



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Análise experimental de telha de aço autoportante

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

João Rodrigo da Silva Baptista

Leiria, Março de 2015



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Análise experimental de telha de aço autoportante

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

João Rodrigo da Silva Baptista

Orientador: Luís Carlos Prola

(Professor Coordenador, ESTG–IPL)

Co-Orientador: Paulo Alexandre Lopes Fernandes

(Professor Coordenador, ESTG–IPL)

Leiria, Março de 2015.

À Minha Família

Agradecimentos

Apesar de na capa desta dissertação constar apenas um autor, este trabalho foi tudo menos individual. Foi um trabalho coletivo, o qual sem a ajuda de colegas, amigos e familiares nunca teria sido possível de levar avante. Deste modo gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para que pudesse desenvolver esta dissertação:

Aos meus pais, Aida e Inácio, pela motivação para seguir aquilo em que acredito e pelo apoio e sacrifícios, durante os últimos anos, que tornaram possível não só a concretização de um curso superior mas também me possibilitou iniciar na investigação científica. Pelo auxílio em laboratório mas especialmente pelo incentivo a continuar sempre em frente face às dificuldades, a nunca desistir e a lutar pelos nossos sonhos, sejam eles quais forem.

Aos meus avós, e falecida avó, pelas palavras de encorajamento, pelo interesse demonstrado e pelo acompanhamento ao longo de todos estes anos.

Ao Professor Luis Prola, pela orientação fundamental prestada, pela sua disponibilidade e pelo gosto que me passou pelas estruturas metálicas e vontade de aprender cada vez mais.

Ao Professor Paulo Fernandes, pela ajuda fundamental prestada em laboratório, por ter sempre solução para os percalços que foram surgindo no decorrer dos trabalhos experimentais, pelo companheirismo e por ter transmitido o gosto pela investigação e trabalho laboratorial.

À Blocotelha – Steel Constructions, SA, na pessoa do Eng.º Samuel Pereira, pelo apoio prestado e fornecimento dos materiais necessários para o desenvolvimento do trabalho em laboratório.

Ao Eng.º Patrick Pinheiro, colega e amigo, pelas inúmeras horas passadas a trabalhar em laboratório, não só de dia mas também de noite, para que os trabalhos fossem sempre realizados a tempo e horas. Pela persistência e força de vontade em laboratório, em muitas vezes até maior que a minha, face aos percalços que inevitavelmente iam surgindo. Pela amizade e companheirismo fundamentais ao longo dos últimos tempos.

Ao colega e amigo Eng.º Tiago Lopes, pela amizade, pelo acompanhamento e apoio prestados no decorrer da dissertação.

À JC BENTO - Construções Metálicas, S.A., na pessoa da Eng.^a Joana Bento, colega e amiga, pelo apoio prestado e amizade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa “Construções J. M. Silva, Lda.”, na pessoa do Eng.^o Jorge Silva, por todos os materiais disponibilizados, por vezes em quantidades consideráveis, e ajuda prestada em laboratório essencial em muitas ocasiões, mas sobretudo pelo apoio e “rivalidade” nestes últimos anos no ensino superior que me permitiram crescer não só como pessoa mas também como profissional.

À Eng.^a Vânia Marques, Técnica de Laboratório, pela ajuda facultada e facilidades concedidas em laboratório que permitiram uma realização do trabalho experimental mais célere.

A toda a equipa de manutenção, não só pelos materiais e ajuda prestada em laboratório mas também pelo companheirismo ao longo deste tempo todo.

Ao colega e amigo Eng.^o Luis Pode, pela amizade e camaradagem durante todos os últimos anos, pelo apoio, pelo interesse demonstrado, pelos momentos de descontração mas sobretudo por me ter ajudado a crescer como pessoa.

Ao colega e amigo Eng.^o Emanuel Conde, pela amizade e camaradagem durante todos os últimos anos, pelo apoio moral e em laboratório, pelo interesse demonstrado e pelos momentos de descontração.

Ao colega e amigo Eng.^o Pedro Pinto, pela amizade e camaradagem durante todos os últimos anos, pelo apoio moral e em laboratório, pelo interesse demonstrado e pelos momentos de descontração.

À colega e amiga Eng.^a Mariana Pereira, pela amizade e camaradagem durante todos os últimos anos, pelo apoio moral e em laboratório, pelo interesse demonstrado e pelos momentos de descontração.

Ao colega e amigo Eng.^o Pedro Cardoso, pela amizade e camaradagem durante todos os últimos anos, pelo apoio moral e em laboratório, pelo interesse demonstrado e pelos momentos de descontração.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, na pessoa do Professor Rui Rúben e Técnico de Laboratório Carlos Dias, pelo apoio prestado no desenvolvimento da dissertação e facilidades concedidas para poder realizar os ensaios de tração no Laboratório de Materiais.

À equipa de seguranças do edifício D, Sr. Tiago Batista, Sr. Carlos Reis, Sr. Arcílio Rodrigues e Sr. Hélder Gil, pela sua disponibilidade, companheirismo e interesse demonstrado.

A todos os meus colegas e amigos que, apesar de seu nome não constar aqui, nunca foram esquecidos ao longo deste trabalho. Um grande obrigado pela força e sobretudo pelas ocasiões de convívio e descontração que permitiram “tirar a cabeça da tese” por momentos e aliviar o stress que se advinha da mesma.

Resumo

As telhas de aço autoportantes têm uma larga utilização na cobertura de grandes áreas (construções industriais, rurais, desportivas), devido ao seu baixo peso próprio e à sua capacidade resistente permitindo vencer grandes vãos sem necessitar de elementos verticais intermédios para a suportar, proporcionando assim um espaço amplo sem obstáculos. A procura de soluções mais eficientes e otimizadas para a secção transversal destas telhas conduziram a geometrias complexas, cuja análise estrutural requer métodos sofisticados de cálculo. Torna-se necessária a validação de métodos de cálculo (especificações de normas, métodos numéricos) através de ensaios experimentais.

Apesar de ter uma vasta aplicação no mercado, esta carece de estudos científicos que descrevam o seu comportamento estrutural face às ações a que estão sujeitas. Com vista a colmatar a falta de estudos neste domínio, este trabalho propõe-se realizar um conjunto de testes experimentais de uma solução de cobertura autoportante com a colaboração da empresa “Blocotelha – Steel Constructions, SA”.

A componente experimental desta dissertação consiste em (i) ensaios de caracterização do material, passando pela (ii) análise do comportamento da secção (barra de eixo reto) quando sujeita a compressão axial até ao (iii) estudo da resposta da estrutura em conjunto, com a forma de um arco.

Por fim são apresentados os resultados de todos os ensaios sob a forma de tabelas, gráficos e imagens que relacionam os fenómenos estruturais relevantes da chapa em análise tais como (i) relações tensão/extensão de ensaios à tração, e (iii) curvas força/deslocamento, curvas força/tensão e momento/curvatura.

Palavras-chave: telha autoportante, análise experimental, ensaio de tração, enformado a frio

Abstract

The cold-formed steel profile roofing system has a wide use in the coverage of large areas due to its low self-weight and its load bearing capacity, allowing great spans without the need for intermediate vertical elements, thus providing ample spaces without barriers. The search for more efficient and optimized cross-section solutions have led to complex geometries, which requires sophisticated structural analysis calculation methods. It is necessary to validate those methods through experimental trials.

Although its application in the market is quite high, it lacks scientific studies that describe its structural behavior. In order to overcome the lack of knowledge, this paper deals with an experimental study of a cold-formed steel profile roofing solution in collaboration with the company "Blocotelha - Steel Constructions, SA". The experimental part of this work consists of (i) tensile test for characterization of the material, (ii) section behavior analysis when subjected to axial compression and (iii) the behavior study of the structure with the shape of an arc.

Finally is presented the results of all tests in the form of tables and graphs relating all the analyzed properties such as (i) stress/strain graphs; and (iii) force/displacement, force/stress and bending moment/curvature graphs.

Keywords: cold formed sheet, experimental analysis, tensile test, cold formed

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Gráficos	xvii
Índice de Tabelas.....	xix
Simbologia	xxi
1. Introdução.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. Revisão da literatura	5
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3. Aço enformado a frio.....	11
3.1 ELEMENTOS ENFORMADOS A FRIO	12
3.2 NORMAS REGULAMENTARES	13
3.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	13
3.3.1 Classificação de secções	14
3.3.2 Método das áreas efetivas	15
3.3.3 Metodologia de cálculo	17
3.4 PROCESSO DE FABRICO	24
4. Ensaios experimentais	29
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO	30
4.1.1 Indicações normativas	30
4.1.2 Método de ensaio.....	31
4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PERFIS DE EIXO RETO	34
4.2.1 Preparação dos elementos para ensaio	36
4.2.2 Instrumentação e obtenção de dados	38
4.2.3 Realização dos ensaios de compressão.....	40
4.3 ENSAIO DE CONJUNTO DE TELHAS AUTOPORTANTES	42
4.3.1 Montagem do esquema de ensaio	43
4.3.2 Instrumentação e obtenção de dados	46
4.3.3 Realização dos ensaios de conjunto.....	50
5. Discussão de Resultados.....	59
5.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	59
5.1.1 Propriedades resistentes.....	59
5.1.2 Propriedades elásticas.....	61
5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PERFIS DE EIXO RETO	61
5.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE CONJUNTO	62
5.3.1 Ensaio de Conjunto 1.....	62
5.3.2 Ensaio de Conjunto 2.....	66
6. Conclusão	71
6.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	72
Bibliografia.....	75

Anexo A	1
A.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO – PROPRIEDADES RESISTENTES	1
Anexo B	21
B.1 ENSAIO DE CONJUNTO 1	21
B.2 ENSAIO DE CONJUNTO 2	31

Índice de Figuras

Figura 1 - Ensaio à flexão.....	7
Figura 2 – Modelo numérico [19].....	8
Figura 3 - Deslocamento lateral em função da carga aplicada; comparação entre os valores numéricos e os valores do Eurocódigo [19].....	8
Figura 4 - Esquemas de aplicação de carga: a) Compressão, b) e c) Compressão combinada com flexão [19].	9
Figura 5 - Tipos de perfis enformados a frio [23].....	12
Figura 6 - Tipos de Secção de chapa enformada a frio [23].....	13
Figura 7 - Curvas Momento-Curvatura para cada tipo de secção [24].....	15
Figura 8 - Área efetiva de um perfil à compressão	15
Figura 9 - Momento resistente em função da esbelteza da secção [9].....	21
Figura 10 – Exemplos de modos de instabilidade à compressão: a) Local; b) Distorcional; c) Global.....	22
Figura 11 – Aumento da resistência em função do número de dobras	22
Figura 12 - Exemplos de cargas críticas para os vários modos de encurvadura em função do seu comprimento	23
Figura 13 – Pós-encurvadura de coluna vs placa uniformemente comprimidas (linha a cheio – sistema ideal sem imperfeições iniciais; linha a tracejado – sistema real com imperfeições iniciais).....	23
Figura 14 – Reforços de topo	24
Figura 15 - Reforços intermédios: a) no banzo e b) na alma	24
Figura 16 – Exemplo do processo de enformagem.....	25
Figura 17 - Bobina de chapa de aço.....	26
Figura 18 - Etapas de Enformagem.....	26
Figura 19 - Curvatura devida ao peso próprio.....	27
Figura 20 - Perfil BC900 sobre os apoios comerciais	29
Figura 21 - Esquema espécime para ensaio [27].....	31
Figura 22 - Dimensões espécime Tipo I [mm].....	32
Figura 23 - Dimensões espécime Tipo II [mm]	32
Figura 24 - Marcação e identificação dos provetes.....	33

Figura 25 - Fixação dos provetes	33
Figura 26 – Ensaio de tração com extensómetro	34
Figura 27 - Tensão crítica vs. Comprimento de semi-onda do perfil BC900 [28].....	35
Figura 28 - Modelação dos troços retos, perspetiva	35
Figura 29 - Modelação dos troços retos, planta	36
Figura 30 - Pormenor do encastramento.....	36
Figura 31 – Cofragem exterior em madeira	37
Figura 32 – Varões roscados para alinhamento da telha	37
Figura 33 – Placa de cofragem personalizada frontal.....	37
Figura 34 – Aplicação de espuma de poliuretano nas aberturas	38
Figura 35 – Cofragem finalizada.....	38
Figura 36 – Betonagem dos topos.....	38
Figura 37 – Varão para suspensão do elemento.....	38
Figura 38 – Localização dos extensómetros para cada um dos modos de instabilidade (MLP – Modo Local de Placa, MD – Modo Distorcional, MGFT – Modo Global Flexão Torção)	39
Figura 39 – Localização e direção dos defletómetros para cada um dos modos de instabilidade (MLP – Modo Local de Placa, MD – Modo Distorcional, MGFT – Modo Global Flexão Torção).....	39
Figura 40 – Colocação do atuador na parede de carregamento.....	40
Figura 41 – Colocação do bloco de reação.....	40
Figura 42 – Rotura do bloco de betão por punçoamento.....	41
Figura 43 – Esquema do ensaio de carga	42
Figura 44 – Esquema do apoio fixo	43
Figura 45 – Esquema do apoio móvel	43
Figura 46 – Montagem da metade inferior dos apoios	44
Figura 47 – Marcação da furação dos cavaletes.....	44
Figura 48 – Furação para os cavaletes	44
Figura 49 – Apoio simples sobre rolos	44
Figura 50 – Marcação da furação.....	45
Figura 51 – Execução da furação.....	45
Figura 52 – Aperto do conjunto	45
Figura 53 – Conjunto de costura final	45
Figura 54 – Telha costurada	45
Figura 55 – Corte dos tirantes	46

Figura 56 – Soldadura dos tirantes.....	46
Figura 57 – Aperto dos tirantes	46
Figura 58 – Esquema de ensaio completo	46
Figura 59 – Localização dos extensómetros na secção transversal	47
Figura 60 – Secções instrumentadas	47
Figura 61 – Preparação e marcação da superfície	47
Figura 62 – Colagem do extensómetro	47
Figura 63 – Extensómetro soldado e protegido.....	47
Figura 64 – Esquema de posicionamento dos transdutores de deslocamentos	48
Figura 65 – Transdutor de deslocamentos SDP-300D.....	48
Figura 66 – Roldana de desvio	48
Figura 67 – Sistema de fixação do fio	48
Figura 68 – Ligação dos fios elétricos dos extensómetros	49
Figura 69 – Data Logger TDS-303 com toda a instrumentação ligada	49
Figura 70 – Enchimento dos sacos de areia.....	49
Figura 71 – Sacos de areia cheios	49
Figura 72 – Deformações nas almas da secção	50
Figura 73 – Rotação da sobreposição das telhas junto ao apoio	51
Figura 74 – Deformações da sobreposição perto dos apoios	51
Figura 75 – Deformação longitudinal do conjunto	52
Figura 76 – Colapso da telha central (Vista superior)	52
Figura 77 – Colapso da telha central (Vista inferior)	53
Figura 78 – Rotura da secção a meio vão	53
Figura 79 – Rotação da sobreposição junto dos apoios	54
Figura 80 – Deformação por flexão	54
Figura 81 – Vigas de carregamento	55
Figura 82 – Estrutura após a rotura.....	56
Figura 83 – Estrutura após a rotura (Vista alternativa).....	56
Figura 84 – Tipos de deformações à rotura	57
Figura 85 – Extensómetros a $\frac{1}{2}$ vão, Ensaio 1	63
Figura 86 – Extensómetros a $\frac{1}{4}$ vão, Ensaio 1	64
Figura 87 – Extensómetros a $\frac{1}{2}$ vão, Ensaio 2	68
Figura 88 – Extensómetros a $\frac{1}{4}$ vão, Ensaio 2	68

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Resumo testes de tração – Provetes Tipo I	59
Gráfico 2 – Resumo testes de tração – Provetes Tipo II.....	60
Gráfico 3 – Curva Força/Deslocamento Ensaio de conjunto 1	62
Gráfico 4 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a ½ vão, Ensaio 1	63
Gráfico 5 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a ¼ vão, Ensaio 1	64
Gráfico 6 – Curva Momento/Curvatura, Ensaio 1	65
Gráfico 7 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a ½ vão, Ensaio 1	66
Gráfico 8 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a ¼ vão, Ensaio 1	66
Gráfico 9 – Curva Força/Deslocamento Ensaio de conjunto 2	67
Gráfico 10 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a ½ vão, Ensaio 2	68
Gráfico 11 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a ¼ vão, Ensaio 2	68
Gráfico 12 – Curva Momento/Curvatura, Ensaio 2	69
Gráfico 13 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a ½ vão, Ensaio 2.....	70
Gráfico 14 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a ¼ vão, Ensaio 2.....	70

Anexos

Gráfico B.1 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 2	21
Gráfico B.2 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 3	21
Gráfico B.3 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 4	22
Gráfico B.4 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 5	22
Gráfico B.5 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 6	23
Gráfico B.6 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 7	23
Gráfico B.7 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 8	24
Gráfico B.8 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 9	24
Gráfico B.9 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 10	25
Gráfico B.10 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 12	25
Gráfico B.11 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 13	26
Gráfico B.12 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 14	26
Gráfico B.13 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 15	27

Gráfico B.14 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 16	27
Gráfico B.15 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 17	28
Gráfico B.16 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 18	28
Gráfico B.17 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 19	29
Gráfico B.18 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 20	29
Gráfico B.19 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 21	30
Gráfico B.20 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 23 (Tirante A).....	30
Gráfico B.21 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 24 (Tirante B).....	31
Gráfico B.22 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 1.....	31
Gráfico B.23 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 2.....	32
Gráfico B.24 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 3.....	32
Gráfico B.25 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 4.....	33
Gráfico B.26 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 5.....	33
Gráfico B.27 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 6.....	34
Gráfico B.28 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 7.....	34
Gráfico B.29 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 9.....	35
Gráfico B.30 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 10	35
Gráfico B.31 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 11	36
Gráfico B.32 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 12	36
Gráfico B.33 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 13	37
Gráfico B.34 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 14	37
Gráfico B.35 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 15	38
Gráfico B.36 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 16	38
Gráfico B.37 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 17	39
Gráfico B.38 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 18	39
Gráfico B.39 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 19	40
Gráfico B.40 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 20	40
Gráfico B.41 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 21	41
Gráfico B.42 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 22	41
Gráfico B.43 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 23 (Tirante A).....	42
Gráfico B.44 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensómetro 24 (Tirante B).....	42

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Elementos internos sujeitos a compressão [10].....	16
Tabela 2 - Elementos externos sujeitos a compressão [10].....	16
Tabela 3 - Propriedades geométricas e mecânicas do perfil BC900.....	29
Tabela 4 - Dimensões dos vários tipos de provetes para ensaio	31
Tabela 5 - Dimensões dos provetes a ensaiar	33
Tabela 6 - Comprimentos para ensaio	34
Tabela 7 – Composição betão C30/37	37
Tabela 8 – Tensões de cedência e rotura dos provetes tipo I e II.....	60
Tabela 9 – Módulos de elasticidade dos provetes tipo I e II	61

Simbologia

Siglas e Acrónimos

EC 3	Eurocódigo 3
EN	Norma Europeia
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria
ISO	Norma Europeia da Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
NP	Norma Portuguesa

Letras Gregas

χ	coeficiente de redução para a curva de dimensionamento (de colunas à encurvadura)
α	fator de imperfeição generalizado
γ_{M0}	coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
γ_{M1}	coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
ε	fator dependente de f_y
λ_1	valor da esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}$	esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}_e$	esbelteza do elemento da secção após redução de área
$\bar{\lambda}_{e_{\max}}$	esbelteza máxima do elemento da secção
$\bar{\lambda}_{e_0}$	esbelteza do elemento da secção em regime elástico
$\bar{\lambda}_p$	esbelteza da placa
ρ	fator de redução de área devido à encurvadura da placa

σ	desvio padrão
σ_1	maior valor de tensão no elemento da secção
σ_2	menor valor de tensão no elemento da secção
σ_{cr}	tensão crítica de instabilidade
$\sigma_{cr,Local}$	tensão crítica do modo local
$\sigma_{cr,Distorcional}$	tensão crítica do modo distorcional
$\sigma_{cr,Global/Distorcional}$	tensão crítica de interação do modo global com o modo distorcional
σ_{max}	tensão máxima aplicada na secção
ϕ	valor para determinar o coeficiente de redução χ
ψ	rácio de tensões no elemento da secção

Letras Latinas Maiúsculas

A_c	área sujeita a um esforço a axial de compressão
$A_{c,eff}$	área efetiva sujeita a um esforço a axial de compressão
A_{eff}	área efetiva
A_g	área bruta da secção
E	módulo de elasticidade
L_0	comprimento de controlo original
L_c	comprimento paralelo do espécime
L_{cr}	comprimento de encurvadura
L_t	comprimento total do espécime
M_{Ed}	valor de cálculo do momento fletor atuante
$M_{c,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente em relação a um eixo principal de uma secção transversal
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à encurvadura de um elemento comprimido
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão de uma secção transversal

N_{cr}	valor crítico do esforço normal para o modo de encurvadura elástica considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço axial atuante
$N_{t,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à tração de uma secção transversal
S_0	área da secção transversal original no comprimento paralelo
W_{eff}	módulo de flexão efetivo em relação a um eixo principal de uma secção transversal de uma secção transversal
W_{el}	módulo de flexão elástico de uma secção transversal
W_{pl}	módulo de flexão plástico de uma secção transversal

Letras Latinas Minúsculas

a_0	espessura original do espécime
b	largura de uma placa reforçada ou não reforçada
b_0	largura original do comprimento paralelo do espécime
b_{eff}	largura efetiva da placa
f_u	tensão última
f_y	tensão de cedência
f_{ya}	tensão de cedência média
f_{yb}	tensão de cedência nominal
i	raio de giração relativo ao eixo considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal bruta
i_{eff}	raio de giração relativo ao eixo considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal efetiva
I_{eff}	momento de inércia relativo ao eixo considerado, determinado com base nas propriedades da secção transversal efetiva
k	coeficiente dependente do tipo de fabrico da peça
k_σ	fator de encurvadura
n	número de dobras a 90° da secção transversal

t	espessura nominal da chapa antes de ser enformada
t_{red}	espessura reduzida
\bar{x}	média

1. Introdução

1.1 Enquadramento e Objetivos

Durante a segunda metade do século XIX verificou-se um grande incremento na utilização de estruturas metálicas. Atualmente a construção metálica é cada vez mais uma solução que permite ao sector da construção fazer a transição de uma indústria tradicional e artesanal para uma atividade industrializada, com os consequentes ganhos de competitividade e qualidade, implementando os princípios universalmente aceites de Construção Sustentável, como argumenta em seu livro Simões da Silva [1].

Com o passar do tempo, as exigências sobre as estruturas metálicas vão aumentando, cada vez se querem mais leves, tornando-as mais baratas e evitando o desperdício sem causar a perda das suas características estruturais mais importantes, a capacidade resistente e rigidez.

A necessidade da otimização estrutural levou ao desenvolvimento do chamado “aço leve”, obtido por meio do processo de enformação a frio de chapas de aço. Este tipo de elemento estrutural de elevada esbelteza, o aço enformado a frio, apresenta várias vantagens quando comparado ao tradicional aço laminado a quente, entre as quais podem ser citadas o seu baixo peso, as variadas formas geométricas que pode assumir, pré-fabricação em grande escala e ainda rapidez de montagem. Por outro lado, este tipo de elementos estruturais introduz novas dificuldades que necessitam de ser alvo de estudo para a melhor compreensão do comportamento do material em causa. Devido a serem perfis de reduzida espessura, estes tendem a sofrer fenómenos complexos de instabilidades de várias naturezas, que devem ser levados em conta no seu dimensionamento e verificação da segurança.

As chapas autoportantes foram desenvolvidas para cobrir médios e grandes vãos sem precisar de se recorrer a apoios intermédios. Assim, são fabricadas a partir de chapas finas de aço que são reforçadas através de dobras.

Tendo em conta os poucos estudos sobre o comportamento estrutural de chapas autoportantes de eixo curvo (o que contrasta com a suas vastas utilizações, principalmente em edifícios industriais) esta dissertação pretende dar início ao estudo experimental deste elemento estrutural. Os ensaios têm como objetivo uma caracterização pormenorizada da solução autoportante atualmente utilizada pela empresa Blocotelha - Steel Constructions, SA.

A análise da estrutura divide-se em três abordagens distintas: caracterização mecânica do material constituinte da chapa que dá origem às telhas; caracterização do comportamento da secção, através do estudo dos modos de instabilidade com ensaios de compressão axial em perfis de eixo reto; e por fim a análise de um conjunto de três telhas de eixo curvo com 12m de vão.

Em suma, pretende-se com estes três tipos de ensaios:

- (i) Obter as propriedades mecânicas do material que constitui a telha autoportante;
- (ii) Analisar estruturalmente o comportamento de troços retos de comprimentos distintos quando sujeitos a uma compressão axial para caracterizar os modos de instabilidade;
- (iii) Analisar o comportamento em conjunto das telhas para compreender os fenómenos que as levam à rotura com as cargas aplicadas no meio do seu vão e avaliar quantitativamente a capacidade resistente do conjunto.

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos que abordam todos os aspetos relevantes para a realização desta dissertação, sendo constituídos pela ordem e conteúdo descritos a seguir.

No **Capítulo 1** introduz-se a temática do aço enformado a frio ao mesmo tempo que é feita a conexão com a evolução das estruturas metálicas até à atualidade. São também apresentados os objetivos a que esta dissertação se propõe.

No **Capítulo 2**, são sumarizadas as publicações relevantes para se estabelecer o estado da arte sobre o estudo de elementos autoportantes enformados a frio. Descrevem-se de forma resumida os estudos que foram realizados sobre o comportamento estrutural de chapas autoportantes.

Na primeira parte do **Capítulo 3** descrevem-se as características dos elementos enformados a frio, nomeadamente, o material constituinte, as suas finalidades, vantagens e desvantagens. Incluem-se também exemplos de algumas das inúmeras geometrias de secções possíveis de serem fabricadas em “aço leve” e enumeram-se as normas relevantes da temática em causa. Num contexto mais científico, a segunda metade deste capítulo apresenta uma marcha de cálculo descrevendo como se processa o dimensionamento de uma secção enformada a frio, juntamente com outras informações pertinentes. Este capítulo termina com uma breve

descrição do processo de fabrico de chapas autoportantes dando ênfase ao tipo de secção em estudo.

No **Capítulo 4** é abordado pormenorizadamente o trabalho experimental realizado em laboratório ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Inicia-se com uma descrição da secção, nomeadamente, a sua utilização e respetivas propriedades mecânicas.

Seguidamente, estrutura-se a escrita do capítulo, dividindo-o em três subcapítulos, cada um respeitante a um tipo de ensaio. No primeiro subcapítulo apresentam-se os ensaios de tração realizados para obtenção das propriedades mecânicas do material. No segundo subcapítulo, abordam-se os ensaios de compressão de perfis de eixo reto de modo a caracterizar os modos de instabilidade da secção em estudo. Por último, no terceiro subcapítulo, descrevem-se os ensaios de grupo, desde a sua montagem, instrumentação e obtenção de dados até à sua realização.

No **Capítulo 5**, são apresentados os resultados obtidos resultantes dos três tipos de ensaios realizados em laboratório, sob a forma de tabelas e gráficos. É feita uma análise crítica aos resultados experimentais obtidos, de modo a permitir que o comportamento do material/da secção/da estrutura seja caracterizado.

Por fim o **Capítulo 6** apresenta as considerações finais obtidas a partir da análise dos resultados recolhidos, estabelecendo conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2. Revisão da literatura

Nota-se, na pesquisa da literatura especializada, uma carência de estudos experimentais sobre o comportamento estrutural de telhas autoportantes curvas. A generalidade dos trabalhos encontrados incidem sobre a análise teórica de perfis enformados a frio e alguns sobre análise experimental de telhas de aço autoportantes planas, não se encontrando na literatura qualquer trabalho experimental ou numérico abordando especificamente as telhas de aço autoportantes curvas.

2.1 Revisão bibliográfica

Os poucos trabalhos sobre telhas autoportantes, abordam perfis com secções de geometria trapezoidal de eixo reto.

Em 1975, Bergfelt *et al.* [2] elaboraram um estudo experimental sobre telhas autoportantes com secção trapezoidal submetidas à flexão abordando a influência da encurvadura local na resistência global.

Em 1992 deu-se início a um extenso programa de ensaios levados a cabo na Universidade de Sydney que se constituem numa referência fundamental sobre o conhecimento do comportamento estrutural de telhas autoportantes planas.

Bernard *et al.* [3] analisaram numericamente (pelo Método das Faixas Finitas) e experimentalmente chapas com secção trapezoidal com reforços intermédios em “V” no banzo comprimido com bordos apoiados e em consola sob flexão. Encontraram uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais. Os mesmos autores aplicaram uma metodologia semelhante para chapas trapezoidais planas com geometrias diferentes [4,5,6]. Num outro trabalho [7], compararam os testes realizados [3,4] com resultados obtidos pelas especificações do regulamento norte-americano [8] e europeu [9], concluindo que este último fornece resultados mais aproximados aos experimentais.

Os resultados experimentais realizados na Universidade de Sydney foram usados por Yu e LaBoube [10] para verificação das especificações dadas pela norma AISI [8] usando os aços australianos (AS 1397 e 650) e norte-americanos (ASTM A613-80), para os quais não havia trabalhos feitos. Para isto tiveram que caracterizar as propriedades mecânicas através de ensaios de amostras do aço norte-americano à tração.

Metodologias semelhantes de comparações de testes experimentais com as prescrições da norma norte-americana foram usadas por (i) Papazian et all. [10], que testaram perfis trapezoidais com três reforços intermédios do banzo superior da secção usando câmaras de vácuo para aplicar o carregamento distribuído e (ii) Landolfo e Mazzolani [11] que executaram 32 testes experimentais para 9 tipos de chapas trapezoidais, aplicando duas cargas concentradas a meio vão. Estes últimos autores também fizeram comparações com as regras do EC3 [9].

A partir do início do século XXI, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no Brasil, no âmbito do desenvolvimento de duas dissertações de mestrado, foram conduzidas campanhas de ensaios experimentais em chapas trapezoidais.

Fonseca [12] interessou-se por avaliar os diferentes tipos de ligação entre as telhas quando submetidas à flexão, utilizando uma prensa hidráulica para aplicação das cargas que conduziram as chapas ao colapso. Os resultados experimentais foram comparados com as prescrições da norma AISI e também com análises numéricas (método dos elementos finitos).

Mezzomo [13], em 2007, também ensaiou as telhas trapezoidais utilizando depósitos de água para aplicar um carregamento, analisando a influência dos vínculos laterais entre telhas na rigidez do conjunto. Utilizou os Métodos dos Elementos Finitos e Faixas Finitas para comparar as cargas críticas obtidas nos ensaios. Para comparar resultados da carga última usou o Método da Resistência Direta. Realizou ensaios de compressão e flexão em telhas com bordas livres, bordas apoiadas e bordas encastradas. Também realizou ensaios dinâmicos para determinação das frequências e modos de vibração naturais das chapas. Através de estudos de otimização de geometria com o uso de algoritmos genéticos chegou à proposta de modificação da telha comercial que ensaiou.

Biegus e Czepizac [14] apresentaram resultados de um trabalho experimental que envolveu a identificação de modos de rotura em 19 testes realizados. Compararam com 41 modelações numéricas feitas no programa comercial de elementos finitos Abaqus [15], obtendo boa correlação de resultados. Também estabeleceram comparações da relação entre momento e carga aplicada com especificações de várias normas nacionais (europa, norte-americana, polaca e alemã). Estes mesmos autores [16] aplicaram a mesma metodologia em 35 testes experimentais para analisar a secção da telha reforçada no apoio intermédio.

Em relação às telhas curvas, a bibliografia é muito mais escassa e não trata especificamente o tipo de telha objeto de estudo desta dissertação. Jorgenson e Chowdhury [17] aplicaram carregamentos a um terço do vão de 3,96 metros, continuamente na largura do conjunto de telhas (de uma a três) simplesmente apoiadas nas extremidades. Como não encontrou resistência última nos ensaios, apresenta um gráfico carga-deslocamento com uma projeção do seu valor. Utilizaram nos seus cálculos numéricos a norma norte-americana.

Na sua tese de doutoramento, Lecce [18] realizou 9 testes de telha autoportante trapezoidal de aço inox, quando sujeito a flexão pura através da rotação de ambos os apoios, relacionando o momento induzido com a rotação aplicada como mostra a Figura 1.

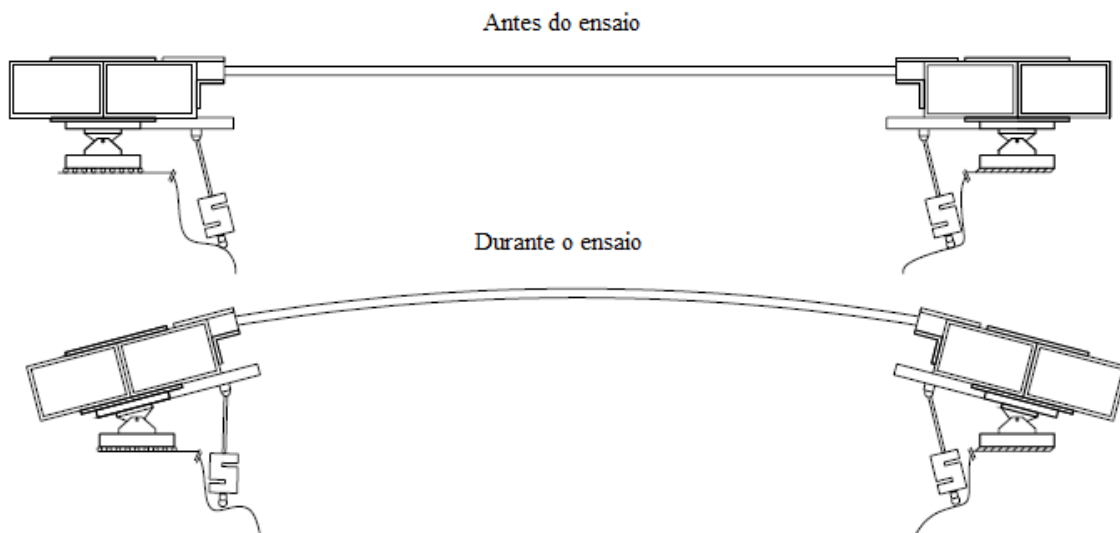


Figura 1 - Ensaio à flexão

Por fim examinaram as deformações obtidas por todos os transdutores de deslocamentos utilizados para cada ensaio, chegando à conclusão que todos os testes revelaram que a chapa atingiu um momento último maior que o momento elástico e que existe uma maior perda de rigidez numa secção com o banzo mais largo à compressão quando comparado a outra com o banzo maior à tração.

Caramelli *et al* [19], estudaram em 2001, através de um modelo de elementos finitos, o comportamento de um perfil autoportante plano à compressão de modo a planear, por meio dos resultados numéricos obtidos, os ensaios experimentais do mesmo perfil.

Inicialmente calcularam as reduções a fazer em cada um dos reforços intermédios ($\chi = t_{red}/t$) para os dois tipos de carregamentos para determinação das respectivas áreas efetivas numa secção com 8 mm de espessura em aço da classe St 355. Seguidamente foram calculados com

base na parte 1-3 do Eurocódigo 3 os valores da resistência à tração, compressão e flexão para várias espessuras e classes de aço.

A modelação numérica foi feita no software ADINA, analisando um elemento com 1 m de comprimento como mostra a Figura 2, com restrição total dos topos (sem deslocamentos e sem deformações para $Z=0$ e $Z=L$) e considerando um comportamento elasto-plástico bilinear do material.

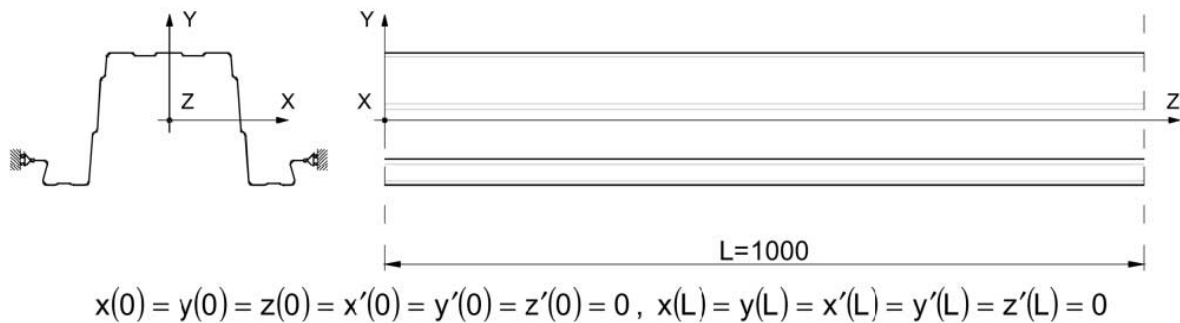


Figura 2 – Modelo numérico [19]

Após a modelação da secção, os resultados foram comparados com os obtidos analiticamente de acordo com a parte 1-3 do Eurocódigo 3, concluindo-se que a resistência do perfil foi totalmente mobilizada para as classes de aço St 235 e St 275, enquanto que para a classe St 355 a máxima carga aplicada não atingiu a carga resistente obtida através do Eurocódigo, como está demonstrado na Figura 3 retirada desta referência [19].

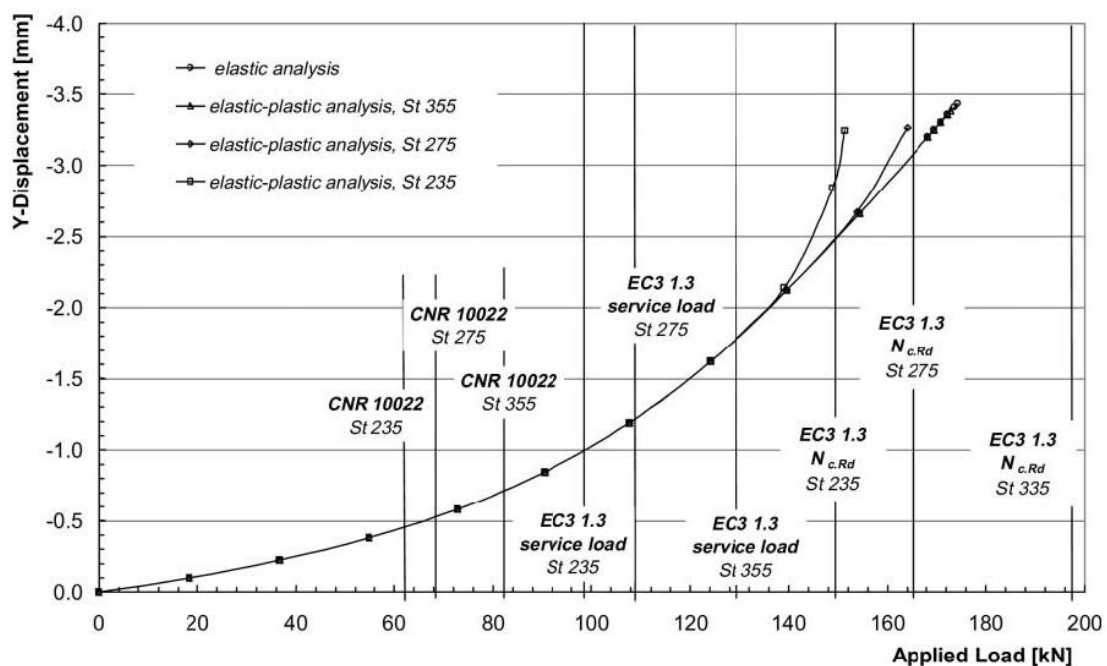


Figura 3 - Deslocamento lateral em função da carga aplicada; comparação entre os valores numéricos e os valores do Eurocódigo [19]

Os autores ensaiaram o mesmo perfil em três ensaios experimentais, um em compressão pura e dois em compressão combinada com flexão (Figura 4 - a), sendo um com compressão no banzo superior (Figura 4-b) e outro semelhante mas com compressão no banzo inferior (Figura 4-c). Foram registados os resultados de cargas de colapso para todos os ensaios realizados e comparados os valores teóricos e experimentais.

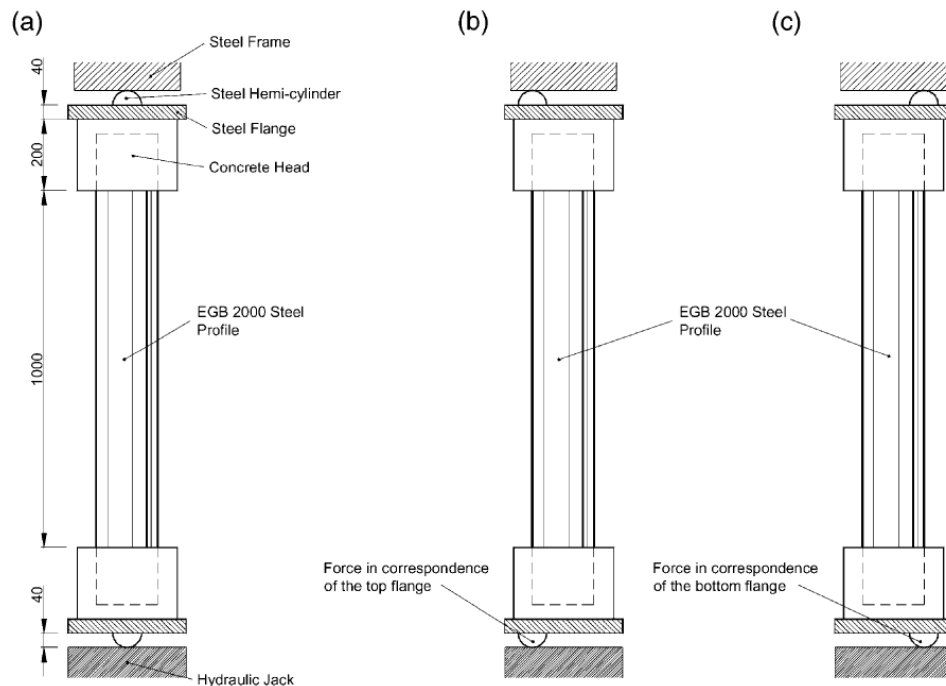


Figura 4 - Esquemas de aplicação de carga: a) Compressão, b) e c) Compressão combinada com flexão [19].

Concluíram que para o perfil analisado, o EC3, por prever apenas dois reforços, sobreavalia a capacidade resistente em relação aos resultados determinados numérica e experimentalmente, recomendando o desenvolvimento de novas abordagens que possam colmatar estas dificuldades.

Mezzomo [20], em 2004, abordou os vários tipos de encurvadura originados por compressão, analisou as larguras efetivas quando sujeito a compressão axial e ainda vários métodos teóricos. O seu trabalho consistiu na realização de vários ensaios à flexão com diferentes condições de apoio periféricas de uma telha plana em que a sua resistência foi obtida através de ensaios de tração. A aplicação da carga foi feita por intermédio de um recipiente a ser progressivamente cheio com água, sendo este centrado em faixas de 500 mm nos terços de vão.

No que diz respeito à modelação numérica do perfil, Mezzomo recorreu ao software ANSYS 8.0 para simular o comportamento de uma telha constituída por elementos de casca para proceder a análises não-lineares. Foram modeladas quatro configurações distintas da telha:

simplesmente apoiada; apoiada em todo o seu contorno; e carregamento mais centrado ou distribuído em toda a sua largura para cada uma das configurações anteriores.

Após a análise numérica do ensaio, o autor utilizou os resultados das cargas críticas das diversas configurações para comparar com os resultados experimentais e ainda com resultados calculados de acordo com a norma brasileira NBR 14762.

Por fim comparou os resultados do ensaio experimental e da modelação numérica, concluindo que a incorporação de plasticidade num modelo de Análise Não-Linear Físico Geométrica poderia traduzir-se numa ferramenta para comparação da carga de colapso obtida experimentalmente com a obtida pelo MEF e que consoante o tipo de apoio periférico, os valores de resistência experimentais eram significativamente superiores aos obtidos numericamente devido à simplificação feita das condições de apoio no software.

Em 2012, Castelani [21] estudou teoricamente o comportamento estrutural de perfis enformados a frio. Para isso recorreu a diversos métodos teóricos, nomeadamente o método dos elementos finitos, o método das faixas finitas e ainda o método das faixas finitas restringidas. Após isto procedeu à otimização estrutural do perfil e de seguida ao teste dos resultados obtidos através de diferentes casos teóricos concluindo que, a eficiência na redução da área transversal para perfis com reforços de borda, confrontados com os perfis sem reforços de topo, ficou evidenciada para três casos, e que para os perfis em U analisados e sem reforços de topo submetidos a flexão simples, estes constituíam o pior caso quando o momento atuava sobre o seu eixo de menor inércia.

