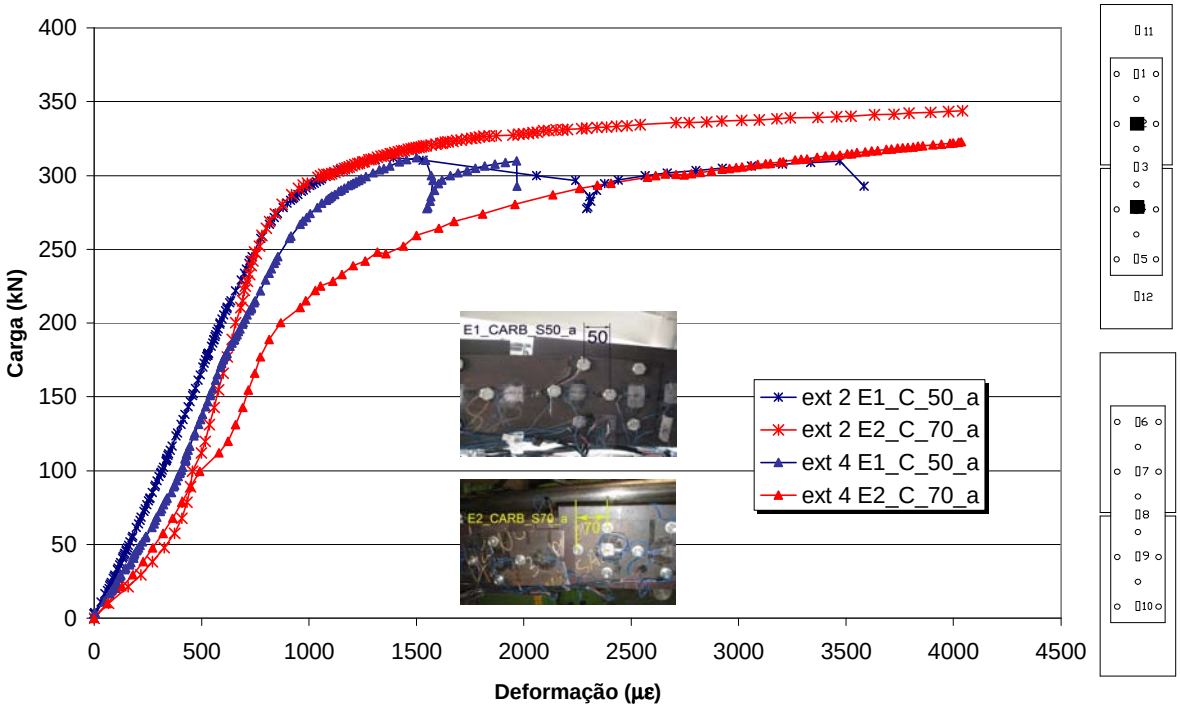


Figura 5.3 – Curvas carga *versus* deformação dos ensaios E1 e E2 (ext. 2 e 4)

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 5.3, nota-se no ensaio E1_CARB_S50_a, uma maior rigidez inicial, pela comparação das diferentes deformações apresentadas para uma mesma carga no início do carregamento.

Este efeito foi causado pelo menor valor do parâmetro s mobilizando imediatamente os três parafusos, pela concentração de tensões nos primeiros furos provocada pela placa de 15 mm de espessura.

Observa-se que a maior carga última foi alcançada pelo ensaio E2_CARB_S70_a, devido a necessidade de se atingir uma carga maior para vencer a maior resistência proporcionada pela área líquida na seção de um furo, conforme mostrado nas curvas carga *versus* deslocamento da Figura 5.4.

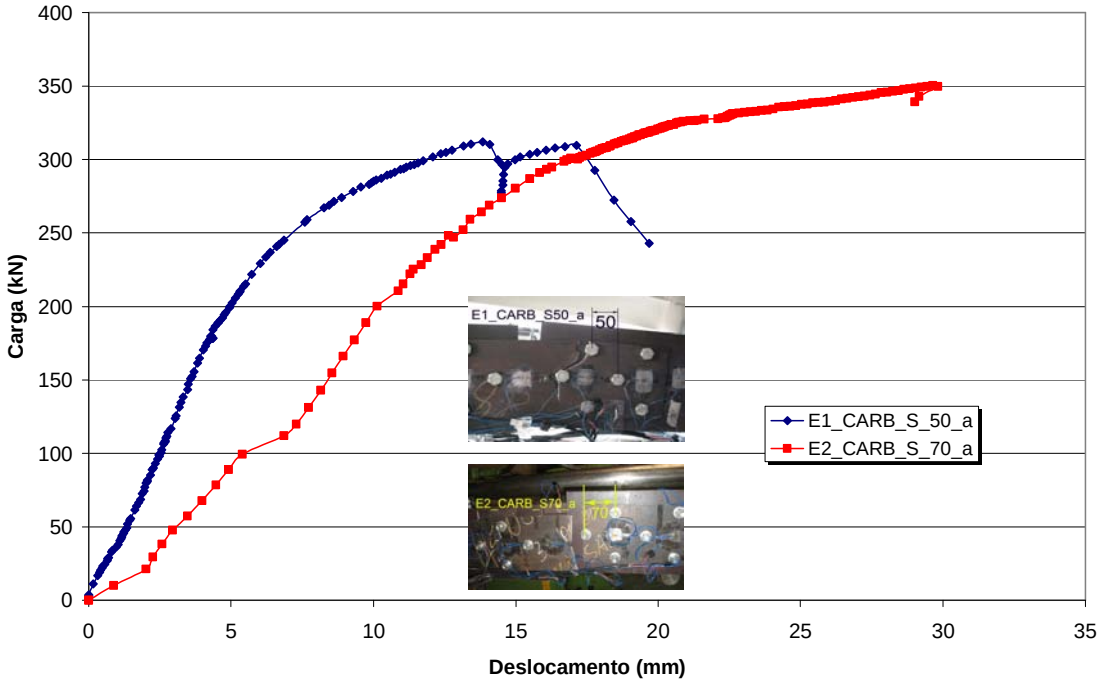


Figura 5.4 – Curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios E1 e E2

Ao comparar os valores experimentais com os valores teóricos da norma (EUROCODE 3, 2003), verifica-se a grande diferença na carga última apresentada pelo ensaio E2_CARB_S70_a e os diferentes modos de colapso apresentados pelos ensaios E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a, conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E1 e E2

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%)
E1_CARB_S50_a	3F	312,0	2F	298,3	4,6
E2_CARB_S70_a	1F	349,5	2F	298,3	17,2

Esse comportamento é devido a grande diferença em absorção de carga pelos parafusos de mesma linha, promovida pela diferente configuração de parafusos, como pode ser observado no gráfico percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada apresentado na Figura 5.5. Apesar disto, os

limites do Eurocode podem ser interpretados como limites inferiores para o problema.

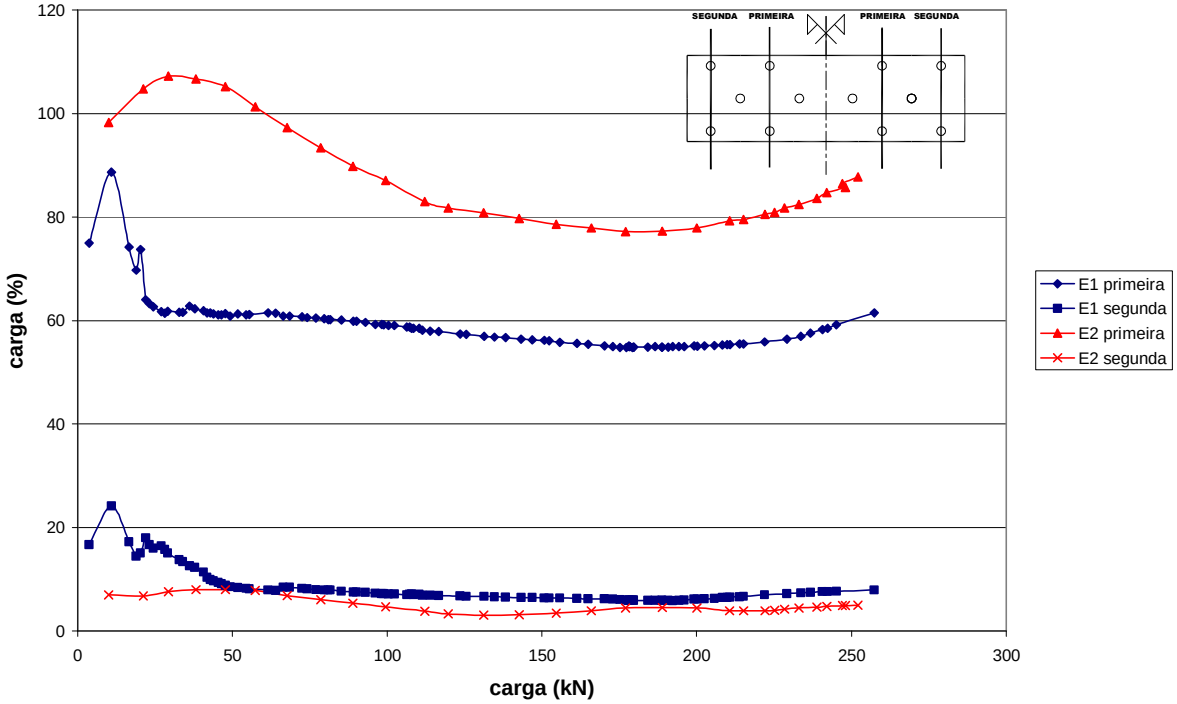


Figura 5.5 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E1 e E2

Estes dados foram retirados pela média das deformações fornecidas pelos extensômetros colados na placa de ensaio com espessura de 3 mm.

A primeira seção transversal no sentido de aplicação da carga, ou seja, a primeira seção mais perto do centro da chapa, onde foram colados os extensômetros 1,5,6 e 10 (ver Figura 5.6).

A seção transversal no meio da placa, onde foram colados os extensômetros 3 e 8, foi considerada a seção de aplicação total da força.

A segunda seção transversal no sentido de aplicação da carga é caracterizada pela a segunda seção mais longe do centro da placa, onde foram colados os extensômetros 1,5,6 e 10 (ver Figura 5.6).

Estas seções estão definidas para os dois tipos de furação nos desenhos apresentados na Figura 5.6.

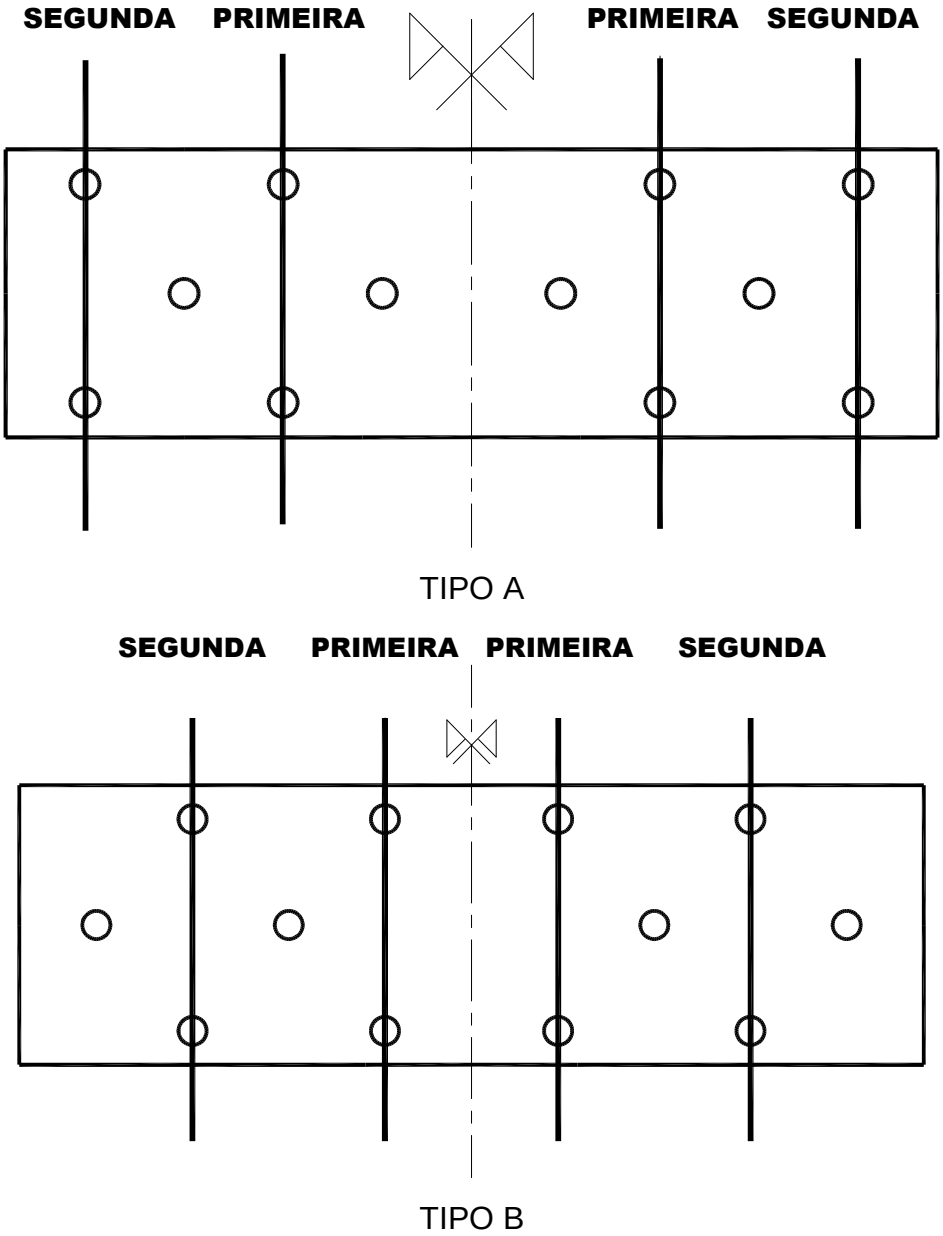


Figura 5.6 – Localização das seções nas chapas de ensaio

5.2.2 Comparação dos ensaios E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a com E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30

A diferença dos ensaios experimentais E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a para os ensaios experimentais E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30 foi a disposição dos parafusos, conforme mostra a Figura 5.7. Observa-se que nos dois primeiros ensaios, a primeira seção após o eixo de simetria da ligação é constituída por um

parafuso enquanto que nos ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30 existem dois parafusos nesta mesma seção.

E3_CARB_S50

E1_CARB_S50_a

Figura 5.7 – Configurações de furação

Para esta análise foi construída a comparação das curvas carga *versus* deformação mostradas na Figura 5.8, nas quais são agrupados os comportamentos dos ensaios experimentais envolvidos, observados pelo extensômetro 2.

Novamente, para melhorar a visualização dos resultados utilizam-se apenas as leituras de um extensômetro, e ao lado direito, do gráfico, a posição do extensômetro nos ensaios considerados.

Podem ser obtidas no anexo A desta dissertação, para eventual consulta, as curvas obtidas de todos os ensaios experimentais, além de todas as comparações possíveis.

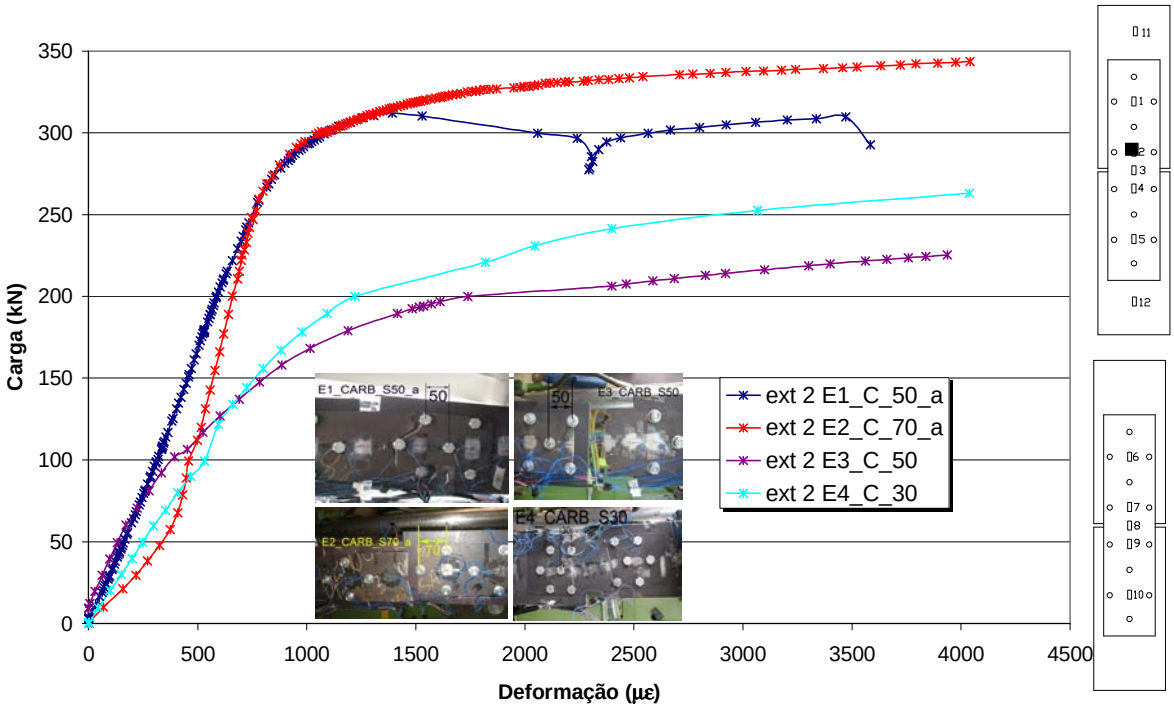


Figura 5.8 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4 (ext. 2)

Observa-se que os ensaios E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a apresentam maior rigidez inicial do que os ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30, devido a configuração da furação ser diferente entre eles.

Esta maior rigidez inicial prova que os ensaios E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a apresentaram uma melhor distribuição de tensão no final da ligação mais equilibrada que os ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30.

Nas curvas carga *versus* deslocamento da Figura 5.9, observa-se que o ensaio E2_CARB_S70_a apresenta maior carga última de ruptura do que os ensaios E1_CARB_S50_a, E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30, devido a sua ruptura ter ocorrido na seção da área líquida de um furo, possuindo maior área líquida a ser vencida, que na seção da área líquida passando por dois furos dos ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30 e passando por três furos do ensaio E1_CARB_S50_a, respectivamente.

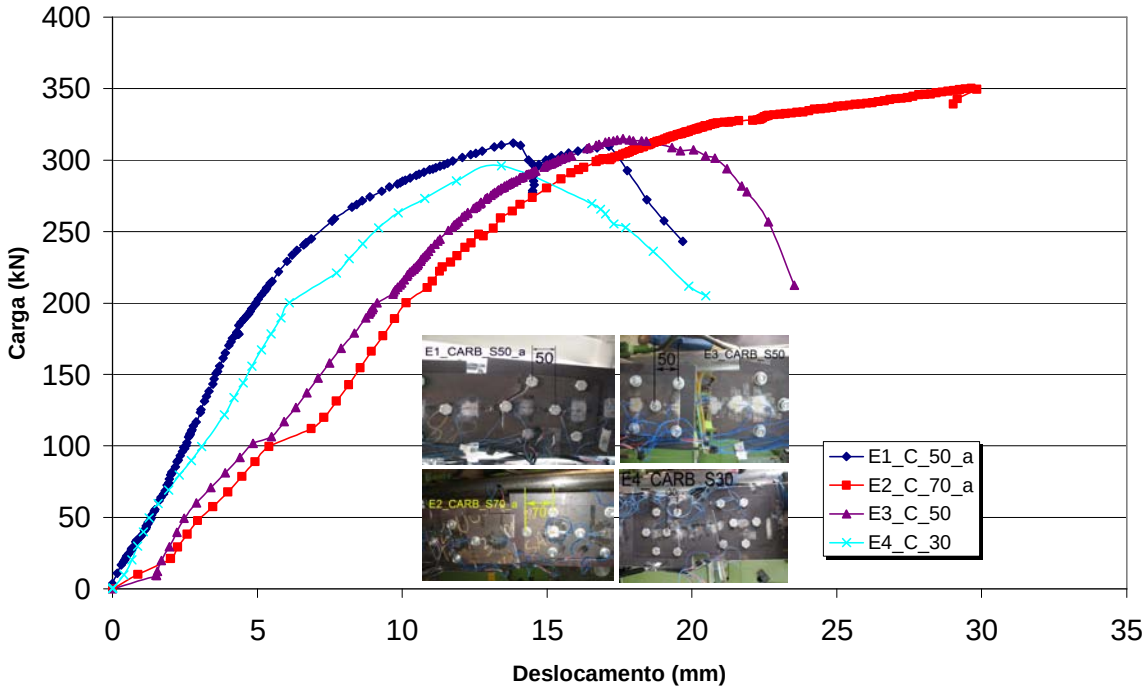


Figura 5.9 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E1, E2, E3 e E4

Considerando-se um erro tolerável de 10% e comparando-se os valores experimentais com os valores teóricos do Eurocode, verifica-se novamente a diferença na carga última apresentada pelo ensaio E2_CARB_S70_a e um diferente modo de colapso apresentado pelo ensaio E4_CARB_S30, mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E1, E2, E3 e E4

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%)
E1_CARB_S50_a	3F	312,0	2F	298,3	4,6
E2_CARB_S70_a	1F	349,5	2F	298,3	17,2
E3_CARB_S50	2F	310,0	2F	298,3	3,9
E4_CARB_S30	2F	296,0	3F	282,5	4,8

Pode-se observar na Figura 5.10 a melhor distribuição de carga dos ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30 executados com furação tipo B em relação aos ensaios E1_CARB_S50_a e E2_CARB_S70_a executados com furação tipo A.

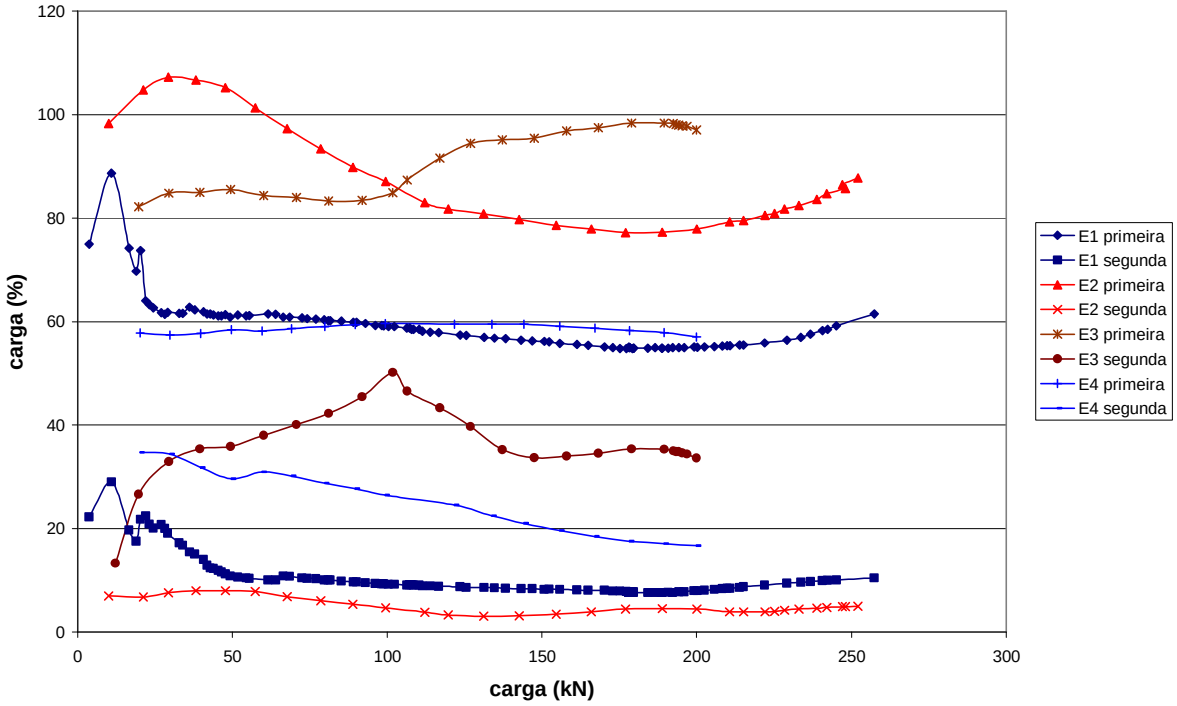


Figura 5.10 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E1, E2, E3 e E4

Novamente, os limites do Eurocode podem ser interpretados como limites inferiores para o problema.

5.2.3 Comparação dos ensaios E1_CARB_S50_a, E3_CARB_S50 e E8_CARB_S50_P8

Estes ensaios experimentais foram comparados, pois apresentam ligações aparafusadas alternadas constituídas de aço carbono com o mesmo valor do parâmetro s, ou seja, os ensaios E1_CARB_S50_a, E3_CARB_S50 e E8_CARB_S50_P8 têm o valor de s fixado em 50 mm. Todavia, a placa interna no ensaio E8_CARB_S50_P8 possui espessura de 8 mm, diferentemente dos outros dois ensaios, onde foi utilizada uma placa de 15 mm de espessura.

Analisando-se as curvas carga *versus* deformação apresentadas na Figura 5.11 construídas através da comparação dos resultados fornecidos pelo

extensômetro 7, observa-se uma maior rigidez inicial do ensaio E1_CARB_S50_a, no qual ocorreu a ruptura na área líquida dos três furos, mostrando, novamente, a influência da configuração da furação no resultado final em termos de rigidez da ligação.

Os três ensaios apresentam cargas últimas diferentes, onde o ensaio experimental E8_CARB_S50_P8 apresenta maior resistência, como pode ser observado nas curvas carga *versus* deslocamento apresentadas na Figura 5.12, devido a melhor distribuição da carga aplicada entre os parafusos, proporcionada pela utilização da placa de menor espessura no ensaio.

Nas curvas carga *versus* deformação da Figura 5.11, e em todas as curvas carga *versus* deformação de todos os ensaios, não é possível visualizar as cargas últimas dos ensaios, porque os extensômetros deixaram de registrar as leituras antes dos ensaios atingirem a carga última.

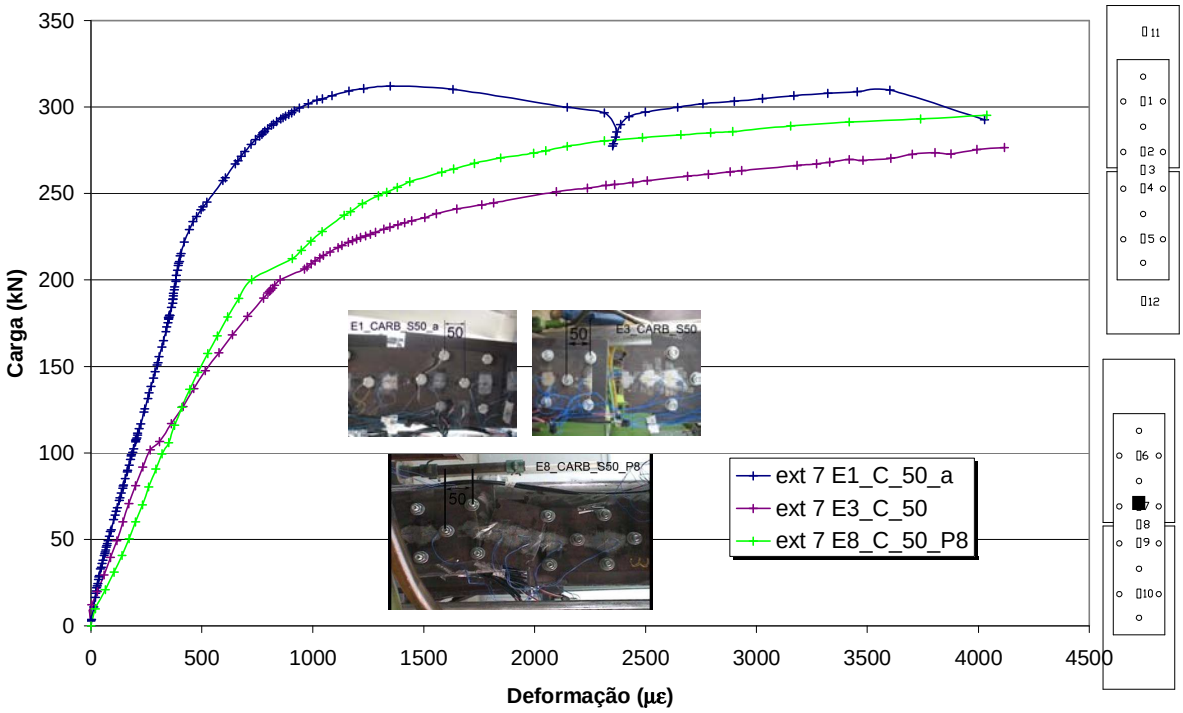


Figura 5.11 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E1, E3 e E8 (ext. 7)

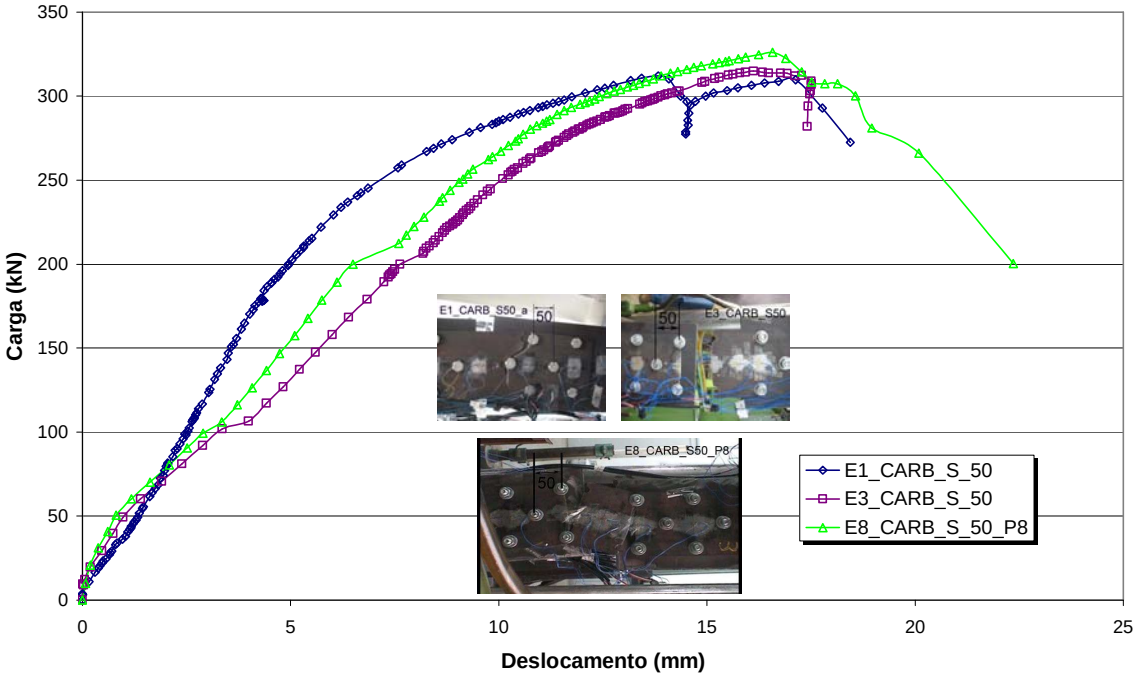


Figura 5.12 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E1, E3 e E8

Ao comparar os valores experimentais com os valores teóricos do Eurocode, verifica-se novamente outro modo de colapso para o ensaio E1_CARB_S50_a, mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E1, E3 e E8

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%)
E1_CARB_S50_a	3F	312,0	2F	298,3	4,6
E3_CARB_S50	2F	310,0	2F	298,3	3,9
E8_CARB_S50_P8	2F	326,0	2F	298,3	9,3

Pode-se observar na Figura 5.13 a melhor distribuição de carga pelos parafusos dos ensaios E3_CARB_S50 e E8_CARB_S50_P8, diferente em comparação com o ensaio E1_CARB_S50_a, devido a mudança da configuração da furação.

