



Análise Experimental e Numérica de um Modelo Laboratorial

CARLOS DANIEL BARROSO CALEIRO DA COSTA

Outubro de 2017

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE UM MODELO LABORATORIAL

CARLOS DANIEL BARROSO CALEIRO DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Carlos Manuel da Silva Félix

Coorientador: Carlos Filipe Guedes Rodrigues

OUTUBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xix
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Sistemas de Monitorização	5
Capítulo 3 Demonstrador para Monitorização Estrutural	33
Capítulo 4 Modelação Numérica e Análise de Resultados Experimentais	67
Capítulo 5 Considerações Finais.....	113
Referências Bibliográficas	117
Anexo I – Manual de Ligações: Extensómetros	119
Anexo II – Manual de Ligações: LVDT’s.....	123
Anexo III – Manual de Ligações: Inclínómetros.....	127
Anexo IV – Resultados dos Ensaios Estáticos	131
Anexo V – Resultados dos Ensaios Dinâmicos.....	155
Anexo VI – Análise Estática do Modelo Numérico de Barras	163
Anexo VII – Análise Modal do Modelo Numérico de Barras	175
Anexo VIII – Análise Estática do Modelo Numérico de Elementos Finitos de Casca	191
Anexo IX – Análise Modal do Modelo Numérico de Elementos Finitos de Casca	207
Anexo X – Comparação de Resultados.....	223

RESUMO

Nos últimos anos, a Monitorização da Integridade Estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) tem surgido como tema de interesse e de cada vez mais alargada aplicação no âmbito da engenharia civil. A relevância da monitorização estrutural surge associada ao crescente interesse, dos donos de obra e entidades gestoras de obras, de ter um conhecimento aprofundado das estruturas. O impulso verificado nos últimos anos no sector da monitorização aparece da necessidade de garantir condições de segurança para as estruturas. Neste aspeto a observação das estruturas mais antigas tem observado um crescimento significativo para se avaliar a adequação das mesmas às exigências atuais.

Os sistemas de monitorização possibilitam um acompanhamento contínuo do comportamento das estruturas e através dos dados obtidos é possível fazer a avaliação das alterações no comportamento da mesma. Baseados em sensores, os sistemas de monitorização são um meio inovador para o estudo cuidado das estruturas e um apoio importante para o planeamento de ações de rotina que permitem a manutenção da estrutura dentro de parâmetros de segurança aceitáveis, potenciando uma manutenção proativa das estruturas.

Na presente dissertação é feito o estudo de um demonstrador, dimensionado e concebido para o efeito, no qual é implementado um sistema de monitorização contínuo e automático. O demonstrador é submetido a uma campanha de ensaios, composta por ensaios estáticos e dinâmicos. O estudo realizado pretende a medição de grandezas consideradas relevantes, tais como deslocamentos, extensões, rotações e acelerações, que permitem avaliar a adequação dos sistemas de monitorização e também o comportamento da estrutura objeto dos ensaios.

Para que seja possível retirar conclusões mais satisfatórias do trabalho realizado, os resultados experimentais são comparados com os provenientes de modelos numéricos. Para tal são desenvolvidos dois modelos de elementos finitos: um de barras e outro de casca. O objetivo do desenvolvimento destes de modelos numéricos é o de avaliar com mais segurança o comportamento da estrutura.

Palavras-chave: Sistemas de Monitorização, Sistemas de Aquisição, Comportamento Estrutural, Análise Estrutural, Monitorização da Integridade Estrutural, Demonstrador.

ABSTRACT

In the last years, *Structural Health Monitoring* (SHM) has arisen as an interesting theme and an ever-wider application in the field of civil engineering. The relevance of structural monitoring is associated with the growing interests of building owners and management entities to have a thorough knowledge of the structures. The momentum in recent years in the monitoring sector as emerged from the need to ensure safety conditions for the structures. In this aspect the observation of the oldest structures has observed a significant growth to evaluate the adequacy of the same to the current requirements.

The monitoring systems allow a continuous monitoring of the behavior of the structures and through the obtained data, it is possible to make the evaluation of the changes in the behavior of the same. Based on sensors, monitoring systems are an innovative mean for careful study of structures and an important support for planning routine actions that allow maintenance of the structure within acceptable safety parameters, fostering proactive maintenance of the structures.

In the present dissertation, a demonstrator is designed for the purpose, in which a continuous and automatic system is implemented. The demonstrator is submitted to a test campaign, composed of static and dynamic tests. The objective of this study is to measure the quantities considered relevant, such as displacements, extensions, rotations and accelerations, which allow to evaluate the adequacy of monitoring systems and the behavior of the structure object of the tests.

To obtain more satisfactory conclusions from the work done, the experimental results are compared with numerical models. For this, two models of finite elements are developed: one of bars and other of shell. The objective of the development of these numerical models is to evaluate more safely the behavior of the structure.

Keywords: Monitoring Systems, Acquisition Systems, Structural Behavior, Structural Analysis, Structural Health Monitoring, Demonstrator.

AGRADECIMENTOS

Ao terminar a redação desta dissertação, e fazendo uma retrospectiva dos últimos anos da minha vida, mais concretamente os que fazem parte do meu percurso académico no ensino superior, quero expressar o meu mais sincero e profundo agradecimento:

- Ao meu orientador, Eng.º Carlos Félix, e coorientador, Eng.º Carlos Rodrigues, pela paciência, disponibilidade no decorrer deste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos e principalmente por apresentarem alternativas quando foi necessário fazer alteração ao plano de trabalhos, numa altura em que o plano original sofreu um desvio. A sua experiência e conhecimentos foram importantes para que este trabalho fosse conduzido ao seu término com sucesso.
- Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto e ao Laboratório de Estruturas e seus responsáveis por terem disponibilizado o espaço e condições para que fosse possível realizar esta dissertação.
- A todos os meus colegas, que durante os últimos meses estiveram presentes na minha vida e que foram um apoio importante no decorrer deste trabalho, principalmente pelo incentivo e partilha de conhecimentos e pela boa disposição que sempre demonstraram.
- A todos os colegas e amigos de curso que fizeram parte do meu percurso académico, por todas as experiências vividas, conhecimentos transmitidos, apoio e incentivo. Para todos eles uma palavra de apreço pelo importante papel desempenhado no meu sucesso académico;
- Em último, e talvez o mais importante, um especial agradecimento aos meus pais e irmã por terem acreditado desde o princípio e depositado em mim toda a sua confiança, mesmo em face de todas as adversidades vividas durante todo este percurso que agora termina. O seu carinho, apoio e demonstração de confiança foram da mais extrema importância para o sucesso de todo o meu percurso académico.

ÍNDICE DE TEXTO

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Motivação e objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
Capítulo 2	Sistemas de Monitorização	5
2.1	Monitorização Estrutural	5
2.1.1	Introdução	5
2.1.2	Monitorização da integridade estrutural	6
2.1.3	Estruturas inteligentes	9
2.2	Processos de Medição	10
2.2.1	Introdução	10
2.2.2	Medição do deslocamento	12
2.2.3	Medição da rotação	25
2.2.4	Medição da temperatura	26
2.2.5	Medição da aceleração	29
2.3	Considerações finais	32
Capítulo 3	Demonstrador para Monitorização Estrutural	33
3.1	Introdução	33
3.2	Descrição do demonstrador	34
3.3	Sistema de monitorização	38
3.3.1	Rede de sensores	38
3.3.2	Sistema de aquisição	42

ÍNDICE DE TEXTO

3.4	Ensaio realizados.....	44
3.4.1	Ensaio estáticos.....	45
3.4.2	Ensaio dinâmicos.....	57
3.5	Considerações finais.....	64
Capítulo 4	Modelação Numérica e Análise de Resultados Experimentais.....	67
4.1	Introdução.....	67
4.2	Compatibilização entre resultados experimentais e analíticos.....	67
4.3	Modelo numérico de barras.....	68
4.3.1	Análise estática.....	69
4.3.2	Análise modal.....	76
4.4	Modelo numérico de elementos finitos de casca.....	80
4.4.1	Análise estática.....	81
4.4.2	Análise modal.....	87
4.5	Análise de resultados.....	90
4.5.1	Comparação entre o modelo de barras e o modelo de casca.....	90
4.5.2	Comparação dos resultados experimentais com o modelo de barras.....	98
4.5.3	Comparação dos resultados experimentais com o modelo de casca.....	105
4.6	Considerações finais.....	112
Capítulo 5	Considerações Finais.....	113
5.1	Conclusões.....	113
5.2	Desenvolvimentos Futuros.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Colapso de infraestruturas. Retirado de Rodrigues (2011).....	2
Figura 1.2 - Natureza da manutenção estrutural e reposição dos níveis de segurança. Retirado de Rodrigues (2011).....	2
Figura 2.1 - Ensaio de carga numa treliça de aço no século XIX. Retirado de Rodrigues (2011).....	6
Figura 2.2 - Paralelismo entre a monitorização estrutural e a medicina. Retirado de Rodrigues (2011)....	7
Figura 2.3 - Esquema geral de um sistema de monitorização. Retirado de Figueiras, et al. (2016).....	7
Figura 2.4 - Ilustração esquemática de um sistema de SHM. Retirado de Figueiras (2008).	8
Figura 2.5 - Tipos e subtipos de sistemas SHM. Retirado de Figueiras (2008).....	8
Figura 2.6 - Monitorização inteligente. Retirado de Figueiredo (2006).....	10
Figura 2.7 - Transdutores de deslocamento capacitivos. Retirado de Mitutoyo Corporation (2015).	12
Figura 2.8 - LVDT da série LDC da marca RDP Group. Retirado de RDP Electronics Ltd (2017).	13
Figura 2.9 - Esquema de um LVDT. Retirado de Cavadas (2008).....	14
Figura 2.10 - Transdutores de deslocamento resistivos. Retirado de Félix (2004).....	14
Figura 2.11 - Transdutor potenciométrico. Retirado de Félix (2004).	15
Figura 2.12 - Princípio dos vasos comunicantes aplicado ao nivelamento hidrostático. Retirado de Rodrigues (2011).....	16
Figura 2.13 - Esquema simplificado da aplicação do método dos níveis líquidos. Retirado de Rodrigues (2011).	16
Figura 2.14 - Sistema de nivelamento hidrostático. Retirado de Magalhães (2015).....	17
Figura 2.15 - Pormenor da célula de carga e fixação. Retirado de Rodrigues (2011).....	18
Figura 2.16 - Configuração do transdutor. Retirado de Rodrigues (2011).....	18
Figura 2.17 - LVDT na medição da extensão média. Retirado de Félix (2004).	19
Figura 2.18 - Constituição de um sensor de corda vibrante. Retirado de Félix (2004).....	20

Figura 2.19 - Extensómetros de corda vibrante. Retirado de Félix (2004).....	21
Figura 2.20 - Extensómetro de resistência elétrica. Retirado de Félix (2004).....	23
Figura 2.21 - Circuito da ponte de Wheatstone. Retirado de Félix (2004).....	23
Figura 2.22 - Ligação de um extensómetro à ponte de Wheatstone com um braço ativo. Retirado de Félix (2004).....	24
Figura 2.23 - Exemplos de extensómetros de resistência elétrica. Retirado de Vishay Precision Group, Inc (2017).....	25
Figura 2.24 - Clinómetro de bolha de ar. Retirado de Félix (2002)	25
Figura 2.25 - Inclínómetro elétrico uniaxial. Retirado de Sherborne Sensors (2017).....	26
Figura 2.26 - Princípio de funcionamento dos termopares. Retirado de Félix (2004).....	27
Figura 2.27 - Sensor de temperatura PT100. Retirado de Félix (2004).....	29
Figura 2.28 - Acelerómetros piezoelétricos. Retirado de IMI Sensors (2017).....	30
Figura 2.29 – Esquema de um acelerómetro piezoresistivo. Adaptado de Aktan, et al. (2003).	31
Figura 2.30 - Esquema de um acelerómetro capacitivo. Adaptado de Aktan, et al. (2003).	32
Figura 3.1 - Analogia do demonstrador a estruturas de engenharia civil. Adaptado de Magalhães (2015).	34
Figura 3.2 - Dimensões do demonstrador (em mm). Adaptado de Magalhães (2015).	35
Figura 3.3 - Pormenores de fixação (em mm). Adaptado de Magalhães (2015).....	36
Figura 3.4 - Pormenores de fixação (em mm). Adaptado de Magalhães (2015).....	36
Figura 3.5 - Modelo numérico de dimensionamento.	37
Figura 3.6 - Aplicação de um extensómetro. Retirado de Magalhães (2015).	39
Figura 3.7 - Localização e pormenores das secções instrumentadas no nível 0 (N0). Adaptado de Magalhães (2015).	39
Figura 3.8 - Localização e pormenores das secções instrumentadas no nível 1 (N1). Adaptado de Magalhães (2015).	40
Figura 3.9 - Localização e pormenores das secções instrumentadas no nível 2 (N1). Adaptado de Magalhães (2015).	40
Figura 3.10 - Equipamento de aquisição de dados cDAQ-9174.	42

Figura 3.11 - Fontes de alimentação utilizadas para os sensores elétricos.	43
Figura 3.12 - Aplicação desenvolvida em LabVIEW.	43
Figura 3.13 - Introdução de molas de compressão.....	44
Figura 3.14 - Introdução de molas de tração.	45
Figura 3.15 - Conjugação de molas de compressão com molas de tração.	45
Figura 3.16 - Procedimento de ensaio estático.	47
Figura 3.17 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE1.	48
Figura 3.18 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE2.	48
Figura 3.19 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE3.	49
Figura 3.20 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE7.	50
Figura 3.21 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE9.	50
Figura 3.22 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE1.	51
Figura 3.23 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE2.	51
Figura 3.24 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE3.	52
Figura 3.25 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE4.	52
Figura 3.26 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE7.	53
Figura 3.27 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE9.	53
Figura 3.28 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE1.	54
Figura 3.29 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE4.	55
Figura 3.30 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE7.	55
Figura 3.31 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE8.	56
Figura 3.32 – Exemplo de acelerações medidas no ensaio estático.	57
Figura 3.33 - Configuração de massas.....	59
Figura 3.34 - Espectros de frequência no ED1 (A-N1).	60
Figura 3.35 - Espectros de frequência no ED1 (A-N2).	60
Figura 3.36 - Espectros de frequência no ED2 (A-N1).	61
Figura 3.37 - Espectros de frequência no ED2 (A-N2).	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.38 - Espetros de frequência no ED3 (A-N1).	62
Figura 3.39 - Espetros de frequência no ED3 (A-N2).	62
Figura 3.40 - Espetros de frequência no ED5 (A-N1).	62
Figura 3.41 - Espetros de frequência no ED5 (A-N2).	63
Figura 3.42 - Espetros de frequência no ED8 (A-N1).	63
Figura 3.43 - Espetros de frequência no ED8 (A-N2).	63
Figura 4.1 - Perspetiva do modelo numérico de barras.....	69
Figura 4.2 – Comparação entre resultados experimentais e numéricos do modelo de barras.	70
Figura 4.3 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE1 (em mm).	72
Figura 4.4 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE2 (em mm).	72
Figura 4.5 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE3 (em mm).	72
Figura 4.6 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE7 (em mm).	73
Figura 4.7 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE9 (em mm).	73
Figura 4.8 - Modelação de elementos finitos de casca.....	80
Figura 4.9 – Comparação entre resultados experimentais e numéricos do modelo de casca.....	81
Figura 4.10 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE1 (em mm).....	83
Figura 4.11 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE2 (em mm).....	83
Figura 4.12 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE3 (em mm).....	83
Figura 4.13 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE7 (em mm).....	84
Figura 4.14 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE9 (em mm).....	84
Figura 4.15 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE1.	91
Figura 4.16 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE2.	91
Figura 4.17 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE3.	91
Figura 4.18 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE7.	92
Figura 4.19 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE9.	92
Figura 4.20 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensómetro E-N0-2 no EE1. ...	93
Figura 4.21 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensómetro E-N0-2 no EE4. ...	93

Figura 4.22 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensómetro E-N0-2 no EE7.....	93
Figura 4.23 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensómetro E-N0-2 no EE8.....	94
Figura 4.24 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE1.	94
Figura 4.25 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE2.	95
Figura 4.26 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE3.	95
Figura 4.27 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE7.	95
Figura 4.28 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE9.	96
Figura 4.29 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE1.	98
Figura 4.30 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE2.	98
Figura 4.31 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE3.	99
Figura 4.32 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE7.	99
Figura 4.33 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE9.	99
Figura 4.34 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE1.....	100
Figura 4.35 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE4.....	100
Figura 4.36 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE7.....	101
Figura 4.37 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE8.....	101
Figura 4.38 - Força vs rotações do I-N2 no EE1.	102
Figura 4.39 - Força vs rotações do I-N2 no EE2.	102
Figura 4.40 - Força vs rotações do I-N2 no EE3.	102
Figura 4.41 - Força vs rotações do I-N2 no EE7.	103
Figura 4.42 - Força vs rotações do I-N2 no EE9.	103
Figura 4.43 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE1.	105
Figura 4.44 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE2.	106
Figura 4.45 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE3.	106
Figura 4.46 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE7.	106
Figura 4.47 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE9.	107
Figura 4.48 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE1.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.49 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE4.....	108
Figura 4.50 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE7.....	108
Figura 4.51 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE8.....	108
Figura 4.52 - Força vs rotação para I-N2 no EE1.....	109
Figura 4.53 - Força vs rotação para I-N2 no EE2.....	109
Figura 4.54 - Força vs rotação para I-N2 no EE3.....	109
Figura 4.55 - Força vs rotação para I-N2 no EE7.....	110
Figura 4.56 - Força vs rotação para I-N2 no EE9.....	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Grandezas medidas na monitorização estrutural.....	9
Tabela 2.2 - Caracterização de algumas configurações padrão de termopares. Adaptado de Félix (2004).	28
Tabela 3.1 - Características das secções.	38
Tabela 3.2 - Simbologia do tipo de sensores e referência de localização. Adaptado de Magalhães (2015).	38
Tabela 3.3 - Características dos sensores utilizados.	41
Tabela 3.4 - Quadro resumo dos módulos utilizados.	42
Tabela 3.5 - Disposição das molas em ensaios estáticos.	46
Tabela 3.6 - Massas aplicadas no ensaio estático.	46
Tabela 3.7 - Ensaio dinâmico.	58
Tabela 4.1 - Quantificação e comparação do peso do modelo	68
Tabela 4.2 - Pesos obtidas através dos modelos numéricos.	68
Tabela 4.3 - Resumo dos deslocamentos do comportamento estrutural (em mm).	71
Tabela 4.4 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).....	74
Tabela 4.5 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).....	74
Tabela 4.6 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).....	74
Tabela 4.7 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).....	75
Tabela 4.8 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE1 (em m°).	75
Tabela 4.9 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE2 (em m°).	75
Tabela 4.10 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE3 (em m°).	75
Tabela 4.11 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE4 (em m°).	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.12 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE7 (em m ^o).....	76
Tabela 4.13 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE9 (em m ^o).....	76
Tabela 4.14 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.1.....	77
Tabela 4.15 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.1.....	77
Tabela 4.16 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.1.....	77
Tabela 4.17 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.1.....	78
Tabela 4.18 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.1.....	78
Tabela 4.19 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.2.....	78
Tabela 4.20 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.2.....	78
Tabela 4.21 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.2.....	78
Tabela 4.22 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.2.....	79
Tabela 4.23 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.2.....	79
Tabela 4.24 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.3.....	79
Tabela 4.25 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.3.....	79
Tabela 4.26 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.3.....	79
Tabela 4.27 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.3.....	80
Tabela 4.28 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.3.....	80
Tabela 4.29 - Resumo dos deslocamentos do comportamento estrutural (em mm).	82
Tabela 4.30 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE1 (x10 ⁻⁶ m/m).	85
Tabela 4.31 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE4 (x10 ⁻⁶ m/m).	85
Tabela 4.32 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE7 (x10 ⁻⁶ m/m).	85
Tabela 4.33 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE8 (x10 ⁻⁶ m/m).	85
Tabela 4.34 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE1 (em m ^o).	86
Tabela 4.35 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE2 (em m ^o).	86
Tabela 4.36 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE3 (em m ^o).	86
Tabela 4.37 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE7 (em m ^o).	86
Tabela 4.38 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE9 (em m ^o).	86

Tabela 4.39 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.1.	87
Tabela 4.40 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.1.	87
Tabela 4.41 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.1.	87
Tabela 4.42 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.1.	88
Tabela 4.43 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.1.	88
Tabela 4.44 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.2.	88
Tabela 4.45 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.2.	88
Tabela 4.46 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.2.	88
Tabela 4.47 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.2.	89
Tabela 4.48 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.2.	89
Tabela 4.49 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.3.	89
Tabela 4.50 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.3.	89
Tabela 4.51 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.3.	89
Tabela 4.52 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.3.	90
Tabela 4.53 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.3.	90
Tabela 4.54 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED1.1 (em Hz).	96
Tabela 4.55 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED2.1 (em Hz).	97
Tabela 4.56 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED3.1 (em Hz).	97
Tabela 4.57 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED5.1 (em Hz).	97
Tabela 4.58 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED8.1 (em Hz).	97
Tabela 4.59 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED1.2 (em Hz).	104
Tabela 4.60 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED2.2 (em Hz).	104
Tabela 4.61 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED3.2 (em Hz).	104
Tabela 4.62 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED5.2 (em Hz).	105
Tabela 4.63 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED8.2 (em Hz).	105
Tabela 4.64 - Valores comparativos de frequências naturais no ED1.3 (em Hz).	111
Tabela 4.65 - Valores comparativos de frequências naturais no ED2.3 (em Hz).	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.66 - Valores comparativos de frequências naturais no ED3.3 (em Hz).....	111
Tabela 4.67 - Valores comparativos de frequências naturais no ED5.3 (em Hz).....	111
Tabela 4.68 - Valores comparativos de frequências naturais no ED8.3 (em Hz).....	111

CAPÍTULO 1

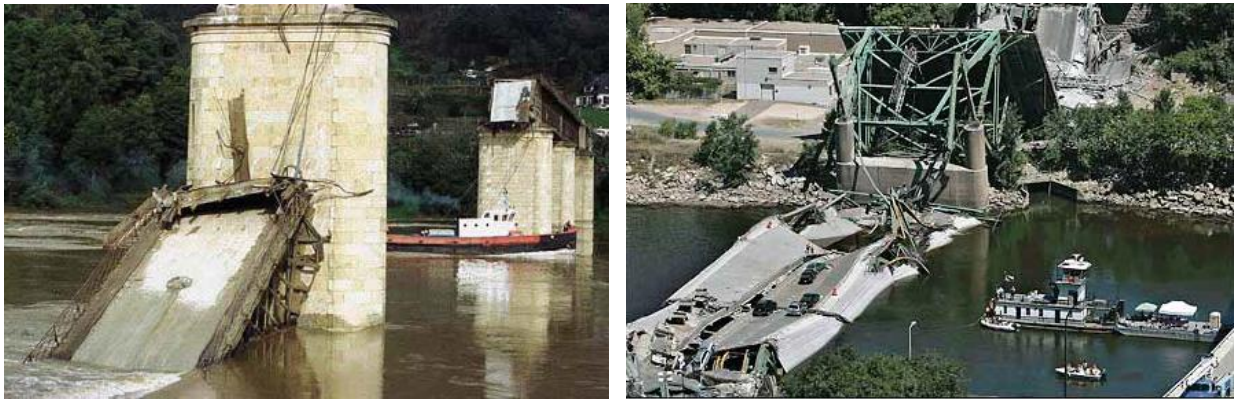
INTRODUÇÃO

A presente dissertação é dedicada à monitorização estrutural baseada na análise e observação experimental de sistemas de monitorização, apoiado na aplicação sobre um modelo laboratorial de diversos equipamentos de medição. Com isto é pretendida a avaliação estrutural de um demonstrador desenvolvido para o efeito, e também a avaliação do desempenho de vários dispositivos de medição. No presente capítulo é introduzida uma visão geral do estado de desenvolvimento dos sistemas de monitorização estrutural, a motivação e os objetivos que levaram a desenvolver este tema. No final é feita uma descrição resumida da estrutura da dissertação, com referência ao conteúdo de cada capítulo.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a manutenção da prosperidade económica e qualidade de vida, a sociedade atual depende de um conjunto extenso de infraestruturas. Durante décadas a maioria das infraestruturas de serviço público, tais como pontes e edifícios foram alvo de negligência e uso descontrolado, o que resultou na sua deterioração (Faria, 2010). A maioria das construções atuais apresentam décadas de serviço, sendo projetadas para as exigências do momento. Atualmente a realidade alterou, e os padrões estruturais atuais não são os mesmos dos do passado. As alterações ao nível de solicitações alteraram drasticamente até ao presente, o que resulta que muitas das infraestruturas existentes se encontrem “desatualizadas” a nível estrutural.

O nível de segurança de algumas estruturas pode ser considerado aquém do exigido, sendo os prejuízos resultantes das falhas das estruturas avultados e muitas vezes com consequências para o ser humano. O impacto destas falhas faz-se sentir em diversos campos, tais como económicos, sociais, estéticos, ecológicos, ou até mesmo podendo levar a fatalidades humanas. A título de exemplo, são apresentadas na Figura 1.1 a Ponte Hintze Ribeiro, em Entre-os-Rios, Portugal, e a Ponte I-35W, sobre o rio Mississípi, Estados Unidos da América, cujas consequências do colapso são bem conhecidas (Rodrigues, 2011).



a) Ponte Hintze Ribeiro, Entre-os-Rios

b) Ponte I-35W, sobre o rio Mississípi

Figura 1.1 - Colapso de infraestruturas. Retirado de Rodrigues (2011)

A avaliação das condições de utilização das estruturas é um dos maiores desafios colocados às entidades responsáveis pela sua exploração. Fatores como o envelhecimento das estruturas existentes, ou mesmo alterações das exigências funcionais de segurança obrigam ao desenvolvimento de estratégias de intervenção, para que seja possível aumentar o período de utilização de uma estrutura (Figueiras, et al., 2016). Sendo que a segurança é um fator primordial para a avaliação da adequação das estruturas atuais, é exigida uma manutenção regular, ou até em alguns casos o reforço estrutural para que se mantenham níveis de segurança aceitáveis, a operacionalidade e conforto adequados às exigências atuais (Rodrigues, 2011). A Figura 1.2 ilustra as intervenções que podem ser efetuadas de modo a que a estrutura se mantenha nos níveis exigidos de segurança.

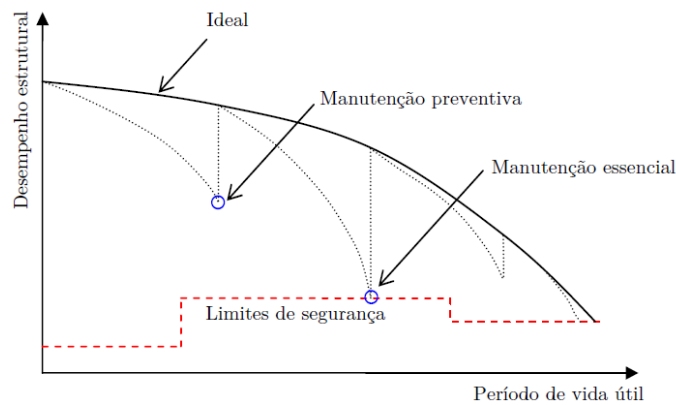


Figura 1.2 - Natureza da manutenção estrutural e reposição dos níveis de segurança. Retirado de Rodrigues (2011).

As preocupações ao nível da segurança estrutural aliadas ao advento tecnológico que se verifica atualmente impulsionam o aparecimento da monitorização do comportamento das estruturas. Esta monitorização, baseada na medição de grandezas relevantes culminou no desenvolvimento de sistemas que acompanham em permanência o comportamento das estruturas e é materializada com recurso a

equipamentos que fazem parte integrante da estrutura. O aparecimento deste tipo de sistemas impulsionou o conceito de monitorização da integridade estrutural, ou internacionalmente designado por *Structural Health Monitoring* (SHM).

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A monitorização estrutural é uma área da engenharia em crescimento e desenvolvimento permanente, sendo por isso uma área de enorme futuro. Apresentando-se, desta forma como um elemento importante na gestão de obras. É de interesse geral que seja feito o acompanhamento e avaliação permanente das grandes estruturas da engenharia civil, áreas que continuam em desenvolvimento constante.

Os desafios, cada vez mais exigentes, atualmente colocados às entidades responsáveis pelas obras públicas, desde projetistas a entidades responsáveis pela exploração de infraestruturas e outras obras de engenharia civil, relacionados com a conceção de projetos mais inovadores e que comportam níveis de custos associados à manutenção e segurança mais elevados. É assim importante a conceção de programas de monitorização de integridade civil (CSHM), que comportam a seleção e colocação de sensores para a medição de parâmetros condicionantes para o desempenho e saúde do sistema estrutural.

É do interesse das entidades responsáveis pelas estruturas existentes a implementação de sistemas SHM. Este interesse surge dos custos associados à construção de novas estruturas, bem como a manutenção das existentes, que em alguns casos se encontram em rápido estado de deterioração. Os sistemas SHM possibilitam a deteção de potenciais danos o mais breve possível, fazendo assim que a atuação sobre os mesmos seja mais rápida. Posto isto, os benefícios da aplicação de sistemas SHM são notórios, e têm como consequência a melhoria de segurança estrutural.

Dito isto, a realização de trabalhos como os elaborados nesta dissertação assume um papel relevante na área da engenharia civil.

O objetivo da dissertação passa pela implementação de um sistema de monitorização estrutural num demonstrador desenvolvido para efeito. Durante os trabalhos de monitorização serão observados vários parâmetros, que serão obtidos através de sensores, tais como LVDT's, extensómetros, inclinómetros e acelerómetros. Os parâmetros medidos permitem uma avaliação global do desempenho dos sensores citados, bem como da resposta da estrutura às ações.

A validação dos dados obtidos experimentalmente é um fator importante para avaliar o sucesso deste tipo de trabalhos. Desta forma, em complemento à campanha experimental realizada, e de forma a comparar as grandezas obtidas por via experimental, serão também explorados modelos de cálculo de complexidade diferente.

O interesse da realização destes trabalhos prende-se com o facto da utilização de modelos numa escala reduzida permite retirar algumas conclusões sobre estruturas em escala real. Não podendo extrapolar completamente os resultados obtidos em modelos reduzidos, algumas das conclusões que deles se retiram podem ser utilizados para concluir sobre o comportamento das estruturas reais da engenharia civil.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, cada um dedicado a um tema, constituídos por introdução, desenvolvimento e conclusão.

No **Capítulo 1** é feita uma introdução genérica à monitorização estrutural no âmbito das estruturas de engenharias civil, contextualizando com o estado atual das obras de engenharia civil, culminando com a apresentação da motivação e dos objetivos que levaram à realização do trabalho.

O **Capítulo 2** oferece uma visão geral sobre as tecnologias de sensores mais utilizadas na monitorização estrutural, bem como as grandezas medidas pelos mesmos. É dada ênfase aos sensores de base elétrica e também, de forma mais genérica, aos sensores de fibra ótica.

No **Capítulo 3** é apresentado o demonstrador utilizado na componente experimental. Esta apresentação é complementada com a indicação dos ensaios realizados na componente experimental e a apresentação dos resultados obtidos na mesma.

O **Capítulo 4** dedica-se à modelação 3D do demonstrador, através do programa de cálculo automático *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017*. São apresentados os dados obtidos através dos modelos numéricos elaborados. É feita a comparação dos resultados obtidos através da modelação numérica, com os resultados que se retiram pela via experimental. O objetivo é obter parâmetros idênticos através dos dois métodos utilizados (experimental e modelos numéricos), de modo a retirar conclusões sobre os mesmos.

No **Capítulo 5** são retiradas as conclusões sobre o trabalho realizado e apresentadas as perspetivas para a realização de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

O presente capítulo dedica-se à apresentação dos sistemas de monitorização estrutural e dos seus principais constituintes. São introduzidos os transdutores mais comuns na monitorização estrutural e os respetivos sistemas de aquisição de dados. O foco será dado às grandezas e sensores utilizados para a realização deste trabalho, dos quais será feita uma apresentação genérica.

Um sistema de Monitorização da Integridade Estrutural (SHM) é usualmente composto por um sistema sensorial, um equipamento de aquisição de dados, um sistema de transmissão de dados, sistemas de controlo, sistemas de processamento, sistemas de gestão de dados e sistemas de avaliação estrutural. Sendo os dois primeiros acoplados à estrutura. No que respeita à rede de sensores, esta pode estar embebida na estrutura ou instalado superficialmente. Todos os restantes sistemas são instalados em laboratório ou escritório.

2.1 MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

2.1.1 Introdução

A avaliação das estruturas sempre foi um dos pilares do desenvolvimento da engenharia estrutural, experimentando desenvolvimentos ao longo de muitos anos. Só mais recentemente é que se começou a observar um crescimento exponencial na monitorização estrutural. Este crescimento é devido aos enormes avanços tecnológicos que se verificaram nas últimas décadas.