3. Aço enformado a frio

O aço enformado a frio consiste em perfis/chapas de baixa espessura (de 0.4mm a 6.0mm) [22] obtidas através da dobragem a frio de um rolo de chapa obtendo assim a secção transversal desejada. Este pode ser dividido em dois grandes grupos: os perfis enformados a frio, utilizados para elementos resistentes numa estrutura tais como pilares, vigas, treliças, etc.; e as chapas enformadas a frio, utilizadas para revestimentos de edifícios industriais e para coberturas autoportantes curvas ou planas. Tanto os perfis como as chapas possuem as mesmas características mecânicas, diferindo apenas na aplicação.

Este tipo de elementos enformados a frio apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação aos laminados a quente.

Veríssimo enumera como vantagens [22]:

- Elevada eficiência estrutural, derivada do seu baixo peso e à sua elevada resistência mecânica;
- Melhor otimização do material utilizado, devido ao facto de poderem ser fabricados para suportarem cargas reduzidas, ao passo que, os laminados a quente ao terem geometrias padrão leva ao sobredimensionamento do elemento;
- Facilidade de fabrico, podendo ser produzidos economicamente inúmeros tipos de secção;
- Algumas secções são produzidas com vista ao seu encaixe umas nas outras, o que leva a uma redução no custo de armazenamento e transporte;
- Pré-fabricação em grande escala;
- Rapidez de montagem;
- Fácil manutenção;
- Inexistência de retração/fluência;
- Não são suscetíveis a ataques biológicos;
- Constituídos por materiais sustentáveis e inteiramente recicláveis.

Apresenta ainda como desvantagens [22]:

- Pode sofrer vários fenómenos de instabilidade, por serem secções de classe 4, que normalmente não se encontram em perfis laminados a quente;
- O cálculo da sua resistência é mais complexo que outro tipo de solução em aço.

3.1 Elementos enformados a frio

Os perfis enformados a frio são caracterizados pelas suas baixas espessuras aliadas às variadas formas geométricas, que a sua secção pode adotar. Estes podem ser constituídos por elementos sem reforços, como por exemplo as cantoneiras (Figura 5 – H), ou por elementos com reforços como por exemplo a secção em “Z” (Figura 5 – F).

Tendo em conta que a função principal deste tipo de elementos é suportar carga, a resistência estrutural e rigidez são as principais considerações a ter em projeto.

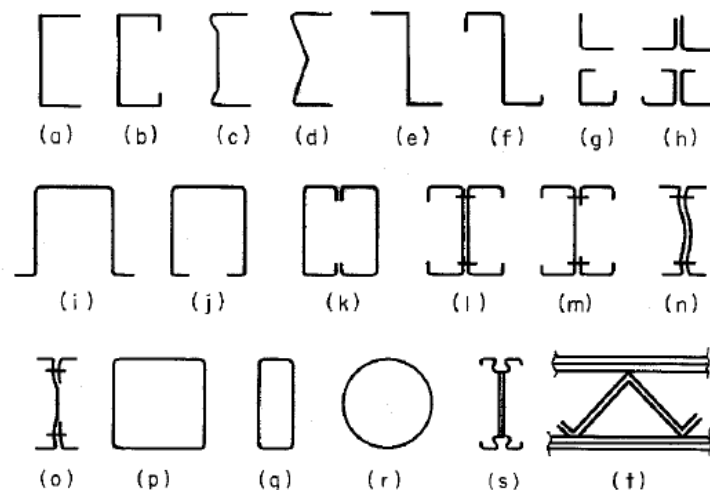


Figura 5 - Tipos de perfis enformados a frio [23]

As chapas enformadas a frio, são fabricadas da mesma maneira que os perfis, através da dobragem por rolos sucessivos até obter a secção desejada. Podem também adotar inúmeras configurações em termos de secção transversal (Figura 6), dependendo da finalidade a que se destinam.

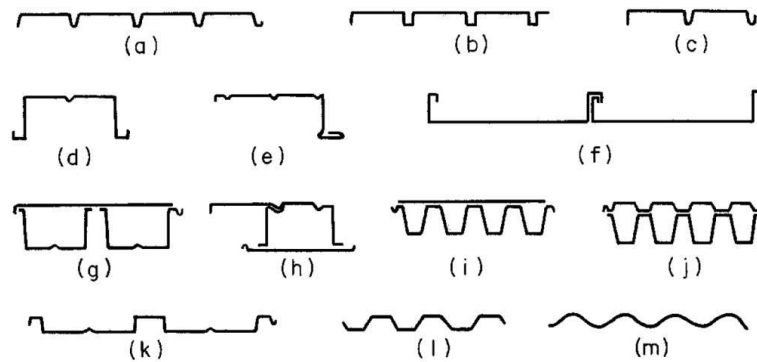


Figura 6 - Tipos de Secção de chapa enformada a frio [23]

3.2 Normas regulamentares

Na Europa temos três documentos que devem ser tidos em conta no projeto das estruturas de aço leve. De entre as normas aplicáveis ao problema em análise destacam-se o Eurocódigo 3, com três partes relevantes. A primeira parte NP EN 1993-1-1: Projeto de estruturas de aço – Parte 1-1 – Regras gerais e regras para edifícios, regulando o dimensionamento de estruturas metálicas em geral a nível europeu. Em 2010 este documento foi traduzido para português e obteve um anexo nacional.

As duas partes restantes não foram traduzidas devido à sua complexidade, não sendo a língua um obstáculo à sua compreensão. São elas o Eurocode 3 (EN 1993-1-3): Design of Steel Structures – Part 1-3. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, que normaliza o dimensionamento e verificação de segurança de secções enformadas a frio; e o Eurocode 3 (EN 1993-1-5): Design of Steel Structures – Part 1-5. Plated structural elements, que dá indicações sobre estruturas constituídas por placas e respetiva verificação de segurança.

Ainda existem normas de referência tais como a norma australiana AS/NZS 4600/2005 – Cold-formed steel structures e a norma brasileira, NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, baseada nas normas europeias e americanas.

3.3 Características mecânicas

Os elementos de paredes finas e enformados a frio, são elementos cuja esbelteza obriga a uma abordagem de cálculo um pouco mais complexa, visto exibirem comportamentos de instabilidade que não são observados na maioria das secções laminadas a quente.

3.3.1 Classificação de secções

A parte 1.1 do EC3 classifica as secções conforme os fenómenos de instabilidade local e/ou plasticidade serem preponderantes ou não na verificação da segurança. Esta classificação é feita para os elementos laminados a quente ou compostos (soldados) de chapas.

A classificação das secções transversais tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e a sua capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local.

Estas classes podem ser divididas em quatro grupos, sendo eles segundo o EC3 [10]:

- Classe 1 – Secção com capacidade de formação de rótula plástica e capacidade de rotação para uma análise plástica, sem redução da sua resistência.
- Classe 2 – Secção com capacidade para atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local.
- Classe 3 – Secção com capacidade para atingir a tensão de cedência na fibra extrema comprimida, quando calculada com base numa distribuição elástica de tensões, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido.
- Classe 4 – Secção em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

Visto os perfis enformados a frio possuírem geralmente espessuras reduzidas, leva a que as suas paredes possuam uma esbelteza bastante elevada, enquadrando-se assim na classe 4. As secções de classe 4 são caracterizadas pelo facto de os fenómenos de instabilidade local impedirem que se mobilize toda a capacidade elástica resistente da secção bruta, ou seja, o seu momento resistente é inferior ao limite elástico devido aos fenómenos de instabilidade. Como pode ser observado na

Figura 7, que ilustra a variação da relação entre o momento atuante (M) e o momento plástico resistente da secção (M_p) com a relação entre curvatura (k) pela curvatura plástica (k_p). Observa-se na figura que as secções classe 1 e 2 são condicionadas pela plastificação, a classe 3 pelo comportamento elástico, não desenvolvendo capacidade de resistência plástica e a secção classe 4 limitada pela ocorrência da encurvadura local. Posto isto, o EC3-1-1 preconiza que a avaliação da resistência das secções classe 4 seja efetuada com base numa secção efetiva reduzida, deduzindo as zonas da secção suscetíveis de instabilizar localmente [22] como mostra a Figura 8 com uma secção em C submetida a esforço axial de compressão. As

partes escurecidas da secção da secção efectiva representam regiões com baixa mobilização de tensões na pós-encurvadura, sendo desprezadas para efeitos de cálculo de resistência. Fica-se assim com um modelo de cálculo que considera apenas as partes claras da secções.

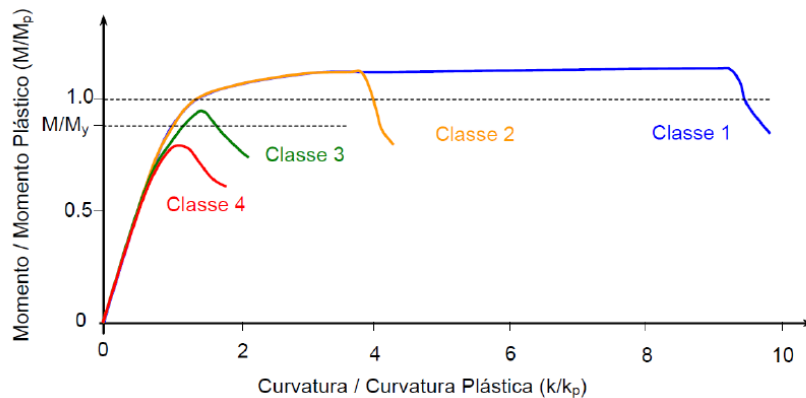


Figura 7 - Curvas Momento-Curvatura para cada tipo de secção [24]

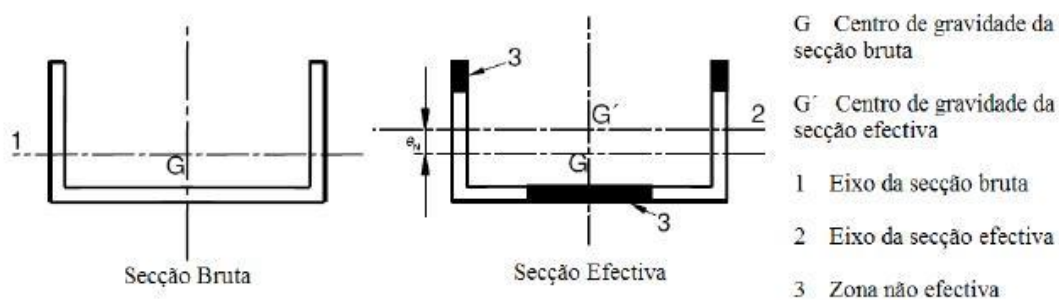


Figura 8 - Área efectiva de um perfil à compressão

3.3.2 Método das áreas efectivas

A secção de uma peça submetida a compressão ou flexão (secção de classe 4) nunca atingirá a tensão de cedência ($\sigma_{max} < f_y$), pois está condicionada pelo fenómeno de encurvadura local. O seu cálculo é feito recorrendo a uma secção efectiva submetida a tensões máximas uniformemente distribuídas sobre as suas partes efectivas. Para este modelo de cálculo, o Eurocódigo considera cada elemento (interno ou externo) constituinte de uma secção como se tratasse de uma placa isolada. A largura efectiva de cada placa depende da relação entre as tensões atuantes nas suas extremidades quer seja ela um elemento interno (troço de uma secção entre dobras ou reforços) ou externo (troço de uma secção com um bordo livre) como indicado na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Elementos internos sujeitos a compressão [25]

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}	
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$	
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$	
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$	
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Buckling factor k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	$\frac{AC_1}{AC_1} - 1 > \psi \geq -3 \frac{AC_1}{AC_1}$ 5,98 (1 - ψ) ²

Tabela 2 - Elementos externos sujeitos a compressão [25]

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}	
				$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho c$	
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$	
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$
Buckling factor k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
				$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho c$	
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$	
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Buckling factor k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Neste trabalho as imagens das partes 1.3 e 1.5 do EC3 são retiradas na sua forma original (na língua inglesa)

Posto isto, a área efetiva da zona de compressão de uma placa é obtida na parte 1.5 do EC3 através dos seguintes passos:

- Cálculo do rácio de tensões ψ ;
- Determinação do fator de encurvadura k_σ ;

- Cálculo do fator de redução devido à encurvadura da placa ρ ;
- Redução da área bruta:

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (3.1)$$

O fator de redução toma valores de:

a) Elementos internos comprimidos:

$$\rho = 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda} \leq 0,5 + \sqrt{0,058 - 0,055\psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (3.2)$$

b) Elementos externos comprimidos:

$$\rho = 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda} \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (3.3)$$

sendo:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.5)$$

em que b corresponde à largura do elemento, k_σ ao fator (coeficiente) de encurvadura (tensão crítica) de acordo com o rácio de tensões ψ (obtidos através da Tabela 1 e Tabela 2) e t a espessura.

3.3.3 Metodologia de cálculo

Após a determinação das suas áreas efetivas, para secções sem dupla simetria e/ou submetidas à flexão, torna-se necessário calcular o novo centro geométrico da secção devido à redução da

sua área para que se possa proceder ao cálculo das propriedades geométricas efetivas a serem utilizadas no cálculo dos esforços resistentes.

Durante o processo de fabrico das secções enformadas a frio, a chapa plastifica em determinadas zonas, nomeadamente nas dobras, alterando assim as suas propriedades mecânicas resultante do endurecimento sofrido. Este endurecimento diminui a ductilidade do elemento, porém confere à secção uma maior resistência que, segundo o Eurocódigo, pode ser considerada para o cálculo.

O Eurocódigo estabelece que o aumento da tensão de cedência em toda a secção pode ser contabilizado de acordo com a cláusula 3.2.2 da EN 1993-1-3 [9] através da seguinte expressão:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{knt^2}{A_g} \leq \frac{(f_u - f_{yb})}{2} \quad (3.6)$$

em que A_g é a área bruta da secção da peça, t é a espessura, k um coeficiente dependente do processo de fabrico da secção, tomando um valor de 7 no caso de serem usados rolos e um valor de 5 para outros tipos de perfilação e n o número de dobras a 90° que a secção possui.

Terminada a análise de placa constante na parte 1.5 no EC3 para a determinação das propriedades geométricas efetivas da secção, dá-se início ao dimensionamento segundo a parte 1.3.

No caso de um elemento estar sujeito a um esforço axial de tração, a resistência deste pode ser calculada tendo em conta o efeito de plastificação dos pontos da secção, utilizando a seguinte fórmula que considera a tensão de cedência média [9]:

$$N_{t,Rd} = \frac{f_{ya} A_g}{\gamma_{M0}} \quad (3.7)$$

em que A_g é a área bruta da secção, f_{ya} é a tensão de cedência média e γ_{M0} um coeficiente de redução da resistência das secções que toma um valor igual à unidade para qualquer tipo de secção.

Ao invés da tração, se um elemento estiver sujeito a compressão axial, a área a ser considerada para o cálculo da resistência da secção já não será a área bruta mas sim a área efetiva, calculada de acordo com a expressão (3.8) [9]:

$$N_{c,Rd} = \frac{f_{yb} A_{eff}}{\gamma_{M1}} \quad (3.8)$$

em que A_{eff} é a área efetiva da secção ($A_{eff} < A_g$), f_{yb} é a tensão de cedência nominal e γ_{M1} um coeficiente de redução da barra que toma em conta a sua resistência à encurvadura, adotando um valor igual à unidade pelo EC3.

No caso em que a área efetiva A_{eff} é igual à área da secção bruta, o cálculo deve ser efetuado utilizando a tensão de cedência de acordo com a seguinte expressão:

$$N_{c,Rd} = A_g (f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) \cdot 4 \cdot (1 - \bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0})) / \gamma_{M0} \leq A_g f_{ya} / \gamma_{M0} \quad (3.9)$$

Esta resistência da secção em elementos comprimidos deve ser comparada com a resistência à encurvadura por flexão do elemento (instabilidade global), verificando a seguinte condição [26]:

$$N_{Ed} < N_{b,Rd} \quad (3.10)$$

A resistência à encurvadura global por flexão do elemento é dada por:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.11)$$

em que o fator de redução que leva em consideração os efeitos das imperfeições iniciais e a da encurvadura é dado por:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (3.12)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_g}} \quad (3.13)$$

sendo:

$$\phi = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.14)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad (3.15)$$

em que α é um fator de imperfeição generalizado, N_{cr} é a carga crítica de Euler para o plano mais condicionante para a encurvadura, L_{cr} é o comprimento de encurvadura correspondente, i é o raio de giração da secção e $\lambda_1 = \sqrt{E/f_y} = 93,9\varepsilon$ sendo $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ com f_y em MPa.

Quando sujeita a flexão, o momento resistente da secção em torno do eixo principal deve ser calculado de acordo com a seguinte expressão [9]:

$$M_{c,Rd} = \frac{f_{yb} W_{eff}}{\gamma_{M0}} \quad (3.16)$$

em que W_{eff} é o módulo de flexão efetivo da secção.

Se o módulo de flexão efetivo for igual ao módulo de flexão elástico da secção bruta, a seguinte equação deve ser utilizada:

$$M_{c,Rd} = f_{yb} (W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \cdot 4 \cdot (1 - \bar{\lambda}_{e_{max}} / \bar{\lambda}_{e0})) / \gamma_{M0} \leq W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0} \quad (3.17)$$

em que:

$\bar{\lambda}_{e_{max}}$ corresponde à esbelteza normalizada do elemento, tomando o maior valor entre $\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}$

Para elementos internos $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ e $\bar{\lambda}_{e0} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi)}$, sendo ψ o rácio de tensões;

Para elementos externos $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ e $\bar{\lambda}_{e0} = 0,673$;

Para elementos reforçados $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ e $\bar{\lambda}_{e0} = 0,65$;

A equação (3.17) é aplicável apenas quando as seguintes condições são verificadas:

- O momento aplicado se dá apenas em torno de um eixo principal da secção;
- O elemento não está sujeito a torção, flexão-torção ou distorção;
- O ângulo ϕ entre a alma e o banzo é superior a 60°.

Se as condições acima referidas não forem aplicadas deverá ser utilizada a seguinte expressão:

$$M_{c,Rd} = W_{el} f_{ya} / \gamma_{M0} \quad (3.18)$$

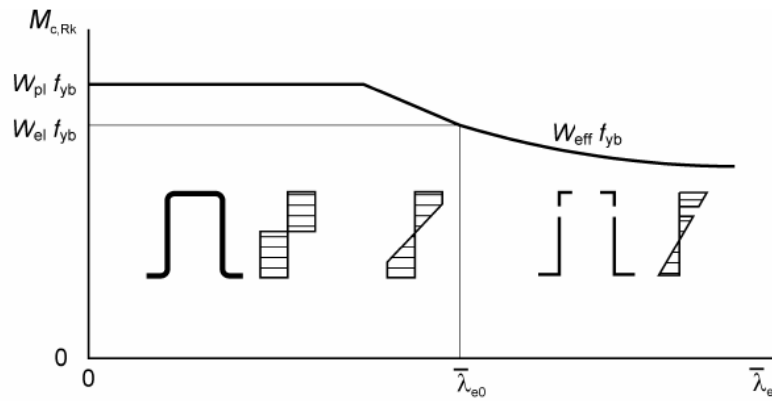


Figura 9 - Momento resistente em função da esbelteza da secção [9]

Sendo a telha autoportante fabricada a partir de uma chapa de baixa espessura através da dobragem a frio, esta enquadra-se no último grupo, as secções de classe 4, em que se devem ter em conta as larguras efetivas de modo a ter em consideração as reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local, visto que à medida que a esbelteza da secção aumenta, a sua área resistente vai diminuindo. Consequentemente esta redução da área efetiva acarreta uma diminuição do momento resistente da secção como ilustrado na Figura 9.

Visto que a secção em estudo possui uma elevada esbelteza, a análise da sua estabilidade estrutural tem de ter em consideração os vários modos de instabilidade característicos de secções enformadas a frio:

- Modo Local – neste modo não existem quaisquer deslocamentos dos bordos longitudinais internos do perfil sendo que a deformação da secção se deve maioritariamente à flexão transversal das paredes internas, comportando-se como uma placa. A instabilidade do elemento é induzida pela flexão da parede comprimida mais esbelta e consequentemente forçando as restantes paredes da secção a deformarem-se por compatibilidade de rotação em torno dos bordos longitudinais da peça como ilustra a Figura 10 a). O modo local ocorre para elementos com um reduzido comprimento visto que a carga crítica local é menor que a global (o comprimento crítico depende do número de semi-ondas locais que se formam) e também não chega a atingir a tensão de cedência devido à deformação local.

A deformação da secção pode ser reduzida com a adoção de reforços intermédios e de topo que irão diminuir o comprimento do elemento da secção e assim melhorar o seu

desempenho face aos esforços atuantes como está explícito nos gráficos da Figura 11.

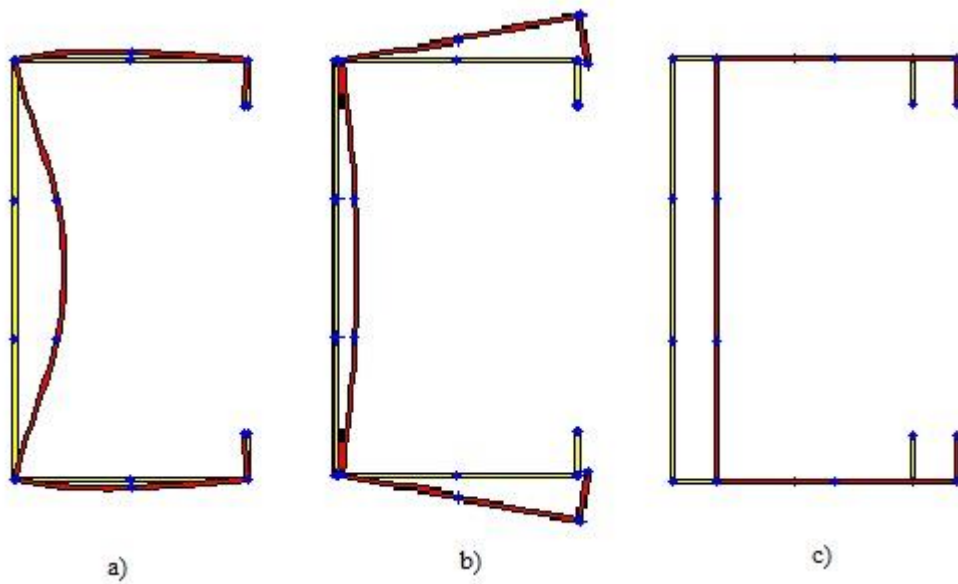


Figura 10 – Exemplos de modos de instabilidade à compressão: a) Local; b) Distorcional; c) Global

- Modo Distorcional – este modo caracteriza-se pelos movimentos de rotação de corpo rígido dos elementos que constituem a secção através da flexão de todas ou algumas paredes (Figura 10 b)). A abertura dos banzos pode ser atenuada com a aplicação de chapas a uni-los.
- Modo Global – o modo global não possui deformação das secções transversais no seu plano, apenas sofre deslocamentos e/ou rotação de corpo rígido em torno do seu eixo (Figura 10 c)). Pode ser contrariado com a adoção de travamentos nas barras.

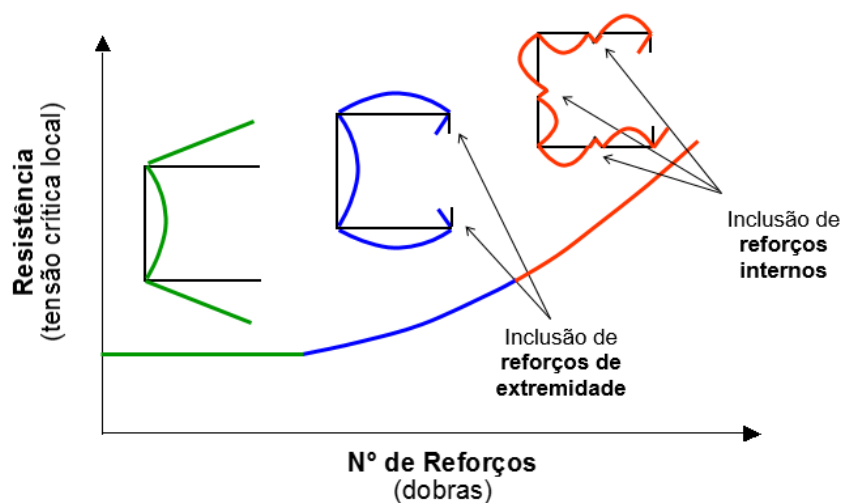


Figura 11 – Aumento da resistência em função do número de dobras
(Adaptado de curso de formação “Projeto de Estruturas em Aço Leve”; Autor: Nuno Silvestre)

Como se pode ver pela Figura 12, um perfil apresenta várias cargas críticas em função do seu comprimento. Apesar do modo local de placa possuir a menor carga crítica neste gráfico, isto não se verifica em todos os casos, podendo uma secção ser condicionada quer pelo modo distorcional quer pelo modo global ou por flexo torção.

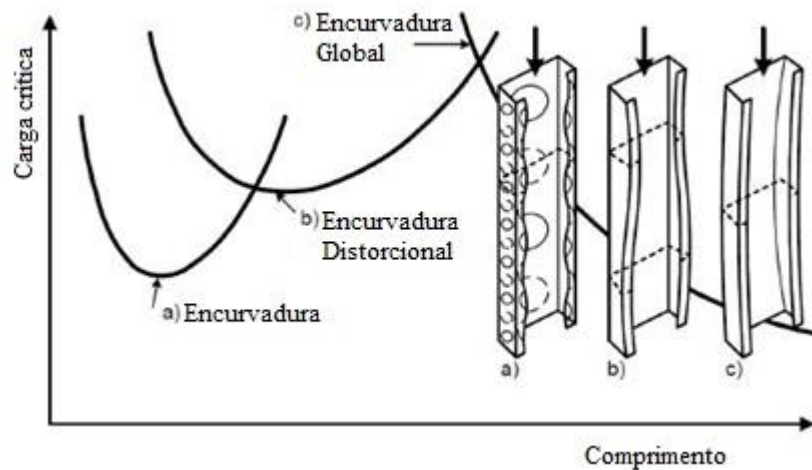


Figura 12 - Exemplos de cargas críticas para os vários modos de encurvadura em função do seu comprimento. As chapas enformadas a frio, tal como os perfis, exibem um comportamento qualitativamente semelhante (estável) quando carregadas mas, contrariamente às colunas que não estão condicionadas pela encurvadura local, possuem uma elevada reserva de resistência de pós-encurvadura, significativamente superior às colunas como indicam as curvas da Figura 13.

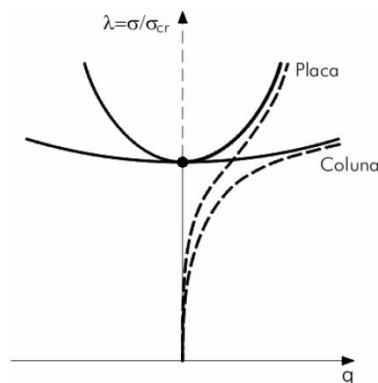


Figura 13 – Pós-encurvadura de coluna vs placa uniformemente comprimidas (linha a cheio – sistema ideal sem imperfeições iniciais; linha a tracejado – sistema real com imperfeições iniciais)

Devido às chapas serem constituídas por secções de classe 4, a secção bruta da peça é diminuída drasticamente por causa dos fenómenos de encurvadura local. Esta redução pode ser combatida por meio da adoção de reforços intermédios (Figura 15) e de topo (Figura 14) que aumentam a área efetiva da peça.

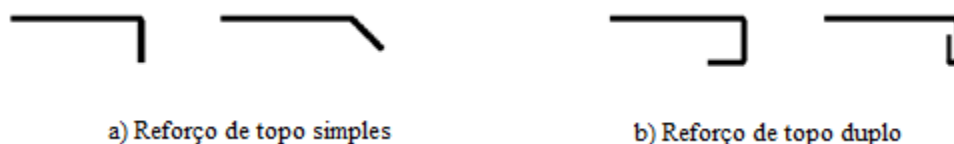


Figura 14 – Reforços de topo

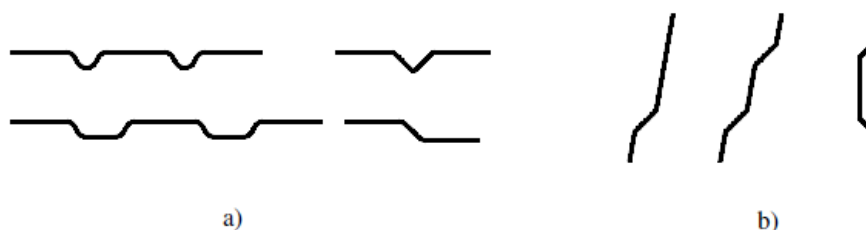


Figura 15 - Reforços intermédios: a) no banzo e b) na alma

Estes reforços intermédios e de topo têm uma grande influência no comportamento de uma secção, na medida em que permitem um aumento da área efetiva através de um aumento da rigidez localizado. Para o cálculo da sua influência, o EC3 preconiza um método complexo que não irá ser abordado nesta dissertação por não ser aplicável à secção em estudo. O EC3 prevê um limite de 2 reforços por troço através de dobras angulares enquanto a secção BC900 possui 5 reforços totalmente curvos no banzo superior.

3.4 Processo de fabrico

O processo de fabrico a frio caracteriza-se pela moldagem dos elementos no seu estado natural a partir de uma chapa de espessura uniforme. Para este tipo de fabrico existem vários métodos para obter o produto final, sendo os mais comuns a dobragem, a quinagem e através de rolos.

As telhas enformadas a frio são geralmente fabricadas através da passagem de chapa por uma sucessão de rolos (Figura 16) que vão conferindo à mesma a sua forma final por intermédio de dobragens sucessivas visto que este método permite fabricar secções bastante complexas com grandes comprimentos. Para o fabrico com rolos, normalmente são utilizados materiais pré-galvanizados para eliminar o problema da corrosão e pintados para conferir um aspeto agradável.

O número de rolos utilizados depende da espessura da chapa e da complexidade da secção a ser produzida. A velocidade do fabrico varia de 10m/min até 100m/min consoante a forma da secção, o material, o equipamento utilizado e a espessura da chapa. Este método permite ainda a execução de furos e entalhes durante o processo.

O processo de fabrico da telha autoportante BC900, objeto de estudo do presente trabalho, inicia-se pela colocação da bobine de chapa no suporte da perfiladora (Figura 17), seguido da colocação de um plástico para proteção do revestimento anticorrosivo que impede que este seja danificado durante o fabrico e transporte.

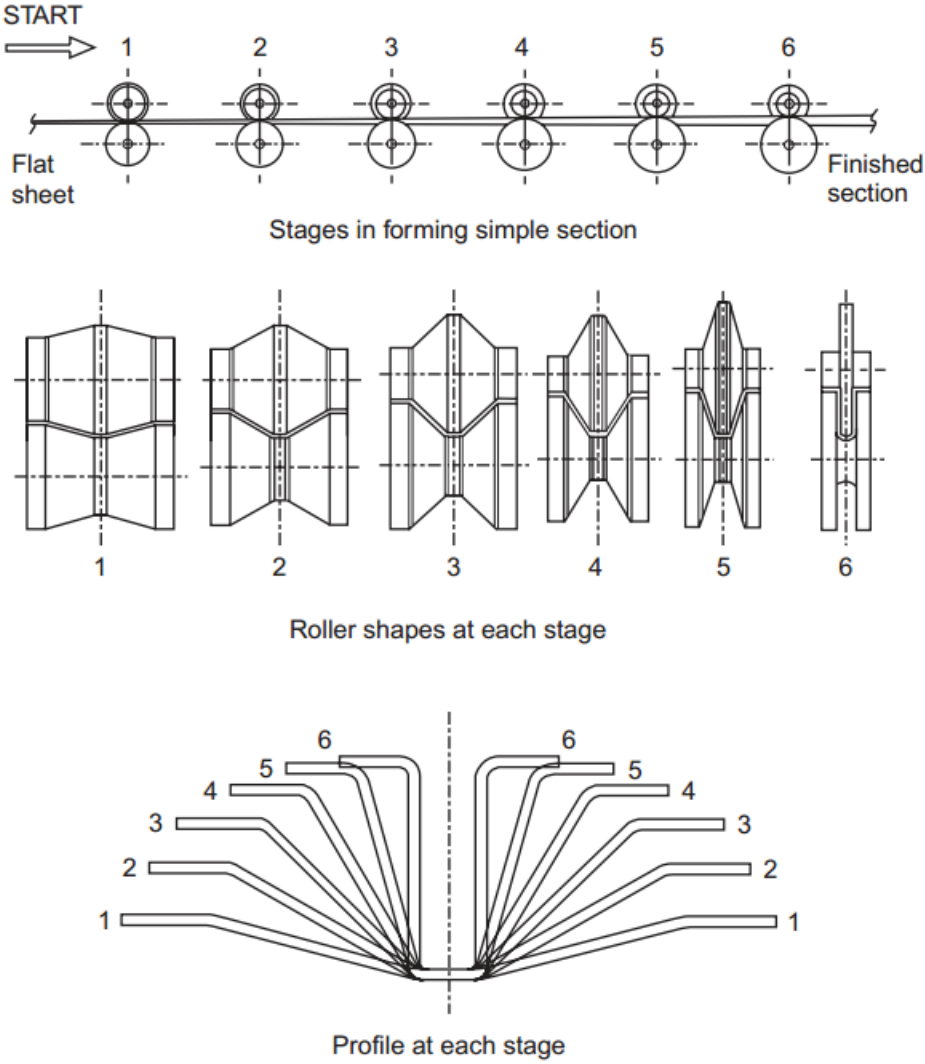


Figura 16 – Exemplo do processo de enformagem



Figura 17 - Bobina de chapa de aço

Ao atravessar a sucessão de rolos, vai sendo conferido ao perfil a sua forma final como se pode ver na Figura 18. Para que a telha possa ter um eixo curvo, é variada a inclinação da perfiladora para que, com o auxílio do peso próprio da telha, seja conferida a sua curvatura (Figura 19). Por fim são armazenadas prontas para transportar para a obra de destino.



1) Após a colocação da chapa, molda-se as ondas superiores; 2) A chapa começa a ganhar altura com a formação das almas; 3) As laterais são dobradas de modo a formar os encaixes; 4) A curvatura é conferida enquanto a telha sai da máquina;

Figura 18 - Etapas de Enformagem

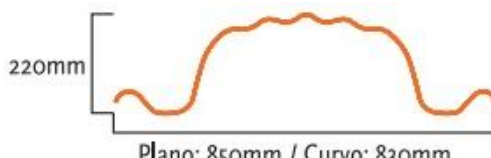


Figura 19 - Curvatura devida ao peso próprio

4. Ensaaios experimentais

A componente laboratorial desta dissertação incide sobre um perfil fabricado pela empresa “Blocotelha”, denominado de BC 900 e mostrado na Figura 20. Este perfil destaca-se dos demais devido à forma (Ómega) da sua secção transversal e à capacidade de cobrir grandes vãos, até 30 metros. As suas propriedades geométricas e mecânicas estão representados na Tabela 3:

Tabela 3 - Propriedades geométricas e mecânicas do perfil BC900



Espessura [mm]	Peso [kg/m ²]	i_{eff} [cm]	A_{eff} [cm ²]	I_{eff} [cm ⁴]	W_{eff} [cm ³]	M_{Rd} [kNm/m]	N_{Rd} [kN/m]
1,25	14,43	6,48	18,00	755,00	83,93	20,98	450,00
1,50	17,32	6,39	22,00	899,00	99,89	24,97	550,00

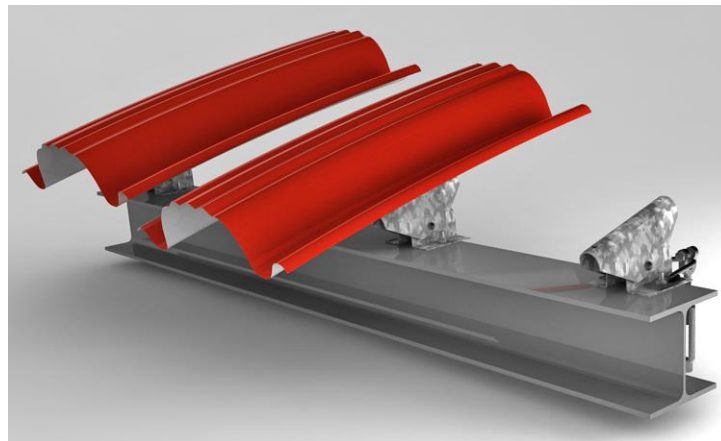


Figura 20 - Perfil BC900 sobre os apoios comerciais

Esta componente divide-se em três partes a realizar no Laboratório de Estruturas e Betão Armado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, sendo a primeira um estudo das propriedades do material submetendo-o a 20 ensaios de tração com vista à obtenção da tensão de cedência, tensão última, módulo de elasticidade e o gráfico tensão-extensão.

Seguidamente foram ensaiados 6 elementos rectos com dimensões pré-definidas à compressão pura, com o objetivo de avaliar o comportamento da secção face aos vários modos de instabilidade.

Por fim foram montados 2 conjuntos formados por três telhas autoportantes curvas BC900 cada, nos seus apoios comerciais e ensaiados com aplicação de uma carga distribuída em toda a largura do conjunto, a meio vão, e com um metro de extensão longitudinal com recurso a sacos de areia fabricados com total respeito pela configuração da secção em causa.

4.1 Ensaio de tração

Os testes de resistência à tração da chapa que dá origem ao perfil BC900 tiveram como base as indicações presentes na norma ISO 6892-1:2009 “Metallic Materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature” [27]. Estes testes consistiram em tracionar um espécime para a determinação de uma ou mais propriedades mecânicas definidas na classe 3 da mesma norma. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente entre 10°C e 35°C no Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

4.1.1 Indicações normativas

Estão definidos três tipos de provetes com diferentes dimensões – tipo I, tipo II e tipo III. Mas como um espécime do tipo III possui rácios L_0/b_0 e L_c/b_0 (ver pormenores na Figura 21) muito inferiores aos outros dois, as propriedades resultantes do ensaio seriam diferentes dos outros dois, em especial a extensão após rotura. Deste modo excluiu-se este tipo do ensaio visto a dimensão da chapa para corte ser limitada. Os provetes para ensaio foram produzidos através de corte por laser da chapa por perfilar com 1,25mm de espessura.

Para a definição das dimensões dos provetes (apresentadas na Tabela 4) a norma enumera algumas condições que necessitam de ser verificadas para um elemento tipo chapa presente no anexo B, sendo elas:

- Respeitante à forma
 - A largura das extremidades deve ser mais larga que a do comprimento paralelo L_c ;
 - O comprimento paralelo L_c deve ligar-se às extremidades através de uma curva de transição com um raio de pelo menos 20 mm;
 - A largura das extremidades deve ser superior a $1,2b_0$;
- Respeitante às dimensões:
 - O comprimento paralelo L_c não deve ser inferior a $L_0 + b_0/2$;

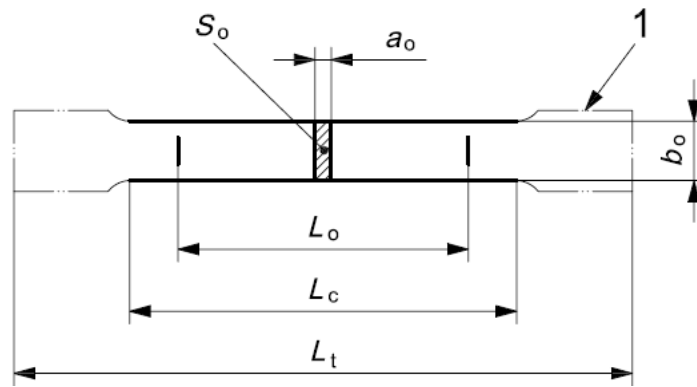


Figura 21 - Esquema provete para ensaio [27]

sendo:

- a_0 espessura original do provete
- b_0 largura original do comprimento paralelo do provete
- L_c comprimento paralelo do provete
- L_0 comprimento de controlo original
- L_t comprimento total do provete
- S_0 área da secção transversal original no comprimento paralelo
- 1 zona de amarração

Tabela 4 - Dimensões dos vários tipos de provetes para ensaio

Dimensões dos provetes para ensaio [mm]				
Tipo	b_0	L_0	L_c	
	Largura paralela original	Comprimento de controlo original	Mínimo	Recomendado
I	$12,5 \pm 1$	45^a	57	75
II	20 ± 1	55^a	90	120

^a Baseado na relação entre a área do espécime S_0 e um coeficiente de proporcionalidade k

$$(L_0 = k\sqrt{S_0} \text{ com } k = 11,3 \text{ e } a_0 = 1,25\text{mm})$$

4.1.2 Método de ensaio

Para a realização do ensaio de tração cortou-se a partir de uma chapa plana 20 provetes, 10 do tipo I (Figura 22) e outros 10 do tipo II (Figura 23), através de uma máquina de corte a laser devido à sua precisão e rapidez de corte. Posteriormente foi necessário retirar algumas marcas do corte com recurso a um esmeril para que os provetes não escorregassem durante a realização do ensaio.

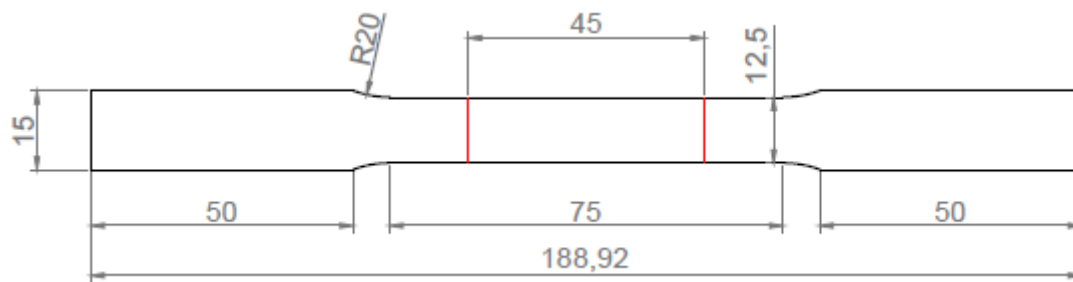


Figura 22 - Dimensões provete Tipo I [mm]

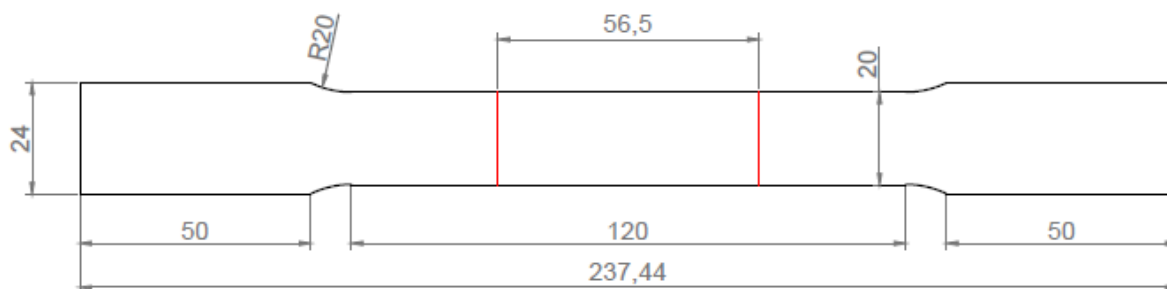


Figura 23 - Dimensões provete Tipo II [mm]

A norma ISO 6892-1:2009 [27] preconiza um procedimento tipo para este ensaio, sendo ele:

1. Identificação dos provetes (Figura 24);
2. Determinação da área da secção transversal através da medição da largura em três pontos do comprimento paralelo do espécime (Tabela 5);
3. Marcação do comprimento de controlo (Figura 24):
 - Tipo I – $L_0 = 45\text{mm}$
 - Tipo II – $L_0 = 55\text{mm}$
4. Fixação do provete nas amarras alinhado verticalmente (Figura 25);
5. Aplicar uma velocidade de ensaio correspondente a:
 - Tipo I: $0,675\text{ mm/min}$
 - Tipo II: $0,8475\text{ mm/min}$
6. Recolha e análise dos resultados.