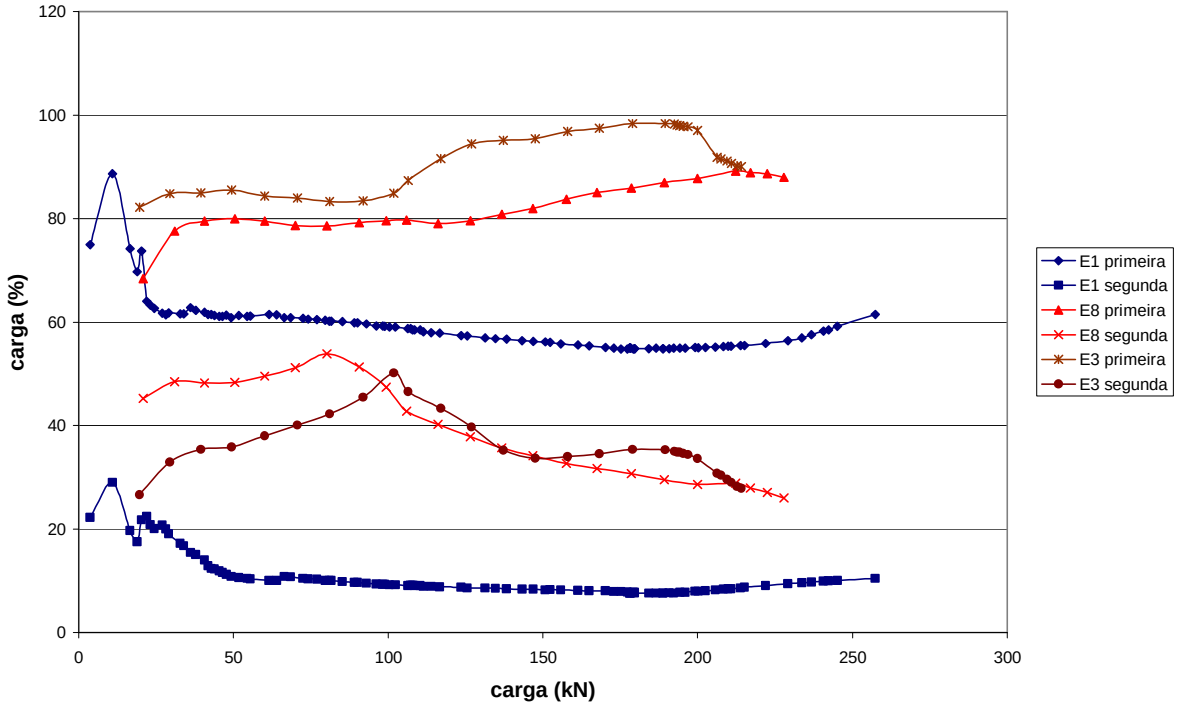


Figura 5.13 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E1, E3 e E8

Observa-se, também, uma melhor distribuição de carga no ensaio E8_CARB_S50_P8 devido a utilização da placa principal com 8 mm de espessura

5.2.4 Comparação dos ensaios E3_CARB_S50, E4_CARB_S30, E6_CARB_S30_P10 e E8_CARB_S50_P8

Neste item comparam-se os resultados dos ensaios experimentais de ligações aparafusadas alternadas de placas constituídas de aço carbono, apresentando dois valores distintos para o parâmetro s e também com variação da placa principal.

Analisando-se as curvas carga *versus* deformação da Figura 5.14, construídas pela leitura do extensômetro 4, conclui-se que as ligações aparafusadas dos ensaios experimentais E4_CARB_S30 e E6_CARB_S30_P10 com valores de s fixados em 30 mm possuem mais rigidez do que as ligações aparafusadas dos ensaios experimentais E3_CARB_S50 e E8_CARB_S50_P8 com valores de s fixados em 50 mm e placas principais mais finas com espessura de 8 e 10 mm, respectivamente.

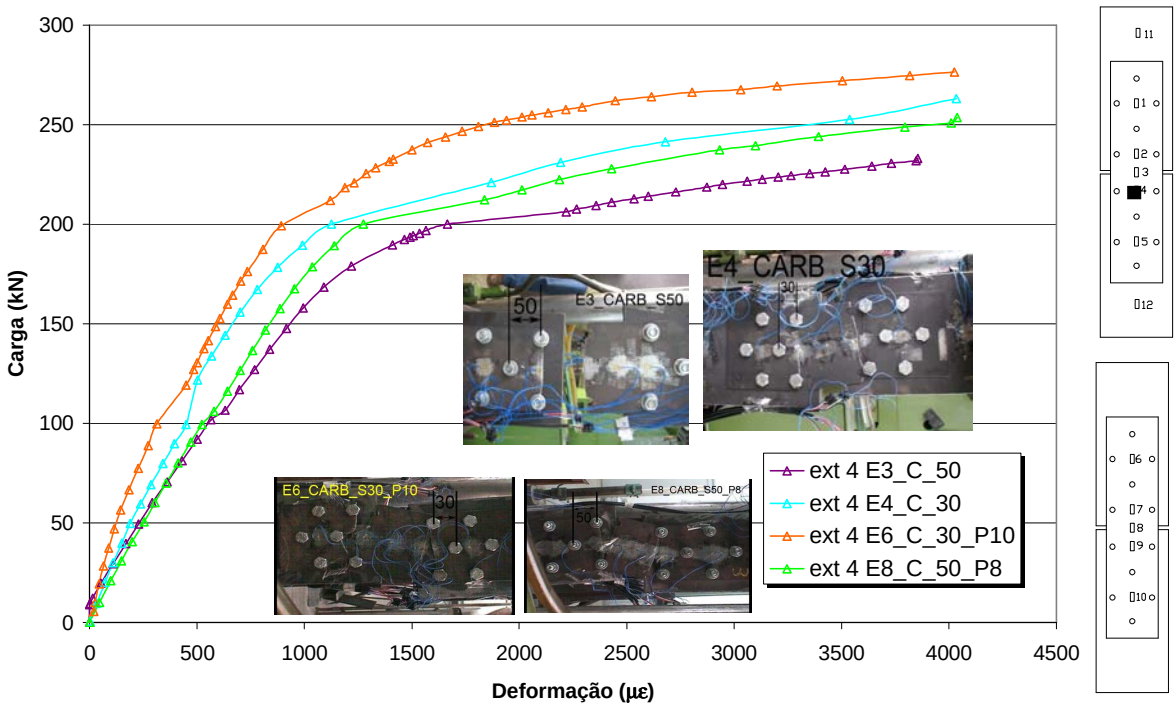


Figura 5.14 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8 (ext. 4)

Na curva carga *versus* deslocamento mostrada na Figura 5.15, pode-se constatar que os ensaios com valor do parâmetro s maiores tiveram as maiores resistências sendo que as placas finas, proporcionaram melhor distribuição da carga, apresentando melhores resultados em termos de resistência final

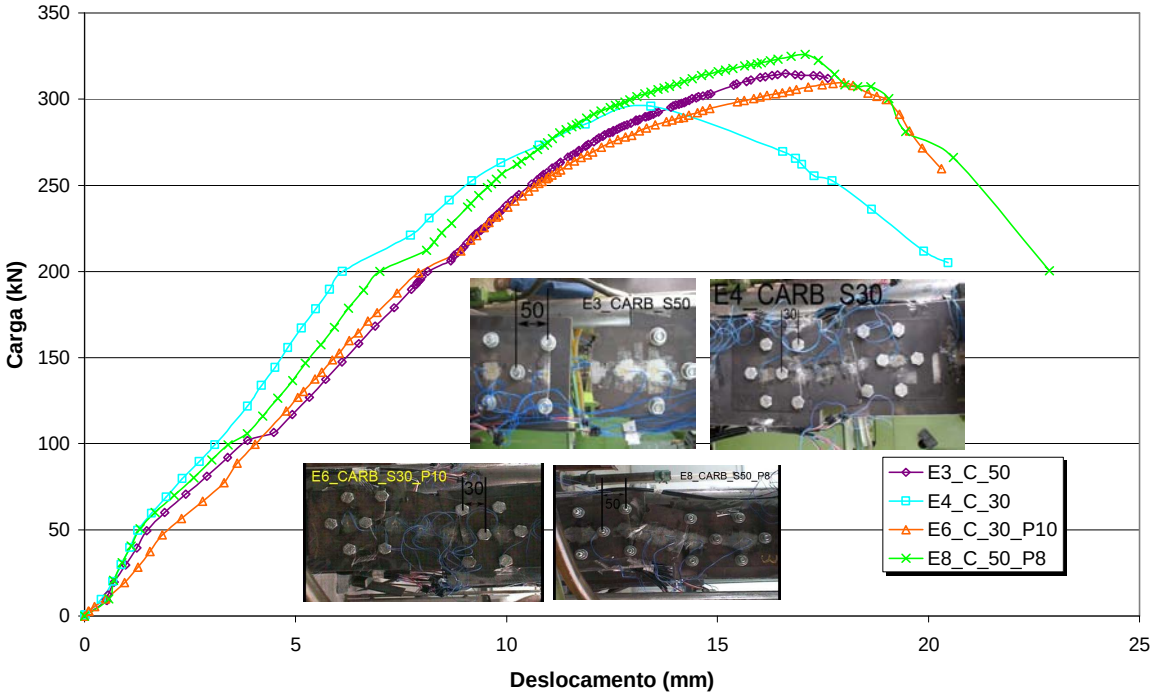


Figura 5.15 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E3, E4, E6 e E8

Comparando os valores experimentais com os valores teóricos do Eurocode, verifica-se novamente diferentes modos de colapso apresentado pelo ensaio E4_CARB_S_30, mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E3, E4, E6 e E8

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga medida (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga prevista EC-3 (kN)	Diferença (%)
E3_CARB_S50	2F	310,0	2F	298,3	3,9
E4_CARB_S30	2F	296,0	3F	282,5	4,8
E6_CARB_S30_P10	3F	309,5	3F	282,5	9,6
E8_CARB_S50_P8	2F	326,0	2F	298,3	9,3

Pode-se observar na Figura 5.16, que na primeira seção, a distribuição de carga pelos parafusos apresenta um ordenamento levando em consideração primeiramente o valor do parâmetro s e em seguida a espessura da placa, apresentando a maior percentagem de carregamento os maiores valores de s, e

apresentando a maior percentagem de carregamento os maiores valores da espessura da placa principal.

Observa-se, também, uma melhor distribuição de carga nos ensaios E6_CARB_S30_P10 e E8_CARB_S50_P8, que utilizaram a placa principal mais fina.

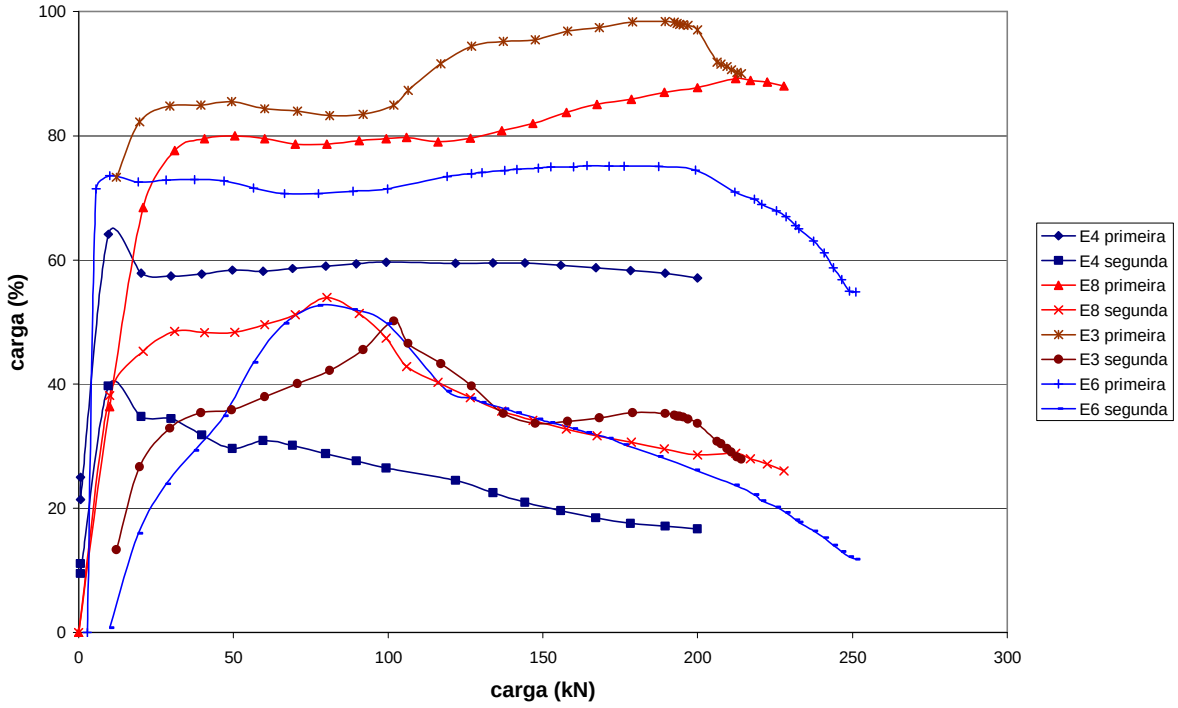


Figura 5.16 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E3, E4, E6 e E8

5.3 Ligações com aço inoxidável

A análise das ligações aparafusadas alternadas de chapas constituídas de aço inoxidável será feita da mesma forma que foi feita para ligações constituídas de aço carbono.

O uso de curvas carga *versus* deformação e carga *versus* deslocamento permite avaliar o comportamento da ligação aparafusada alternada de chapas constituídas de aço inoxidável, mostrando uma comparação entre estas ligações e as ligações de aço carbono a ser apresentada posteriormente.

Para esta análise, foram novamente utilizados cinco extensômetros elétricos instalados e posicionados simetricamente em cada chapa de 3 mm de espessura.

Todavia, como nos ensaios das chapas de aço carbono, os resultados obtidos para os canais 1, 5, 6 e 10 foram inconclusivos, e assim, somente apresentam-se os dados correspondentes aos extensômetros 2, 3, 4, 7, 8 e 9, respectivamente.

Novamente, pode-se agrupar alguns resultados retirados da mesma posição de leitura, comparando seus comportamentos e fazendo uma análise da variação dos parâmetros que influenciam no comportamento global das ligações em estudo.

Repete-se, novamente, a colagem dos extensômetros 2, 4, 7 e 9 em simetria, com a mesma localização, invertidas as posições, como também acontece com os extensômetros 3 e 8 (ver Figura 5.2 apresentada anteriormente).

5.3.1 Comparação dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23

A primeira análise foi feita com a comparação dos resultados dos três ensaios realizados com as chapas constituídas de aço inoxidável, lembrando que os três ensaios tiveram as dimensões idênticas apenas variando o valor do parâmetro s.

Observando-se as curvas carga *versus* deslocamento mostradas na Figura 5.17 conclui-se que o valor do parâmetro s governou a resistência última dos ensaios.

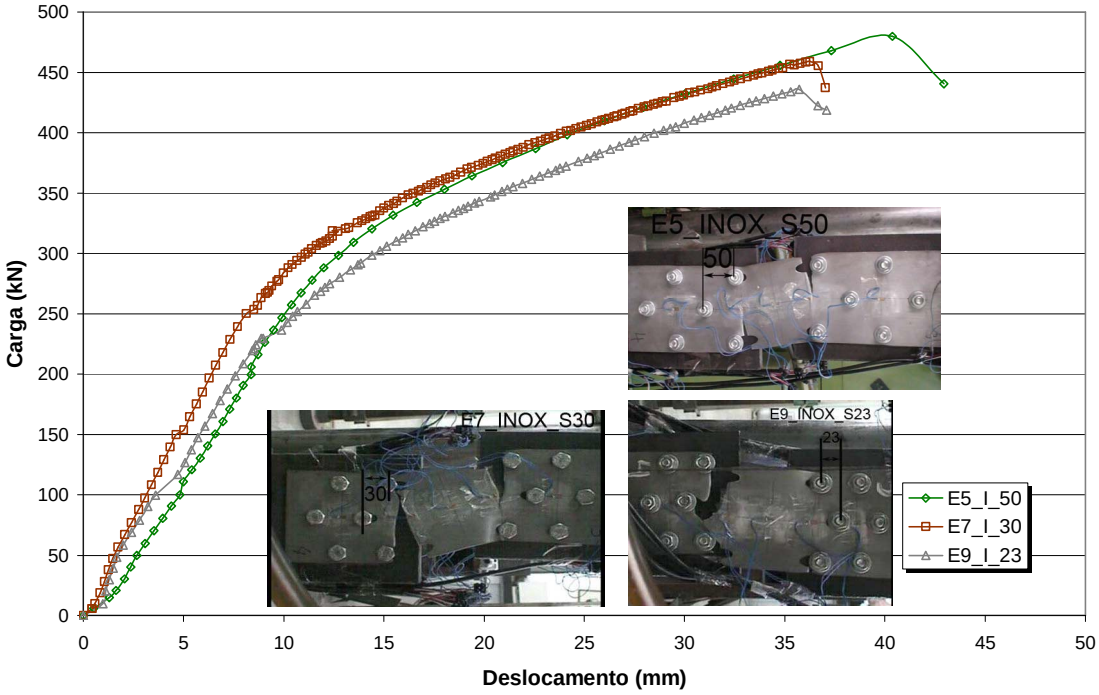


Figura 5.17 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E5, E7 e E9

Analisando-se as curvas carga *versus* deformação, mostradas na Figura 5.18 pode-se concluir que a maior rigidez inicial foi apresentada pelos ensaios, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23, porém o ensaio E5_INOX_S50 apresenta a maior resistência última. Nestes ensaios observou-se um comportamento similar ao das ligações constituídas de aço carbono, onde os ensaios com menor valor do parâmetro s, apresentaram o comportamento de maior rigidez em relação aos outros, com maior valor do parâmetro s.

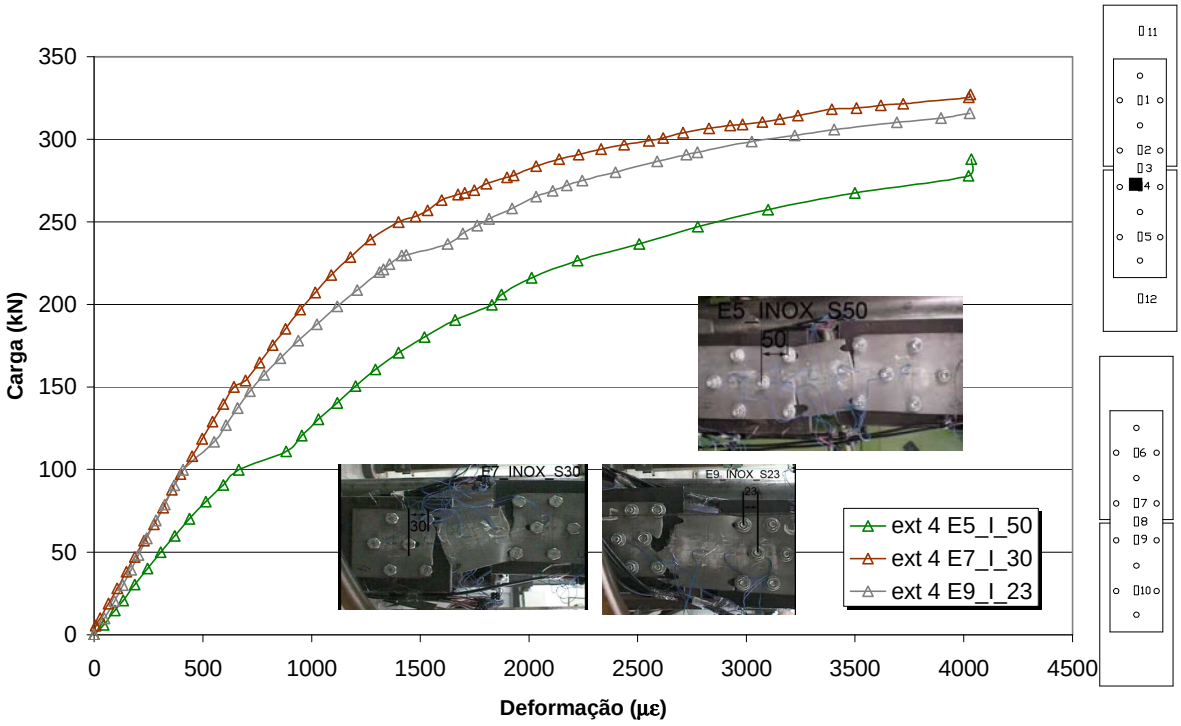


Figura 5.18 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaio E5, E7 e E9 (ext. 4)

Estas curvas carga *versus* deformação da Figura 5.18, também mostram um agrupamento do comportamento dos ensaios E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 devido a pequena diferença entre os valores do parâmetro s, comparada com o ensaio E5_INOX_S50, mostrando a evolução do comportamento da ligação com a variação do parâmetro s.

Comparando os valores experimentais com os valores teóricos do Eurocode, verifica-se uma grande diferença na carga última e diferentes modos de colapso apresentados pelos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23, conforme mostrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E5, E7 e E9

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%)
E5_INOX_S50	2F	480,0	AB	302,9	58,5
E7_INOX_S30	2F	459,0	AB	302,9	51,5
E9_INOX_S23	3F	436,0	AB	302,9	43,9

Observa-se uma melhor distribuição de carga no ensaio E9_INOX_S23 e uma pior distribuição de carga no ensaio E7_INOX_S30. Porém, diferentemente destes ensaios, o ensaio E5_INOX_S50 apresenta um comportamento de diminuição do percentual de carga de cada seção mostrando uma maior capacidade de absorção de carga e apresentando a maior carga última dos ensaios.

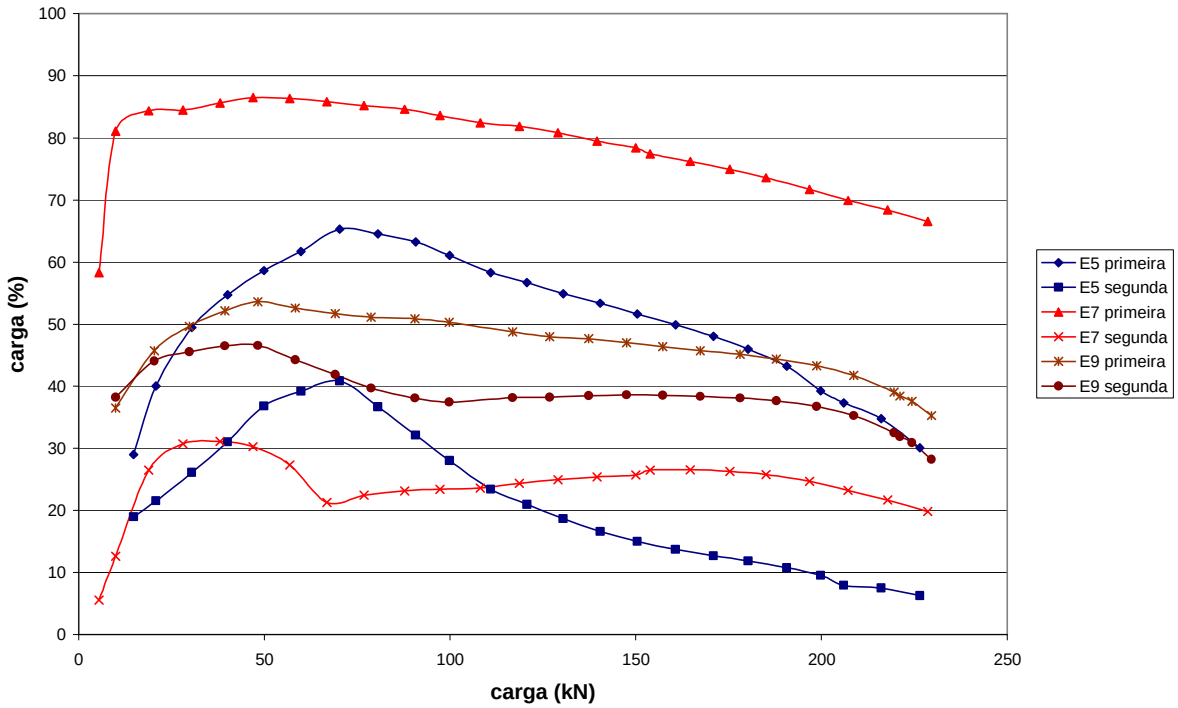


Figura 5.19 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E5, E7 e E9

5.4 Comparação dos resultados do aço carbono com o aço inoxidável

Este sub-capítulo foi desenvolvido para estudar as ligações aparafusadas alternadas constituídas de aço inoxidável e para tanto foram construídas ligações semelhantes às utilizadas para o aço carbono, ou seja, com mesma geometria, para realização de uma análise comparativa.

5.4.1 Comparação dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 com E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30

Comparando-se os ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 com os ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30, que foram executados com a mesma placa principal, observa-se através das curvas carga *versus* deslocamento mostradas na Figura 5.20, a diferença de comportamento entre as ligações constituídas pelos dois materiais utilizados neste trabalho.

As ligações em aço inoxidável apresentaram uma resistência última superior em relação às ligações em aço carbono, além de possuir maior ductilidade devido ao maior deslocamento sofrido conforme observado na Figura 5.20.

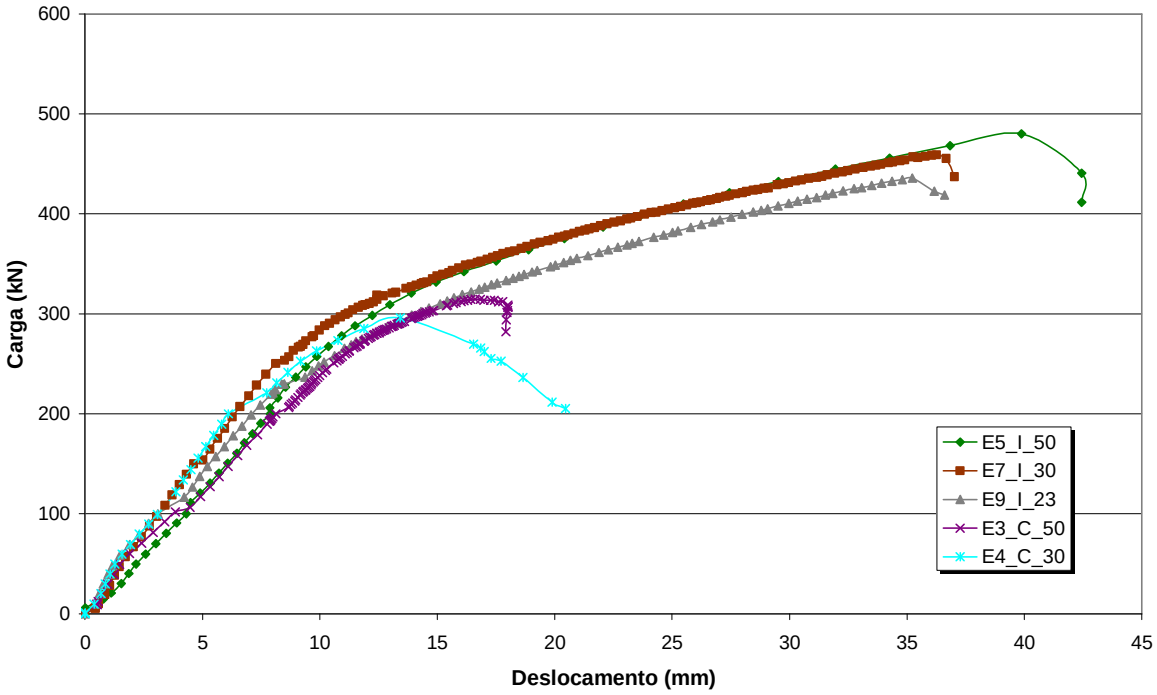
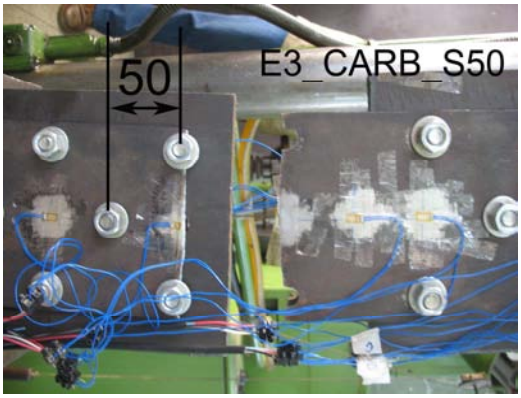
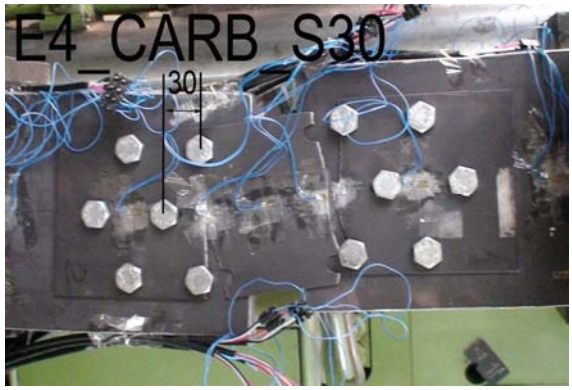


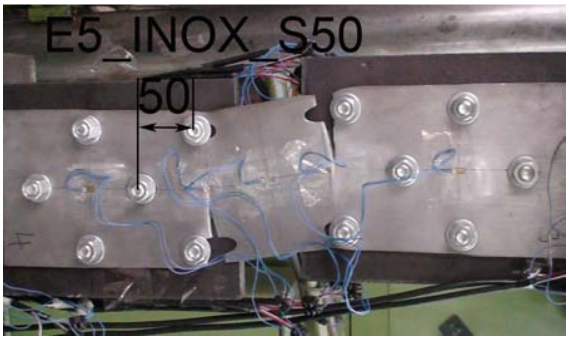
Figura 5.20 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E3, E4, E5, E7 e E9



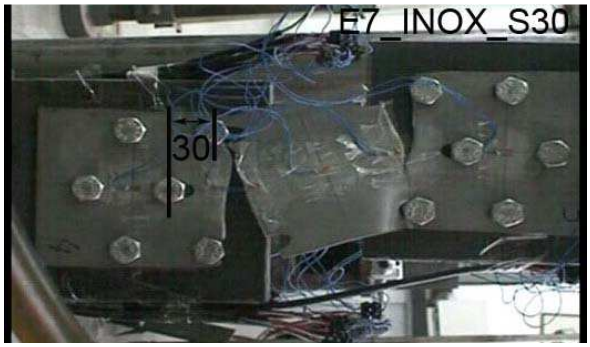
E3_CARB_S50



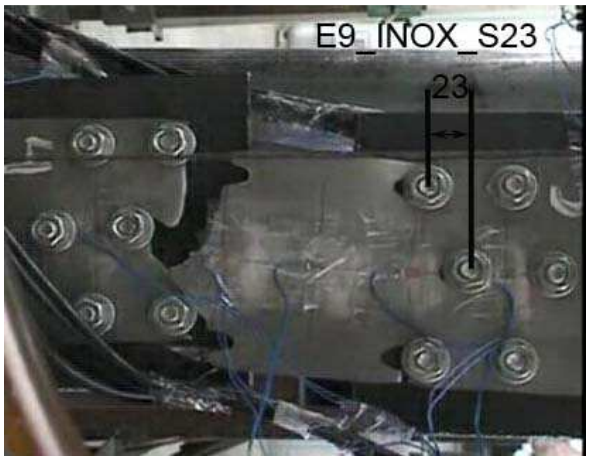
E4_CARB_S30



E5_INOX_S50



E7_INOX_S30



E9_INOX_S23

Figura 5.21 – Modos de ruptura - Ensaios E3, E4, E5, E7 e E9

Observa-se nas curvas carga *versus* deformação construídas com as leituras retiradas do extensômetro 2, dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23, E3_CARB_S50 e E4_CARB_S30, apresentadas na Figura 5.22, que a rigidez inicial apresentada pela ligação aparafusada de chapas constituídas de aço

carbono, diminui mais rápido, do que a rigidez da ligação aparafusada de chapas constituídas de aço inoxidável.

Este comportamento verificado através das curvas carga *versus* deformação, mostra que ligação aparafusada de chapas constituídas de aço inoxidável tem uma maior capacidade de absorção de carga, através da sua maior capacidade de deformação, apresentando uma maior carga última.