Os primórdios da monitorização estrutural remontam a vários séculos atrás, e a ideia da observação do comportamento das estruturas surge na engenharia civil e com desenvolvimentos ao longo de muitos anos. A história está repleta de casos de testes e observações do desempenho de estruturas a construir na tentativa de garantir a segurança e prolongar a vida útil das estruturas, como é o exemplo apresentado na Figura 2.1, que remonta ao século XIX.

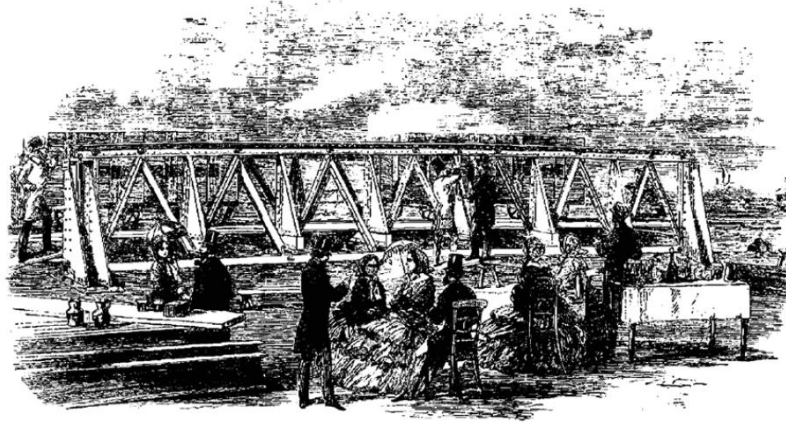


Figura 2.1 - Ensaio de carga numa treliça de aço no século XIX. Retirado de Rodrigues (2011).

A evolução encarregou-se de ajudar o ser humano na sua procura de soluções melhores para corresponder às suas expectativas. Nas últimas décadas observou-se um rápido crescimento das tecnologias SHM, principalmente devido à necessidade de monitorização constante das estruturas com o objetivo de se garantir uma gestão e manutenção mais eficiente, de se obter um melhor conhecimento do comportamento das estruturas para se realizarem intervenções mais seguras e eficazes. Um dos fatores mais importantes neste crescimento deve-se aos desenvolvimentos tecnológicos que culminaram em sensores mais económicos e funcionais e também dos sistemas de aquisição de dados. Estes desenvolvimentos apoiam-se no advento de novas tecnologias de comunicação e de meios de armazenamento e gestão de dados (Cavadas, 2008).

2.1.2 Monitorização da integridade estrutural

A definição do conceito de monitorização da integridade estrutural (SHM – Structural Health Monitoring) não é de todo consensual. Vários autores apresentam definições que na generalidade dos casos têm pontos em comum (Figueiredo, 2006).

As publicações mais recentes apresentam os sistemas de monitorização estrutural como sistemas que promovem a automatização do acompanhamento das principais grandezas que caracterizam o comportamento das estruturas, e das ações a que as mesmas estão sujeitas, disponibilizando informação, em tempo real, às entidades responsáveis pela sua gestão. É desta definição que surge o conceito de “estruturas inteligentes”, do inglês *Smart Structure*, tema que será desenvolvido mais à frente neste capítulo.

De modo a tornar o conceito mais claro, a Figura 2.2 ilustra uma analogia que pode ser feita entre a monitorização estrutural e a abordagem de um médico perante um paciente. Assim como na medicina se procura os sintomas que o paciente exhibe, também na engenharia SHM o que se procura é medir e analisar

aspectos que representem o “estado de saúde” das estruturas, com o objetivo de se trabalhar na sua conservação.

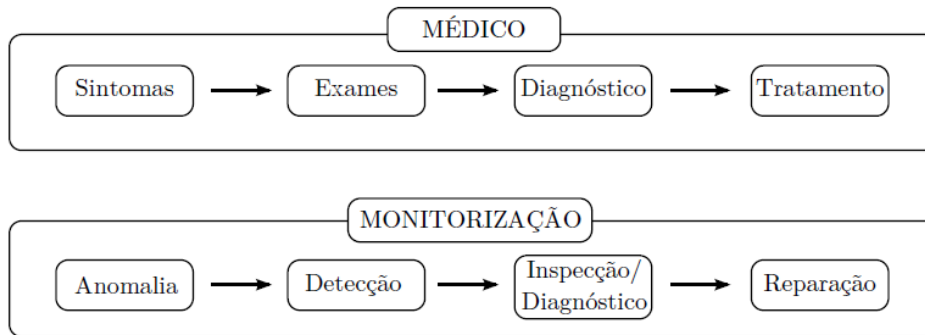


Figura 2.2 - Paralelismo entre a monitorização estrutural e a medicina. Retirado de Rodrigues (2011).

Um sistema de monitorização estrutural é constituído pelos seguintes subsistemas, cuja integração com a rede de sensores e o sistema de aquisição de dados é apresentado na Figura 2.3:

- Rede de sensores;
- Unidades de aquisição de dados;
- Unidades de comunicação
- Controlo, visualização e pós-processamento.

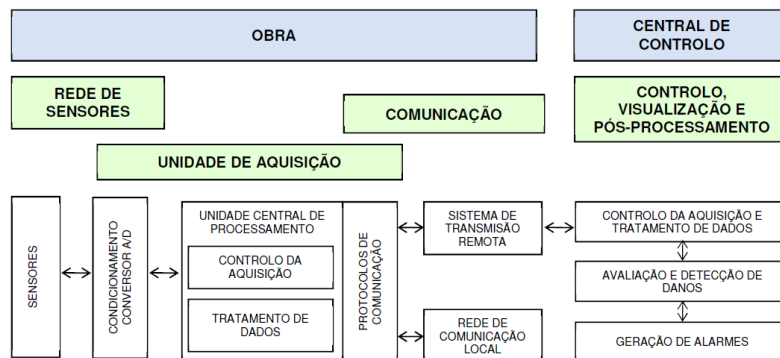


Figura 2.3 - Esquema geral de um sistema de monitorização. Retirado de Figueiras, et al. (2016).

O desenvolvimento de um sistema de monitorização estrutural envolve conhecimentos de diferentes áreas, das quais se destacam as estruturas, materiais, sensores, gestão e processamento de dados, modelação, computadores e comunicação. A Figura 2.4 ilustra a representação esquemática de um sistema típico de monitorização estrutural (Figueiras, 2008).

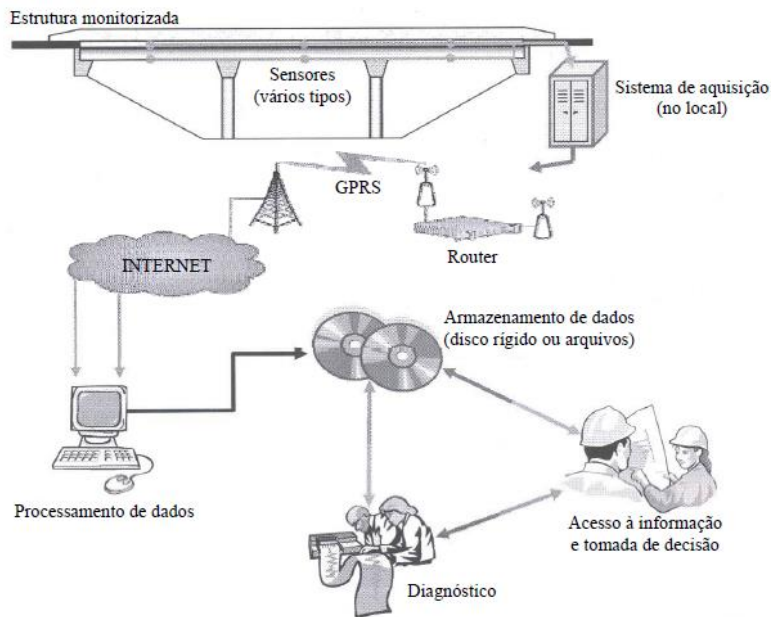


Figura 2.4 - Ilustração esquemática de um sistema de SHM. Retirado de Figueiras (2008).

A monitorização da integridade estrutural pode ser dividida em quatro categorias: ensaios estáticos, ensaios dinâmicos, monitorização periódica e monitorização contínua (consultar Figura 2.5). Cada uma das categorias mencionadas pode ser dividida em diferentes subcategorias, que se distinguem entre si pelo tipo de ação a que sujeita as estruturas, seja em termos de frequência da medição das grandezas físicas, quer na escala temporal da recolha de dados (Figueiras, 2008).

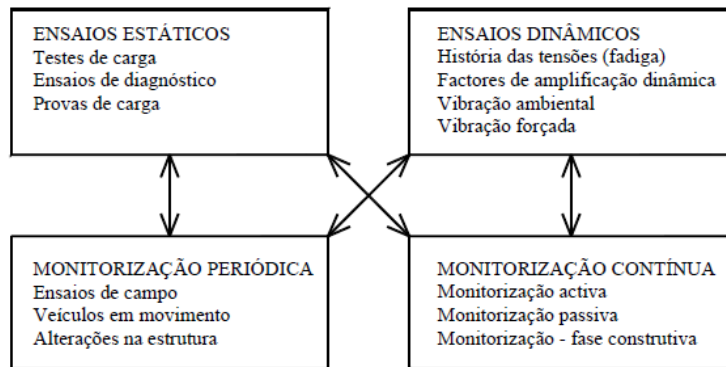


Figura 2.5 - Tipos e subtipos de sistemas SHM. Retirado de Figueiras (2008)

A função da rede de sensores constituinte do sistema de monitorização é medir as grandezas mecânicas, físicas e químicas consideradas representativas do comportamento da estrutura em estudo. Na Tabela 2.1 são apresentadas as grandezas mais comuns na monitorização estrutural.

Tabela 2.1 - Grandezas medidas na monitorização estrutural.

Mecânicas	Deslocamento, rotação, força, pressão, abertura de fendas, abertura de juntas, extensão, deformação, tensão, aceleração
Físicas	Temperatura, humidade relativa, pluviosidade, radiação solar, vento
Químicas	pH, penetração de cloretos, penetração de sulfatos, penetração da carbonatação, corrosão das armaduras, corrosão do aço

As grandezas apresentadas são escolhidas para o sistema de monitorização conforme o tipo de estrutura e as condições que se permite avaliar. É desta avaliação que se faz a escolha dos equipamentos a utilizar na monitorização.

2.1.3 Estruturas inteligentes

Conforme referido anteriormente, a aplicação de sistemas de monitorização estrutural implica o conceito de “estruturas inteligentes”, ou *Smart Structures*. As estruturas inteligentes baseiam-se na correlação existente entre o sistema muscular e o sistema nervoso do ser humano. O conceito nasce da ideia de produzir estruturas não biológicas que tenham uma resposta otimizada, tal como acontece nos sistemas biológicos na natureza através da sua capacidade adaptativa (Figueiredo, 2006).

A definição de estrutura inteligente aponta no sentido de estruturas dotadas de sensores, embebidos ou colados à estrutura, fazendo parte integrante da estrutura, e por atuadores cuja resposta é em função de uma unidade de controlo baseada nos parâmetros fornecidos pelos sensores. Estas estruturas têm a capacidade de responder de forma programada e inteligente, em função das ações atuantes.

Os componentes constituintes de uma estrutura inteligente são:

- Sensores e sistema de aquisição;
- Sistema de transmissão;
- Unidade de comando e controlo;
- Sistemas de instrução;
- Dispositivos de controlo ou atuadores.

Na Figura 2.6 está ilustrado um possível sistema de monitorização inteligente, onde y é o vetor de dados analógicos dos sensores diretamente para o computador periférico ou unidade de controlo ativo, w é o vetor de dados analógicos que transmitam diretamente para o computador central e u_i é a instrução para

os atuadores, sendo u_1 originária da unidade de controlo ativo e u_2 originária da unidade de comando e controlo (Figueiredo, 2006).

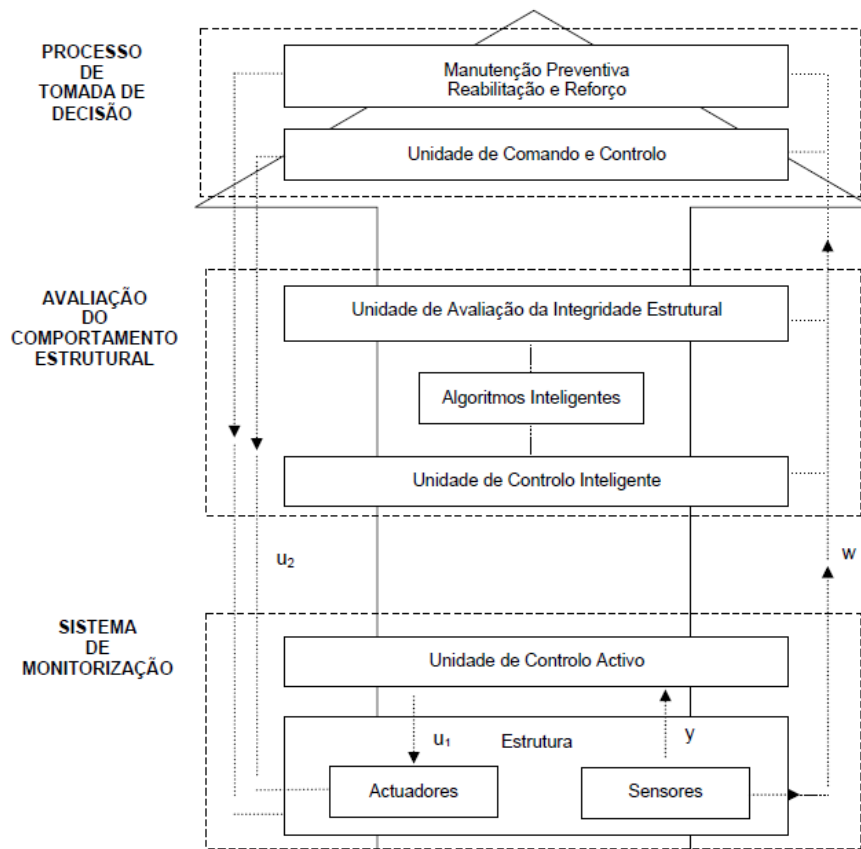


Figura 2.6 - Monitorização inteligente. Retirado de Figueiredo (2006).

As estruturas inteligentes podem ser consideradas o futuro da engenharia, dado que têm a seu favor os desenvolvimentos tecnológicos que atualmente se verificam. Com este tipo de estruturas é possível fazer uma gestão cuidada das obras de engenharia civil. Têm a seu favor a vantagem de proporcionarem uma gestão mais económica, dado que as estruturas reagem autonomamente às solicitações prevenindo assim o aparecimento de danos que podem comprometer a segurança estrutural.

2.2 PROCESSOS DE MEDIÇÃO

2.2.1 Introdução

O objetivo da implementação de sistemas SHM é obter medições da resposta estrutural, resultantes de excitações externas, permitindo assim concluir sobre a salubridade da estrutura baseado nos dados da medição. Os sensores são estrategicamente colocados em pontos considerados mais condicionantes, ou seja, onde é mais elevada a probabilidade de ocorrência de anomalias. Para um projeto de SHM é importante o conhecimento das condições de vida e conceção da estrutura, sendo que para tal é

necessário um estudo prévio, para a identificação dos parâmetros que é necessário monitorizar e a localização mais adequada para os sensores (Enckell, 2011).

Para a implementação de um sistema de monitorização, com o objetivo de observar o comportamento estrutural, recorre-se a instrumentos de medição, cuja função é transformar uma grandeza física em outra, manifestando desta forma a resposta da estrutura. A grandeza em avaliação pode ser obtida por sensores mecânicos, elétricos ou óticos.

As grandezas que mais interessam medir na observação do comportamento de obras de engenharia civil são:

- Deslocamento linear;
- Extensões;
- Rotações (ou desvios angulares);
- Acelerações;
- Pressão;
- Abertura de fendas;
- Distorção dos aparelhos de apoio;
- Contração ou expansão das juntas de dilatação;
- Temperatura;
- Humidade.

Os sensores elétricos assumem uma função fundamental em sistemas de monitorização automáticos. Um sensor é um instrumento de medição capaz de transformar uma grandeza de entrada num sinal elétrico. Em alguns dos sensores mais comuns o sinal elétrico de resposta não se obtém de forma direta, sendo por isso necessário transformar o sinal. Para tal os sensores instalados para a observação do comportamento da estrutura concentram-se num sistema de aquisição de dados, cuja função é converter o sinal analógico ou digital e armazenar informação (Magalhães, 2015).

Atualmente têm sido observados avanços significativos no mercado de sensores, consequência dos trabalhos de investigação que visam desenvolver tecnologias e técnicas de monitorização mais precisas, fáceis e rentáveis economicamente. Consequentemente o mercado de sensores com aplicação na engenharia civil apresenta uma vasta gama de aparelhos que permitem a medição da maioria das grandezas estruturais relevantes.

É importante que um sensor possua uma boa sensibilidade, para captar e medir variações pequenas, particularmente quando aplicados em estruturas rígidas. Contudo deverão ter boa resposta a frequências baixas, para análises dinâmicas, para que seja possível identificar certas características associadas às estruturas flexíveis.

2.2.2 Medição do deslocamento

A medição de deslocamentos é uma grandeza importante para a realização de ensaios de carga e medição de flechas em tabuleiros de pontes. Possibilita a análise do comportamento linear global e local, através da quantificação de deslocamentos horizontais e verticais.

Existe no mercado uma grande variedade de instrumentos aplicados na medição de deslocamentos relativamente a dois pontos. A medição de deslocamentos é fundamental para analisar o comportamento de uma estrutura quando aplicada uma carga na mesma. Para tal é importante definir um ponto fixo, que pode ser interno ou externo à estrutura (Félix, 2002).

2.2.2.1 Transdutores de deslocamento capacitivos

O princípio de funcionamento de um transdutor de deslocamento capacitivo baseia-se na variação da capacidade de um condensador através da variação da distância entre placas. Nestes aparelhos de medida o fenómeno é utilizado para que uma variação de distância tenha correspondência com uma indicação numérica da mesma (Félix, 2004). Na Figura 2.7 são apresentados um comparador digital e um paquímetro digital, exemplos desta tipologia de instrumentos. Estes instrumentos são capazes de medir deslocamentos até 12,7 mm, com rigor de milésima de milímetro, com elevada precisão, de forma autónoma e expedita (Mitutoyo Corporation, 2015).



a) Comprador digital

b) Paquímetro digital

Figura 2.7 - Transdutores de deslocamento capacitivos. Retirado de Mitutoyo Corporation (2015).

2.2.2.2 Transdutores indutivos LVDT

O LVDT (Linear Variable Differential Transformer), como o apresentado na Figura 2.8, é um dispositivo eletromecânico que mede movimentos retilíneos relativos, através de um sinal elétrico proporcional ao movimento de um núcleo magnético móvel. É bastante fiável uma vez que apresenta elevada repetibilidade, boa estabilidade a longo prazo, uma vida mecânica longa e resposta eficaz, seja em medições estáticas, seja em medições dinâmicas, possibilitando o registo através da ligação a um sistema de aquisição de dados (Félix, 2004).



Figura 2.8 - LVDT da série LDC da marca RDP Group. Retirado de RDP Electronics Ltd (2017).

Um LVDT é constituído por três enrolamentos, um primário e dois secundários, conforme esquematizado na Figura 2.9 a). Quanto à composição, o núcleo cria um campo magnético, que quando o LVDT é excitado aplica uma corrente alternada AC, $v_i(t)$, ao enrolamento primário. Enquanto os restantes enrolamentos, os secundários, induzem tensões, $v_1(t)$ e $v_2(t)$, resultante do acoplamento de fluxo com o primário, sendo estas tensões igualmente distribuídas quando o núcleo está centrado, ou seja, na posição zero. Quando se verifica um deslocamento do núcleo, a variação no acoplamento de fluxo eleva a tensão num enrolamento secundário, diminuindo no outro. Assim sendo, a tensão de saída $v_o(t)$ não é nula, sendo, contudo, as respetivas fases de sinal opostas e dependentes da posição e sentido em se verifica o movimento do núcleo. A tensão nos dois enrolamentos secundários é dada por:

$$v_o(t) = v_1(t) - v_2(t) \quad (2.1)$$

Conforme o que se pode verificar na Figura 2.9 b) a amplitude do sinal de saída, v_o , é função da posição do núcleo. Este fato reflete-se na boa linearidade dentro do campo de medida do LVDT. Assim sendo o sinal de saída é sinusoidal e com frequência e amplitude provocada pela frequência de movimentação do núcleo.

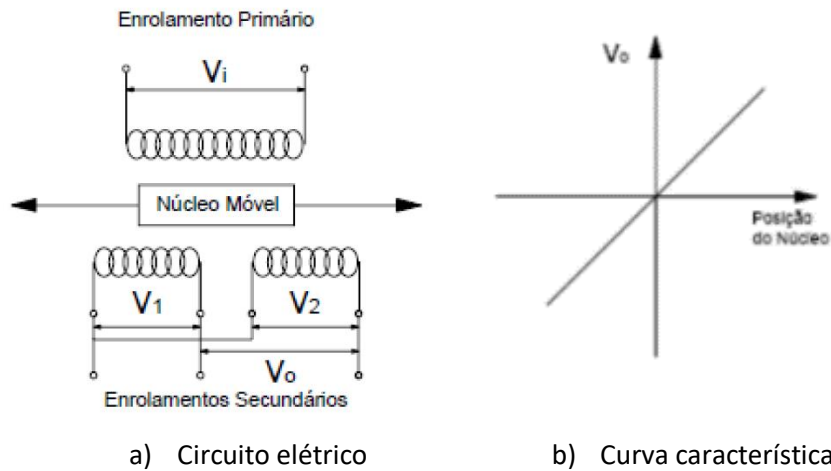


Figura 2.9 - Esquema de um LVDT. Retirado de Cavadas (2008).

2.2.2.3 Transdutores de deslocamento resistivos

No método de funcionamento dos transdutores de deslocamento resistivos é feita uma relação entre o deslocamento imposto e a resistência do elemento sensor. Este tipo de sensores utiliza extensômetros de resistência e potenciômetros, sendo disso exemplo os apresentados na Figura 2.10. Na Figura 2.10 a) é apresentado um transdutor de deslocamento de mola, onde o deslocamento entre dois pontos fixos traduz-se pela deformação de uma mola, que é medida através de extensômetros de resistência elétrica ligados em ponte completa. Nestes sensores para uma gama de medição de ± 2 mm a relação entre o sinal de saída da ponte e o deslocamento é linear, e possui uma distância entre pontos de fixação que varia entre 100 mm a 300 mm, sendo usualmente utilizado para medir extensões em peças de betão. A Figura 2.10 b) apresenta um medidor de abertura de fendas, cujo princípio de funcionamento é semelhante ao dos transdutores de deslocamento de mola, e apresenta uma gama de medição de ± 5 mm e uma distância entre pontos de fixação de aproximadamente 80 mm, sendo o mais indicado para a medição de abertura de fendas (Félix, 2004).



a) Transdutor de deslocamento de mola



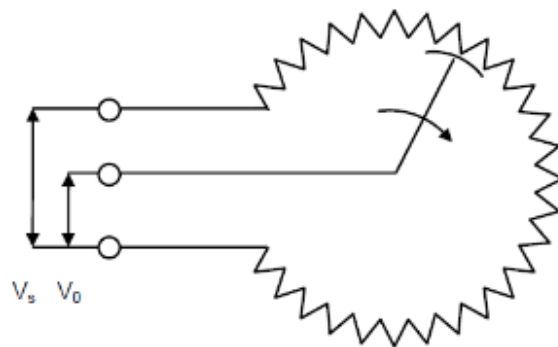
b) Medidor de abertura de fendas

Figura 2.10 - Transdutores de deslocamento resistivos. Retirado de Félix (2004).

A Figura 2.11 a) ilustra um transdutor linear de posição cujo elemento sensor é um potenciómetro. Estes transdutores são instalados numa base fixa e o fio extensível é fixado à parte móvel, de modo que qualquer movimento resulta numa rotação interna de um veio que aciona o potenciómetro (consultar Figura 2.11 b)), e cujo sinal de saída é diretamente proporcional ao movimento. Estes sensores possuem uma gama de medição muito alargada, que pode ascender a alguns metros. Podem ser utilizados na medição de movimentos de juntas de dilatação em obras de grande dimensão (Félix, 2004).



a) Transdutor linear de posição



b) Potenciómetro de posição

Figura 2.11 - Transdutor potenciométrico. Retirado de Félix (2004).

2.2.2.4 Medição de flechas com recurso ao método dos níveis líquidos

O método dos níveis líquidos, baseado no sistema de nivelamento hidrostático é utilizado na medição de flechas, ou seja, deslocamentos verticais, que assenta no princípio dos vasos comunicantes (ver Figura 2.12). Este sistema consiste na introdução de um circuito hidráulico que percorre a estrutura. Estando garantido o equilíbrio hidrostático e analisadas as alturas h_1 e h_2 do líquido possibilita traçar a linha piezométrica do circuito, com base na equação de Bernoulli (Rodrigues, 2011).

A determinação dos deslocamentos verticais de forma indireta, associados à variação de cotas do líquido no circuito, é feito pela seguinte expressão:

$$(h_1 + \Delta H) + \frac{P_{0,1}}{\rho_1 g} = h_2 + \frac{P_{0,2}}{\rho_2 g} = c \quad (2.2)$$

Onde:

$P_{0,1}$ e $P_{0,2}$ é a pressão atmosférica;

ρ_1 e ρ_2 é massa volúmica do líquido;

g é a aceleração gravítica associada à energia de equilíbrio do sistema.

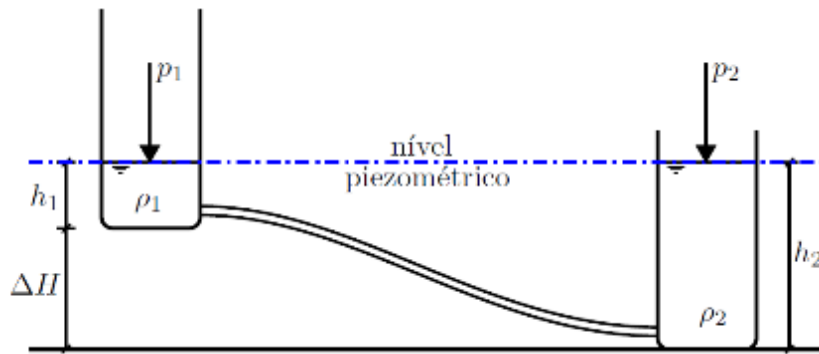


Figura 2.12 - Princípio dos vasos comunicantes aplicado ao nivelamento hidrostático. Retirado de Rodrigues (2011).

No método dos níveis líquidos utiliza-se a água, devido à facilidade de acesso, o seu custo, a suas propriedades são bem conhecidas, e possui peso específico e viscosidade quase nula. Este sistema é uma boa solução para a medição de flechas devido à sua elevada precisão em casos de dificuldade, ou mesmo de impossibilidade de ter pontos de referência com ligação ao solo ou a pontos exteriores à estrutura, como é o exemplo de uma ponte (Félix, 2004).

O circuito hidráulico contém um ponto de referência, onde pressupõe que o deslocamento vertical é nulo, por exemplo junto de um pilar, e pontos onde se pretende determinar o deslocamento vertical. Todos os pontos referidos devem estar munidos de sensores de pressão. O circuito é alimentado por um reservatório, instalado próximo do ponto de referência, que percorre a estrutura passando pelos sensores, que na fase inicial estão em equilíbrio com o circuito. A deformação da estrutura causa um rearranjo do fluido, que dá origem a um novo estado de equilíbrio. O deslocamento vertical de um ponto é dado pela diferença de cotas entre o estado inicial e o final (Rodrigues, 2011).

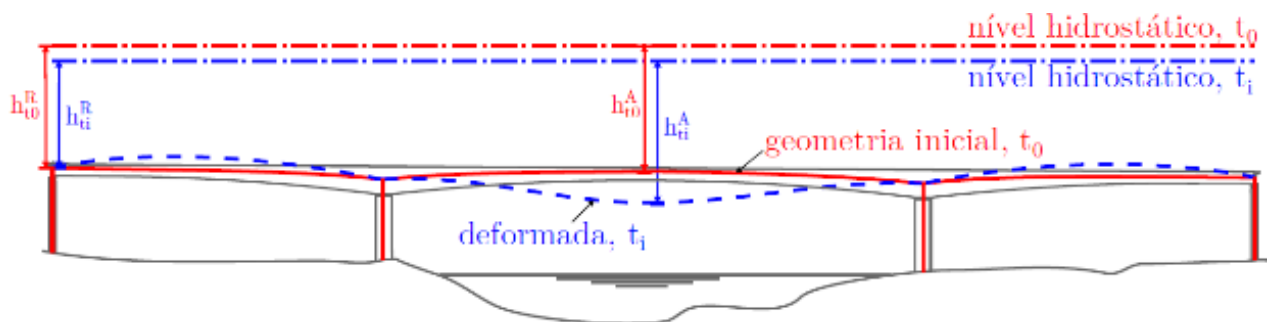


Figura 2.13 - Esquema simplificado da aplicação do método dos níveis líquidos. Retirado de Rodrigues (2011).

A aplicação do método dos níveis líquidos, esquematizado na Figura 2.13, numa secção específica onde o pretendido é determinar o deslocamento vertical no ponto A resultado de uma nova posição de equilíbrio do líquido em relação ao ponto de referência R.

Partindo do princípio que a pressão atmosférica é constante em todos os pontos do circuito, o deslocamento vertical relativo para o ponto t, é o correspondente à variação de cota do nível líquido no ponto A, ao ponto fixo de referência é dado por:

$$\Delta\delta_{v,t_i}^A = (h_{t_i}^A - h_{t_0}^A) - (h_{t_i}^R - h_{t_0}^R) \quad (2.3)$$

Onde:

$\Delta\delta_{v,t_i}^A$ é o deslocamento vertical relativo entre A e R;

$h_{t_i}^A$ é a altura do líquido no instante t_i na secção A;

$h_{t_0}^A$ é a altura do líquido no instante inicial t_0 na secção A;

$h_{t_i}^R$ é a altura do líquido no instante t_i na secção R;

$h_{t_0}^R$ é a altura do líquido no instante inicial t_0 na secção R.



a) Reservatório e transdutor de referência



b) Transdutor de pressão integrado no circuito

Figura 2.14 - Sistema de nivelamento hidrostático. Retirado de Magalhães (2015).

Na Figura 2.14 apresenta-se os transdutores geralmente utilizados na medição de deslocamentos verticais da estrutura, baseado em sensores elétricos de pressão que possibilitam a medição da variação de pressão associada à variação de altura do circuito.

Em alternativa aos sensores elétricos existem transdutores de deslocamentos baseados na tecnologia de fibra ótica, desenvolvidos no LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural) e patenteados pela Universidade do Porto, que são aplicados na monitorização de estruturas para a medição de flechas (Rodrigues, 2011).

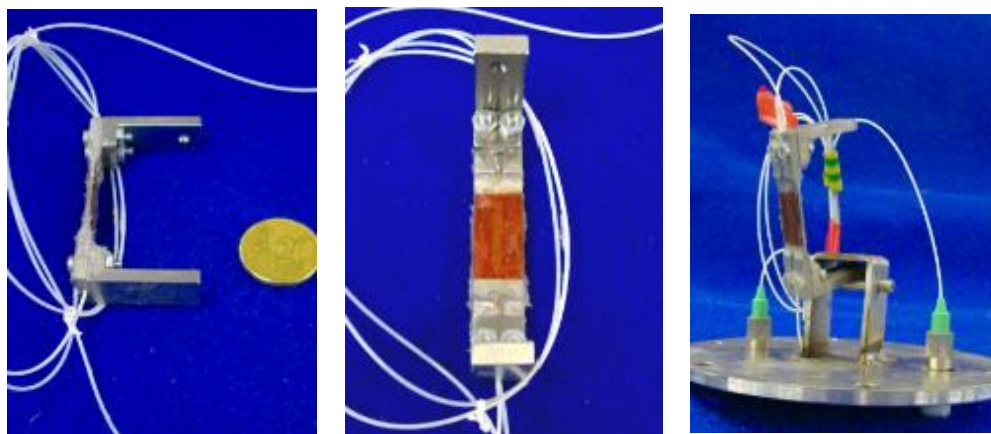


Figura 2.15 - Pormenor da célula de carga e fixação. Retirado de Rodrigues (2011).

O transdutor apresentado na Figura 2.15 possibilita a medição de pequenas variações no nível do líquido no circuito utilizando uma célula de carga acoplada a uma peça cilíndrica parcialmente imersa no líquido que com a variação do mesmo está sujeito a um impulso, e ao peso aparente da peça imersa, baseado no princípio de Arquimedes (Rodrigues, 2011).

Este transdutor é uma alternativa eficiente, de baixo custo e mais robusta para a medição de flechas, seja em pontes, seja em outras obras de engenharia civil (ver Figura 2.16).