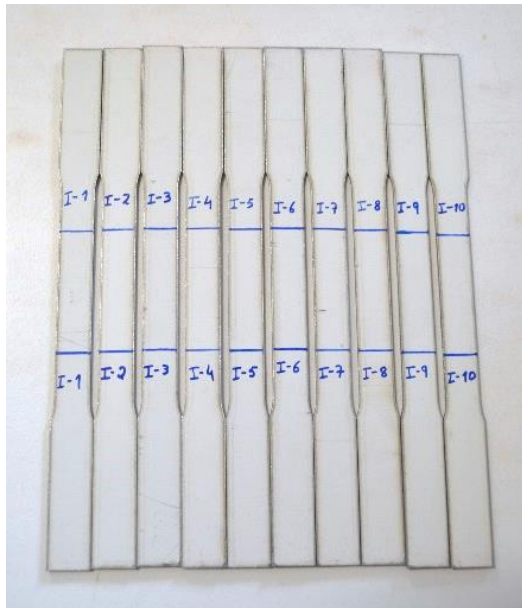


Figura 24 - Marcação e identificação dos provetes



Figura 25 - Fixação dos provetes

Tabela 5 - Dimensões dos provetes a ensaiar

Dimensões dos provetes em chapa (mm)

Provete	Largura média	Espessura	Área	Comprimento de controlo
<i>I-1</i>	12,57	1,25	15,71	44,70
<i>I-2</i>	12,47	1,25	15,59	45,00
<i>I-3</i>	12,52	1,25	15,65	44,70
<i>I-4</i>	12,43	1,25	15,54	44,80
<i>I-5</i>	12,50	1,25	15,63	44,85
<i>I-6</i>	12,47	1,25	15,59	44,85
<i>I-7</i>	12,47	1,25	15,59	44,85
<i>I-8</i>	12,45	1,25	15,56	44,75
<i>I-9</i>	12,47	1,25	15,59	44,50
<i>I-10</i>	12,45	1,25	15,56	44,70
<i>II-1</i>	19,90	1,25	24,88	56,60
<i>II-2</i>	19,93	1,25	24,91	56,65
<i>II-3</i>	19,83	1,25	24,79	56,40
<i>II-4</i>	19,75	1,25	24,69	56,65
<i>II-5</i>	19,87	1,25	24,84	56,45
<i>II-6</i>	19,88	1,25	24,85	56,50
<i>II-7</i>	19,82	1,25	24,78	56,60
<i>II-8</i>	19,88	1,25	24,85	56,45
<i>II-9</i>	19,77	1,25	24,71	56,60
<i>II-10</i>	19,85	1,25	24,81	56,90

Nome do espécime: X-Y, “X” corresponde ao tipo e “Y” corresponde ao número do provete

Para a obtenção do módulo de elasticidade do material ensaiou-se 6 provetes adicionais, 3 de cada tipo, com o auxílio de um extensómetro ligado à máquina de tração como ilustra a Figura 26.

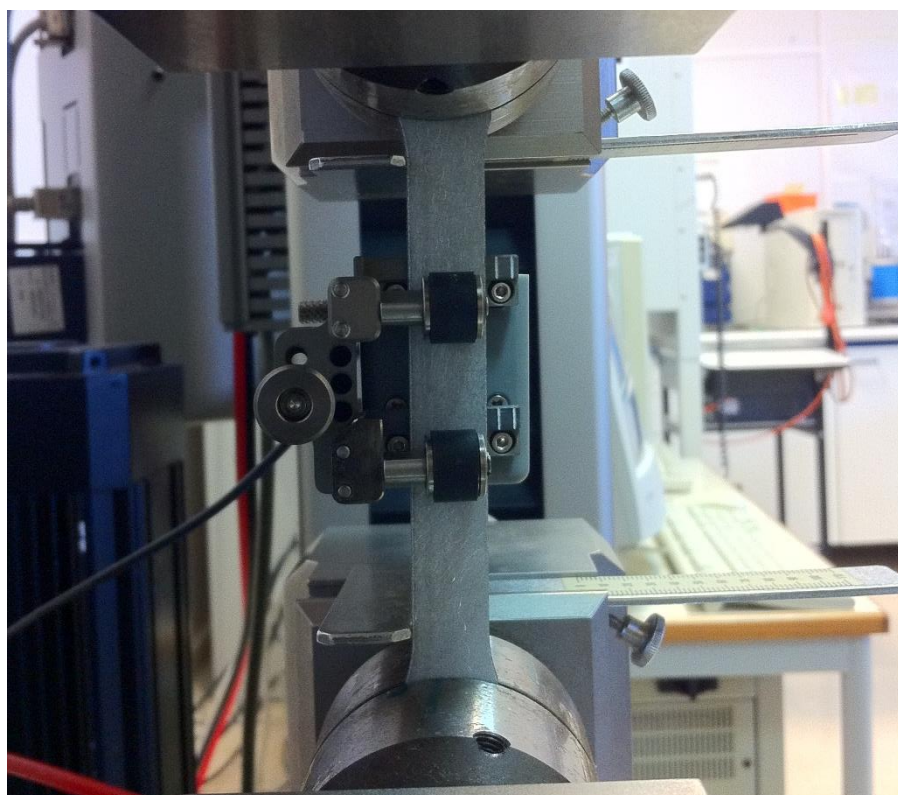


Figura 26 – Ensaio de tração com extensómetro

4.2 Ensaio de compressão de perfis de eixo reto

Com o ensaio dos elementos lineares pretendeu-se testar três comprimentos previamente definidos de modo a obter uma instabilidade local, distorcional e por último uma instabilidade por flexão-torção. Conforme o gráfico presente na Figura 27 retirado da bibliografia [28], conclui-se que os comprimentos a ensaiar para uma chapa de 1.25mm de espessura são os enumerados na Tabela 6.

Tabela 6 - Comprimentos para ensaio

Modo de instabilidade	Comprimento Livre	σ_{cr}
Local	100mm	$\sigma_{cr,local} = 233,97MPa$
Distorcional	2350mm	$\sigma_{cr,distorcional} = 155,57MPa$
Interação Global/Distorcional	4200mm	$\sigma_{cr,global/distorcional} = 154,84MPa$

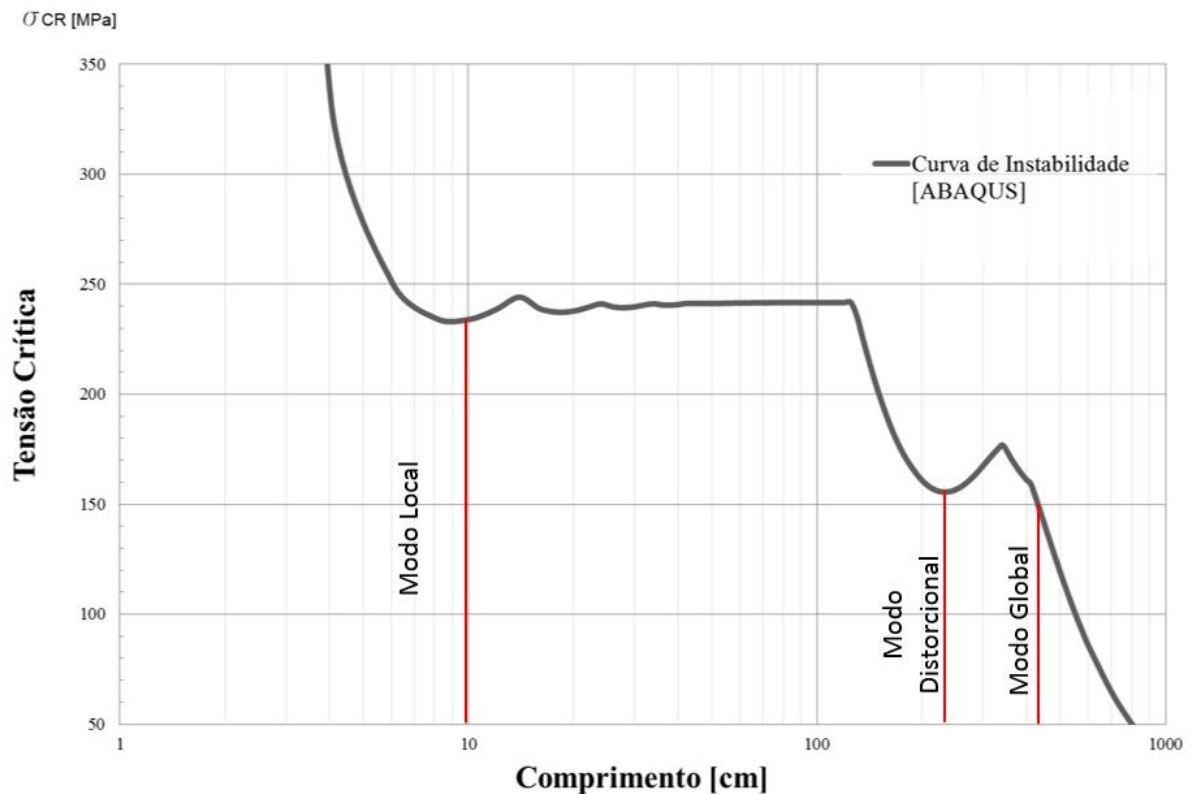


Figura 27 - Tensão crítica vs. Comprimento de semi-onda do perfil BC900 [28]

Teve-se por objetivo ensaiar dois perfis retos para cada comprimento, como os mostrados na Figura 28 (1 – 4200mm, 2 – 2350mm, 3 – 100mm). Na Figura 29, pode-se observar um encastramento de 150mm de comprimento num bloco de betão com dimensões de 1000x300x200mm, com o objetivo de impedir os deslocamentos nos topos do elemento.

Estes troços iriam sofrer a ação de um esforço axial de compressão puro, com o auxílio de dois cilindros de aço alinhados com o centro de gravidade da secção. Os blocos de betão foram fabricados com recurso a cofragens de madeira, tendo sido o seu interior forrado com placas de Wallmate de 30mm de espessura de modo a obter uma superfície lisa para carregamento.

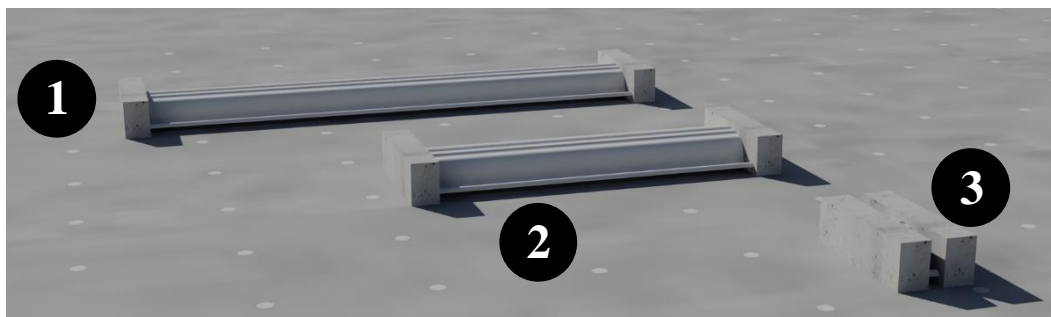


Figura 28 - Modelação dos troços retos, perspectiva

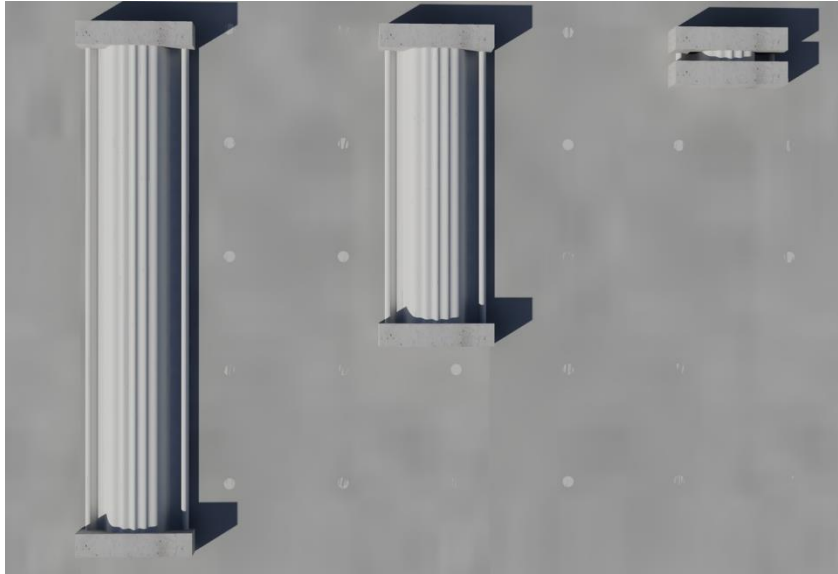


Figura 29 - Modelação dos troços retos, planta

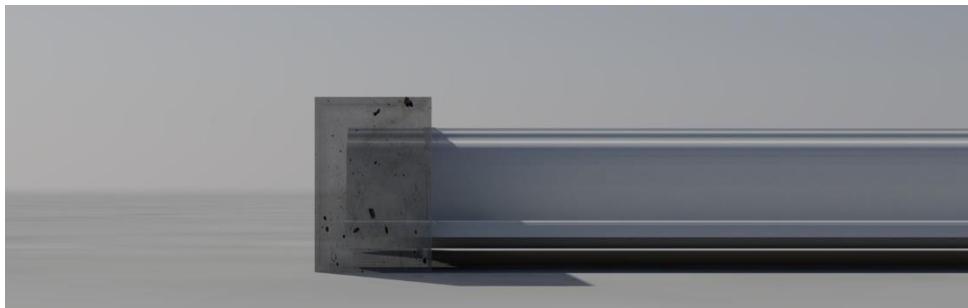


Figura 30 - Pormenor do encastramento

4.2.1 Preparação dos elementos para ensaio

Para o fabrico dos blocos em betão começou-se por produzir cofragens exteriores em madeira com dimensões tais que, com o revestimento interior colocado, pudessem acomodar um bloco com as dimensões previstas inicialmente. Foram construídas apenas 6 cofragens semelhantes às da Figura 31 com vista à economia de material tendo em conta que estas seriam reaproveitadas.

Durante o período de armazenamento a secção alterou parte da sua forma original. Deste modo surgiu a necessidade de corrigir esta deformação com recurso a varões roscados perpendiculares à cofragem, representados na Figura 32, afastados entre si de 770 mm, que permitiram não só colocar a secção com a sua forma original como também possibilita o ajuste manual da inclinação da telha para ser assegurada a correta posição dentro do bloco de betão.

Depois de todas as cofragens furadas e de aplicado o descofrante foram montadas as 3 primeiras telhas nas cofragens para que se pudesse completar a frente da mesma com uma placa de wallmate recortada com a forma aproximada da telha como ilustrado na Figura 33.



Figura 31 – Cofragem exterior em madeira



Figura 32 – Varões roscados para alinhamento da telha



Figura 33 – Placa de cofragem personalizada frontal

Apesar das placas frontais terem sido cortadas de acordo com a respetiva telha não conseguíram isolar totalmente a frente da cofragem, tendo sido os espaços preenchidos com espuma de poliuretano como está mostrado na Figura 34 e Figura 35 que foi usada por ter propriedades expansivas, permitindo assim preencher as aberturas restantes, e por ser uma solução económica, fácil e rápida de aplicar.

Posteriormente deu-se início à betonagem dos topos das telhas da forma como se observa na Figura 36 com um betão C30/37 fabricado no laboratório de acordo com uma composição previamente estabelecida e mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição betão C30/37

Constituintes		Volume de betão:	
		1,00 m ³	0,05 m ³
<i>Cimento</i>	II -B/L 32,5 Maceira	360 kg	18,00 kg
<i>Adjuvante</i>	VISCOCRETE 20 HE	2,0 litros	0,108 kg
<i>Agreg.1</i>	Brita	972 kg	48,61 kg
<i>Agreg.2</i>	Areia	861 kg	43,03 kg
<i>Água</i>	-	160 litros	8,00 litros



Figura 34 – Aplicação de espuma de poliuretano nas aberturas



Figura 35 – Cofragem finalizada



Figura 36 – Betonagem dos topos

Por último, após todas as cofragens estarem cheias, colocou-se um varão de aço encastrado em cada ponta para permitir que o conjunto pudesse ser movimentado sem causar qualquer tipo de dano à telha como a Figura 37 demonstra:



Figura 37 – Varão para suspensão do elemento

4.2.2 Instrumentação e obtenção de dados

Com vista à recolha de informação que permitisse caracterizar o comportamento da secção à compressão, foram idealizadas várias configurações de distribuição de extensómetros e defletómetros como ilustrado na Figura 38 e Figura 39. Os extensómetros e defletómetros foram localizados em regiões da secção onde eram previstos as deformações que melhor caracterizam cada um dos modos de instabilidade.

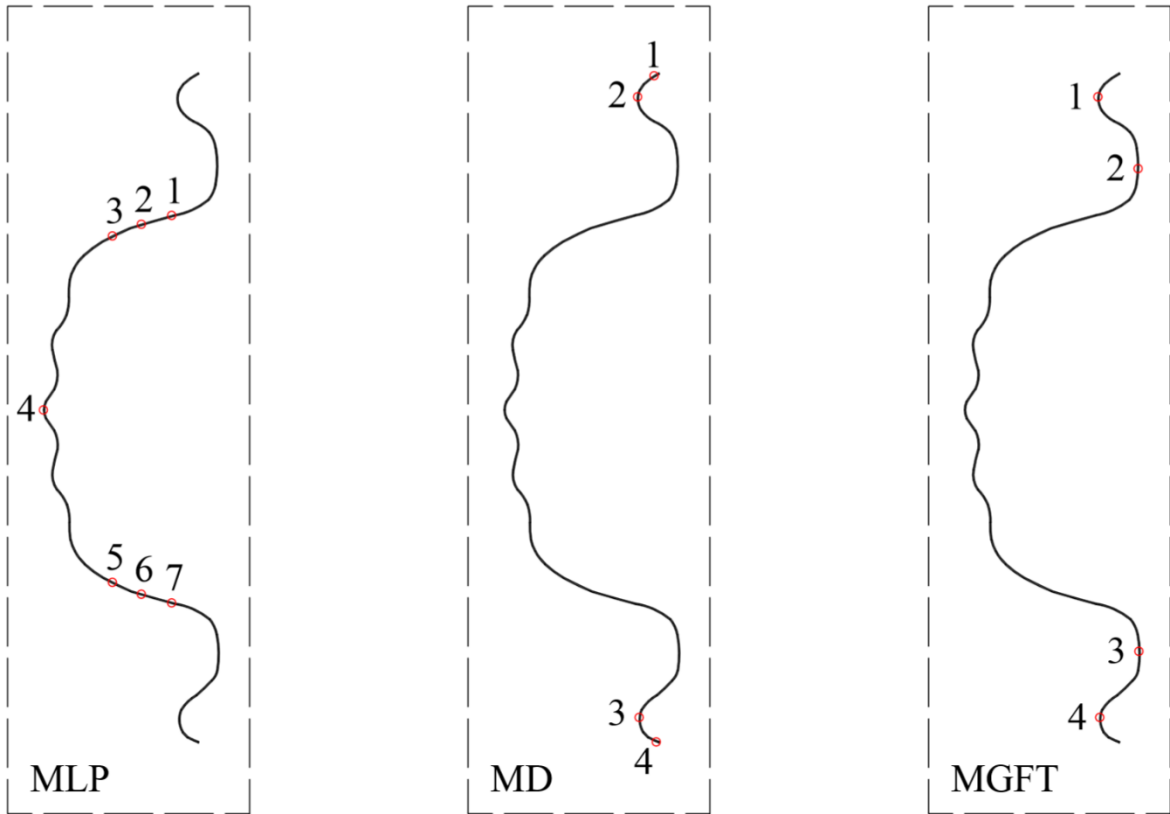


Figura 38 – Localização dos extensómetros para cada um dos modos de instabilidade (MLP – Modo Local de Placa, MD – Modo Distorcional, MGFT – Modo Global Flexão Torção)

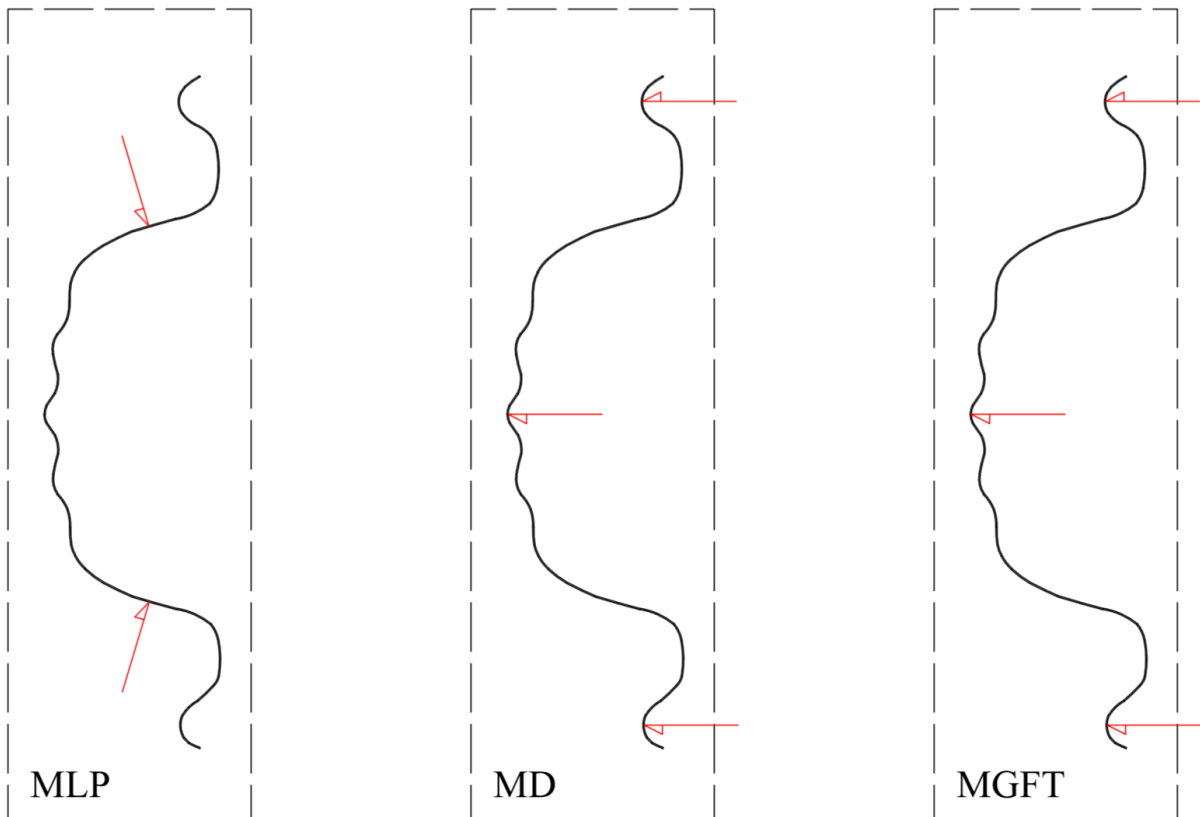


Figura 39 – Localização e direção dos defletómetros para cada um dos modos de instabilidade (MLP – Modo Local de Placa, MD – Modo Distorcional, MGFT – Modo Global Flexão Torção)

4.2.3 Realização dos ensaios de compressão

Após fabrico e instrumentação concluídos, deu-se início à montagem do esquema de ensaio com a colocação do atuador na parede de carregamento, devido à altura do pórtico ser inferior ao comprimento das telhas, e o bloco de reação conforme ilustração na Figura 40 e Figura 41.



Figura 40 – Colocação do atuador na parede de carregamento



Figura 41 – Colocação do bloco de reação

De seguida tracionaram-se os varões de pré-esforço que prendiam o bloco à laje com recurso a um macaco hidráulico oco “Larzep” e a uma bomba hidráulica manual “Enerpac”. Posteriormente fixou-se o bloco de reação à parede de carregamento com dois perfis tubulares e quatro varões de pré-esforço, para que todos os possíveis deslizamentos do conjunto de reação fossem impedidos.

Acabada a montagem do sistema de ensaio deu-se início ao teste de uma das telhas intermédias cujo modo distorcional é crítico, com uma velocidade de 0.025 mm/s. No momento em que a carga atingiu os 140,575 kN o bloco de betão, onde a carga estava aplicada, rompeu por punção, como se nota na Figura 42, inviabilizando assim este tipo de ensaio, visto que a carga crítica para qualquer um dos modos de instabilidade ser bastante superior ao que os blocos de betão conseguem resistir.



Figura 42 – Rotura do bloco de betão por punção

Este fenómeno não foi previsto na fase de planeamento e, apesar de se ter formulado um método alternativo de ensaio, devido à falta de tempo e recursos disponíveis não foi possível uma nova concretização deste ensaio. Denota-se ainda que este ensaio seria complementar na

realização desta dissertação visando apenas ilustrar o comportamento das secções relativamente à instabilidade local e distorcional.

O acontecido demonstrou a grande resistência axial que este tipo de secção com uma elevada quantidade de dobras possui face às convencionais, sendo possível a consulta da modelação numérica desta secção na bibliografia [28].

4.3 Ensaio de conjunto de telhas autoportantes

As telhas foram instaladas nos apoios correntes, que a empresa utiliza em obras e, que impedem o deslocamento quer na horizontal quer na vertical, permitindo a rotação segundo o eixo horizontal. Estes apoios foram instalados sobre perfis metálicos de modo a formar uma base estável para a realização dos ensaios experimentais no Laboratório de Estruturas e Betão Armado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Na Figura 44 e Figura 45 estão mostrados os modelos do esquema de ensaios. A carga foi aplicada por meio de um atuador com capacidade de 1000 kN e célula de carga, com recurso a um perfil metálico e sacos de areia para distribuir a carga como mostra a Figura 43.

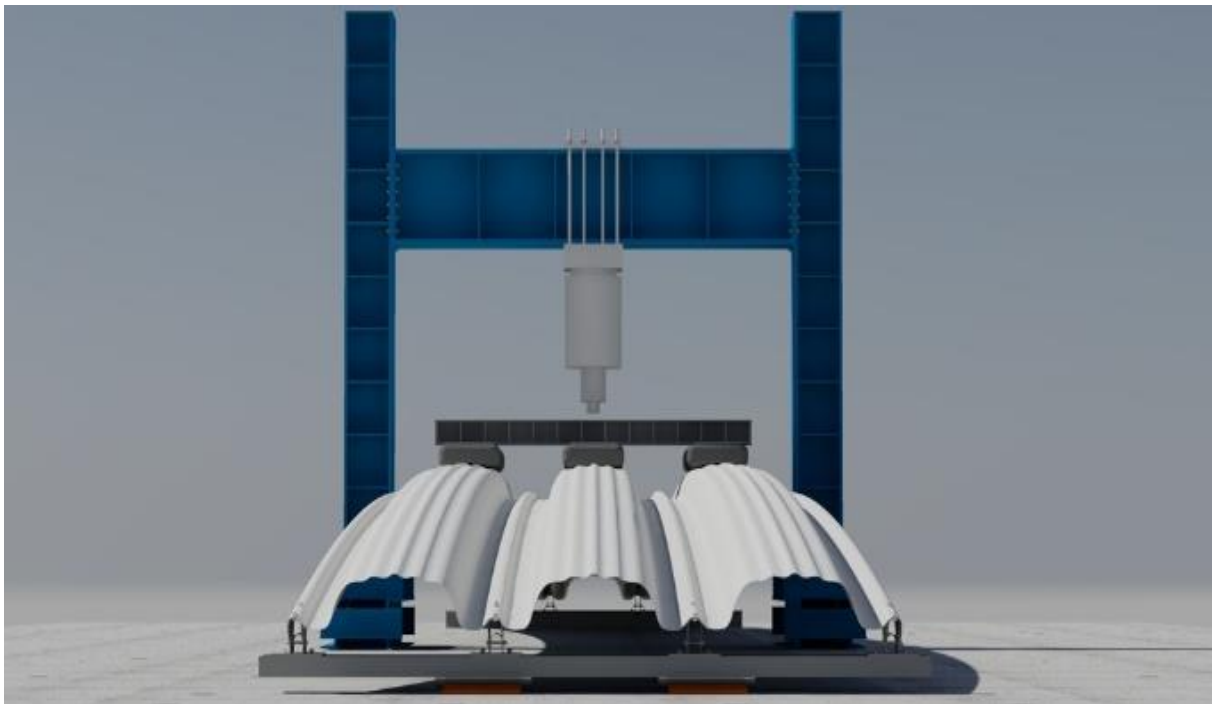


Figura 43 – Esquema do ensaio de carga

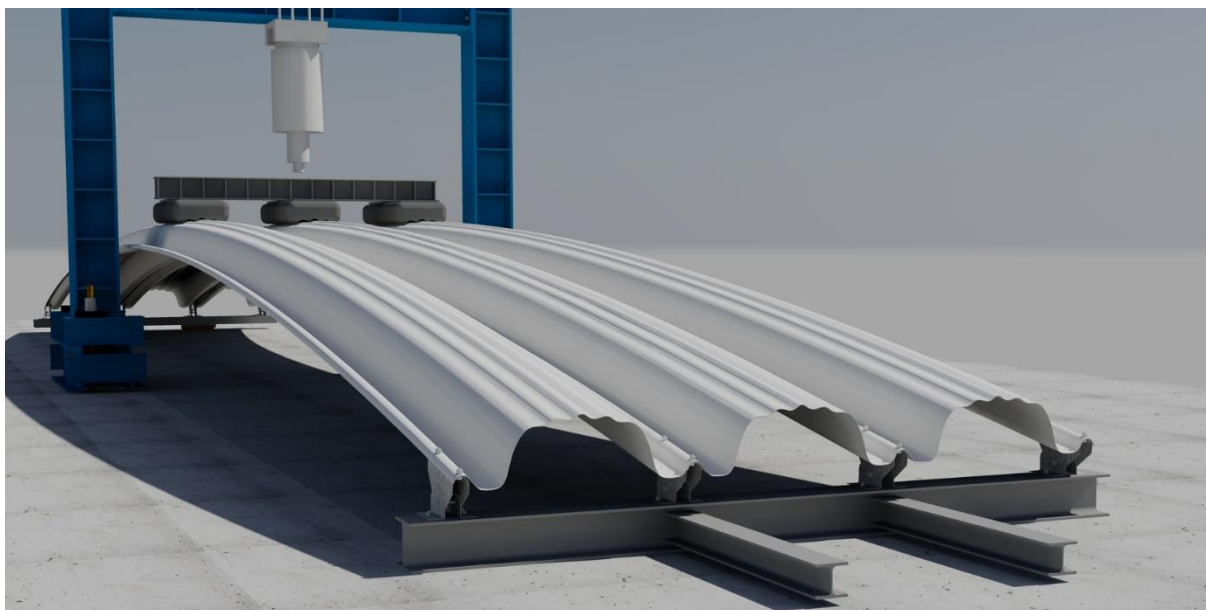


Figura 44 – Esquema do apoio fixo



Figura 45 – Esquema do apoio móvel

4.3.1 Montagem do esquema de ensaio

A montagem do conjunto para ensaio começou com as marcações no chão da localização dos apoios de acordo com a posição do pórtico de carregamento de modo a que o conjunto ficasse centrado longitudinalmente com o atuador, evitando-se excentricidade de cargas. De seguida colocaram-se os perfis metálicos de apoio nas respectivas posições para que pudessem ser aparafusadas as metades inferiores dos cavaletes e os ganchos dos tirantes no apoio fixo da forma como está representado na Figura 46 e ainda no apoio móvel, constituído por um perfil metálico apoiado sobre dois rolos, a $1/3$ e $2/3$ do seu comprimento, com o deslocamento longitudinal impedido pelos tirantes.

Após a montagem dos apoios, foi marcada a posição dos furos (Figura 47), executada a furação nos topos das telhas onde se aparafusou as metades superiores dos cavaletes (Figura 48) e montadas sobre o apoio (Figura 49).



Figura 46 – Montagem da metade inferior dos apoios



Figura 47 – Marcação da furação dos cavaletes



Figura 48 – Furação para os cavaletes



Figura 49 – Apoio simples sobre rolos

Posteriormente procedeu-se à marcação (Figura 50) e furação da sobreposição das telhas (Figura 51) para que pudessem ser costuradas em todo o seu comprimento com um espaçamento de 1 m entre parafusos (Figura 52 e Figura 54). Estas costuras foram executadas

exatamente como é feito em obra, com conjuntos de parafuso, vedante em borracha, anilha metálica curva, porca e um protetor plástico no topo (Figura 53).



Figura 50 – Marcação da furação



Figura 51 – Execução da furação



Figura 52 – Aperto do conjunto



Figura 53 – Conjunto de costura final



Figura 54 – Telha costurada

Terminada a montagem e a costura das telhas procedeu-se à fixação do conjunto, com recurso a um bloco de betão sobre o apoio fixo e tirantes a ligar o apoio fixo ao móvel (Figura 58). Os tirantes tiveram de ser cortados (Figura 55) e soldados no adaptador (Figura 56) para corresponder à distancia entre apoios, sendo posteriormente apertados (Figura 57).



Figura 55 – Corte dos tirantes



Figura 56 – Soldadura dos tirantes



Figura 57 – Aperto dos tirantes



Figura 58 – Esquema de ensaio completo

4.3.2 Instrumentação e obtenção de dados

Terminada a montagem do conjunto para ensaio, procedeu-se à realização da instrumentação do mesmo, constituída por 24 extensómetros “Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd” tipo PFL-10-11, 11 a $\frac{1}{2}$ vão, outros 11 a $\frac{1}{4}$ de vão e os restantes dois nos tirantes; e 2 transdutores de deslocamentos “Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd” SDP-300D com 300 mm de curso. A extensometria foi dividida em duas secções distintas, uma a meio vão, no local da aplicação da carga, e outra a um quarto de vão com a distribuição retratada na Figura 59 para cada uma delas, representada pelas linhas a tracejado na Figura 60.

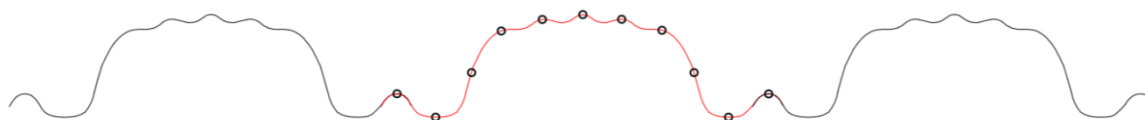


Figura 59 – Localização dos extensômetros na secção transversal

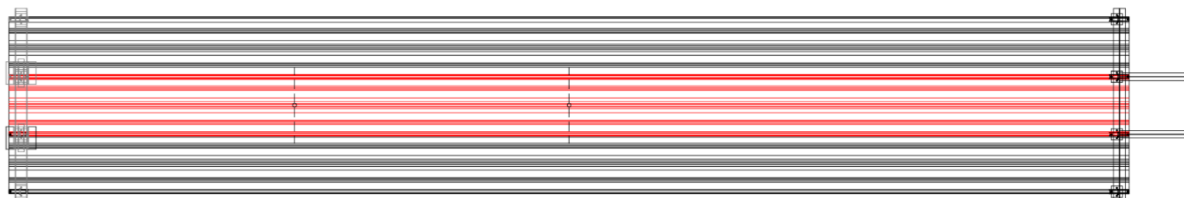


Figura 60 – Secções instrumentadas

Para a aplicação individual dos extensômetros foi necessário remover a camada de revestimento da telha com recurso a uma lixa manual. De seguida limpavam-se as zonas com acetona para, por fim, se marcar a localização exata de cada extensómetro (Figura 61). Após concluída a preparação da superfície colocaram-se os extensómetros com uma cola de base cianoacrilato (Figura 62), soldaram-se os cabos elétricos aos fios de ligação de cada um e por fim protegeu-se com silicone (Figura 63).



Figura 61 – Preparação e marcação da superfície



Figura 62 – Colagem do extensómetro



Figura 63 – Extensómetro soldado e protegido

De modo a obter os deslocamentos ao longo do ensaio, ligaram-se dois transdutores de deslocamentos (Figura 65) às mesmas secções acima referidas (Figura 64) com dois filamentos de aço, roldanas para desviar cada um dos fios (Figura 66) e fixaram-se as pontas com peças metálicas coladas com silicone (Figura 67).

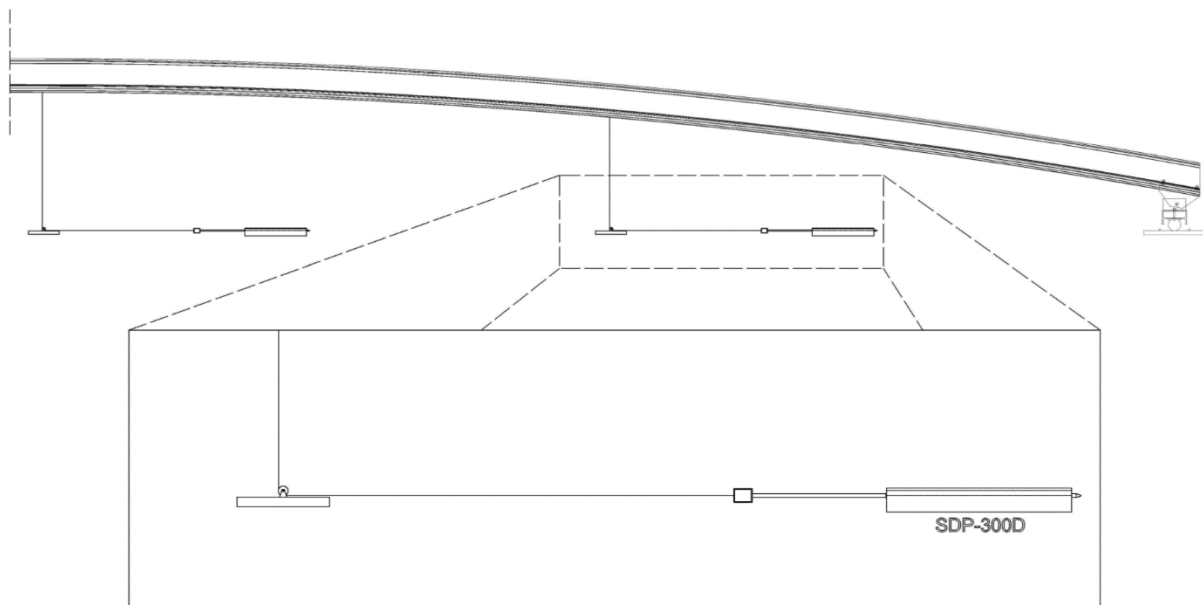


Figura 64 – Esquema de posicionamento dos transdutores de deslocamentos



Figura 65 – Transdutor de deslocamentos SDP-300D



Figura 66 – Roldana de desvio



Figura 67 – Sistema de fixação do fio

Por último ligaram-se todos os extensómetros (Figura 68) e defletómetros a um *Data Logger* TDS-303 (Figura 69) da marca “*Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd*” de 30 canais de modo a registar todos os dados recolhidos pelos equipamentos de medição.

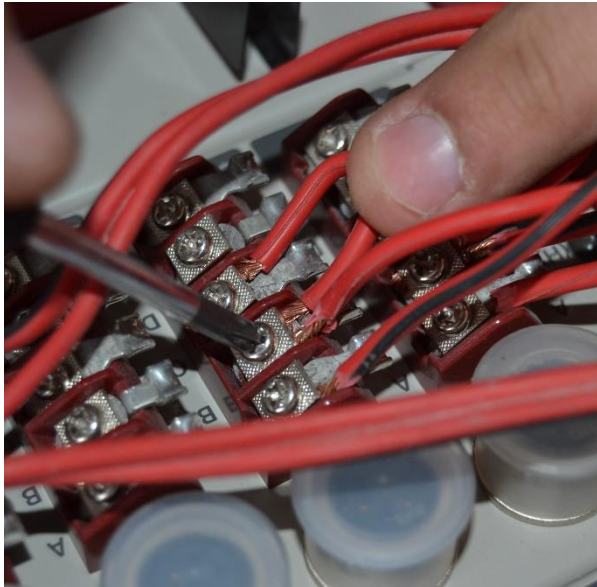


Figura 68 – Ligação dos fios elétricos dos extensómetros



Figura 69 – Data Logger TDS-303 com toda a instrumentação ligada

Terminada a montagem de toda a instrumentação, procedeu-se ao enchimento dos sacos de areia (Figura 70) para distribuição da carga concentrada aplicada a meio vão. Cada saco tem a forma da secção transversal da telha, um comprimento de 1 metro e um peso de aproximadamente 270 kg (Figura 71). Por último prendeu-se a viga metálica que distribui a carga pelos sacos ao actuador para assegurar uma correta aplicação dessa mesma carga uniformemente ficando assim o conjunto pronto para ser ensaiado.



Figura 70 – Enchimento dos sacos de areia

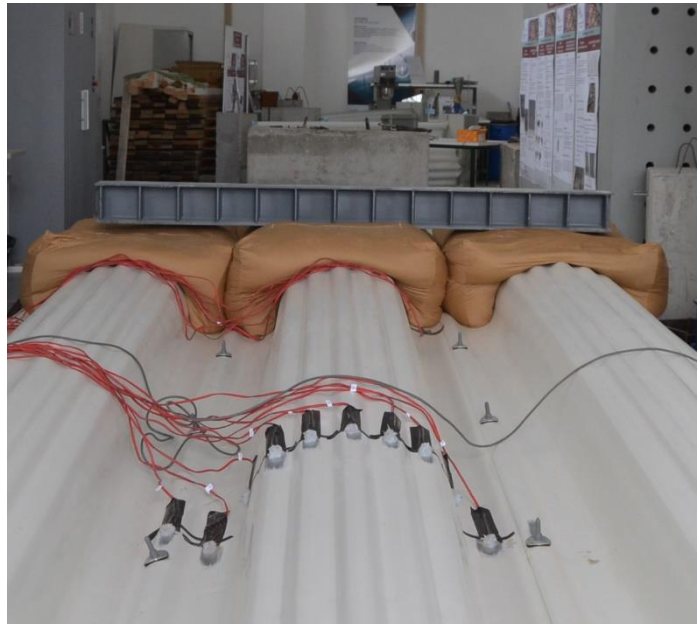


Figura 71 – Sacos de areia cheios

4.3.3 Realização dos ensaios de conjunto

Encontrando-se terminada toda a preparação e instrumentação, deu-se início aos ensaios de conjunto. Estes foram realizados com o objetivo de obter a resposta da estrutura face à aplicação da carga concentrada a meio vão, com uma velocidade constante de $0,25 \text{ mm/min}$ por meio de um atuador hidráulico “Servosis” CH4-100/C300 com um curso de 300mm e uma capacidade de carga de 1000 kN e célula de carga “Servosis” PCI-200 com 2000 kN de capacidade.

4.3.3.1 Ensaio de Conjunto 1

Durante a realização do primeiro ensaio de conjunto começaram por aparecer deformações oblíquas nas almas das 3 telhas a aproximadamente $1/5$ do vão total como mostra a Figura 72, entre o apoio e a primeira secção instrumentada, deformações estas que se manifestaram em ambos os lados dos elementos.

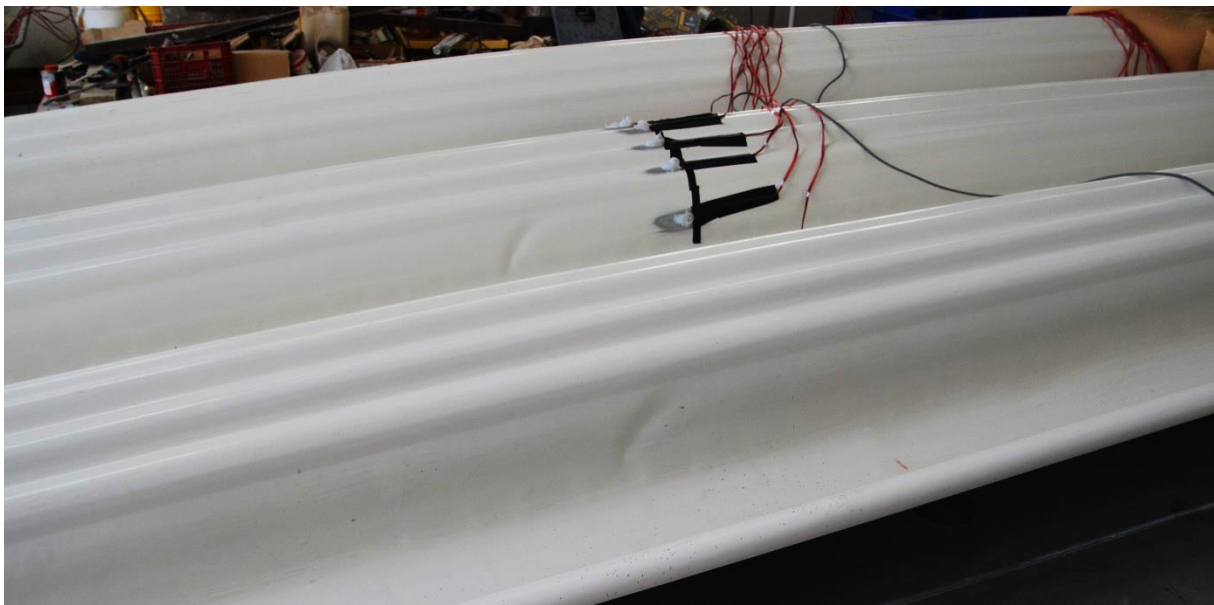


Figura 72 – Deformações nas almas da secção

Posteriormente verificou-se a descida do corpo central da secção no apoio, constituído pelas duas almas e o banzo de cima, provocando uma rotação das laterais da telha entre o cavalete de apoio e a primeira costura como representado na Figura 73.