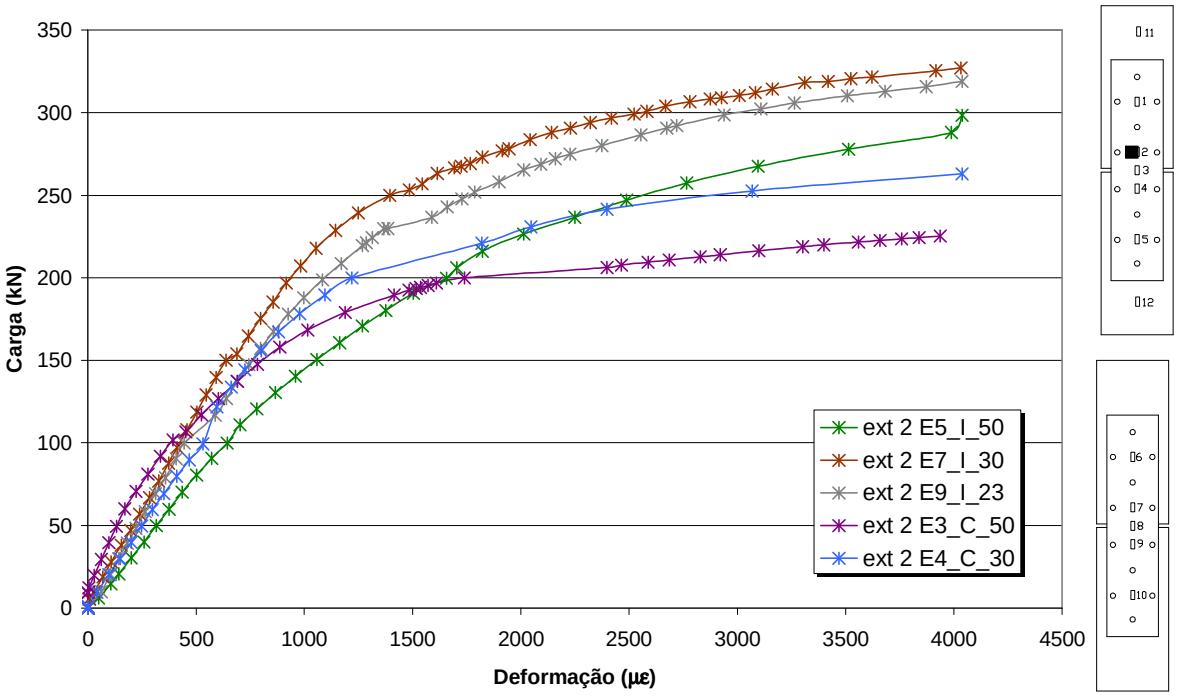


Figura 5.22 – Curvas carga *versus* deformação - Ensaios E3, E4, E5, E7 e E9

Comparando os valores experimentais com os valores teóricos do Eurocode, verifica-se que o ensaio E3_CARB_S50 é o único que apresentou o modo de colapso idêntico ao previsto pelo Eurocode, e novamente observa-se as cargas últimas dos ensaios em aço inoxidável muito altas e modos de colapsos diferentes do Eurocode, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E3, E4, E5, E7 e E9

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%)
E3_CARB_S50	2F	310,0	2F	298,3	3,9
E4_CARB_S30	2F	296,0	3F	282,5	4,8
E5_INOX_S50	2F	480,0	AB	302,9	58,5
E7_INOX_S30	2F	459,0	AB	302,9	51,5
E9_INOX_S23	3F	436,0	AB	302,9	43,9

Observa-se, através das curvas da Figura 5.23, nos ensaios E3_CARB_S50 e E4_CARB_S_30, um comportamento na distribuição de carga, nas seções das linhas dos parafusos perpendiculares a aplicação da carga, diferente dos ensaios executados em aço inoxidável, que apresentam curvas bem definidas com a tendência de diminuição da percentagem de carga nas linhas dos parafusos, com o aumento da carga. O ensaio E4_CARB_S_30, que possui um menor valor do parâmetro s, apresenta uma melhor distribuição de carga do que o ensaio E3_CARB_S50, conforme mostrado nas curvas apresentadas na Figura 5.23.

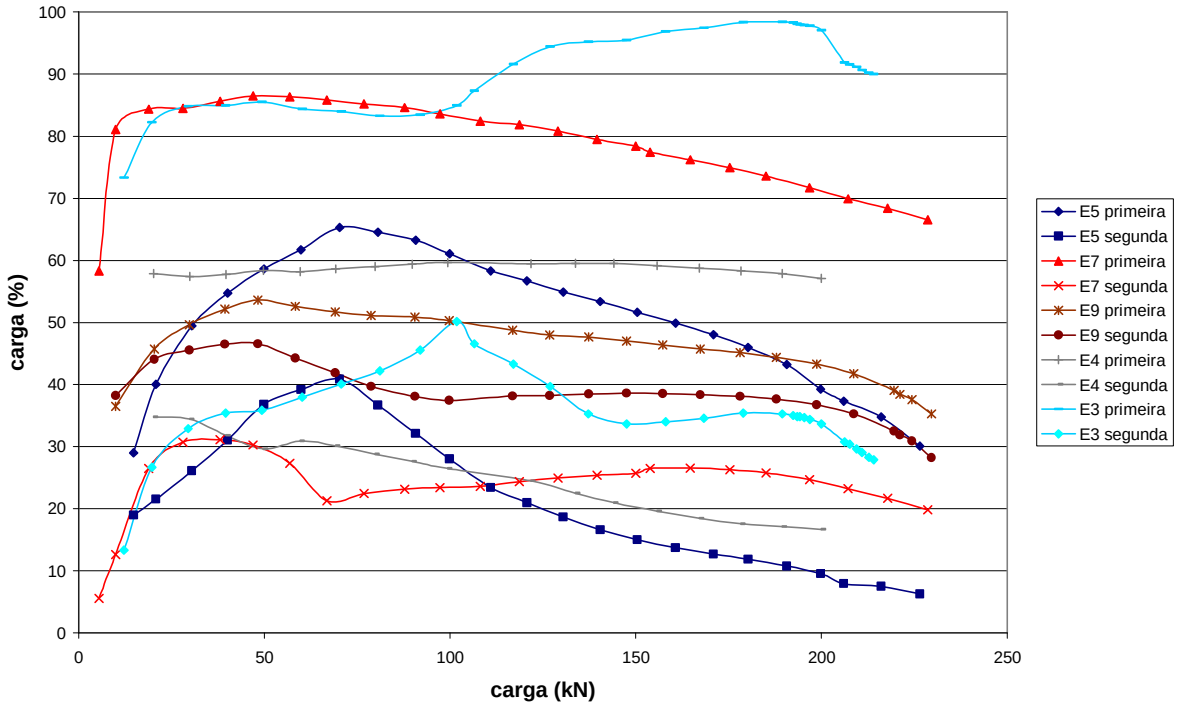


Figura 5.23 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E3, E4, E5, E7 e E9

5.4.2 Comparação dos ensaios E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23 com E6_CARB_S50_P10 e E8_CARB_S30_P8

O mesmo comportamento da comparação do item anterior é observado quando agora analisam-se as curvas carga *versus* deslocamento e carga *versus* deformação, mostradas nas Figura 5.24 e Figura 5.25, respectivamente, dos ensaios com aço inoxidável E5_INOX_S50, E7_INOX_S30 e E9_INOX_S23, e os ensaios com aço carbono E6_CARB_S50_P10 e E8_CARB_S30_P8.

Apenas observa-se uma melhor adequação entre curvas devido ao uso de placas mais finas nos ensaios experimentais de ligações aparafusadas constituídas de aço carbono, compensando um pouco a diferença da maior deformação apresentada pelas ligações constituídas de aço inoxidável.

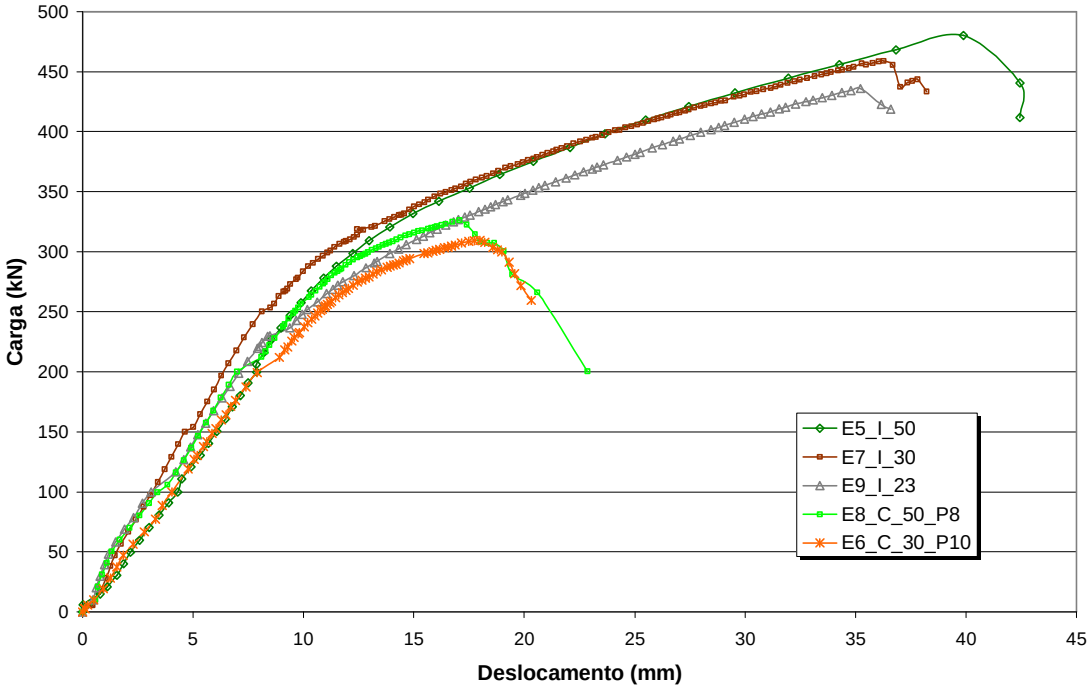


Figura 5.24 – Curvas carga *versus* deslocamento - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

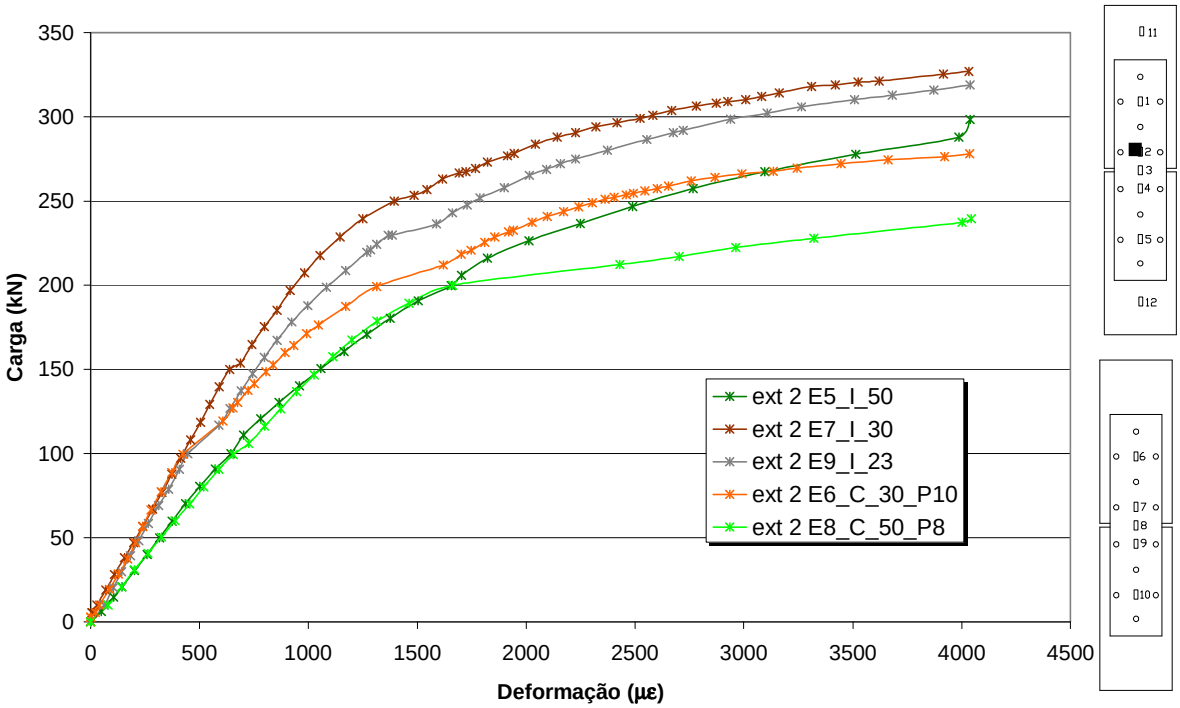
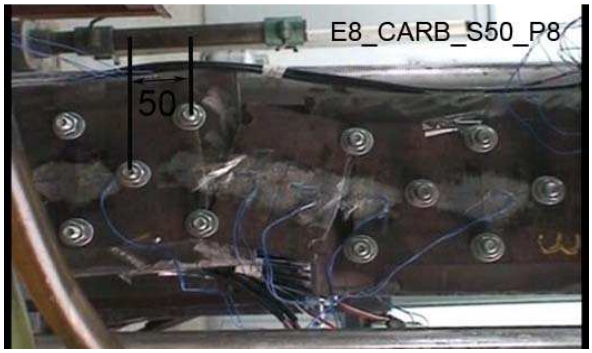
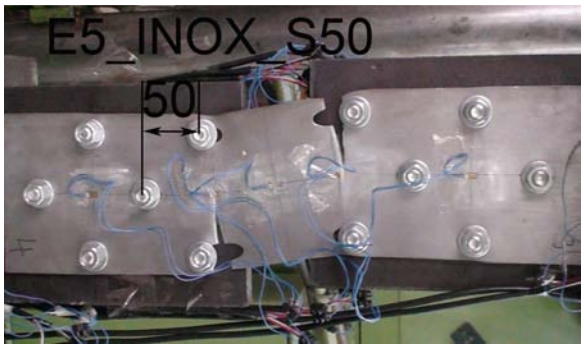


Figura 5.25 – Curvas carga *versus* deformação Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

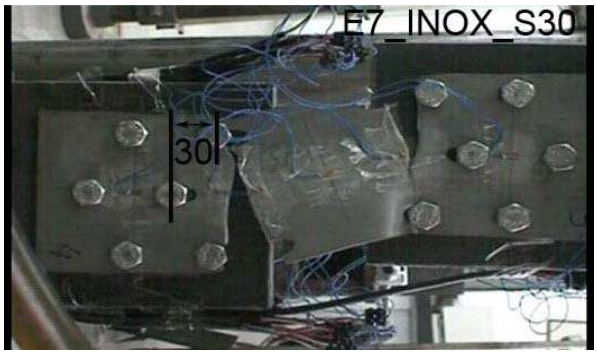
E6_CARB_S50_P10



E8_CARB_S30_P8

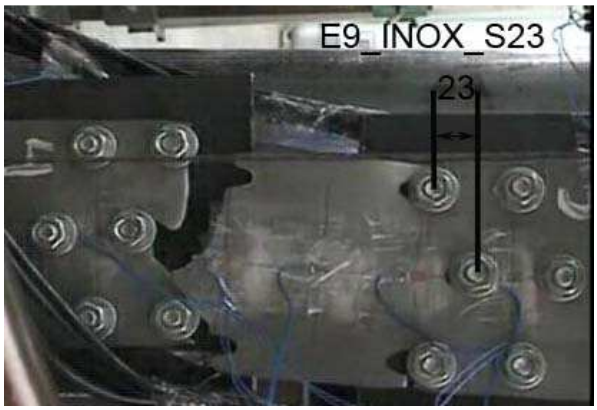


E5_INOX_S50



E7_INOX_S30

Figura 5.26 – Modo de ruptura - Ensaios E5, E6, E7e E8



E9_INOX_S23

Figura 5.27 – Modo de ruptura - Ensaio E9

Comparando os valores experimentais com os valores teóricos do Eurocode, verifica-se que os ensaios E6_CARB_S30_P10 e E8_CARB_S50_P8 apresentaram o modo de colapso idêntico ao previsto pelo Eurocode, e novamente observam-se as cargas últimas dos ensaios em aço inoxidável muito altas e modos de colapso diferentes do Eurocode, conforme apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valores teóricos e experimentais dos ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

Ensaio	Tipo de ruptura	Carga última (kN)	Tipo de ruptura EC-3 (kN)	Carga última EC-3 (kN)	Diferença (%)
E5_INOX_S50	2F	480,0	AB	302,9	58,5
E6_CARB_S30_P10	3F	309,5	3F	282,5	9,6
E7_INOX_S30	2F	459,0	AB	302,9	51,5
E8_CARB_S50_P8	2F	326,0	2F	298,3	9,3
E9_INOX_S23	3F	436,0	AB	302,9	43,9

Observa-se, através das curvas da Figura 5.28, que os ensaios E6_CARB_S30_P10 e E8_CARB_S50_P8 apresentam um comportamento na distribuição de carga, nas seções das linhas dos parafusos perpendiculares a aplicação da carga, diferente dos ensaios executados em aço inoxidável, porém com

alguma semelhança entre si. Os ensaios com placas constituídas de aço inoxidável apresentam curvas bem definidas com a tendência de diminuição da percentagem de carga nas linhas dos parafusos, com o aumento da carga. Novamente o comportamento se repete, onde o ensaio E6_CARB_S30_P10, que possui um menor valor do parâmetro s, apresenta uma melhor distribuição de carga do que o ensaio E8_CARB_S50_P8, conforme mostrado nas curvas apresentadas na Figura 5.28

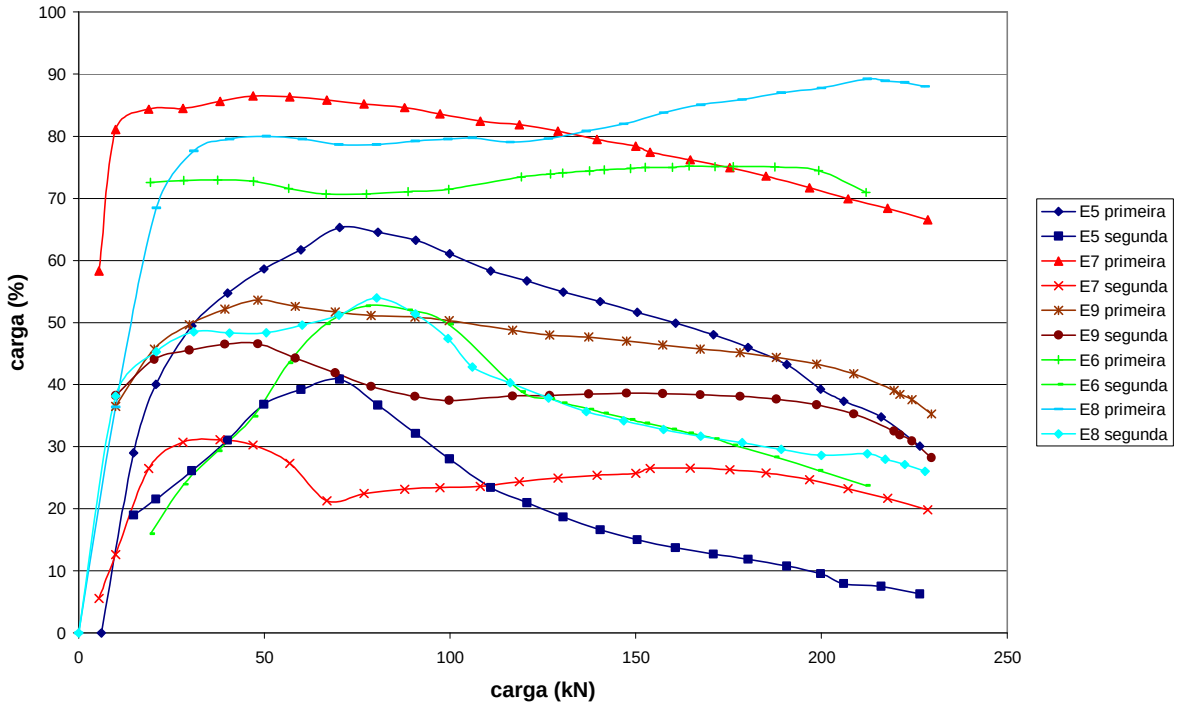


Figura 5.28 – Curvas percentagem de carga por linha de parafuso *versus* carga total aplicada - E5, E6, E7, E8 e E9

São mostrados na Tabela 5.8 e Tabela 5.9, respectivamente, os valores teóricos das cargas últimas das ligações aparafusadas constituídas em aço carbono e aço inoxidável com valores do parâmetro s executados neste trabalho.

Encontra-se uma diferença média de 12% dos valores de $A_g x f_y$ e $A_{net} x f_u$ para ligações em aço carbono, conforme Tabela 5.10. Esta diferença demonstra a pequena capacidade de encruamento do aço carbono, mostrando, como comprovado neste trabalho, a sua baixa capacidade de rigidez e a sua baixa resistência plástica, comparada com a do aço inoxidável.

Verifica-se, também, uma diferença média de 62% dos valores de $A_g x f_y$ e $A_{net} x f_u$ para ligações em aço inoxidável, conforme Tabela 5.11. Esta diferença demonstra a grande capacidade de encruamento do aço inoxidável, mostrando, como também comprovado neste trabalho, a sua alta rigidez e a sua alta resistência plástica, comparada com a do aço carbono.

Tabela 5.8 – Valores teóricos dos ensaios em aço carbono

s (mm)	AB (kN)	2F (kN)	3F (kN)	Cisalhamento (kN)	Esmagamento (kN)	Carga de Ruptura (kN)
30	334,1	298,3	**282,5**	371,3	328,1	**282,5**
50	334,1	**298,3**	320,1	371,3	328,1	**298,3**

Tabela 5.9 – Valores teóricos dos ensaios em aço inoxidável

s (mm)	AB (kN)	2F (kN)	3F (kN))	Cisalhamento (kN)	Esmagamento (kN)	Carga de Ruptura (kN)
23	**302,9**	494,6	455,5	376,0	466,9	**302,9**
30	**302,9**	494,6	469,8	376,0	466,9	**302,9**
50	**302,9**	494,6	531,8	376,0	466,9	**302,9**

Tabela 5.10 – Diferença percentual de $A_g x f_y$ e $A_{net} x f_u$ - ensaios em aço carbono

AB (kN)	2F (kN)	3F (kN)	AB/2F (%)	AB/3F (%)	Média (%)
334,1	298,3	282,5	112,0	118,3	115,1
334,1	298,3	320,1	112,0	104,4	108,2
				Média (%)	111,7

Tabela 5.11 – Diferença percentual de $A_g x f_y$ e $A_{net} x f_u$ - ensaios em aço inoxidável

AB (kN)	2F (kN)	3F (kN)	AB/2F (%)	AB/3F (%)	Média (%)
302,9	494,6	455,5	163,3	150,4	156,8
302,9	494,6	469,8	163,3	155,1	159,2
302,9	494,6	531,8	163,3	175,6	169,4
				Média (%)	161,8

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados neste trabalho e no capítulo seguinte, apresentar-se-ão as considerações finais com as principais conclusões deste trabalho além sugestões para trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

A utilização de ligações aparafusadas alternadas tem se mostrado de grande importância no projeto de estruturas de aço possibilitando uma maior redução nos custos de fabricação e montagem.

Na tentativa de se avaliar o real comportamento das ligações aparafusadas alternadas com chapas constituídas em aço inoxidável, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta área.

Poucos ensaios em laboratório foram realizados que possibilitassem a calibração dos modelos existentes. Desta forma, comenta-se a seguir, os procedimentos adotados na realização deste trabalho.

Este trabalho foi baseado no Eurocode 3 (Eurocode 3, 2003) – Norma Européia para Projeto de Estruturas de Aço por se tratar de uma norma que considera o comportamento das ligações em estruturas de aço inoxidável.

Foram feitos cálculos preliminares de forma a avaliar o comportamento da ligação aparafusada alternada, ao se variar os parâmetros s e p, e mesmo com a utilização do fator de correção k_r , não se observou um outro estado limite último, que não fosse a plastificação da sessão bruta do aço inoxidável.

Os resultados do corte no parafuso pelo efeito de cisalhamento foram preteridos em função da análise do estado limite último da seção bruta, através do escoamento, da seção líquida, através da ruptura, e do esmagamento da placa na seção dos parafusos.

Considerando as análises feitas através destes modos de ruína, a ligação aparafusada constituída de aço inoxidável mostrou durante os ensaios uma grande capacidade de deformação antes da ruptura, característica que se mostrou útil na redistribuição da força aplicada pelos parafusos.

A metodologia de cálculo das ligações alternadas constituídas de aço inoxidável considera a presença desta grande deformação, impondo apenas uma limitação, através do escoamento da seção bruta, sendo esta a resistência plástica da ligação aparafusada para o esforço axial máximo que ela poderá suportar,

mantendo os procedimentos aplicáveis válidos para o aço carbono. Vale ressaltar que não existe nenhum fundamento para justificar este limite empírico, a não ser de garantir a ligação segura sob o aspecto da grande deformação apresentada. Vale lembrar que existem alguns tipos de estruturas onde o esforço axial proveniente das ligações é muito alto podendo ser melhor dimensionadas com aço inoxidável, fato que motiva uma melhor investigação do seu comportamento.

Tendo em mente esta limitação encontrada no Eurocode 3, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço submetidas a esforço axial de tração fora deste limite, determinado pela norma.

Sendo assim, foram comparados os comportamentos de dois tipos de ligações aparafusadas sendo uma constituída de aço carbono e outra de aço inoxidável. Para tanto foram realizados nove ensaios de ligações, sendo que seis em aço carbono e três em aço inoxidável.

A concepção geométrica dos ensaios bem como a instrumentação dos mesmos, para aquisição dos dados no sistema de aplicação de carga, são inovadoras, onde não se encontrou nenhuma referência similar na literatura.

O sistema de aquisição de dados através da construção de células-de-carga no próprio ensaio se mostrou-se bem eficiente, e a disposição dos extensômetros também se mostrou-se capaz tanto na captura de dados quanto na sua utilização na comparação entre si e outros ensaios.

Um dos problemas verificados na leitura das cargas aplicadas foi a utilização de chapas base mais finas, proporcionando desvio de leituras maiores. Isso não inviabilizou a sua utilização, pois sua validade foi verificada, através da comparação dos valores apresentados pelas duas células-de-carga e também pelo valor analógico lido da máquina de tração, que foi aferido antes da realização dos ensaios.

Por fim, utilizou-se um LVDT (transdutor linear variável diferencial) conectado a este sistema de aquisição de dados possibilitando a leitura do deslocamento da ligação aparafusada, tornando ainda mais precisos os resultados aferidos.

6.2 Conclusões

A comparação de resultados mostrou-se efetivamente útil na visualização dos comportamentos apresentados pelos ensaios com mesmas características geométricas. A análise dos resultados obtidos nos ensaios das ligações aparafusadas constituídas de aço carbono permitiu algumas conclusões importantes conforme descrito a seguir:

- os valores de carga última, dos ensaios em aço carbono, obtidos através do Eurocode 3, apresentaram valores coerentes quando comparado com os obtidos experimentalmente, estando o dimensionamento sempre a favor da segurança;
- o ensaio com menor valor do parâmetro s em comparação com um outro maior apresentou uma rigidez inicial maior;
- a configuração da furação Tipo A e a utilização da placa principal mais grossa provocaram no ensaio E2_CARB_S70_a outro tipo de comportamento na ligação aparafusada diferente do previsto pela norma, provocando a mudança no modo de ruptura. Esta ruptura na seção passando por um furo aumentou para 17% a diferença entre a carga última experimental e a teórica. Isto mostra que a forma de cálculo prevista no Eurocode 3 deve ser reavaliada. Entretanto, a norma ainda se mostra eficiente a favor da segurança, por mostrar uma carga de ruptura 60% menor da encontrada experimentalmente;
- A configuração de furação Tipo A apresentou maior rigidez e uma distribuição de tensão mais equilibrada no final da ligação aparafusada do que a ligação Tipo B;
- o menor valor do parâmetro s apresenta uma melhor distribuição força nos parafusos devido a maior proximidade destes;
- o maior valor do parâmetro s apresenta uma maior resistência, pois proporciona uma maior área líquida a ser vencida;
- A diminuição da espessura da placa base melhorou a distribuição da carga na ligação aparafusada constituída de aço carbono, pela sua deformação em conjunto com a placa de ensaio, aumentando a resistência da ligação.

Para os ensaios das ligações aparafusadas de chapas constituídas em aço inoxidável, as principais conclusões obtidas foram:

- Os ensaios em aço inoxidável apresentaram grandes deformações e grande capacidade de absorção de energia devido a sua capacidade de encruamento em função da maior razão entre a tensão última e a tensão limite de escoamento (f_u/f_y);
- O modo de ruína e a carga última esperados, através do Eurocode 3 (EUROCODE 3, 2003), para os ensaios da ligação aparafusada constituída de aço inoxidável, não aconteceram, apresentando experimentalmente valores de carga última bem superiores aos da norma, estando o dimensionamento muito a favor da segurança, evitando, com esta carga inferior de ruptura, o aparecimento de grande deformação, característica apresentada nos aços inoxidáveis, como mostrado na Tabela 4.3, porém não contemplando, de uma forma intermediaria a maior capacidade de carga do aço inoxidável .

Finalmente pela comparação dos ensaios das ligações aparafusadas de chapas constituídas em aço inoxidável e aço carbono, as principais conclusões obtidas foram:

- A comparação do comportamento entre as ligações aparafusadas constituídas por aço carbono e as constituídas de aço inoxidável, onde a capacidade de ductilidade, caracterizada pela maior razão dos parâmetros f_u/f_y do aço inoxidável, mostra uma capacidade de absorção de energia, em torno de 60% maior, do que o aço carbono;
- A rigidez inicial da ligação aparafusada de chapas constituídas de aço carbono diminui rapidamente em comparação com a rigidez das ligações aparafusadas constituídas em aço inoxidável;
- A grande diferença dos valores de $A_g x f_y$ e $A_n x f_u$ do aço inoxidável em relação ao aço carbono, proporciona uma maior capacidade de encruamento com o aumento de carga apresentando maior resistência na fase plástica e conseqüentemente maiores cargas últimas.

6.3 Trabalhos futuros

Uma das principais dificuldades encontradas na análise dos resultados experimentais é conseguir extrair a real influência de todos os parâmetros envolvidos numa ligação aparafusada. Portanto, torna-se viável realizar uma análise através do método dos elementos finitos que permita uma avaliação do comportamento da ligação aparafusada através de um modelo mecânico computacional. Para calibração deste modelo numérico mais ensaios experimentais deverão ser feitos, utilizando valores de parâmetros diferentes dos utilizados neste trabalho.

Execução de novos ensaios com a utilização de novas configurações de parafusos, já que neste trabalho, a mudança de configuração da furação apresentou mudanças significativas no comportamento das ligações aparafusadas. Ensaios com a utilização de parafusos em aço inoxidável e ensaios com parafusos torqueados (protendidos).

Considerando que a norma baseia-se na segurança, optando por evitar uma grande deformação da ligação aparafusada constituída de aço inoxidável, através da utilização do limite de escoamento da seção bruta como carga última para o cálculo, uma melhor avaliação da formulação, através de novos ensaios, com análise das relações entre os diversos parâmetros faz-se necessária, principalmente somando-se aos dados apresentados neste trabalho de ligação aparafusada constituída de aço inoxidável e a presença em outros trabalhos.

Outros tipos de ligações, considerando que a espessura é um fator importante, seria interessante utilizar espessuras de placas diferentes das utilizadas neste trabalho, pois com isso, ter-se-ia uma gama maior de resultados para estudo mais aprofundado do comportamento individual das ligações aparafusadas em aço inoxidável.

Ensaios com cargas cíclicas considerando a capacidade de absorção de energia demonstrada pela ligação aparafusada constituída de aço inoxidável neste trabalho, também devem ser avaliados em comparação com as ligações aparafusadas constituídas de aço carbono.

Finalmente, de posse de mais resultados, torna-se possível a realização de uma análise paramétrica identificando o efeito de cada um dos parâmetros. A partir disso, deve-se propor uma nova formulação de dimensionamento a ser inserida em normas de dimensionamento de estruturas constituídas de aço inoxidável.

REFERÊNCIAS

A. BOUCHAÏR _, J. AVERSENG, A. ABIDELAH, *Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections*, LaMI, Civil Engineering, Blaise Pascal University, rue des Meuniers, BP 206, 63174 Aubière cedex, France, 2008

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *"Produtos Planos de Aço – Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração" NBR 6673*, Rio de Janeiro, 1981.

ASTM E 646–78. American Society for Testing and Materials - *"Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Expoents (n-values) of Metallic Sheet Metals"* , 1984.

BURGAN BA, BADDOO NR, GILSENAN KA. *Structural design of stainless steel members - comparison between Eurocode 3, Part 1.4 and test results*. Journal of Constructional Steel Research; 54(1):51–73, 2000.

COCHRANE, R. *article page 465*, Engineering News,1908.

COCHRANE, R. *article*, Engineering News,1922.

DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2ª ed., 1981.

DIN EN 10002-1 Deutsches Institut für Normung -*Tensile testing of metallic materials; method of test at ambient temperature (including Corrigendum AC1:1990)*; german version, 1990.

EUROCODE 3, EN 1993-1-8, *Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints*. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2005.

EUROCODE 3, ENV - 1993-1-1: *Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2003.

EUROCODE 3, prEN 1993-1-4, *Design of steel structures – Part 1.4: General rules – Stainless steel* . CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2003.

GARDNER L, BADDOO NR. *Fire testing and design of stainless steel structures*. Journal of Constructional Steel Research; 62: 532–43, 2006.

GARDNER L, NETHERCOT DA. *Experiments on stainless steel hollow sections — Part 1*: Material and cross-sectional behaviour. Journal of Constructional Steel Research ;60:1291–318.cap 3, 2004.