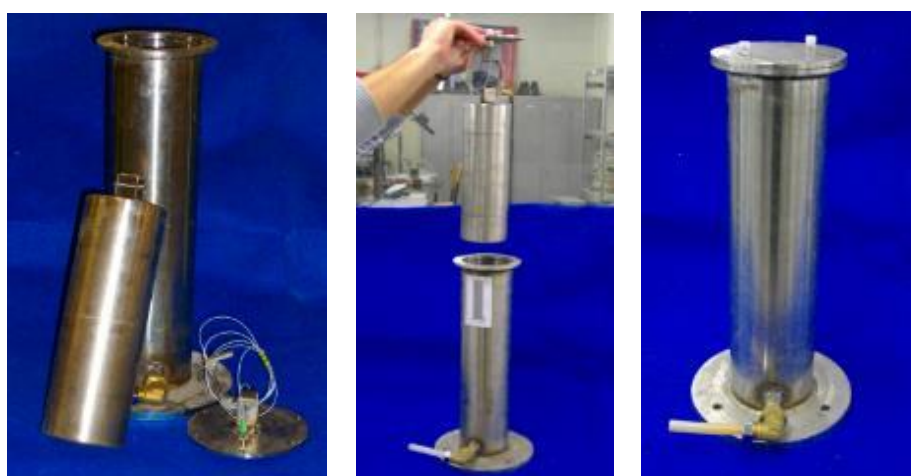


Figura 2.16 - Configuração do transdutor. Retirado de Rodrigues (2011).

2.2.2.5 Medição da extensão

Um dos objetos de estudo da monitorização é a medição de extensões, sendo possível com apoio a modelos numéricos a avaliação da distribuição de esforços e tensões numa estrutura, para determinar o seu comportamento e avaliar a segurança. Para a medição de extensões é corrente o uso de extensómetros, existindo a possibilidade de estes serem embebidos ou aplicados superficialmente (Félix, 2002).

Na medição de extensões o conceito de ponto é fictício, sendo na realidade um segmento, cujo comprimento é conhecido e ao longo do qual são medianizadas as extensões. Tendo em consideração a heterogeneidade e as características do material é definido o comprimento do referido segmento. Em materiais mais homogêneos, como o aço, podem ser usados extensómetros de menor dimensão, e em contrapartida para materiais mais heterogêneos, tal como o betão, a dimensão do extensómetro é condicionada à dimensão dos inertes utilizados (Félix, 2004).

Fatores ambientais como a temperatura, deformações que não introduzem tensões nas estrutura e variações das propriedades dos materiais são condicionantes para a interpretação dos valores das extensões e obtenção das tensões a partir das extensões, apresentando assim problemas para a monitorização (Félix, 2004).

2.2.2.6 Medição da extensão com transdutores de deslocamento

Considerando que extensão se trata de uma variação relativa de comprimento, é possível obter a extensão através do uso de transdutores de deslocamento que medem o afastamento entre pontos extremos de um segmento. Sendo o comprimento do segmento de referência condicionado pelas características dos materiais, existe um paralelismo com a definição do comprimento dos extensómetros. Processo que é utilizado na medição de para a medição de extensões médias em comprimentos de referência significativos (Félix, 2004).

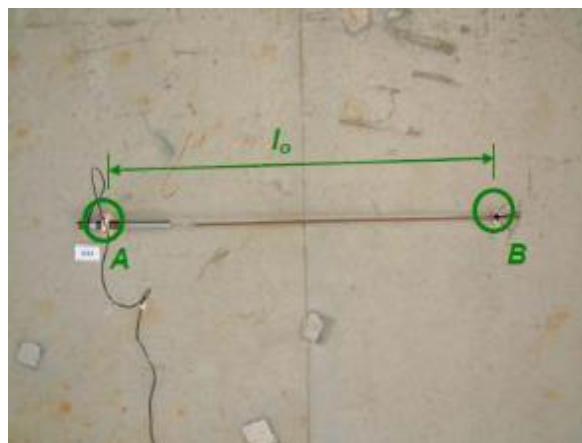


Figura 2.17 - LVDT na medição da extensão média. Retirado de Félix (2004).

Conforme o ilustrado na Figura 2.17 é possível utilizar um LVDT na medição da extensão média entre dois pontos de fixação, representados por A e B. Neste caso à haste do LVDT foi ligada uma vareta de cobre para o aumento do comprimento de referência até ao valor pretendido (l_0) (Félix, 2004).

2.2.2.7 Extensómetros de corda vibrante

Os extensómetros de corda vibrante funcionam baseados pelo facto de existir uma relação entre a frequência de vibração de uma corda e a tensão à qual esta está sujeita. Estes extensómetros são constituídos por uma cápsula, com uma corda de aço instalada no seu interior e fixa nas suas extremidades por duas flanges de aço, e que está submetida a uma elevada tração (consultar Figura 2.18) (Félix, 2004).

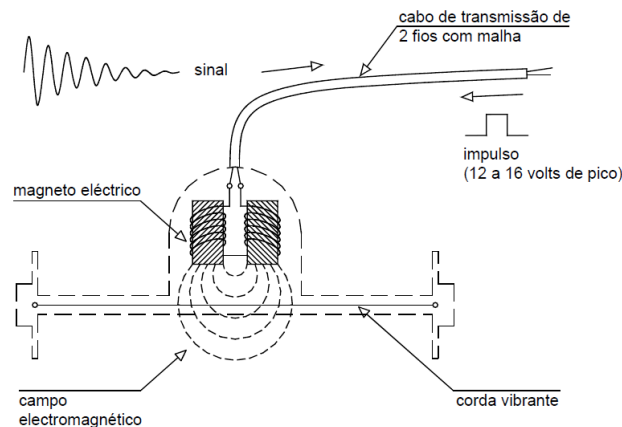


Figura 2.18 - Constituição de um sensor de corda vibrante. Retirado de Félix (2004).

A variação de extensão do sensor corresponde a uma variação de tensão na corda que provoca alteração da frequência natural de vibração do sensor. Ao percorrer uma bobine instalada nas proximidades da corda, uma corrente alterna cria um campo magnético que estimula a corda que conseqüentemente oscila à frequência de ressonância. Esta oscilação é detetada pelo sistema de aquisição, que é o mesmo dispositivo que excita a corda no campo magnético (Félix, 2002).

A seguinte expressão fornece a frequência de vibração da corda:

$$f = \frac{1}{2 * l} * \sqrt{\frac{g * \theta}{\rho}} = \frac{1}{2 * l} * \sqrt{\frac{g * E * \epsilon}{\rho}} \quad (2.4)$$

Onde:

f é a frequência natural da corda;

l é o comprimento da corda;

g é a aceleração da gravidade;

σ é a tensão a que a corda está submetida ($\sigma = E * \epsilon$);

ϵ é a extensão da corda;

E é o módulo de elasticidade da corda;

ρ é a massa específica da corda.

Quando o sensor sofrer uma variação de extensão ($\Delta\varepsilon$) a corda irá ser submetida à mesma variação. Sendo f_i a frequência de vibração inicial da corda e f_f a frequência após deformação, é possível obter a deformação através das expressões:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_i = K * (f_f^2 - f_i^2) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = k * f^2 \quad (2.6)$$

Em que:

$$k = \frac{4 * l^2 * m}{E} \quad (2.7)$$

Onde:

$\Delta\varepsilon$ é a variação de extensão;

ε_i e ε_f são as extensões iniciais e finais;

f_i e f_f são as frequências iniciais e finais;

k é a constante definida pelas propriedades do material da corda.

Os extensómetros de corda vibrante permitem a deteção de extensões da ordem de 1×10^{-6} m/m, com um campo de medida de 3000×10^{-6} m/. Verifica-se então que as perdas de sinal ao longo dos cabos que ligam o sensor ao sistema de aquisição é diminuta, possibilitando a utilização de cabos de comprimento de 2000 m (Félix, 2002). Estes sensores possuem elevada precisão, boa sensibilidade, alargado campo de medida, capacidade e estabilidade para realizar leituras de longa duração e distância (Magalhães, 2015). Contudo, como consequência dos efeitos de dilatação térmica da corda no interior da cápsula e da estrutura não serem os mesmos, estes sensores apresentam alguma sensibilidade aos efeitos térmicos.

Com a utilização de sensores de corda vibrante abre-se a possibilidade de embeber, em estruturas de betão de betão armado ou pré-esforçado, ou também de aplicação à superfície, dos quais são exemplos os apresentados na Figura 2.19.



a) De embeber no betão



b) De superfície

Figura 2.19 - Extensómetros de corda vibrante. Retirado de Félix (2004).

2.2.2.8 Extensómetros de resistência elétrica

O funcionamento dos extensómetros de resistência elétrica assenta na variação de resistência de um condutor ou semicondutor, quando sujeito a uma deformação mecânica (Félix, 2004). Para um condutor com comprimento l , secção transversal A e resistividade ρ , a resistência elétrica é dada por:

$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad (2.8)$$

Quando ao condutor é aplicada uma deformação longitudinal, cada uma das quantidades acima varia afetando a resistência, conseqüentemente ocorre uma variação da resistência definida por:

$$\frac{dR}{R} = G * \frac{dl}{l} \quad (2.9)$$

No qual G , que se trata de uma constante de calibração fornecida pelos fabricantes e que relaciona a resistência elétrica com a extensão axial, é o fator de ganho de resistência ou *gage factor*, que correntemente toma valores próximos de 2. Este fator é determinado através de ensaios em ambientes e matérias conhecidos.

A expressão 2.9 pode ainda tomar a forma:

$$x = G * \varepsilon \quad (2.10)$$

Ou ainda:

$$\varepsilon = \frac{x}{G} \quad (2.11)$$

Na qual x representa a variação de resistência do extensómetro partindo de um valor de referência.

Para extensómetros de colar à superfície considera-se que todas as extensões são no mesmo plano, ou seja, na se verificam extensões perpendiculares aos fios condutores. De acordo com (Félix, 2004), para que se uma resistência elétrica significativa do extensómetro este é constituído por um conjunto longitudinal de segmentos, ligados entre si por pequenos segmentos transversais de maior secção, formando uma malha. Assim sendo, a sensibilidade transversal será, na generalidade dos casos, somente de 1% a 2% da sensibilidade longitudinal. A malha condutora é impressa por um processo de fotogração sobre uma película metálica de espessura reduzida, depositada sobre uma base também de espessura reduzida, que em conjunto pode atingir 0,025 mm (ver Figura 2.20).

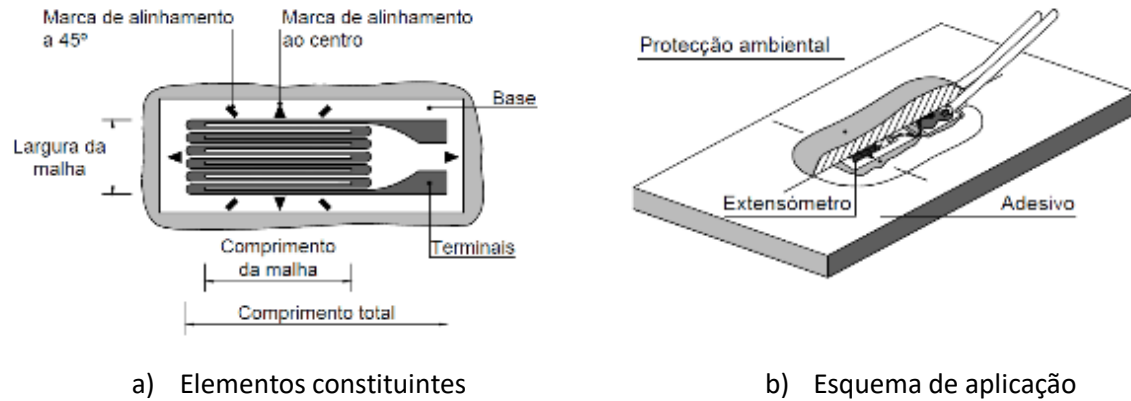


Figura 2.20 - Extensómetro de resistência elétrica. Retirado de Félix (2004).

A medição de deformações com recurso a extensómetros tem-se revelado muito útil. No entanto, existe um conjunto de limitações que devem ser consideradas de modo a assegurar a qualidade dos resultados obtidos. Em primeiro lugar a extensão mecânica experimentada pelo condutor constituente do extensómetro não deve exceder o seu limite de elasticidade, valor que varia entre, aproximadamente, $3000 \mu\epsilon$ em extensómetros semicondutores e $4000 \mu\epsilon$ em extensómetros metálicos. Em segundo, apenas se obtém uma medição correta se toda a extensão for integralmente transmitida ao sensor. Para tal é necessária uma cuidadosa colagem do extensómetro, com um adesivo elástico e estável com o tempo e com a temperatura. O extensómetro deve estar eletricamente isolado do material onde é aplicado, e protegido das condições ambientais.

O processo de medição pode ter na sua base métodos de medição de desvio ou de determinação de zero. No primeiro método, caso a resistência dos extensómetros seja alimentada por tensão ou intensidade de corrente conhecida, a medição das quedas das respetivas grandezas permite calcular o valor da resistência final. Sendo o método mais comum a determinação de zero que se apresenta mais preciso, fiável e fácil de aplicar. Tem como princípio de aplicação a ponte Wheatstone, através da qual se procede à medição das variações de resistência e a sua conversão em extensões (Magalhães, 2015).

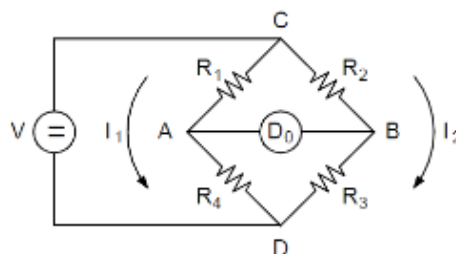


Figura 2.21 - Circuito da ponte de Wheatstone. Retirado de Félix (2004).

Ilustrado na Figura 2.21 na sua forma mais elementar, o circuito da ponte de Wheatstone é constituído por quatro resistências, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , ligadas entre si em série e em paralelo que são alimentadas por

uma fonte tensão (V) e um detetor de zero D_0 . Este detetor que se instala no braço central da ponte tem como função comparar as diferenças de potencial entre os pontos A e B do circuito (Félix, 2004).

Admitindo que a impedância do detetor é infinita, ou seja, o circuito está aberto a diferença de potencial V_0 entre os pontos A e B é dada por:

$$V_0 = V_A - V_B \quad (2.12)$$

Onde:

V_A é o potencial do ponto A em relação ao ponto C;

V_b é o potencial do ponto B em relação ao ponto C.

Considerando a lei de Ohm e que as resistências (R_1, R_4) e (R_2, R_3) estão emparelhadas em série, vem:

$$V_0 = \frac{R_1 * R_3 - R_2 * R_4}{(R_1 + R_4) * (R_2 + R_3)} \quad (2.13)$$

Quando o processo de medição de um extensômetro baseado na ponte Wheatstone, alimentada por tensão constante, se supõe que apenas um braço da ponte sofre variação de tensão com valor x , mantendo-se inalterado o valor das restantes resistências, de acordo com a Figura 2.22, R_3 toma o valor:

$$R_3 = R_0 * (1 + x) \quad (2.14)$$

Onde:

R_0 é o valor de referência da resistência;

x é o aumento da resistência, a partir do valor de referência.

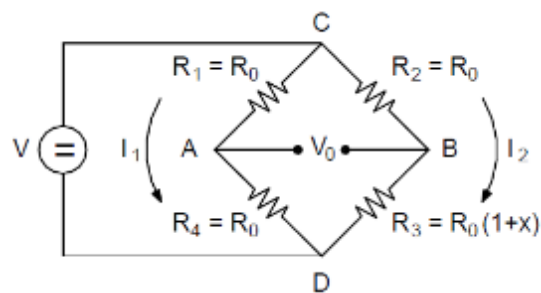


Figura 2.22 - Ligação de um extensômetro à ponte de Wheatstone com um braço ativo. Retirado de Félix (2004).

Quando são utilizados dois extensômetros obtém-se uma ligação em meia ponte, ao passo que quando se usa quatro extensômetros ativos tem-se uma ligação em ponte completa. Para estes casos já se verifica compensação do efeito da temperatura desde que os extensômetros estejam sujeitos à mesma variação térmica (Magalhães, 2015).

Os extensómetros de resistência elétrica possuem na sua composição uma resistência metálica, uma base de material isolante e terminais de ligação. Na Figura 2.23 são apresentadas algumas das configurações existentes no mercado para extensómetros de resistência elétrica.

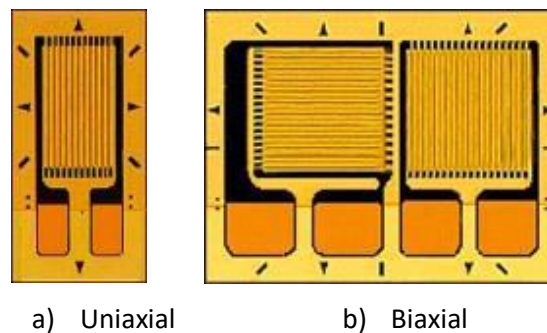


Figura 2.23 - Exemplos de extensómetros de resistência elétrica. Retirado de Vishay Precision Group, Inc (2017).

2.2.3 Medição da rotação

Para a medição da rotação ou inclinação existem dois processos distintos. O primeiro baseia-se na medição da variação angular de um eixo, entre uma posição inicial e final. No segundo é medido o desvio angular de um eixo em relação a um ponto de referência fixo, medindo assim inclinações absolutas. O plano de referência pode ser horizontal ou vertical (Félix, 2004).

Na medição de variações angulares é comum o uso do clinómetro, enquanto para a medição de rotações absolutas é usado o inclinómetro.

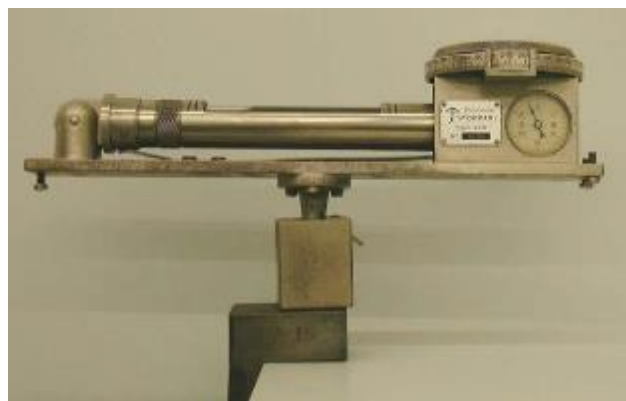


Figura 2.24 - Clinómetro de bolha de ar. Retirado de Félix (2002)

Na Figura 2.24 é apresentado o clinómetro de bolha de ar, cujo método de medição passa pela observação da posição de uma bolha de ar, o que o torna suscetível a erros de leitura do operador, ou até mesmo do incorreto posicionamento do clinómetro (Félix, 2002).

Geralmente os inclinómetros são elétricos apresentando assim a vantagem de integração num sistema automático de aquisição de dados. Este mede o movimento imposto a um pendulo que se desloca num

meio viscoso, com um movimento amortecido, quando a superfície onde é aplicado roda numa dada direção. Em posição horizontal o magneto de ferro, suspenso na haste de rigidez elástica do pêndulo, está num ponto medio entre as duas bobinas que o rodeiam, assim, um movimento de rotação em relação ao plano altera a localização do magneto, diminuindo a indutância de uma bobina relativamente à outra. Esta variação de indutância é convertida numa corrente contínua e o sinal de saída é linear relativamente ao angulo que o inclinómetro forma com o plano (Félix, 2002).

A Figura 2.25 ilustra o exemplo de um inclinómetro. Estes sensores permitem a avaliação de inclinações com elevada precisão e fiabilidade. A sua proteção externa possibilita o uso em ambientes climatéricos adversos. No entanto, exigem fixação à estrutura, e se possível, devem ser protegidos do meio ambiente.



Figura 2.25 - Inclinómetro elétrico uniaxial. Retirado de Sherborne Sensors (2017).

2.2.4 Medição da temperatura

Sendo a temperatura um fator condicionante da deformação das estruturas, interferindo assim nas grandezas de interesse para a monitorização estrutural, existem dois motivos principais para que seja feito o estudo da temperatura nas estruturas. Em primeiro lugar, para se fazer a devida compensação dos desvios dos instrumentos de medição, e em segundo, a determinação da parcela de deformação livre. Assim sendo, é aconselhável fazer a medição da temperatura juntos dos aparelhos de medição e também em locais criteriosamente selecionados que possibilitem a definição da distribuição da temperatura internamente (Félix, 2002).

Os elevados gradientes térmicos consequentes da exposição solar dificultam a interpretação da temperatura. Contudo, não é apenas a exposição solar que interfere com a dificuldade da medição da temperatura. Fatores como a baixa condutibilidade térmica do betão, a elevada condutividade térmica do aço ou mesmo a cor das superfícies condicionam a medição da temperatura.

De toda a diversidade de sensores existentes no mercado para a medição da temperatura, destaca-se como de uso mais corrente na monitorização estrutural os termopares e os detetores de temperatura resistivos (RTD – *Resistance Temperature detector*).

2.2.4.1 Termopares

Os termopares são uma boa solução, por serem mais económicos, resistentes a choques mecânicos e elevadas vibrações e possuem boa resposta a variações térmicas. Funcionam baseados no fenómeno que ocorre quando dois pontos de um se encontram a temperaturas distintas, T_1 e T_2 . Este fenómeno provoca a vibração dos átomos e a movimentação de eletrões é afetada de forma que se cria uma diferença de potencial entre os dois pontos. O fenómeno descrito processa-se devido ao facto de os átomos da região mais quente possuírem energia térmica superior e tenderem a deslocar-se para a zona mais fria. Esta movimentação é afetada pela condutividade térmica dos materiais. Se o circuito for fechado ligando as extremidades através de outro condutor verifica-se a passagem de uma corrente na malha fechada. A este fenómeno dá-se o nome de força eletromotriz (f.e.m) termoelétrica no circuito que faz circular a corrente (consultar Figura 2.26). Este efeito, designado de Efeito de Seebeck, está na base do funcionamento dos termopares (Félix, 2004).

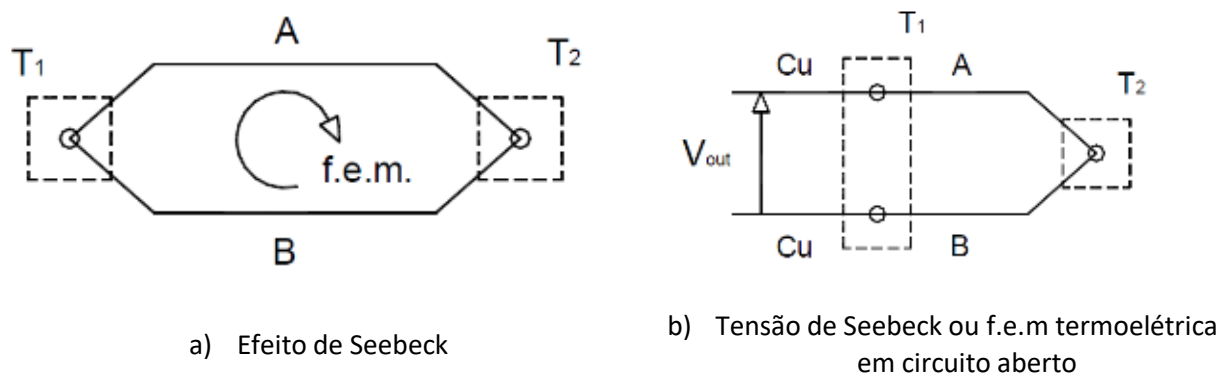


Figura 2.26 - Princípio de funcionamento dos termopares. Retirado de Félix (2004).

Em qualquer termopar a f.e.m de Seebeck F_e , em volts, é proporcional à diferença de temperatura das junções, dada por:

$$f_e = \alpha * (T_2 - T_1) \quad (2.15)$$

Onde α é a constante, expressa em $V/^\circ C$, que depende da diferença entre as constantes de condutibilidade térmica dos dois metais. Em casos que se pretenda maior precisão deve considerar-se que α também depende da temperatura a que os materiais estão sujeitos.

É possível, através da medição da f.e.m termoelétrica gerada em circuito aberto, avaliar a temperatura de uma junção quente ou de medição, através de uma junção fria ou junção de referência mantida a temperatura constante conhecida. No caso das junções citadas se encontrarem à mesma temperatura ou

ambos os condutores do termopar forem do mesmo material, a f.e.m termoelétrica é zero. As referidas junções são ligações entre dois metais e podem ser realizadas através do enrolamento de dois fios ou soldadura. Existem varias configurações de termopares, todas elas designadas por letras (consultar Tabela 2.2), dado que possuem características diferentes, tais como, a gama de medição, a linearidade, a sensibilidade, a resistência às medições ambientais, entre outras (Félix, 2004).

Assim sendo, o comportamento dos termopares ao longo de um intervalo alargado de temperatura não é linear. Contudo, na engenharia civil é costume trabalhar com intervalos de temperatura que variam entre -20°C e +100°C, onde se pode admitir que os termopares têm um comportamento linear satisfatório.

Tabela 2.2 - Caracterização de algumas configurações padrão de termopares. Adaptado de Félix (2004).

Tipo	Materiais A – B (*)	Gama de medição (°C)	F _E (mV)
C	75% tungsténio + 25% rénio 74% tungsténio + 26% rénio	0 a +2320	0 a +37,066
E	cromel® constantan	-164 a +885	-8,824 a +68,783
J	ferro constantan	0 a +749	0 a +42,283
K	cromel® alumel®	-164 a +1250	-5,973 a +50,633
S	90% platina + 10% ródio 100% platina	0 a +1450	0 a +14,973
T	cobre constantan	-164 a +350	-5,602 a +17,816

2.2.4.2 Detetores de temperatura resistivos

Um detetor de temperatura resistivo (RTD – *Resistance Temperature Detector*) é um sensor de temperatura cujo funcionamento é baseado no princípio do aumento da resistência do metal com a temperatura. O metal mais comum para neste tipo de sensores é a platina, sendo por isso designado por PRT (*Platinum Resistance thermometer*). Contudo podem ser utilizados outros metais, tais como o cobre, o níquel e o balco, ou mesmo outras ligas semelhantes à platina, que para certas gamas de medição constituem uma solução mais económica.

Nos casos em que o elemento sensor é constituído por platina, cobre ou níquel, considera-se uma variação linear entre a resistência e a temperatura, que para uma gama de medição alargada pode ser determinada através da seguinte expressão simplificada:

$$R_T = R_0 * (1 + \alpha * T) \quad (2.16)$$

Onde:

R_T é a resistência do condutor à temperatura T ;

R_0 é a resistência do condutor à temperatura $0\text{ }^\circ\text{C}$;

T é a temperatura;

α é o coeficiente de temperatura da resistência.

Cada condutor possui características específicas, das quais a resistividade é um parâmetro que se destaca pela sua importância. É aconselhável a resistividade do condutor ser elevada, de modo que o valor da resistência fornecida pelo transdutor também o seja, possibilitando a utilização de cabos de ligação ao sistema de aquisição mais compridos.

O circuito em ponte de Wheatstone é utilizado na aquisição do sinal emitido pelos RTD's, e a ligação mais comum para a monitorização estrutural é composta por três fios. No entanto, quando é necessária elevada precisão para os valores de temperatura a ligação supracitada pode ser materializada com quatro fios (Figueiredo, 2006).

O sensor de utilização mais comum em obra é composto por platina, com resistência de 100Ω à temperatura de $0\text{ }^\circ\text{C}$, sendo por isso designado de PT100 (ver Figura 2.27 a)). Possui dimensões reduzidas, rápida resposta térmica e construção simples, características que tornam uma boa solução com variadas aplicações. Estes sensores podem ser encapsulados de acordo com a utilização pretendida, sendo que a Figura 2.27 b) apresenta um exemplar de um PT100 cujo invólucro é um tubo de aço inox, com 6 mm de diâmetro exterior e 100 mm de comprimento, utilizado caso seja necessário embeber no betão, proporcionando assim a devida proteção a agressões externas (Félix, 2004).



a) Elemento sensor



b) Termómetro de embeber no betão

Figura 2.27 - Sensor de temperatura PT100. Retirado de Félix (2004).

2.2.5 Medição da aceleração

Os acelerómetros são sensores usados na medição de acelerações e/ou vibrações, que permitem, após processamento dos dados, a identificação de frequências próprias, modos de vibração e amortecimento,

propriedades que se relacionam diretamente com a rigidez e massa da estrutura. Utilizados essencialmente em ensaios dinâmicos, fornecem informações relevantes para a caracterização de parâmetros fundamentais de uma estrutura (Aktan, et al., 2003).

Da vasta gama de modelos existente no mercado, os mais utilizados são os acelerômetros piezoelétricos, piezoresistivos e capacitivos.

2.2.5.1 Acelerômetros piezoelétricos

Baseados nas propriedades de alguns cristais, os acelerômetros piezoelétricos são constituídos por uma base, uma massa e um cristal piezoelétrico. Os cristais piezoelétricos quando sujeitos a um carregamento deformam-se gerando uma carga elétrica proporcional à deformação sofrida. A massa introduz uma força aplicada no elemento piezoelétrico quando o acelerômetro é submetido a uma aceleração, que obedece à segunda lei de Newton ($F=m*a$), gerando dessa forma uma diferença de potencial proporcional à aceleração (Figueiredo, 2006). Na Figura 2.28 são apresentados o esquema de funcionamento e dois tipos de acelerômetros piezoelétricos, os uniaxiais e os triaxiais.



Figura 2.28 - Acelerômetros piezoelétricos. Retirado de IMI Sensors (2017).

Para a seleção do acelerômetro a aplicar na monitorização estrutural é fundamental identificar a gama de frequências e amplitudes a medir, dado que alguns acelerômetros piezoelétricos não possuem características que permitam a medição de frequências baixas e de pequena amplitude, parâmetros que são relevantes nas aplicações no domínio das estruturas de engenharia civil. Contudo, alguns dos modelos existem possuem as características necessárias para serem considerados uteis para este tipo de aplicações.

2.2.5.2 Acelerómetros piezoresistivos

Os acelerómetros piezoresistivos medem acelerações com base na variação de resistência elétrica, funcionando através da alteração da resistência, devido à deformação a que este é submetido. Através da calibração da constante (*gage factor*) de um material é feita a quantificação do efeito piezoresistivo imposto no mesmo.

No interior do sensor existe uma massa ligada a um elemento submetido à flexão e no qual estão instalados os elementos piezoresistivos, normalmente em sílica, operando num circuito em ponte de Wheatstone ativo, conforme ilustrado na Figura 2.29. Os elementos piezoresistivos sofrem uma deformação quando a massa se encontra sujeita a uma aceleração, de onde é produzido um sinal elétrico proporcional à aceleração experimentada (Aktan, et al., 2003). Ao contrário do que acontece com os acelerómetros piezoeletricos que geram o seu próprio sinal elétrico, os acelerómetros piezoresistivos necessitam de um sinal elétrico.

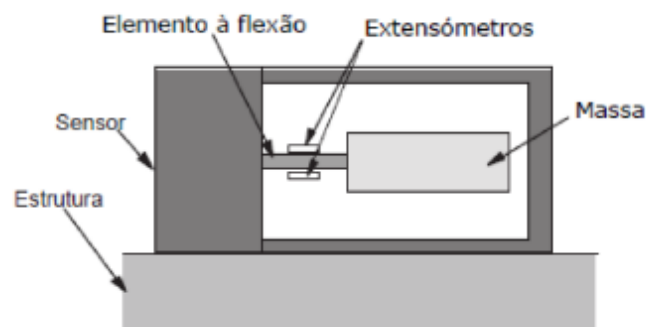


Figura 2.29 – Esquema de um acelerómetro piezoresistivo. Adaptado de Aktan, et al. (2003).

2.2.5.3 Acelerómetros capacitivos

À semelhança dos acelerómetros piezoresistivos, os acelerómetros capacitivos também possuem na sua constituição uma massa ligada a um elemento submetido à flexão. No entanto, os elementos de medição são posicionados para formar meia ponte capacitiva. De acordo com o ilustrado na Figura 2.30, estes acelerómetros utilizam uns condensadores de placa que se encontram paralelos à massa. A submissão do sensor a uma aceleração faz com que a ponte se destabilize, emitindo assim um sinal que é proporcional à aceleração, que é mensurado pela alteração provocada no condensador elétrico (Aktan, et al., 2003).

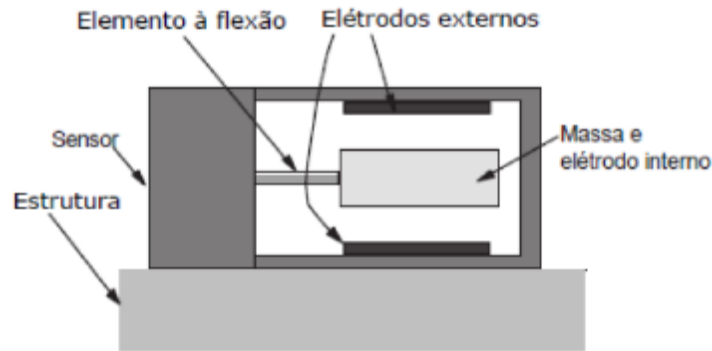


Figura 2.30 - Esquema de um acelerômetro capacitivo. Adaptado de Aktan, et al. (2003).