Figura 73 – Rotação da sobreposição das telhas junto ao apoio

À medida que a carga aplicada se aproximava da carga de rotura, constatou-se o aparecimento de deformações notórias junto dos apoios (Figura 74) provocadas pela compressão a que a secção estava sujeita e a alteração do arco original para um arco deformado com 3 semi-ondas (Figura 75).



Figura 74 – Deformações da sobreposição perto dos apoios



Figura 75 – Deformação longitudinal do conjunto

Ao fim de aproximadamente 35 minutos de ensaio deu-se a rotura com o colapso da telha central, originado pelo esmagamento da secção central a meio vão (Figura 76, Figura 77 e Figura 78)



Figura 76 – Colapso da telha central (Vista superior)



Figura 77 – Colapso da telha central (Vista inferior)



Figura 78 – Rotura da secção a meio vão

4.3.3.2 Ensaio de Conjunto 2

Contrariamente ao primeiro ensaio, em que se manifestaram inicialmente deformações nas almas, neste ensaio o primeiro sintoma a manifestar-se foi a rotação das laterais sobrepostas das telhas entre o apoio e o início das costuras (Figura 79).



Figura 79 – Rotação da sobreposição junto dos apoios

De seguida, com o aumento do deslocamento da estrutura desenvolveu-se uma deformação por flexão a aproximadamente 1/6 do vão (Figura 80), provocado pela descida do corpo da telha como descrito no primeiro ensaio, movimento esse que não pôde ser acompanhado pela sobreposição das telhas devido à reação de apoio.



Figura 80 – Deformação por flexão

Devido ao segundo conjunto ter atingido uma deformação mais elevada que o primeiro, o curso do actuador hidráulico atingiu o limite, o que impossibilitou o carregamento até à rotura. Após a descarga da estrutura notou-se uma deformação residual significativa relativamente ao arco original, diferença esta que foi compensada com uma segunda viga (Figura 81) para um novo carregamento até à rotura.

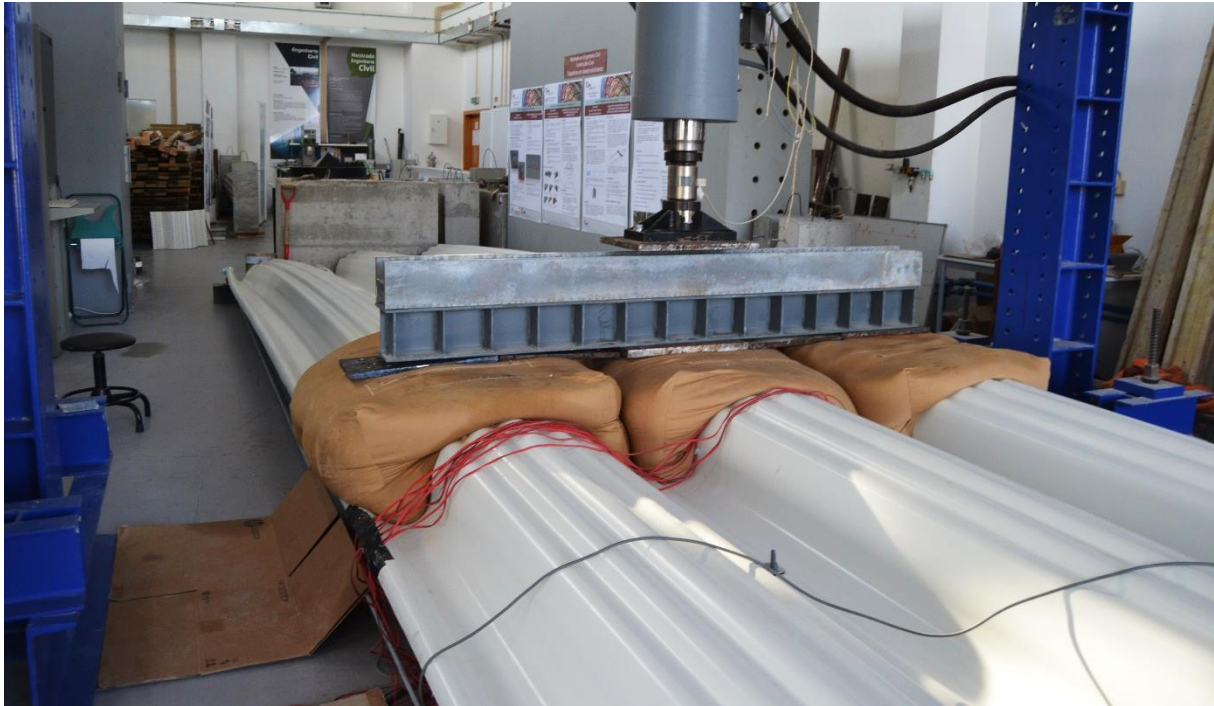


Figura 81 – Vigas de carregamento

Durante toda a duração deste carregamento apenas se constatou o aumento da magnitude das deformações já registadas anteriormente devido à plastificação de algumas zonas, apresentando assim um comportamento linear. Constatou-se apenas o aumento progressivo da deformação até à rotura da estrutura, que por sua vez se verificou em todas as telhas (Figura 82 e Figura 83). Na Figura 84 estão representadas, pela linha vermelha, as deformações devido à carga concentrada, e a azul as deformações nas almas da telha por compressão do arco.



Figura 82 – Estrutura após a rotura



Figura 83 – Estrutura após a rotura (Vista alternativa)

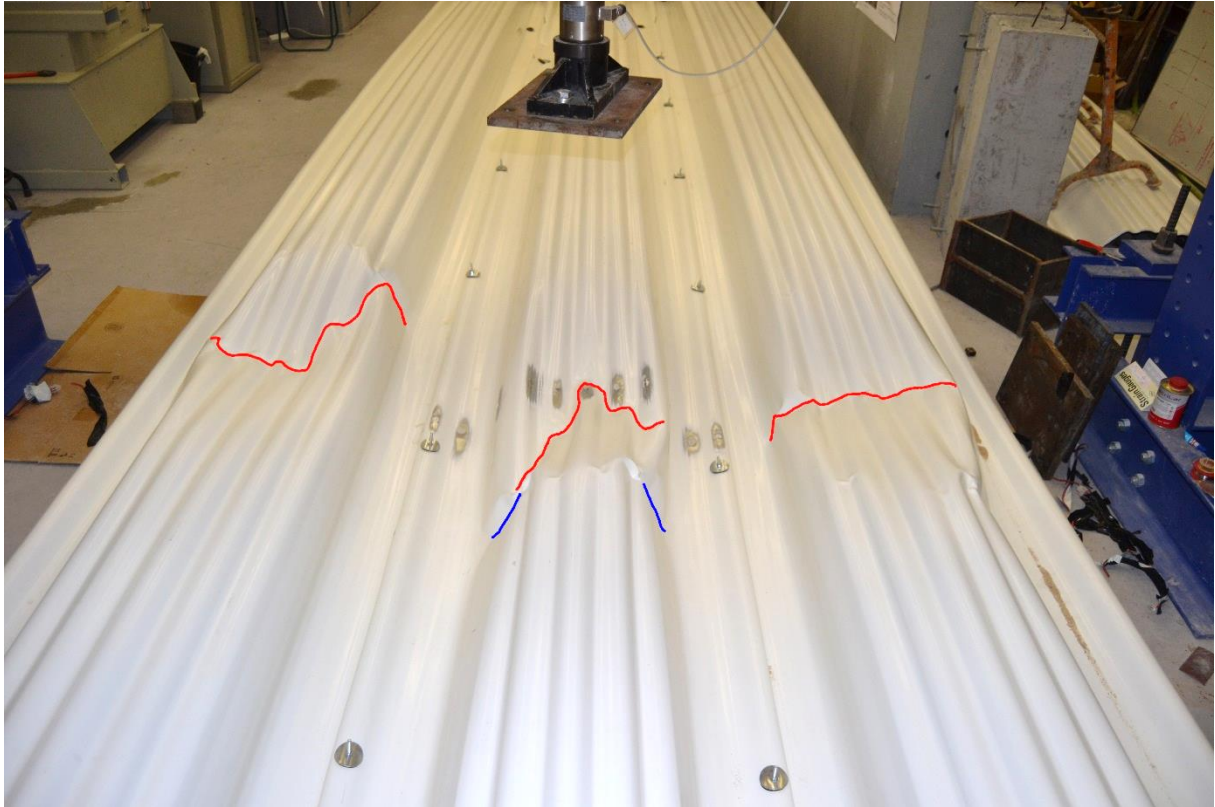


Figura 84 – Tipos de deformações à rotura

5. Discussão de Resultados

Finalizadas as campanhas experimentais e obtidos e tratados os dados, apresenta-se e discutem-se a seguir os resultados encontrados.

5.1 Resultados do Ensaio de tração

5.1.1 Propriedades resistentes

Expõem-se na Tabela 8 as propriedades referentes às tensões de cedência e rotura, bem como a média final destas propriedades para cada tipo de espécime ensaiado à tração.

Durante o ensaio do espécime *II-1* a máquina atingiu a sua capacidade máxima à tração de 8 kN, abortando o ensaio e tornando o espécime obsoleto.

Os resultados encontram-se apresentados no Gráfico 1 e Gráfico 2, bem como o resumo de todos os dados recolhidos dos ensaios à tração realizados (para um total dos 19 provetes nas duas figuras), estando presentes no Anexo A os gráficos individuais de cada espécime.

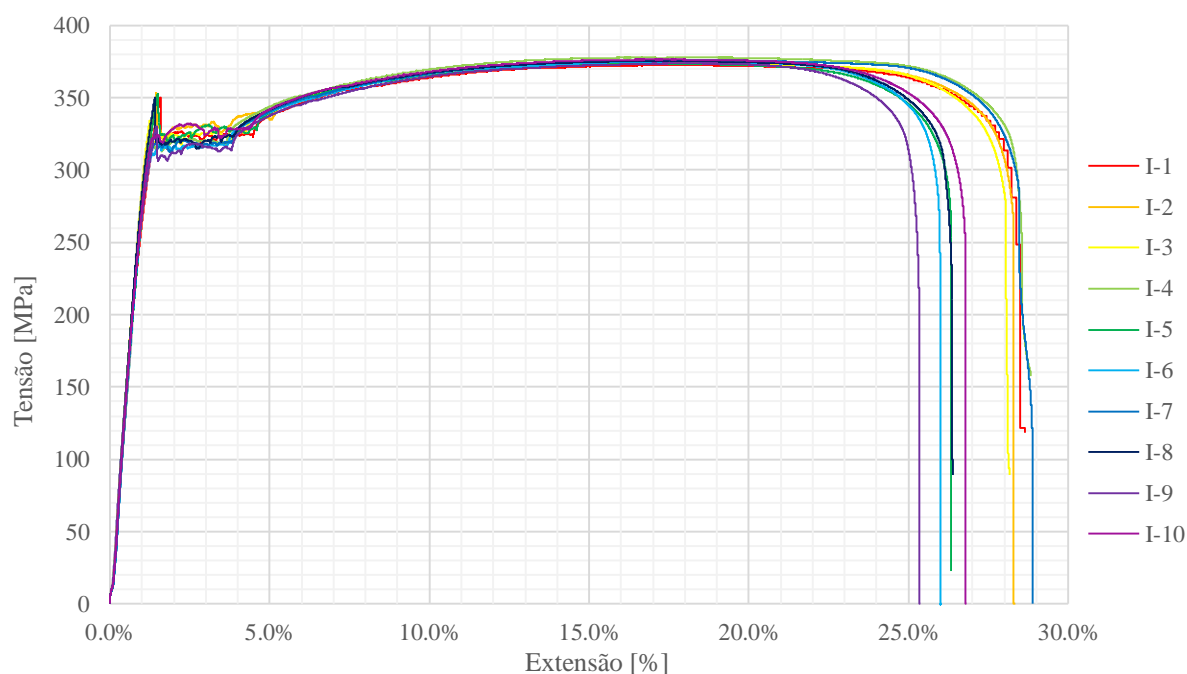


Gráfico 1 – Resumo testes de tração – Provetes Tipo I

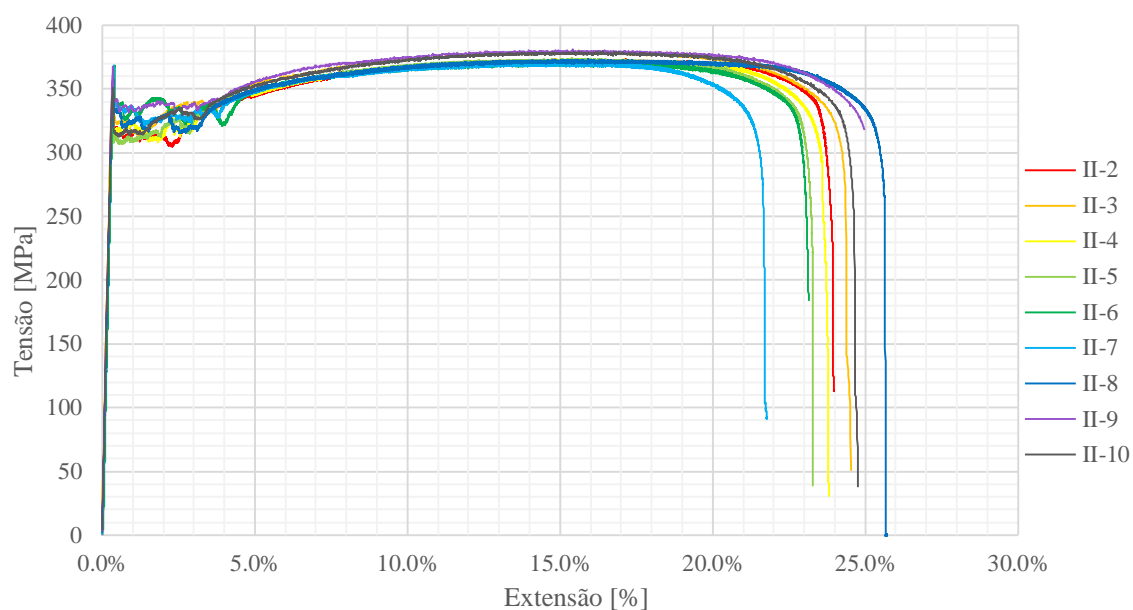


Gráfico 2 – Resumo testes de tração – Provetes Tipo II

Tabela 8 – Tensões de cedência e ruptura dos provetes tipo I e II

Quadro Resumo			
Espécime	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	f_u/f_y
<i>I-1</i>	350,04	372,95	1,07
<i>I-2</i>	353,44	374,36	1,06
<i>I-3</i>	334,12	374,23	1,12
<i>I-4</i>	318,89	377,96	1,19
<i>I-5</i>	350,28	373,63	1,07
<i>I-6</i>	317,92	375,20	1,18
<i>I-7</i>	318,92	376,12	1,18
<i>I-8</i>	350,20	375,42	1,07
<i>I-9</i>	330,36	373,91	1,13
<i>I-10</i>	324,42	376,51	1,16
\bar{x}	334,86	375,03	1,12
Máx	353,44	377,96	-
Min	317,92	372,95	-
<i>II-1</i>	Espécime inválido		
<i>II-2</i>	335,73	373,44	1,11
<i>II-3</i>	353,69	380,47	1,08
<i>II-4</i>	342,70	373,80	1,09
<i>II-5</i>	336,08	374,36	1,11
<i>II-6</i>	367,49	371,70	1,01
<i>II-7</i>	368,72	371,28	1,01
<i>II-8</i>	357,34	373,53	1,05
<i>II-9</i>	367,61	381,03	1,04
<i>II-10</i>	350,95	379,62	1,08
\bar{x}	353,37	375,47	1,06
Máx	368,72	381,03	-
Min	335,73	371,28	-

De acordo com a tabela, a média de tensão de cedência para os provetes tipo I foram aproximadamente 34 % superior ao seu valor nominal (250 MPa) e a tensão última obtida superou o seu valor nominal (330 MPa) aproximadamente em 14 %. O valor médio da relação entre tensão última e tensão de cedência, que define a ductilidade do material, é 15 % inferior ao seu valor nominal (1,32). Em relação ao espécime tipo II os resultados para os mesmos parâmetros são, respetivamente, 41% superior, 14 % superior e 20 % inferior.

5.1.2 Propriedades elásticas

Na Tabela 9 são apresentados os dados recolhidos referentes às propriedades elásticas do material constituinte da telha.

Tabela 9 – Módulos de elasticidade dos provetes tipo I e II

Espécime	Módulo de elasticidade
<i>E I-1</i>	175.77 GPa
<i>E I-2</i>	173.37 GPa
<i>E I-3</i>	176.90 GPa
\bar{x}	175.34 GPa
σ	1.47
Máx	176.90 GPa
Min	173.37 GPa
<i>E II-1</i>	195.34 GPa
<i>E II-2</i>	190.80 GPa
<i>E II-3</i>	198.17 GPa
\bar{x}	194.77 GPa
σ	3.04
Máx	198.17 GPa
Min	190.80 GPa

O valor médio do módulo de elasticidade encontrado para o espécime II é 11 % maior que para o espécime I. Refira-se que os resultados referentes aos ensaios do espécime I foram realizados com uma velocidade de controlo de deslocamento inferior aos do tipo II.

5.2 Resultados do Ensaio de compressão de perfis de eixo reto

Considerando que a telha não apresentou deslocamentos relevantes até à carga em que o bloco entrou em rotura, os resultados não permitem qualquer tipo de conclusão, ficando assim este tipo de ensaio disponível para eventual estudo futuramente.

5.3 Resultados do Ensaio de Conjunto

5.3.1 Ensaio de Conjunto 1

Na realização do primeiro ensaio de conjunto, devido à configuração de detecção de rotura estar ativada no controlador do atuador hidráulico, houve dois momentos de carga e descarga, que mostra a resposta da estrutura face a estes ciclos como representado no Gráfico 3, que relaciona a força aplicada na estrutura com o deslocamento vertical da mesma.

Devido à carga ser aplicada com recurso a sacos de areia, foi provocada uma carga inicial na estrutura, com um peso de aproximadamente 8,8 kN, que impediu a obtenção do troço inicial do gráfico, fazendo assim com que este não se inicie na origem.

Nota-se um troço até cerca de 22 kN em que a estrutura apresenta um comportamento elástico linear, sendo que a partir desse ponto se verifica uma resposta elasto-plástica devido à perda de rigidez.

Destaca-se ainda um aumento de carga logo após o primeiro patamar de descarga onde há um ligeiro aumento de resistência atingindo aproximadamente os 26,5 kN, terminando com aproximadamente 27 kN de carga de rotura.

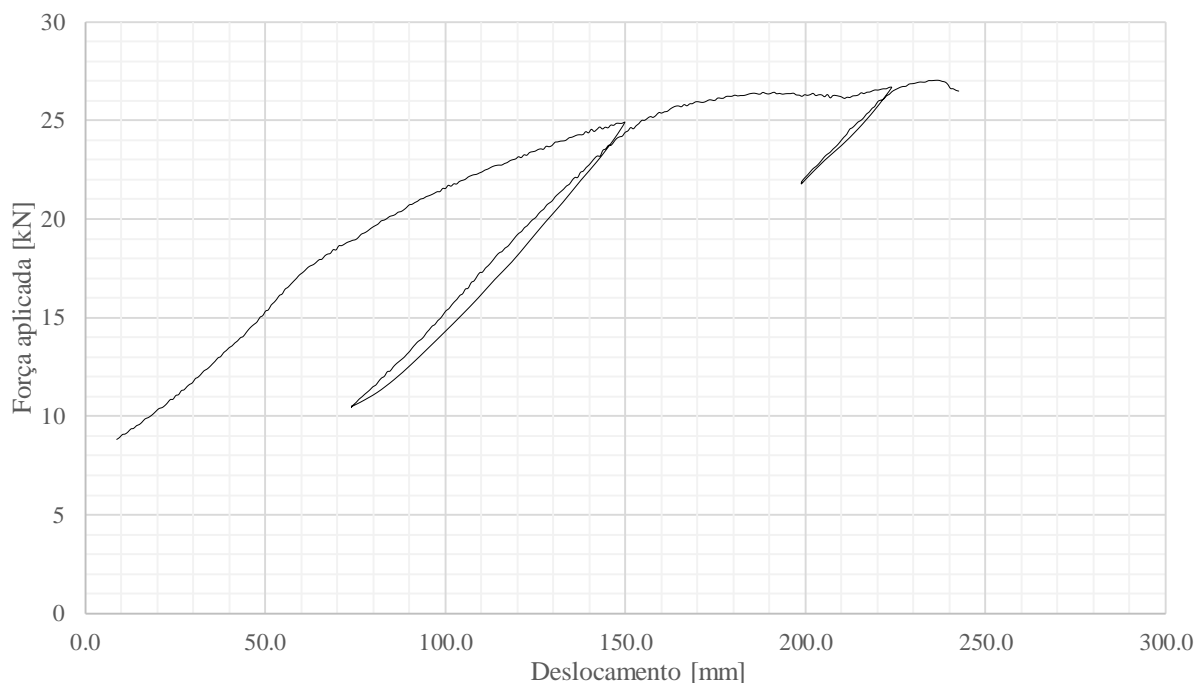


Gráfico 3 – Curva Força/Deslocamento Ensaio de conjunto 1

Verificou-se que os extensómetros colocados em pontos opostos na secção, representados pela mesma cor aos pares no Gráfico 4, apresentaram uma mesma inclinação, o que indica

uma distribuição de tensões simétrica na secção. Esta simetria pode ser verificada pelos pares 2-10, 3-9, e 4-8 (ilustrada pela Figura 85 e Figura 86). Os extensómetros 3 e 9, devido a estarem próximos da linha neutra da secção, apresentam, como esperado, uma variação de tensão quase nula, enquanto o extensómetro 6, por ser o mais afastado desta, exhibe a maior variação de tensão do conjunto. Apesar de estar representado no gráfico, o extensómetro 5 considera-se inválido dado que apresentou erros de leitura.

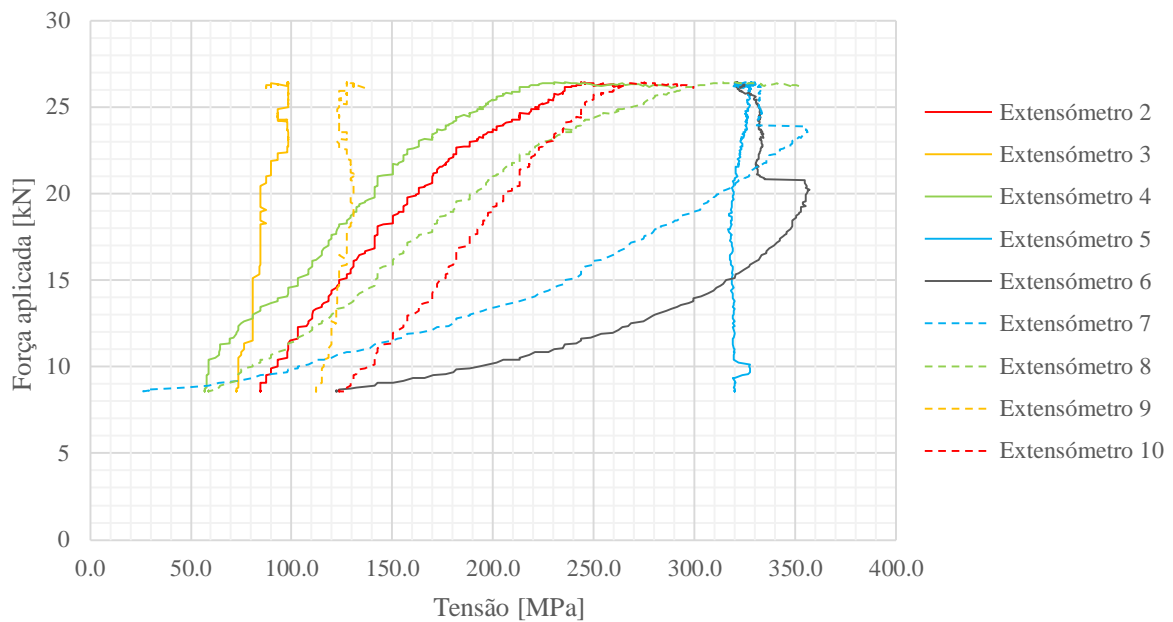


Gráfico 4 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a $\frac{1}{2}$ vão, Ensaio 1

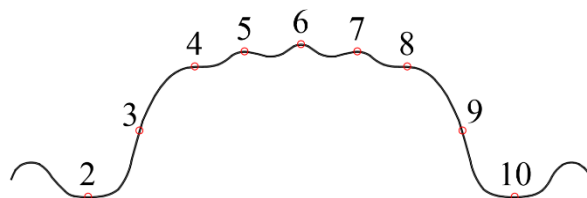


Figura 85 – Extensómetros a $\frac{1}{2}$ vão, Ensaio 1

No Gráfico 5 volta a verificar-se a mesma simetria entre extensómetros e a pouca variação dos extensómetros perto da linha neutra. Tal como descrito acerca do extensómetro 5, voltou a registar-se um erro na leitura dos extensómetros 15 e 17.

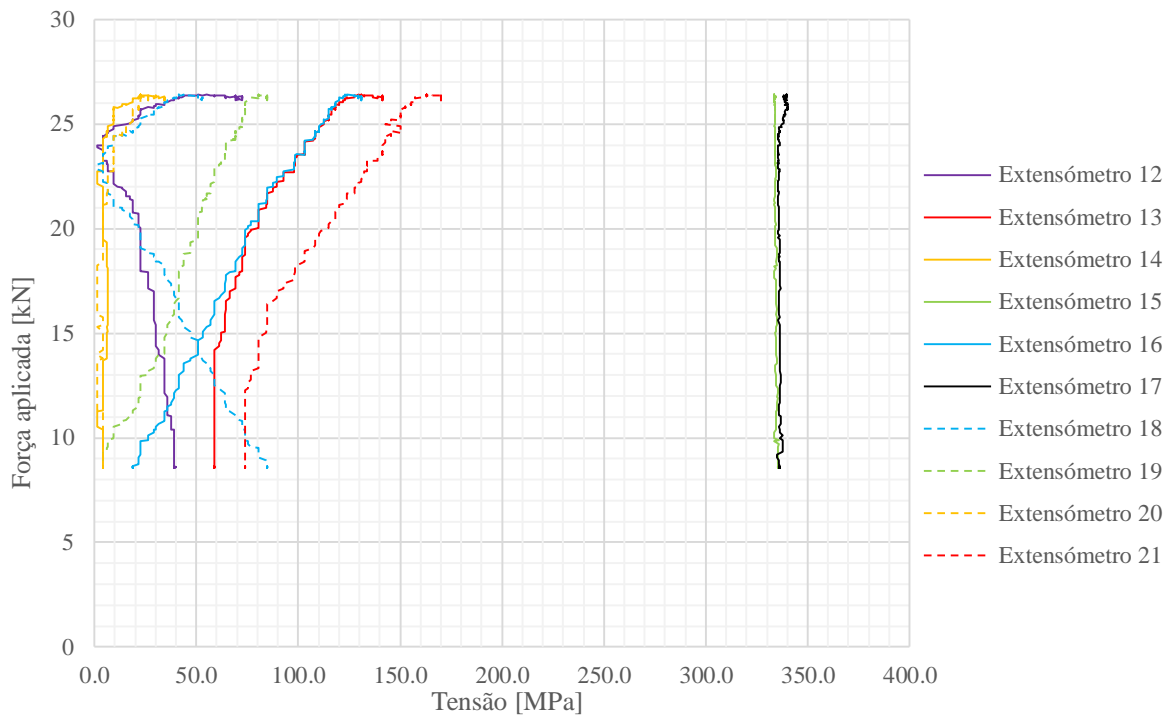


Gráfico 5 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a ¼ vão, Ensaio 1

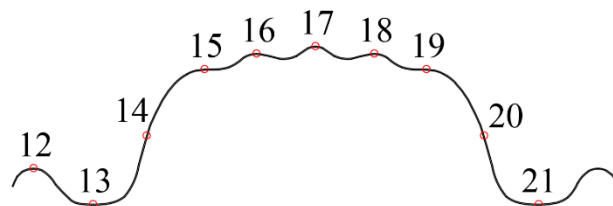


Figura 86 – Extensômetros a ¼ vão, Ensaio 1

Por último encontra-se representada no Gráfico 6 a curva Momento/Curvatura que mostra o comportamento da secção a meio vão face à carga aplicada. Inicialmente apresenta um comportamento linear até aproximadamente $0,026 \text{ m}^{-1}$, ponto a partir do qual se começa a verificar deformações na estrutura até atingir uma curvatura de $0,042 \text{ m}^{-1}$. Observou-se ainda que a secção exibe uma variação de curva sem aumento significativo de momento atuante até ao colapso da mesma.

Para a obtenção destas curvas momento/curvatura foi considerada a evolução do momento atuante na estrutura em cada instante do carregamento, tendo em conta a reação de apoio, a força instalada nos tirantes e a variação de altura da estrutura ao longo de todo o ensaio. Para o cálculo da curvatura foram avaliadas as extensões de dois extensômetros, um superior e um inferior, em função da distância entre si.

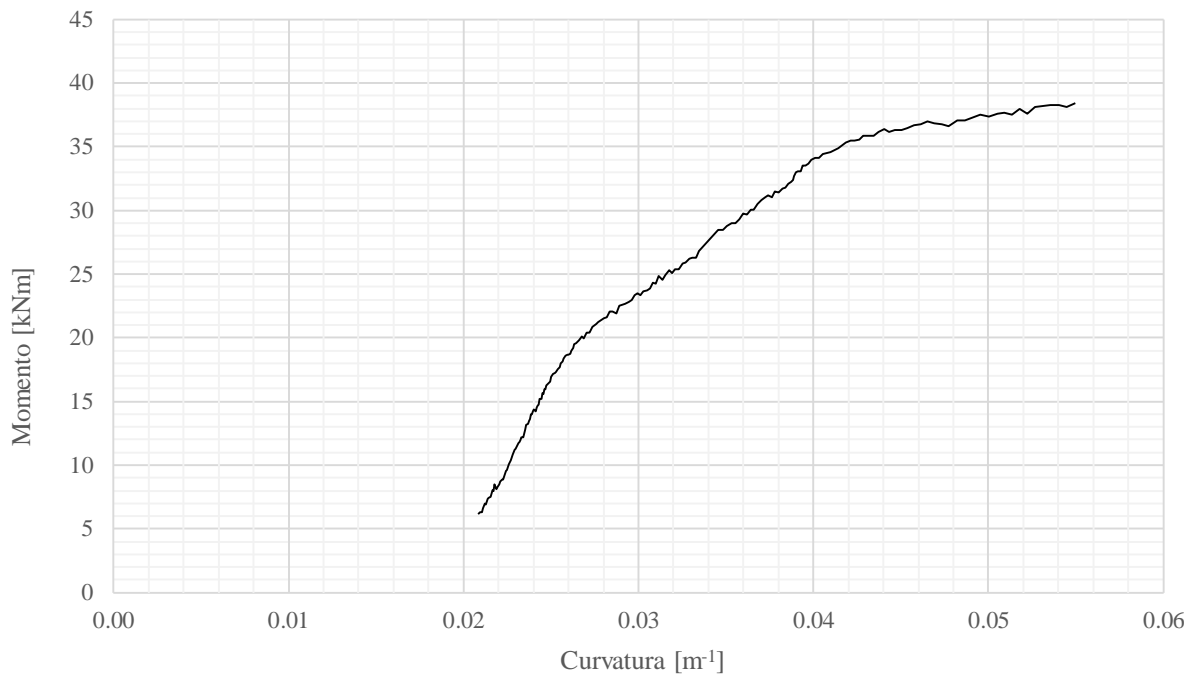


Gráfico 6 – Curva Momento/Curvatura, Ensaio 1

Seguidamente é apresentado no Gráfico 7 e no Gráfico 8 a evolução da distribuição retificada das tensões nas secções a $\frac{1}{2}$ vão e $\frac{1}{4}$ vão, respetivamente.

Na secção a $\frac{1}{2}$ vão, inicialmente não se verifica uma simetria devido a uma possível diferença no peso dos sacos de areia, sendo que a partir dos 20 kN se verifica não só uma distribuição mais simétrica, com valores de tensão máximos acima de 350 MPa.

Por volta dos 26 kN, aquando da carga de rotura da estrutura, verifica-se uma diminuição de tensões no centro da telha, enquanto o resto da secção continua a aumentar. Este fenómeno deve-se à deformação provocada pela carga concentrada em cima da telha.

Observa-se também o aumento progressivo da tensão nas laterais da telha, zona esta maioritariamente sujeita apenas a compressão.

Na secção a $\frac{1}{4}$ vão verificou-se uma simetria ao longo de todo o ensaio, apresentando tensões ligeiramente inferiores à secção de $\frac{1}{2}$ vão.

Destaca-se ainda a irregularidade dos dois extensómetros ao lado do central, a $\frac{1}{4}$ de vão provocadas por erros de leitura. Deste modo consideram-se essas tensões inválidas tendo a secção atingido uma tensão máxima de aproximadamente 130 MPa.

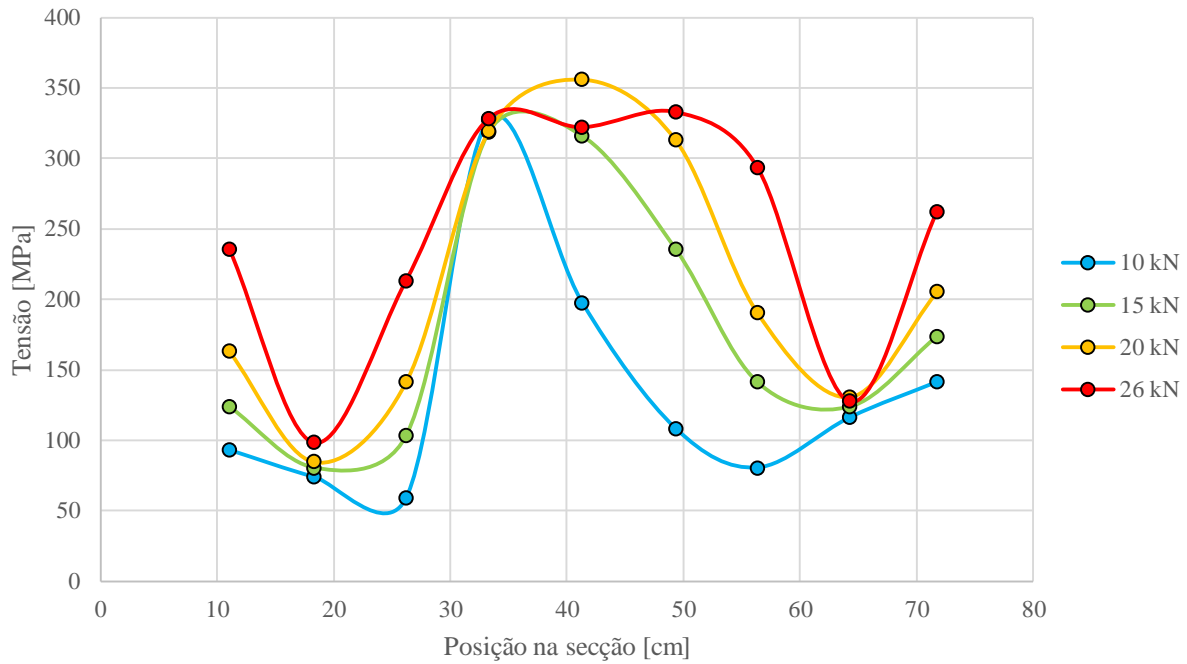


Gráfico 7 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a 1/2 vão, Ensaio 1

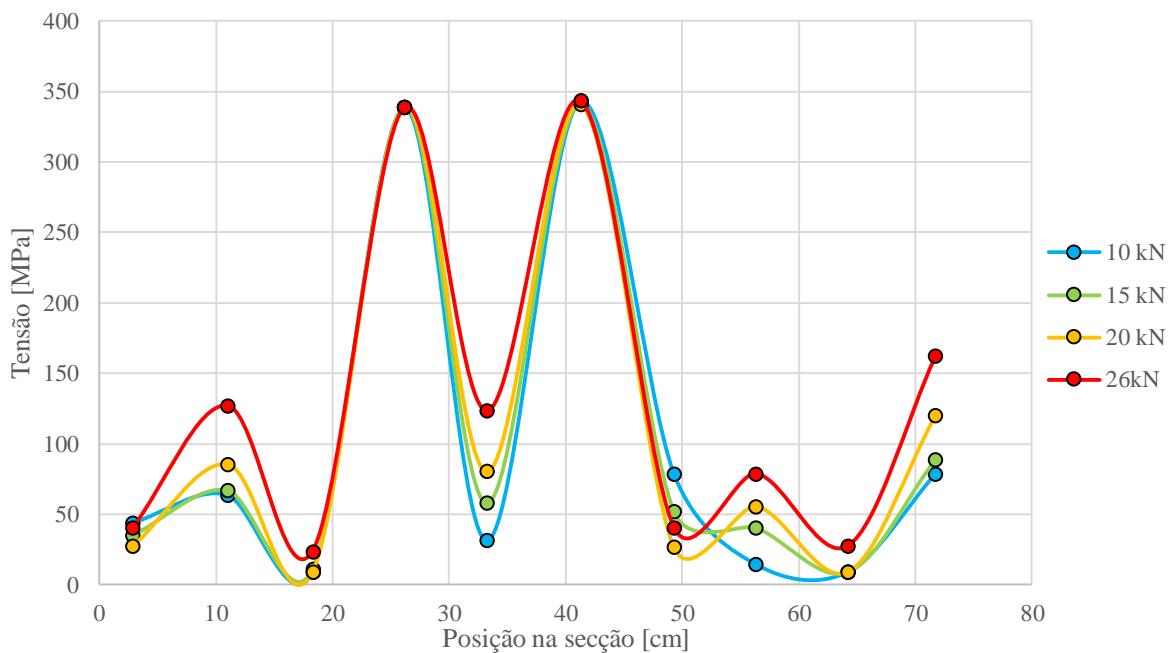


Gráfico 8 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a 1/4 vão, Ensaio 1

5.3.2 Ensaio de Conjunto 2

Conforme referido anteriormente, durante a realização do segundo ensaio de conjunto, o atuador atingiu o limite do seu curso pouco antes da rotura da estrutura como se pode constatar no Gráfico 9. Esta situação deveu-se a um ligeiro assentamento da viga de carregamento na areia, um pouco abaixo dos 27 kN de força aplicada, apesar da presença de chapas metálicas entre esta e os sacos de distribuição de carga, o que provocou o aumento do deslocamento do atuador, enquanto a estrutura manteve a deformação já instalada.

Quando comparado com o primeiro, o segundo ensaio apresentou um comportamento semelhante, sendo que ocorreu a mesma perda de rigidez a aproximadamente 60 mm de deslocamento e 16 kN de carga aplicada. Em relação à rotura da estrutura, apesar de esta não ter sido atingida no segundo ensaio, calcula-se que, devido à carga máxima aplicada e correspondente deformação, o valor de rotura seria idêntico ao primeiro.

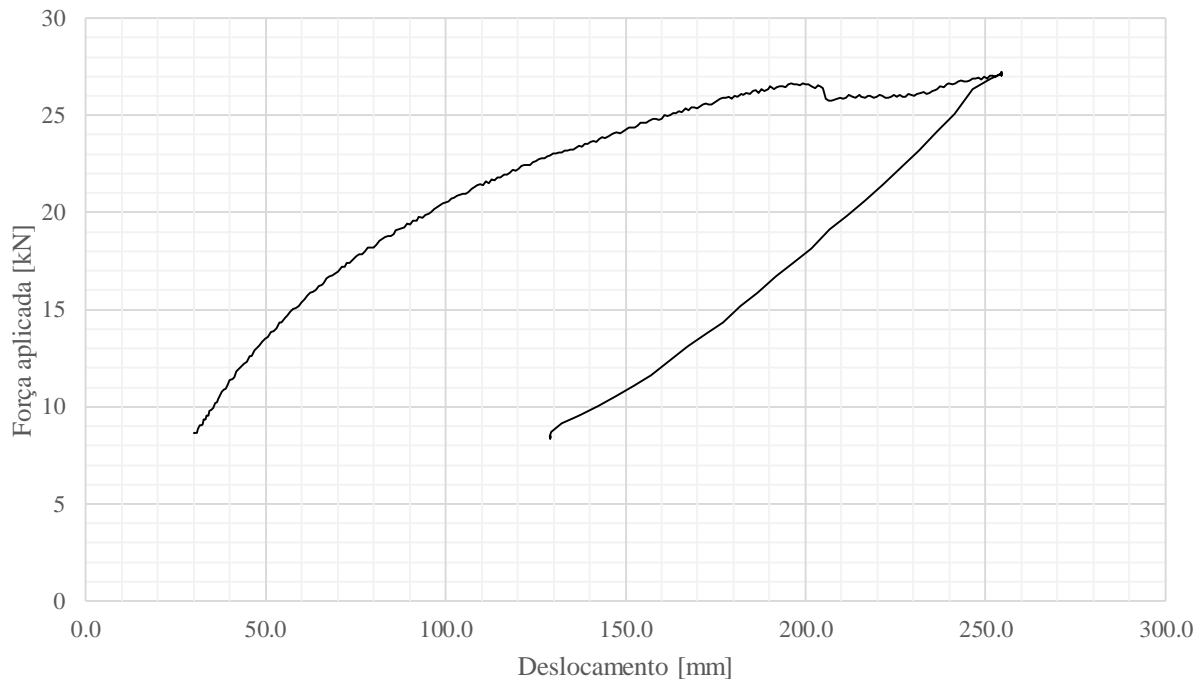


Gráfico 9 – Curva Força/Deslocamento Ensaio de conjunto 2

No segundo ensaio de conjunto verificaram-se menos perdas de dados por falha dos extensómetros, quando comparado ao primeiro ensaio, verificando-se apenas a inutilização do extensómetro 8.

No que diz respeito aos resultados (Gráfico 10 e Gráfico 11), voltou a verificar-se a coerência descrita no primeiro ensaio com a variação semelhante dos extensómetros em localizações opostas (Figura 87 e Figura 88), destacando-se a descontinuidade dos extensómetros superiores, 5,6 e 7, originada pela deformação devido à carga concentrada.