GARDNER L, NETHERCOT DA. *Structural stainless steel design: A new approach*. The Structural Engineer; 21–8, 2004.

GODFREY, E. *article*, Engineering News,1922

GRAHAM GEDGE, *Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 64, Pages 1194-1198, 2008.

KEELER, S. P. The state of the art. Understanding sheet metal formability. Machinery, v.74, n. 6, p. 88-95, fev. 1968.

KOUHI J, TALJA A, SALMI P, ALA-OUTINEN T. *Current R&D work on the use of stainless steel in construction in Finland*. Journal of Constructional Steel Research; 54(1):31–50, 2000.

KUMAR, D. R. *Formability analysis of extra-deep drawing steel*. Journal of Materials Processing Technology, p 31-41, 2002.

N.R. BADDOO, *Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities* Journal of Constructional Steel Research, Volume 64, Issue 11, Pages 1199-1206, November 2008.

RAMBERG, W., & OSGOOD, W. R. *Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902,* National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC, 1943.

SCHAEFFER, L*. Conformação mecânica*. Porto Alegre: Editora da UFRS, 1999.

SOUZA, S. A*. Ensaios mecânicos de materiais metálicos*. Edgard Blucher, 1974.

TAE SOO KIMA, HITOSHI KUWAMURAB, SANGNOK-GU, ANSAN, KYEUNGGI-DO, *Thin-Walled Structures 45*, 407–421 *Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear, Sustainable Building Research* Center, Hanyang University, 425-791, Department of Architecture, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656, Japan, 2007.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, A. E. and HSIANG, T*.. Taguchi Engenharia de Qualidade em Sistemas de Produção.* MacGraw Hill - São Paulo, 1990

VAN DEN BERG GJ. *The effect of the non-linear stress–strain behaviour of stainless steels on member capacity*. Journal of Constructional Steel Research;54(1):135–60, 2000.

YOUNG, C.R. *article*, Engineering News,1922.