Os acelerômetros piezoresistivos e os capacitivos possuem boa precisão e resolução. Contudo, apenas para gamas baixas de frequência é que têm uma boa resposta, podendo mesmo medir a componente DC (corrente contínua), sendo esta uma característica que os acelerômetros piezoelétricos não oferecem.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foram apresentados os aspectos mais relevantes de um sistema de monitorização estrutural. Descreveu-se os sistemas de monitorização e os sensores de uso mais comum na medição de grandezas que permitem avaliar a resposta das estruturas, dando-se ênfase aos aspectos considerados mais importante para a observação da resposta de estruturas da engenharia civil.

Atualmente existe uma enorme variedade de equipamentos que podem ser utilizados na medição da resposta estrutural, tendo-se neste capítulo referido apenas os considerados de uso mais frequente na engenharia civil e mais úteis na avaliação da resposta das estruturas.

A exceção é dada aos sensores com base na fibra ótica, considerados de grande utilidade e com algumas vantagens em relação aos sensores mais tradicionais. Sendo este tipo de sensores o futuro da monitorização estrutural foi reservado a eles uma parte do presente capítulo.

A escolha dos sensores mais indicados para a monitorização estrutural pode ser um processo bastante complicado, devido à grande variedade de equipamentos existentes. No entanto, o aspecto positivo é que a generalidade deles produz resultados fiáveis. Facto esse que é importante para impulsionar a monitorização estrutural, e fazer dela uma prática comum na engenharia civil.

CAPÍTULO 3

DEMONSTRADOR PARA MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

No presente capítulo é apresentada a estrutura utilizada para a implementação prática de um sistema de monitorização. É feito o acompanhamento da estrutura através da observação e análise estrutural do seu comportamento em serviço, assente na medição das grandezas consideradas como mais relevantes. Para efeito do descrito anteriormente foi concebido um modelo estrutural equipado com diversos sensores. Expõem-se uma descrição do modelo laboratorial, e são apresentados os ensaios realizados e compilados os resultados relevantes.

3.1 INTRODUÇÃO

O modelo estrutural utilizado, alvo de estudo na dissertação de mestrado de Sérgio Daniel Mendes Magalhães, intitulada “Conceção e análise de um demonstrador para a monitorização estrutural”, concebido em parceria com o LABEST – Laboratório da Tecnologia de Betão e do Comportamento Estrutural, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e integrado no âmbito de um projeto de investigação que juntou investigadores do ISEP e da FEUP. O demonstrador desenvolvido em laboratório, em estrutura metálica, é instrumentado em diversas secções com sensores elétricos.

O demonstrador foi submetido em ambiente laboratorial, onde é possível ter um melhor controlo das condições, a uma série de ensaios de ordem estática e dinâmica. A resposta da estrutura foi registada por um sistema de aquisição de dados produzido para o efeito.

A estrutura desenvolvida pretende simular a resposta de estruturas semelhantes, tais como torres ou o mastro de uma ponte (ver Figura 3.1). Considera-se que o demonstrador é representativo do comportamento de algumas estruturas de engenharia civil.

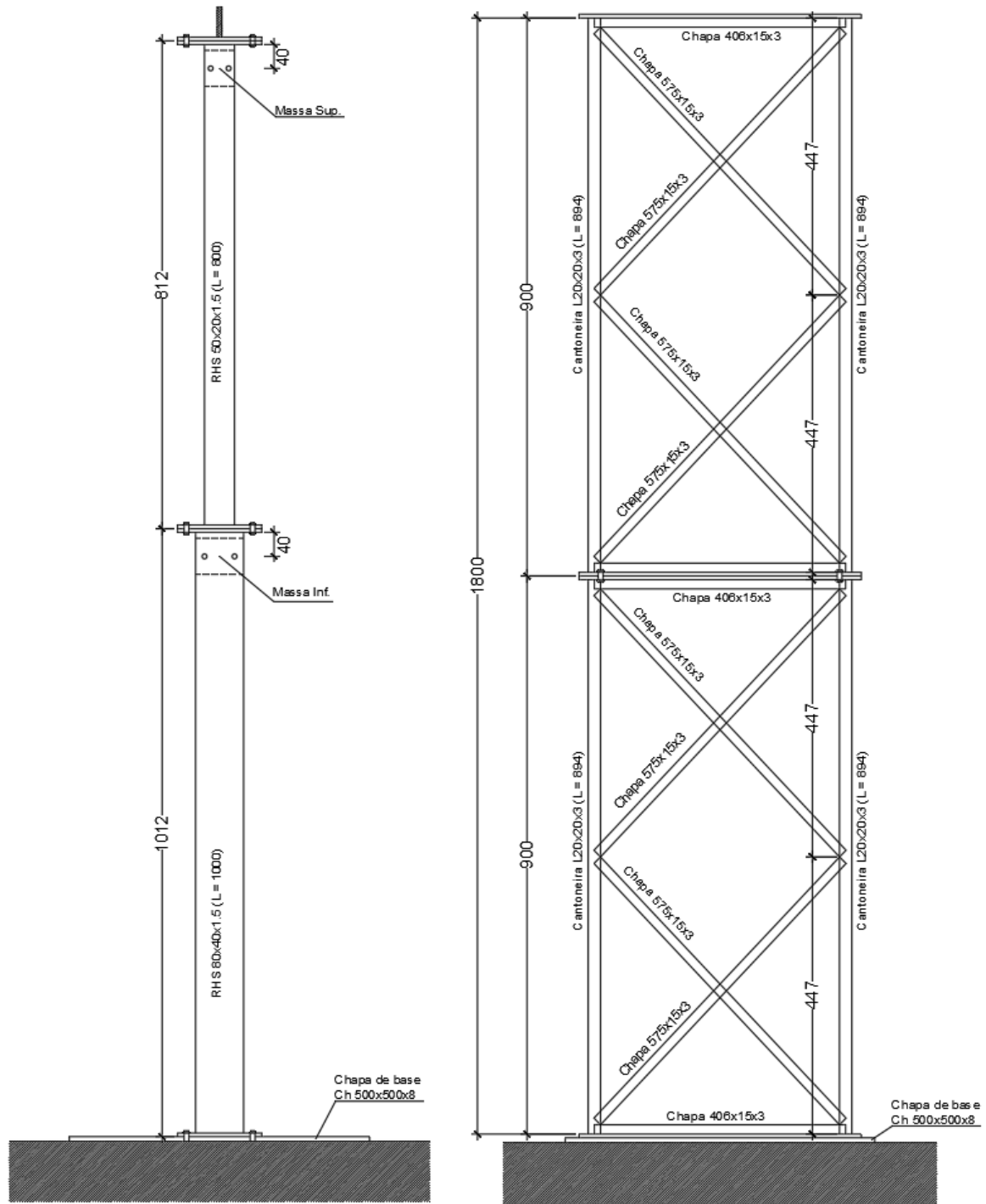


Figura 3.1 - Analogia do demonstrador a estruturas de engenharia civil. Adaptado de Magalhães (2015).

Em seguida são descritos os critérios para a conceção do demonstrador, os equipamentos, os sensores e os sistemas de aquisição de dados utilizados, bem como a descrição dos ensaios realizados.

3.2 DESCRIÇÃO DO DEMONSTRADOR

O demonstrador utilizado, é uma estrutura em aço, constituída por duas subestruturas: (i) uma interior, que é a estrutura propriamente dita, instrumentada e monitorizada (elemento a azul na Figura 3.1 b)); (ii) e uma estrutura exterior de reação que a envolve (treliça cinzenta na Figura 3.1 b)). Ambas têm 1,80 m de altura total. A estrutura interior é materializada em dois tramos distintos compostos por perfis RHS, ligados entre si com um sistema de parafusos, sendo o tramo inferior constituído por um perfil RHS80x40x1.5 mm com 1 m de comprimento, e o tramo superior é constituído por um perfil RHS50x20x1.5 mm com 0,80 m de comprimento. No topo de cada tramo foi colocado um conjunto de seis massas (três por face de perfil), com aproximadamente 1,1 Kg cada massa. As massas colocadas no tramo inferior possuem dimensões de 50x60x50 mm, enquanto no tramo superior a sua dimensão é 80x60x30 mm. Os perfis constituintes da estrutura de reação exterior são cantoneiras L20x20x3 mm e chapas diagonais de travamento de 575x15x3 mm. As dimensões dos elementos referidos são apresentadas na Figura 3.2 (Magalhães, 2015).



a) Alçado da estrutura interior

b) Alçado da estrutura de reação

Figura 3.2 - Dimensões do demonstrador (em mm). Adaptado de Magalhães (2015).

O apoio da estrutura é materializado através de um encastramento da base, ligado a uma chapa quadrada de dimensões 500x500x8 mm (ver Figura 3.3 a)). Sendo a estrutura de reação exterior fixada na mesma chapa de base e reforçada, no topo, com uma chapa em todo o seu perímetro. Num dos vértices do topo da estrutura de reação foi instalada uma roldana, cuja função é servir de ponto de aplicação de cargas horizontais (ver Figura 3.3 b)) (Magalhães, 2015).

representativo do comportamento de estruturas reais e também garantir as melhores condições para a avaliação dos sistemas de medição (Magalhães, 2015).

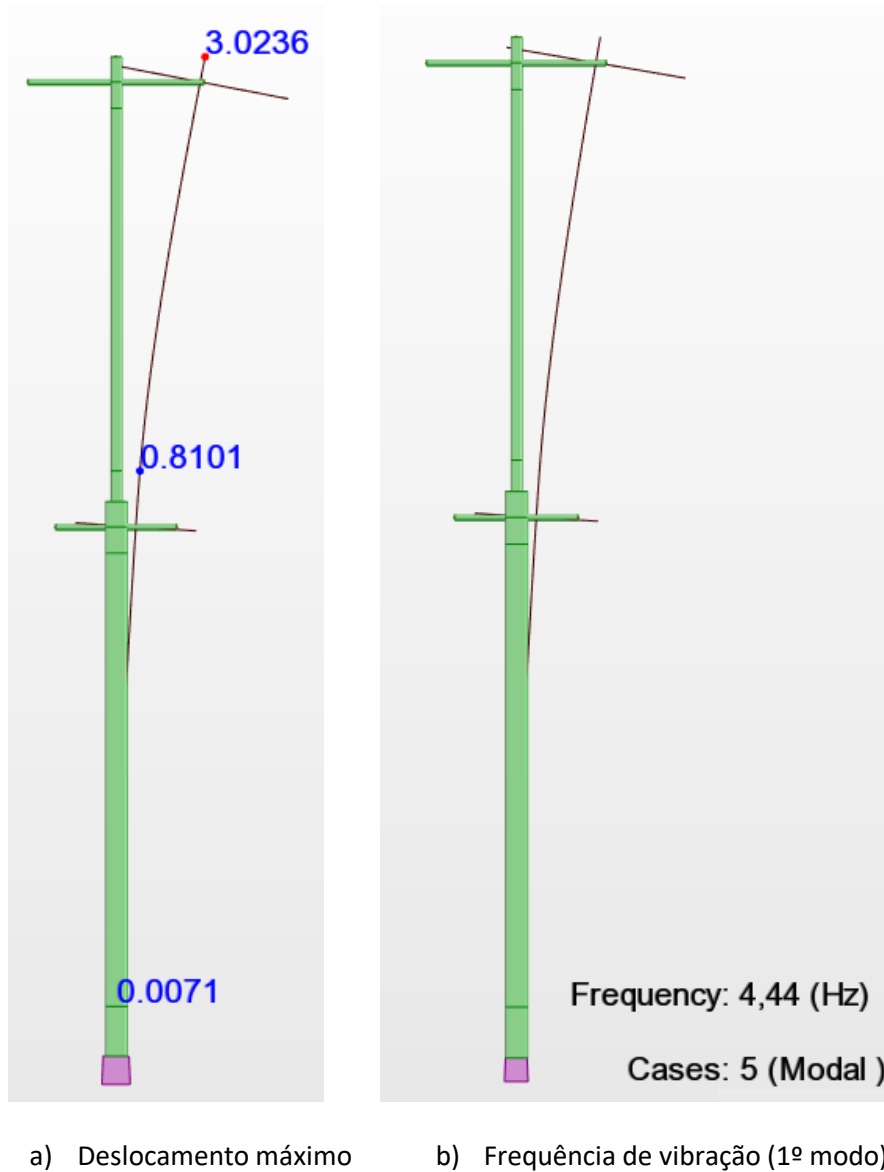
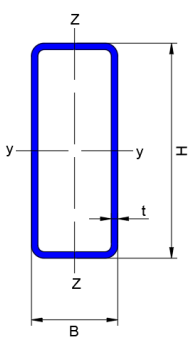


Figura 3.5 - Modelo numérico de dimensionamento.

São utilizados dois perfis do tipo RHS em aço S355, cuja tensão de cedência (f_y) é de 355 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa (Magalhães, 2015). Na Tabela 3.1 podem ser consultadas as características geométricas das secções transversais dos perfis utilizados. Estas características foram retiradas através do programa de cálculo automático *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017*, com apoio do programa de desenho *Autodesk AutoCAD 2017*, onde foram desenhadas as secções e posteriormente exportadas para o programa de cálculo automático *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

Tabela 3.1 - Características das secções.

	Designação/ Dimensões HxBxt (mm)	Massa Linear (Kg/m)	Área da Secção (cm ²)	Momento de Inércia		Módulo Plástico		Módulo Elástico	
				I _{yy} (cm ⁴)	I _{zz} (cm ⁴)	W _{pl,yy} (cm ³)	W _{pl,zz} (cm ³)	W _{el,yy} (cm ³)	W _{el,zz} (cm ³)
	RHS 50x20x1,5	1,53	1,95	5,77	1,35	2,97	1,55	2,31	1,35
	RHS 80x20x1,5	2,71	3,45	28,97	9,93	8,92	5,53	7,24	4,97






3.3 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

3.3.1 Rede de sensores

O sistema de monitorização foi instalado de modo a ser feita a observação de deslocamentos horizontais, acelerações, extensões, rotações e temperatura. Para tal foram definidas três secções consideradas como sendo as mais críticas, sendo elas a base na zona do encastramento, denominada como nível 0, a transição entre perfis, denominada como nível 1 e o topo do demonstrador, denominado como nível 2.

Na secção do nível 0 são medidas apenas extensões, e para tal são aplicados extensómetros de resistência elétrica. Na secção do nível 1 são observados deslocamentos horizontais através de transdutores de deslocamento (LVDT's), acelerações através de acelerómetros piezoelétricos, rotações através de inclinómetros elétricos e também extensões, através de extensómetros. Para a secção do nível 2 são medidas as mesmas grandezas da secção do nível 1, com exceção para as extensões, e são utilizados os mesmos aparelhos de medição. Para a medição da temperatura foi utilizado um termómetro colocado nas proximidades da estrutura, que mede a temperatura ambiente. Na Tabela 3.2 apresenta-se a nomenclatura adotada na monitorização, associando símbolos a cada um dos sensores.

Tabela 3.2 - Simbologia do tipo de sensores e referência de localização. Adaptado de Magalhães (2015).

Simbologia dos sensores		Referência de localização
	Extensómetro (E)	E-N1-1 E – Tipo de sensor N1 – Nível de localização 1 - Face
	Acelerómetro (A)	
	Inclinómetro (I)	
	Transdutor de deslocamento (LVDT)	
	Temperatura (T)	

Na secção do nível 0 (N0) foram apenas colocados dois extensómetros de resistência elétrica 120Ω nas faces opostas do perfil, perpendiculares à direção da força, de forma a captar a sua flexão. A aplicação deste tipo de sensores exige um tratamento adequado da superfície, que passa pela remoção de todos os materiais depositados na face do perfil. Para que seja garantida a adesão dos extensómetros ao perfil é necessária a escolha de um adesivo que garanta a compatibilidade das deformações entre o sensor e o material onde ele é aplicado. A proteção face aos agentes externos é feita através da aplicação de uma resina epóxi (ver Figura 3.6) (Magalhães, 2015).



Figura 3.6 - Aplicação de um extensómetro. Retirado de Magalhães (2015).

Na Figura 3.7 está representada a localização e pormenores da secção instrumentada do nível 0.

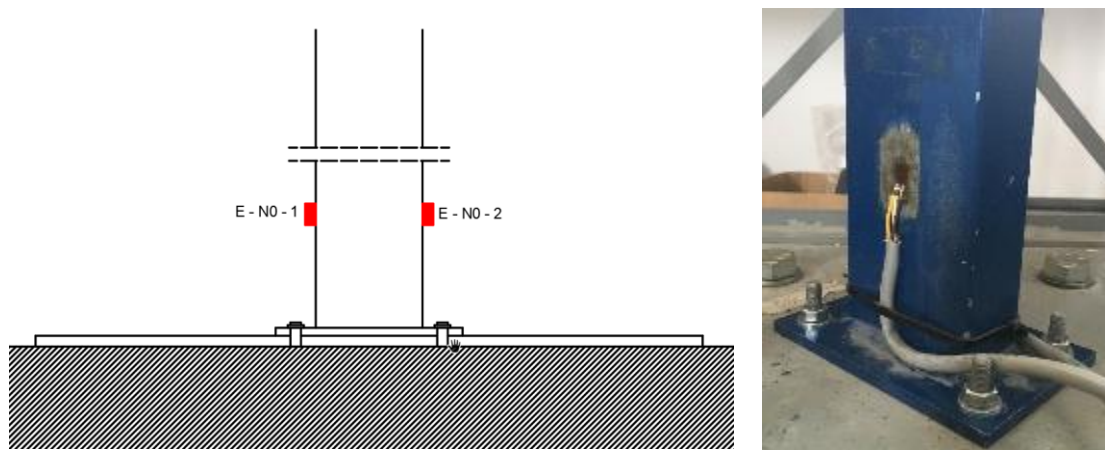


Figura 3.7 - Localização e pormenores das secções instrumentadas no nível 0 (N0). Adaptado de Magalhães (2015).

A secção do nível 1 (N1) foi instrumentada com um LVDT, que mede o deslocamento horizontal relativo entre o modelo e a estrutura de reação, na direção perpendicular ao eixo de menor inércia da secção, e um acelerómetro uniaxial, que mede as acelerações na mesma direção. Foram também colocados, com

o mesmo princípio descrito para o nível 0, dois extensómetros. A instrumentação deste nível fica completa com a aplicação de um inclinómetro que mede as rotações em torno do eixo de menor inércia da secção. Para que todos os sensores acompanhem exatamente na mesma secção a resposta da estrutura, foi criado um suporte de alumínio assemelhando-se a uma abraçadeira, no qual estão ligados os diversos transdutores (Magalhães, 2015). Na Figura 3.8 está representada a localização de todos os sensores aplicados no nível 1.

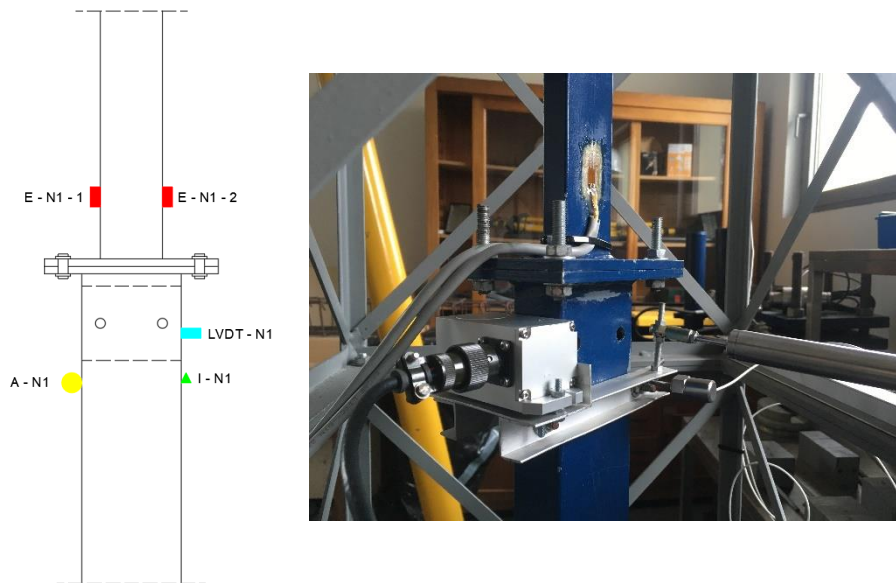


Figura 3.8 - Localização e pormenores das secções instrumentadas no nível 1 (N1). Adaptado de Magalhães (2015).

A secção do nível 2 foi instrumentada da mesma forma da secção do nível 1, com exceção para a presença de extensómetros, conforme o ilustrado na Figura 3.9.

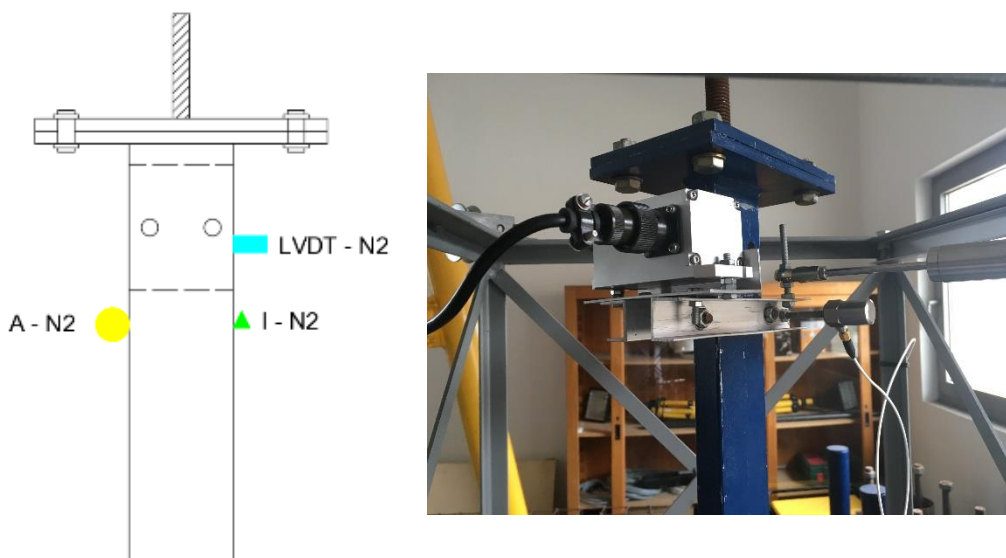


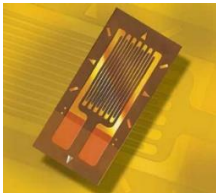




Figura 3.9 - Localização e pormenores das secções instrumentadas no nível 2 (N1). Adaptado de Magalhães (2015).

Os sensores utilizados no sistema de monitorização, bem como as suas principais características, são apresentados na Tabela 3.3.

É de salientar que todos os sensores utilizados para a monitorização estrutural foram submetidos a testes preliminares de calibração, antes de realizados os ensaios no demonstrador de modo a validar os resultados dos mesmos. Os testes preliminares incidiram essencialmente na verificação das sensibilidades dos aparelhos utilizados, e para tal foi realizada uma serie de ensaios simplificados de modo a confirmar o normal funcionamento dos dispositivos em conjunto com o programa elaborado em LabVIEW, que será descrito no decorrer do presente capítulo. Após a realização destes ensaios foi possível avançar no trabalho e instrumentar a estrutura da maneira mais conveniente.

Os trabalhos preliminares de calibração dos sensores culminaram na elaboração de manuais de ligação para alguns dos sensores utilizados. Os manuais de ligação podem ser consultados no Anexo I, Anexo II e Anexo III da presente dissertação.

Tabela 3.3 - Características dos sensores utilizados.

Tipo de sensor	Número de sensores	Características
	4	Marca: Vishay Modelo: Strain Gages Gage Factor: $2,085 \pm 0,3 \%$ Resistência Elétrica: $120 \pm 0,3\%$ Ligação: Quarto de Ponte
	2	Marca: RDP Group Modelo: LDC2000C Sensibilidade: 44,90 mV/mm, 45,18 mV/mm Gama de Amplitude: ± 50 mm
	2	Marca: Dytran Modelo: 3100D24 Sensibilidade: 1005,7 mV/g, 1015,5 mV/g Gama de amplitude: $\pm 0,5$ g
	2	Marca: Sherborne Sensors Modelo: LSOC - 3 Sensibilidade: 0,0017 V/miligradu, 0,0017 V/miligradu Gama de medição: $\pm 3^\circ$
	1	Sensor de temperatura Modelo: PT100

3.3.2 Sistema de aquisição

A aquisição de dados foi feita através de um chassi NI cDAQ-9174, da *National Instruments* onde são conectados os módulos onde estão ligados cada um dos sensores utilizados. Cada sensor utiliza um módulo específico. Na Tabela 3.4 é feito um resumo dos módulos utilizados e dos respectivos sensores.

Tabela 3.4 - Quadro resumo dos módulos utilizados.

Tipo de sensor	Módulo utilizado
Extensómetros	NI 9237
Acelerómetros	NI 9234
Inclinómetros	NI 9209
LVDT's	NI 9209
Termómetro	NI 9217

Na Figura 3.10 é apresentado o equipamento de aquisição de dados, o chassi NI cDAQ-9174, da *National Instruments*, e todos os módulos que a ele são conectados.

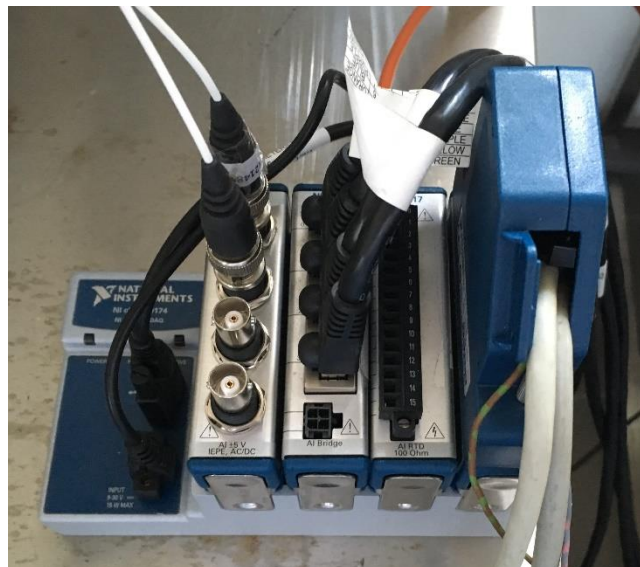


Figura 3.10 - Equipamento de aquisição de dados cDAQ-9174.

Para o sistema de aquisição de dados estar completo, e tendo em atenção que tanto os LVDT's como os inclinómetros são sensores elétricos, foi necessária a utilização de fontes de alimentação adequadas a cada um dos tipos de sensores mencionados. Para os LVDT's é necessária uma fonte de alimentação de 6 – 18V, ao passo que para os inclinómetros é utilizada uma fonte de alimentação de $\pm 5V - \pm 12V$. Na Figura 3.11 são apresentadas as fontes de alimentação utilizadas para os sensores elétricos.

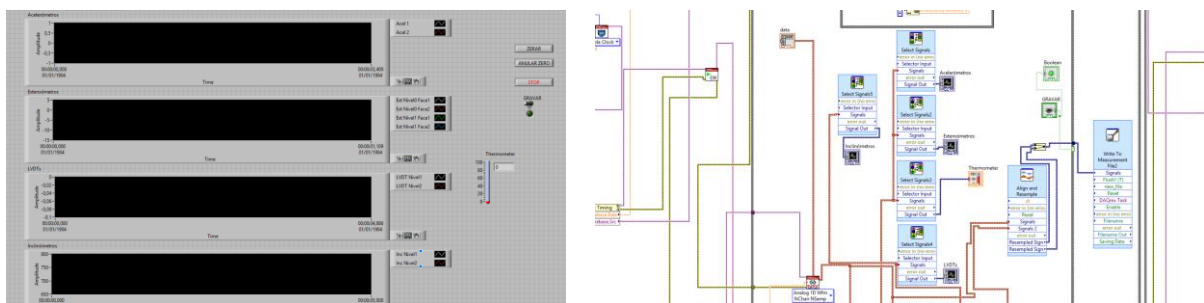


a) LVDT's

b) Inclínómetros

Figura 3.11 - Fontes de alimentação utilizadas para os sensores elétricos.

Associado ao equipamento de aquisição de dados existe um computador portátil, que é utilizado para a visualização de dados. Para tal desenvolveu-se um programa em *LabVIEW*, que efetua as operações de aquisição de sinal e pré-processamento do mesmo, regista os dados provenientes dos sensores e possibilita a aplicação de filtros de sinal e decimação de acordo com o pretendido pelo utilizador. O desenvolvimento desta aplicação permitiu a criação de um ambiente de trabalho onde é possível observar representações gráficas, em tempo real, dos ensaios realizados (ver Figura 3.12).



a) Painel frontal

b) Código

Figura 3.12 - Aplicação desenvolvida em LabVIEW.

Em complemento às aplicações desenvolvidas em *LabVIEW*, foram utilizadas rotinas em *MATLAB*. Esta linguagem permite implementar métodos que apresentam vantagens relacionadas com o facto de serem utilizadas rotinas, onde são aplicadas funções existentes para o processamento do sinal e análise espectral.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

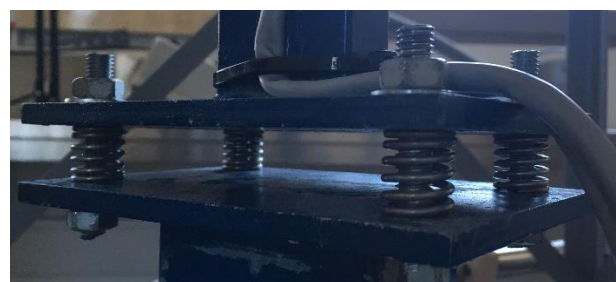
Foi realizada, em ambiente laboratorial, uma campanha de ensaios dos quais foram recolhidos os resultados experimentais. Contudo, para o que diz respeito a este trabalho, é importante apresentar aqueles que englobam todos os sensores nos ensaios realizados, e são utilizados para caracterizar e compreender o comportamento da estrutura. Os resultados em seguida apresentados dizem respeito aos ensaios realizados em laboratório, sendo eles de carácter estático e dinâmico.

O estudo do comportamento da estrutura passou pela inserção de alterações de rigidez que são conferidas pela introdução de molas em pontos condicionantes da estrutura. Para a realização dos ensaios foram utilizadas molas de compressão e tração: (i) as molas de compressão, que pretendem simular quebra de rigidez em determinadas secções da estrutura, são constituídas por molas interpostas entre chapas de extremidade de fixação da estrutura interior, ao nível da base (secção de encastramento) e da secção intermédia (ver Figura 3.13); (ii) enquanto as molas de tração, que são molas que promovem a ligação da estrutura interior à estrutura exterior de reação, são instaladas ao nível das secções intermédia e superior (ver Figura 3.14). Estas molas foram usadas separadamente, e também foram feitos ensaios em que se conjugou os dois tipos de molas.

As molas de compressão foram instaladas, alternadamente, ou em simultâneo, na secção de encastramento (nível 0) e na secção intermédia de ligação entre os dois perfis (nível 1) (ver Figura 3.13) e em conjunto nos dois níveis. Para as molas de tração foi aplicado o mesmo método de ensaio, ou seja, foram colocadas molas individualmente em dois níveis (nível 1 e nível 2) (ver Figura 3.14) e por último foi feita a conjugação de molas nos dois níveis. Foi também feita a conjugação dos dois tipos de molas, alternadas entre os dois níveis (ver Figura 3.15).



a) Nível 0



b) Nível 1

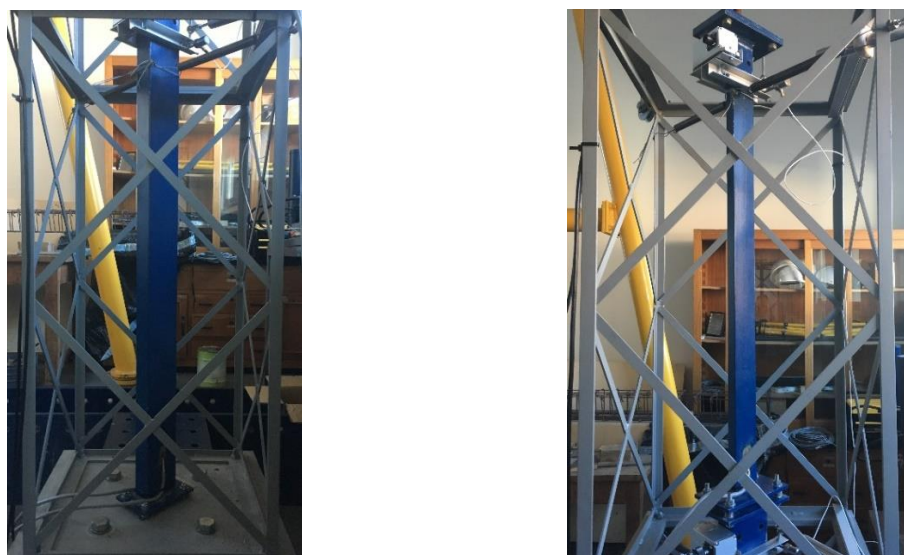
Figura 3.13 - Introdução de molas de compressão.



a) Nível 1

b) Nível 2

Figura 3.14 - Introdução de molas de tração.



a) Nível 0 (compressão) + Nível 1 (tração)

b) Nível 1 (compressão) + Nível 2 (tração)

Figura 3.15 - Conjugação de molas de compressão com molas de tração.