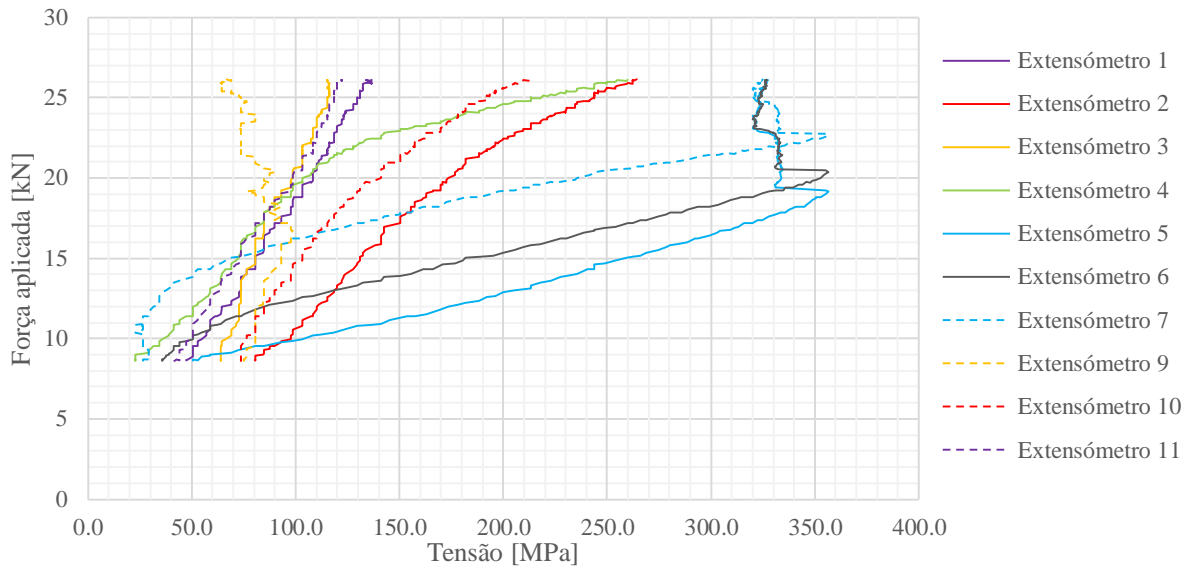


Gráfico 10 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a 1/2 vão, Ensaio 2

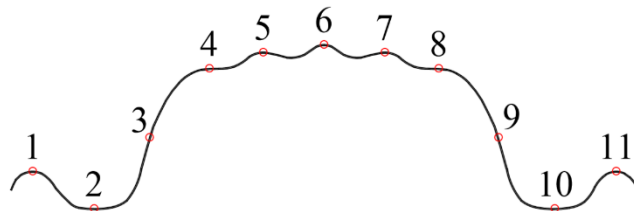


Figura 87 – Extensômetros a 1/2 vão, Ensaio 2

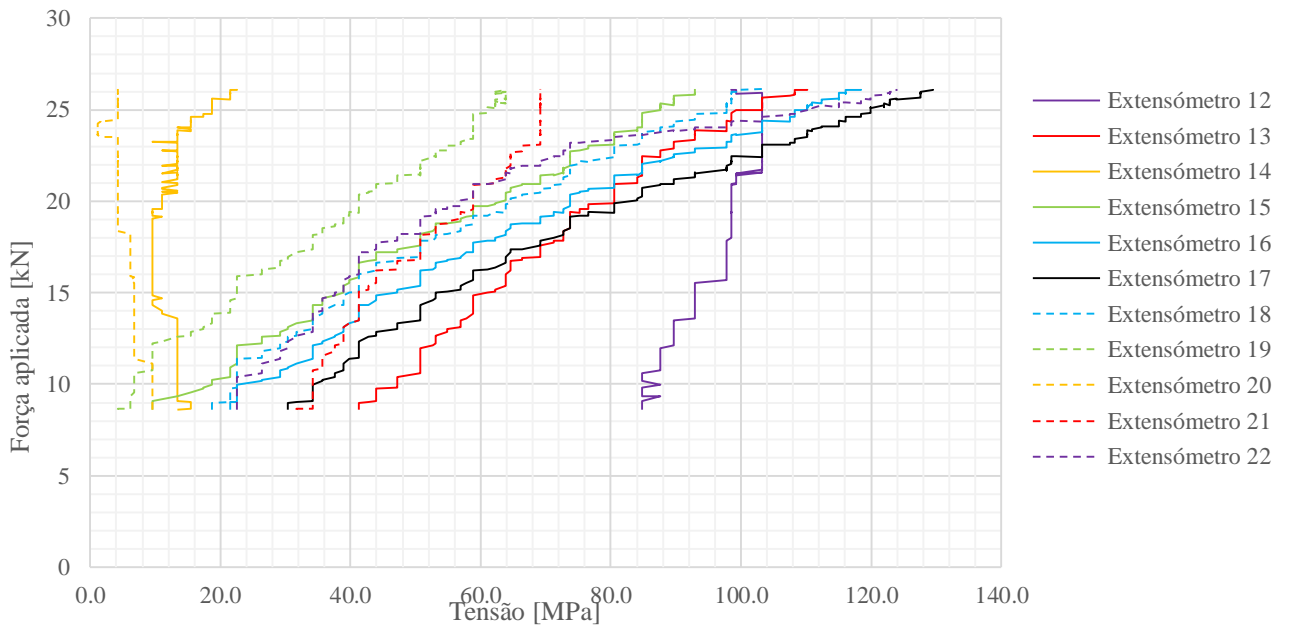


Gráfico 11 – Resumo Tensão/Carga Aplicada a 1/4 vão, Ensaio 2

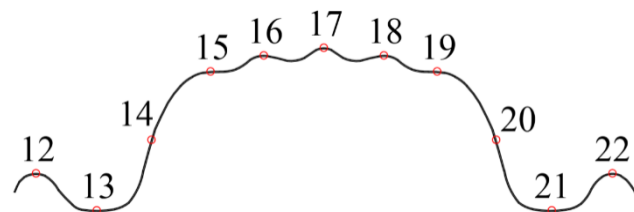


Figura 88 – Extensômetros a 1/4 vão, Ensaio 2

O cálculo do momento e da curvatura para a curva presente no Gráfico 12 foi executado como descrito no ensaio de conjunto 1.

O segundo ensaio de conjunto apresenta apenas dois patamares por não ter sido levado à rotura tal como o primeiro. Apesar disso, é notório o primeiro patamar linear elástico até cerca de 0.024 m^{-1} a partir do qual começa a existir deformações nas telhas.

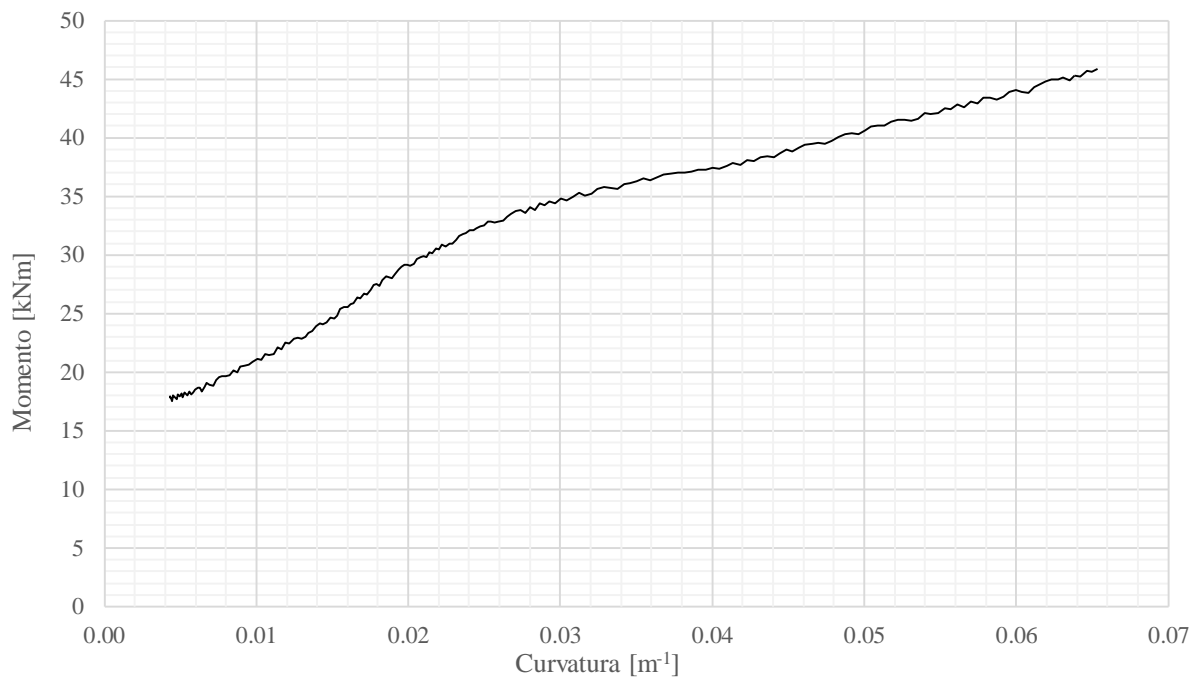


Gráfico 12 – Curva Momento/Curvatura, Ensaio 2

Tal como no primeiro ensaio, o Gráfico 13 apresenta uma assimetria inicial, verificando-se a sua atenuação com o aumento da carga. Destaca-se também o mesmo fenómeno ocorrido no primeiro ensaio com a deformação provocada pela carga concentrada ao centro da secção provocando uma conseqüente diminuição de tensões. O Gráfico 14 não apresenta erros de leitura relevantes, mostrando assim a evolução das tensões a $\frac{1}{4}$ de vão com tensões máximas semelhantes às tensões máximas válidas da respetiva secção no primeiro ensaio.

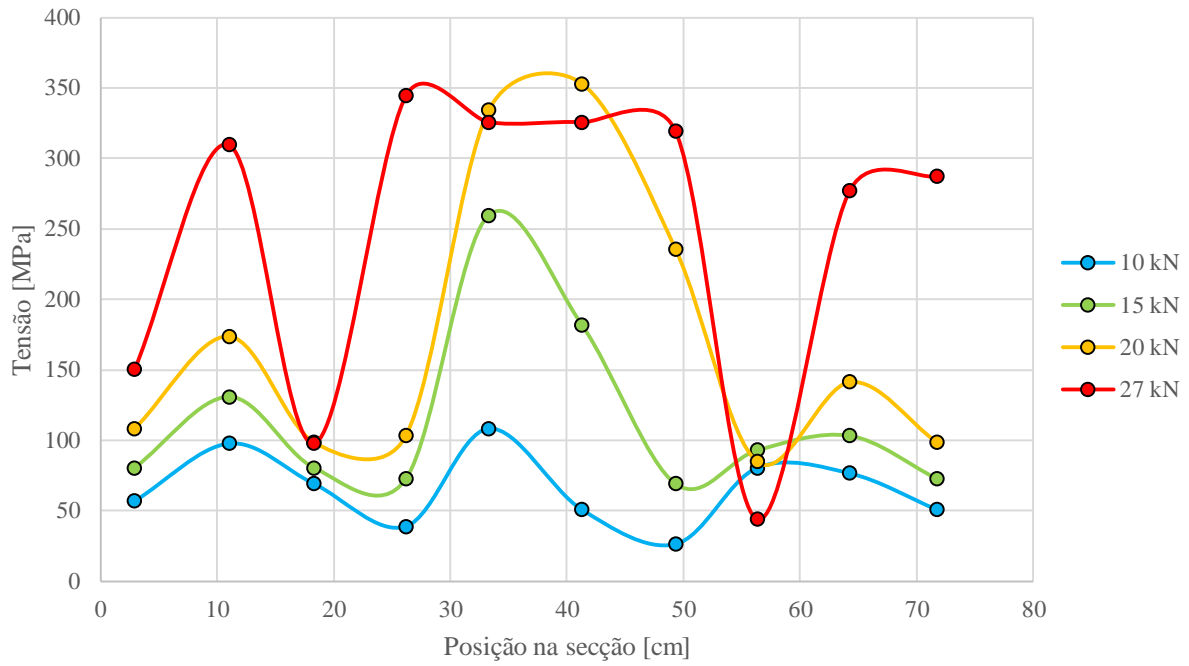


Gráfico 13 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a 1/2 vão, Ensaio 2

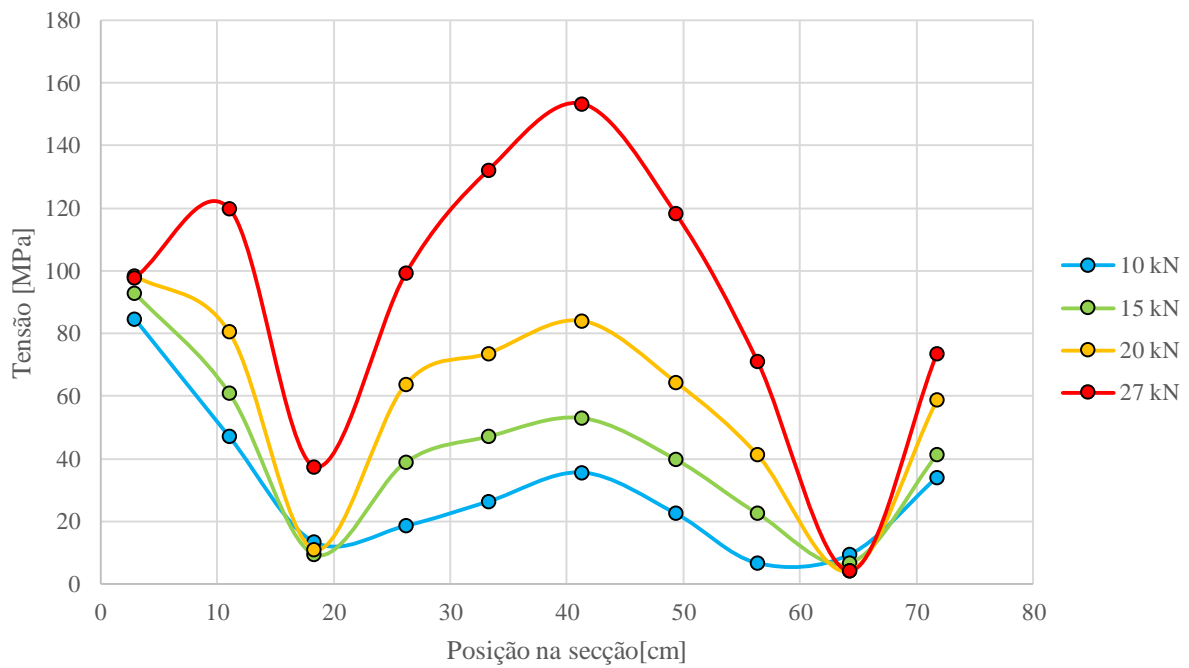


Gráfico 14 – Evolução da distribuição retificada de tensões na secção a 1/4 vão, Ensaio 2

6. Conclusão

O facto de as coberturas autoportantes terem uma grande utilização na atualidade, aliada à falta de trabalhos científicos e regulamentação aplicável ao seu dimensionamento, motivou o desenvolvimento desta dissertação.

Após revisão bibliográfica do assunto em estudo, decidiu-se efetuar uma campanha de ensaios de um modelo que se aproximasse das condições reais de utilização, tendo sido possível reproduzir com rigor vãos, geometrias, condições de apoio e tirantes utilizados em obra. Relativamente à aplicação da carga optou-se por aquela que se adaptava às condições existentes em laboratório.

Não sendo possível a simulação da carga real, tal como o vento, aplicou-se a carga a meio vão permitindo assim obter muitas conclusões úteis sobre o comportamento real da telha.

Para uma caracterização dos modos de instabilidade da secção, optou-se por ensaiar perfis de eixo reto, ensaio esse que não foi possível terminar, ficando assim disponível para trabalhos futuros.

Esta caracterização de modos de instabilidade seria útil, para que no ensaio da telha curva pudessem ser identificados nas suas configurações deformadas após a aplicação da carga.

A opção de eixos retos foi determinada de modo que uma compressão uniforme pudesse ser aplicada e identificadas com clareza as suas configurações deformadas.

Os ensaios experimentais revelaram-se bastante trabalhosos, com alguns contratempus que, com criatividade se foram ultrapassando, proporcionando assim uma importante aprendizagem e qualificação para futuros trabalhos de laboratório.

Contando com a colaboração da empresa “Blocotelha – Steel Constructions” os modelos foram sendo construídos no Laboratório de Estruturas e Betão Armado.

Em primeiro lugar foram ensaiados à tração 26 provetes do material constituinte da telha no Laboratório de Materiais, tendo-se obtido as suas propriedades resistentes e elásticas.

Posteriormente montou-se todo o conjunto para ensaio desde os perfis de montagem, apoios, tirantes, telhas e costuras. Após isso colocaram-se por cima sacos preenchidos com areia para distribuição de carga a meio vão. Por último carregaram-se as estruturas verificando-se as maiores deformações junto dos apoios e algumas nas almas das telhas.

Por último fabricaram-se cofragens dos topos para os ensaios de compressão dos perfis de eixo reto, seguido da respetiva betonagem dos mesmos.

Após conclusão dos ensaios previstos, obtiveram-se os diagramas tensão/extensão do material que permitiram a análise dos dados do ensaio de conjunto e gráficos força/deslocamento, tensão/extensão e momento/curvatura, que mostram o comportamento da estrutura face à carga aplicada.

Sublinha-se que os resultados experimentais evidenciaram claramente, para além das deformações plásticas que levam a telha à rotura, os fenómenos de instabilidade local característicos deste tipo das estruturas de parede fina.

Durante ambos os ensaios de conjunto evidenciaram-se deformações nas extremidades junto dos apoios que, neste caso com carga concentrada a $\frac{1}{2}$ vão, não se revelaram relevantes para a rotura do conjunto. Quando sujeito à ação do vento, em que não há nenhum tipo de carga localizada como a dos ensaios, estas deformações podem ter um papel decisivo na capacidade resistente.

Concluiu-se também que, apesar da perda de rigidez devido a deformações localizadas, o funcionamento em conjunto assegura a estabilidade da estrutura.

Por último constatou-se também que apesar da perda de rigidez devido às deformações localizadas, o funcionamento em conjunto assegura a estabilidade da estrutura.

6.1 Desenvolvimentos futuros

Tendo este trabalho sido desenvolvido em parceria com a empresa “Blocotelha” é relevante mencionar que, a partir da experiência e dos resultados obtidos, sugerir alguns temas para investigação no futuro.

Em primeiro lugar refira-se que o facto de se tratar de uma secção com muitos reforços, o que lhe confere uma grande rigidez e previne os modos de instabilidade da secção, contribuiu para que o ensaio de compressão dos perfis de eixo reto não pudesse ser completado. Ficam disponíveis estes ensaios, com vista à análise dos modos de instabilidade desta secção em particular.

Observou-se no ensaio de conjunto que apenas o modo distorcional com o movimento/rotação das extremidades da telha em 3 semi-ondas que interagem com o modo global.

Um tema relevante de análise para o futuro seria estudar a otimização da geometria da secção que resultasse em economia de material e processo de fabrico.

Requer também um estudo mais aprofundado e pormenorizado as tensões e deformações que ocorrem nas proximidades dos apoios.

Outro assunto com importância para estudo, seria a análise numérica e experimental desta

secção face à ação do vento, apesar da complexidade de reproduzir esta carga em ambiente laboratorial.

Dadas estas dificuldades, os ensaios qualitativos com cargas distribuídas por toda a superfície da telha, seriam de grande utilidade, embora não se conseguísse fazer uma análise quantitativa de tensões e deformações.

As ligações das telhas aos apoios longitudinais e entre as próprias chapas revelam-se também um potencial alvo de estudo, pelo facto de serem as portadoras das deformações mais elevadas.

Por último destaca-se o estudo da ação do vento em caso de sucção devido a provocar um momento negativo localizado, visto que a secção da telha está idealizada de forma a suportar momentos positivos.

Bibliografia

1. Santos, F. and L.S. Silva, *Manual de Execução de Estruturas Metálicas*, ed. CMM. 2011.
2. Bergfelt, A., B. Edlund, and H. Larsson, *Experiments on trapezoidal steel sheets in bending. Proceedings of the Third International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, November, 1975.*
3. Bernard, E.S., R.Q. Bridge, and G.J. Hancock, *Intermediate Stiffeners in Cold-Formed Profiled Steel Decks. Part 1: "V" Shaped Stiffeners, Research Report n° 653, Center for Advanced Structural Engineering, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, April, 1992.*
4. Bernard, E.S., R.Q. Bridge, and G.J. Hancock, *Intermediate Stiffeners in Cold-Formed Profiled Steel Decks. Part 2: "Flat Hat" Shaped Stiffeners, Research Report n° 658, Center for Advanced Structural Engineering, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, August, 1992.*
5. Bernard, E.S., R.Q. Bridge, and G.J. Hancock, *Intermediate Stiffeners in Cold-Formed Profiled Steel Decks. Part 3: Condeck Rolled Panels, Research Report n° 674, Center for Advanced Structural Engineering, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, March, 1993.*
6. Bernard, E.S., R.Q. Bridge, and G.J. Hancock, *Intermediate Stiffeners in Cold-Formed Profiled Steel Decks. Part 4: Bondeck Rolled Panels, Research Report n° 675, Center for Advanced Structural Engineering, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, March, 1993.*
7. Bernard, E.S.B., R.Q. and G.J. Hancock, *Design of Decking Panels with Intermediate Stiffeners, Research Report n° 676, Center for Advanced Structural Engineering, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, March, 1993.*
8. *AISI S100-12, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.*
9. CEN, *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-3. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.* 2004, European Committee for Standardisation. p. 134.

10. Papazian, R.P., R.M. Schuster, and M. Sommerstein, *Multiple Stiffened Deck Profiles, Twelfth Internacional Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis , Missouri, USA, October 18-19, 1994, pp. 217-228. .*
11. Landolfo, R. and F.M. Mazzolani, *Ultimate Behaviour of Trapezoidal Steel Sheets in Bending, Twelfth Internacional Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis , Missouri, USA, October 18-19, 1994, pp. 205-215. .*
12. Fonseca, N.D.R., *Avaliação do comportamento teórico e experimental em provetes de telhas metálicas autoportantes submetidas à flexão. Dissertação de Mestrado. E.E./UFRGS, Porto Alegre, 2000.*
13. Mezzomo, G., *Análise Estrutural de Telhas de Aço Trapezoidais Formadas a Frio.* 2007, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 183.
14. Biegus, A. and D. Czepizac, *Experimental investigation on combined resistance of corrugated sheets with strengthened cross-section under bending and concentrated load, Thin-Walled Structures, 46, 2008, pp. 303-309.*
15. *ABAQUS, 3DS Dassault Systèmes.*
16. Biegus, A. and D. Czepizac, *Research on the interactive resistance of corrugated sheets under combined bending and contact pressure, Thin-Walled Structures, 44, 2006, pp. 825-831.*
17. Jorgenson, J.L. and A.H. Chowdhury, *Proceedings of the Sixth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, November, 1982.*
18. Lecce, M., *Distortional Buckling of Stainless Steel Sections, PhD Thesis, Department of Civil Engineering University of Sydney Australia, 2006.*
19. Caramelli, S., P. Croce, and W. Salvatore *Multiple stiffened cold-formed steel profiles for cylindrical vault roofing systems Journal of Constructional Steel Research 57, 2001. 24.*
20. Mezzomo, G.P., *Verificação Teórica e Experimental do Comportamento de Telhas Trapezoidais de Aço Formadas a Frio.* 2004, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 29.
21. Castelani, T., *Otimização e Dimensionamento de Perfis Formados a Frio pelo Método da Resistência Direta.* 2012, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre. p. 111.
22. Veríssimo, H., *Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio de acordo com o Eurocódigo 3* 2008, Instituto Superior Técnico: Lisboa. p. 270.
23. Yu, W. *Cold-Formed Steel Design (3rd Edition).* 2000. 462.

24. Simões, R., *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas*. 2nd ed. 2007, Coimbra: CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. 221.
25. CEN, *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5. Plated structural elements*. 2006, European Committee for Standardisation. p. 56.
26. *Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios* in *Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios* 2010: Portugal. p. 116.
27. ISO6892-1:2009, *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*. 2009.
28. Lopes, T., *Análise Estrutural de Telha de Aço Autoportante*. 2014, Instituto Politécnico de Leiria.

Anexo A

A.1 Resultados do Ensaio de Tração - Propriedades Resistentes

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura		Espessura
	12.6	x	1.25
	12.5	x	1.25
	12.6	x	1.25

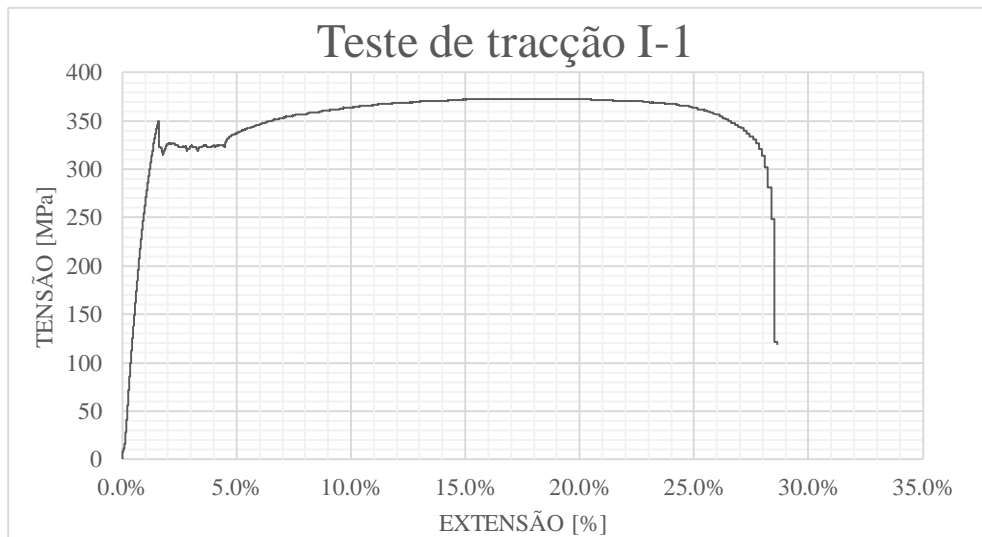
Média: 12.57 x 1.25 = 15.70833333 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 350.04 MPa

Tensão última: 372.95 MPa



Nota: Forças estimadas

	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 10:12

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	12.45		1.25
	12.5		1.25
12.45	1.25		

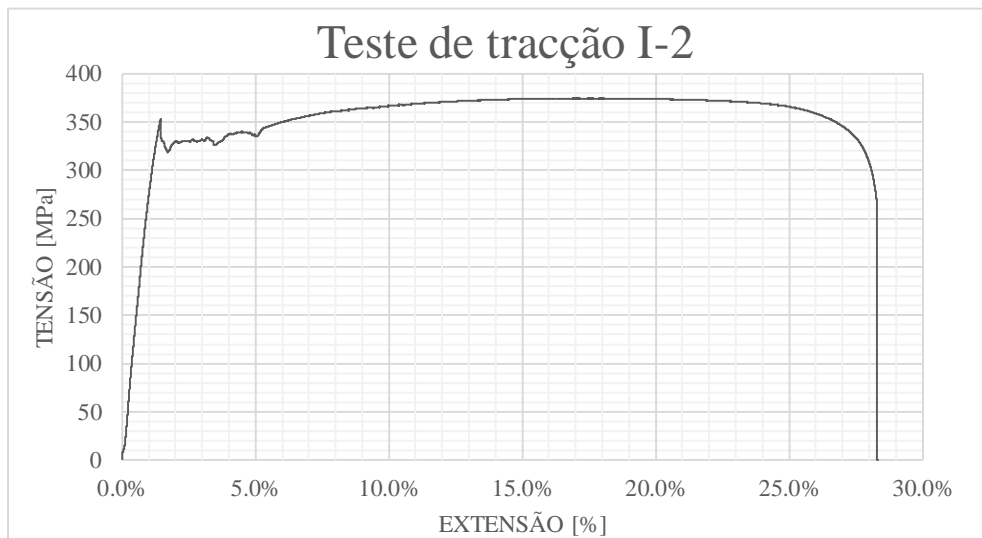
Média: 12.47 x 1.25 = 15.58333333 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 353.44 MPa

Tensão última: 374.36 MPa



	Forças estimadas	
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 10:47

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	<input type="text" value="12.45"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.6"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.5"/>		<input type="text" value="1.25"/>

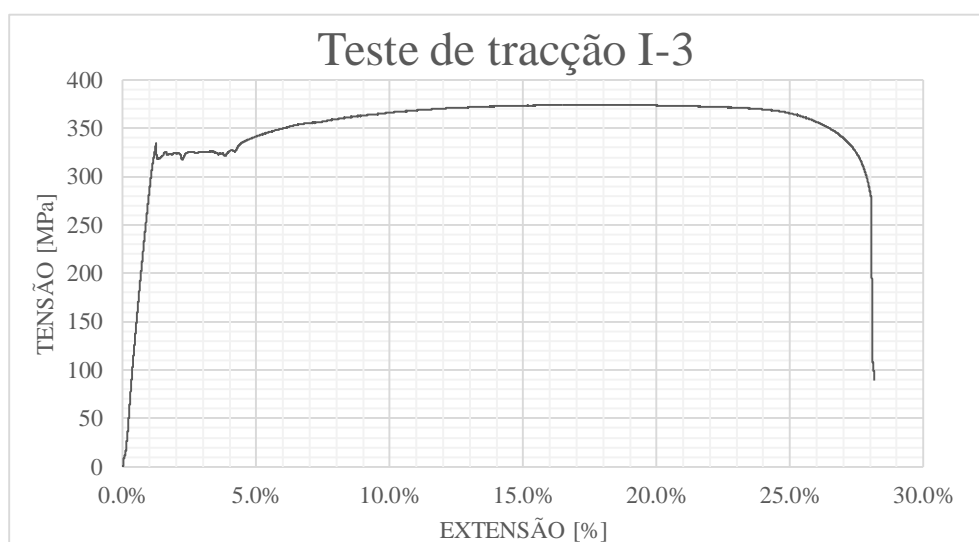
Média: 12.52 x 1.25 = 15.64583333 mm²

Testing rate: 0.675 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 334.12 MPa

Tensão última: 374.23 MPa



Nota: Forças estimadas	
Cedência	Rotura
Tipo 1 3906N	5156N
Tipo 2 6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 11:20

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	12.45		1.25
	12.4		1.25
	12.45		1.25

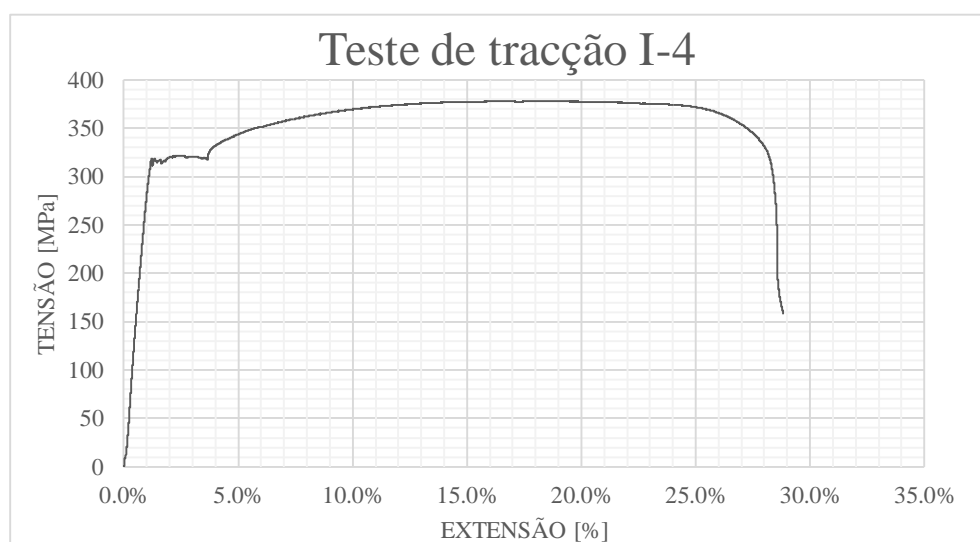
Média: 12.43 x 1.25 = 15.54166667 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 318.89 MPa

Tensão última: 377.96 MPa



Nota:	Forças estimadas	
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 11:53

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espeçura
	12.5		1.25
	12.5		1.25
	12.5	x	1.25

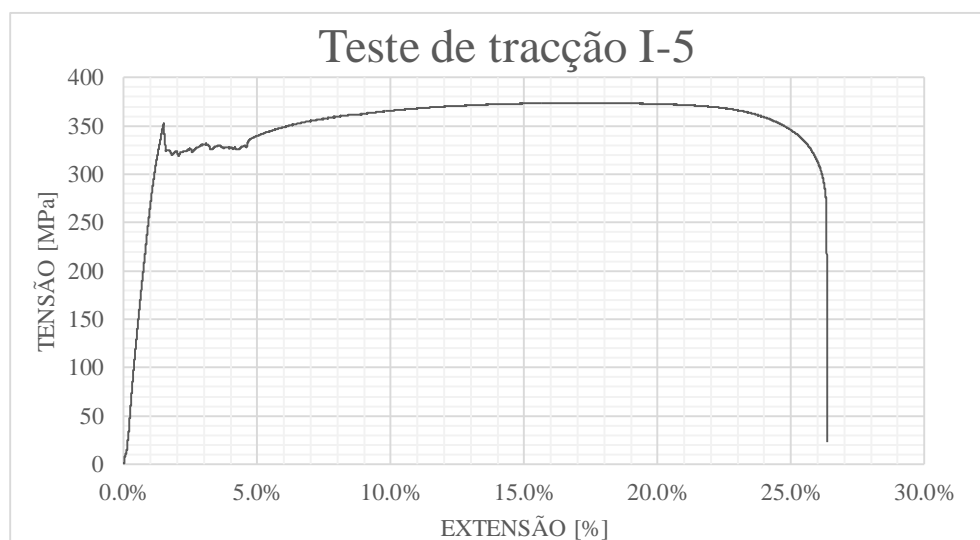
Média: 12.5 x 1.25 = 15.625 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 350.28 MPa

Tensão última: 373.63 MPa



Nota: Forças estimadas	Cedência	Rotura
	Tipo 1	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 12:25

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime: Tipo:

Nome do ficheiro: Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	12.45		1.25
	12.5		1.25
	12.45	x	1.25

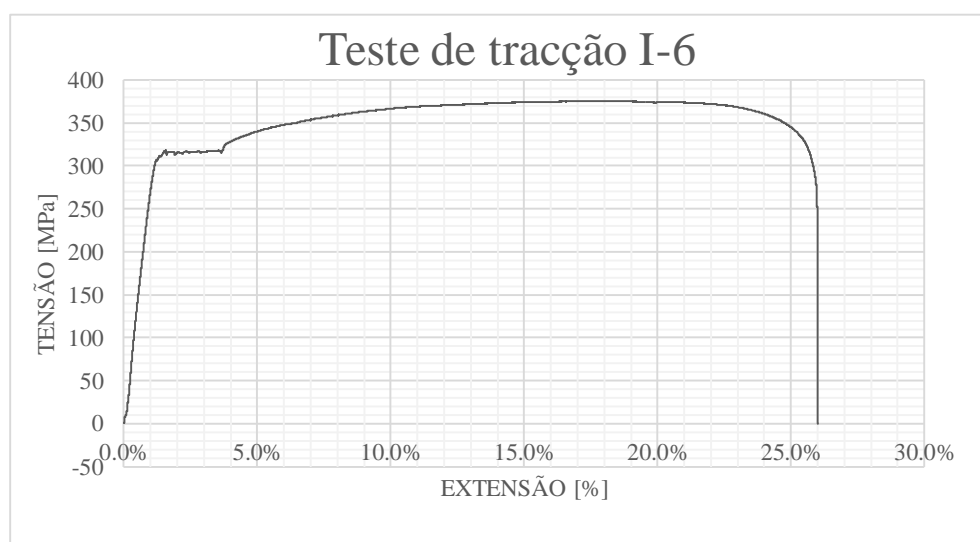
Média: 12.47 x 1.25 = 15.58333333 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 317.92 MPa

Tensão última: 375.2 MPa



Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 12:55

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	<input type="text" value="12.45"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.5"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.45"/>	x	<input type="text" value="1.25"/>

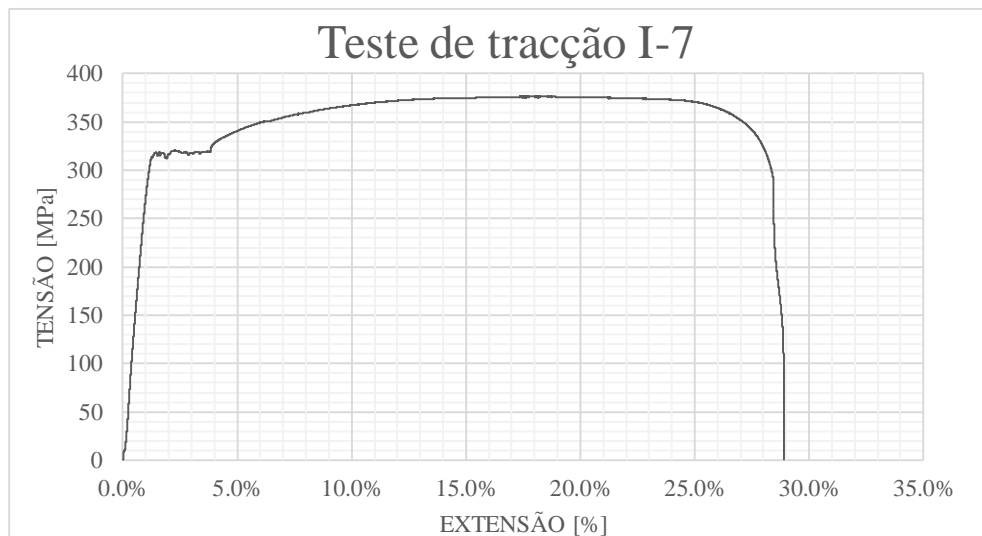
Média: 12.47 x 1.25 = 15.58333333 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 318.92 MPa

Tensão última: 376.12 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 13:30

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	<input type="text" value="12.45"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.45"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.45"/>	x	<input type="text" value="1.25"/>

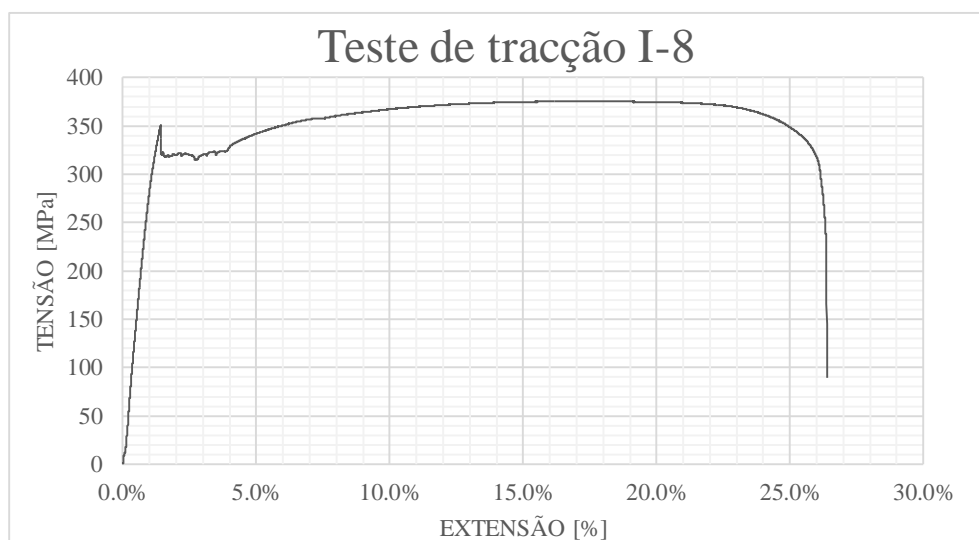
Média: 12.45 x 1.25 = 15.5625 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 350.2 MPa

Tensão última: 375.42 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 14:01

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	12.45		1.25
	12.45		1.25
	12.5		1.25

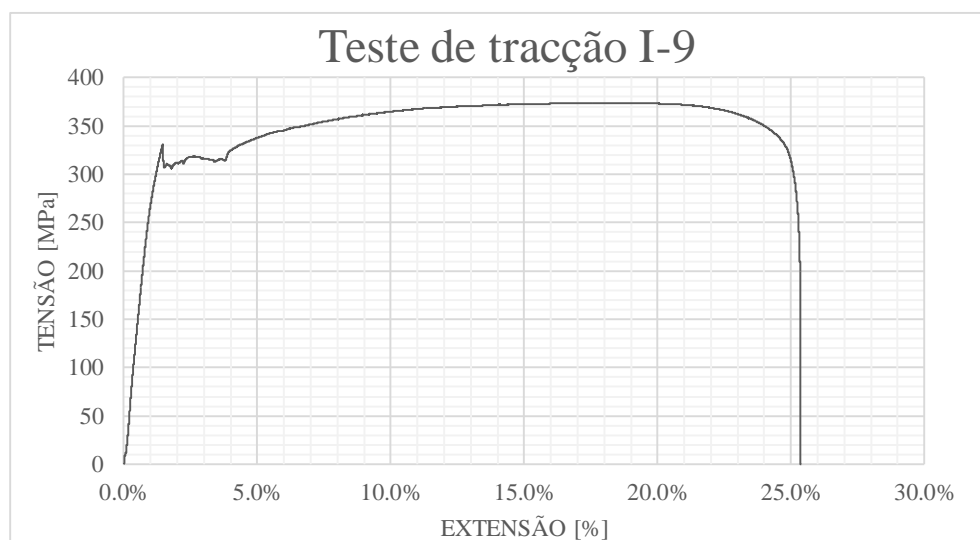
Média: 12.47 x 1.25 = 15.58333333 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 330.36 MPa

Tensão última: 373.91 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 14:30

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	<input type="text" value="12.45"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.45"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="12.45"/>	x	<input type="text" value="1.25"/>

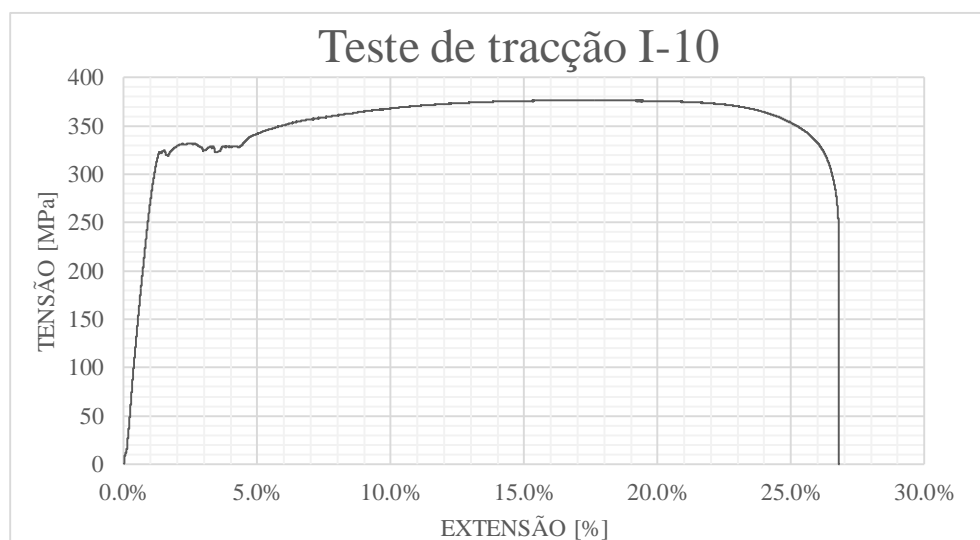
Média: 12.45 x 1.25 = 15.5625 mm²

Testing rate: 0.67500 mm/min / 0.01125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 324.42 MPa

Tensão última: 376.51 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 23/05/2014

Hora: 15:01

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	19.9		1.25
	19.9		1.25
	19.9		1.25

Média: 19.9 x 1.25 = 24.875 mm²

Ensaio inválido

Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: _____

Hora: _____

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	<input type="text" value="19.95"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="19.95"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="19.9"/>		<input type="text" value="1.25"/>

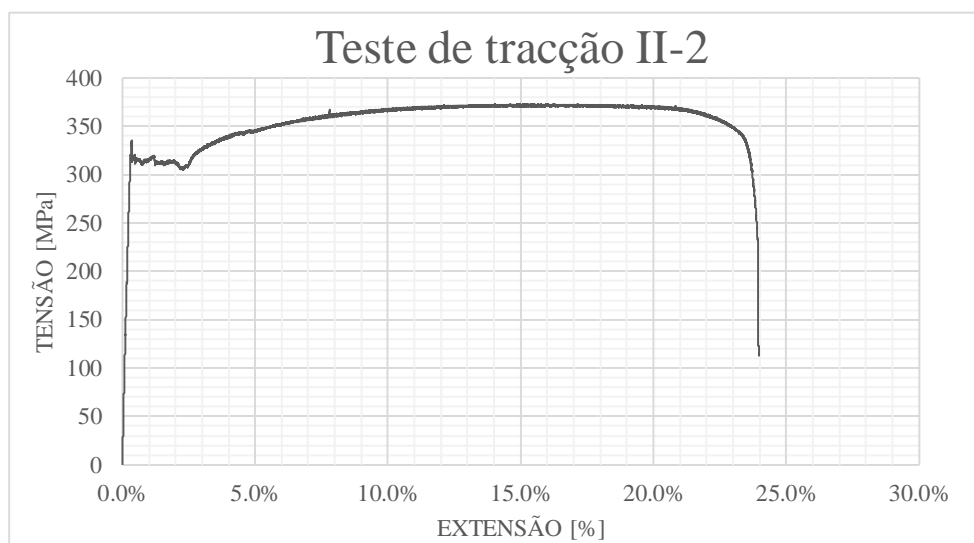
Média: 19.93 x 1.25 = 24.91666667 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 335.73 MPa

Tensão última: 373.44 MPa



Nota: Forças estimadas

	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 10:12:50

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	<input type="text" value="19.85"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="19.8"/>		<input type="text" value="1.25"/>
	<input type="text" value="19.85"/>		<input type="text" value="1.25"/>