Anexo A - CURVAS DOS ENSAIOS

A.1. ENSAIOS INDIVIDUAIS

A.1.1. CURVAS CARGA AXIAL MEDIDA *VERSUS* DEFORMAÇÃO

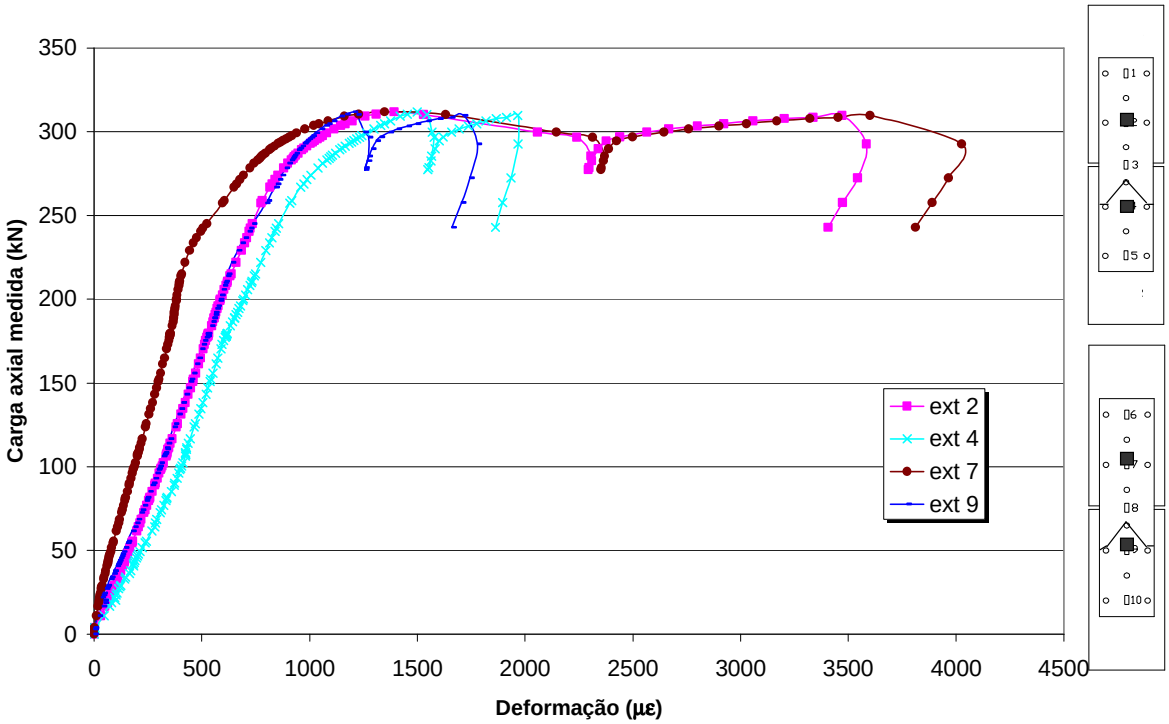


Figura A.1 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E1_CARB_S50_a

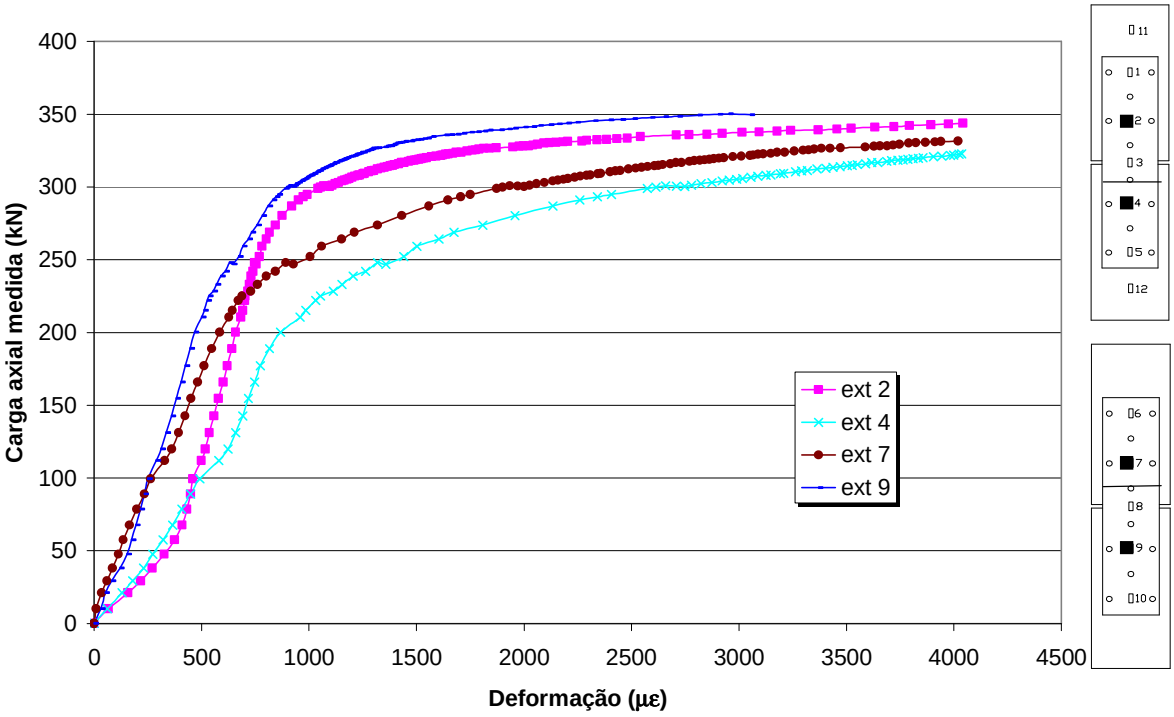


Figura A.2 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E2_CARB_S70_a

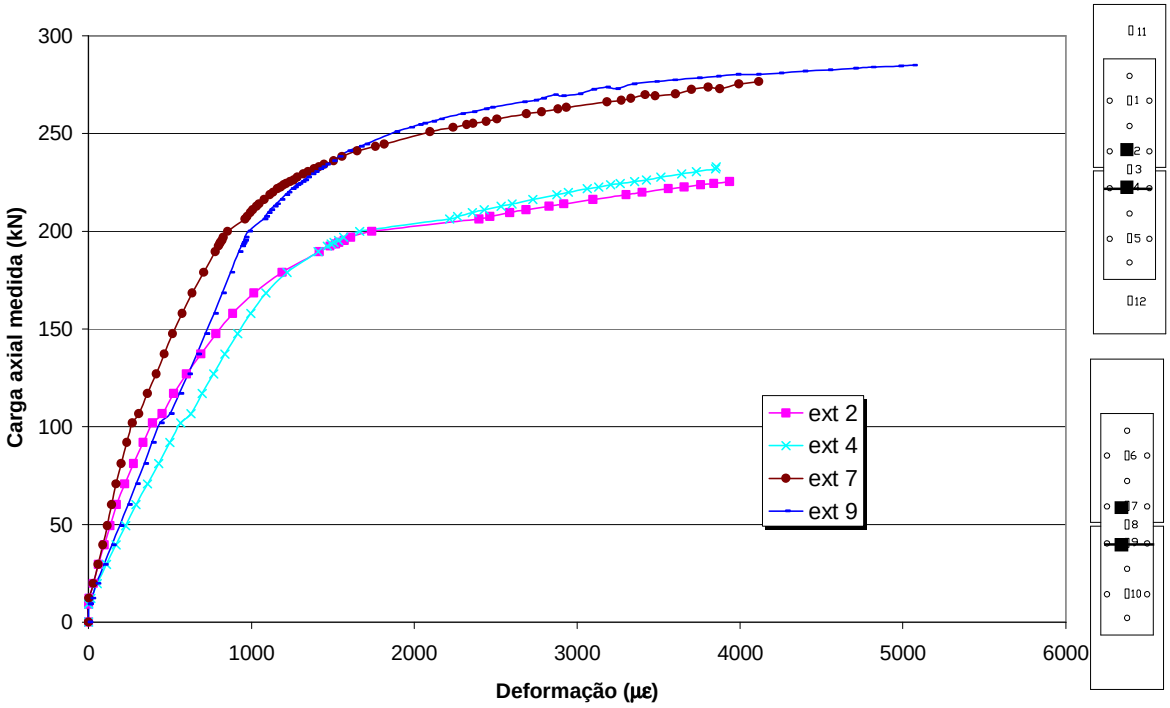


Figura A.3 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E3_CARB_S50

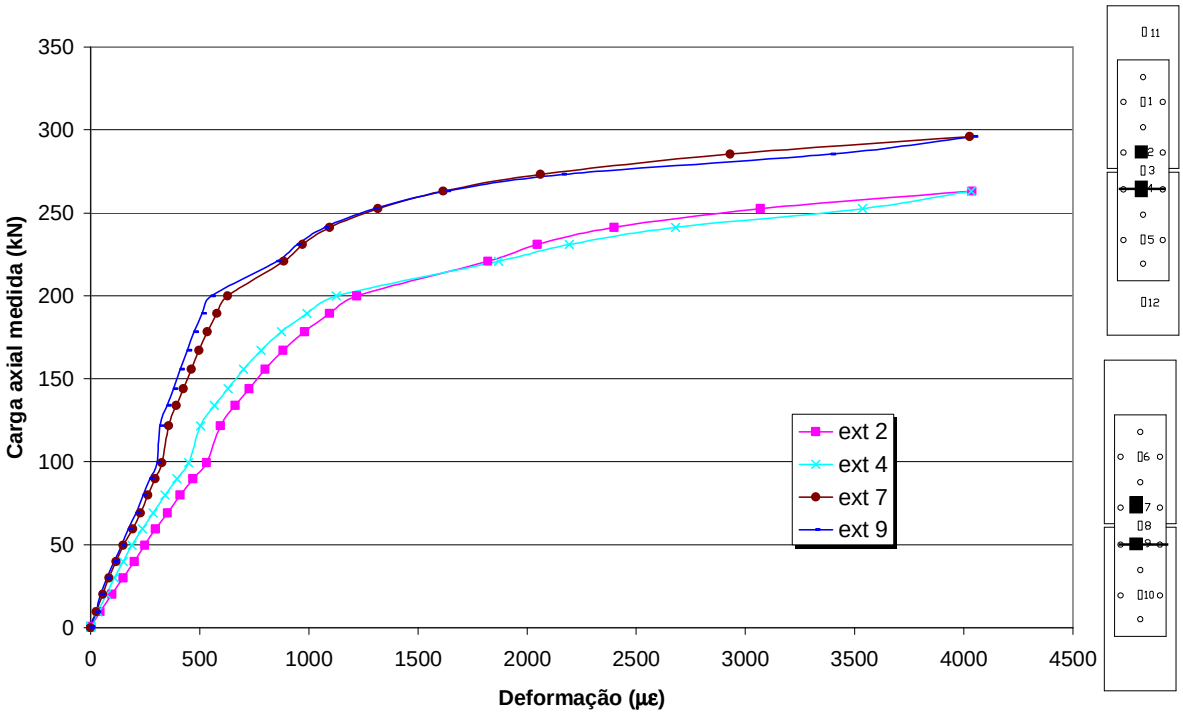


Figura A.4 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E4_CARB_S30

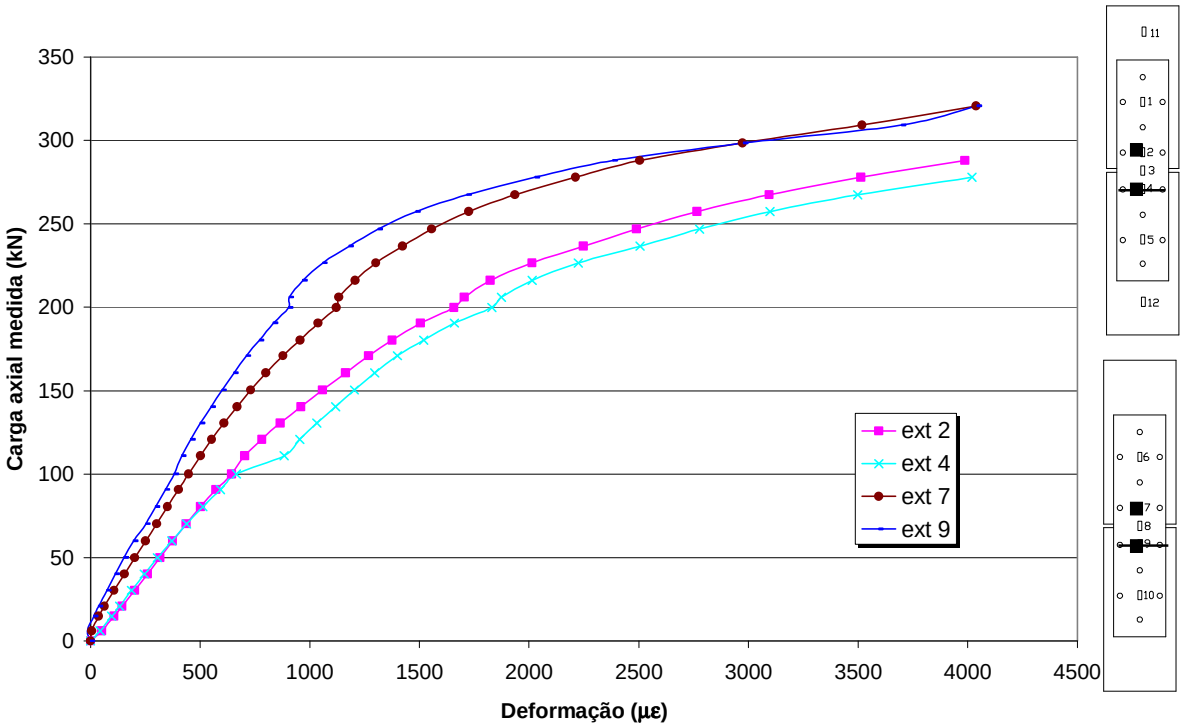


Figura A.5 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E5_INOX_S50

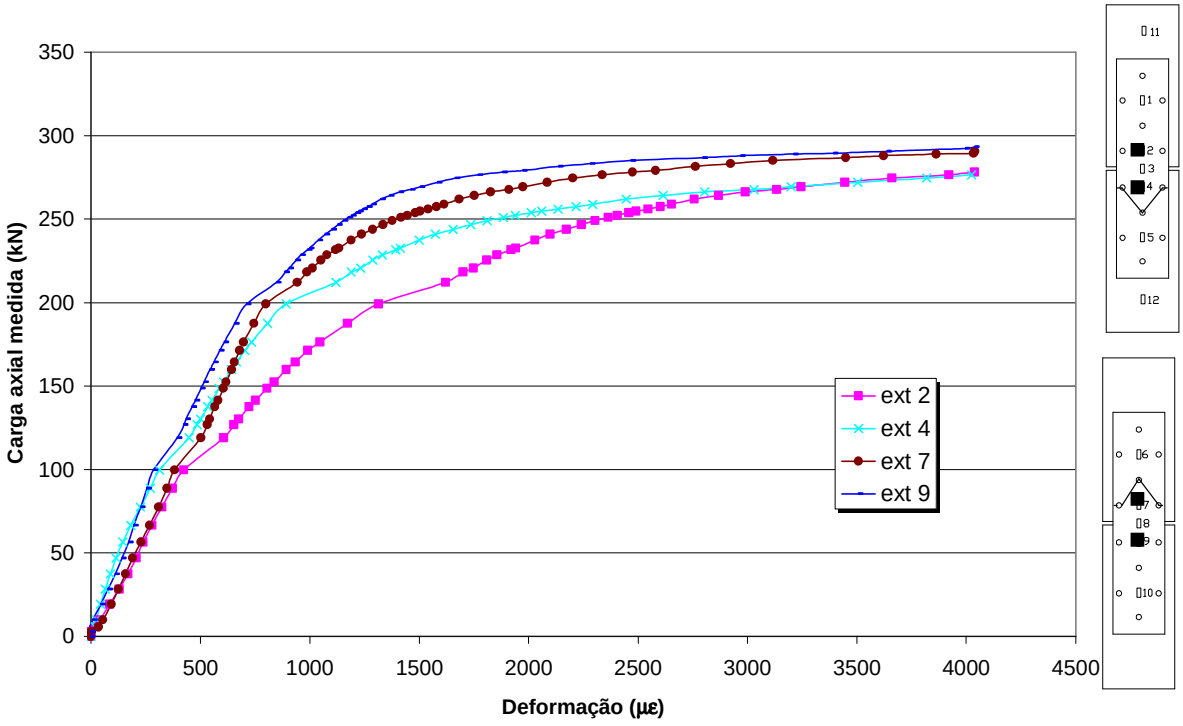


Figura A.6 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E6_CARB_S30_P10

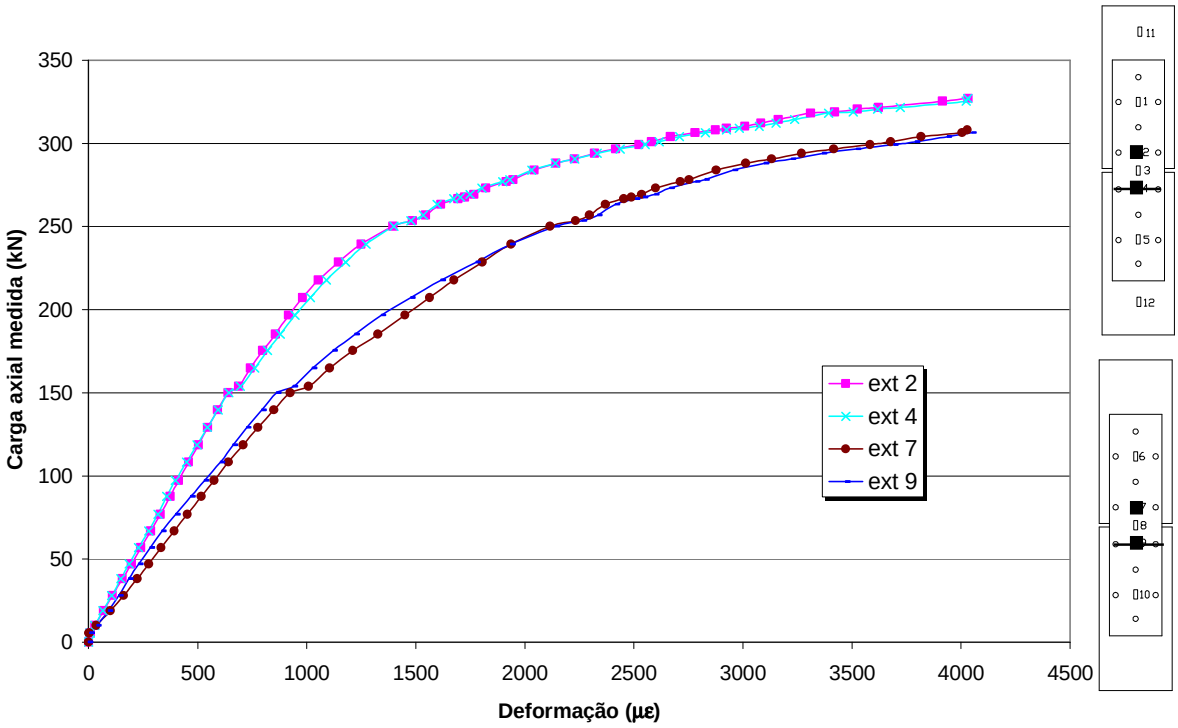


Figura A.7– Curvas carga versus deformação - Ensaio E7_INOX_S30

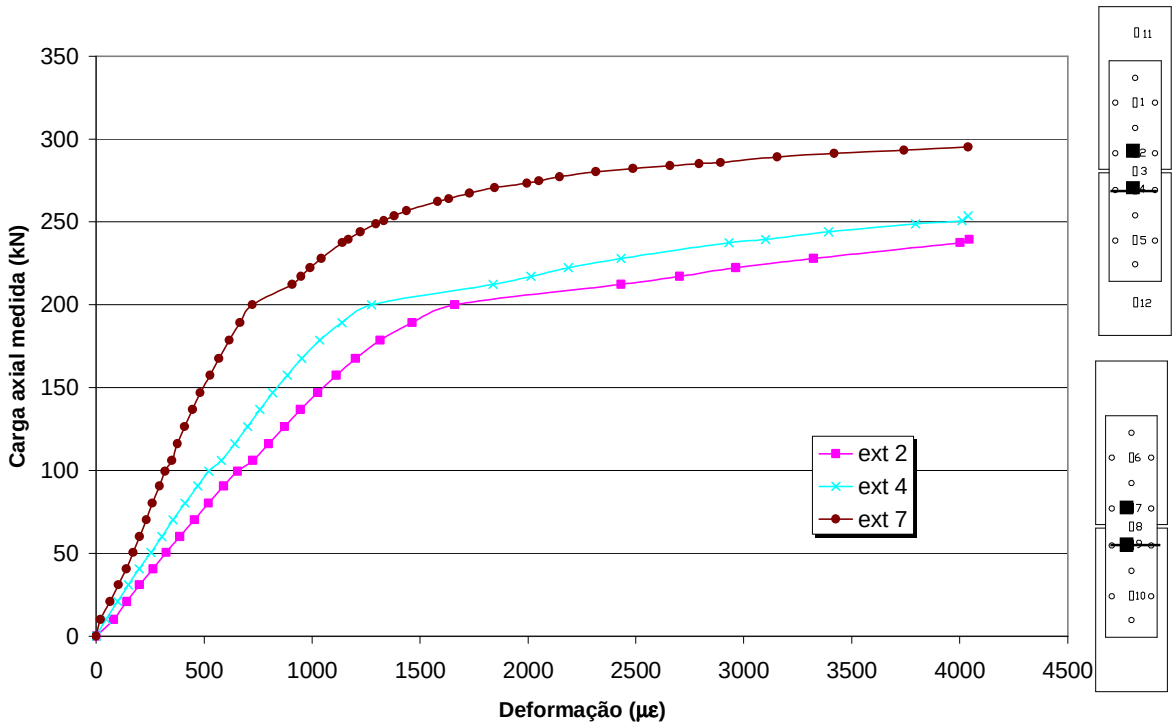


Figura A.8 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E8_CARB_S50_P8

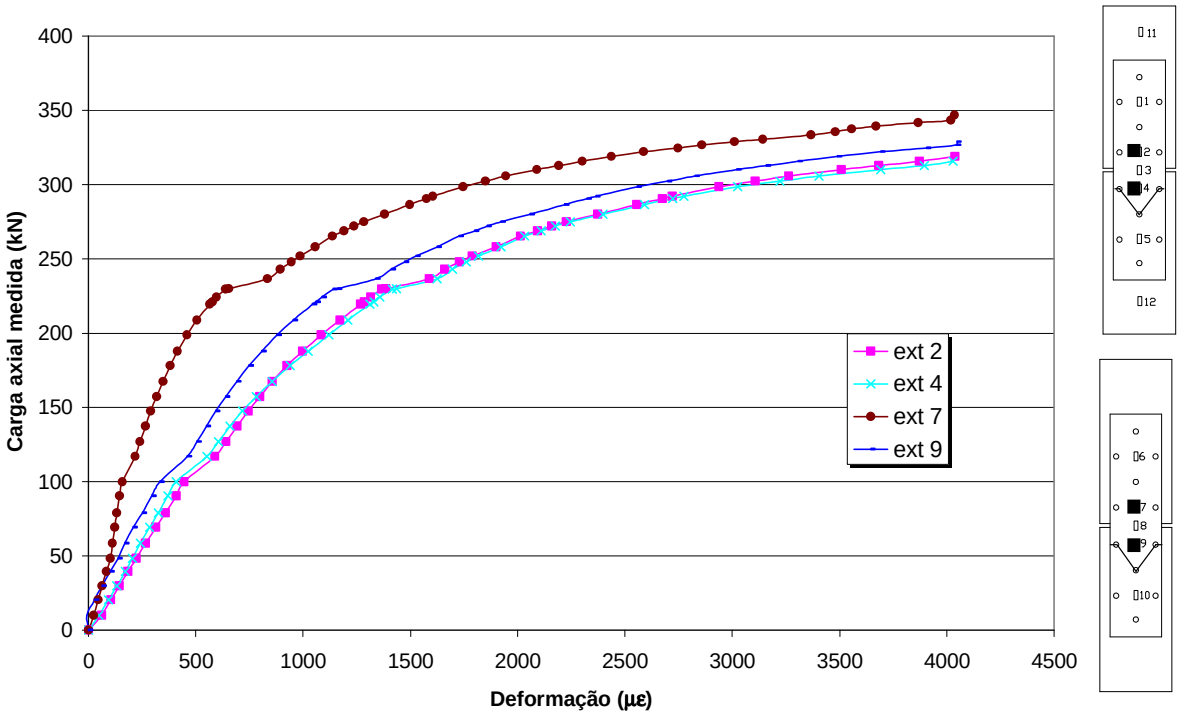


Figura A.9 – Curvas carga versus deformação - Ensaio E9_INOX_S23

A.2. CURVAS COMPARATIVAS

A.2.1. CURVAS CARGA *VERSUS* DEFORMAÇÃO

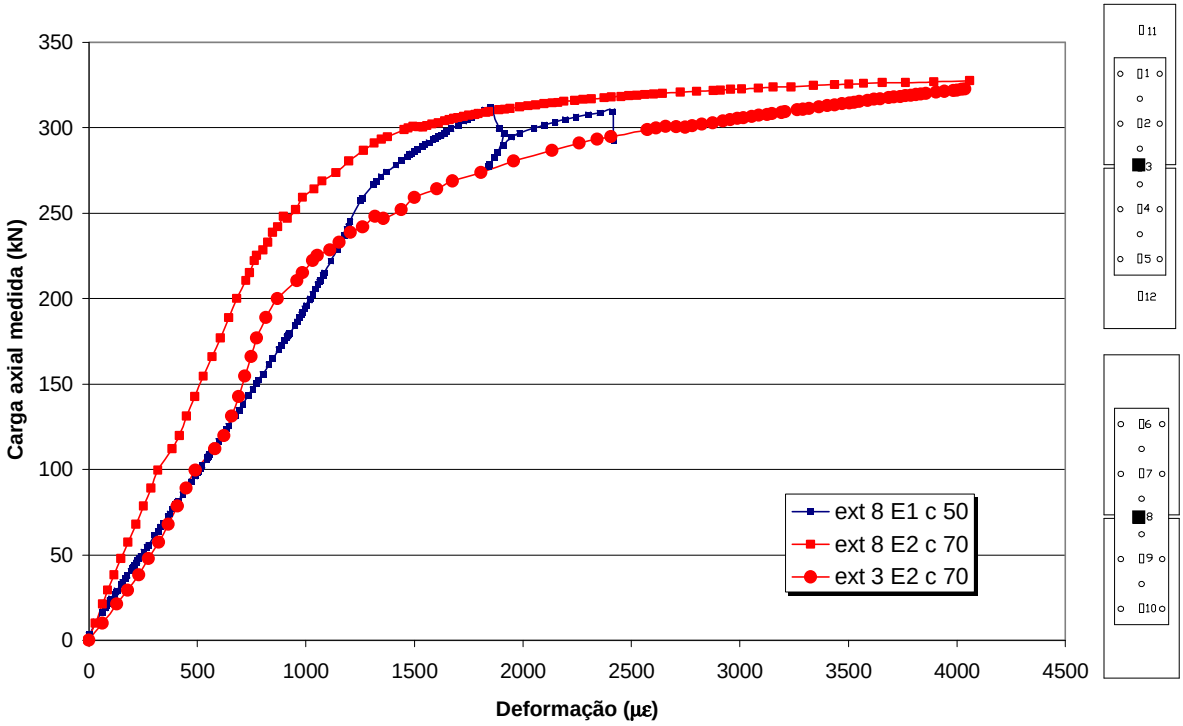


Figura A.10 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1 e E2

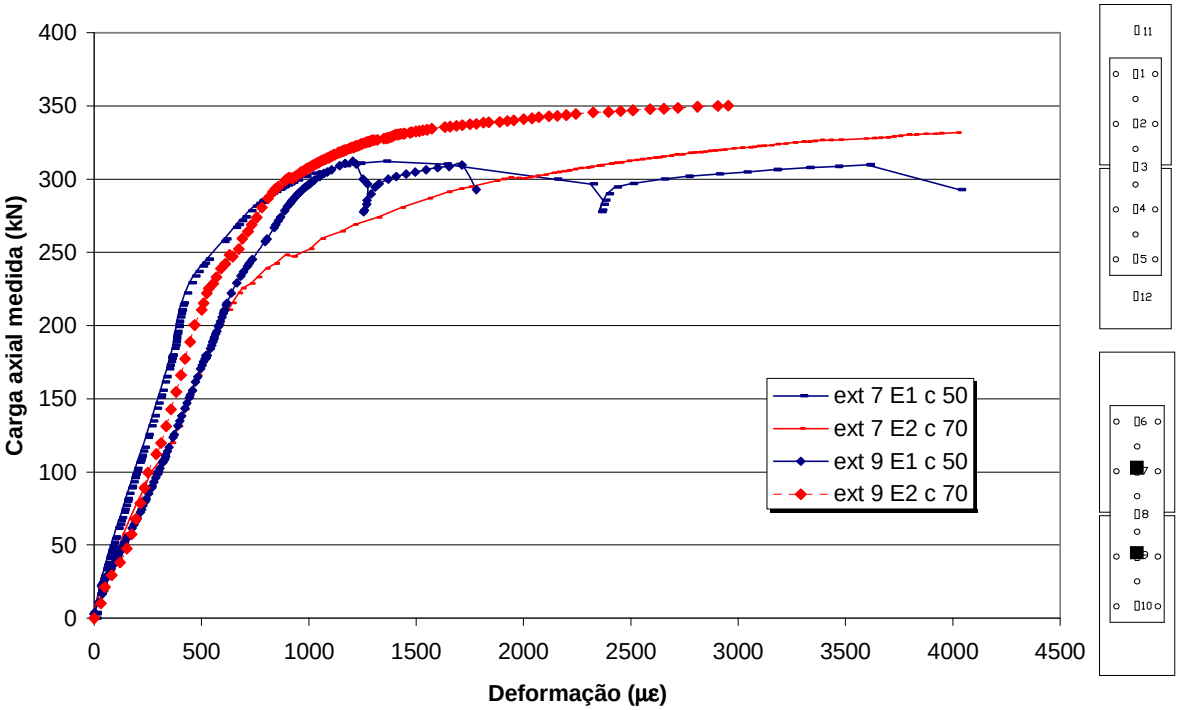


Figura A.11– Curvas carga versus deformação - Ensaios E1 e E2

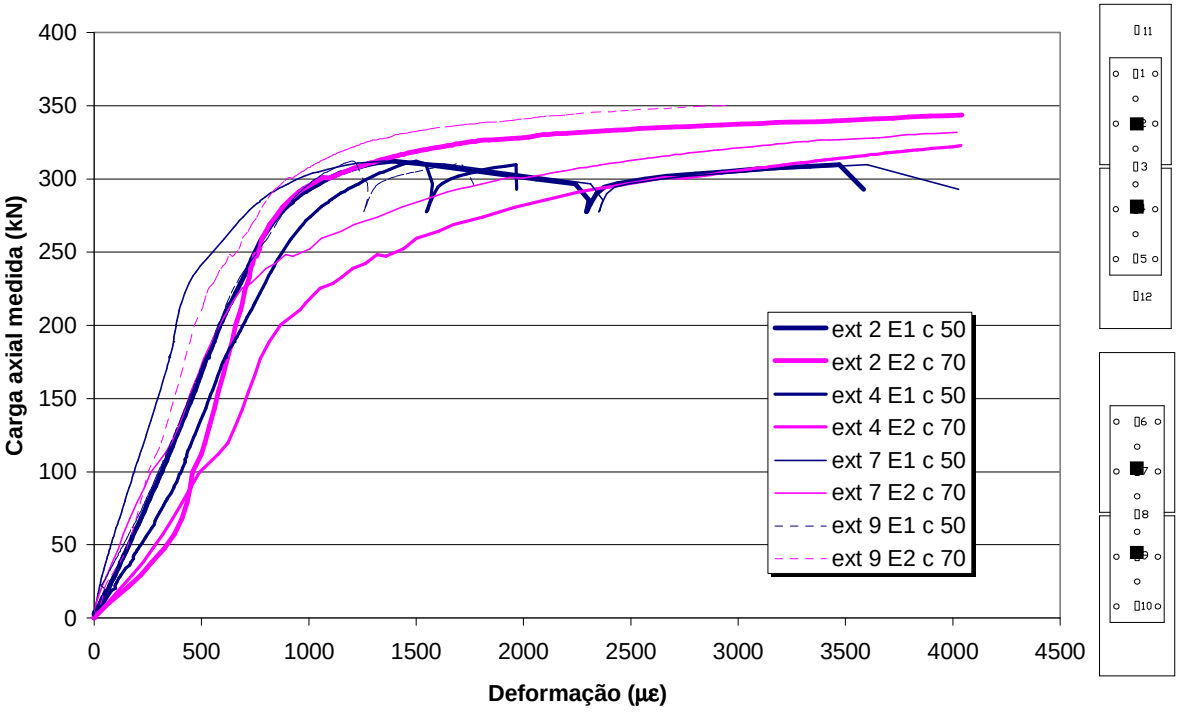


Figura A.12 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1 e E2

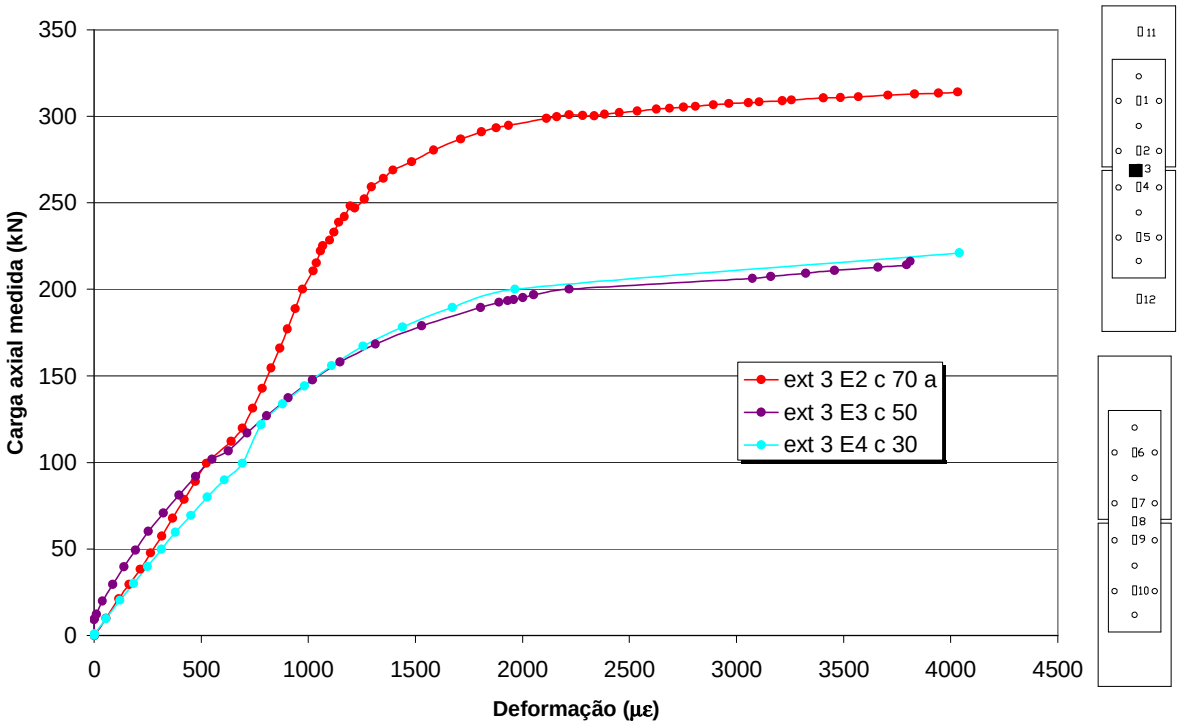


Figura A.13 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4

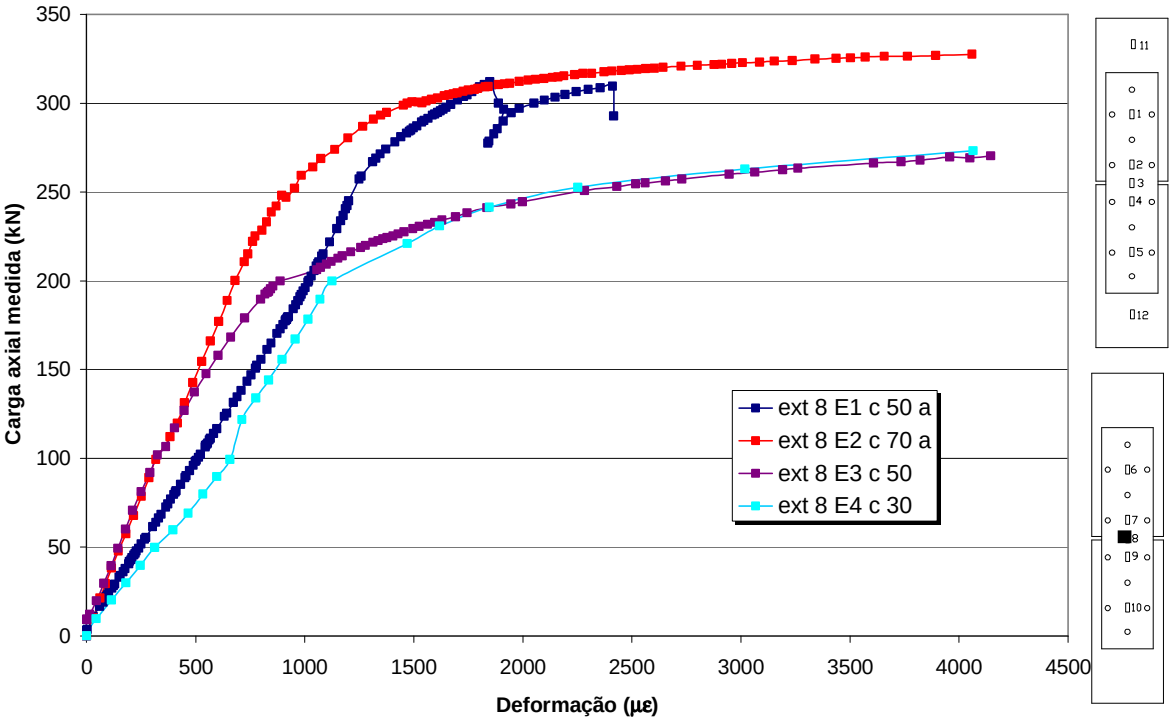


Figura A.14 –Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4

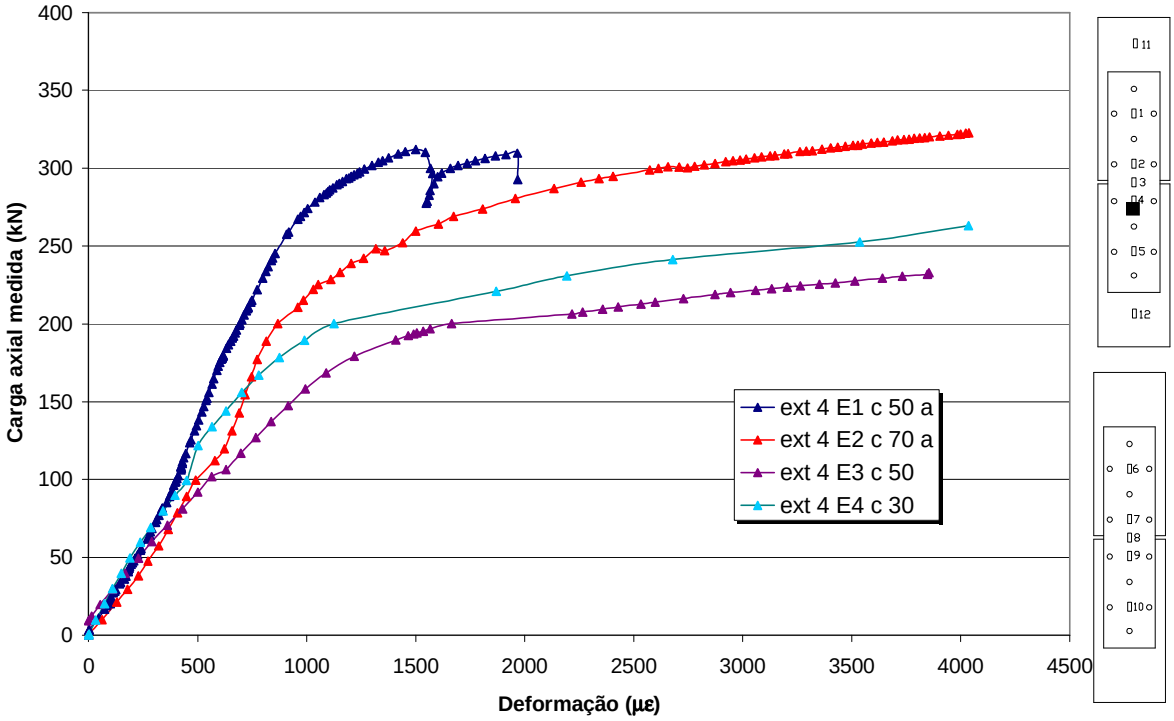


Figura A.15 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4

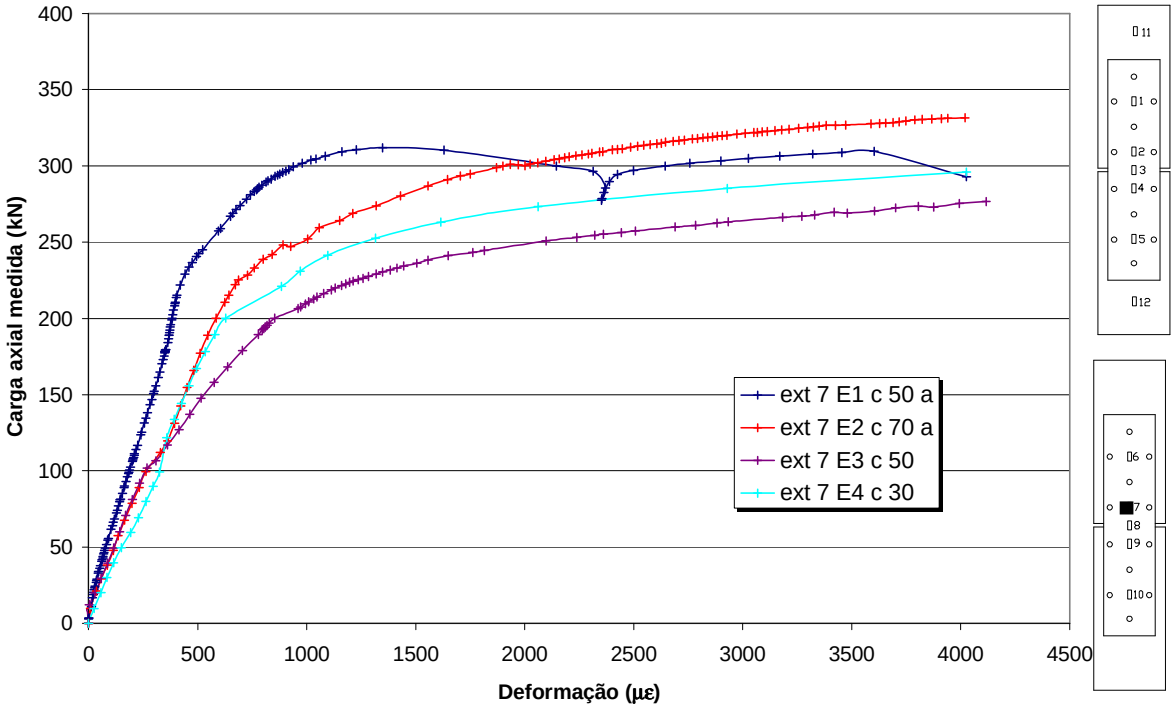


Figura A.16 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4

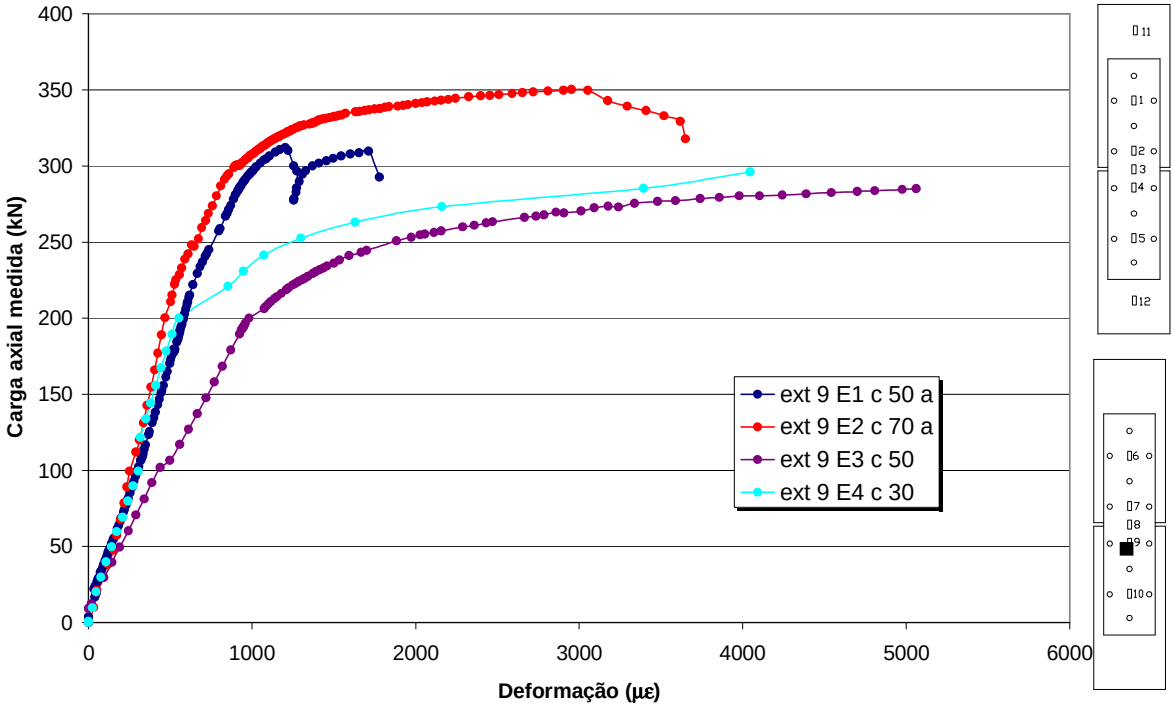


Figura A.17 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E2, E3 e E4

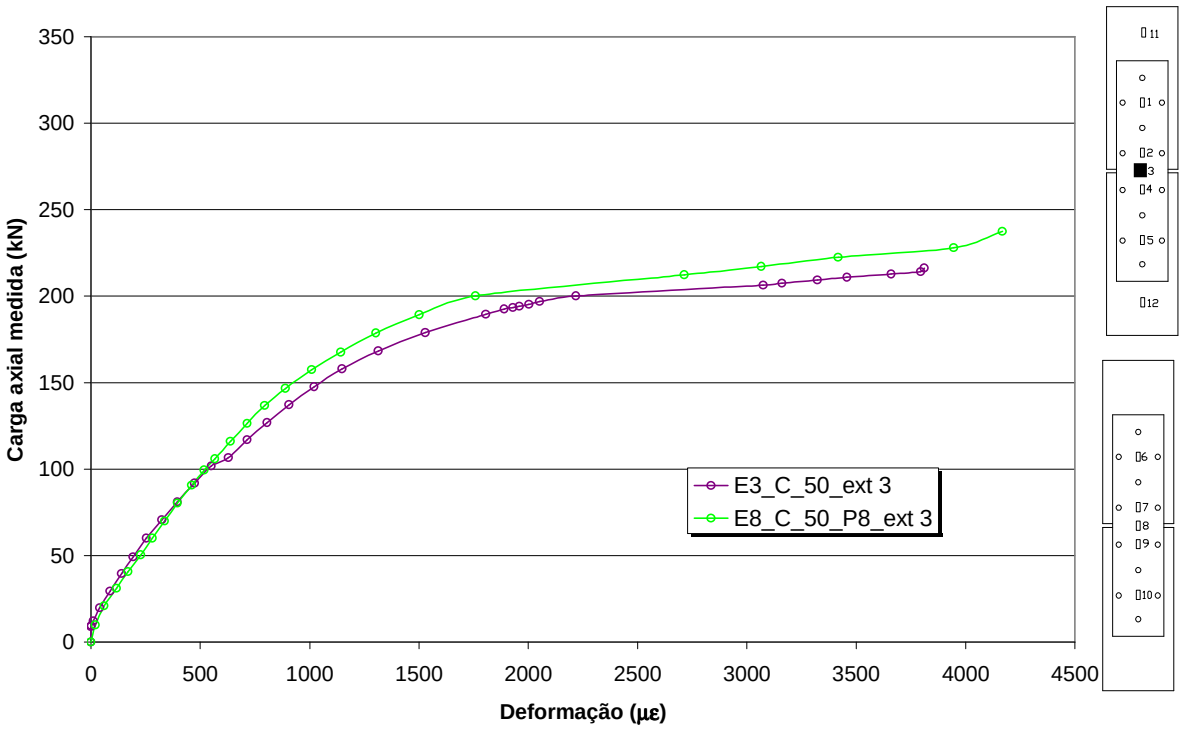


Figura A.18 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E3 e E8

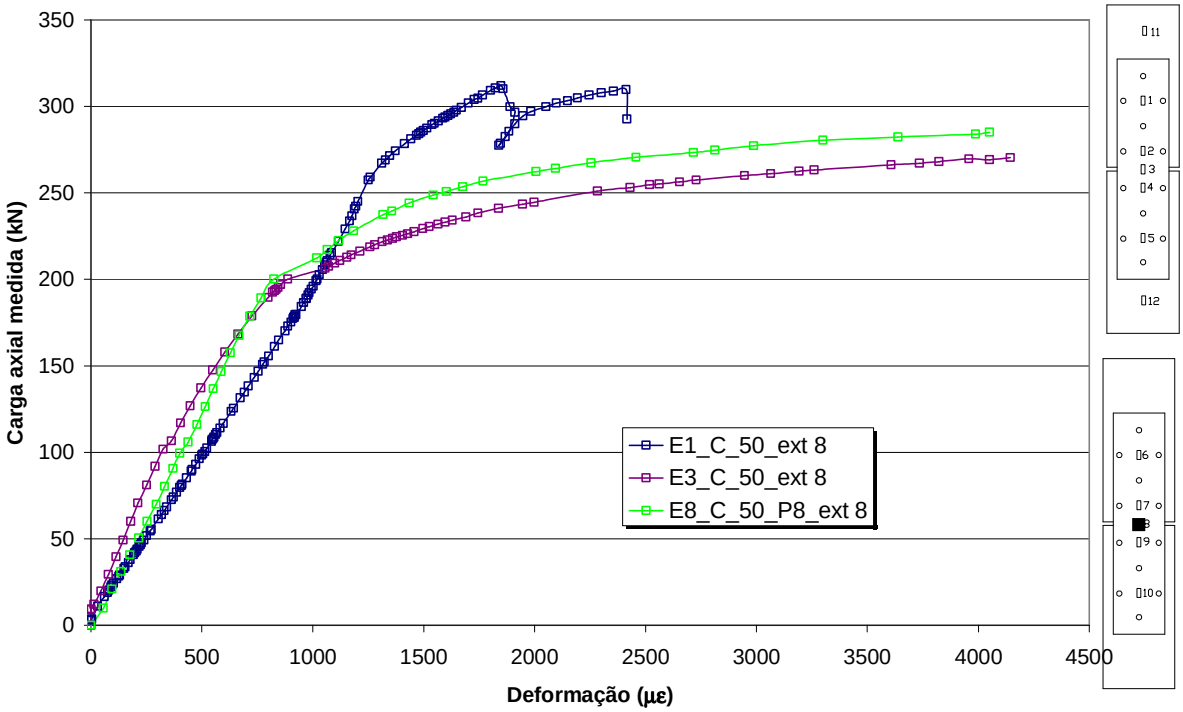


Figura A.19 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E3 e E8

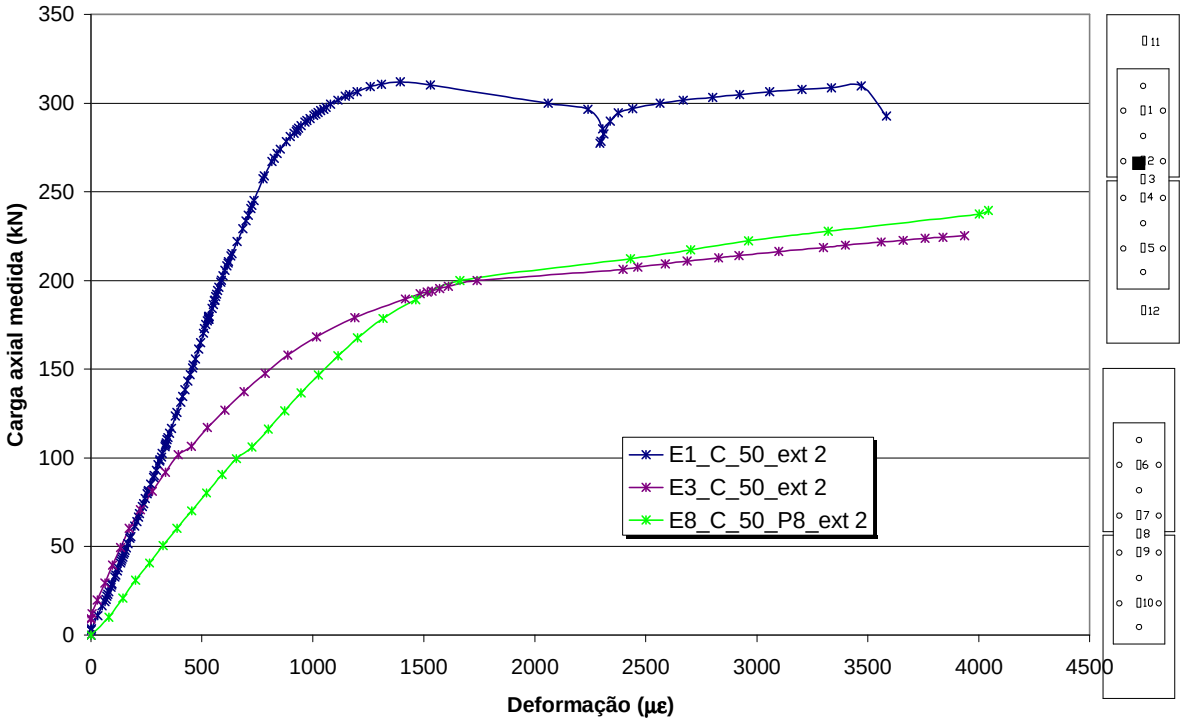


Figura A.20 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E3 e E8

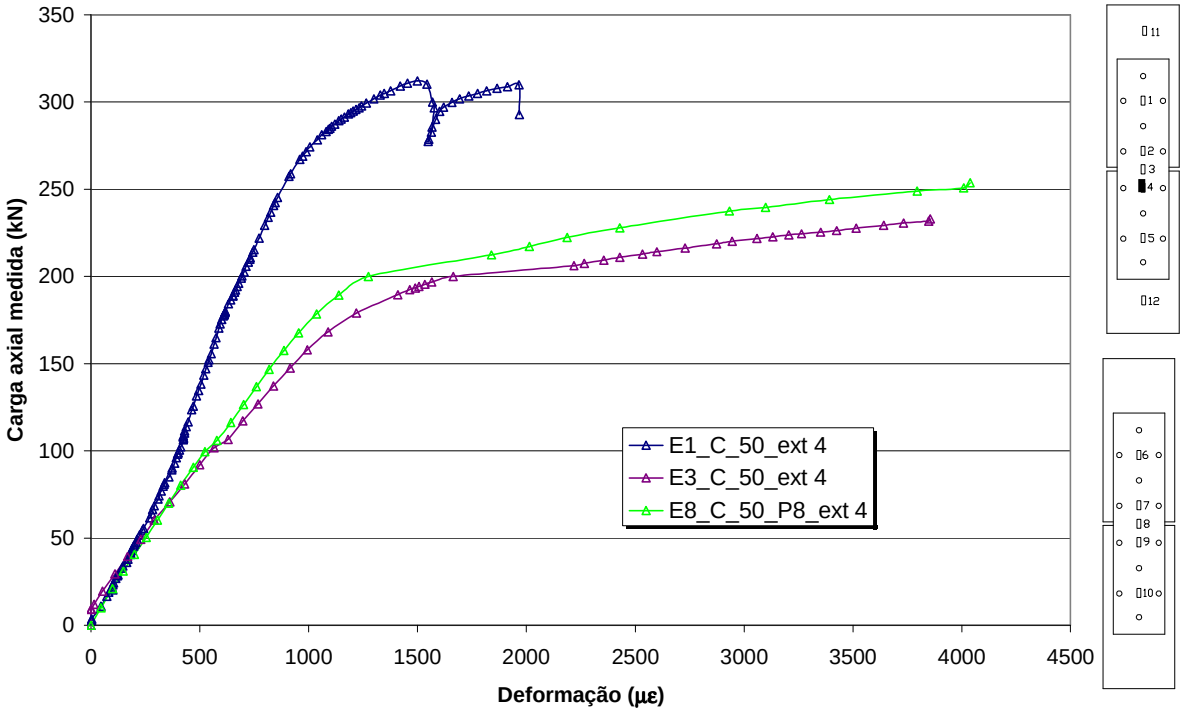


Figura A.21 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1, E3 e E8

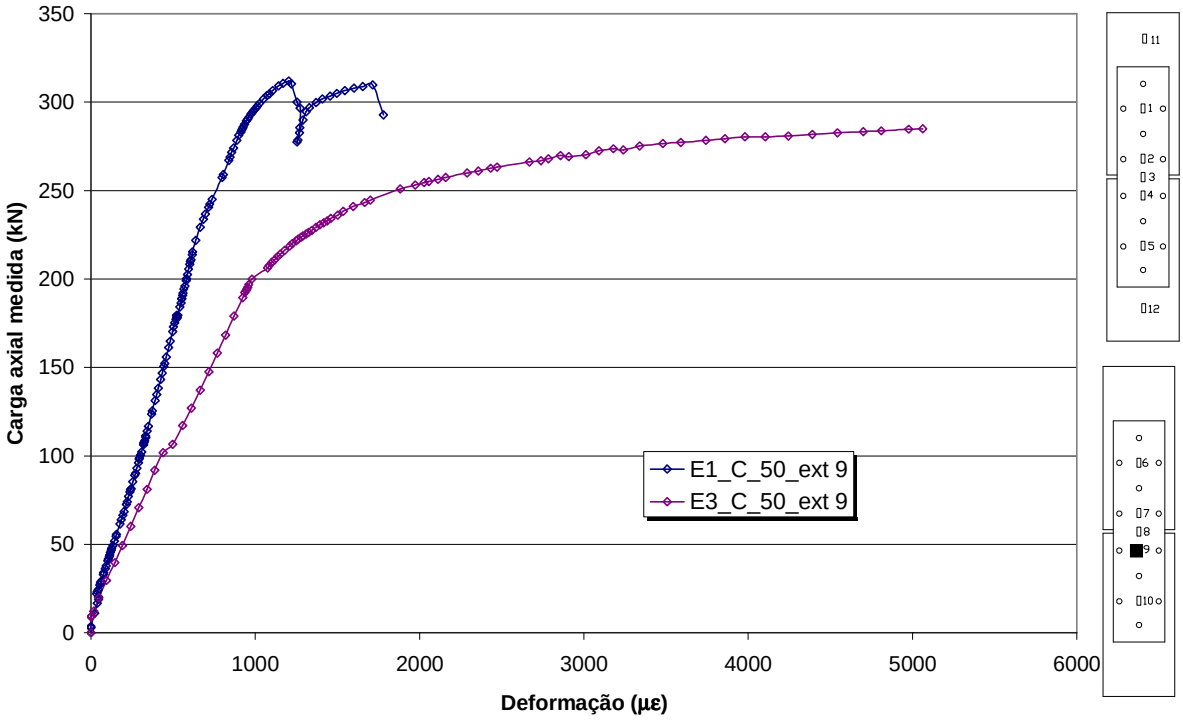


Figura A.22 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E1 e E3

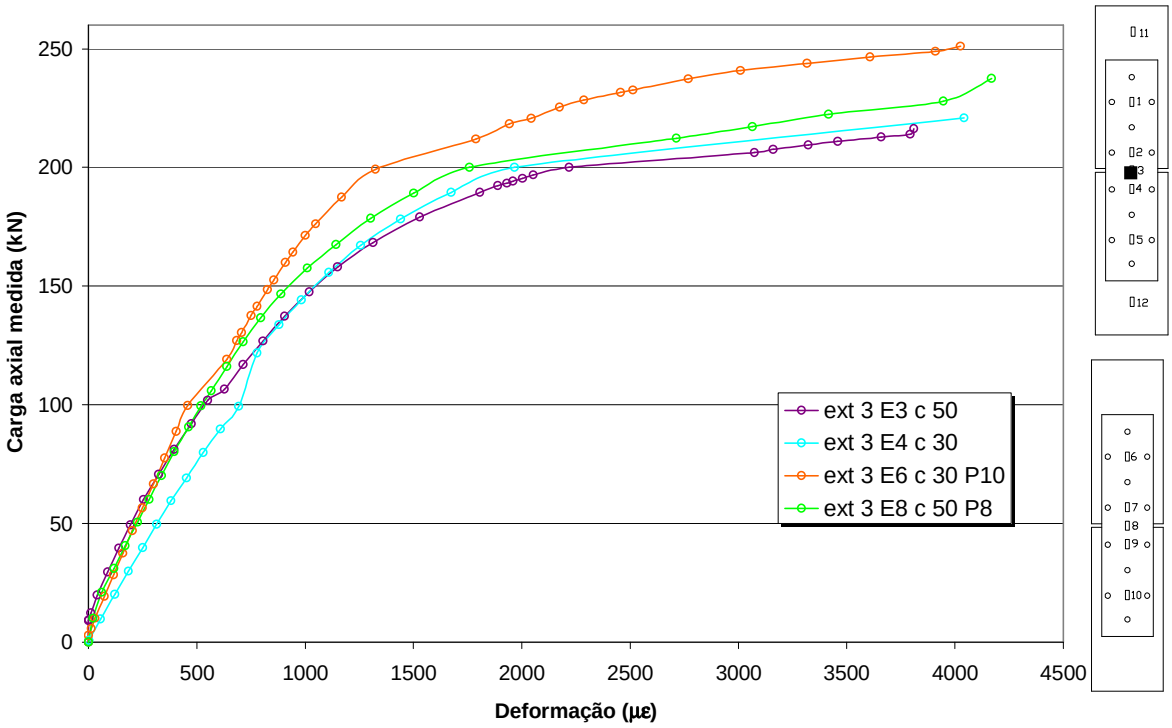