3.4.1 Ensaio estáticos

Os ensaios de carácter estático consistem em submeter a estrutura a um carregamento por patamares de carga. O principal objetivo desta série de ensaios é identificar o comportamento da estrutura em situações de carga e descarga, para diferentes condições de rigidez, de onde são retirados dados quanto a deslocamentos horizontais, rotações e extensões, a partir dos quais se pode retirar conclusões quanto à deformação da estrutura, deformações dos apoios e quanto ao comportamento global dos materiais constituintes da estrutura.

Na Tabela 3.5 é apresentado um resumo dos ensaios realizados na componente estática, considerando a alternância da introdução de molas.

Tabela 3.5 - Disposição das molas em ensaios estáticos.

Designação	Molas
EE1	X
EE2	N0 (compressão)
EE3	N1 (compressão)
EE4	N0 (compressão) + N1 (compressão)
EE5	N1 (tração)
EE6	N2 (tração)
EE7	N1 (tração) + N2 (tração)
EE8	N0 (compressão) + N1 (tração)
EE9	N1 (compressão) + N2 (tração)

O carregamento do modelo consistiu na aplicação de ciclos sucessivos de carga/descarga, por patamares, de 30 segundos cada, das massas especificadas na Tabela 3.6. A duração de cada ensaio, que partiu e regressou da situação de repouso (sem carga), teve a duração total de 210 segundos.

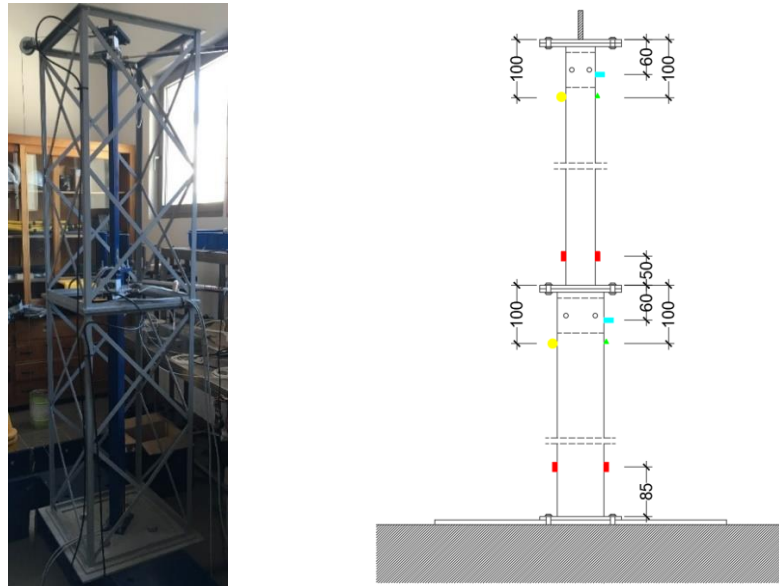
Tabela 3.6 - Massas aplicadas no ensaio estático.

Cargas	Força (Kgf)	Força (N)	Força acumulada (N)
Força 1	2,265	22,2	22,2
Força 2	2,510	24,6	46,8
Força 3	2,505	24,6	71,4

A força é aplicada no topo da estrutura, através da fixação de um cabo de aço, que passa por uma roldana e que na sua ponta foi colocado um gancho. As massas são suspensas no gancho sendo assim transmitida a força horizontal ao ponto mais elevado da estrutura, conforme o esquematizado na Figura 3.16 a). A Figura 3.16 b) apresenta a localização dos sensores relativamente a alguns pontos de referência da estrutura.

Para este ensaio são definidos três casos de carga distintos, correspondentes a três estados de deformação da estrutura. Inicialmente, a estrutura encontra-se em repouso, com o cabo de aço e o suporte. Antes de se dar início ao carregamento da estrutura e gravação de dados, o programa de leitura foi zerado, de modo a que os valores das leituras correspondam apenas às forças aplicadas

As massas são aplicadas conforme a ordem apresentada na tabela 3.6, sendo o valor máximo aplicado de aproximadamente 0,07 kN, correspondente ao último patamar de carga.



a) Colocação das massas b) Localização dos sensores (em mm)

Figura 3.16 - Procedimento de ensaio estático.

Em seguida são apresentados os resultados relativos aos ensaios estáticos realizados. De todos os ensaios que foram executados, são apenas apresentados os que auxiliam na compreensão do comportamento e resposta da estrutura às alterações de rigidez, que se materializam na introdução de molas em pontos considerados condicionantes da estrutura. A consulta total dos dados referentes à componente estática pode ser feita no Anexo IV – Resultados dos Ensaios Estáticos.

3.4.1.1 Medição de deslocamentos

Em seguida são apresentados os deslocamentos medidos nas duas secções, através de LVDT's, em N1 e N2, para cada tipologia de ensaio executado.

A Figura 3.17 apresenta os gráficos dos deslocamentos obtidos pelos LVDT's no nível 1 e 2 para o EE1. Este ensaio é o ponto de partida da análise do comportamento estrutural. O EE1 corresponde ao ensaio em que não existe a introdução de nenhuma mola, sendo por isso considerado como sendo as condições iniciais da estrutura. O EE1 é a base da análise do comportamento da estrutura face às alterações de rigidez.

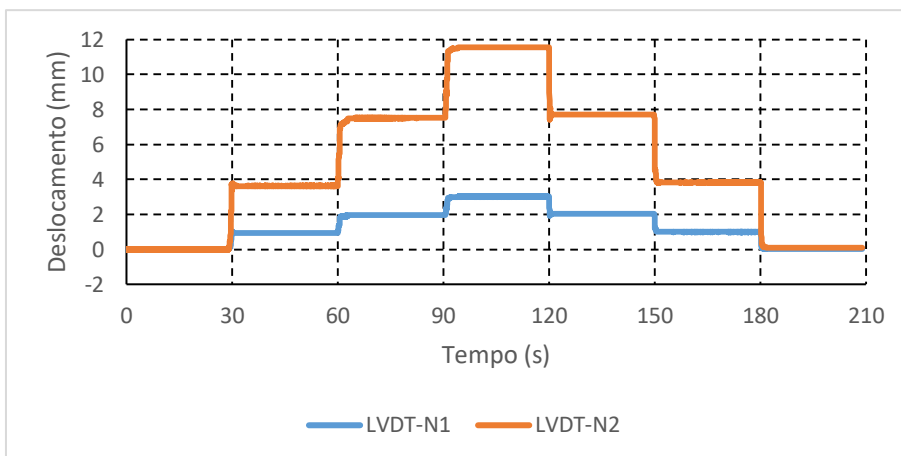


Figura 3.17 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE1.

Em primeiro lugar será feita a análise da resposta da estrutura à introdução de molas de compressão. Na Figura 3.18 é ilustrado o gráfico dos deslocamentos obtidos nos dois LVDT's aplicados na estrutura no EE2, que corresponde ao ensaio em que foram aplicadas molas de compressão na base da estrutura (nível 0).

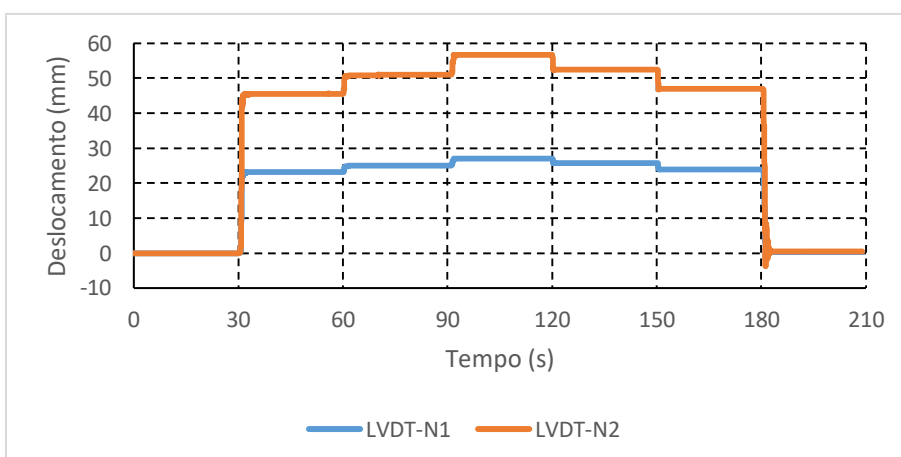


Figura 3.18 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE2.

Da análise do gráfico dos deslocamentos obtidos no EE2, é de salientar o significativo aumento dos deslocamentos medidos nos dois níveis onde se encontram os LVDT's, quando comparado com o obtido no EE1. A introdução de molas de compressão na base da estrutura implica uma diminuição de rigidez nesse ponto, aumentando dessa forma o grau de liberdade da estrutura para reações horizontais.

Outro aspeto interessante da colocação de molas de compressão na estrutura surge quando as mesmas são aplicadas no nível intermédio (nível 1) da estrutura, zona onde se faz a separação entre perfis. Na Figura 3.19 surge o gráfico dos deslocamentos obtidos no EE3, onde as molas de compressão são colocadas no nível intermédio.

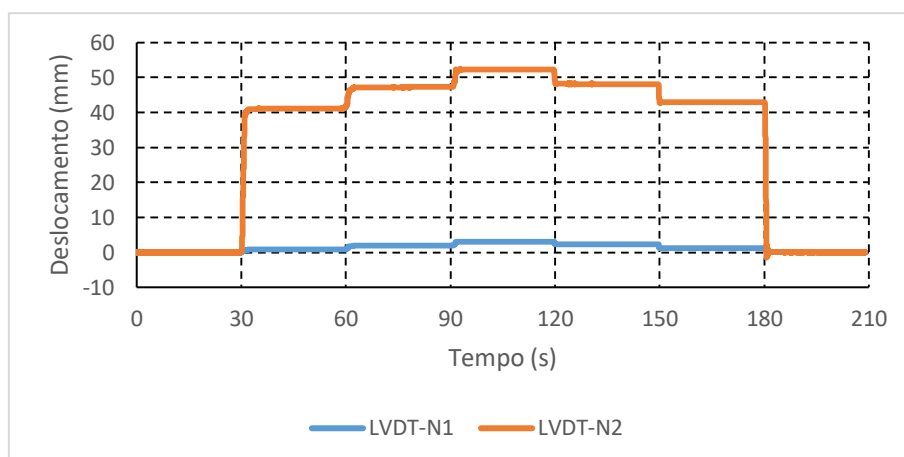


Figura 3.19 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE3.

No gráfico acima apresentado é de salientar que quando se coloca molas de compressão no nível intermédio da estrutura, a deformação só se faz sentir no perfil superior. A introdução de molas de compressão no ponto de separação entre perfis não permite a transmissão da deformação do perfil superior para o perfil inferior, sendo esta praticamente nula. Em relação ao EE1, mantém-se o aumento dos deslocamentos no nível 2, enquanto que no nível 1 o deslocamento medido mantém-se praticamente inalterado.

No que respeita à introdução de molas de compressão, é importante salientar um comportamento bilinear observado na estrutura. O comportamento da estrutura divide-se então em duas fases. Numa primeira fase, a estrutura deforma-se de acordo com a deformação das molas, enquanto a segunda fase do comportamento da estrutura está relacionada com a deformação dos perfis metálicos que a constituem. O comportamento bilinear observado na estrutura deve-se ao facto de o limite de deformação das molas ser atingido, materializado quando a base do perfil encosta nos constituintes do aparelho de apoio, ficando a partir desse momento a deformação da estrutura a dever-se à rigidez dos perfis. O tema do comportamento bilinear da estrutura será retomado no Capítulo 4, quando for feita a análise dos modelos de cálculo desenvolvidos.

No que respeita à introdução de molas de tração na estrutura é de assinalar uma ligeira diminuição nos deslocamentos medidos nos dois LVDT's. A Figura 3.20 apresenta os deslocamentos observados para os LVDT's no EE7, que corresponde à aplicação de molas de tração nos dois níveis (nível 1 e 2) da estrutura.

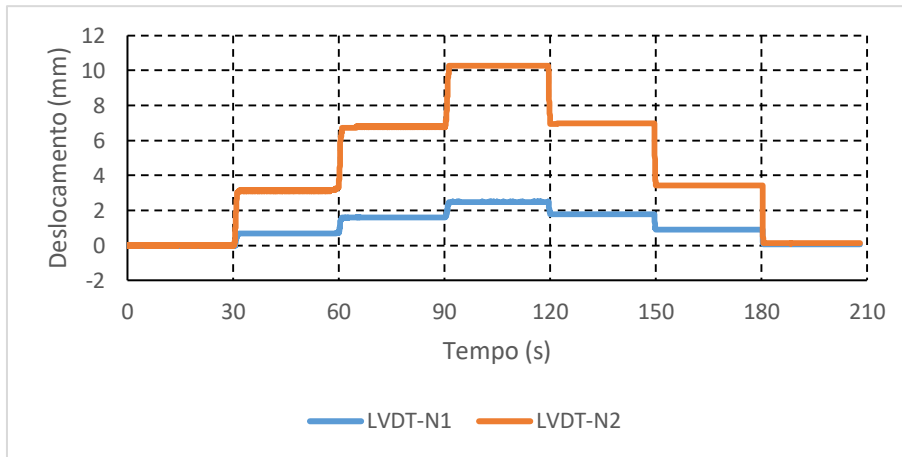


Figura 3.20 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE7.

Confrontado com o que foi medido no EE1, no EE7 é notório o decréscimo dos deslocamentos nos dois níveis instrumentados.

Por último, é feita análise do comportamento de estrutura quando feita a conjugação dos dois tipos de molas (compressão e tração). A introdução de molas de compressão introduz na estrutura um aumento da deformação, sendo que quando conjugadas com molas de tração, o efeito da colocação de molas de compressão é anulado pela influência das molas de tração, conforme se pode verificar na Figura 3.21, onde se apresenta o gráfico dos deslocamentos medidos no EE9, que corresponde à introdução de molas de compressão no EE3.

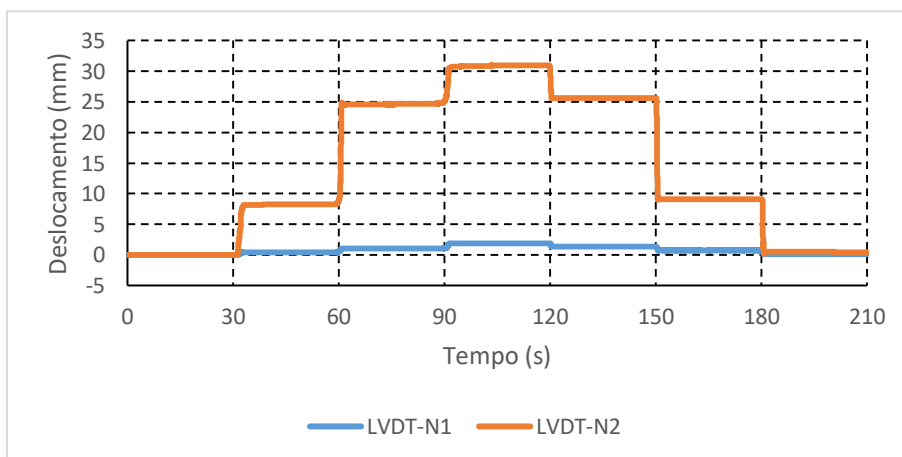


Figura 3.21 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE9.

Na análise do gráfico é possível observar que quase não existe transmissão da deformação entre níveis, e que quando comparado com o EE3, houve uma redução nos deslocamentos medidos no nível 2.

3.4.1.2 Medição da rotação

No que respeita à medição de rotações durante os ensaios estáticos, as figuras seguintes apresentam os gráficos das rotações nas secções N1 e N2. A inclinação medida durante os ensaios é em torno do eixo horizontal, ortogonal ao da direção de aplicação da força.

O desenvolvimento das rotações ao longo dos ensaios realizados acompanha o comportamento identificado para os LVDT's. Na Figura 3.22 é apresentado o gráfico das rotações observadas no EE1, ponto de partida para a análise do comportamento da estrutura.

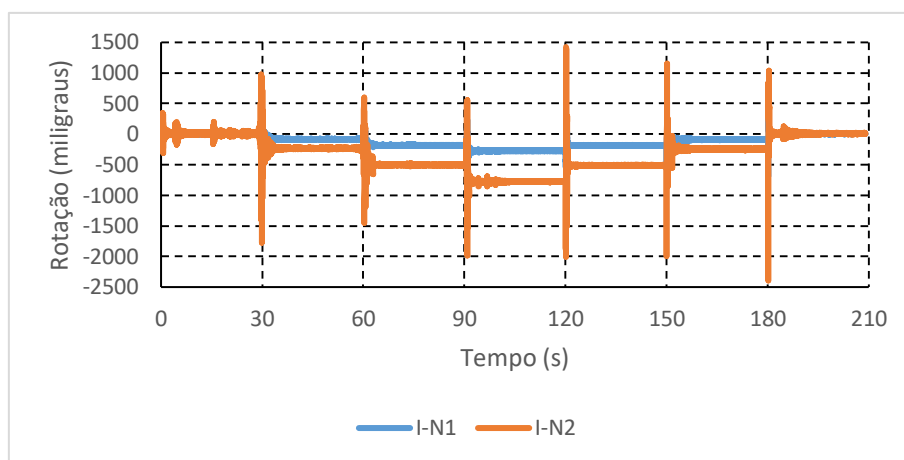


Figura 3.22 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE1.

Em paralelo com o sucedido nos deslocamentos, a introdução de molas de compressão é responsável por um aumento significativo das rotações medidas pelos inclinómetros nos dois níveis instrumentados. Esse aumento é visível na análise do gráfico correspondente às medições das rotações no EE2 (consultar Figura 3.23).

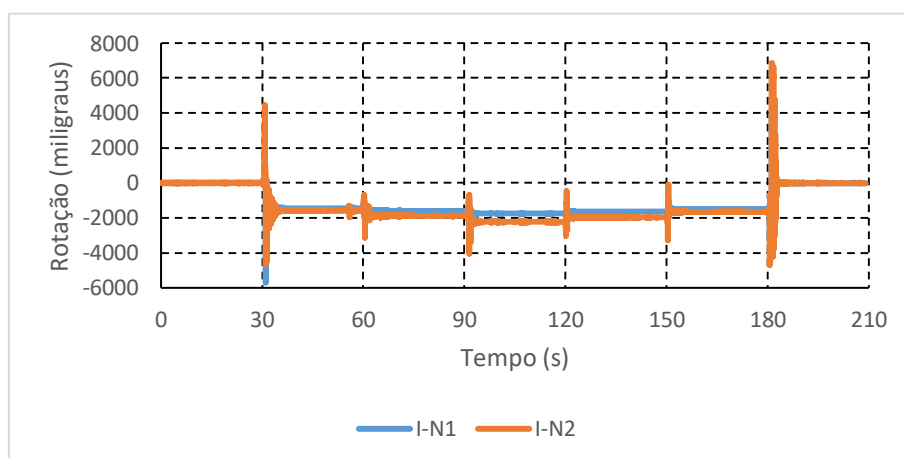


Figura 3.23 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE2.

No que diz respeito à baixa transmissão de deformações que é possível observar quando introduzidas as molas de compressão no nível intermédio, confirma-se o exposto na análise dos deslocamentos. É possível observar, no gráfico das rotações obtidas no EE3, apresentado na Figura 3.24, que também ao nível das rotações, a interação entre níveis é quase nula.

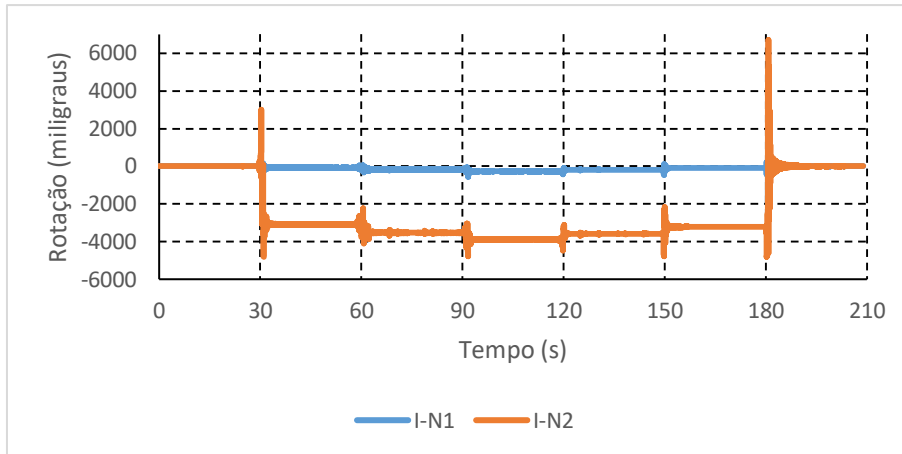


Figura 3.24 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE3.

Durante a análise das rotações obtidas nos ensaios estáticos, torna-se importante referir que no EE4 foi ultrapassado o limite do campo de medição do inclinómetro colocado no nível 2 (consultar Figura 3.25). Esse facto é visível através de um patamar constante no gráfico, que se estende desde a colocação do primeiro patamar de carga até ao ponto em que esse mesmo patamar é retirado. A ultrapassagem dos limites de medição dos sensores está relacionada com o grande aumento de deformação que introdução de molas nos dois níveis acarreta, e também se pode relacionar com o facto de a estrutura se encontrar ligeiramente inclinada quando se dá início ao processo de introdução de cargas. Essa inclinação inicial faz com que os inclinómetros não iniciem o ensaio na sua posição zero, ou seja perfeitamente nivelado.

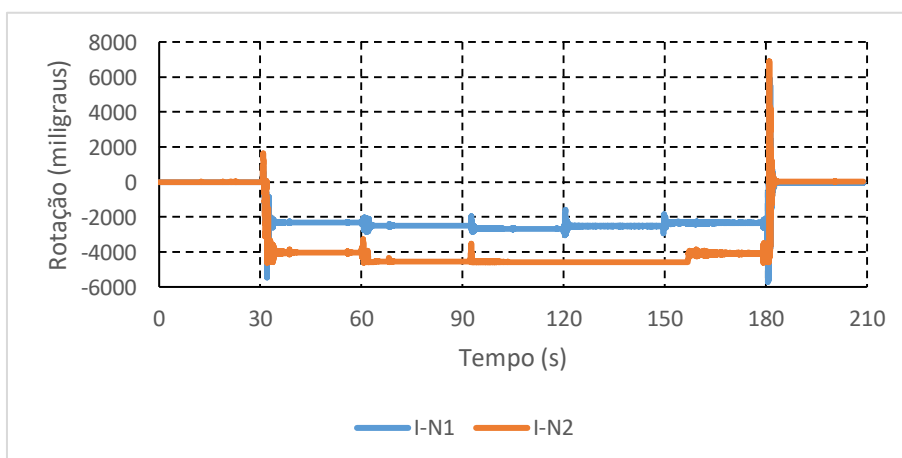


Figura 3.25 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE4.

Quanto à introdução de molas de tração, as conclusões quanto ao desenvolvimento das rotações estão de acordo com as expostas para os deslocamentos. As Figura 3.26 e Figura 3.27, correspondem às medições das rotações nos EE7 e EE9, respetivamente. É possível observar a diminuição das rotações nos níveis instrumentados da estrutura, quando comparados com o EE1 e EE3, respetivamente, e são confirmadas as conclusões retiradas do comportamento da estrutura através da análise dos deslocamentos.

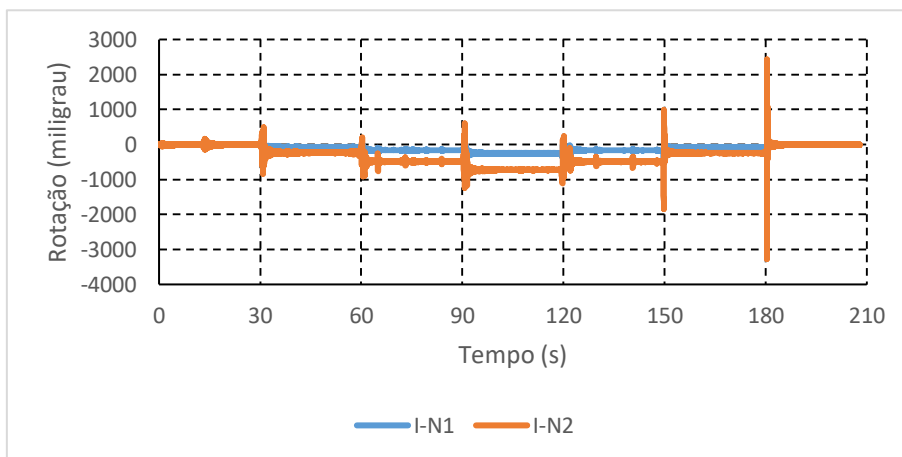


Figura 3.26 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE7.

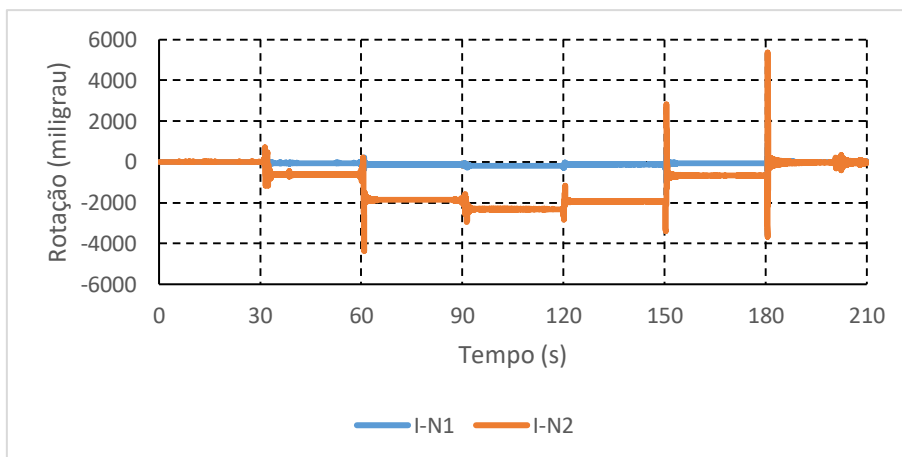


Figura 3.27 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE9.

3.4.1.3 Medição das extensões

Em seguida são apresentados os gráficos das medições das extensões. É importante salientar que a estrutura tem aplicados, em cada face do perfil, dois extensómetros. Os extensómetros E-N0-1 e E-N1-1 registam para as cargas aplicadas deformações negativas coincidentes com compressões, ou encurtamentos da secção. Para os extensómetros E-N0-2 e E-N1-2 foram registadas deformações positivas coincidentes com trações, ou alongamentos da secção.

Considerando a homogeneidade da secção, e também que houve, antes de se iniciar a campanha de ensaios, a necessidade de substituição do extensómetro E-N1-1 e ainda o local onde estão aplicados os extensómetros, os gráficos apresentam uma simetria considerada boa.

É de salientar que a secção do nível 2 sofreu deformações superiores, ou seja, no perfil de menor dimensão.

Na Figura 3.28 ilustra-se as extensões medidas ao longo do EE1, que corresponde às condições iniciais da análise estática das deformações da estrutura.

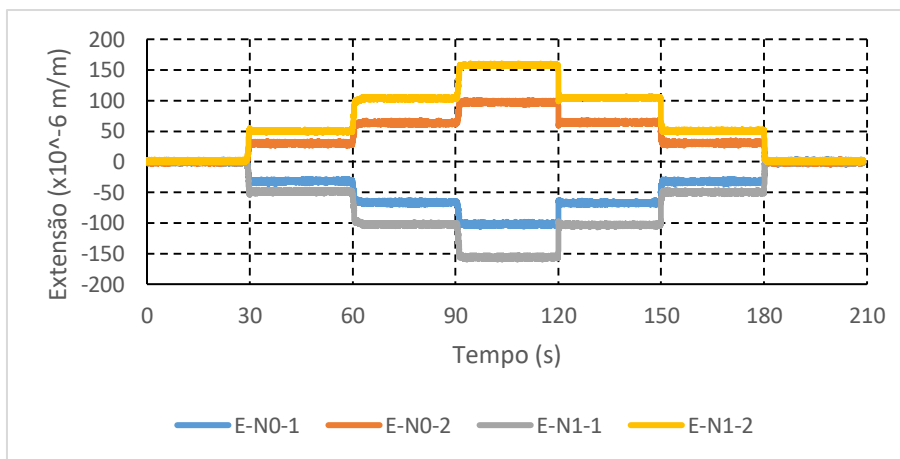


Figura 3.28 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE1.

No que respeita ao desenvolvimento das extensões ao longo dos ensaios realizados, e analisando aqueles em foram introduzidas molas de compressão, é de salientar que a estabilidade das extensões nos mesmos. A influência da introdução de molas de compressão na estrutura é praticamente nula. A extensão é proporcional ao momento atuante na estrutura, e a introdução de molas de compressão tem uma influência quase nula na redução dos momentos atuantes, conforme é possível verificar na Figura 3.29, que apresenta as extensões verificadas no EE4, correspondente à colocação de molas de compressão nos dois níveis.

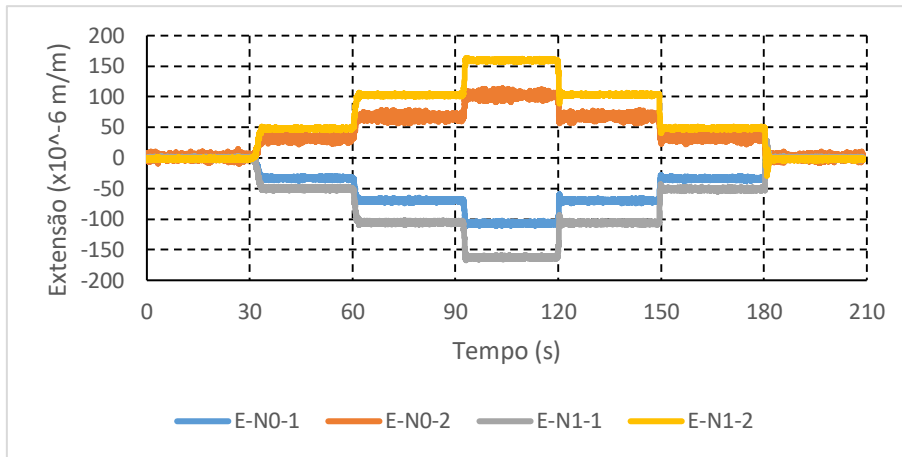


Figura 3.29 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE4.

Da análise do gráfico acima apresentado, é possível observar que as extensões medidas não sofrem grande alteração quando comparadas com as medidas no EE1, onde não são aplicadas quaisquer molas de compressão.

As extensões só começam a sofrer alterações significativas quando aplicadas molas de tração, conforme ilustrado nas Figura 3.30 e Figura 3.31, que correspondem ao EE7 e EE8, respetivamente.

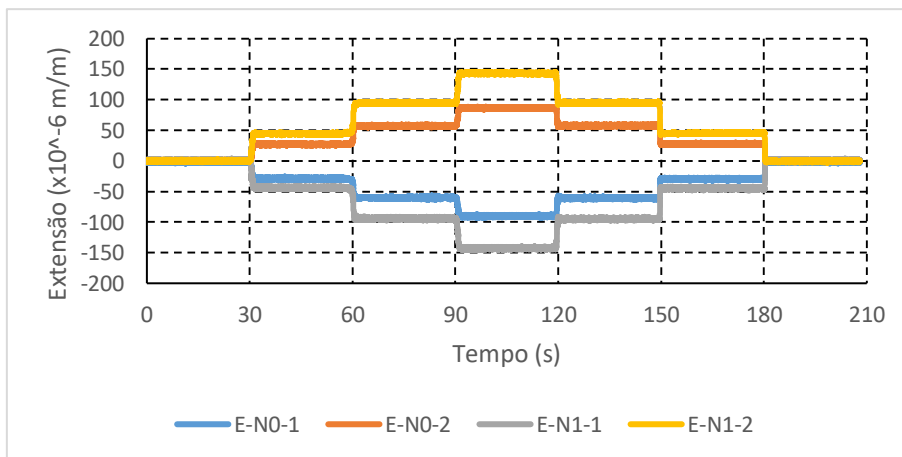


Figura 3.30 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE7.

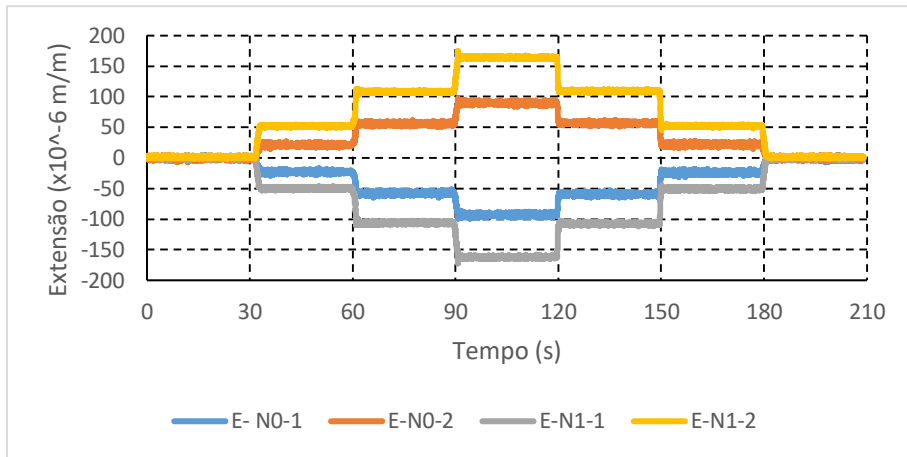


Figura 3.31 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE8.