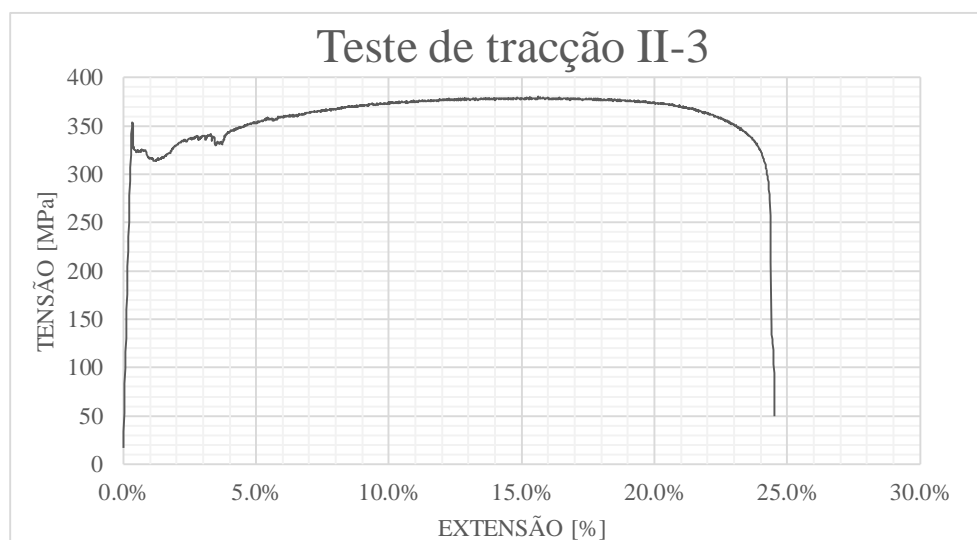
Média: 19.83333 x 1.25 = 24.79166667 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 353.69 MPa

Tensão última: 380.47 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 11:30:32

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime: Tipo:

Nome do ficheiro: Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	19.8		1.25
	19.75		1.25
	19.7	x	1.25

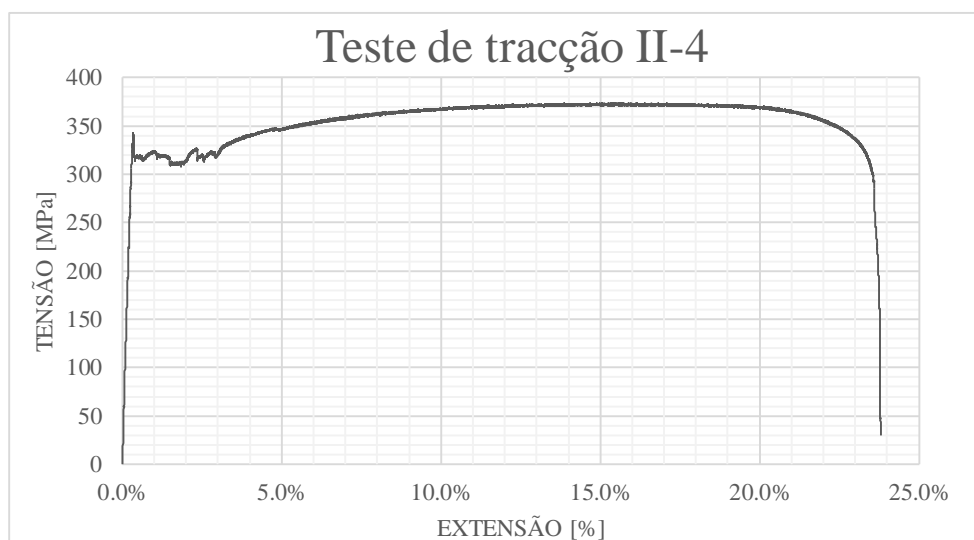
Média: 19.75 x 1.25 = 24.6875 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 342.70 MPa

Tensão última: 373.80 MPa



Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 11:37:19

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	19.85	x	1.25
	19.9	x	1.25
	19.85	x	1.25

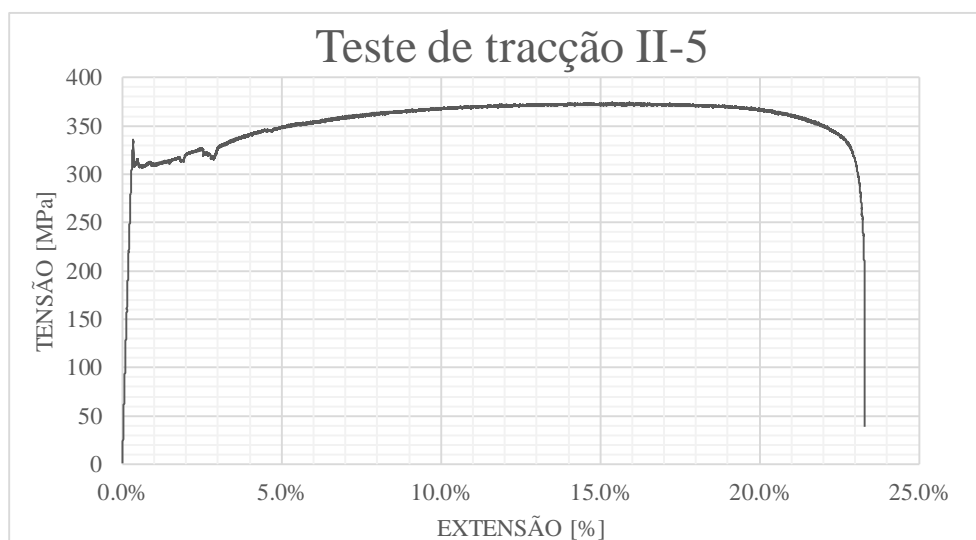
Média: 19.87 x 1.25 = 24.83333333 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 336.08 MPa

Tensão última: 374.36 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 12:13:38

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	19.85		1.25
	19.9		1.25
	19.9	x	1.25

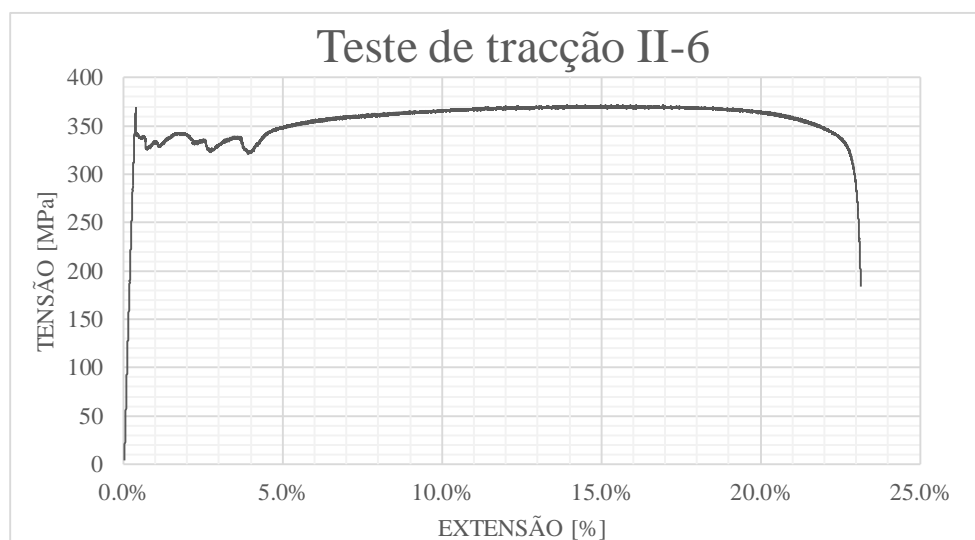
Média: 19.88 x 1.25 = 24.85416667 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 367.49 MPa

Tensão última: 371.70 MPa



Nota: Forças estimadas		
Cedência	Rotura	
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 13:56:51

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura		x	Espessura	
	19.85			1.25	
	19.8			1.25	
	19.8			1.25	

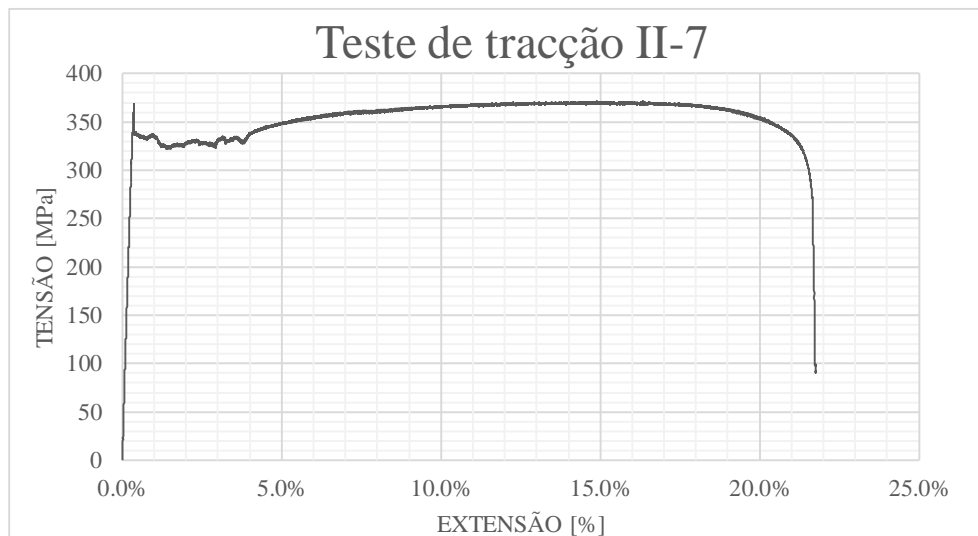
Média: 19.82 x 1.25 = 24.77083333 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 368.72 MPa

Tensão última: 371.28 MPa



Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 14:31:31

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

Área da secção:	Largura		x	Espessura	
	19.85			1.25	
	19.9			1.25	
	19.9			1.25	

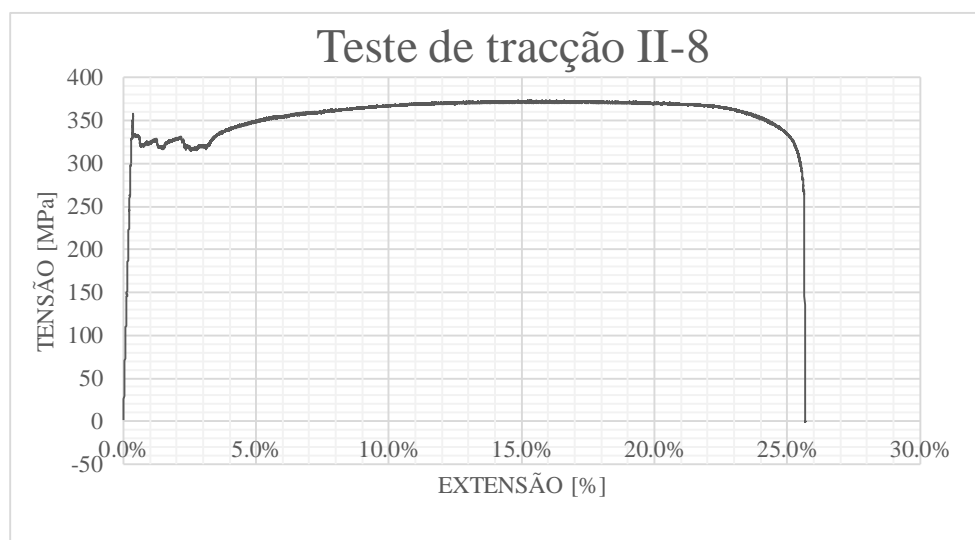
Média: 19.88 x 1.25 = 24.85416667 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 357.34 MPa

Tensão última: 373.53 MPa



Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 15:04:04

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime:

Tipo:

Nome do ficheiro:

Material: S250GD

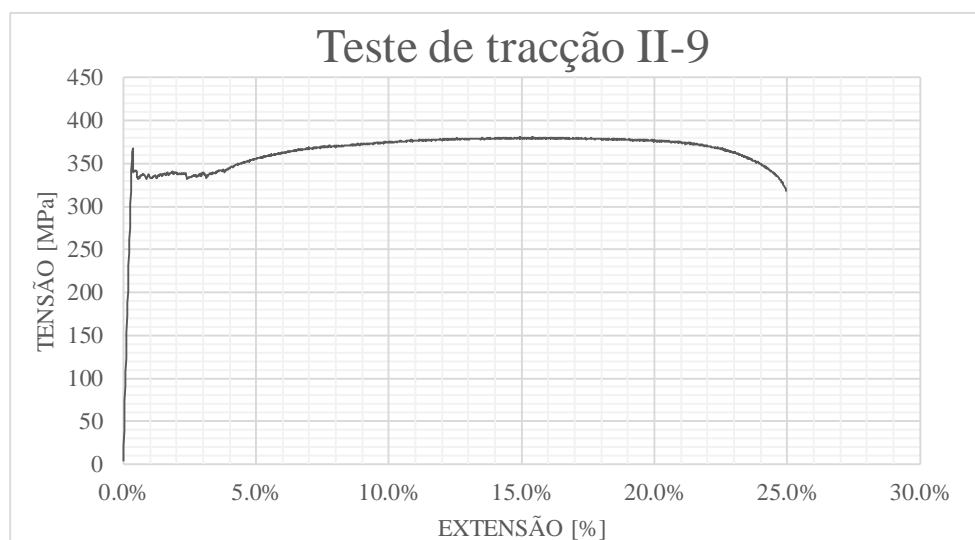
Área da secção:	Largura	x	Espessura	
	19.8	x	1.25	
	19.75	x	1.25	
	19.75	x	1.25	
Média:	19.77	x	1.25	= 24.70833333 mm ²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 367.61 MPa

Tensão última: 381.03 MPa



Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 11:18:59

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Relatório Ensaio de Tração de Provetes Metálicos

Nome do espécime: Tipo:

Nome do ficheiro: Material: S250GD

Área da secção:	Largura	x	Espessura
	19.85		1.25
	19.8		1.25
	19.9	x	1.25

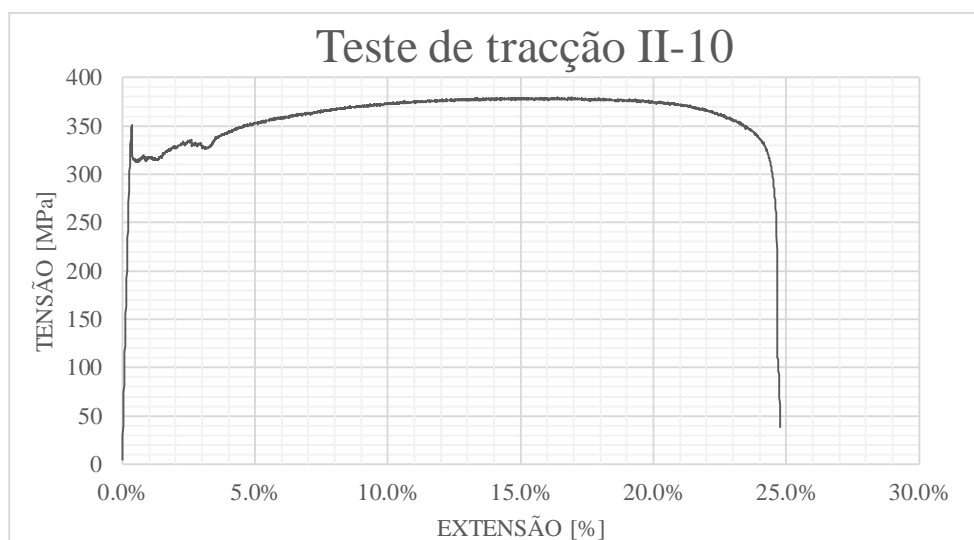
Média: 19.85 x 1.25 = 24.8125 mm²

Testing rate: 0.8475 mm/min / 0.014125 mm/seg (0.00025 s⁻¹ ±20%)