Figura A.23 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8

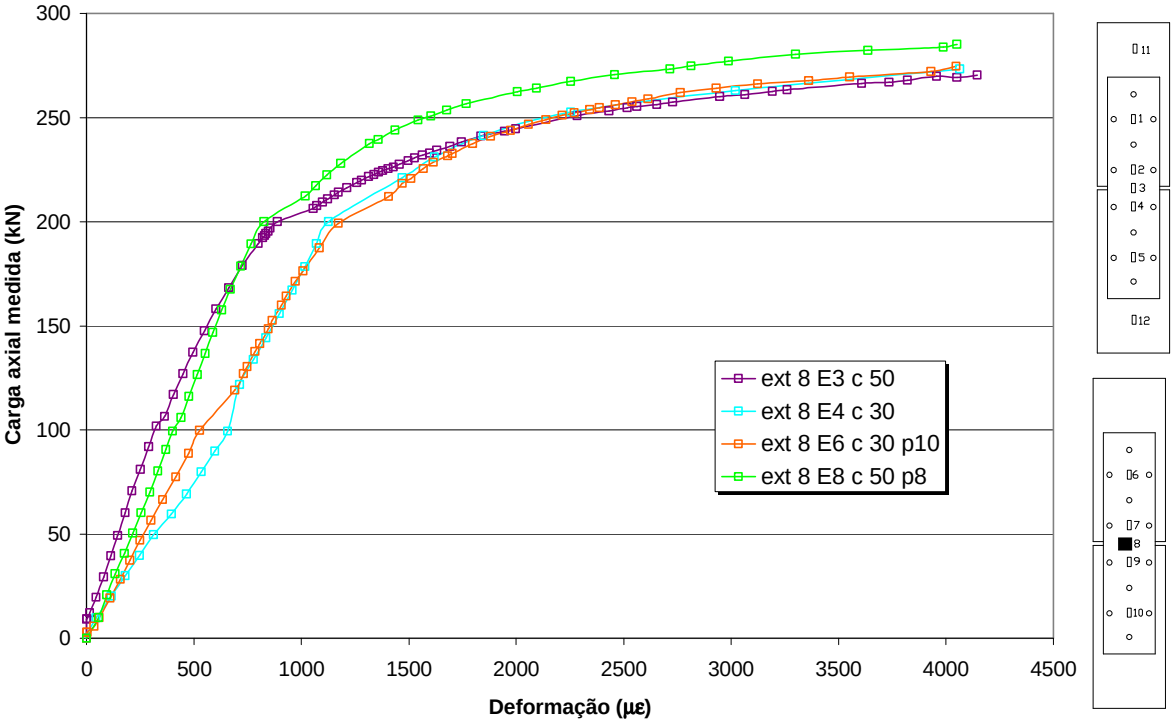


Figura A.24 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8

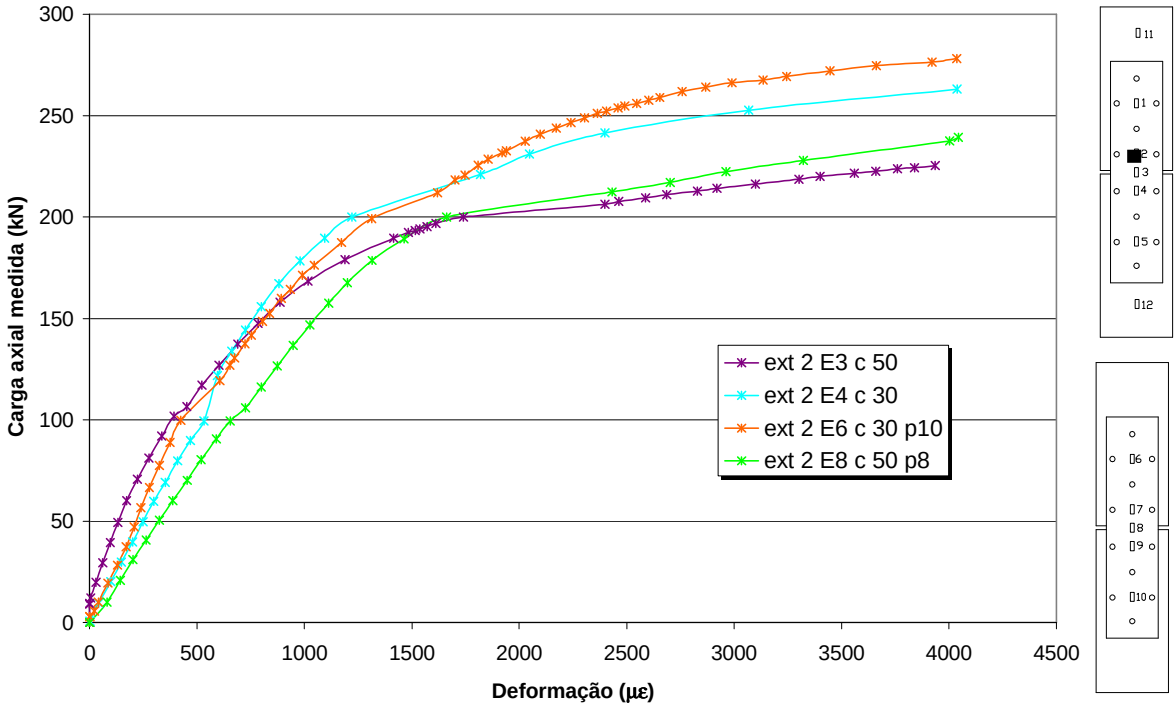


Figura A.25 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8

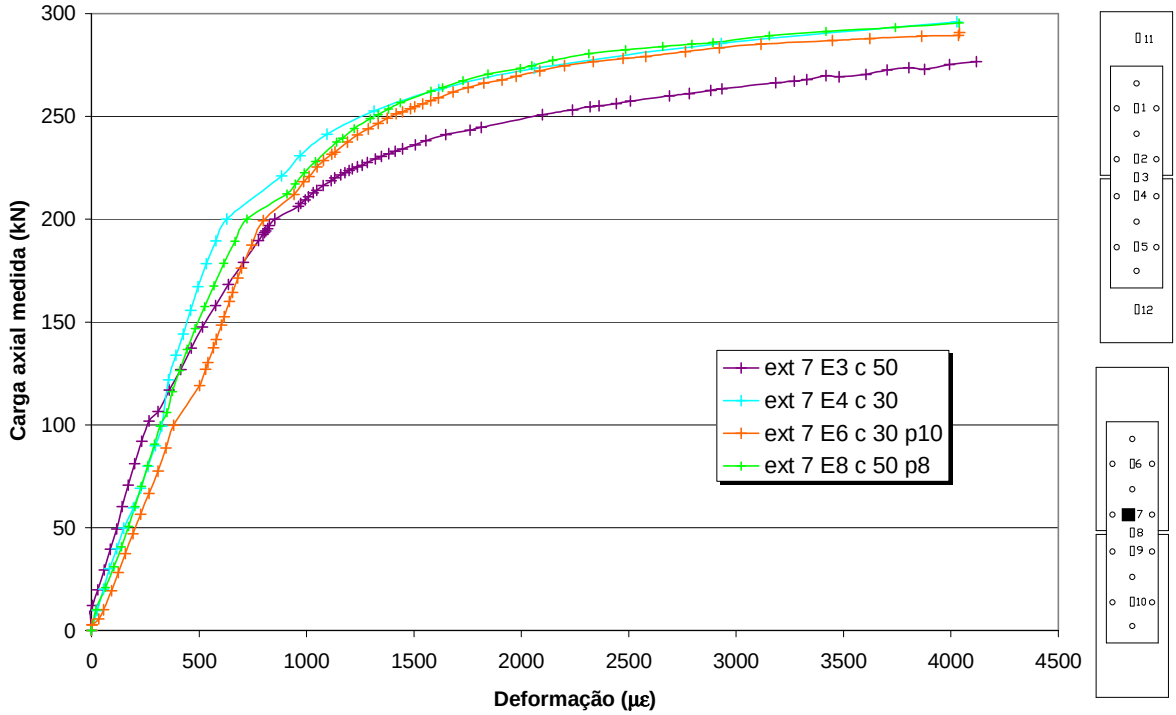


Figura A.26 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E3, E4, E6 e E8

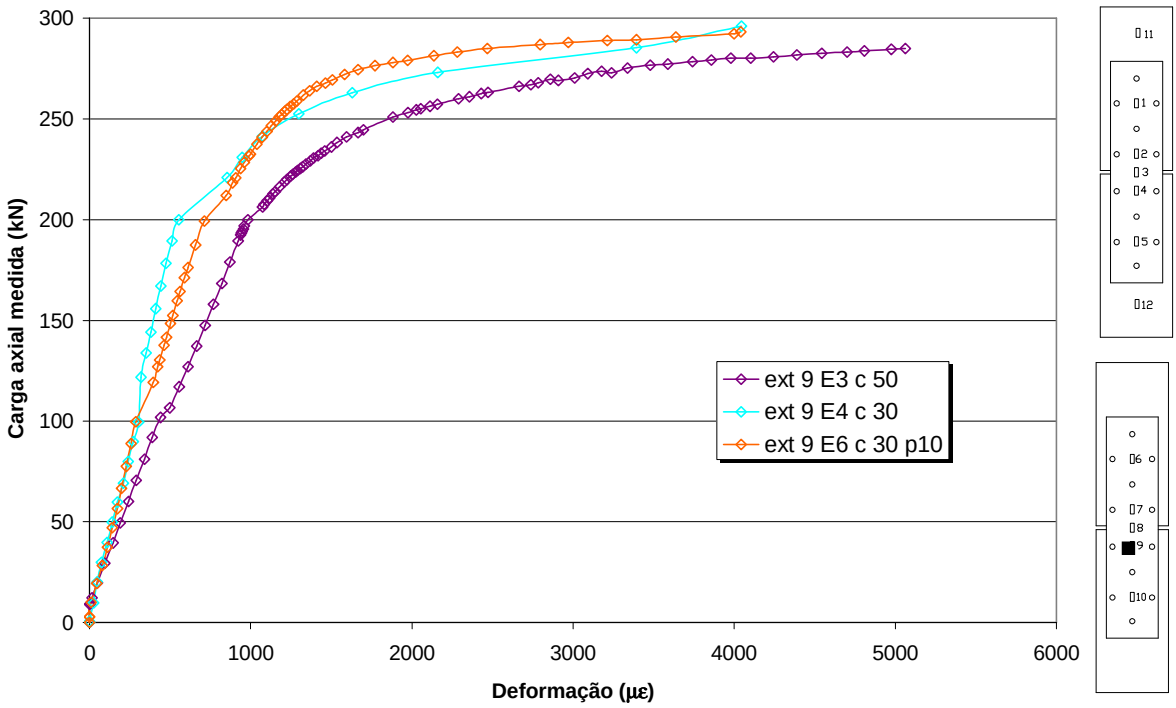


Figura A.27 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E3, E4 e E6

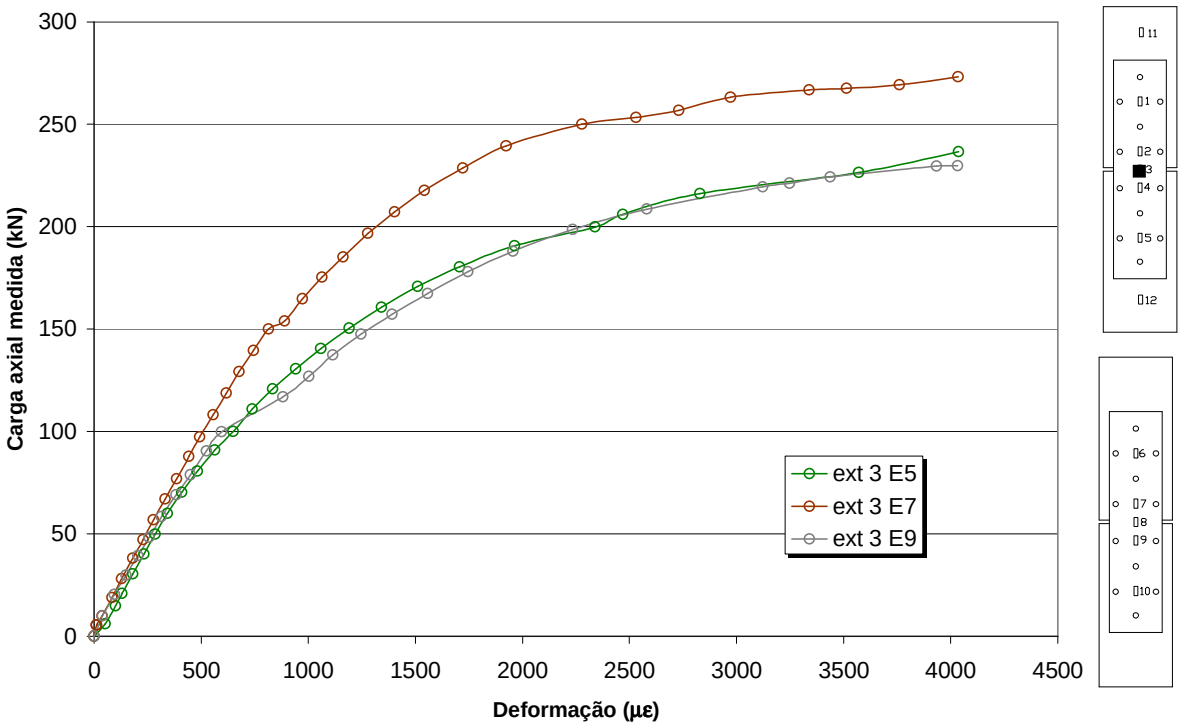


Figura A.28 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7e E9

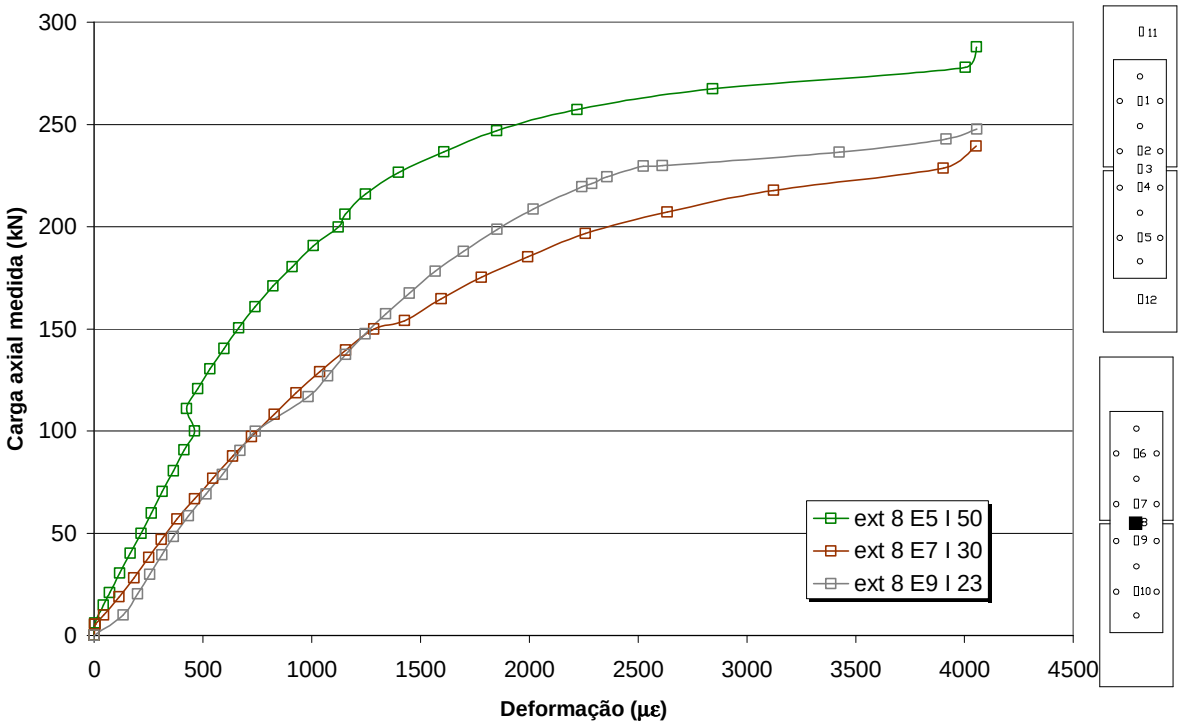


Figura A.29 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7 e E9

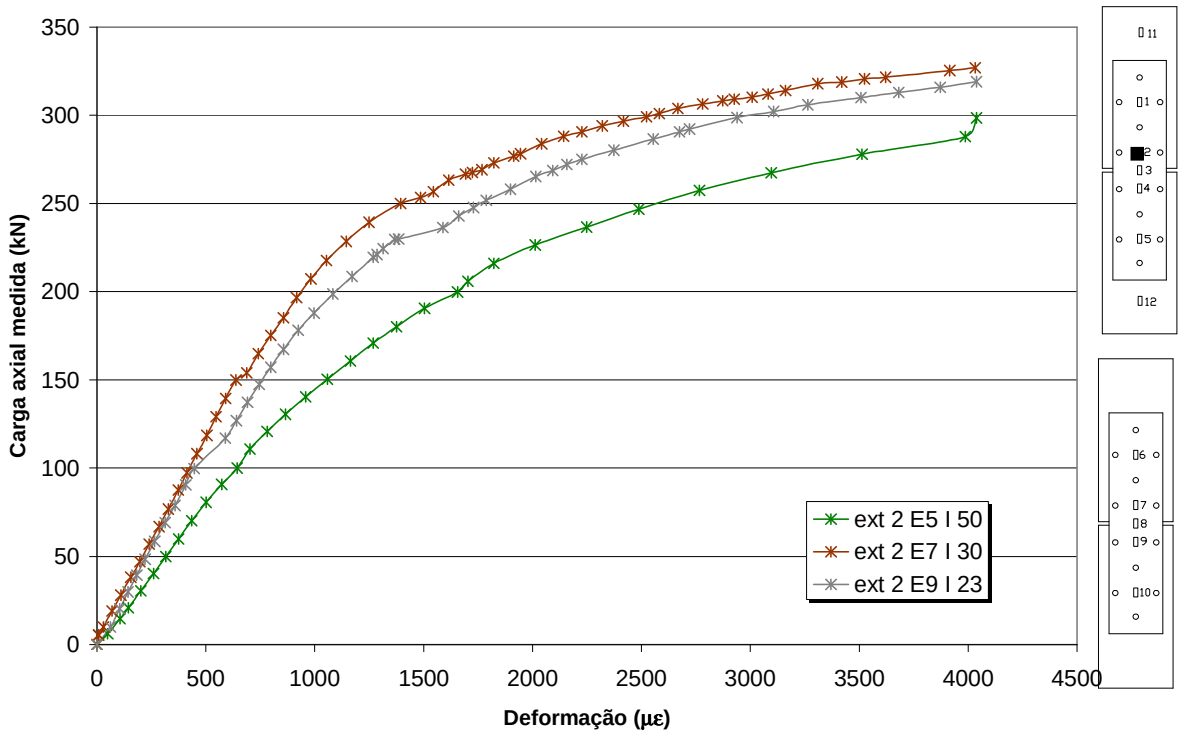


Figura A.30 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7 e E9

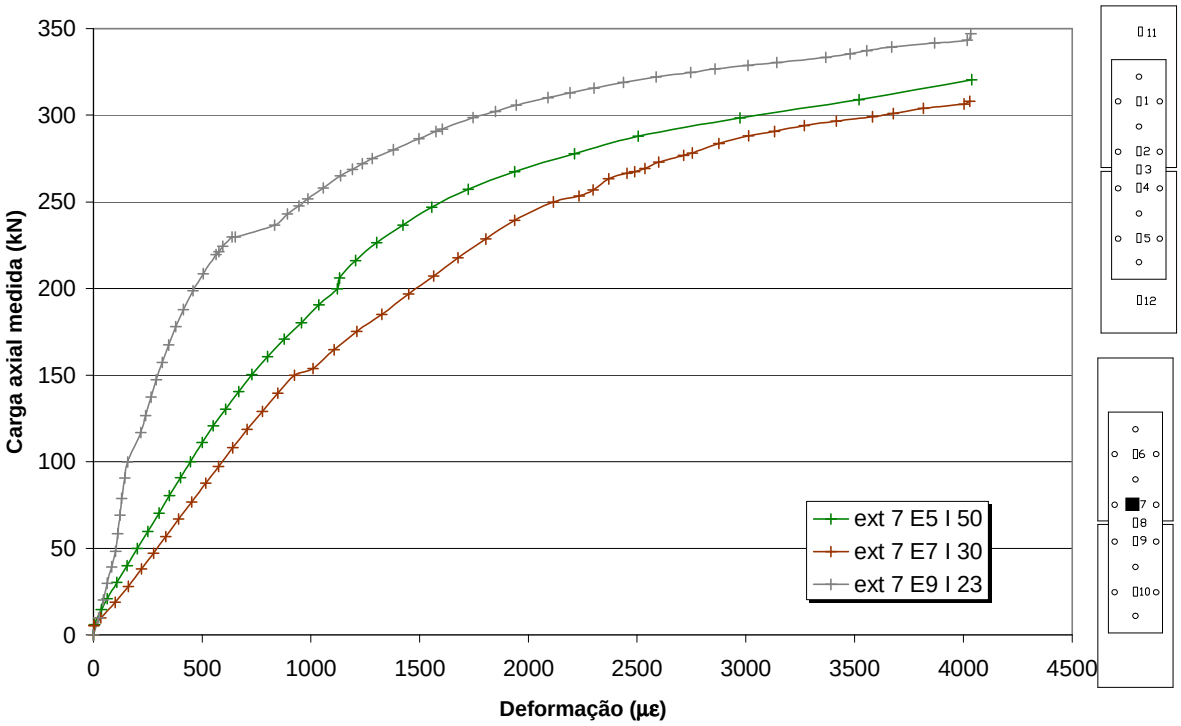


Figura A.31 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7 e E9

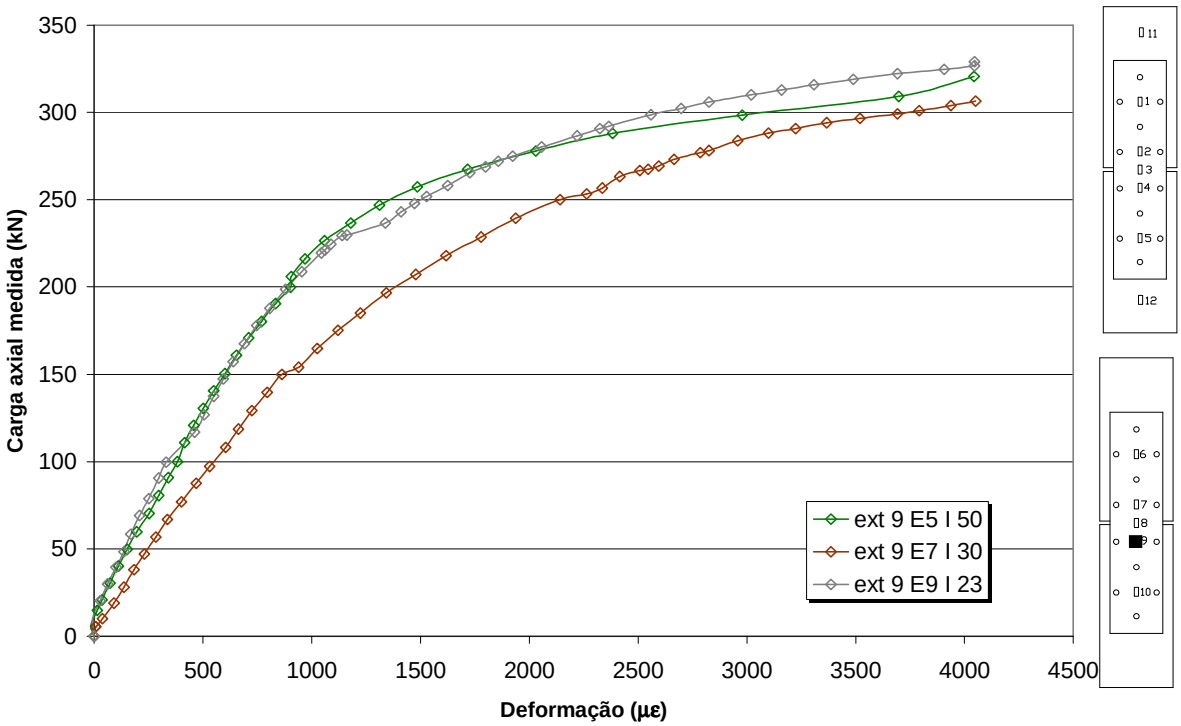


Figura A.32 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7 e E9

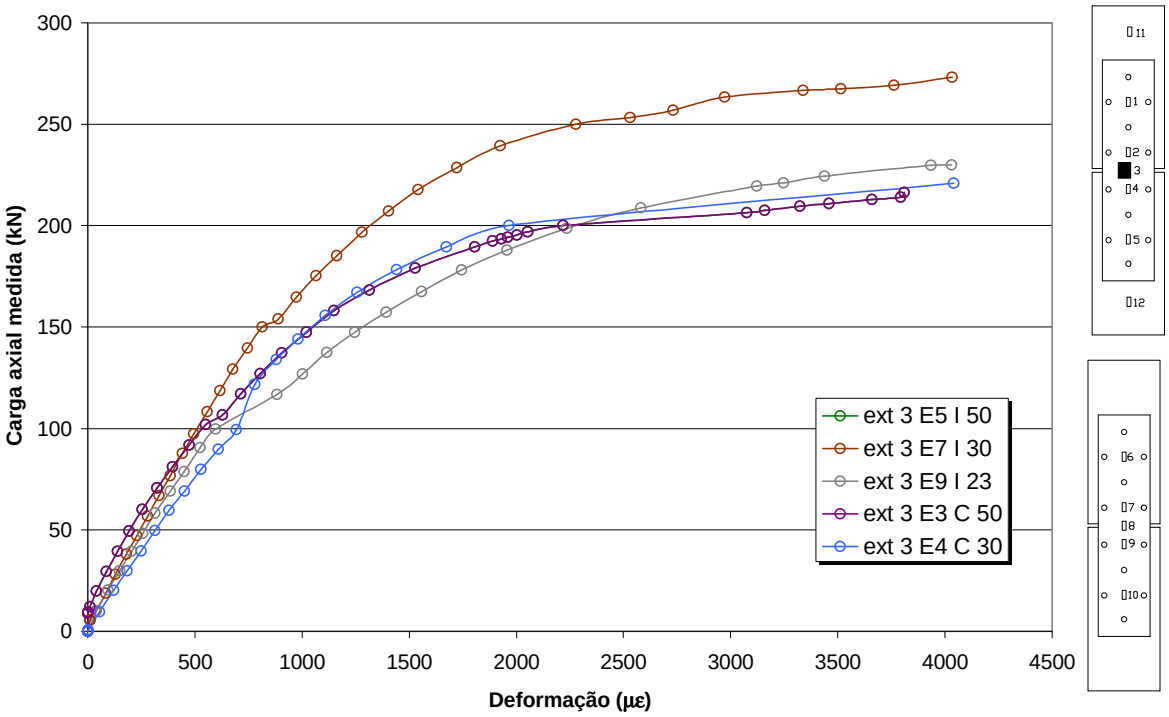


Figura A.33 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4

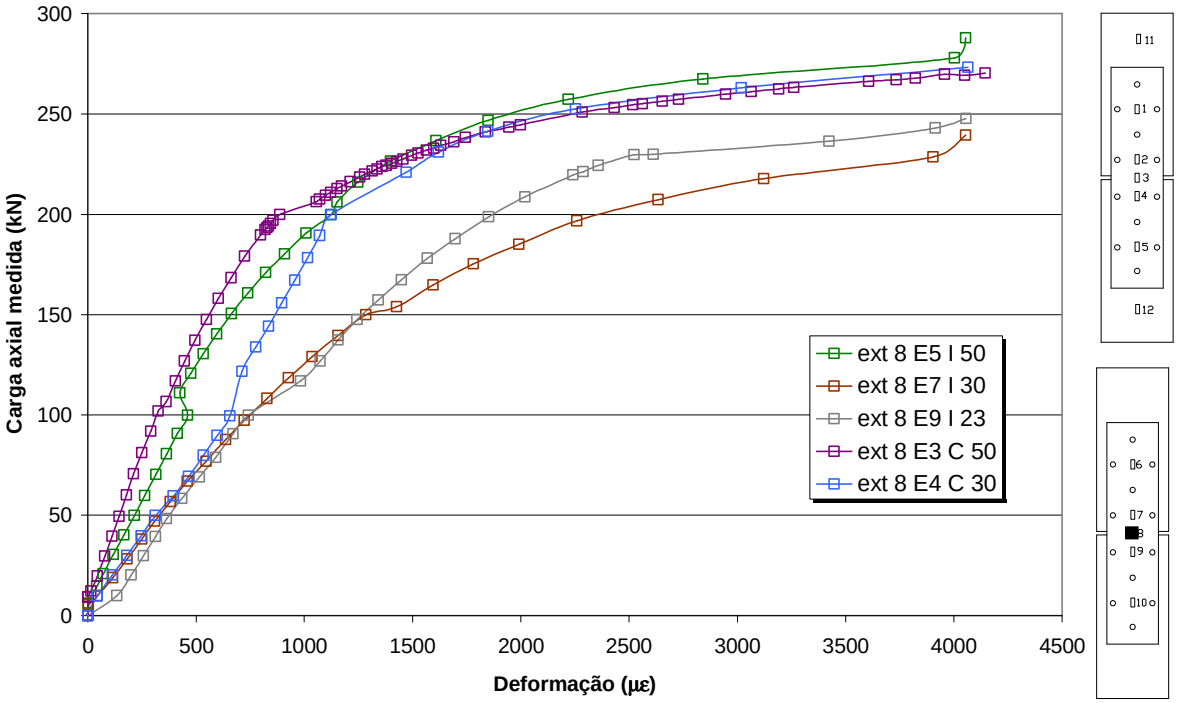


Figura A.34 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4

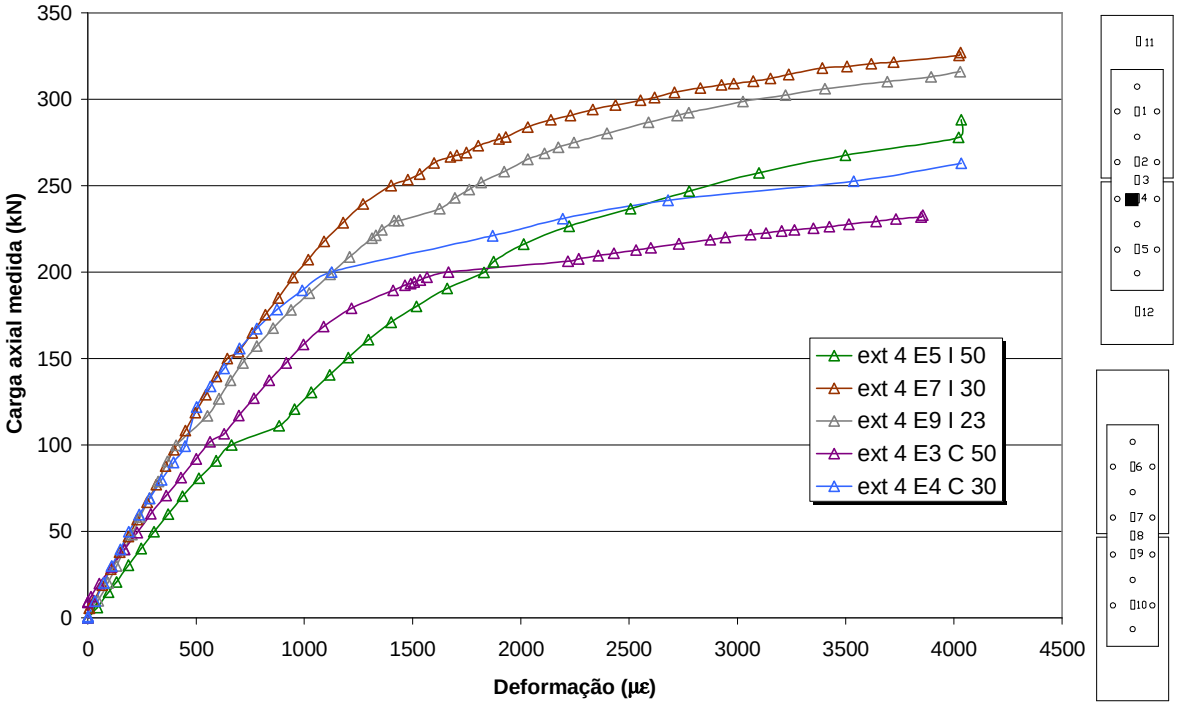


Figura A.35 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4

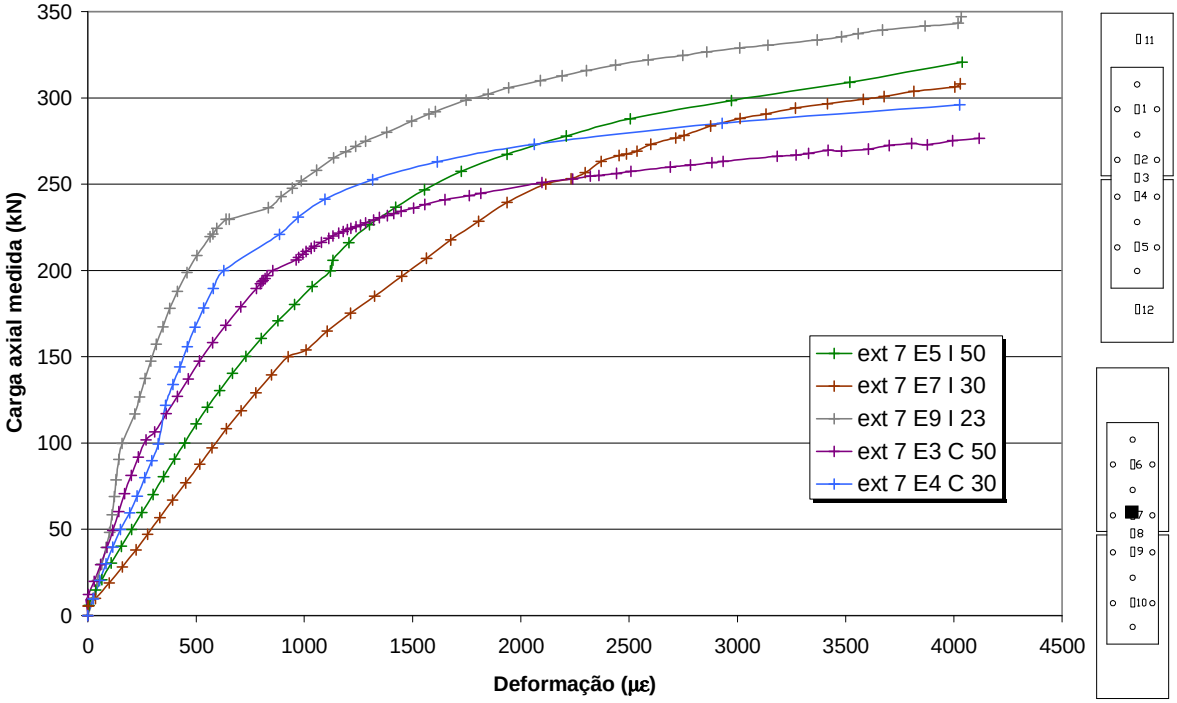


Figura A.36 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4

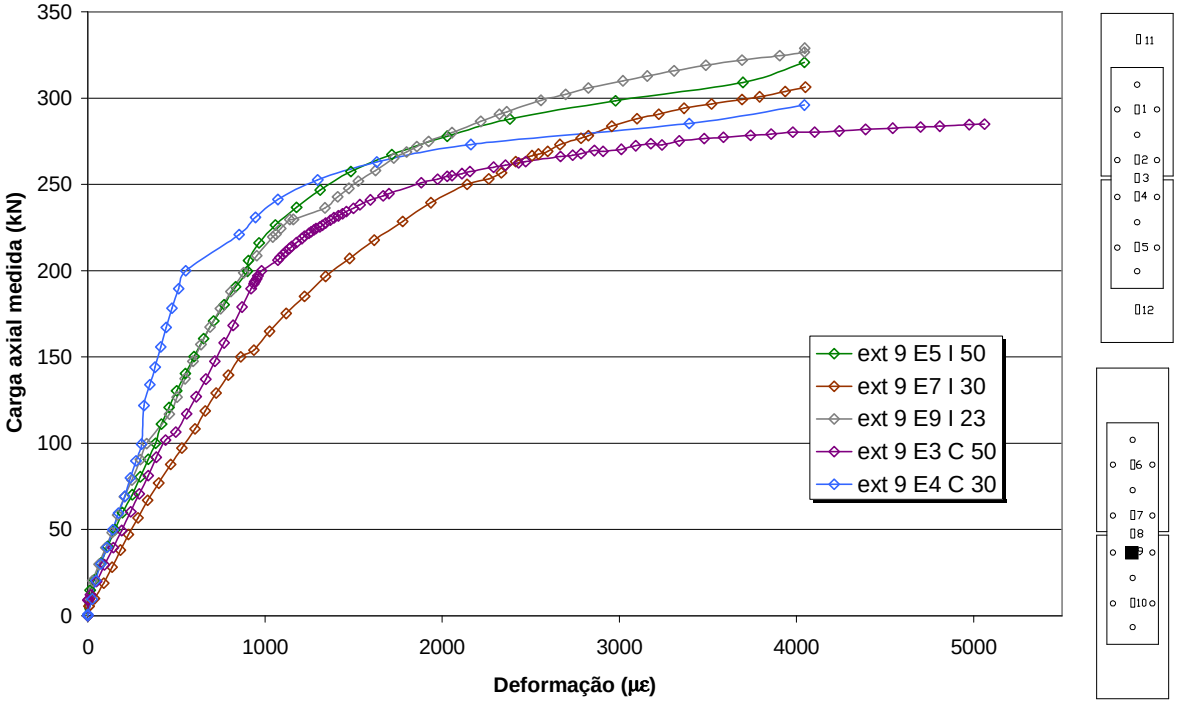


Figura A.37 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E7, E9, E3 e E4

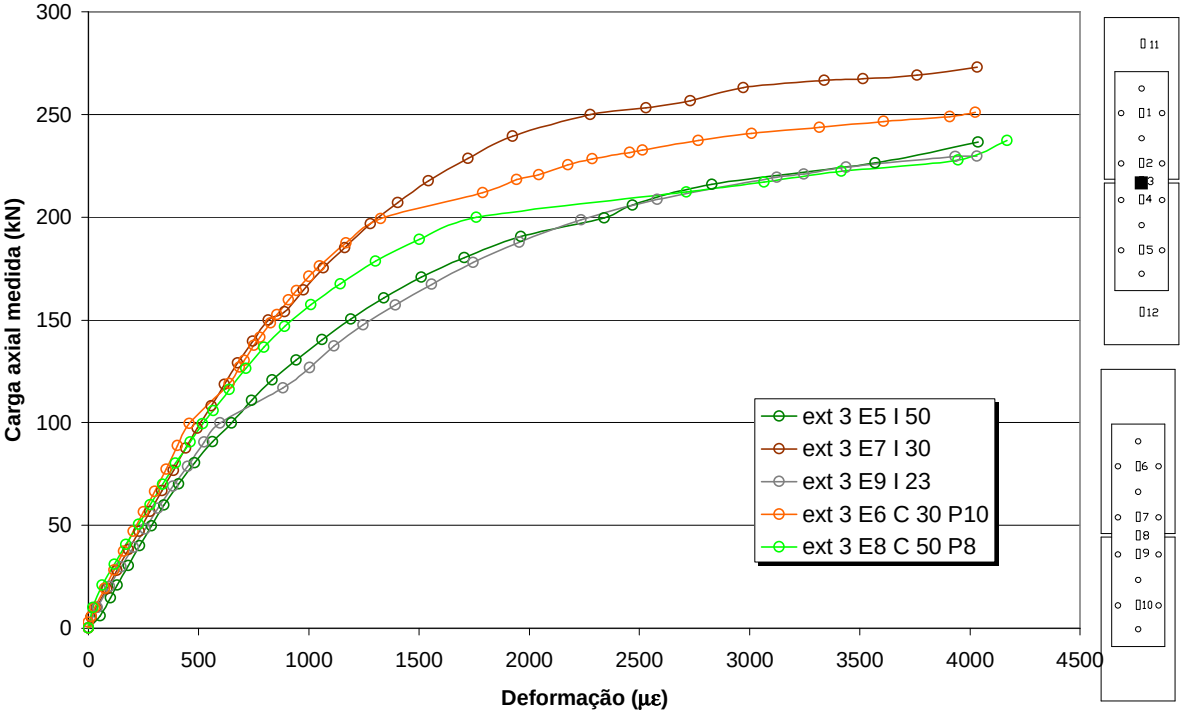


Figura A.38 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

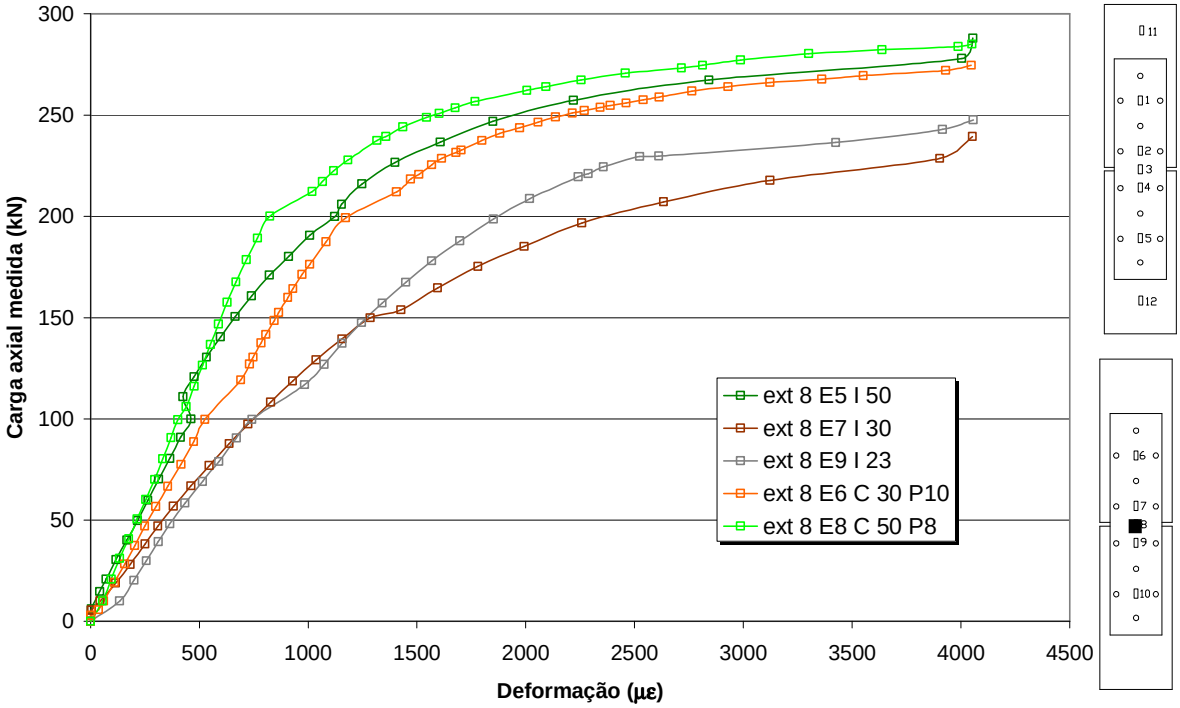


Figura A.39 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

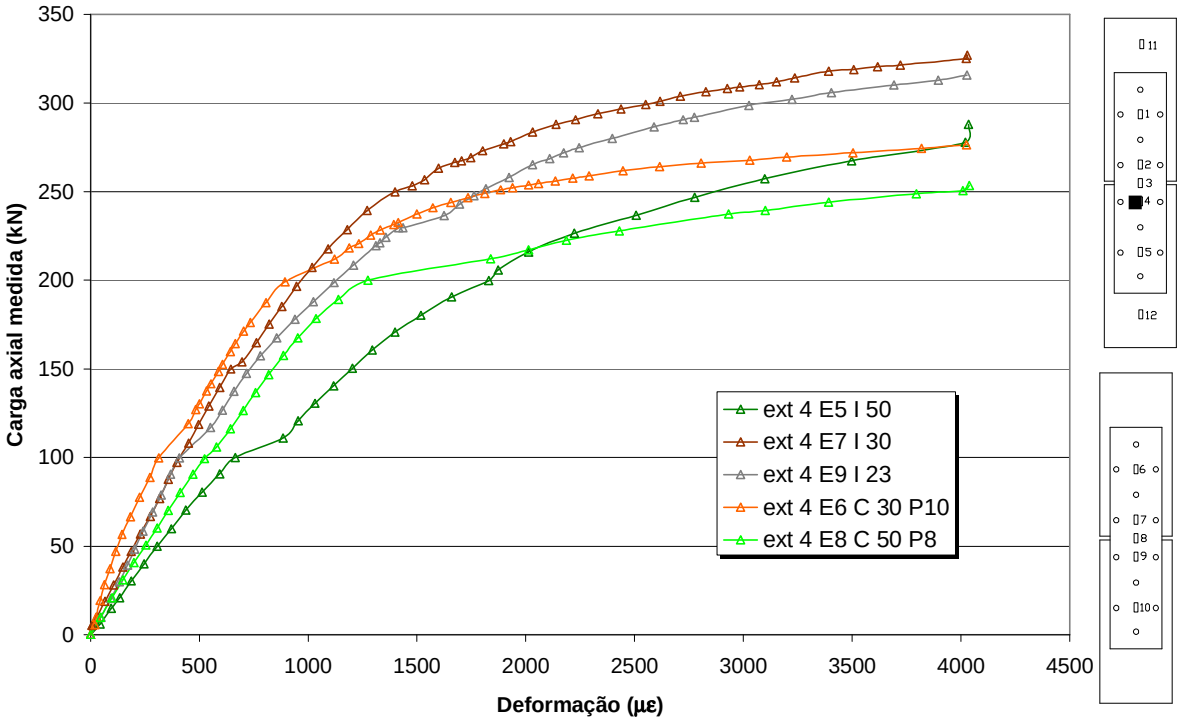


Figura A.40 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

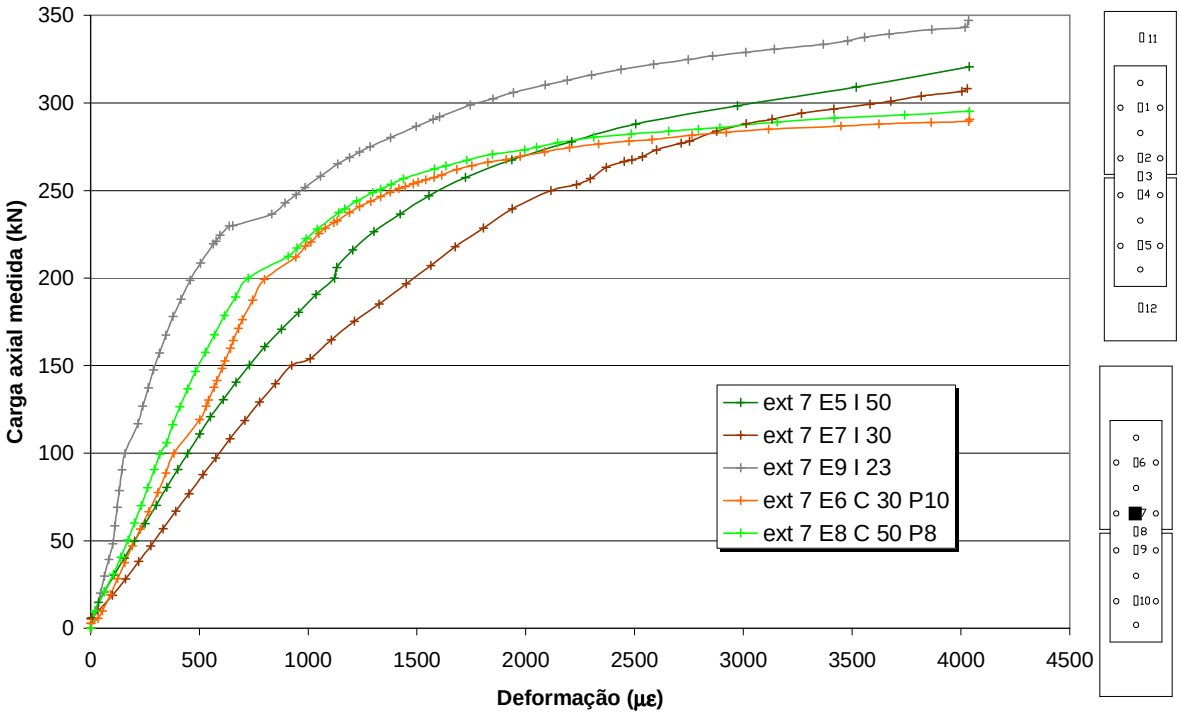


Figura A.41 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E6, E7, E8 e E9

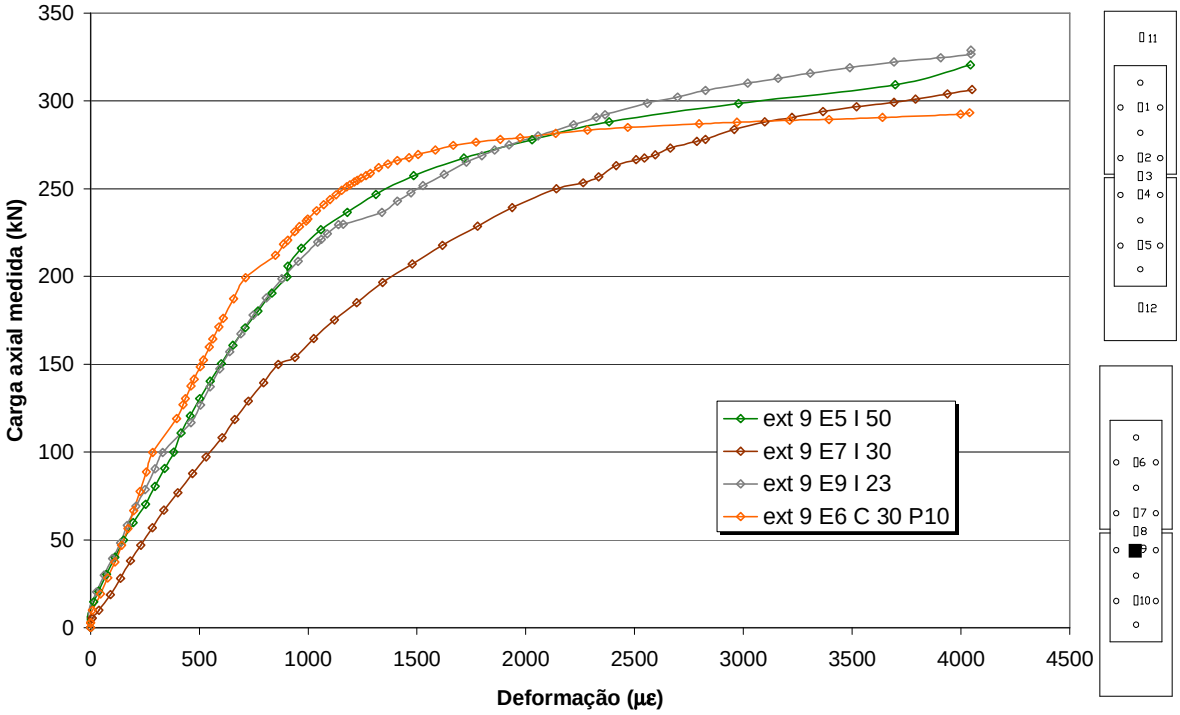


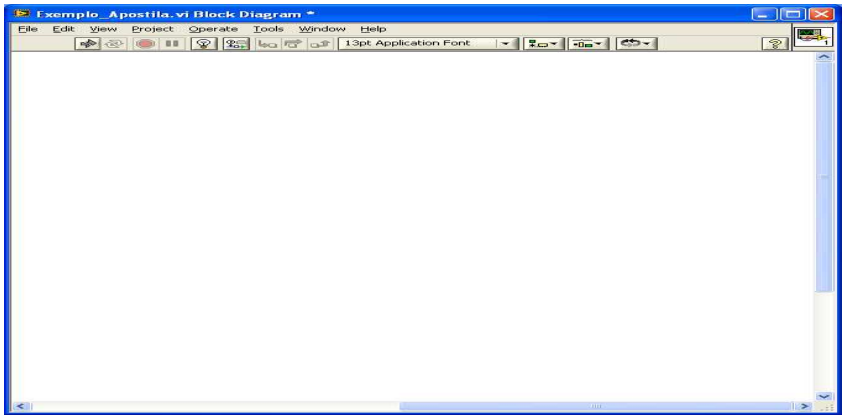
Figura A.42 – Curvas carga versus deformação - Ensaios E5, E6, E7 e E9

Apostila de programação em Labview 8.1.2

Anexo B - Apostila de programação em Labview

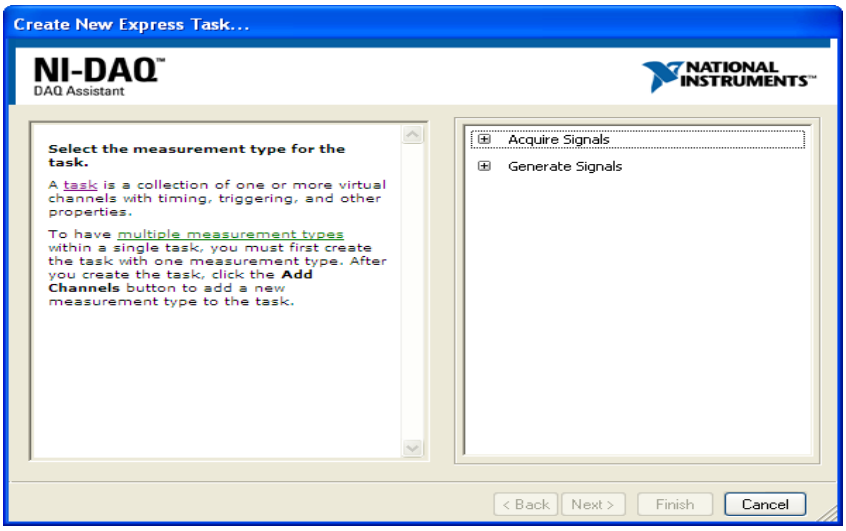
Exemplo: Leitura de valores medidos por extensômetros e gravação em programa Excel

1- Tela Inicial do Labview – Diagrama de Blocos ou Block Diagram



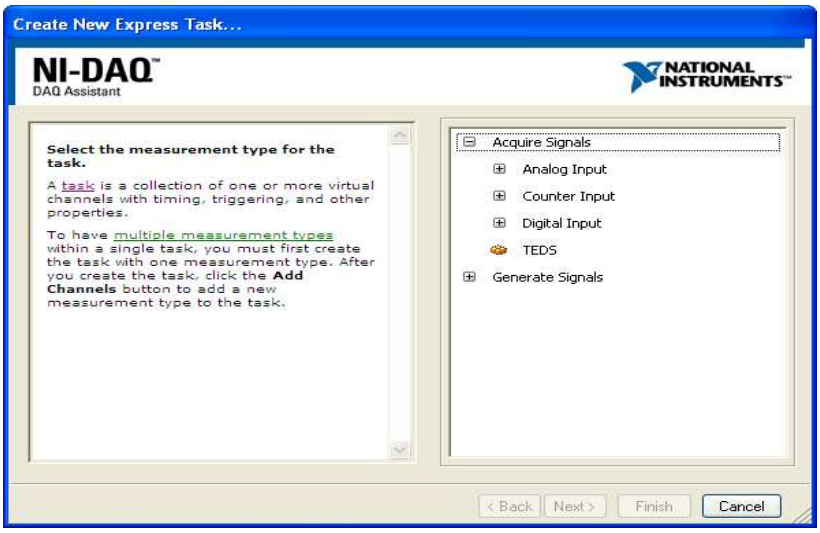
Para iniciar a programação do exemplo, clicar com o botão direito do mouse na tela e escolher Messurement I/O passar com o mouse em NIDAQ-mx e arrastar o DAQassist, com o botão esquerdo do mouse pressionado, para a tela do Block diagram.