As molas de tração, estando ligadas ao exterior, oferecem resistência às cargas aplicadas, diminuindo dessa forma os momentos atuantes na estrutura. Considerando que existe uma relação direta entre o momento atuante e a extensão, a resistência que as molas de tração oferecem às cargas horizontais aplicadas, provocam uma ligeira redução do momento atuante, que conseqüentemente reduz as extensões atuantes nos perfis.

3.4.1.4 Medição das acelerações

As medições de acelerações no ensaio estático não oferecem dados relevantes quanto ao comportamento estático da estrutura, conforme se pode verificar na Figura 3.32. Os acelerômetros aplicados na estrutura apenas registam acelerações em torno de zero. A introdução dos carregamentos estáticos acontece de 30 em 30 segundos, onde é possível observar uma excitação do sinal, resultante da colocação manual das massas. Tratando-se de um processo manual, a introdução dos carregamentos acaba por provocar vibrações na estrutura. Também é possível observar alguns picos que não se encontram no intervalo definido, picos esses que são resultantes de interferências externas, como por exemplo a movimentação de pessoas nas imediações dos acelerômetros. Estes picos observados fora do intervalo definido para a introdução de cargas devem-se à elevada sensibilidade que os acelerômetros utilizados na instrumentação da estrutura apresentam.

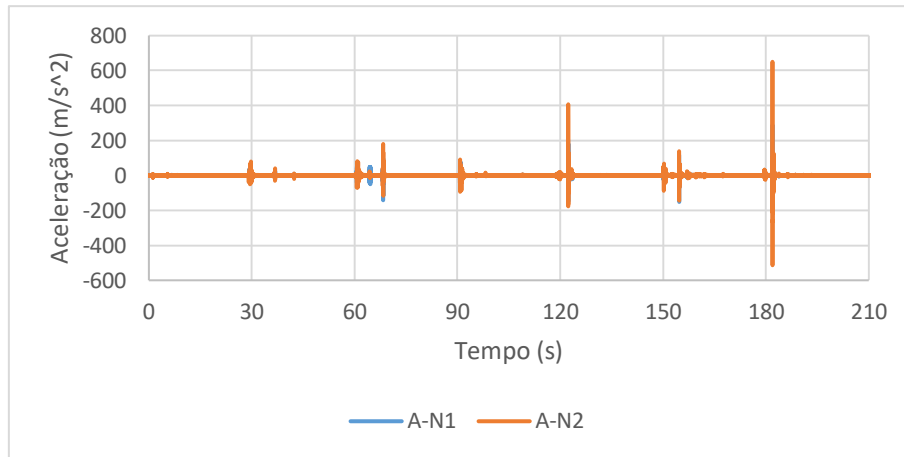


Figura 3.32 – Exemplo de acelerações medidas no ensaio estático.

3.4.2 Ensaios dinâmicos

O objetivo dos ensaios dinâmicos é fazer a avaliação do comportamento vibratório da estrutura, particularmente das frequências próprias e os respetivos modos de vibração. Para esta tipologia de ensaios, e de toda a rede de sensores que foi aplicada, apenas os acelerómetros são utilizados, contudo podem ser aplicados outros sensores que consigam registar o movimento da estrutura.

3.4.2.1 Descrição do ensaio

Para os ensaios dinâmicos é medida a resposta da estrutura perante uma excitação devida à aplicação de impulsos dinâmicos espaçados no tempo.

Dado que o pretendido é medir a frequência e o modo de vibração da estrutura, e tendo em consideração que estes fatores estão diretamente relacionados com a massa da estrutura, foi observada a resposta da estrutura com três configurações de massas distintas:

- Massas só no nível 1
- Massas só no nível 2
- Massas nos níveis 1 e 2

Para os ensaios dinâmicos utilizou-se a mesma formulação de alteração de rigidez da estrutura dos ensaios estáticos. Foram também introduzidas molas, de compressão e de tração (separadamente e em conjunto), nos pontos considerados mais críticos da estrutura. A Tabela 3.7 apresenta todos os ensaios da componente dinâmica realizados, considerando as diferentes configurações para a localização das molas e também as alterações de massa mencionadas.

Tabela 3.7 - Ensaio dinâmicos.

Designação	Molas	Massas
ED1	1.1	N1
	1.2	X
	1.3	N1 + N2
ED2	2.1	N1
	2.2	N0 (compressão)
	2.3	N1 + N2
ED3	3.1	N1
	3.2	N1 (compressão)
	3.3	N1 + N2
ED4	4.1	N1
	4.2	N0 (compressão) + N1 (compressão)
	4.3	N1 + N2
ED5	5.1	N1
	5.2	N1 (tração)
	5.3	N1 + N2
ED6	6.1	N1
	6.2	N2 (tração)
	6.3	N1 + N2
ED7	7.1	N1
	7.2	N1 (tração) + N2 (tração)
	7.3	N1 + N2
ED8	8.1	N1
	8.2	N0 (compressão) + N1 (tração)
	8.3	N1 + N2
ED9	9.1	N1
	9.2	N1 (compressão) + N2 (tração)
	9.3	N1 + N2

As massas encontram-se junto das secções instrumentadas do nível 1 e nível 2, conforme o apresentado na Figura 3.33. Como referido no início deste capítulo as massas são paralelepípedos retangulares maciços com aproximadamente 1,1 Kg cada. As massas são agrupadas em trios nas faces dos perfis, num somatório de seis massas em cada nível.

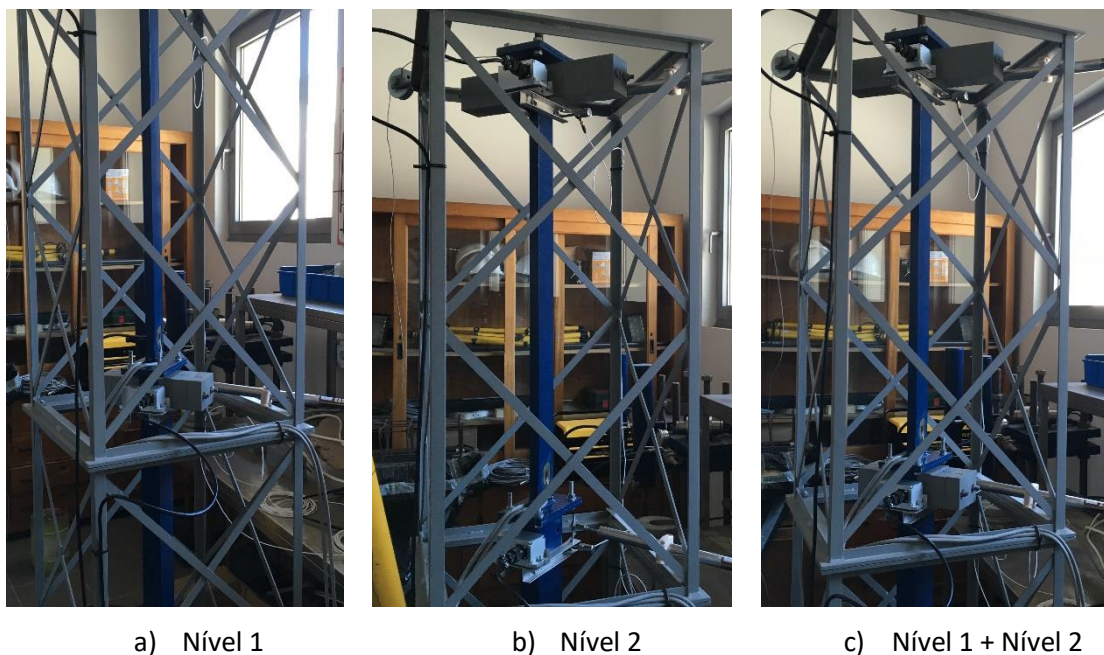


Figura 3.33 - Configuração de massas.

No ponto que se segue são apresentados os resultados obtidos para a resposta dinâmica e também a identificação modal da estrutura quando submetida a um carregamento dinâmico. Foram aplicados impulsos manuais dinâmicos à estrutura, também designados como piparotes, de 10 em 10 segundos, num total de 90 segundos para a duração de cada ensaio. A frequência de amostragem é de 100 Hz para os dados recolhidos neste ensaio.

3.4.2.2 Medição da aceleração

Os acelerómetros A-N1 e A-N2 medem as acelerações paralelas ao movimento da estrutura, que caracterizam o primeiro modo de vibração.

Tendo em consideração que o objetivo dos ensaios dinâmicos é caracterizar o modo de vibração da estrutura, ou seja, o dado relevante para esta fase do trabalho é a frequência de vibração da estrutura cuja avaliação se torna mais difícil com a utilização de gráficos de acelerações em função do tempo. Desta forma, a utilização de gráficos de aceleração em função do tempo não é o método mais indicado para a avaliar a frequência de vibração de uma estrutura, por não se tratar de um método que permita retirar frequências de vibração de forma direta.

Desta forma, para se obter os espectros de frequência de forma direta são aplicadas as transformadas diretas discretas finitas de Fourier que podem ser calculadas através de um algoritmo matemático denominado por FFT (*Fast Fourier Transform*).

As frequências obtidas através da FFT deverão corresponder, em princípio, aos modos de vibração natural do modelo numérico do demonstrador, análise que será feita mais detalhadamente no Capítulo 4 da presente dissertação.

À semelhança do que foi feito para a análise dos ensaios estáticos, a análise do comportamento dinâmico da estrutura será feita com base em alguns dos ensaios dinâmicos realizados, considerados os mais relevantes para análise dinâmica da estrutura face às alterações de rigidez. Os resultados obtidos para todos os ensaios dinâmicos realizados podem ser consultados na íntegra no Anexo V – Resultados dos Ensaios Dinâmicos.

As Figura 3.34 e Figura 3.35 apresentam os espectros de resposta obtidos para o ED1, onde não são aplicadas molas em nenhum ponto da estrutura. O ED1 trata-se do ponto partida para a análise do comportamento dinâmico da estrutura, em função da colocação das molas na mesma.

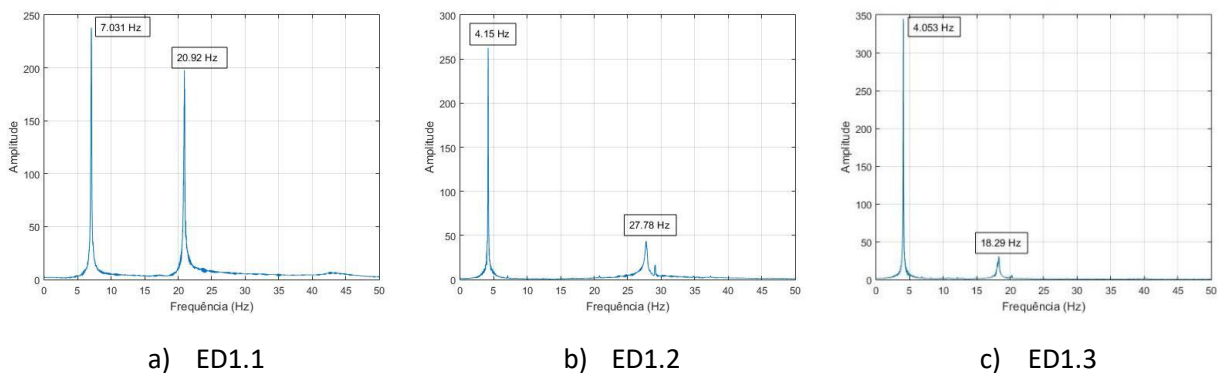


Figura 3.34 - Espectros de frequência no ED1 (A-N1).

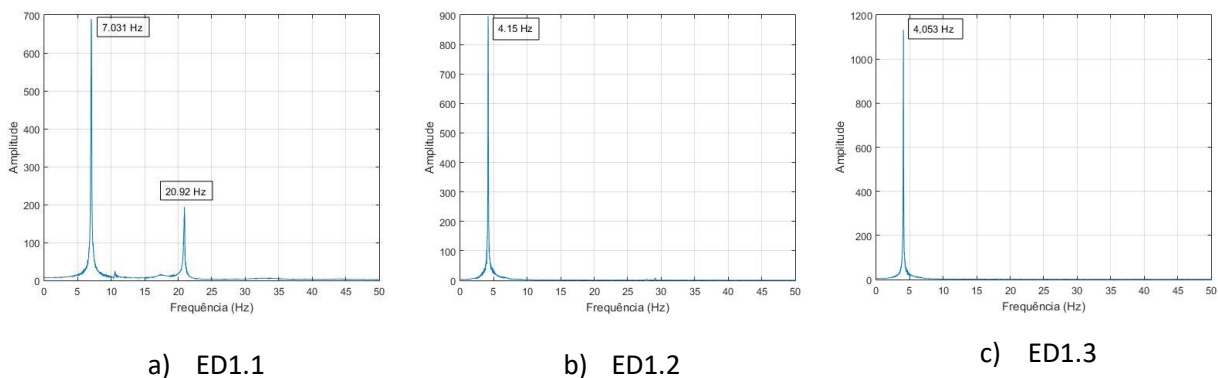


Figura 3.35 - Espectros de frequência no ED1 (A-N2).

No que diz respeito aos espectros obtidos para o ED1 importa referir que, como seria de esperar, os dois acelerómetros colocados na estrutura, medem a mesma gama de frequências, mas em amplitudes. Conforme o exposto anteriormente, confirma-se que a massa é um fator importante no desenvolvimento

das frequências de vibração da estrutura. Confirma-se então que para a avaliação das frequências de vibração a massa da estrutura é um dos fatores mais importantes.

Ao nível da introdução de molas na estrutura, verificou-se durante a realização dos ensaios laboratoriais que o uso de molas de compressão contribuiu para a instabilização do comportamento da estrutura. Nas Figura 3.36 e Figura 3.37, correspondentes à realização do ED2, onde são introduzidas molas de compressão na base da estrutura é visível esse facto.

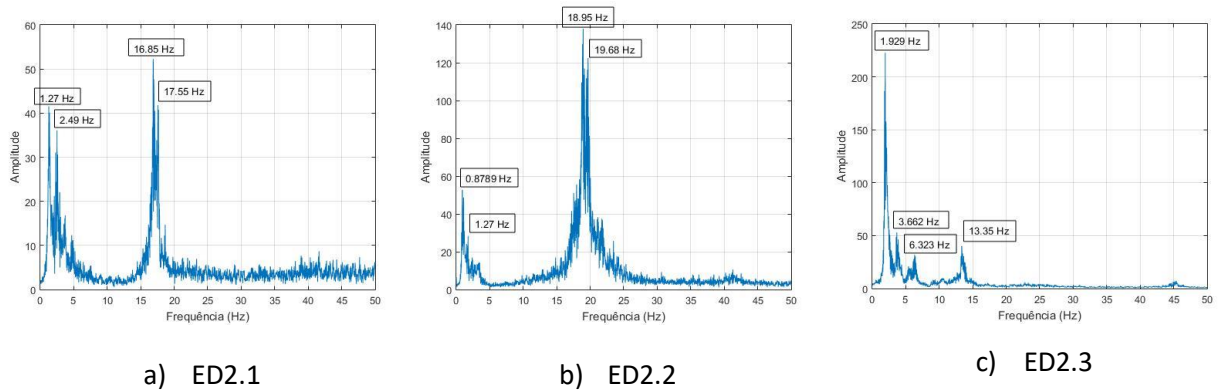


Figura 3.36 - Espectros de frequência no ED2 (A-N1).

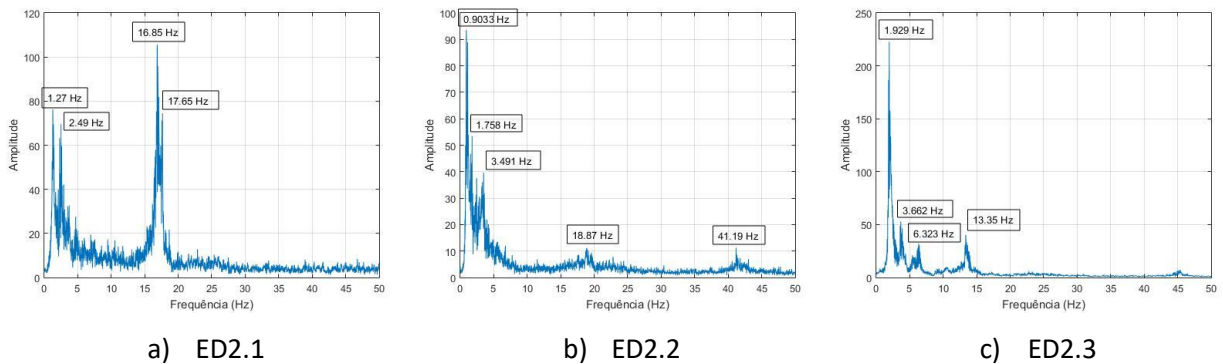


Figura 3.37 - Espectros de frequência no ED2 (A-N2).

Da análise dos dados referentes aos espectros retirados do ED2 confirma-se o anteriormente dito em relação à massa da estrutura como sendo um fator importante na diminuição das frequências de vibração da estrutura. É também possível observar a influência da introdução de molas de compressão de estrutura, e verificar que estas contribuem, a par das alterações de massa na estrutura, para a diminuição das frequências de vibração da estrutura, quando comparadas com o obtido no ED1. É ainda bem visível que as molas instabilizam um pouco a estrutura, aumentando o ruído nos espectros calculados e número de frequências de vibração obtidas.

Outro aspeto importante da introdução de molas de compressão está relacionado com a introdução de molas no nível intermédio da estrutura. É possível observar nos espectros calculados para o ED3 (consultar Figura 3.38 e Figura 3.39 que, e da mesma forma do que se sucedeu nos ensaios estáticos, a introdução

de molas no nível de separação entre perfis faz com que as vibrações transmitidas do nível superior para o inferior sejam praticamente nulas, estando desta forma os dois acelerômetros (A-N1 e A-N2) aplicados na estrutura a medir frequências diferentes.

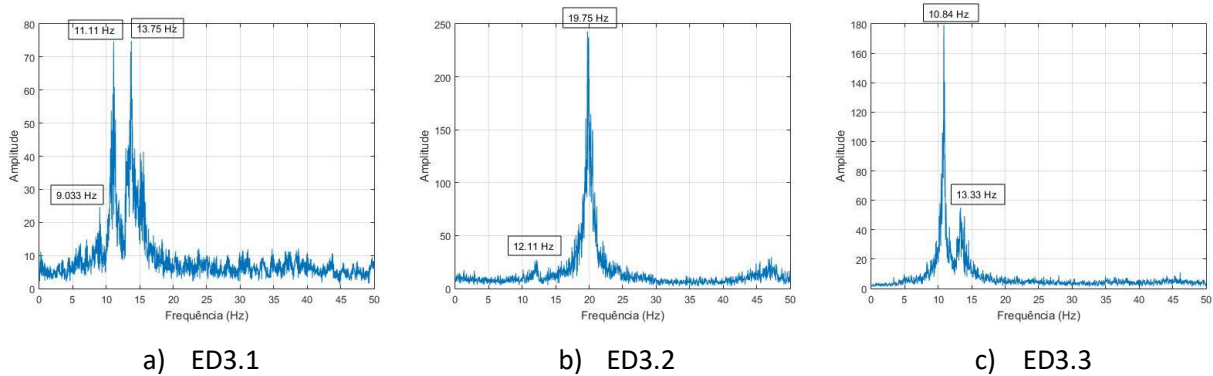


Figura 3.38 - Espectros de frequência no ED3 (A-N1).

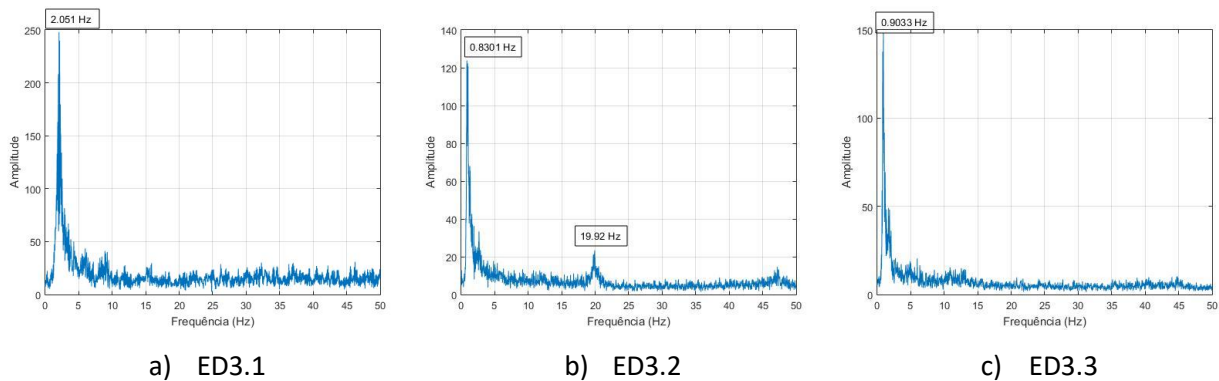


Figura 3.39 - Espectros de frequência no ED3 (A-N2).

A influência da introdução de molas de tração na estrutura não se fez sentir quando as mesmas são aplicadas individualmente, conforme se pode verificar nas Figura 3.40 e Figura 3.41, referentes aos espectros de resposta obtidos para o ED5.

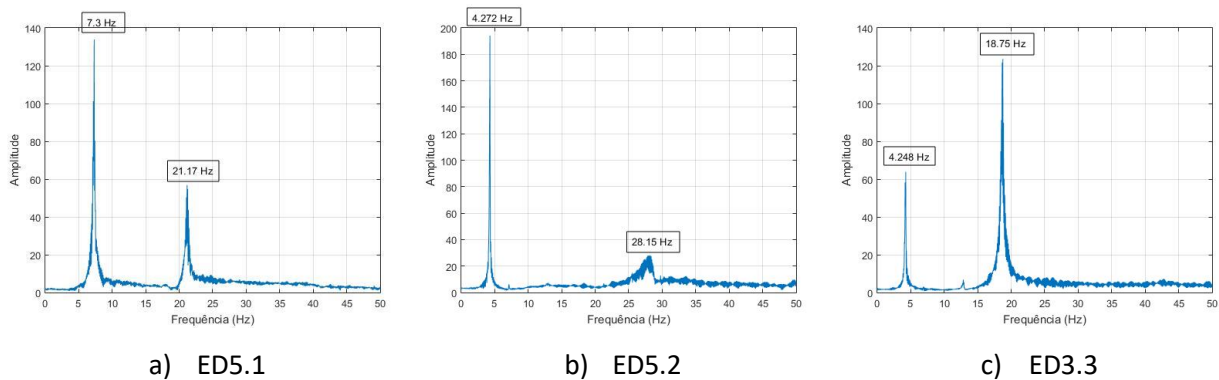


Figura 3.40 - Espectros de frequência no ED5 (A-N1).

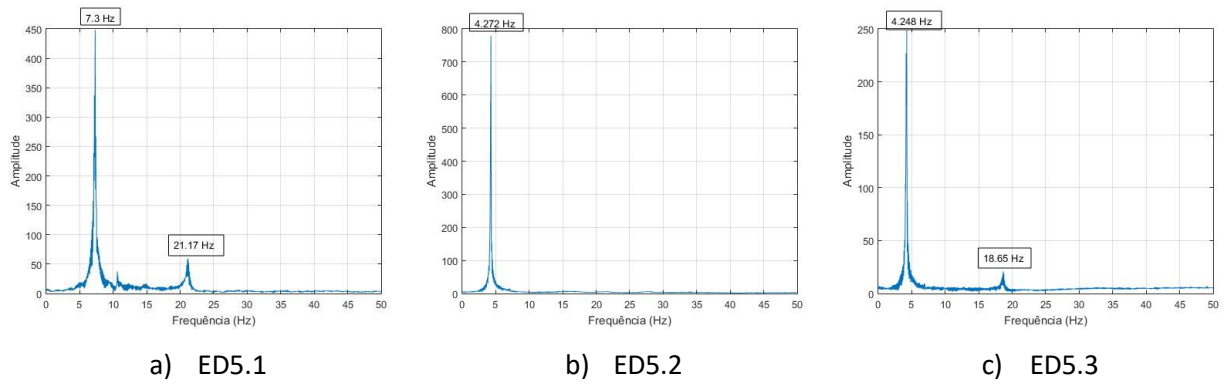


Figura 3.41 - Espectros de frequência no ED5 (A-N2).

Como se pode observar nas figuras acima, as frequências de vibração obtidas, quando introduzidas as molas de tração na estrutura são muito próximas das obtidas para o ED1, no qual a estrutura não possui qualquer tipo de mola aplicado.

A influência das molas de tração no comportamento dinâmico da estrutura apenas se faz sentir quando as mesmas são conjugadas com molas de compressão. A instabilização da estrutura resultante da introdução de molas de compressão é anulada de certa forma anulada com a introdução de molas de tração. Este facto está patente nos espectros obtidos no ED8, ilustrados nas Figura 3.42 e Figura 3.43.

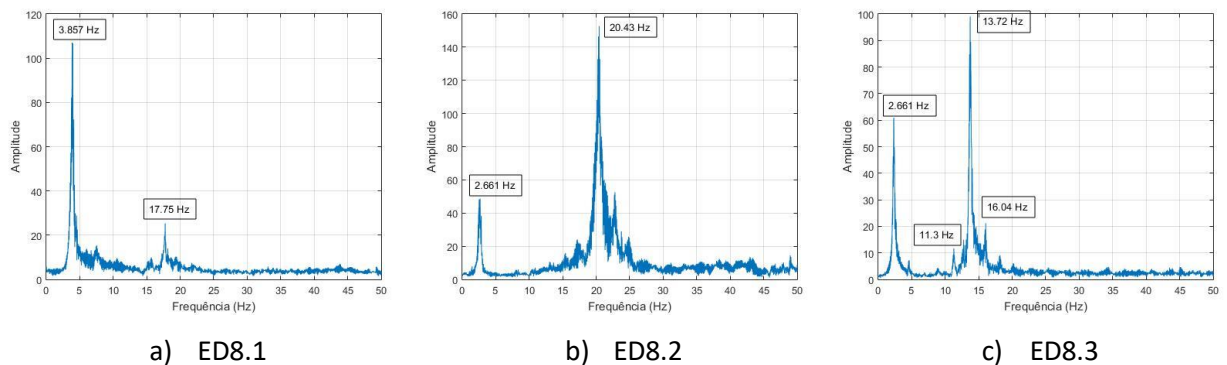


Figura 3.42 - Espectros de frequência no ED8 (A-N1).

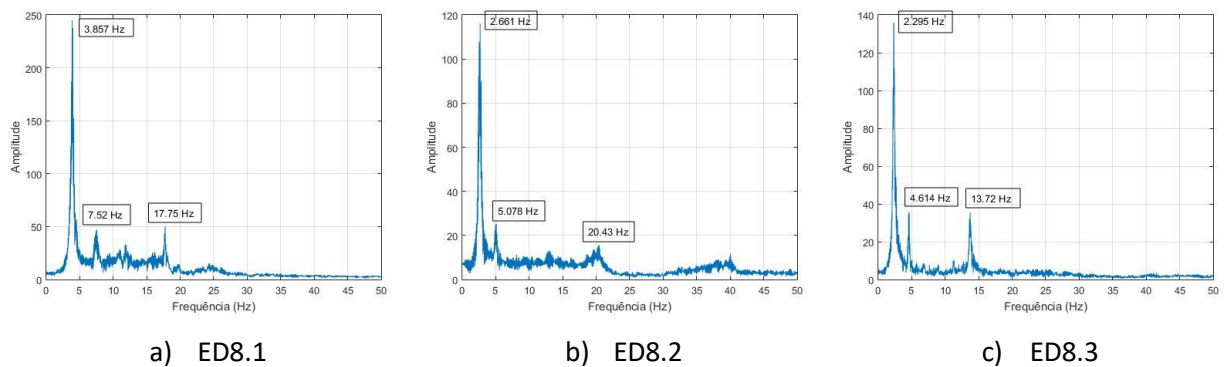


Figura 3.43 - Espectros de frequência no ED8 (A-N2).

A estabilização devido à introdução de molas de tração, quando conjugadas com molas de compressão, pode ser observada nas figuras acima apresentadas, e está presente no facto de se obter menos ruído nos espetros obtidos e frequências melhor definidas no mesmo e mais fáceis de avaliar.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresenta o modo de conceção do modelo laboratorial, onde foi implementado um sistema de monitorização estrutural para a realização de ensaios caracterizadores da resposta estatística e dinâmica da estrutura.

É feita a referência a todos os sensores e equipamentos aplicados no demonstrador que serviram para medir as varias grandezas que caracterizam a resposta de estrutura, sendo destacadas as especificidades que consideradas mais relevantes na monitorização estrutural.

São descritas as técnicas utilizadas na realização dos ensaios estáticos e dinâmicos e apresentados os resultados mais relevantes obtidos através da campanha de ensaios a que se submeteu a estrutura.

O âmbito dos trabalhos passou pela introdução de molas de compressão e de tração nos pontos mais relevantes do modelo estrutural, para que seja possível avaliar a resposta da estrutura a mudanças de rigidez. Os resultados são diversificados e conclusivos quanto às implicações que mudanças de rigidez estrutural podem ter no comportamento da estrutura.

As alterações de rigidez, materializadas com a introdução de molas de compressão e tração, tiveram consequências que podem ser consideradas negativas ou positivas de acordo com o tipo de ensaio ou grandeza que se está a avaliar.

É assim importante referir que da análise dos valores obtidos na componente estática dos ensaios realizados, observou-se que, nas duas localizações estudadas, a introdução de molas de compressão aumentou significativamente os deslocamentos e as rotações medidas, ao passo que as molas de tração reduziram esses mesmos deslocamentos, quando as duas tipologias de molas são aplicadas individualmente. Quando se fez a conjugação dos dois tipos de molas (compressão + tração) verifica-se que o aumento nos deslocamentos e rotações devido às molas de compressão são compensados pelas molas de tração. No que respeita às extensões medidas observou-se que o fator condicionante, e de acordo com o expectável, são as cargas aplicadas, considerando que o que condiciona a extensão é a tensão aplicada, sendo possível também observar que na generalidade dos casos a introdução de molas, sejam de tração ou de compressão, ajuda na redução das extensões medidas.

No que respeita aos ensaios dinâmicos observa-se que um dos fatores condicionantes para a frequência de vibração da estrutura é a massa, que na generalidade dos casos é possível observar é um fator

importante para redução das frequências de vibração. A introdução de molas, seja de compressão ou de tração, contribuiu, a com das alterações de massa, para a redução das frequências de vibração observadas. É importante assinalar que as molas, de qualquer tipologia das utilizadas funcionam como “amortecedores” para a vibração resultante da excitação aplicada.

CAPÍTULO 4

MODELAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento de modelos numéricos cujo objetivo é interpretar a resposta estrutural do modelo laboratorial. A calibração do modelo é realizada com base nos resultados experimentais. Procura-se depois fazer uma discussão qualitativa e quantitativa do comportamento do modelo com base nos resultados experimentais e nos dos modelos numéricos.

4.1 INTRODUÇÃO

Face aos desenvolvimentos no que respeita ao cálculo automático, no âmbito da engenharia civil os modelos numéricos perfilam-se como ferramentas importantes para o estudo do comportamento estrutural. Este desenvolvimento está diretamente relacionado com os avanços tecnológicos na capacidade de processamento dos computadores e com os *softwares* disponíveis no mercado.

A integração dos resultados obtidos pela via experimental com os resultados obtidos através de modelos numéricos permite avaliar a adequação da resposta das estruturas quando solicitadas. Sendo desta forma possível avaliar o comportamento dos materiais, e também os estados de tensão e deformação para solicitações com carácter estático ou dinâmico.

Para a o desenvolvimento do tema do presente capítulo foram realizados dois modelos numéricos com recurso ao *software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017*, sendo esses modelos de barras e de elementos finitos de casca.

4.2 COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS

Para os modelos em seguida apresentados foi adotado um módulo de elasticidade de 210 GPa e uma massa volúmica de aproximadamente 7858 Kg/m³, propriedades que se relacionam com os valores médios do aço. A Tabela 4.1 apresenta os pesos parciais de cada perfil incluindo as chapas de fixação soldadas nas duas campanhas de ensaios realizados. É também comparado o peso total do demonstrador contabilizando a totalidade das massas colocadas nos dois níveis. Na Tabela 4.1, os valores são obtidos através do modelo numérico de barras

Tabela 4.1 - Quantificação e comparação do peso do modelo

	Real (N)	Analítico (N)
RHS 50x20x1,5	39,2	29,8
RHS 80x40x1,5	47,1	38,9
Peso Total	214,1	196,5

Na Tabela 4.2 estabelece a comparação entre as massas consideradas nos dois modelos numéricos e massa real da estrutura.