Comprimento de controlo: mm

Tensão de cedência: 350.95 MPa

Tensão última: 379.62 MPa



Nota: Forças estimadas		
	Cedência	Rotura
Tipo 1	3906N	5156N
Tipo 2	6250N	8250N

Nome: João Baptista

Data: 25/06/2014

Hora: 10:54:55

Ensaio realizado de acordo com a norma europeia EN ISO 6892-1:2009

Anexo B

B.1 Ensaio de conjunto 1

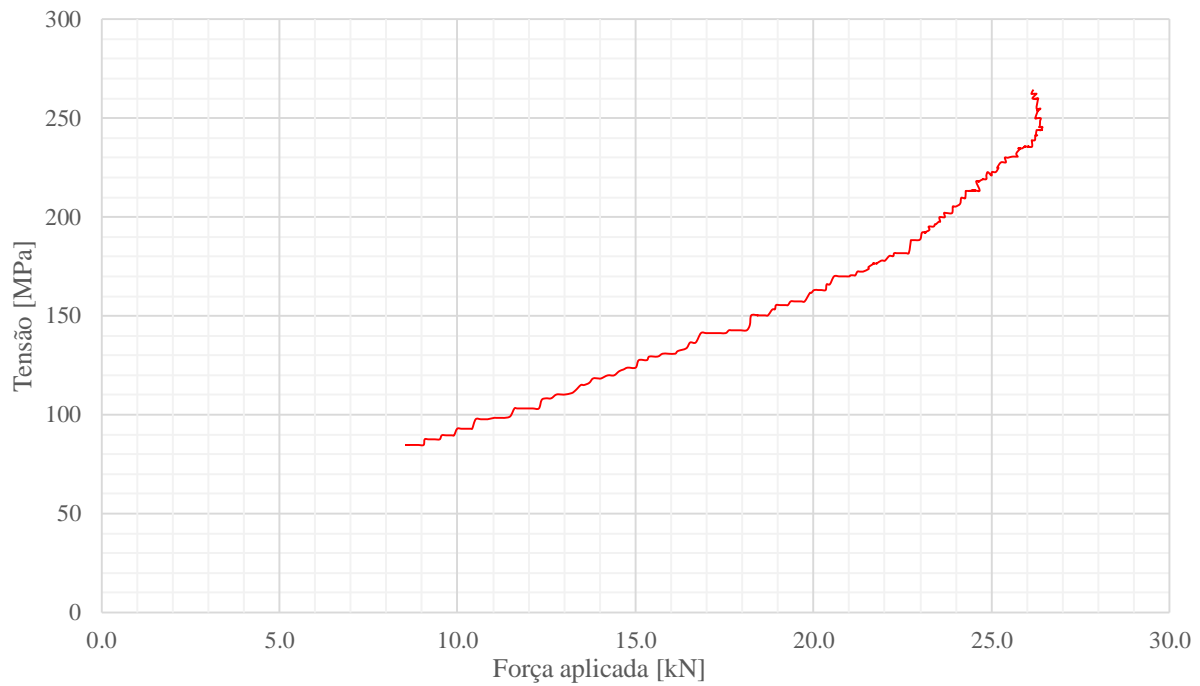


Gráfico B.1 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 2

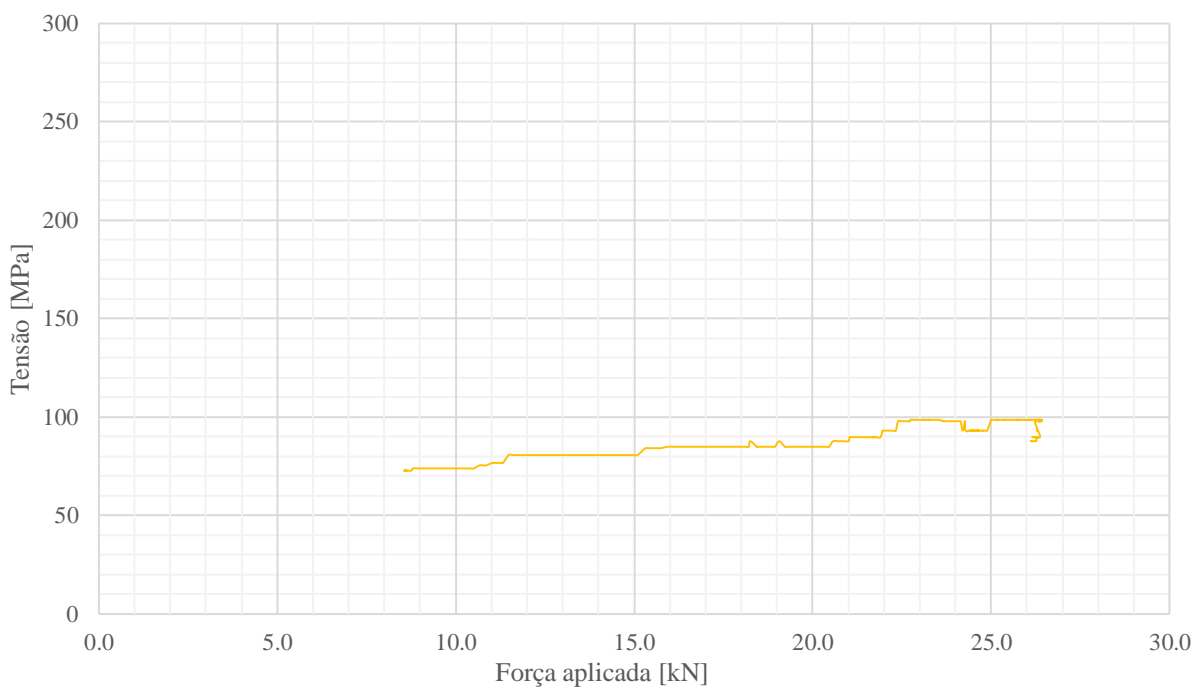


Gráfico B.2 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 3

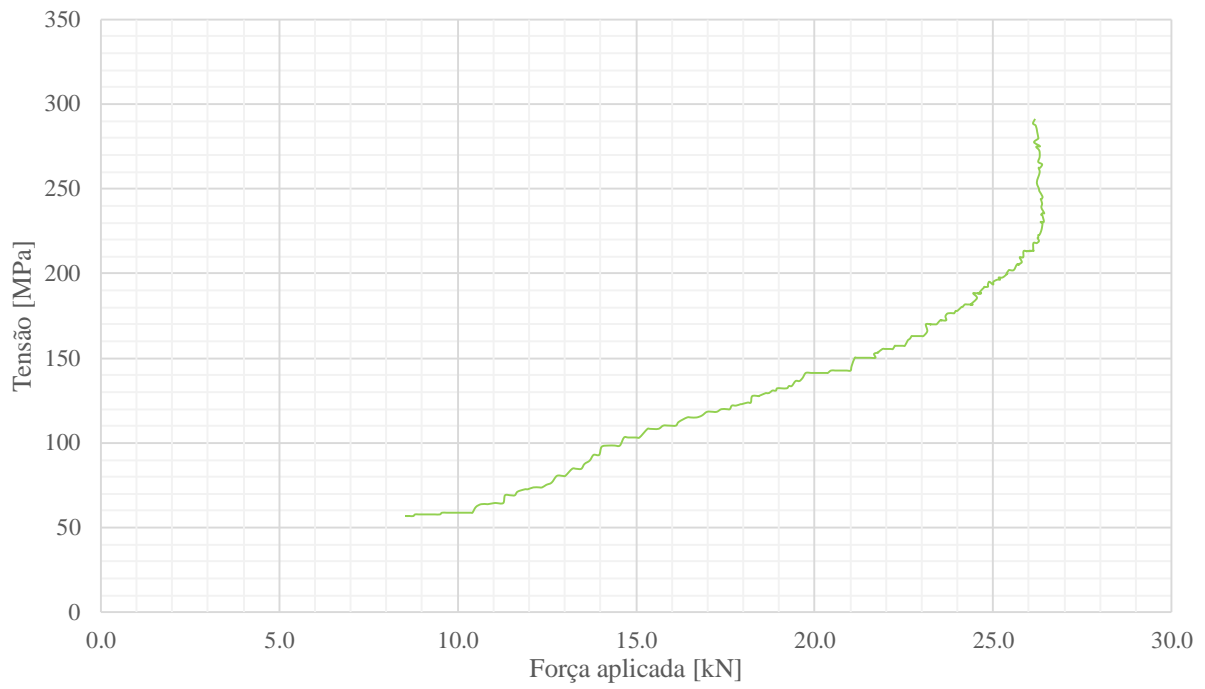


Gráfico B.3 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 4

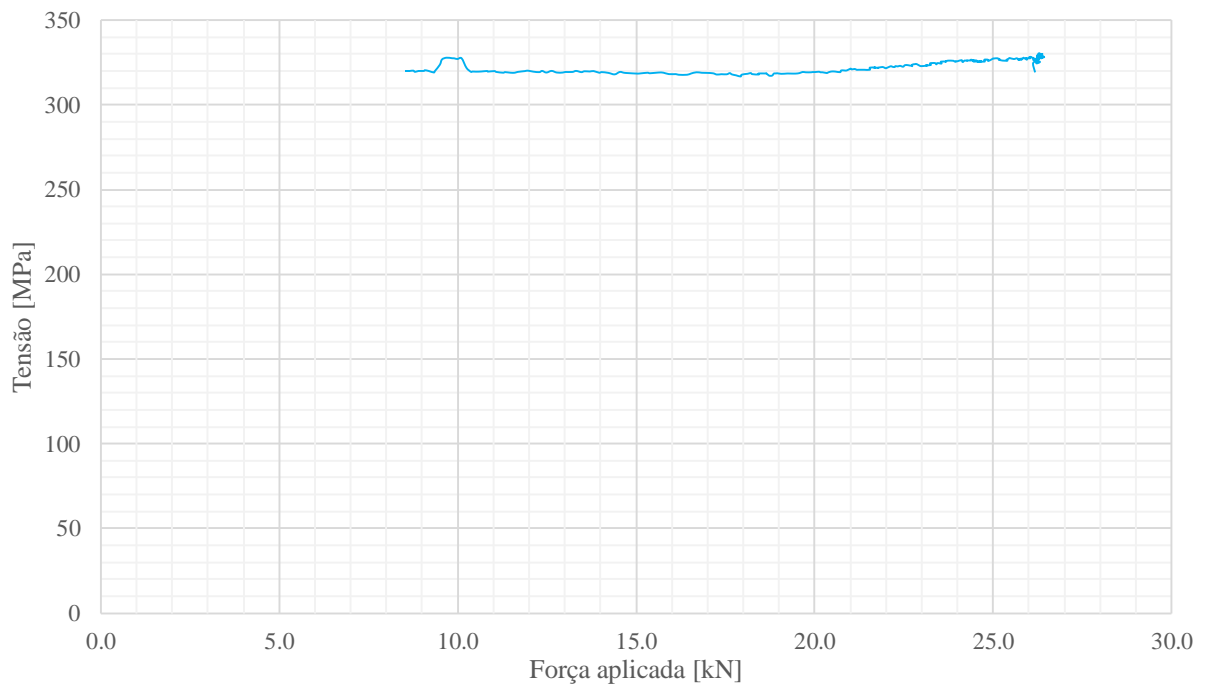


Gráfico B.4 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 5

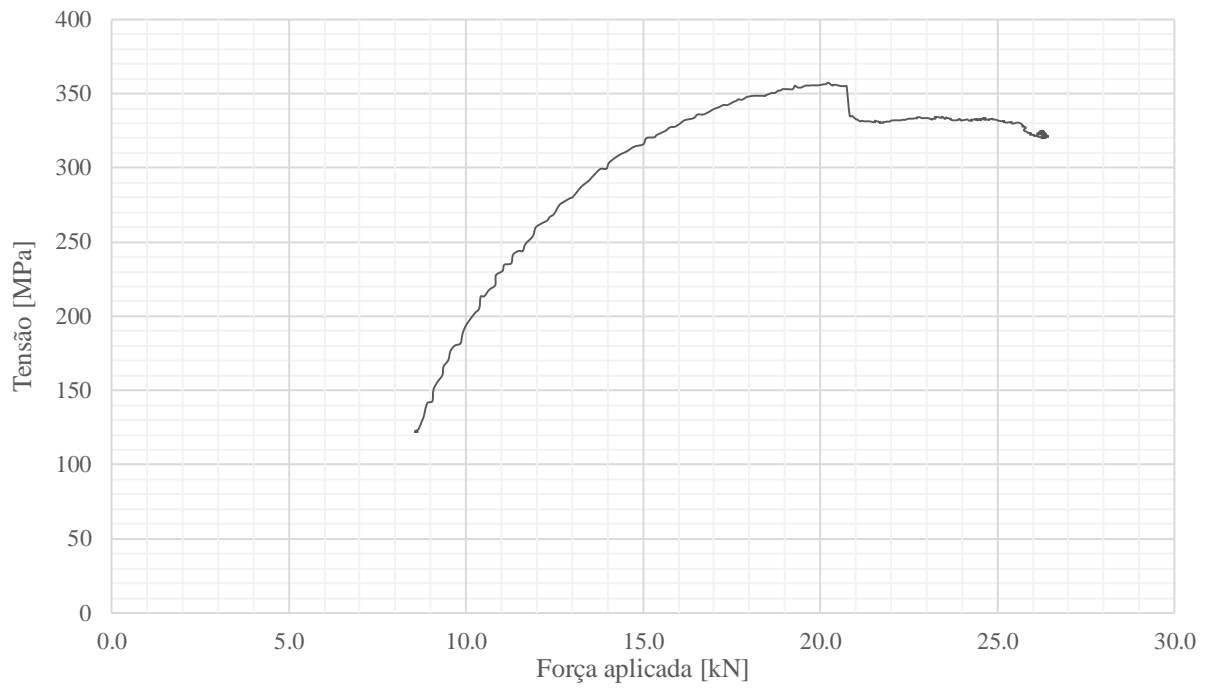


Gráfico B.5 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 6

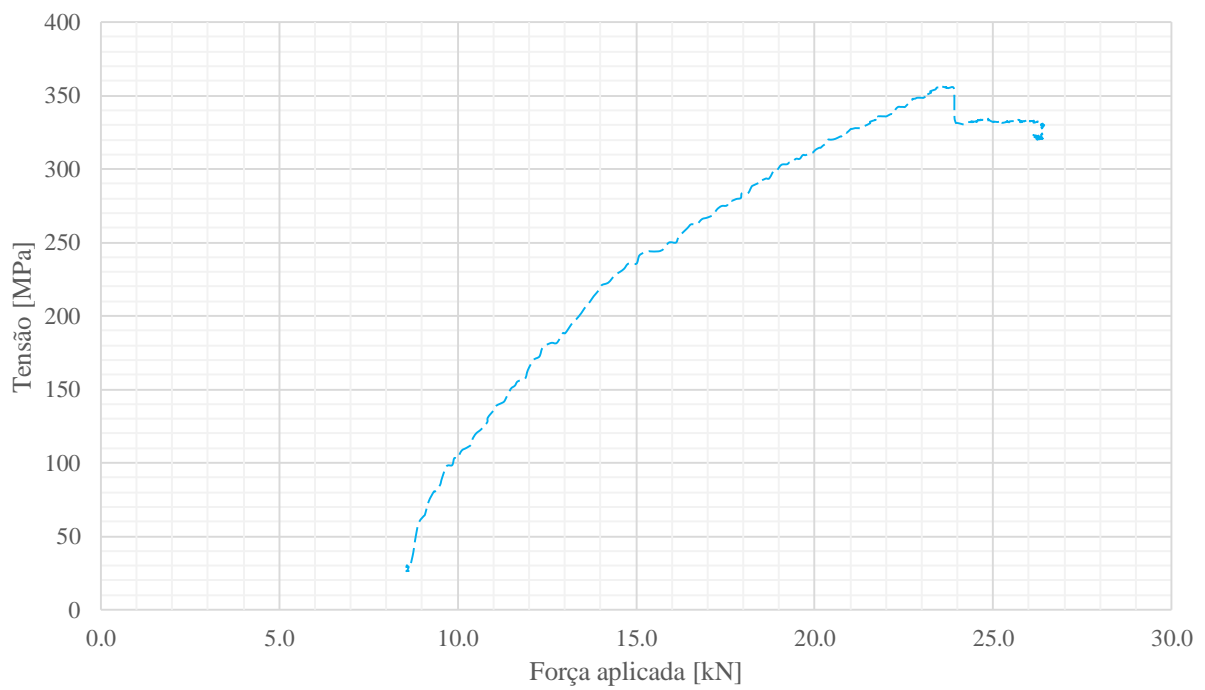


Gráfico B.6 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 7

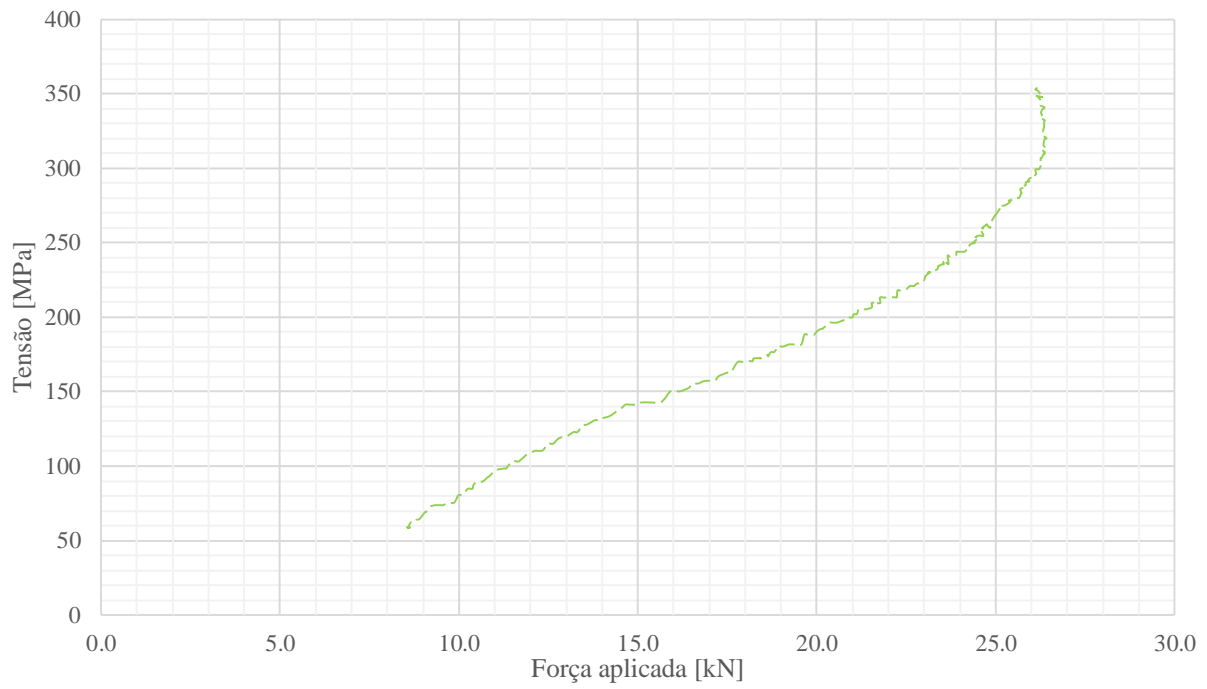


Gráfico B.7 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 8

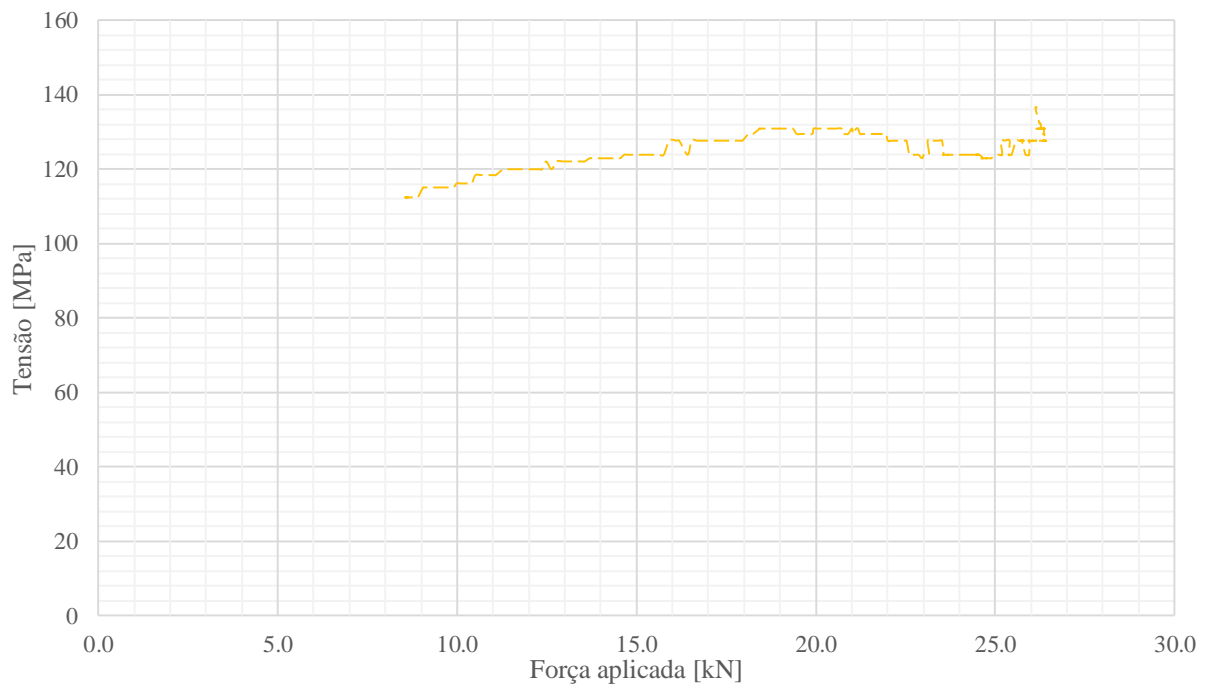


Gráfico B.8 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 9

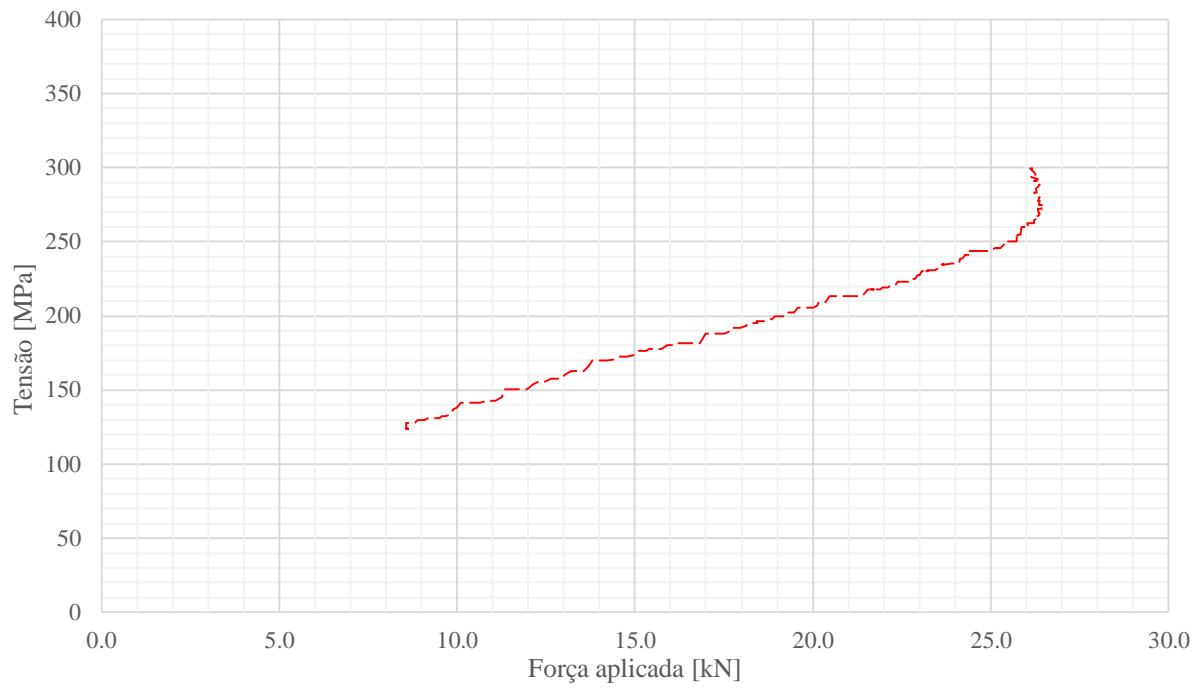


Gráfico B.9 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 10

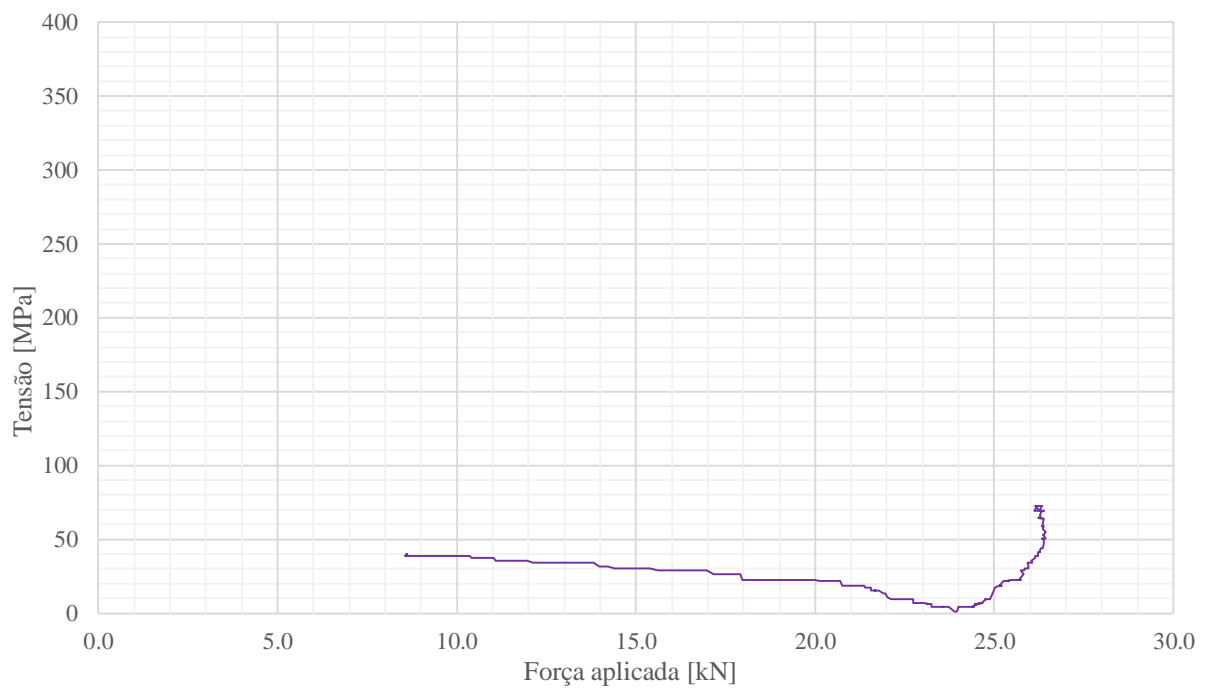


Gráfico B.10 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensómetro 12

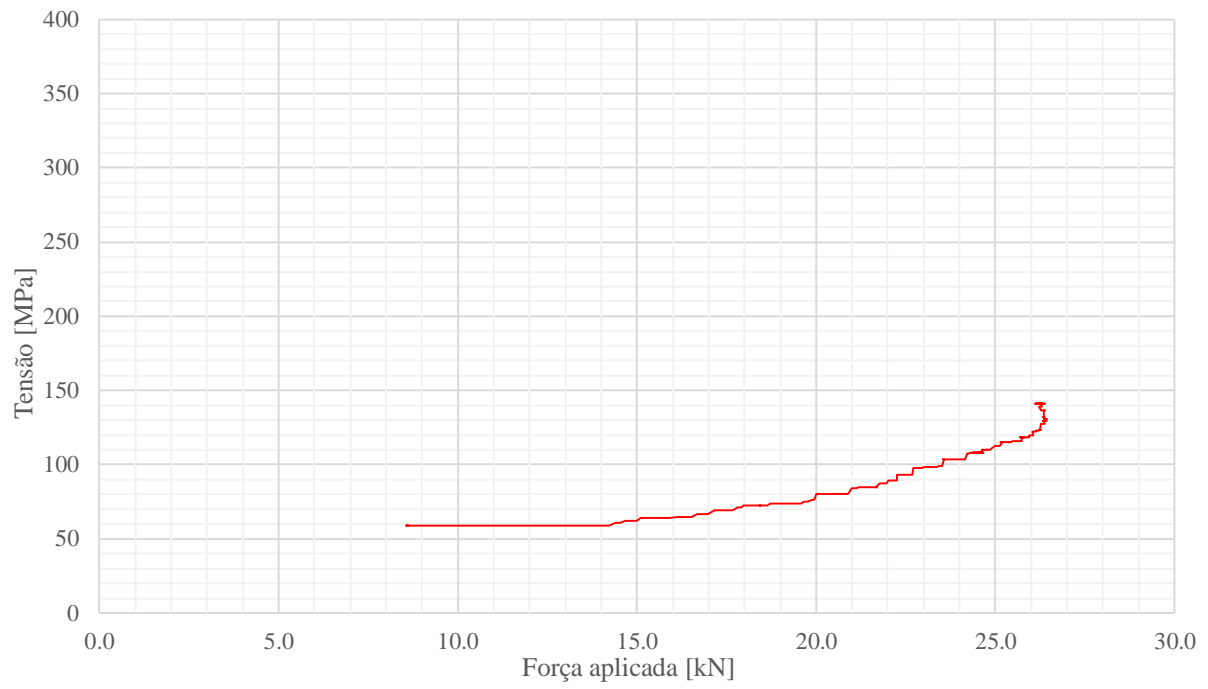


Gráfico B.11 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 13

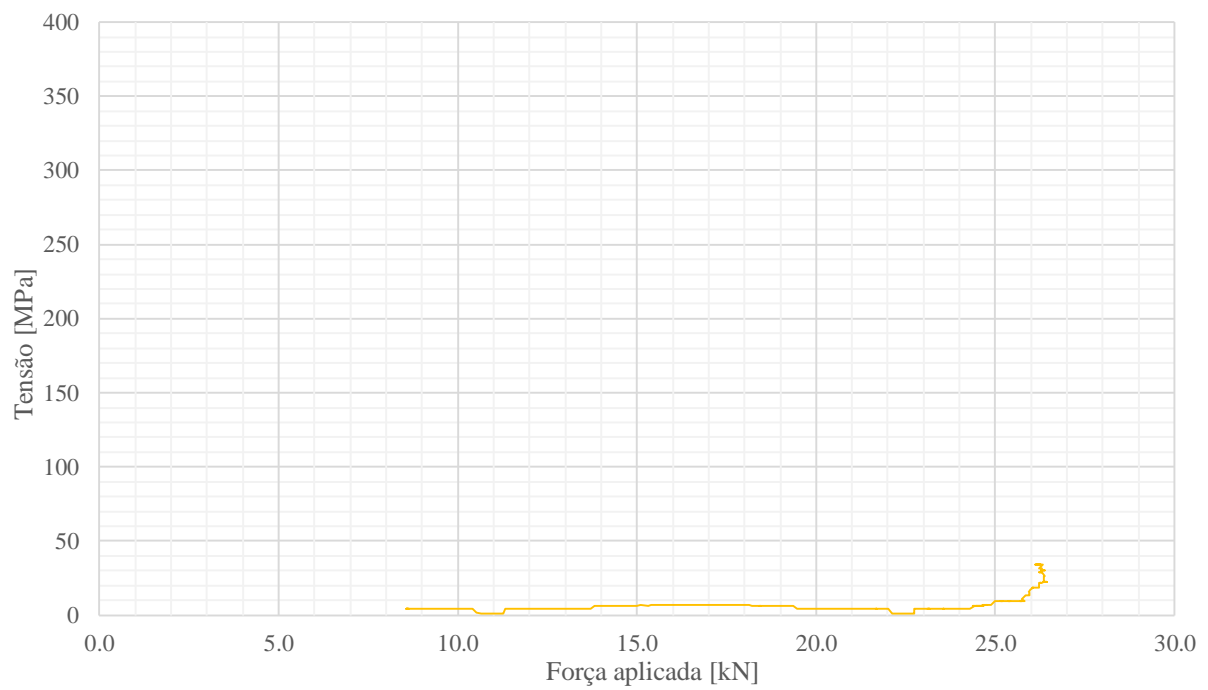


Gráfico B.12 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 14

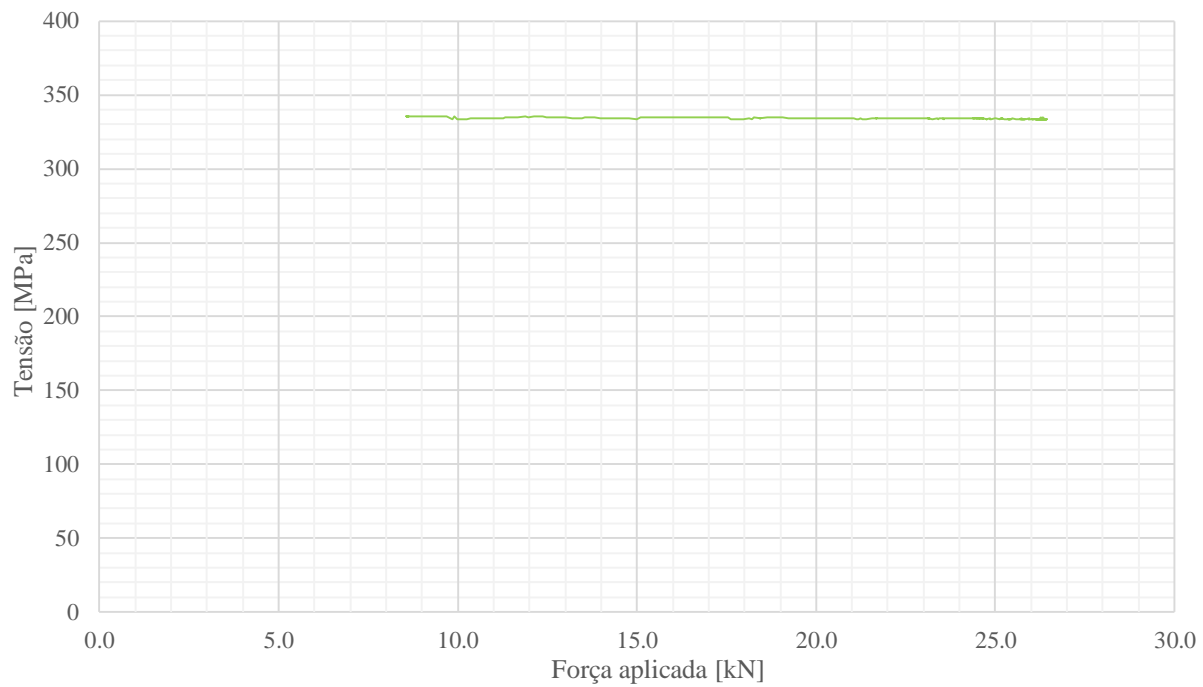


Gráfico B.13 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 15

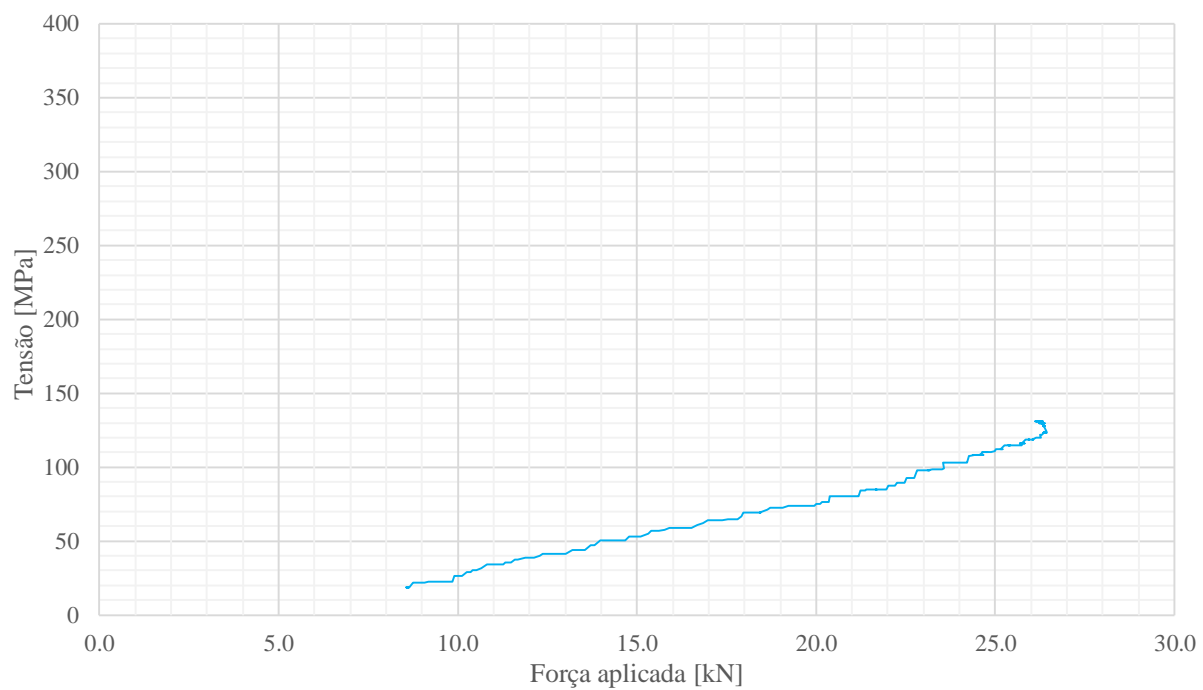


Gráfico B.14 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 16

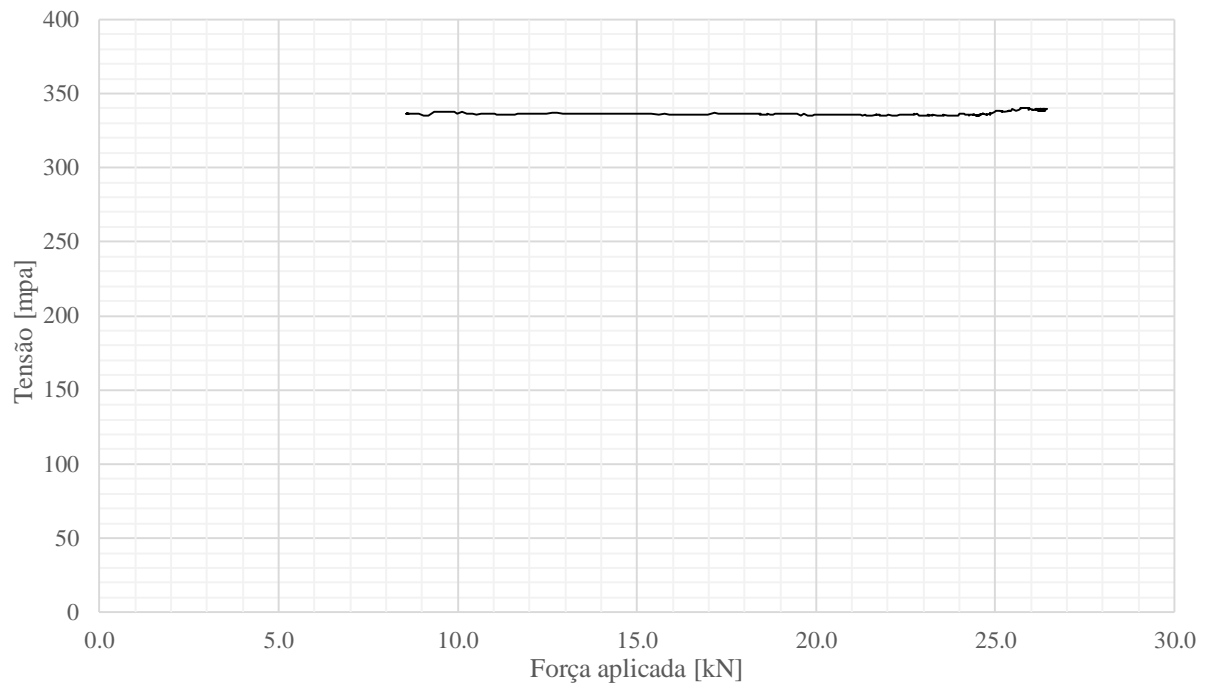


Gráfico B.15 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 17

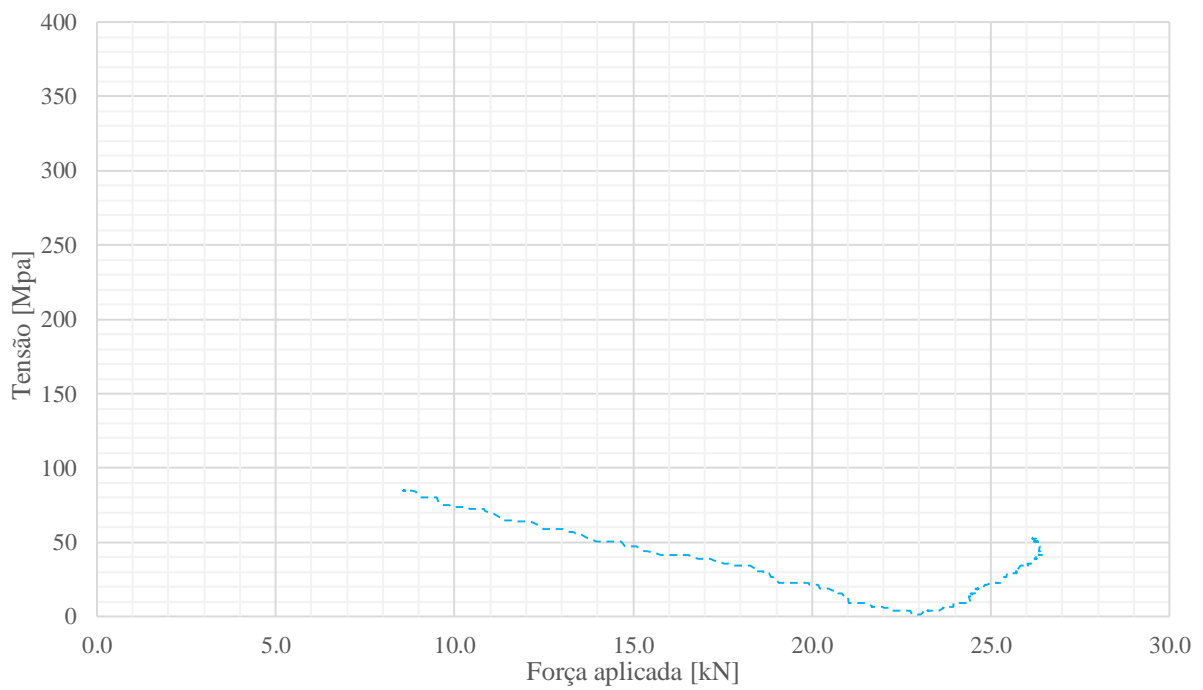


Gráfico B.16 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 18

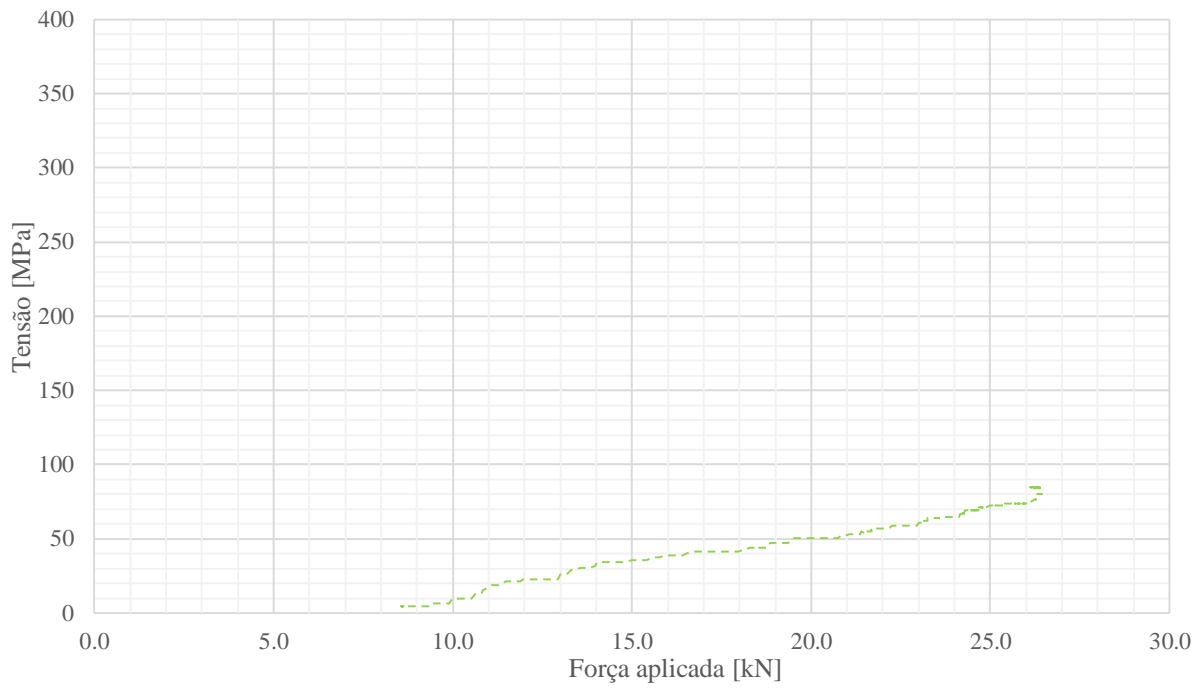


Gráfico B.17 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 19

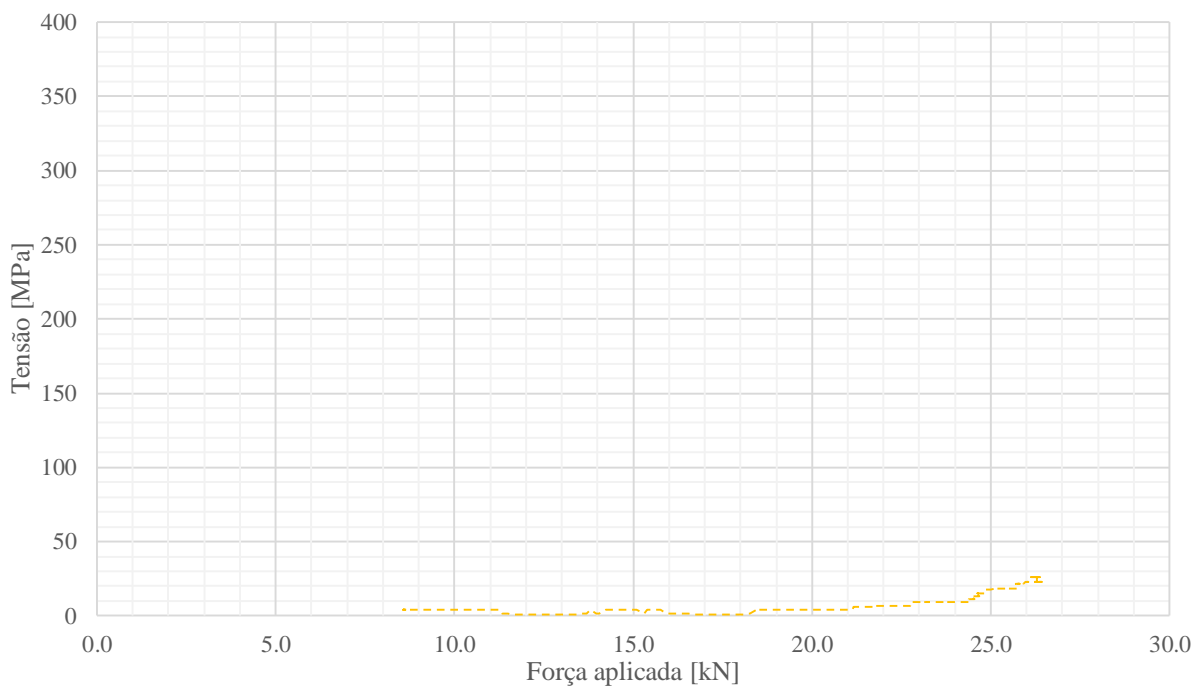


Gráfico B.18 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 20

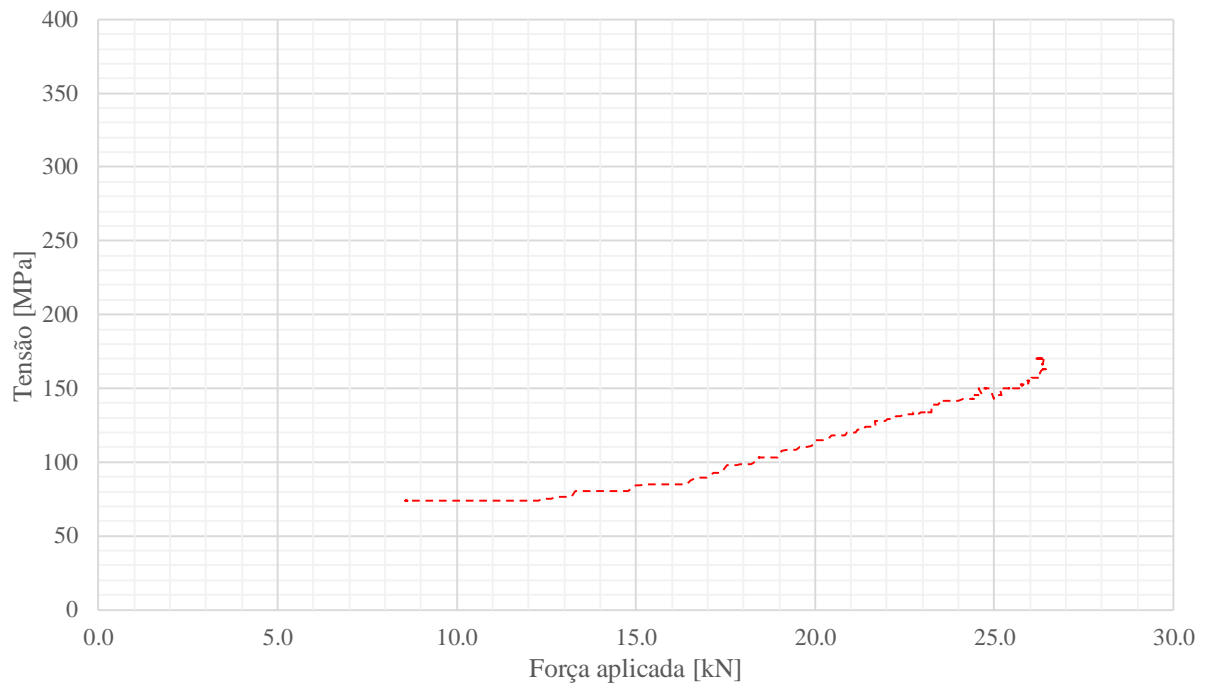


Gráfico B.19 – Curva Tensão/Força Aplicada do extensômetro 21

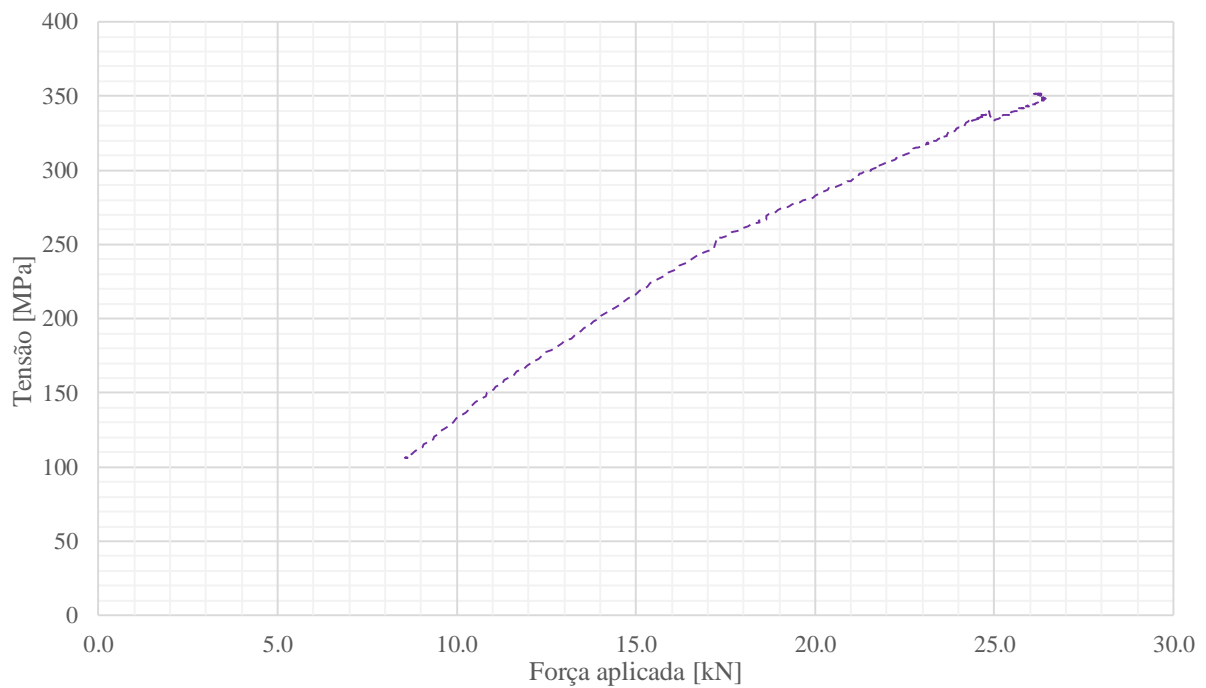


Gráfico B.20 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 23 (Tirante A)

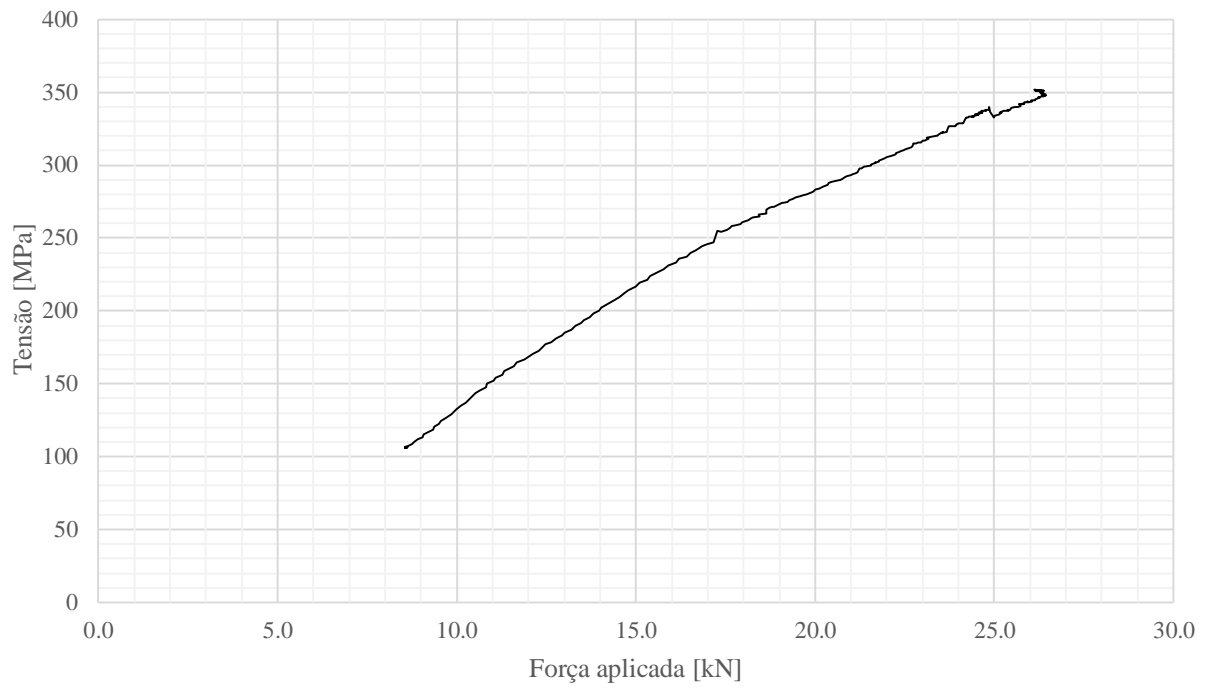


Gráfico B.21 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 24 (Tirante B)