Clicando duas vezes com o botão esquerdo do mouse em cima do DAQassist aparece a tela abaixo:

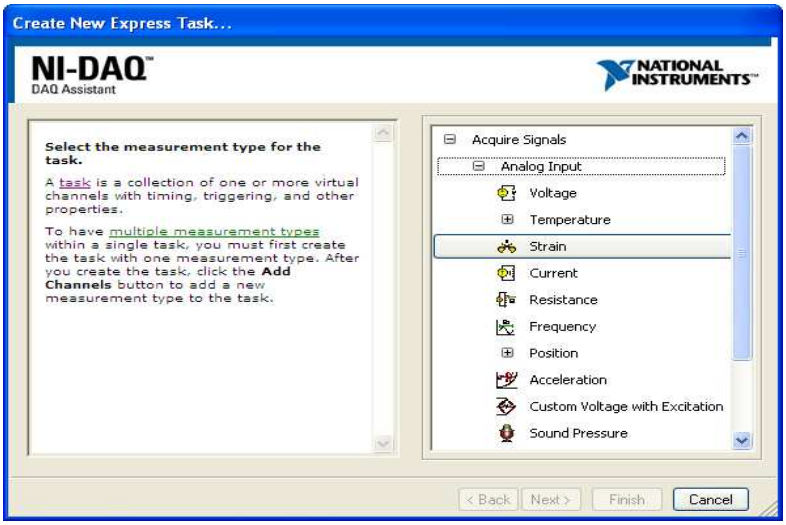


Clicar em Acquire Signals, pois o programa vai ler os sinais emitidos pelos extensômetros

Aparece a tela abaixo:

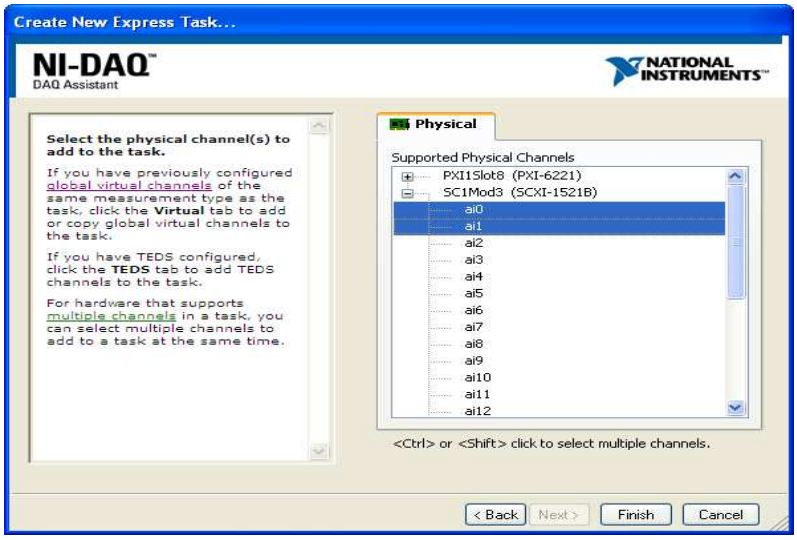


Clicar em analog input



Como o exemplo é de estensômetros para ler deformações, clicar com o botão esquerdo do mouse em strain.

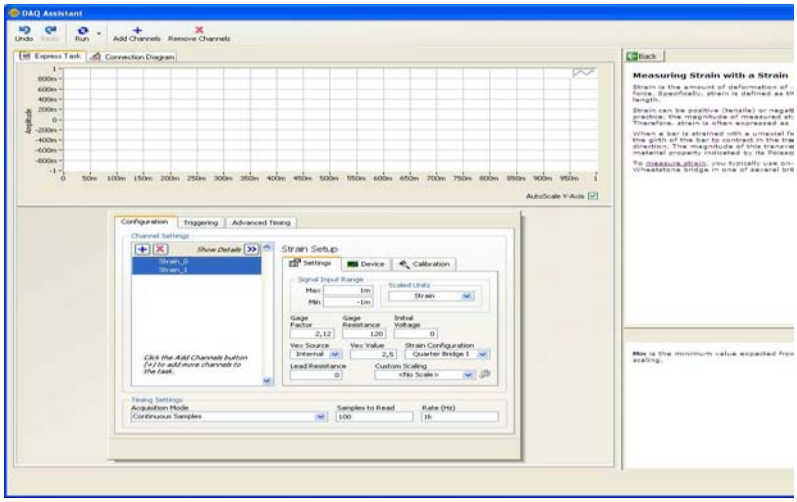
Escolher a placa de entrada, no caso SCXI-1521B, na qual esta ligada os estensômetros e clicar no sinal de mais.



Selecionar as portas de entrada de dados, já configurada nos cabos.

Clicar em Finish.

2- Neste momento de configurar as características do strain gage (extensômetro).



Selecionar novamente os dois estensômetros para fazer somente uma única configuração para os dois, pois tem a mesmas caracteristicas.

Signal input Range – configura os limites de leitura. A menos que saiba os limites, aceita-se a range de imput inicialmente mostrada, que também pode ser modificada no meio das leituras aumentando a precisão das leituras diminuindo o ruído. No caso deixa o range bem aberto para pegar tudo. 50000 strain

Scale Units – unidade que será medida as leituras, no caso strain.

Gage factor - dados fornecidos pelo fabricante do strain gage.

Gage Resistence - dados fornecidos pelo fabricante do strain gage.

Initial Voltage – Voltagem inicial. Se o aparelho de leitura tiver uma voltagem inicial coloca-se ela aqui, no caso os estensômetros não tem.

Vex Source - se vai utilizar excitação externa ou a interna produzida pelo strain gage ou nenhuma, no caso interna.

Vex value - valor da excitação. Não mexe, pois ela é interna.

Strain configuration - tipo de strain gage utilizado, no caso medindo a deformação numa só direção.

Load resistence – medir a resistência do fio que transposta os dados. Se ele for muito longo tem que ser medida e colocado o valor neste campo.

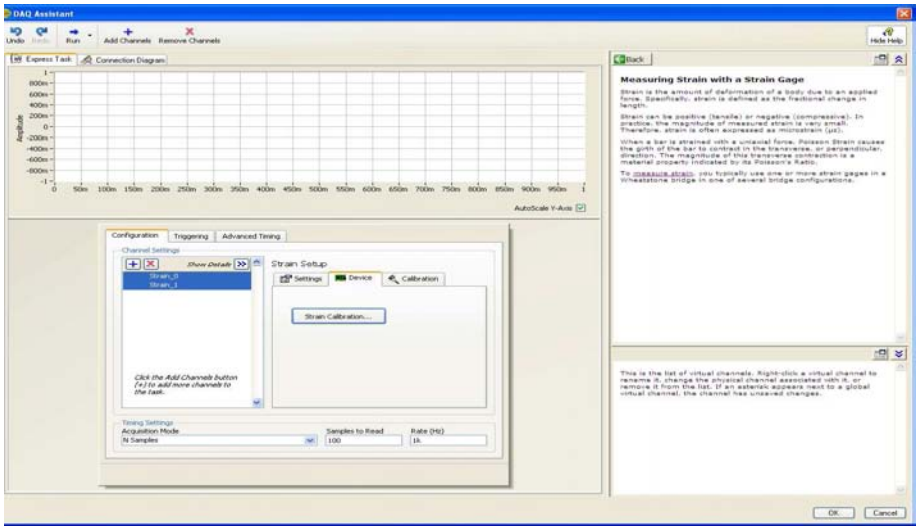
Custon Scaling - configurar a escala a ser utilizada, a principio deixar sem escala determinada. No caso lerá na unidade strain já pré-determinada.

Timing setting – Os dados serão adquiridos por um determinado número de leituras feitas em determinada freqüência no caso em tela no período de 0,1 segundos, pois serão 100 leituras num período de 1000 Hz.

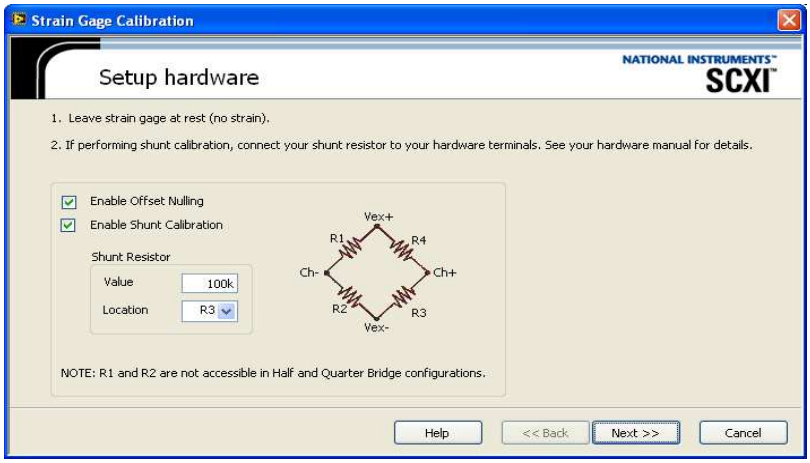
Aquisition Mode - continuous mode. Para fazer um looping nas leituras.

2.1 - Calibrando os estensômetros

Selecionar a pasta device e após clicar com botão esquerdo em strain calibration

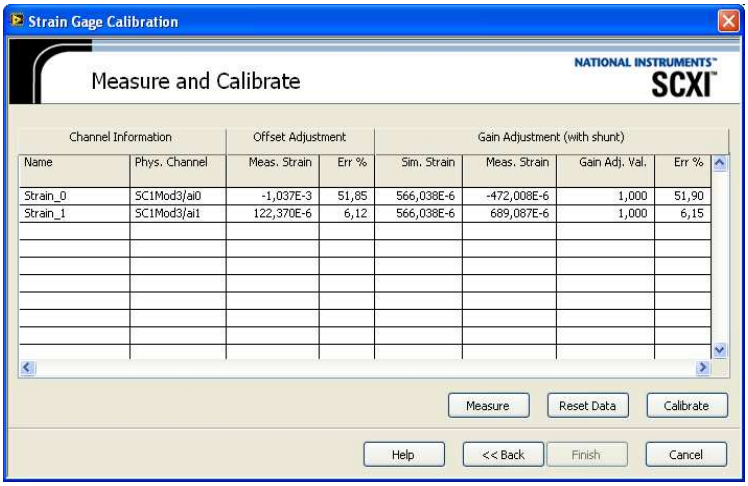


Configurar o extensômetro



Informações já determinadas pelo tipo de extensômetro escolhido anteriormente. Clicar em next.