Tabela 4.2 - Pesos obtidas através dos modelos numéricos.

	Peso nos modelos numéricos (N)	Peso real (N)
Modelo de barras	196,5	214,1
Modelo de casca	201,3	

As diferenças que se observam ao nível dos pesos dos dois perfis e do peso total justificam-se pela precisão das medições realizadas e pelo facto dos perfis terem sido pesados com os sensores, inclinómetros e extensómetros e respetivas cablagens, aplicados nos perfis da estrutura modelo. Também as diferenças que existem entre o peso real dos perfis e o obtido através dos modelos numéricos está relacionada com o facto de nos modelos não estar a ser considerada a massa parcial resultante da medição da massa com sensores aplicados. As disparidades verificadas ao nível dos pesos dos modelos devem-se às características consideradas para os materiais e ao posicionamento das massas, que sendo diferente produz resultados diferentes.

No que respeita ao diferencial existente entre o peso dos dois modelos ele faz-se sentir no facto dos pesos dos perfis de ligação no modelo de barras ter de ser contabilizada individualmente, através de cargas concentradas nos nós, ao passo que no modelo de casca esta massa é representada por uma “shell”, ou casca, que se aproxima mais da realidade, não havendo qualquer interferência de cálculos complementares realizados, que estão sujeitos a arredondamentos parciais que afetam o resultado final.

4.3 MODELO NUMÉRICO DE BARRAS

O modelo numérico de barras é um modelo tridimensional, composto por duas barras com as características dos perfis que compõe a estrutura, que estão ligadas entre si por nós. Cada nó do modelo contém seis graus de liberdade, conforme a formulação de elementos finitos tridimensionais. A estrutura

encontra-se encastrada na base através de um apoio capaz de bloquear os seis graus de liberdade da estrutura. De forma a obter maior precisão nos deslocamentos e esforços obtidos compatíveis com o modelo experimental, foram criados nós nas secções correspondentes à localização dos sensores. A Figura 4.1 apresenta uma perspetiva do modelo numérico de barras.



Figura 4.1 - Perspetiva do modelo numérico de barras.

4.3.1 Análise estática

O objetivo dos ensaios estáticos é fazer a avaliação do comportamento estrutural do modelo experimental, quando sujeito a cargas horizontais. No modelo numérico de barras foram simulados os três casos de carga aplicados na estrutura onde as grandezas medidas foram deslocamentos, extensões e rotações.

As grandezas avaliadas a partir do modelo numérico correspondem às secções instrumentadas no modelo físico. As forças aplicadas, em cada um dos casos de carga, correspondem aos três patamares de carga dos ensaios de carga apresentados no capítulo anterior e foram aplicados com recurso a forças concentradas no respetivo nó do modelo.

4.3.1.1 Resultados dos deslocamentos

Retomando o tema introduzido no Capítulo 3 que diz respeito ao comportamento bilinear da estrutura, resultante da introdução de molas de compressão, constata-se a necessidade de traduzir esse comportamento no modelo executado. Essa necessidade materializa-se na introdução de alterações de rigidez nos pontos onde essas mesmas alterações foram executadas no modelo físico. À partida para o desenvolvimento do modelo de cálculo foi assumido o comportamento linear da estrutura, o que não se verificou na realidade. Esse facto teve como resultado a necessidade de ajustar o comportamento do

modelo com a introdução de alterações de rigidez não lineares, e que simulem o comportamento bilinear da estrutura.

O resultado da análise mencionada no parágrafo anterior é exposto na Figura 4.2, onde se faz o confronto entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados de dois modelos numéricos: (i) um que admite um comportamento linear; (ii) outro que assume um comportamento bilinear.

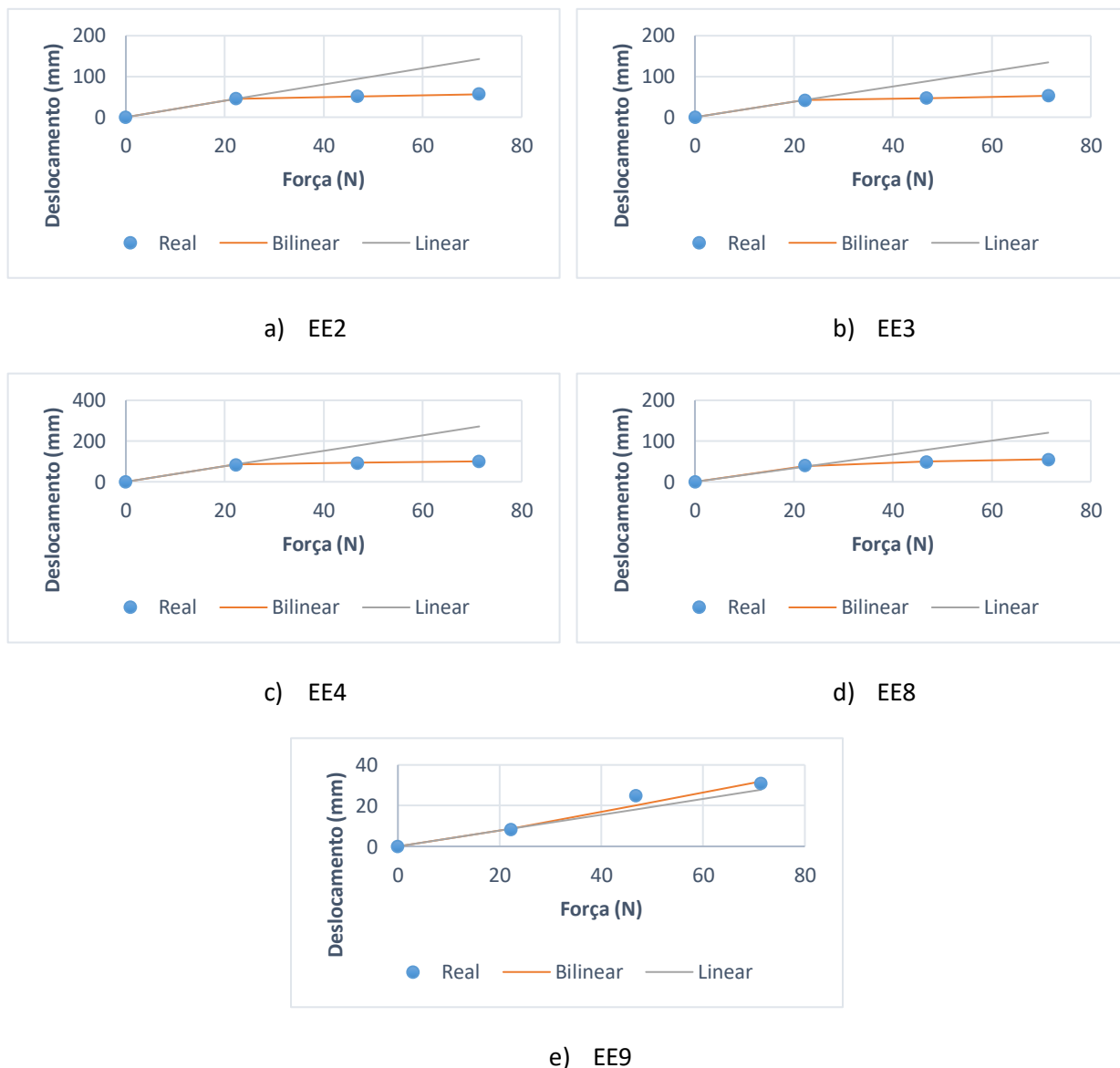


Figura 4.2 – Comparação entre resultados experimentais e numéricos do modelo de barras.

Da análise da figura anterior é possível observar, de facto, que a estrutura assumiu dois comportamentos distintos, que se observam na obtenção de um gráfico com duas retas de declive diferente. Conclui-se então que numa primeira fase a deformação global da estrutura deve-se à deformação das molas, enquanto a segunda fase da deformação é promovida pela rigidez dos perfis que constituem a estrutura. A exceção a este comportamento aparece no EE9, no qual é possível observar que houve um comportamento linear do princípio ao fim do ensaio. A conjugação de molas de compressão no nível 1

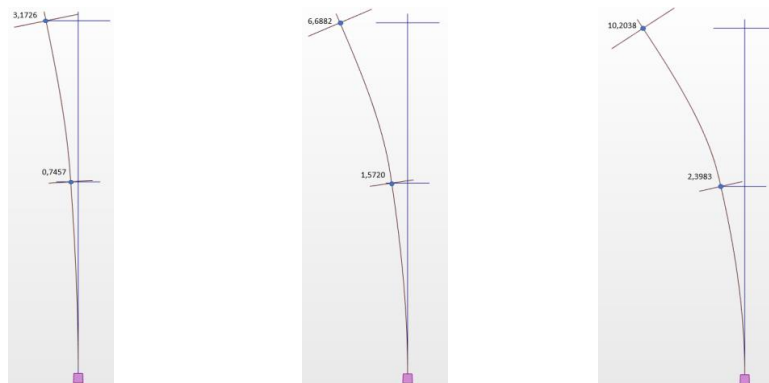
com molas de tração no nível 2 não permitiu que fosse atingido a máxima deformação das molas de compressão, facto que está traduzido no gráfico da Figura 4.2 e). O facto de não ser atingida a máxima deformação nas molas de tração traduz-se na obtenção de um gráfico linear para o comportamento da estrutura, resultante apenas da deformação das molas de compressão.

Na Tabela 4.3 faz-se um resumo dos deslocamentos obtidos nas três descritas, o comportamento real da estrutura, no caso de comportamento bilinear e no caso de comportamento linear da estrutura.

Tabela 4.3 - Resumo dos deslocamentos do comportamento estrutural (em mm).

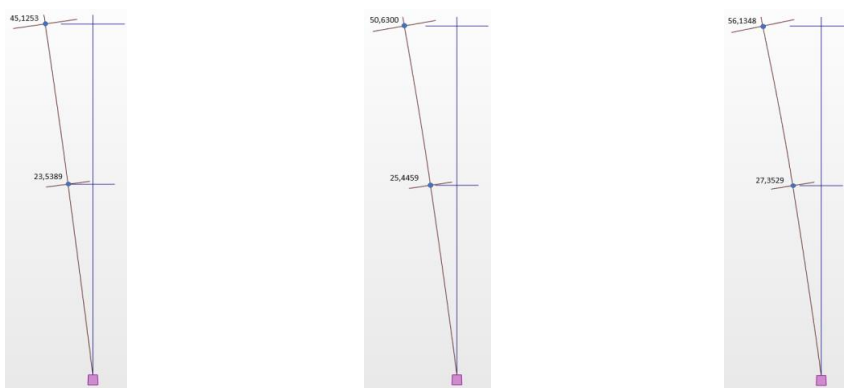
Ensaio	Carregamento	Força (N)	Real	Bilinear	Linear
EE2	1	22,2	45,520	45,125	44,389
	2	46,8	50,912	50,630	93,577
	3	71,4	56,664	56,135	142,764
EE3	1	22,2	41,055	41,456	41,839
	2	46,8	47,205	46,966	88,202
	3	71,4	52,265	52,476	134,564
EE4	1	22,2	84,507	84,340	84,493
	2	46,8	92,733	92,943	178,120
	3	71,4	100,628	100,442	271,747
EE8	1	22,2	40,487	38,084	37,436
	2	46,8	49,773	49,874	78,919
	3	71,4	55,575	55,322	120,402
EE9	1	22,2	8,264	8,600	8,650
	2	46,8	24,846	20,145	18,236
	3	71,4	30,886	31,921	27,821

Nas Figura 4.3 a Figura 4.7 apresentam-se as deformadas para cada caso de carga aplicado à estrutura. As deformadas que se seguem correspondem aos ensaios utilizados na análise do comportamento feita no capítulo anterior. O complemento à informação pode ser consultado no Anexo VI – Análise Estática do Modelo Numérico de Barras.



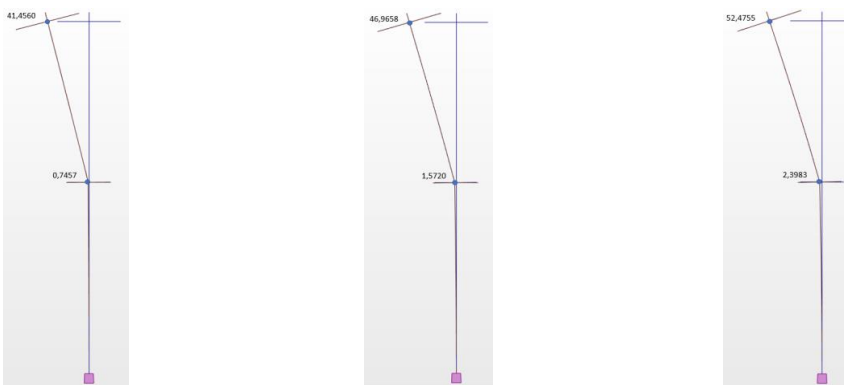
a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura 4.3 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE1 (em mm).



a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura 4.4 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE2 (em mm).



a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura 4.5 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE3 (em mm).

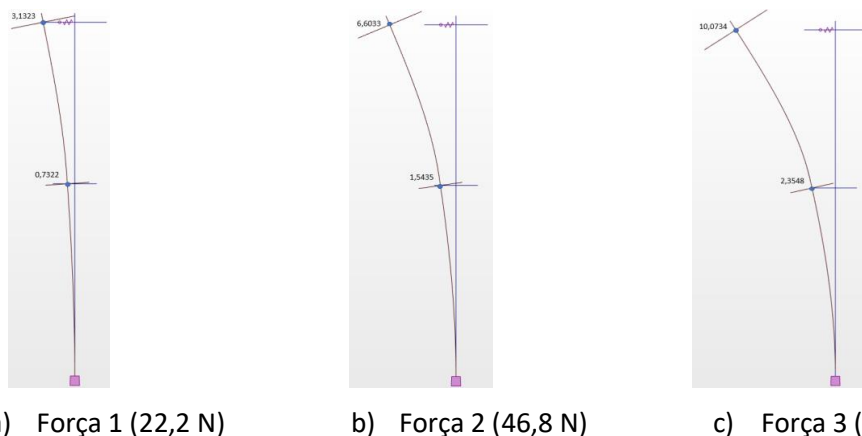


Figura 4.6 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE7 (em mm).

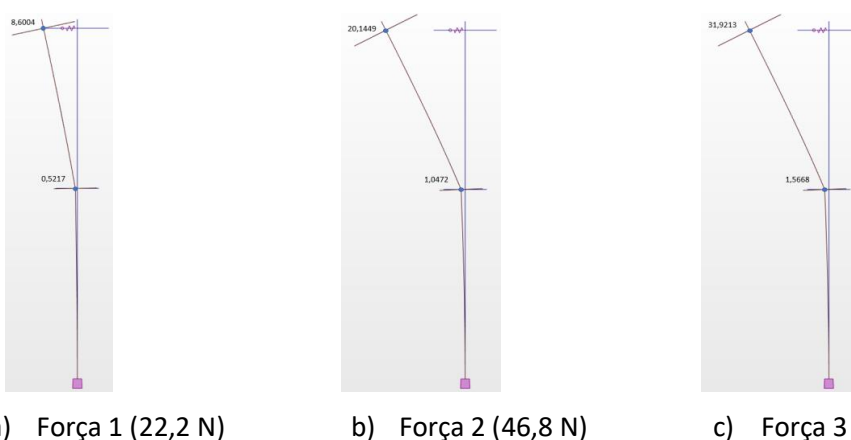


Figura 4.7 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE9 (em mm).

4.3.1.2 Extensões no modelo numérico de barras

Pretende-se neste trabalho estabelecer a comparação entre as extensões obtidas a partir da modelação numérica com as extensões obtidas experimentalmente. Dado que o *software* utilizado não apresenta diretamente as extensões, é necessário recorrer à avaliação das tensões para calcular as extensões.

Tendo-se verificado em todos os ensaios efetuados que as tensões instaladas no demonstrador são inferiores à tensão de cedência, é possível afirmar que a lei de Hooke é aplicável de acordo com a expressão:

$$\sigma = \varepsilon * E \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{4.1}$$

Onde:

σ é a tensão obtida através do modelo numérico;

E é o módulo de elasticidade do material.

É de referir que nos ensaios estáticos realizados no modelo físico observou-se que após a retirada das cargas aplicadas a estrutura apresentou uma recuperação quase total da sua deformação, conforme o exposto no capítulo anterior. Considera-se assim validada a hipótese de cálculo apresentada e o comportamento linear dos materiais constituintes da estrutura.

Nas Tabelas 4.4 a 4.7 são apresentados os valores de extensões calculadas a partir do modelo numérico correspondentes às secções onde se encontram instalados os extensómetros de resistência eléctrica na estrutura. São apresentados resultados correspondentes aos ensaios analisados no Capítulo 3, podendo ser feita a consulta total dos dados no Anexo VI.

Tabela 4.4 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,9	36,9	-59,0	59,0
2	46,8	-77,8	77,8	-124,5	124,5
3	71,4	-118,6	118,6	-190,4	190,4

Tabela 4.5 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,9	36,9	-59,0	59,0
2	46,8	-77,8	77,8	-124,5	124,5
3	71,4	-118,6	118,6	-189,9	189,9

Tabela 4.6 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,1	36,1	-58,6	58,7
2	46,8	-76,2	76,2	-123,6	123,7
3	71,4	-116,6	116,1	-188,6	188,6

Tabela 4.7 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-30,2	30,2	-59,0	59,0
2	46,8	-69,3	69,3	-124,5	124,5
3	71,4	-110,0	110,0	-189,9	189,9

4.3.1.3 Rotações no modelo numérico de barras

Os valores das rotações calculadas a partir do modelo numérico de barras, nos nós correspondentes às secções instrumentadas com inclinómetros, para cada tipologia de ensaio estático e tendo em consideração os carregamentos aplicados, encontram-se apresentados nas Tabela 4.8 a Tabela 4.13. São listados os valores das rotações dos modelos que simulam os ensaios analisados anteriormente, estando toda a informação relativa às rotações nos modelos numéricos de barras exposta no Anexo VI.

Tabela 4.8 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE1 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-79,0	-228,4
2	46,8	-166,5	-481,4
3	71,4	-254,0	-734,4

Tabela 4.9 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE2 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-1430,9	-1580,3
2	46,8	-1582,5	-1897,4
3	71,4	-1734,1	-2214,6

Tabela 4.10 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE3 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-79,0	-2929,7
2	46,8	-166,5	-3323,4
3	71,4	-254,0	-3717,2

Tabela 4.11 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE4 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-2279,2	-3338,0
2	46,8	-2430,8	-3873,8
3	71,4	-2582,5	-4331,7

Conforme o exposto no Capítulo 3, é possível verificar que no EE4 as inclinações obtidas no nível 2 da estrutura ultrapassam o campo de medição dos inclinômetros. Desta forma, a análise dos dados referentes a inclinações no nível 2 perdem relevância daqui em diante.

Tabela 4.12 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE7 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-77,7	-226,1
2	46,8	-163,8	-476,7
3	71,4	-249,9	-727,3

Tabela 4.13 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE9 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-55,3	-612,0
2	46,8	-111,1	-1432,5
3	71,4	-166,3	2269,4

4.3.2 Análise modal

Para complementar o estudo do modelo numérico em apreço, foi realizada uma análise modal, onde são analisadas as frequências naturais e as deformadas correspondentes aos modos de vibração da estrutura. A análise das frequências próprias e das deformadas modais oferece informações relevantes quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente. A comparação entre os valores obtidos através dos modelos e os experimentais permitem o ajuste do modelo numérico das características mecânicas da estrutura, como por exemplo o módulo de elasticidade, e também das condições de apoio.

Na análise modal do numérico de barras são simuladas as condições experimentais, ou seja, a alternância de massas no nível 1 e no nível 2, e também as alterações de rigidez resultantes da introdução das molas na estrutura.

O posicionamento dos acelerômetros na estrutura permite fazer a avaliação dos modos de vibração coincidentes com a direção da carga aplicada. Sendo assim, nesta parte do trabalho serão apresentadas as frequências naturais e as deformadas correspondentes aos modos de vibração na direção da carga, ou seja, o primeiro e o segundo e segundo modos de vibração obtidos na direção do movimento.

4.3.2.1 Massas no nível 1

As tabelas que se seguem (Tabela 4.14 a Tabela 4.18) resumem os valores das frequências de vibração calculadas nos modelos que simulam o comportamento dinâmico, com massas apenas no nível 1, dos apresentados no Capítulo 3. A consulta do Anexo VII – Análise Modal do Modelo Numérico de barras completa a informação agora exposta, nomeadamente com a apresentação das deformadas dos modos de vibração determinados.

Tabela 4.14 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,07	0,12
2	22,27	0,04

Tabela 4.15 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,59	0,62
2	17,63	0,06

Tabela 4.16 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,55	0,39
2	13,91	0,07

Tabela 4.17 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,11	0,12
2	22,31	0,04

Tabela 4.18 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,76	0,57
2	17,64	0,06

4.3.2.2 Massas no nível 2

Nas Tabela 4.19 a Tabela 4.23 são expostas as frequências naturais para os modos de vibração dos modelos que simulam os ensaios dinâmicos, considerando massas complementares no nível 2, estudados no capítulo anterior. A informação completar, tais como as deformadas dos modos identificados, encontra-se apresentada no Anexo VII.

Tabela 4.19 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,54	0,22
2	26,99	0,04

Tabela 4.20 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,13	0,88
2	12,82	0,08

Tabela 4.21 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	23,53	0,04

Tabela 4.22 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	5,56	0,22
2	27,03	0,04

Tabela 4.23 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,25	0,8
2	18,88	0,05

4.3.2.3 Massas nos dois níveis

As Tabela 4.24 a Tabela 4.28 resumem os valores das frequências dos modos de vibração obtidos no modelo numérico. A análise que se segue é referente à modelação da estrutura com massas nos dois níveis, para além do peso próprio da estrutura. Toda a informação referente ao presente subcapítulo pode ser consultada no Anexo VII

Tabela 4.24 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,44	0,23
2	19,06	0,05

Tabela 4.25 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,04	0,96
2	12,92	0,08

Tabela 4.26 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	13,75	0,07

Tabela 4.27 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,46	0,22
2	19,11	0,05

Tabela 4.28 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,15	0,87
2	12,95	0,08

4.4 MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS DE CASCA

A análise e dimensionamento de estruturas novas e também o estudo de avaliação de estruturas existentes em que se exige um refinamento do cálculo, recorre frequentemente a elementos finitos de casca. A modelação da estrutura do modelo físico através de elementos de casca, conforme ilustrado na Figura 4.8, apresenta, em princípio, resultados mais rigorosos quando comparado com a modelação através de elementos de barras.

A ligação da estrutura ao exterior é feita através de quatro nós que simulam a ligação dos parafusos entre a chapa de base e a estrutura externa de reação. São em seguida apresentados os valores obtidos através do modelo de elementos de casca.

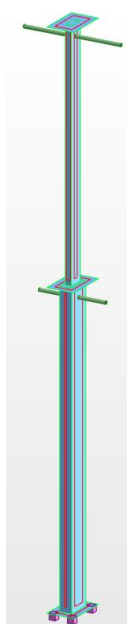


Figura 4.8 - Modelação de elementos finitos de casca.

4.4.1 Análise estática

A análise estática do modelo numérico de elementos finitos de casca é feita considerando as mesmas condições e casos de carga referidos para o modelo numérico de barras.

4.4.1.1 Resultados dos deslocamentos

Na mesma medida do que foi expresso na modelação do modelo de numérico de barras, no modelo de elementos finitos de casca também foi preciso fazer o ajuste do comportamento do modelo, de modo a simular o comportamento bilinear da estrutura. Na Figura 4.9 estão ilustrados os gráficos comparativos dos três comportamentos considerados, o comportamento real do modelo físico, o caso em que se assume o comportamento linear do modelo de cálculo, e o caso do comportamento bilinear do modelo de cálculo.

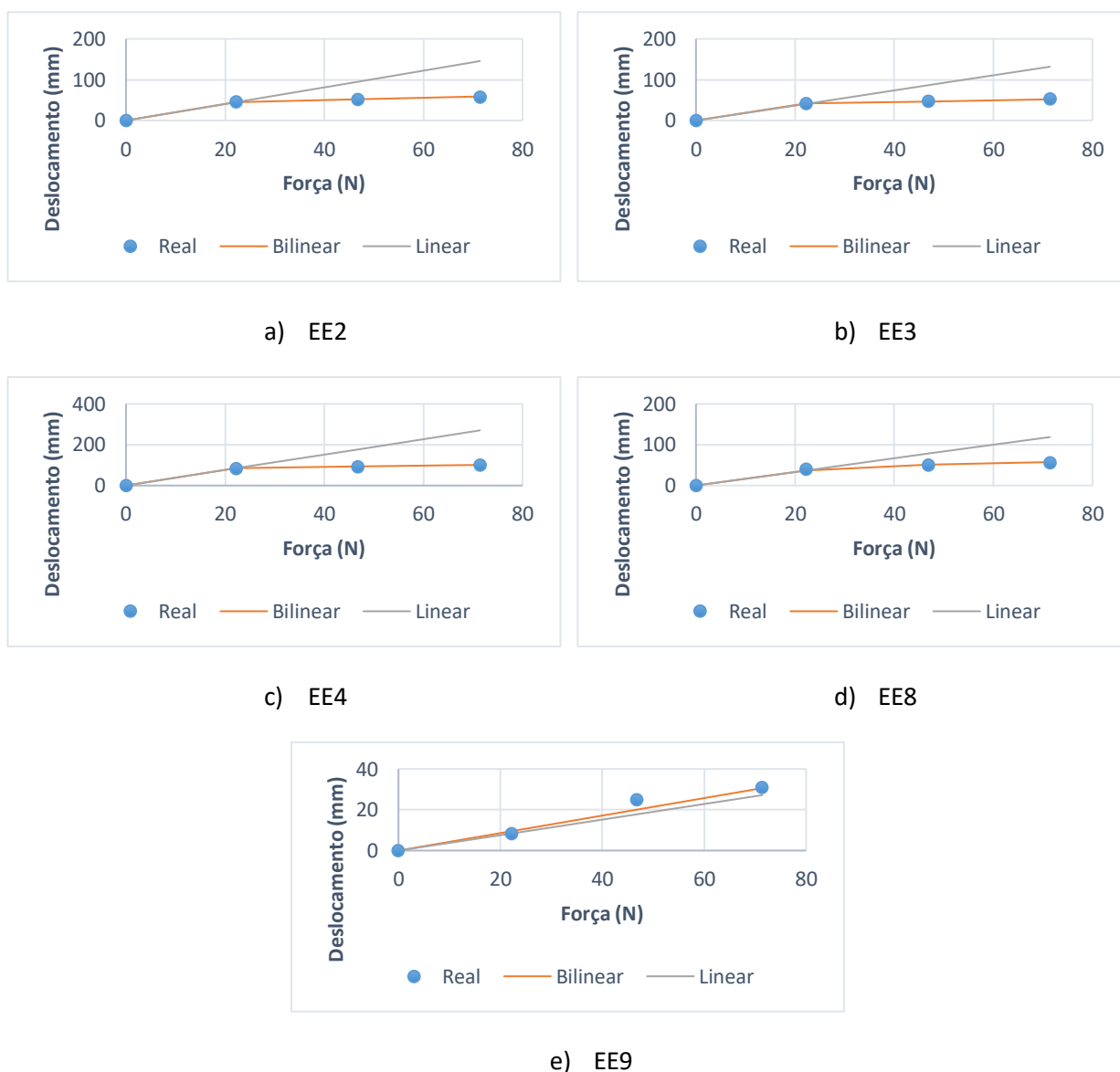


Figura 4.9 – Comparação entre resultados experimentais e numéricos do modelo de casca.

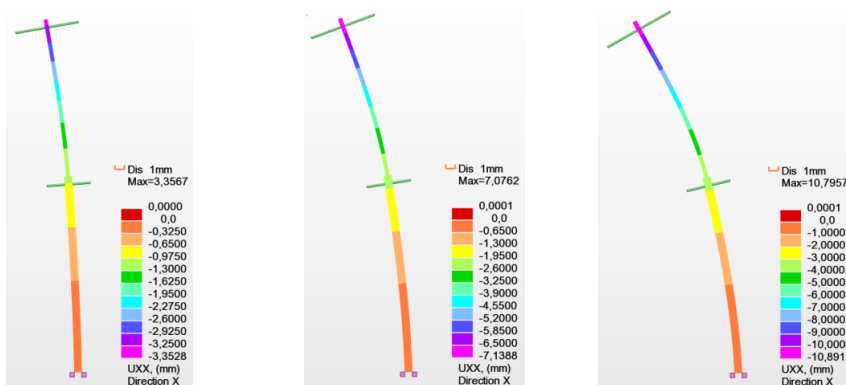
Foi também necessário, no modelo de casca, e à semelhança do procedimento adotado no modelo de barras, a alteração de rigidez do modelo conforme uma lei não linear. Da Figura 4.9 é possível observar duas retas de declive distinto, que traduzem as duas fases da deformação global da estrutura. A primeira fase devido à deformação axial das molas de compressão, enquanto numa segunda fase a deformação global é da responsabilidade da rigidez dos perfis metálicos da estrutura. Mais uma vez, o EE9 confere a exceção ao comportamento obtido nos demais ensaios, e no qual a conjugação entre molas de compressão com molas de tração foi suficiente para não ser atingida a deformação máxima das molas de compressão, traduzindo-se num comportamento global da estrutura linear.

Na Tabela 4.29 é apresentado um resumo com os valores dos deslocamentos obtidos nas três situações estudadas.

Tabela 4.29 - Resumo dos deslocamentos do comportamento estrutural (em mm).

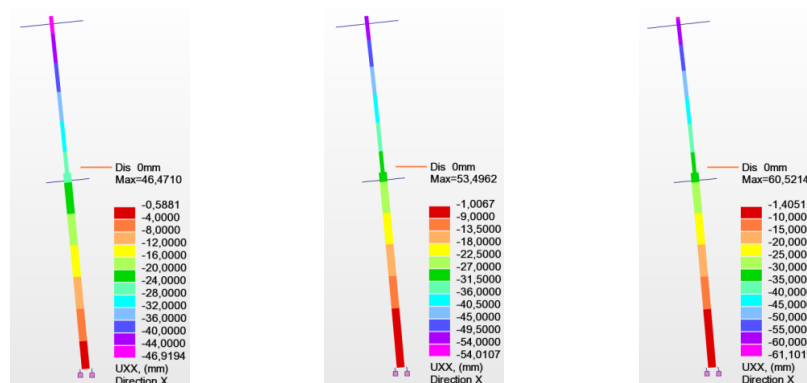
Ensaio	Carregamento	Força (N)	Real	Bilinear	Linear
EE2	1	22,2	45,520	45,300	45,265
	2	46,8	50,912	52,085	95,423
	3	71,4	56,664	58,869	145,581
EE3	1	22,2	41,055	41,722	40,975
	2	46,8	47,205	46,851	86,380
	3	71,4	52,265	51,981	131,785
EE4	1	22,2	84,507	84,235	84,056
	2	46,8	92,733	92,664	177,200
	3	71,4	100,628	101,093	270,343
EE8	1	22,2	40,487	37,091	36,915
	2	46,8	49,773	50,809	77,821
	3	71,4	55,575	57,452	118,727
EE9	1	22,2	8,264	9,517	8,450
	2	46,8	24,846	20,064	17,813
	3	71,4	30,886	30,610	27,176

As deformadas da estrutura associada a cada caso de carga, e também tendo em atenção as alterações de rigidez provocadas pela introdução de molas na estrutura, conforme os ensaios realizados, são apresentadas nas Figura 4.10 a Figura 4.14. As deformadas que se seguem correspondem aos ensaios identificados no Capítulo 3, encontrando-se no Anexo VIII – Análise Estática do Modelo de Elementos Finitos de Casca a informação referente a todos os ensaios simulados.



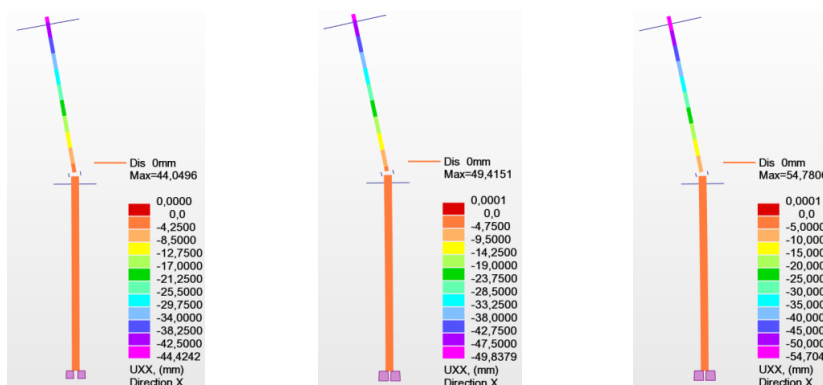
a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura 4.10 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE1 (em mm).



a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura 4.11 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE2 (em mm).



a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura 4.12 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE3 (em mm).