B.2 Ensaio de conjunto 2

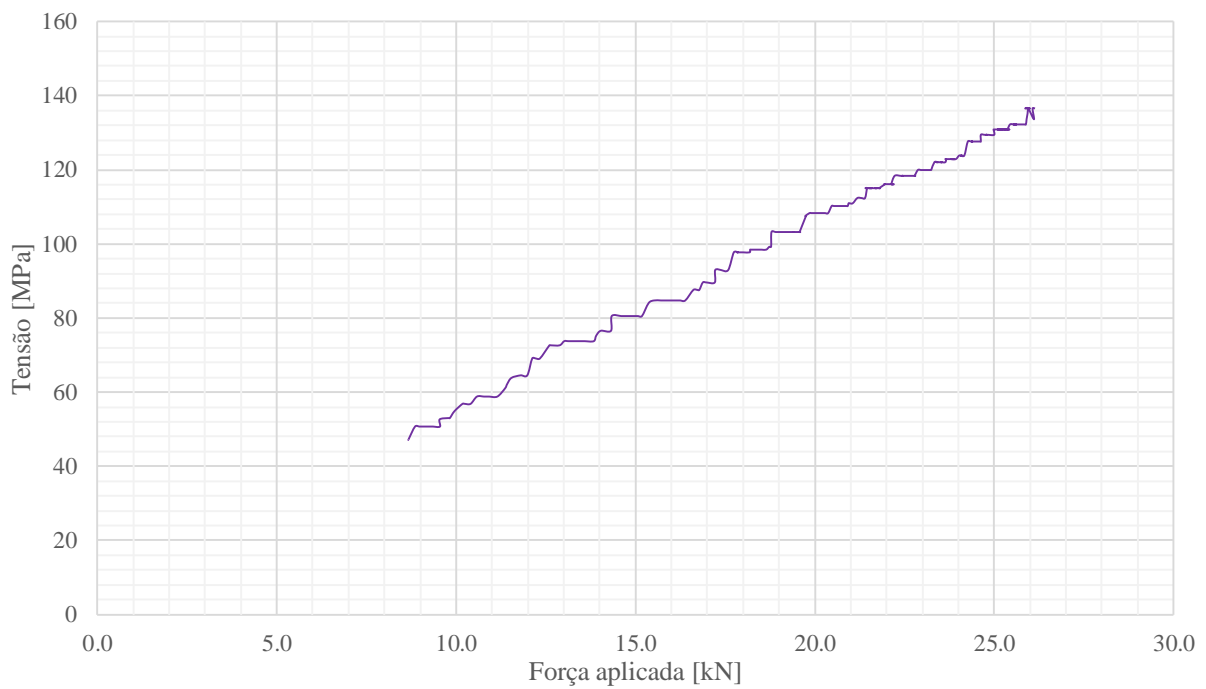


Gráfico B.22 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 1

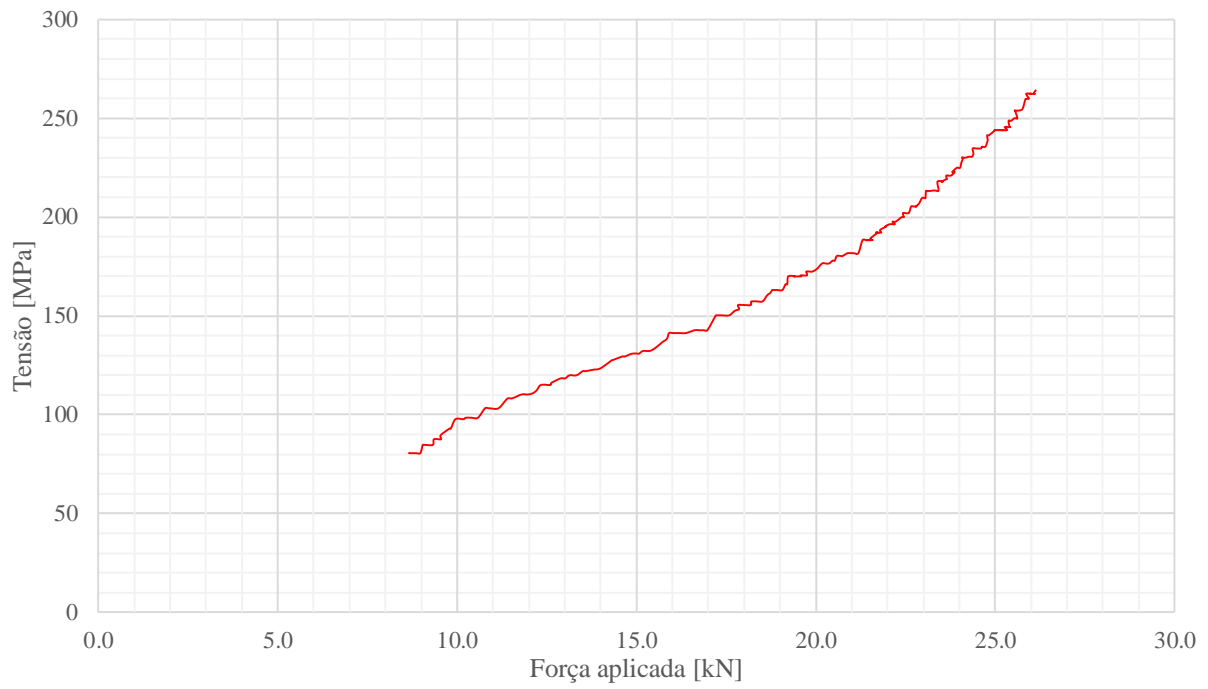


Gráfico B.23 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 2

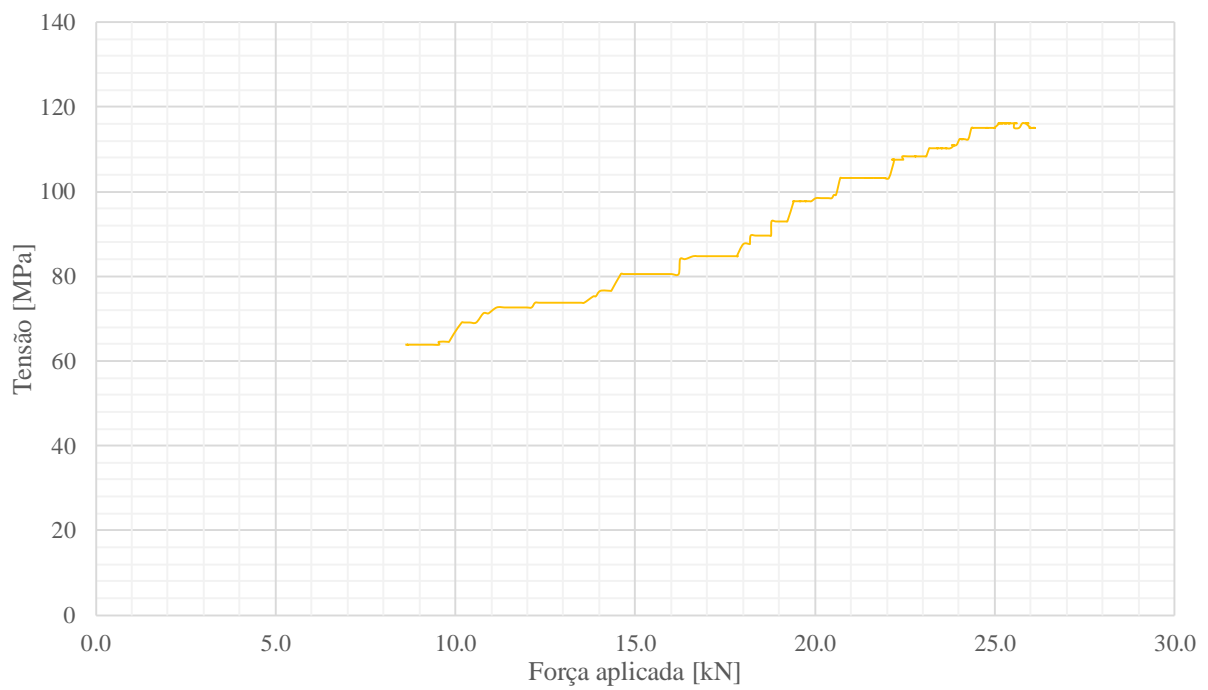


Gráfico B.24 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 3

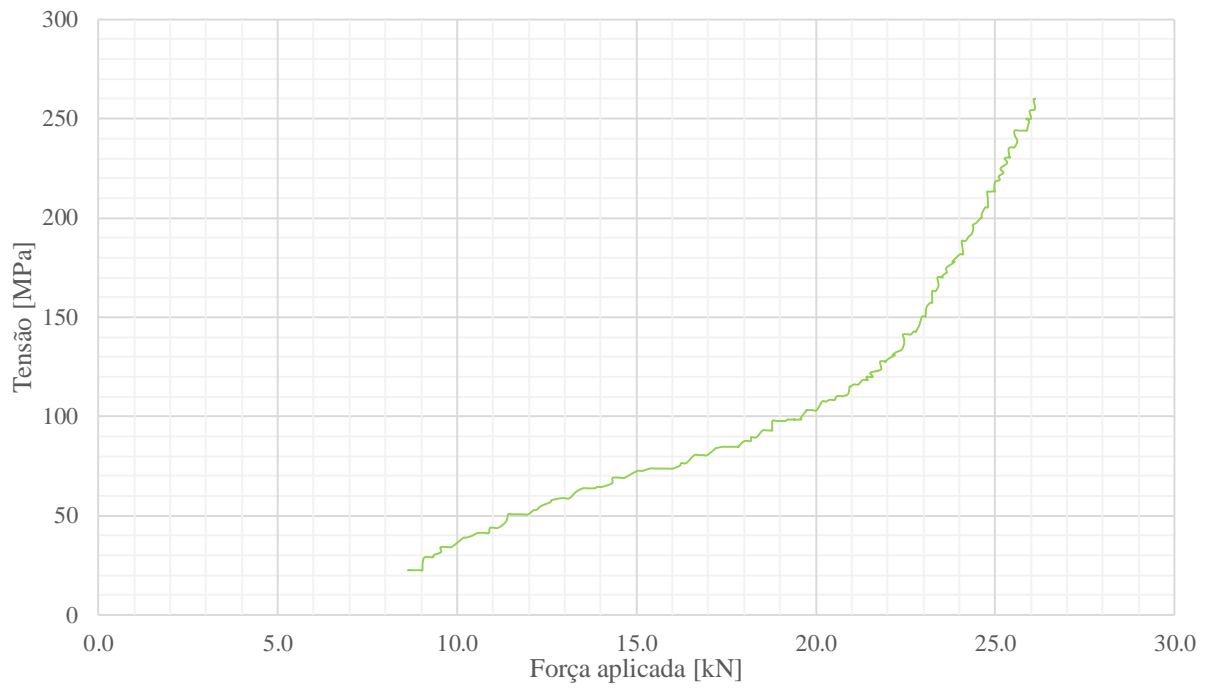


Gráfico B.25 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 4

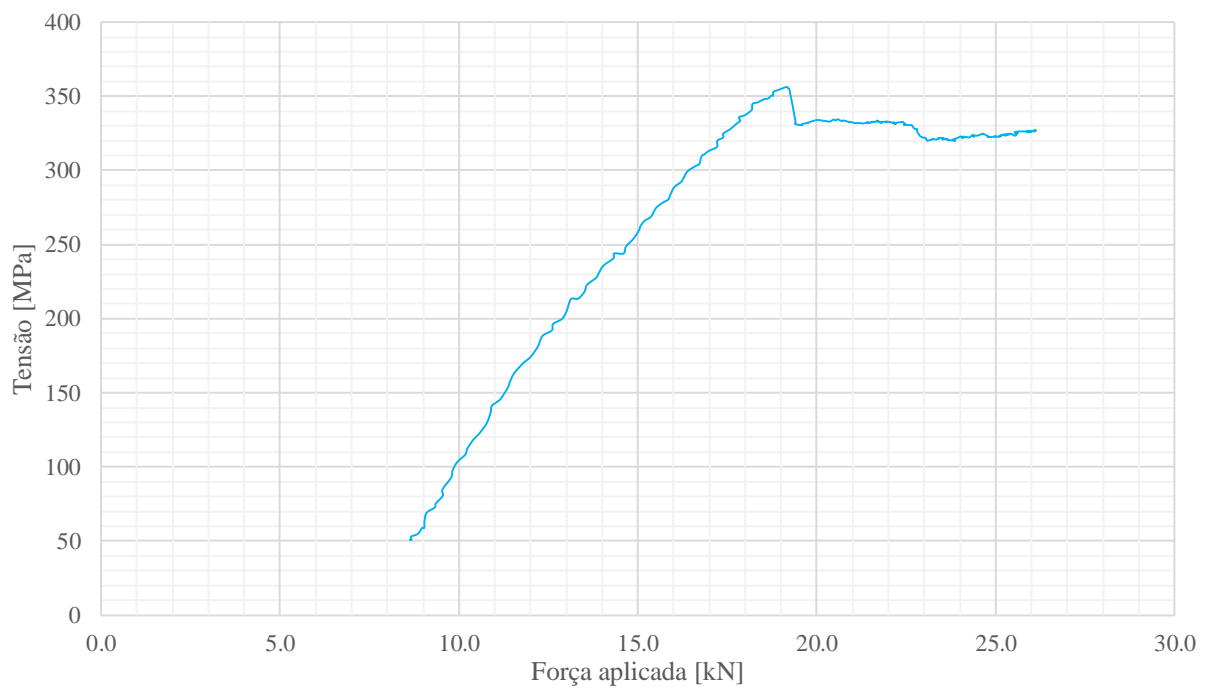


Gráfico B.26 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 5

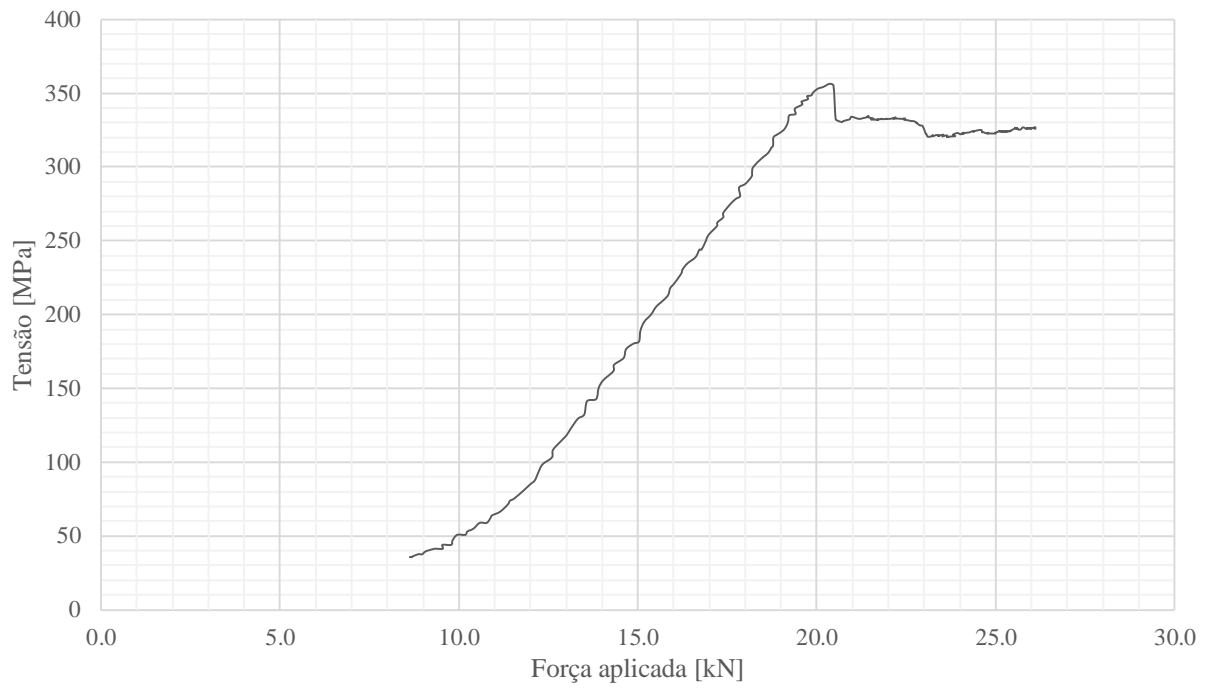


Gráfico B.27 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 6

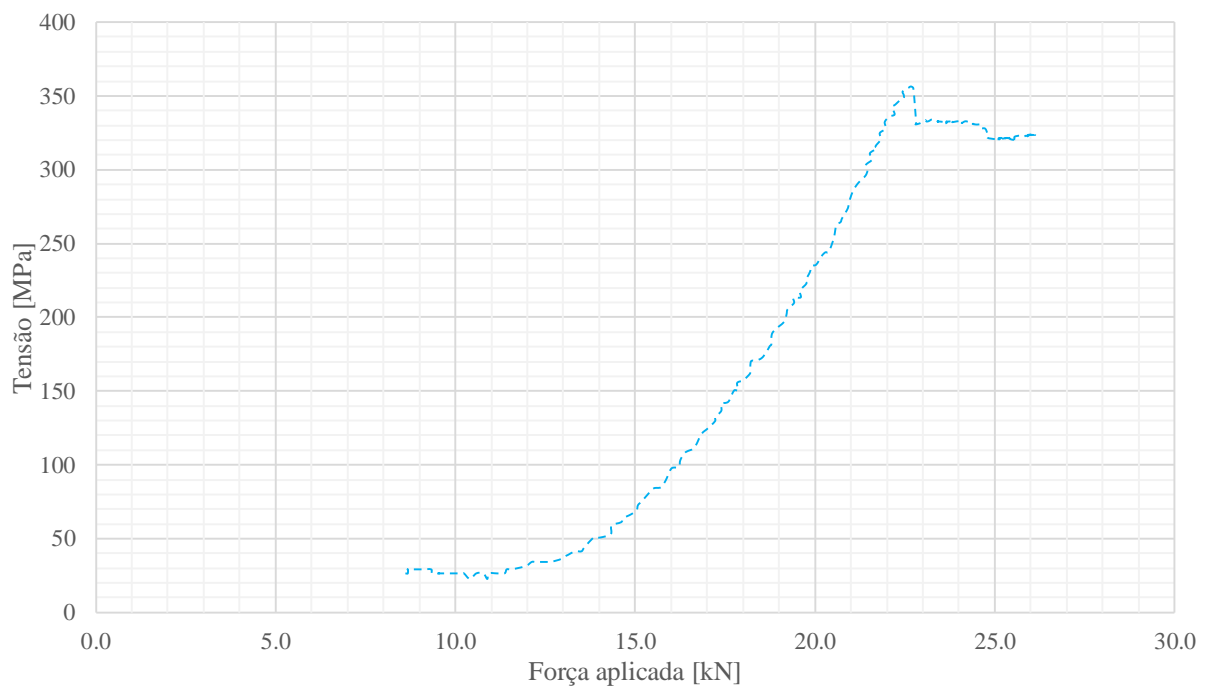


Gráfico B.28 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 7

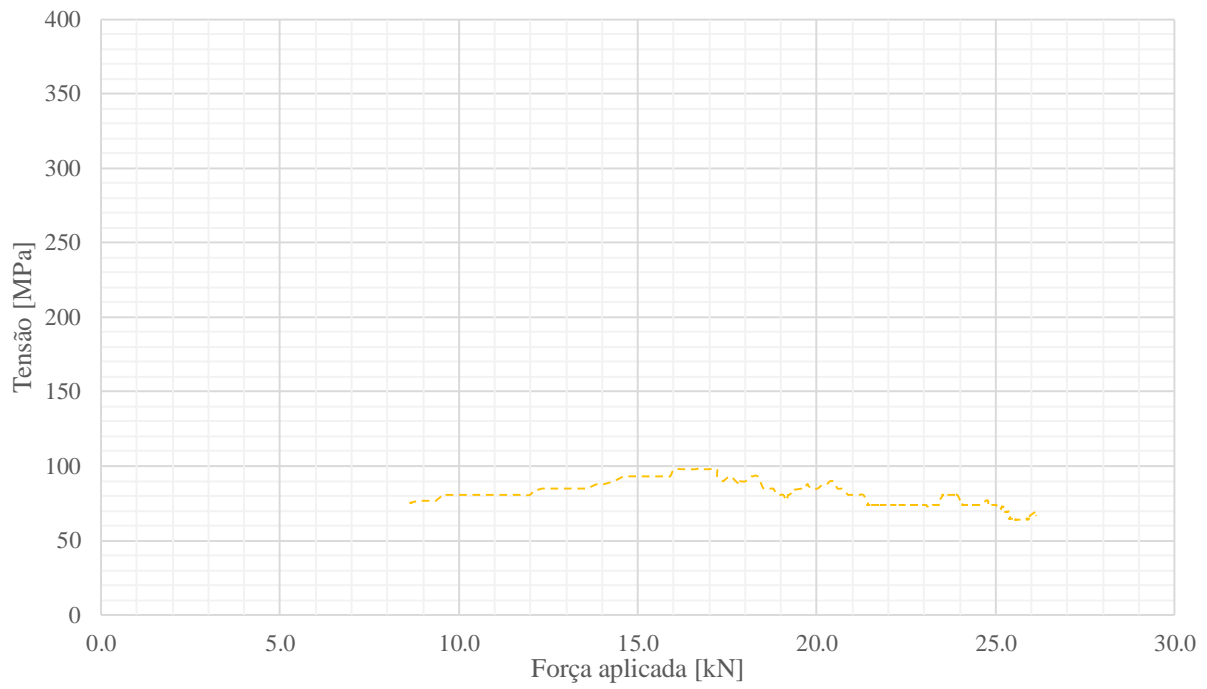


Gráfico B.29 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 9

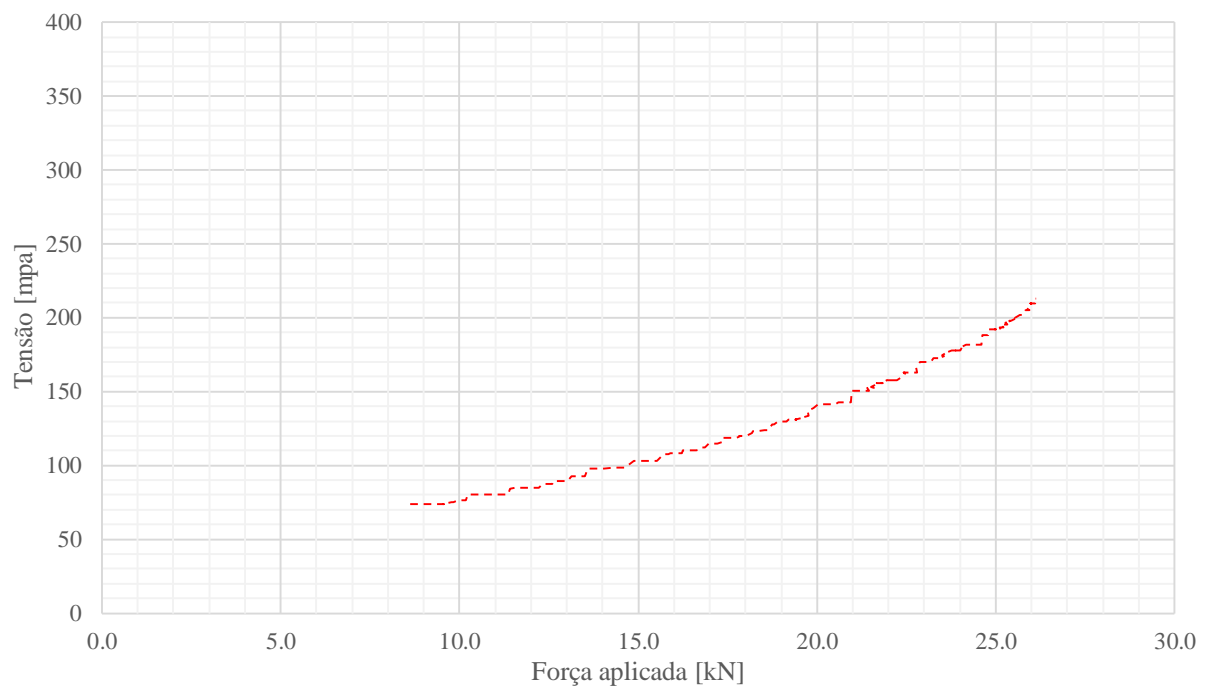


Gráfico B.30 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 10

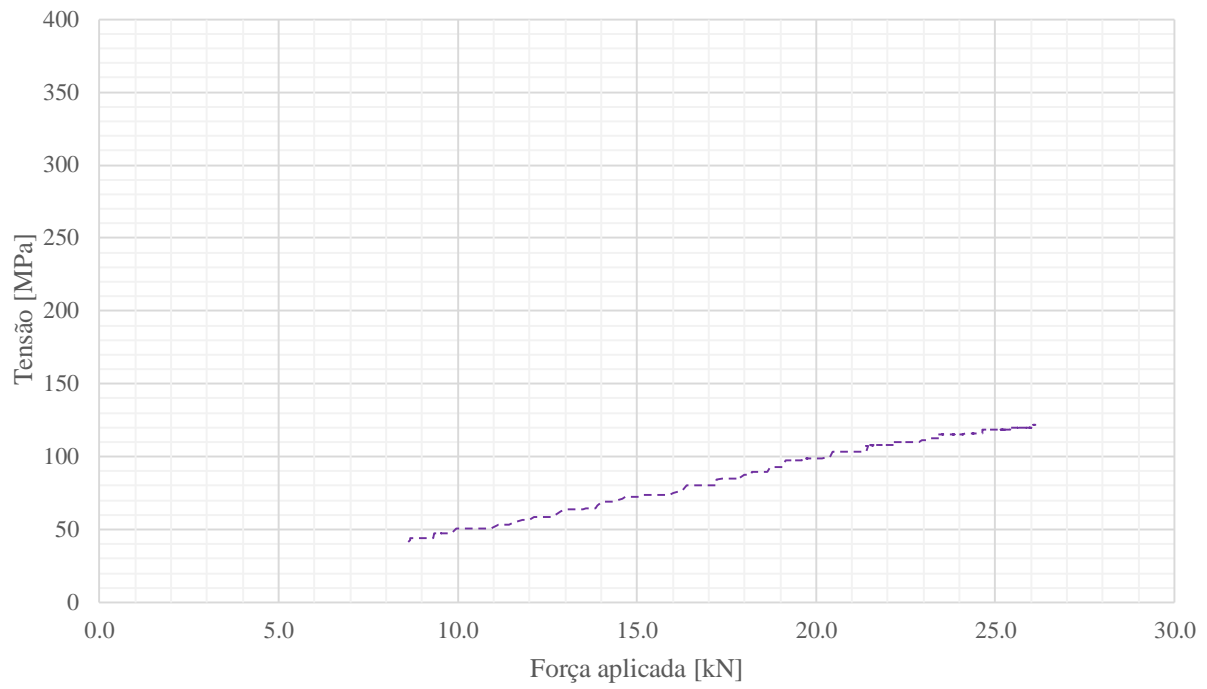


Gráfico B.31 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 11

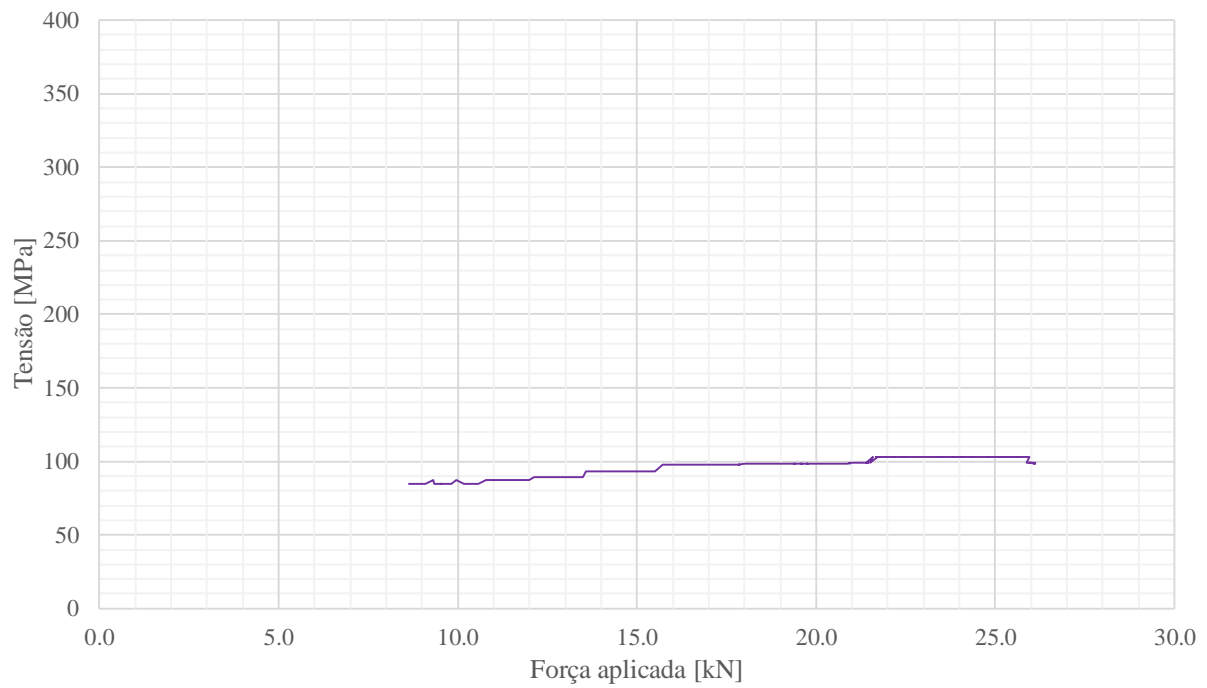


Gráfico B.32 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 12

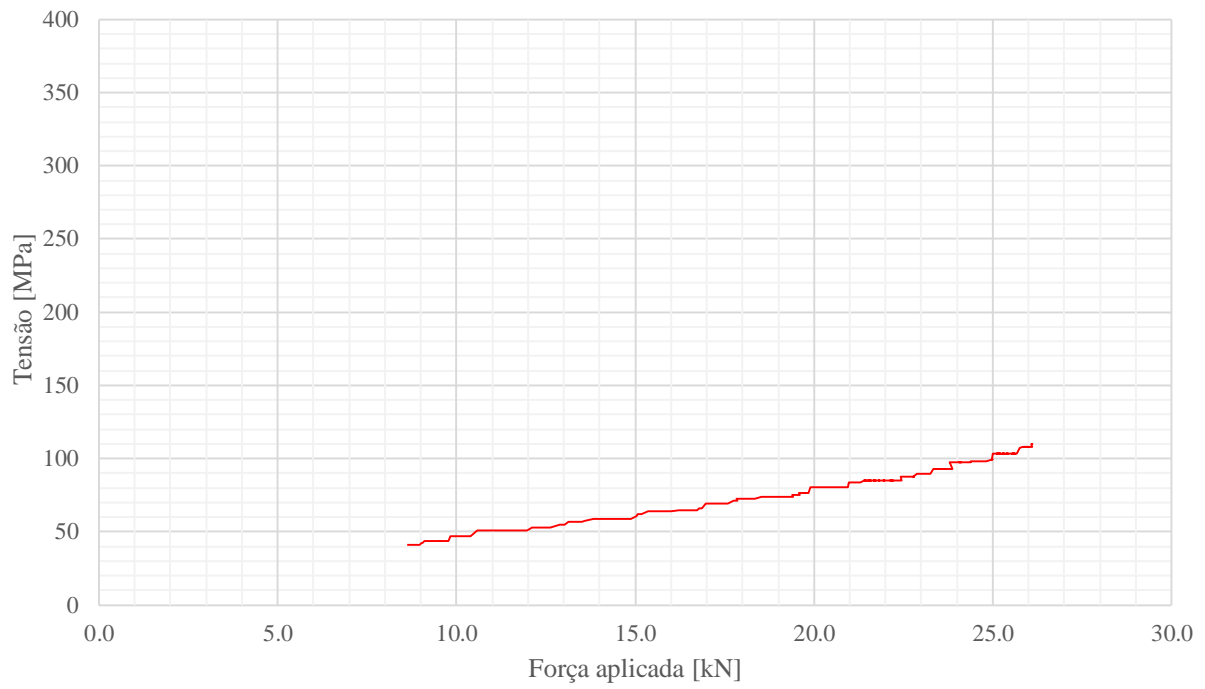


Gráfico B.33 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 13

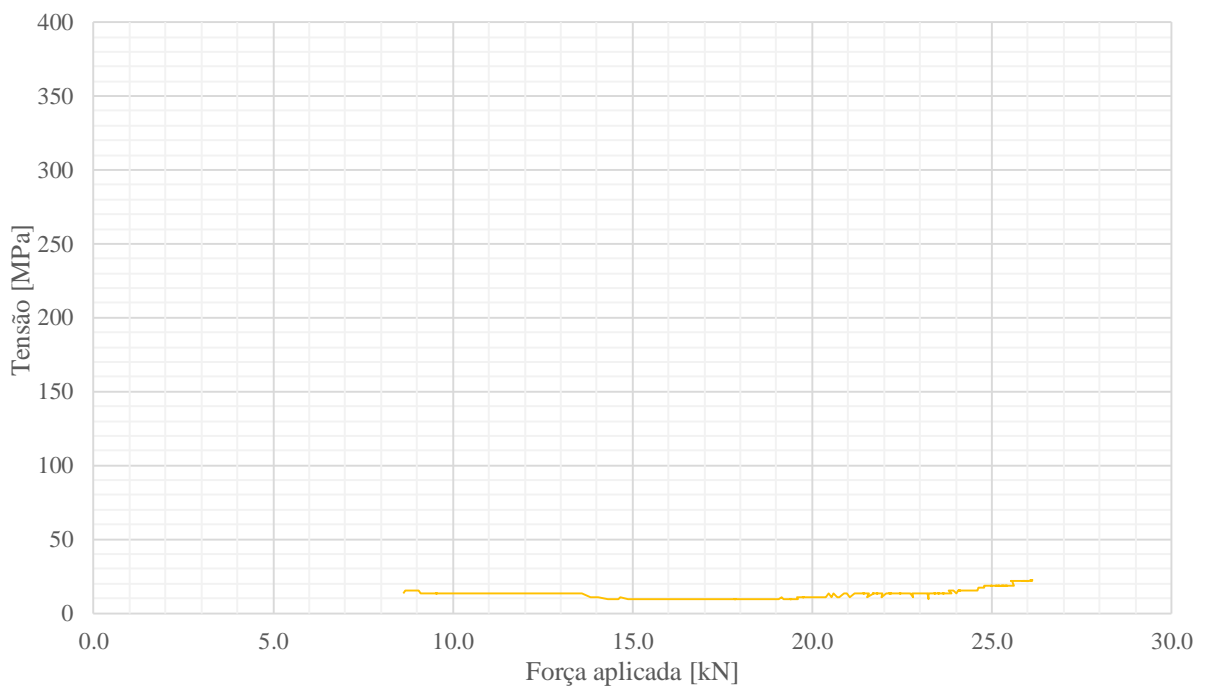


Gráfico B.34 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 14

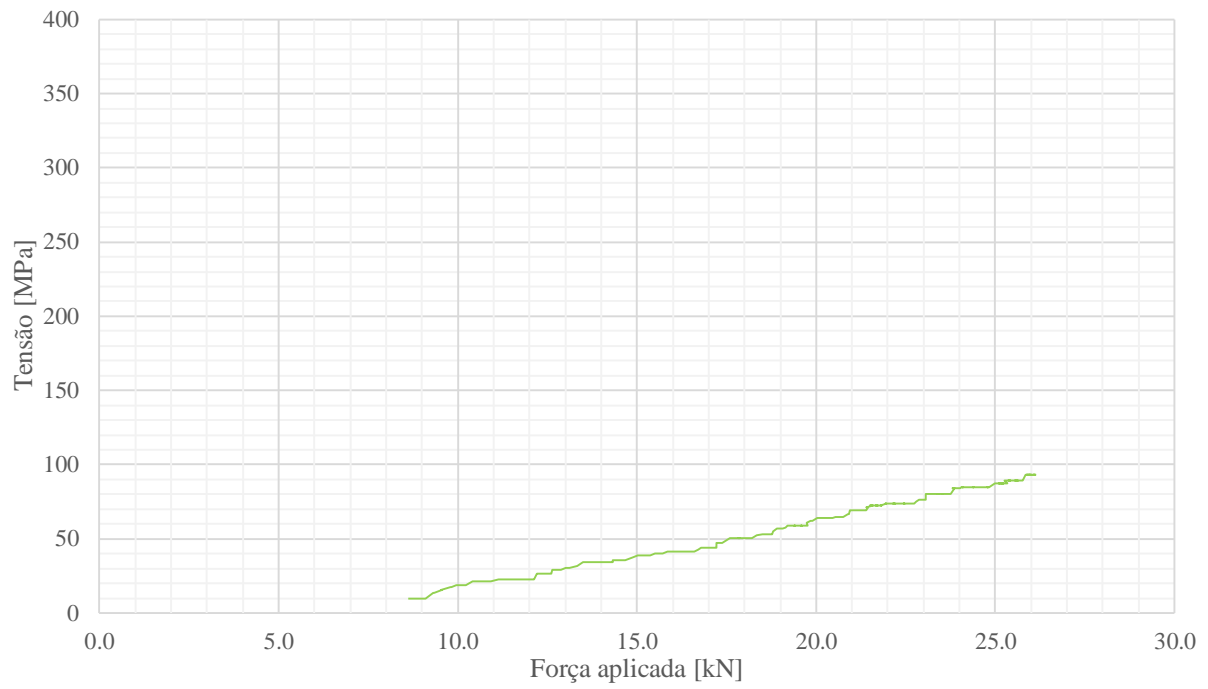


Gráfico B.35 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 15

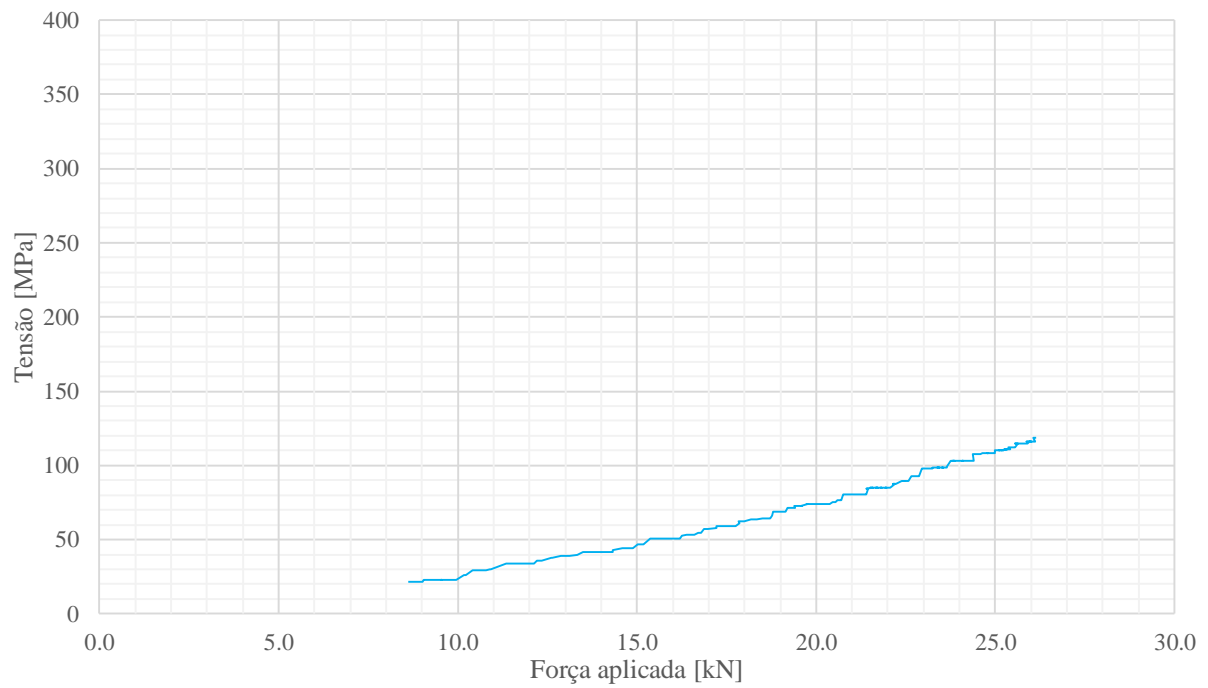


Gráfico B.36 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 16

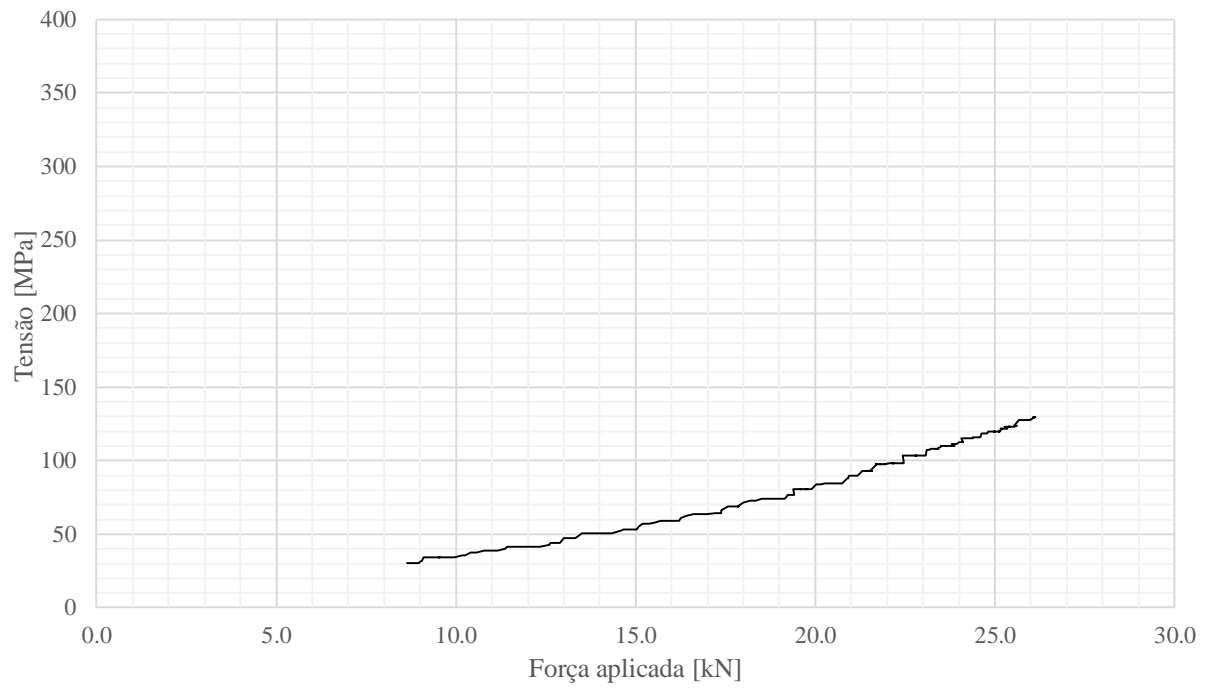


Gráfico B.37 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 17

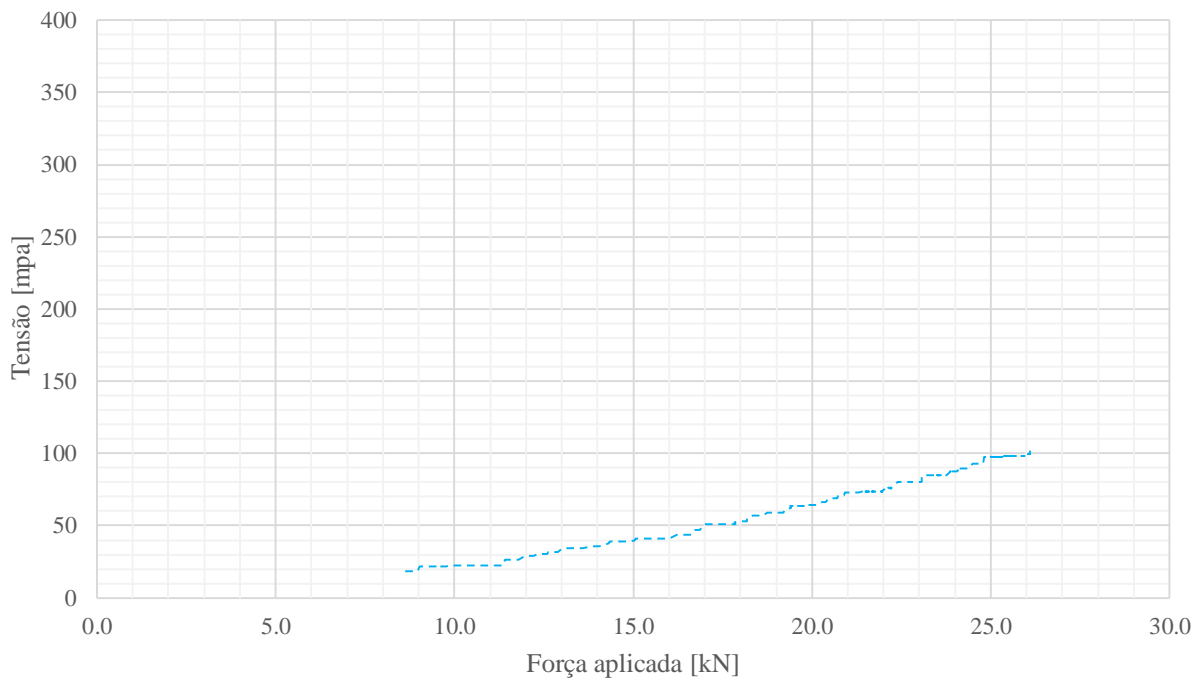


Gráfico B.38 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 18

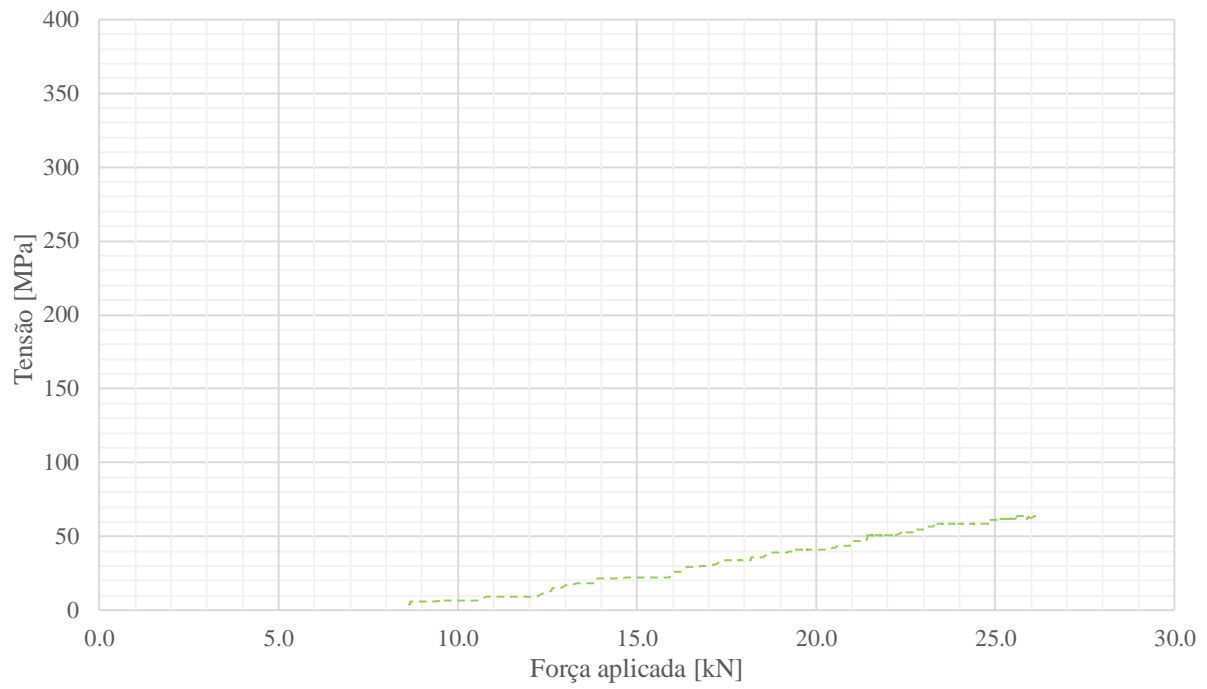


Gráfico B.39 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 19

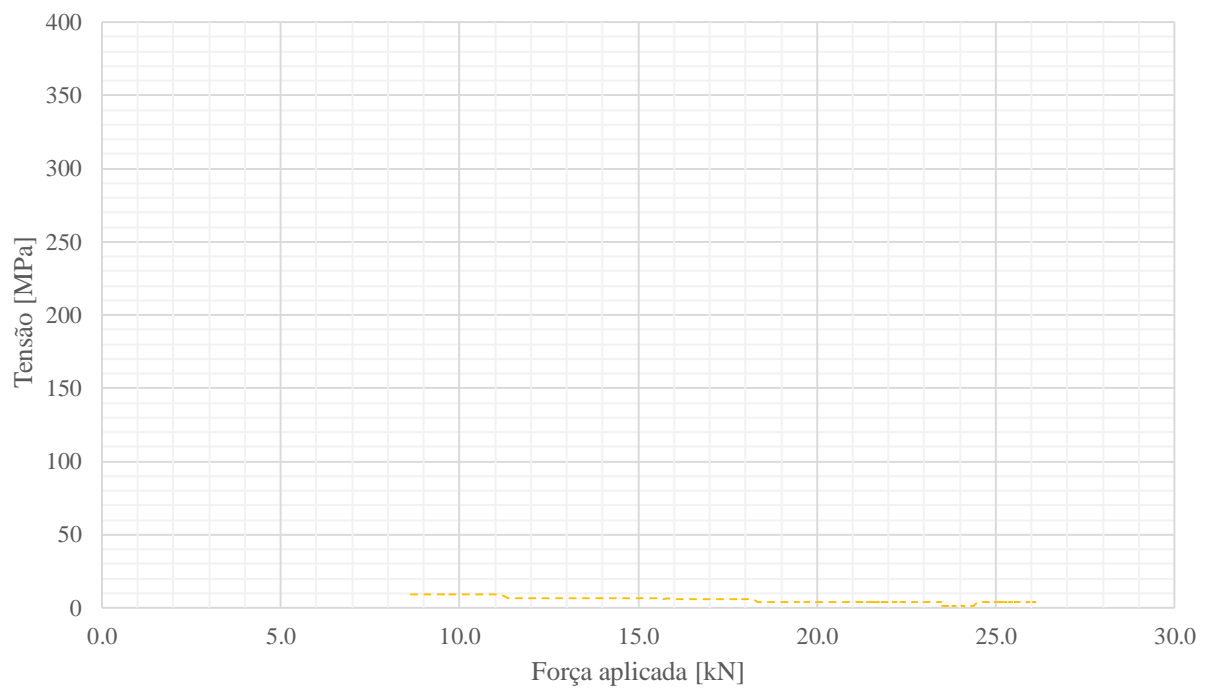


Gráfico B.40 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 20

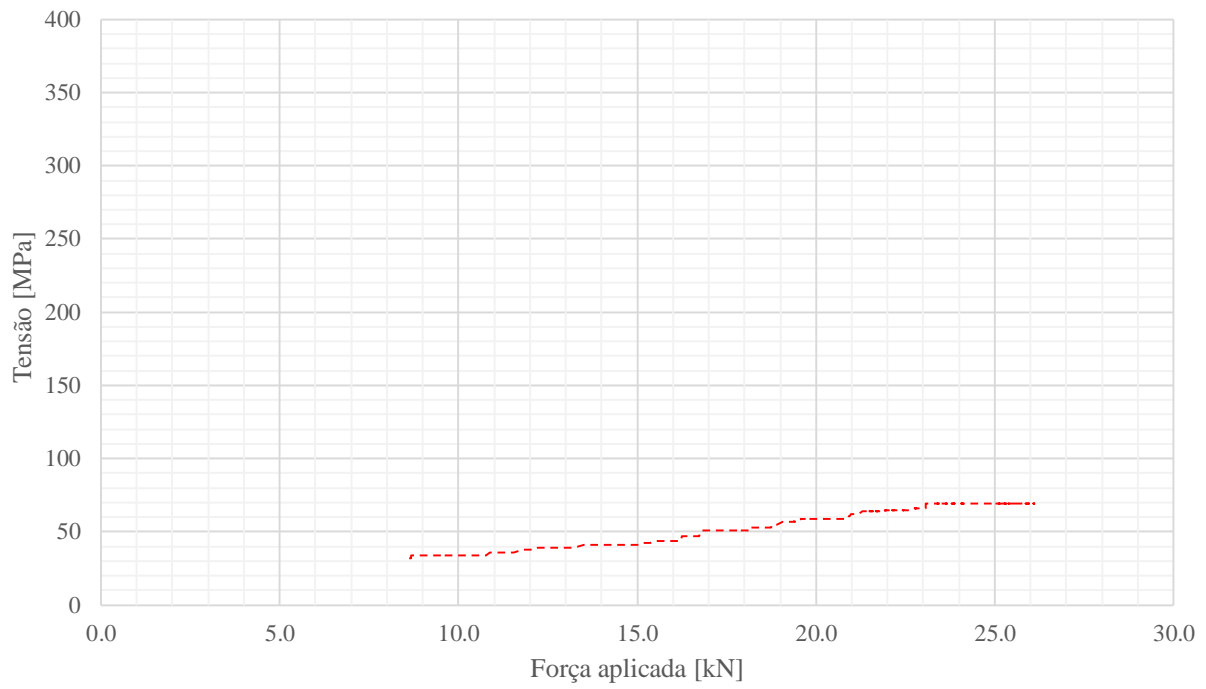


Gráfico B.41 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 21

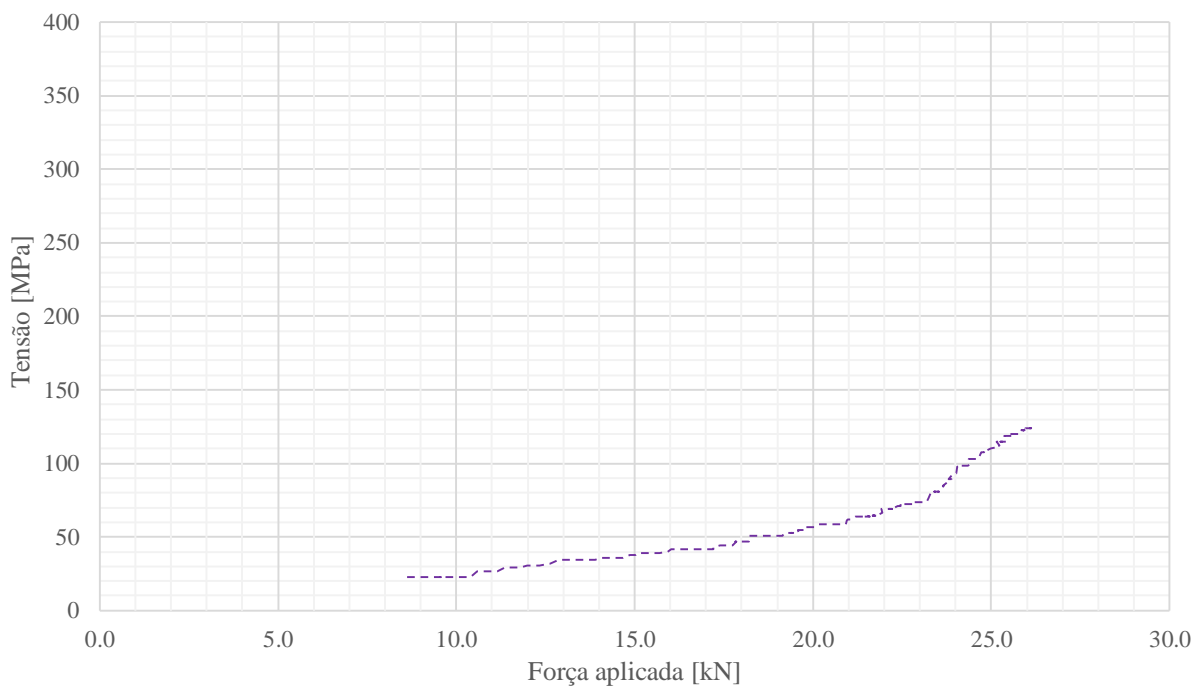


Gráfico B.42 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 22

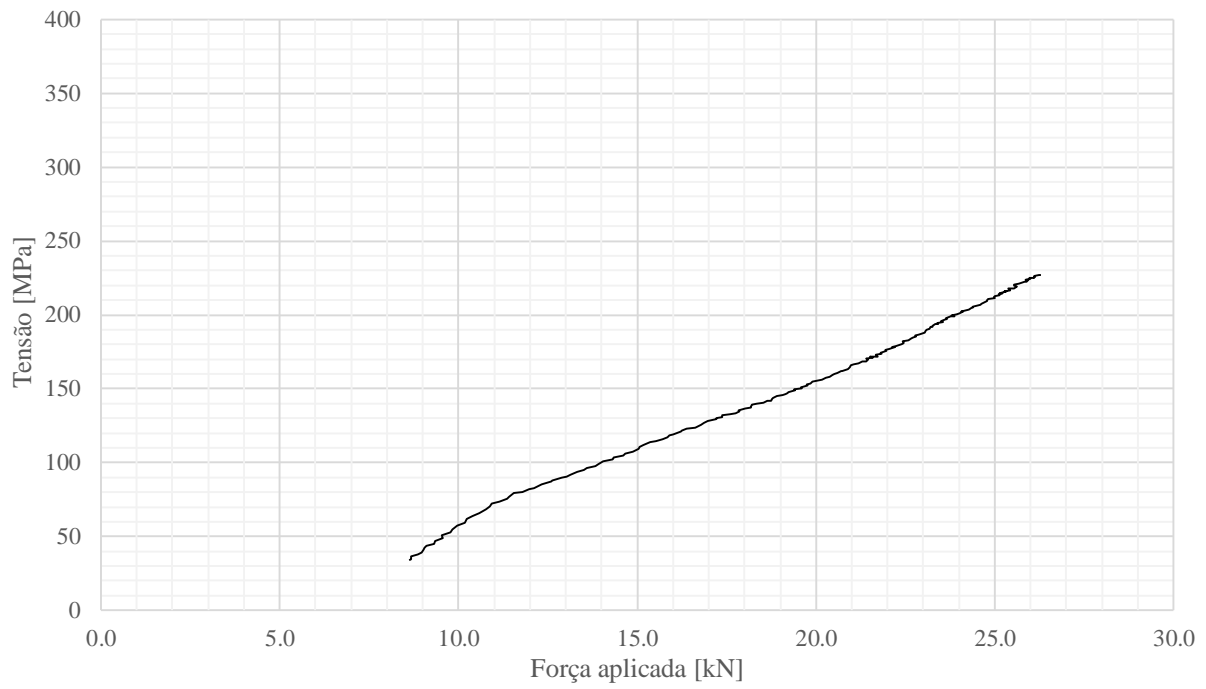


Gráfico B.43 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 23 (Tirante A)

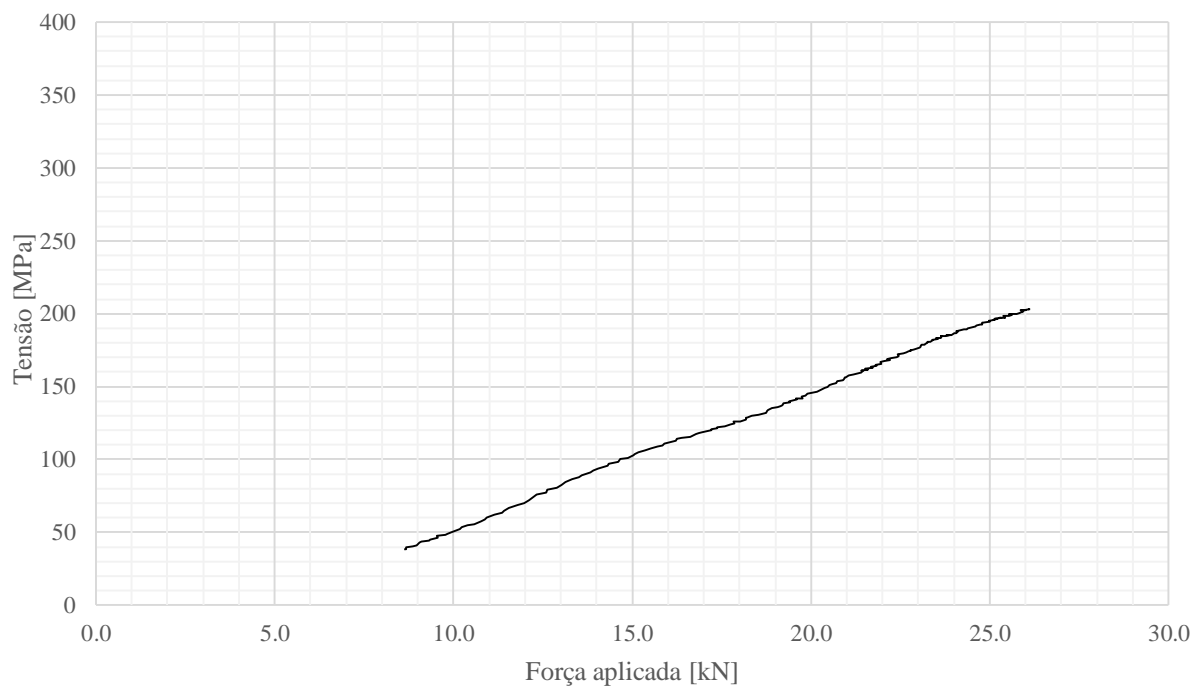


Gráfico B.44 – Curva Tensão/Força Aplicada do Extensômetro 24 (Tirante B)