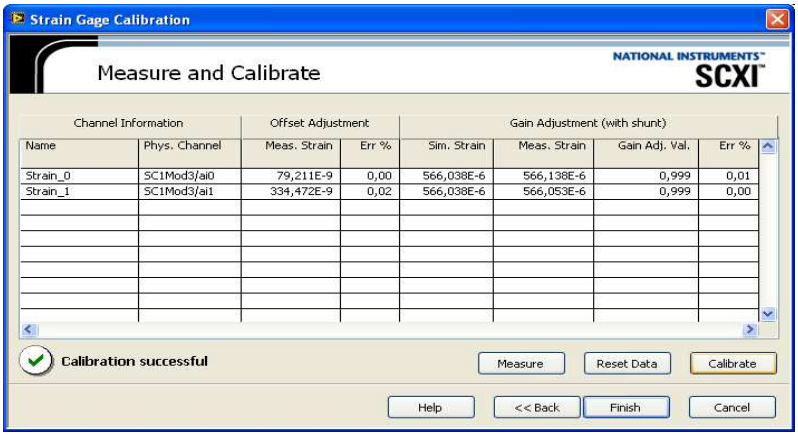
A tela apresenta as medidas iniciais apresentadas pelos estensômetros colados. Uma má colagem demonstraria valores altos, porém estes apresentados são baixos mostrando que foram bem colados na peça a ser analisada.



Channel Information		Offset Adjustment		Gain Adjustment (with shunt)			
Name	Phys. Channel	Meas. Strain	Err %	Sim. Strain	Meas. Strain	Gain Adj. Val.	Err %
Strain_0	SC1Mod3/ai0	-1,037E-3	51,85	566,038E-6	-472,008E-6	1,000	51,90
Strain_1	SC1Mod3/ai1	122,370E-6	6,12	566,038E-6	689,087E-6	1,000	6,15

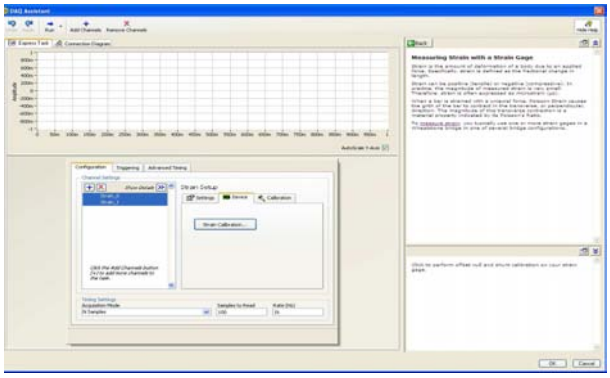
No caso o extensômetro 0 apresenta um erro de leitura de 51,9%

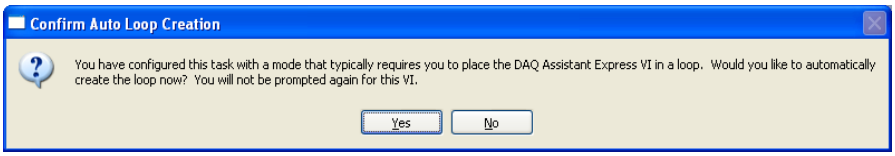
Aperta Calibrate, para zerar os erros e obter as leituras de deformação apresentada pela peça.



Clicar em finish, pois os erros foram zerados.

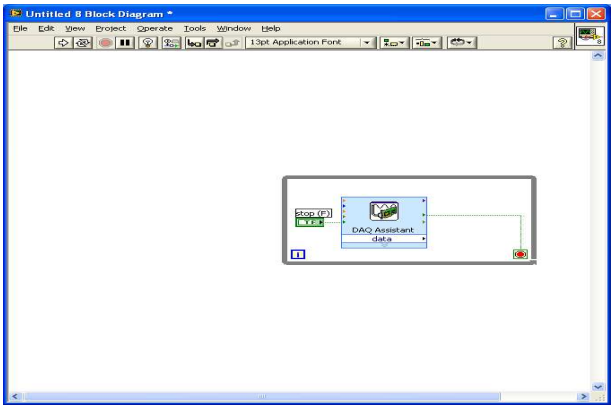
Agora Clicar no ok, para continuar configurando nosso Diagram block





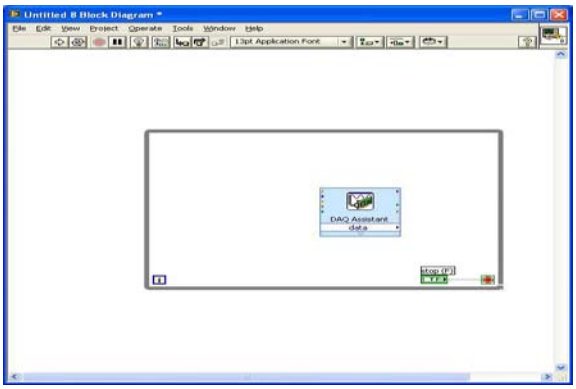
O programa pergunta se quer mesmo que ele próprio configure o looping a ser executado. Clica OK

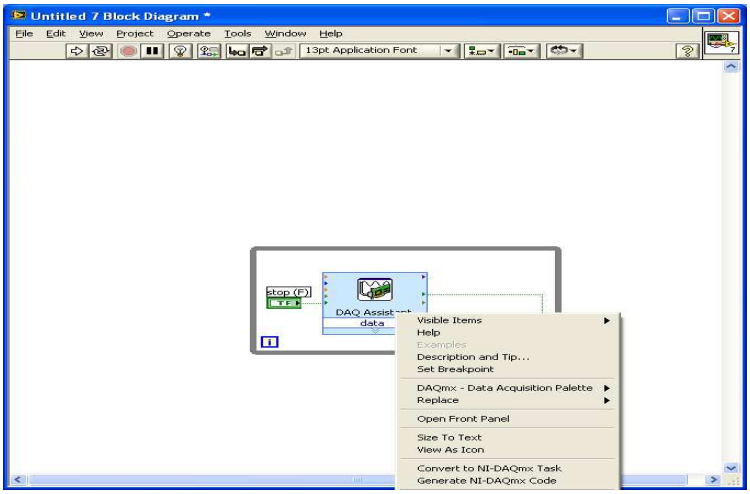
E aparece a tela abaixo, com o ícone do assistente de aquisição de dados



Configurar o botão do stop para parar o looping quando for necessário.

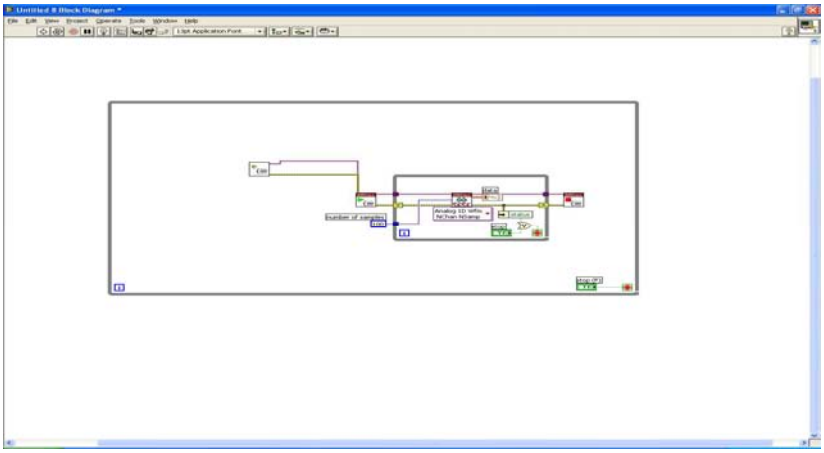
Eliminar as linhas clicando sobre elas e deletando e ligar com a figura carretel aparecendo e pressionando o botão esquerdo do mouse e arrastando criar uma linha até o stop.





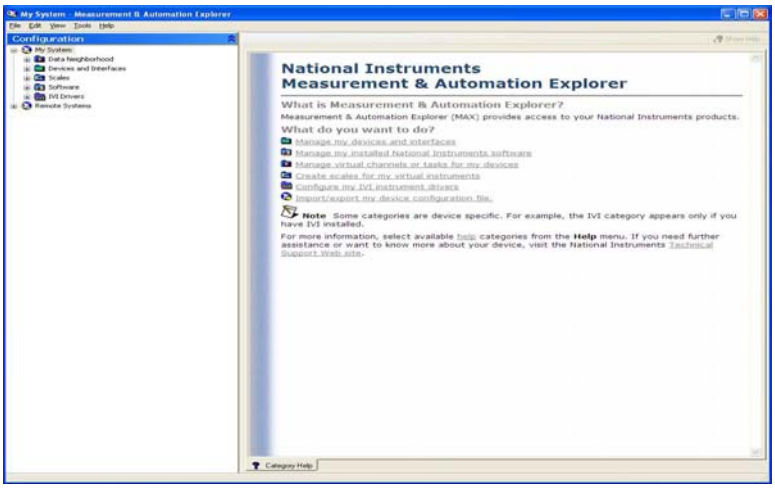
Com o botão esquerdo em cima do ícone converter para NIDAQ-mx code.

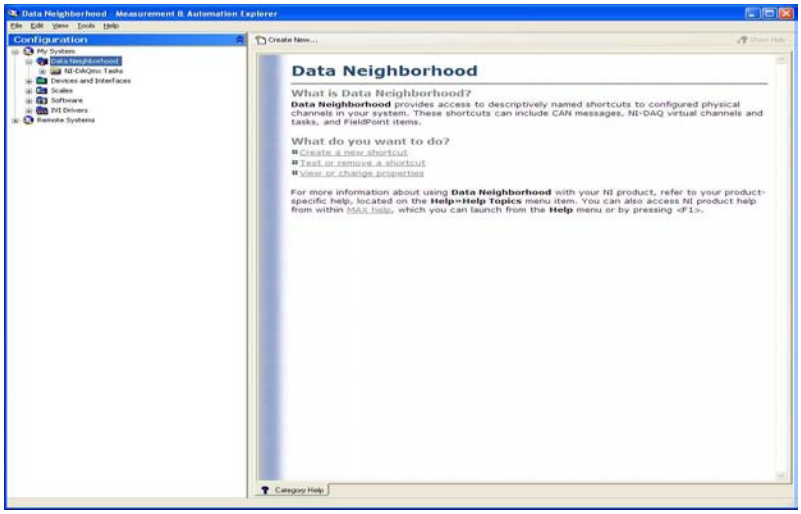
Em Tools acesse Measurement acesse o último DAQ assist x rename a tarefa para apostila

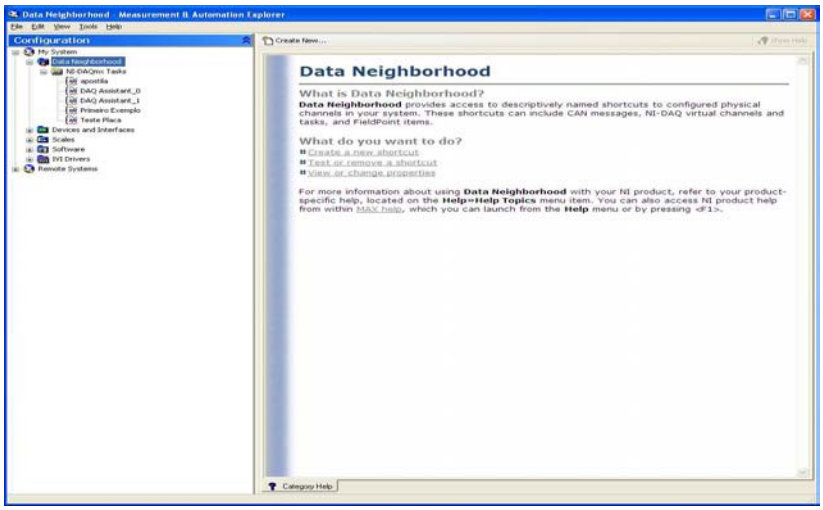


Salve o programa com um nome apostila.

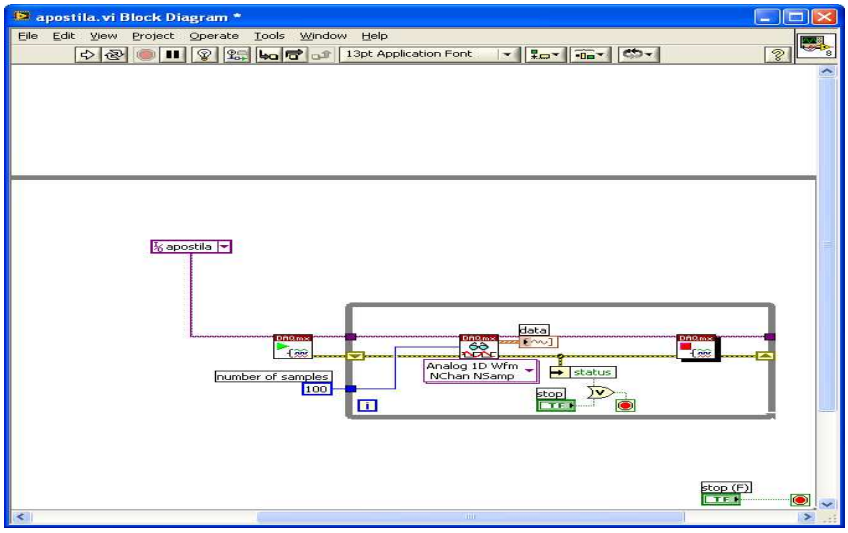
Em Tools acesse Measurement acesse o último DAQ assist x (último) rename a tarefa para apostila. Seguir os seguintes passos:



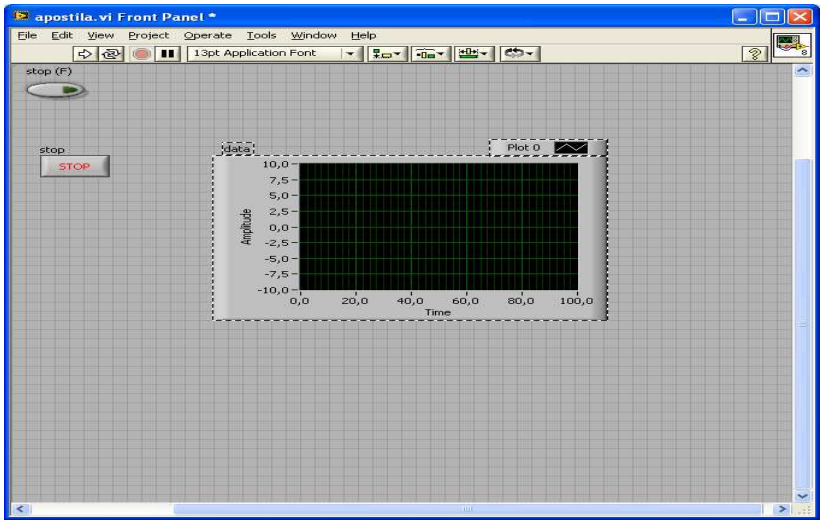




Para arrumar o programa retirando a janela de erro e com o botão direito do mouse em cima do canal tarefa criar uma constante para entrada de dados da tarefa apostila criada anteriormente.



O programa criado já gerou uma janela gráfica para acompanhar as diversas leituras feitas graficamente pelos extensômetros no painel frontal, que pode ser visto ao clicar em windows e selecionar a sua visualização.

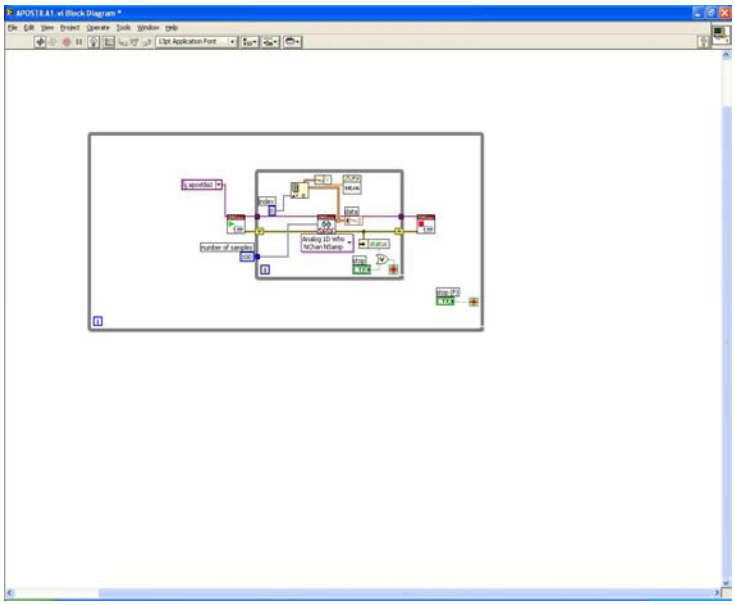


A programação para a leitura dos dados foi criada, agora pode-se novamente ajeitar o range para melhor visualizar os valores de leitura graficamente.

Clicar com o botão esquerdo nos valores extremos se consegue mudar o fundo de escala.

Outra mudança que pode ser feita é no diagrama de blocos mudar a quantidade de leituras no período de 1000Hz.

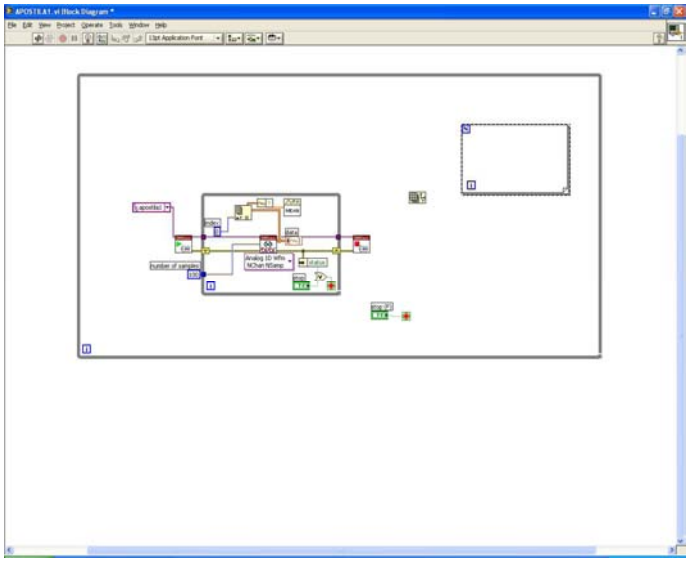
3 - Preparando o programa para tratar e organizar a saída de leituras.



Separar as leituras, através de uma matriz ir no Programing/array/index array, agora indexar, através da criação de uma constate.

Pegar a forma de curva computando os seus valores, separando e indexando, através da waveform retirada de programing/waveform/ get waveform components.

No block diagram colocar um controlador de valores, escolhendo o valor principal através da janela mathematics/prob & statist. Posicionar o controlador mean, que dará o valor principal ou a média das leituras.



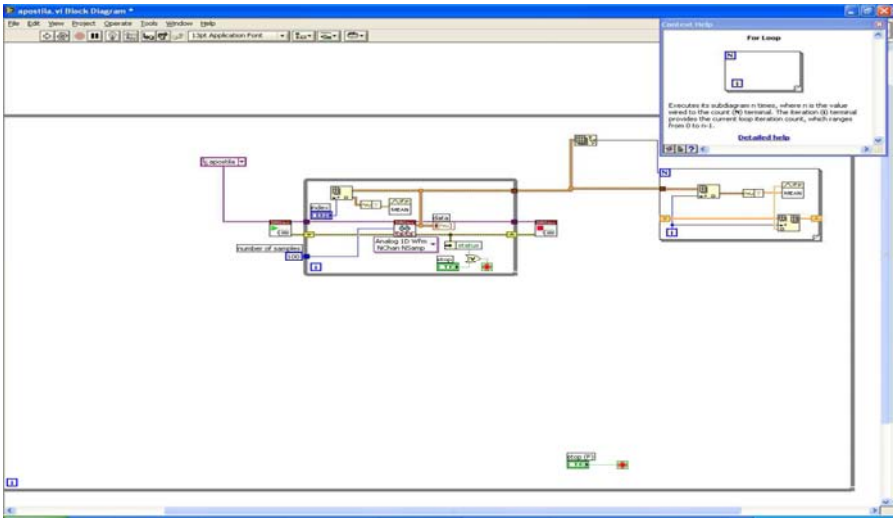
Criar um for loop para fazer várias leituras repetidas vezes.

E para identificar as entradas separadamente será criado um array size na entrada, para que as várias leituras sejam ordenadas.

Criando a mesma estrutura gerada no primeiro looping, para ler os principais valores de cada entrada.

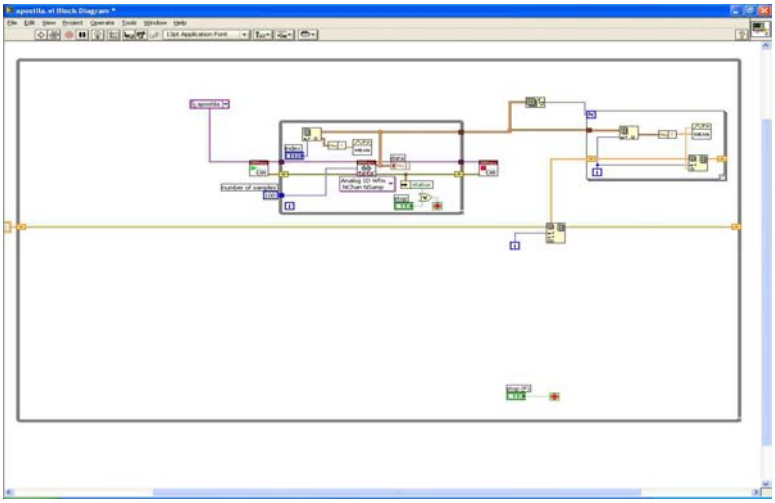
Deve-se então desabilitar o indexador, pois no for loop já existe este indexador necessário no index array.

Criar o shift register para passar dados da atual interação para a próxima interação.

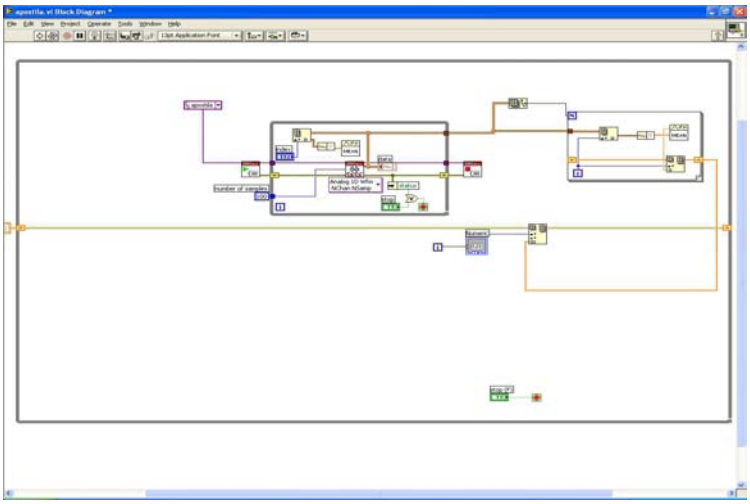


Acumulando os dados num insert array.

Criar uma constante e aumentar para duas saídas promovendo a relação com o array do for loop



Criar um contador numérico de leituras que vai aparecer no painel frontal



4 - Criar a tabela do Excel.

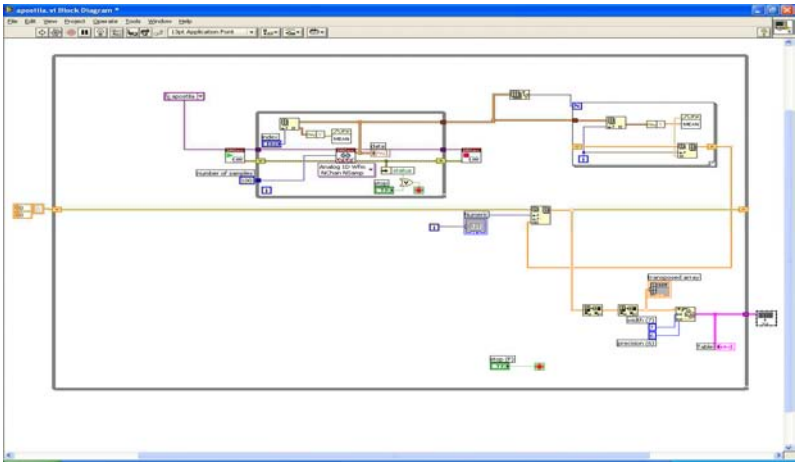
Pegar os dados acumulados e faz-se uma transposição de dados duas vezes
No programing array pegar o transpose 2d array e colocar em seqüência os dois.

No programing selecionar string e depois no string/number selecionar o number to fractional string para definir o tamanho do número e sua precisão que irá sair na tabela do Excel.

Criar um cotrolador de transpose array e fazer change to indicator para poder se conectar com a linha de dados e mostrar no painel frontal a matriz transposta.

Através do help se encontra os exemplos de VIs no NI example finder é escolhido write table to xl.VI depois de aberto salvar com o nome de tabela Excel apostila nos meus documentos. Após salvar arrastar o ícone para a ligação final

Seleciona a tabela do table Excel apostila e copia para dentro do loop e fazer change to indicator para poder se conectar com a linha de dados e mostrar no painel frontal.



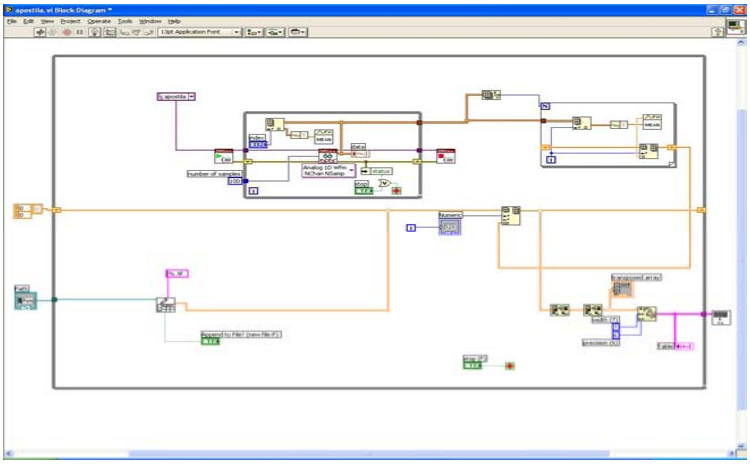
5 - Gravar os dados em um arquivo de dados .dat

No endereço C\ National Instruments\Labview 8.2\vi.lib\Utility\file.llb\write to spreadsheet file.vi colocar o icone ou mais fácil pegar do file I/O write to spreadsheet

Criar uma condição de verdadeiro ou falso, que pode ser formatada no painel frontal.

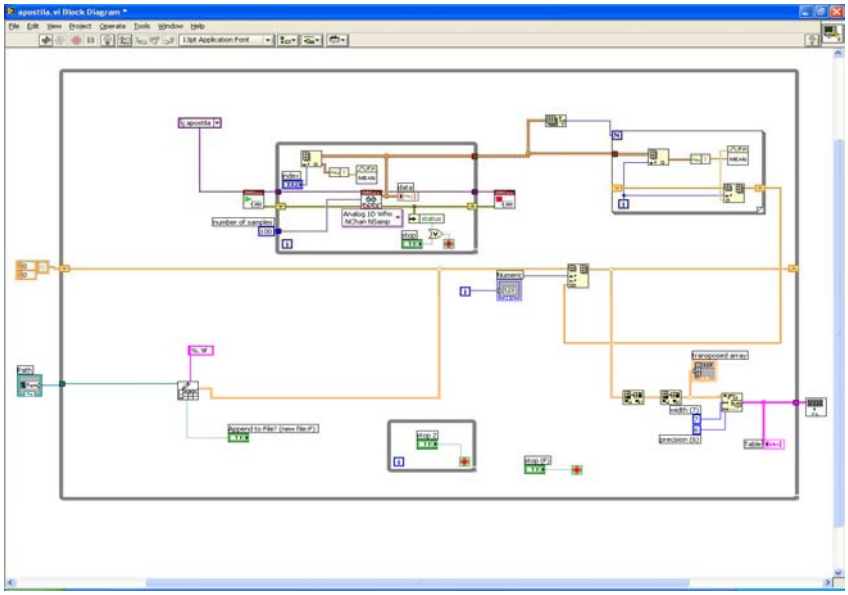
Criar uma formatação dos resultados através do string constat no formato de 9 dígitos.

E gerar um path com endereço aonde os dados serão guardados e colocar fora do loop.



Criar um botão que para todo o ciclo e nos mostre os valores lidos.

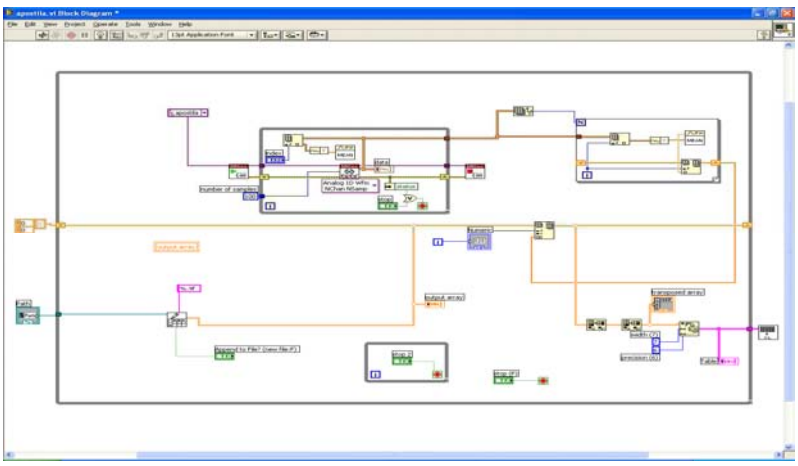
Dentro de um loop será colocado o controlador de verdadeiro ou falso comum botão de stop criado através de replace bolean



6 - Criar um gráfico com as leituras geradas

Create a indicator e desabilita o formato ícone para transportar as leituras para outras área do loop para construir o gráfico

E criar uma variável local em outro lugar do loop para construir os comando de formação do gráfico

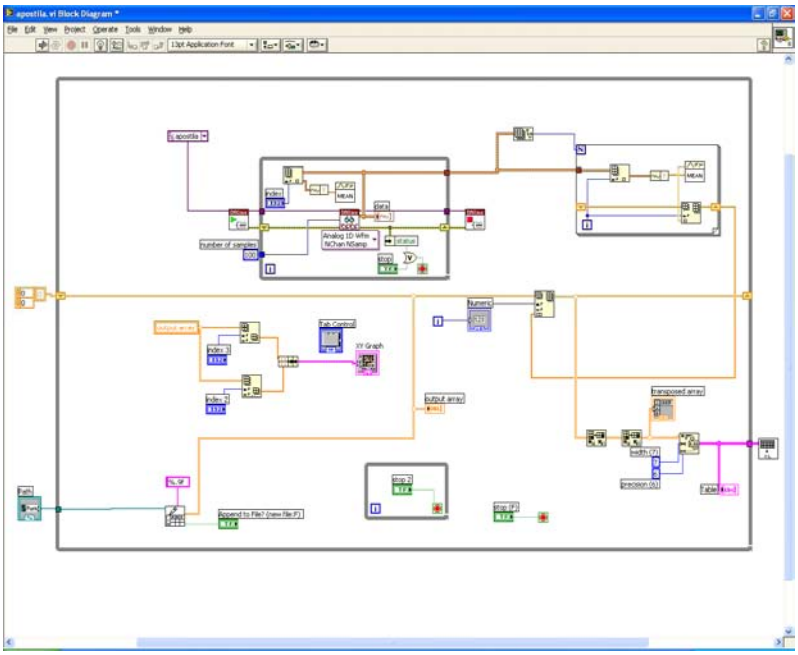


Criar então dois index array através da palete de array e change to read

No programing cluster e colocar um bundle para separar em ordenada e abcisa as leituras

Acessar front panel e criar um gráfico xy e ligar no boundle

Criar um tab control para melhorar a aparência do painel frontal



Tela final de diagrama de blocos.

Esta pronta a programação para leitura de deformações fornecida por extensômetros colados ao ensaio e gravar estas leituras em planilha Excel. Pode-se, ainda, criar mais dois controladores neste programa: um para a leitura de carga e outro para leitura de deslocamento feita através de placas de capturas específicas.