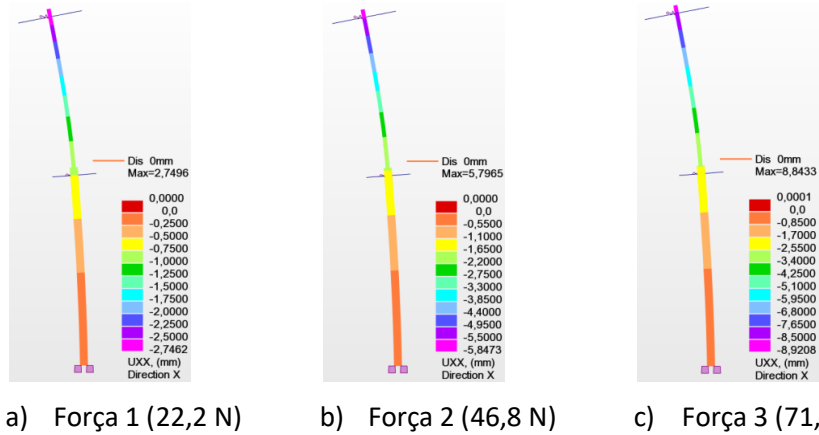


Figura 4.13 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE7 (em mm).

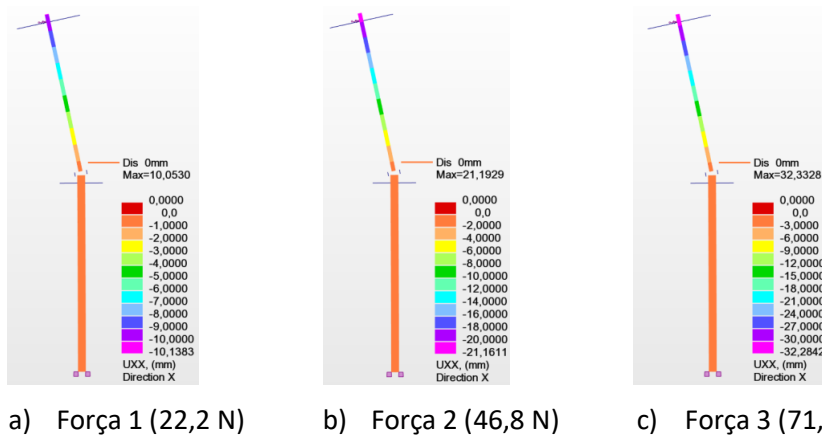


Figura 4.14 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE9 (em mm).

4.4.1.2 Extensões no modelo numérico de casca

Para a determinação das extensões a partir do modelo numérico, é feita a análise dos diagramas de tensões instaladas na estrutura em todos os casos ensaiados. Do programa de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017* são retiradas as tensões na direção Y (sYY) do referencial local, coincidentes com a direção longitudinal dos perfis.

É utilizado o mesmo método do modelo numérico de barras para a conversão das tensões obtidas em extensões, baseado na aplicação da lei de Hooke, conforme exposto na expressão 4.1. As Tabela 4.30 a Tabela 4.33 resumem os valores das tensões, nos ensaios analisados no capítulo anterior, correspondentes às secções instrumentadas com extensómetros de resistência elétrica. O Anexo VIII apresenta a totalidade dos resultados encontrados.

Tabela 4.30 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-31,8	31,8	-47,0	47,0
2	46,8	-67,1	67,1	-99,0	99,0
3	71,4	-102,2	102,2	-151,1	151,1

Tabela 4.31 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-31,5	31,5	-46,3	46,3
2	46,8	-66,5	66,4	-97,6	97,6
3	71,4	-101,3	101,3	-148,9	148,9

Tabela 4.32 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-24,5	24,5	-41,7	41,7
2	46,8	-51,7	51,7	-88,0	88,0
3	71,4	-82,9	82,9	-139,0	139,0

Tabela 4.33 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-24,2	24,2	-46,6	46,6
2	46,8	-54,5	54,5	-98,3	98,3
3	71,4	-86,1	86,1	-150,0	150,0

4.4.1.3 Rotações no modelo numérico de casca

O estudo das rotações é feito em torno do X (Rxx) do modelo numérico, correspondente à direção do movimento da estrutura devido às cargas aplicadas. Nas Tabela 4.34 a Tabela 4.38 surgem os valores das rotações, nas secções onde foram aplicados inclinómetros no modelo físico, retirados da análise do modelo numérico que simulam os ensaios anteriormente mencionados. A consulta completa da análise das rotações nos modelos numéricos de casca pode ser feita no Anexo VII.

Tabela 4.34 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE1 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-87,7	-204,1
2	46,8	-184,8	-430,3
3	71,4	-282,0	-656,5

Tabela 4.35 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE2 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-1441,3	-1557,2
2	46,8	-1630,3	-1875,4
3	71,4	-1819,1	-2193,7

Tabela 4.36 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE3 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-89,3	-3049,7
2	46,8	-188,2	-3360,7
3	71,4	-287,1	-3671,7

Tabela 4.37 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE7 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-69,6	-173,2
2	46,8	-146,8	-365,3
3	71,4	-223,9	-57,2

Tabela 4.38 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE9 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-18,4	-700,6
2	46,8	-38,8	-1476,9
3	71,4	-59,2	-2253,2

4.4.2 Análise modal

O procedimento utilizado na análise modal do modelo numérico de elementos finitos de casca é semelhante ao utilizado no modelo apresentado anteriormente. Posto isto, em seguida são apresentados os resultados da análise modal do modelo de casca.

4.4.2.1 Massas no nível 1

Nas tabelas que se seguem (Tabela 4.39 a Tabela 4.43) são resumidos os modos de vibração, a partir da análise das frequências naturais, para os ensaios dinâmicos usados para descrever o comportamento dinâmico da estrutura onde apenas é aplicada massa no nível 1. A informação exposta fica completa com a consulta do Anexo IV – Análise Modal do Modelo Numérico de Elementos Finitos de Casca.

Os modos de vibração apresentados esboçam a flexão da estrutura segundo o eixo dos YY, que coincidem com a direção em torno da qual a estrutura está a vibrar. São apresentados os dois primeiros modos obtidos na direção do movimento.

Tabela 4.39 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	7,59	0,13
2	23,32	0,04

Tabela 4.40 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,60	0,63
2	17,58	0,06

Tabela 4.41 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,59	0,39
2	11,75	0,09

Tabela 4.42 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	7,91	0,13
2	23,49	0,04

Tabela 4.43 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,78	0,56
2	17,59	0,06

4.4.2.2 Massas no nível 2

As Tabela 4.44 a Tabela 4.48 expõem os valores das frequências de vibração dos modos identificados, simulando os ensaios dinâmicos analisados no Capítulo 3, quando consideradas massas adicionais apenas no nível 2. A consulta completa dos dados pode ser feita no Anexo IV.

Tabela 4.44 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,49	0,22
2	33,64	0,03

Tabela 4.45 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,15	0,87
2	19,63	0,05

Tabela 4.46 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	20,67	0,05

Tabela 4.47 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,63	0,22
2	31,19	0,03

Tabela 4.48 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,27	0,79
2	19,68	0,05

4.4.2.3 Massas nos dois níveis

As seguintes tabelas (Tabela 4.49 a Tabela 4.53) apresentam um resumo das frequências naturais dos modos de vibração para os ensaios dinâmicos estudados, encontrando-se a informação completa no Anexo IX da presente dissertação.

Tabela 4.49 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,34	0,23
2	19,98	0,05

Tabela 4.50 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,05	0,95
2	13,61	0,07

Tabela 4.51 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	9,61	0,10

Tabela 4.52 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,49	0,22
2	20,27	0,05

Tabela 4.53 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,17	0,85
2	13,64	0,07

4.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Uma das vantagens que a análise do comportamento e das características de uma estrutura quando submetida a ações de ordem estática ou dinâmica oferece é a comparação com modelos numéricos, particularmente, com modelos de elementos finitos. Esta comparação assume interesse para proceder a modificações com o intuito de calibrar os modelos numéricos, de tal forma que as propriedades e características calculadas sejam o mais próximo possível das características identificadas experimentalmente. Estas comparações auxiliam no ajuste dos modelos analíticos, de modo a obter maior confiança na avaliação da resposta real das estruturas.

Em seguida é feita a comparação entre os valores obtidos pelos modelos de barras e de casca, e também os obtidos experimentalmente. As questões resultantes da compatibilização dos resultados experimentais com os resultados numéricos serão alvo de escrutínio, de modo a justificar os ajustes a cada um dos modelos.

4.5.1 Comparação entre o modelo de barras e o modelo de casca

Os resultados apresentados em pontos anteriores deste capítulo, quando comparados com os valores apresentados no Capítulo 3, obtidos experimentalmente, constata-se a existência de algumas diferenças entre os valores obtidos pelo modelo numérico de barras, quando confrontados com o modelo de elementos finitos de casca.

4.5.1.1 Comparação relativa à análise estática

Os gráficos (Figura 4.15 a Figura 4.19) que se seguem ilustram a comparação realizada entre o modelo numérico de barras e o modelo de elementos finitos de casca. A comparação apresentada de seguida é a

referente aos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2, secção onde se observam os deslocamentos superiores. São apresentadas as comparações para os ensaios analisados no Capítulo 3, sendo a informação completa exposta no Anexo X – Comparação de Resultados.

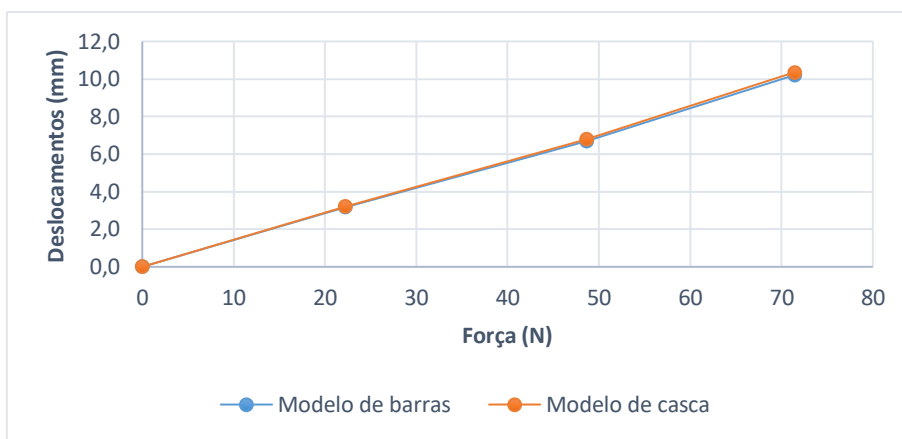


Figura 4.15 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE1.

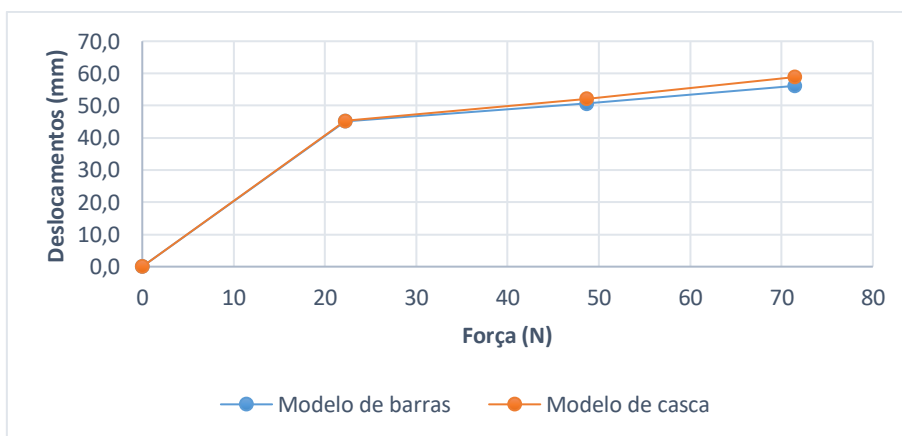


Figura 4.16 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE2.

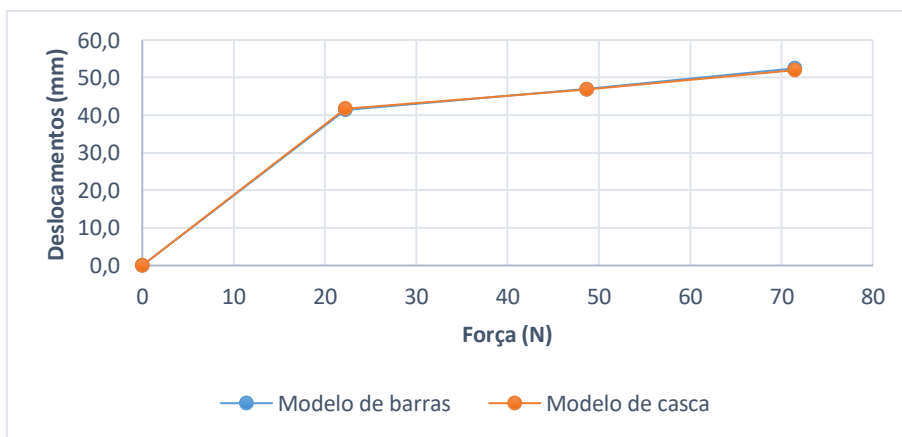


Figura 4.17 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE3.

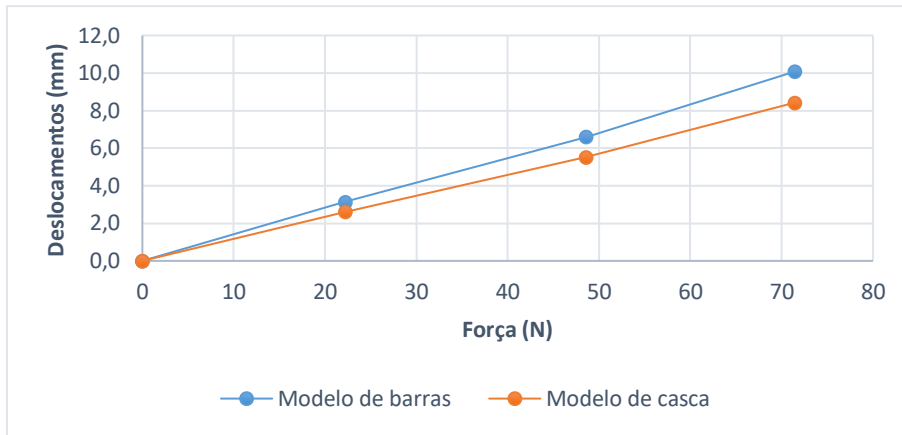


Figura 4.18 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE7.

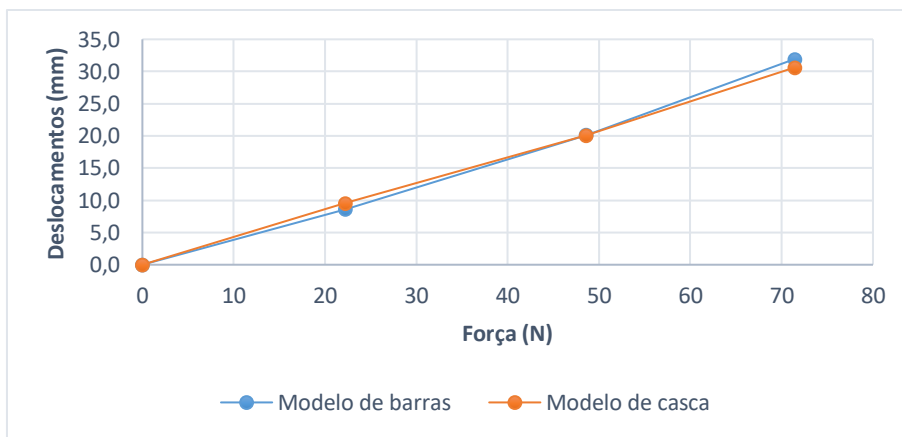


Figura 4.19 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE9.

Através da análise dos deslocamentos é possível observar desvios entre os dois modelos. O motivo dos desvios observados está relacionado com as condições de apoio da estrutura. No modelo de barras é considerado um encastramento que não ilustra verdadeiramente a realidade, devido às rotações que ocorrem devido à deformação da chapa de apoio. No modelo de casca a ligação à base é simulada através de quatro encastramentos, que são colocados na posição geométrica coincidente com a ligação dos quatro parafusos à estrutura de reação.

Também as alterações de rigidez introduzidas nos modelos, que pretendem simular a introdução de molas influenciam os desvios observados, sendo que nos casos onde existe a simulação de molas o desvio é atenuado com o ajuste da rigidez atribuída ao elemento onde se simula a existência da mola.

As Figura 4.20 a Figura 4.23 representam graficamente a comparação das extensões dos ensaios analisados no Capítulo 3. Para esta comparação foram selecionados os extensómetros submetidos à tração do nível 0, onde se observam as maiores extensões.

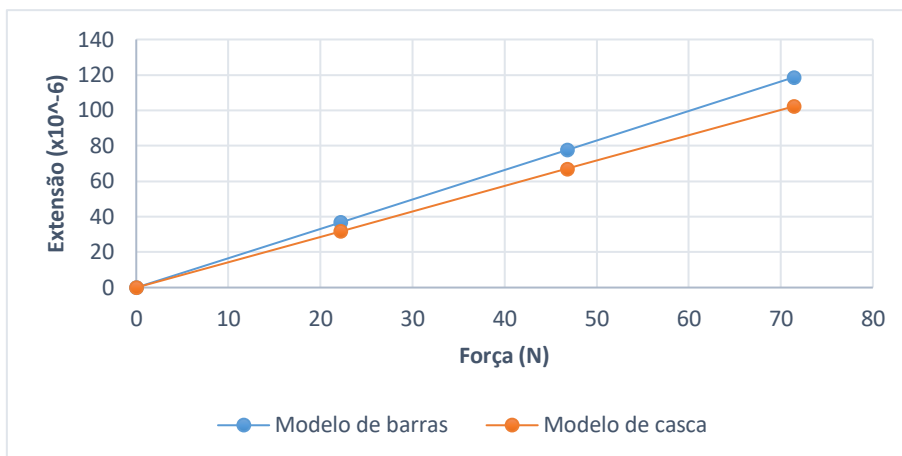


Figura 4.20 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE1.

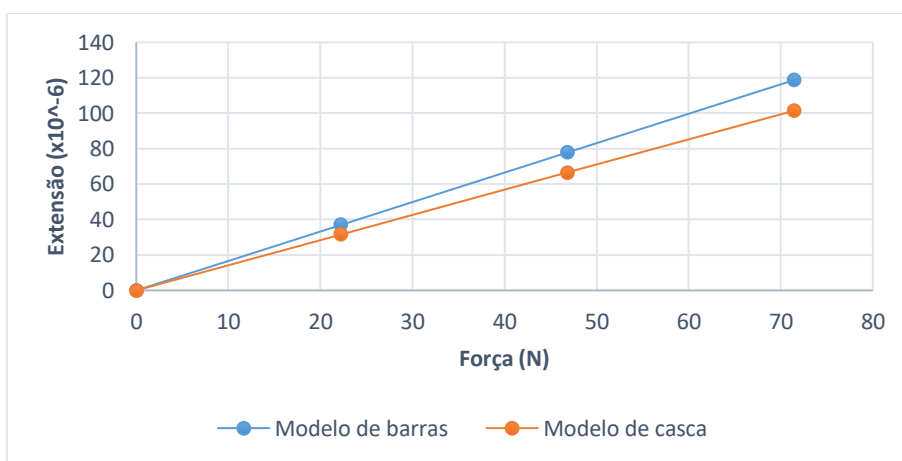


Figura 4.21 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE4.

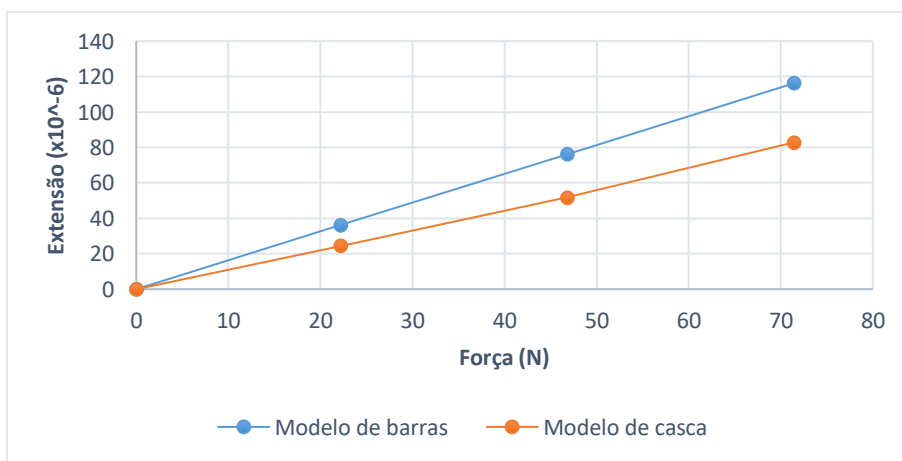


Figura 4.22 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE7.

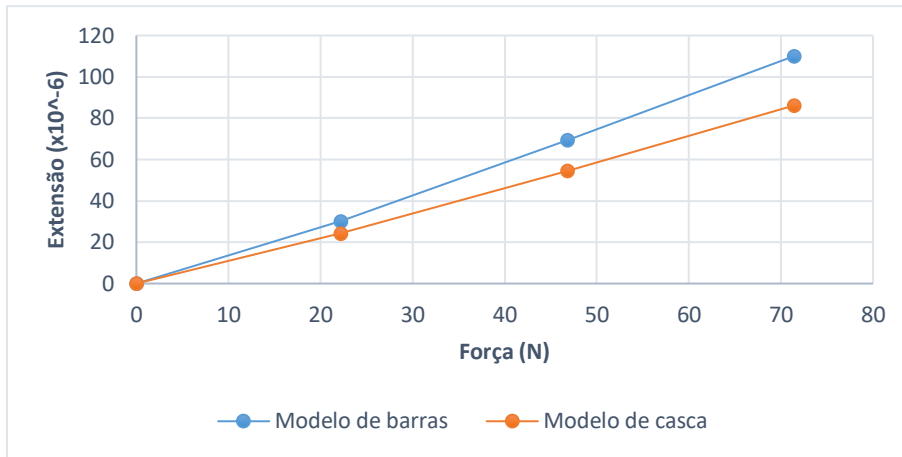


Figura 4.23 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensómetro E-N0-2 no EE8.

No que respeita à comparação dos valores das extensões obtidas nos modelos, é possível verificar que apresentam discrepâncias relativamente baixas. Pode então dizer-se que mesmo existindo incoerências relativamente às condições de apoio, este aspecto não influencia muito as extensões obtidas. Nem mesmo as várias simulações de alteração de rigidez introduzem uma influência muito grande nas extensões obtidas.

Para finalizar a comparação dos resultados relativa à componente estática, as Figura 4.24 a Figura 4.28 ilustram a comparação das rotações entre modelos numéricos. Para esta fase foram seleccionados os dados que se referem aos ensaios estudados no capítulo anterior. A comparação dos valores das rotações é feita nos inclinómetros do nível 2, onde foi possível observar as maiores rotações.

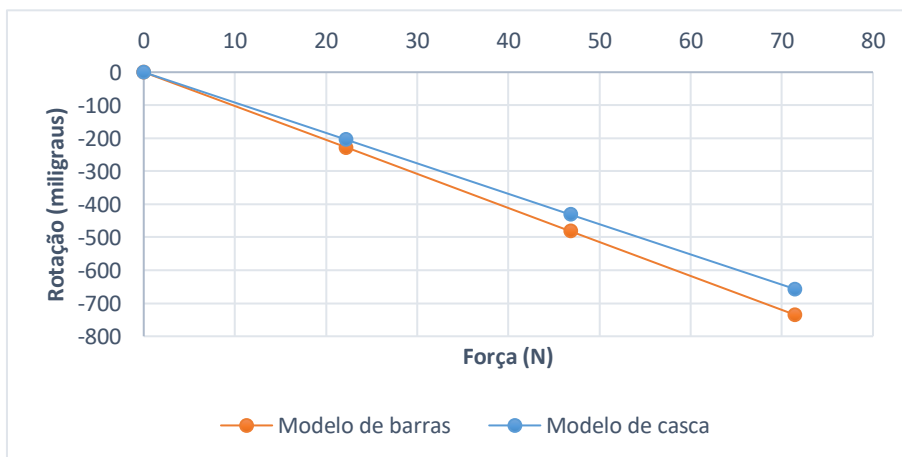


Figura 4.24 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE1.

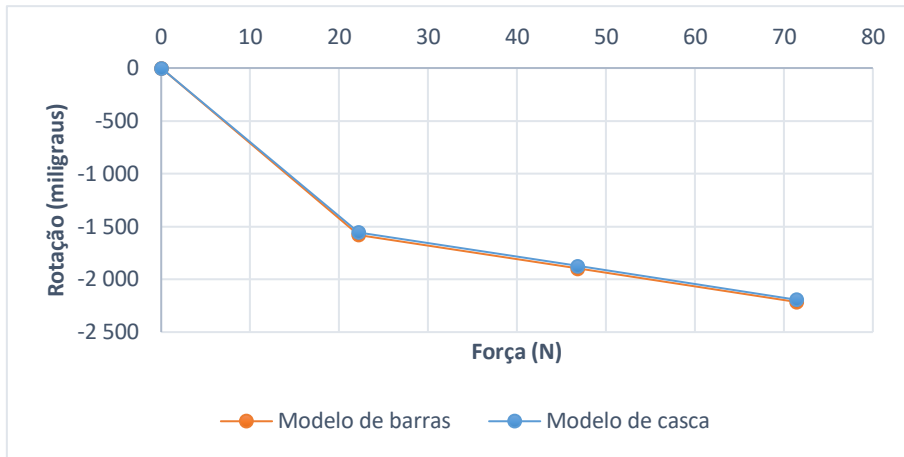


Figura 4.25 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE2.

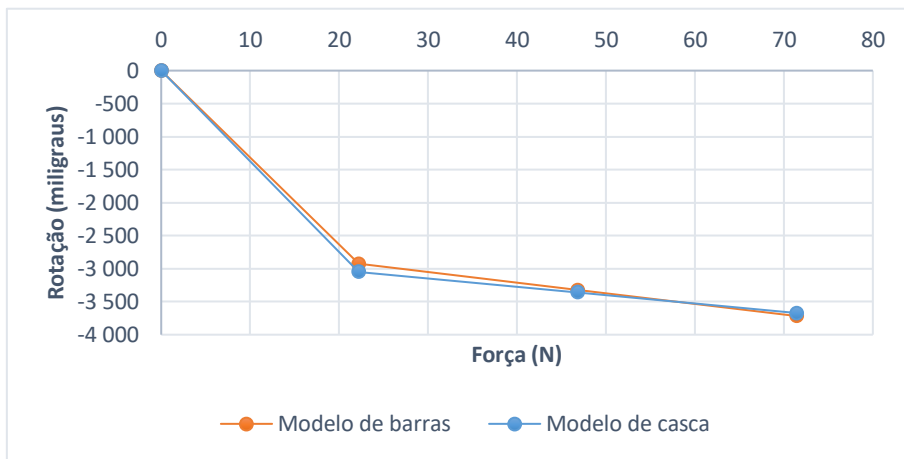


Figura 4.26 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE3.

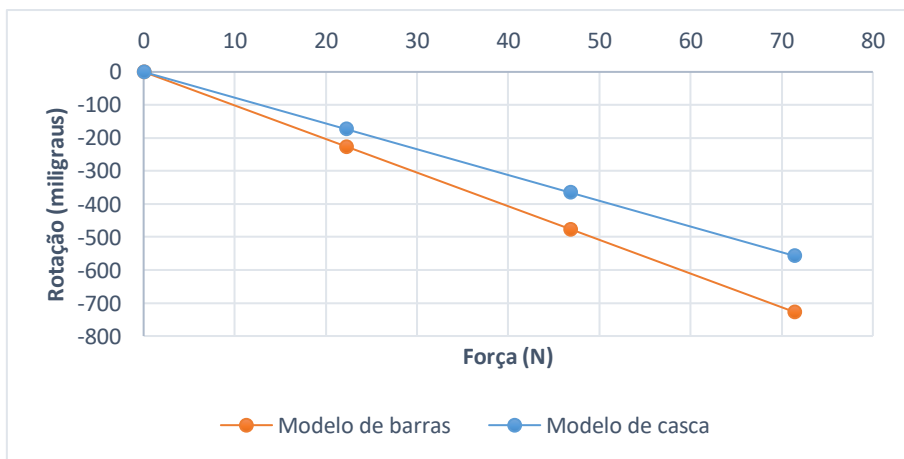


Figura 4.27 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE7.

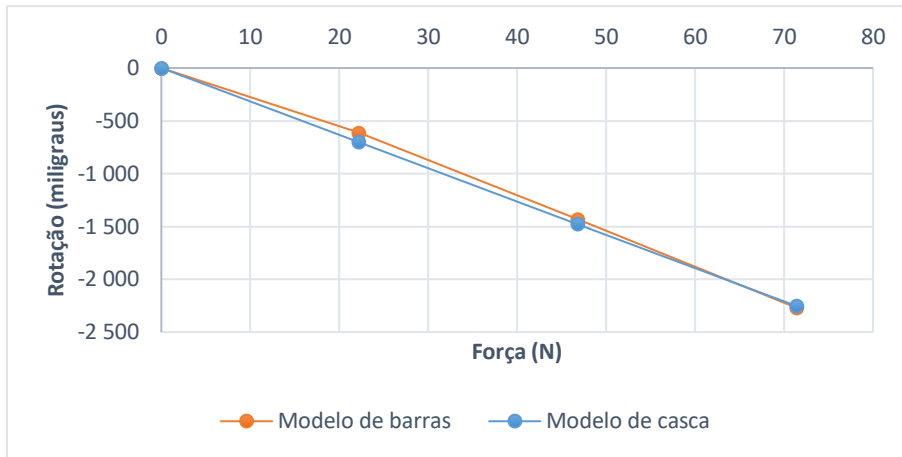


Figura 4.28 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE9.

Analisando cuidadosamente os resultados até este ponto apresentados, para todas as grandezas calculadas através dos dois modelos desenvolvidos, na componente estática, é possível identificar alguma diferenças entre eles. Tendo em consideração os deslocamentos e as rotações, conclui-se que o modelo de barras é mais rígido em relação ao modelo de casca. As diferenças observadas justificam-se com as condições de apoio consideradas em cada um dos modelos. No modelo de barras considera-se um encastramento perfeito, não havendo assim rotações na base da estrutura, ao passo que no modelo de elementos finitos de casca utiliza-se quatro apoios de encastramento, que estando ligados à chapa de base da estrutura originam a deformação da mesma, tornando assim a estrutura mais flexível.

Importa salientar que as alterações de rigidez simuladas, resultantes da aplicação de molas na estrutura também desempenham um papel influente nos resultados observados, mas não alteram a rigidez da própria estrutura conferida pelos dois perfis que constituem a estrutura. A influência das molas utilizadas faz-se sentir pontualmente, ou seja, apenas nos nós de ligação, entre perfis e do perfil à base de reação.

4.5.1.2 Comparação relativa à análise modal

As tabelas (Tabela 4.54 a Tabela 4.58) que se seguem expõem a comparação dos valores obtidos da análise modal. Para este ponto foram selecionados os ensaios, analisados no capítulo anterior, onde são aplicadas as massas complementares no nível 1. No Anexo X é possível consultar todas as comparações feitas nesta componente.

Tabela 4.54 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED1.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	8,07	7,59	-0,48	-6
2º	22,27	23,32	1,05	5

Tabela 4.55 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED2.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,59	1,60	0,01	1
2º	17,63	17,58	-0,05	0

Tabela 4.56 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED3.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,55	2,59	0,04	2
2º	13,91	11,75	-2,16	-18

Tabela 4.57 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED5.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	8,11	7,91	-0,20	-3
2º	22,31	23,49	1,18	5

Tabela 4.58 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED8.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,76	1,78	0,02	1
2º	17,64	17,59	-0,05	0

Os resultados da análise modal apresentam disparidades relevantes, nomeadamente nas frequências mais elevadas. Conforme referido anteriormente, considera-se que o erro observado pode ser resultante das diferentes condições de apoio modeladas na estrutura. A maior deformabilidade do modelo de casca quando comparado com o modelo de barras, decorrente da introdução da chapa de ligação à estrutura de reação tem influência na rigidez global da estrutura e por conseguinte nos modos de vibração. A simulação da introdução de molas na estrutura acentua um pouco este facto, pela circunstância das molas influenciarem a rigidez global da estrutura.

4.5.2 Comparação dos resultados experimentais com o modelo de barras

4.5.2.1 Resultados do ensaio estático

Nos pontos que se seguem é feita a comparação dos resultados referentes aos deslocamentos experimentais e do modelo numérico de barras. É importante recordar que que a componente estática consiste na submissão da estrutura a ciclos de carga e descarga.

As figuras seguintes (Figura 4.29 a Figura 4.33) ilustram graficamente a comparação entre a via experimental e o modelo numérico de barras. Foi selecionada a comparação para a secção do nível, onde se obtêm os maiores deslocamentos dos ensaios.

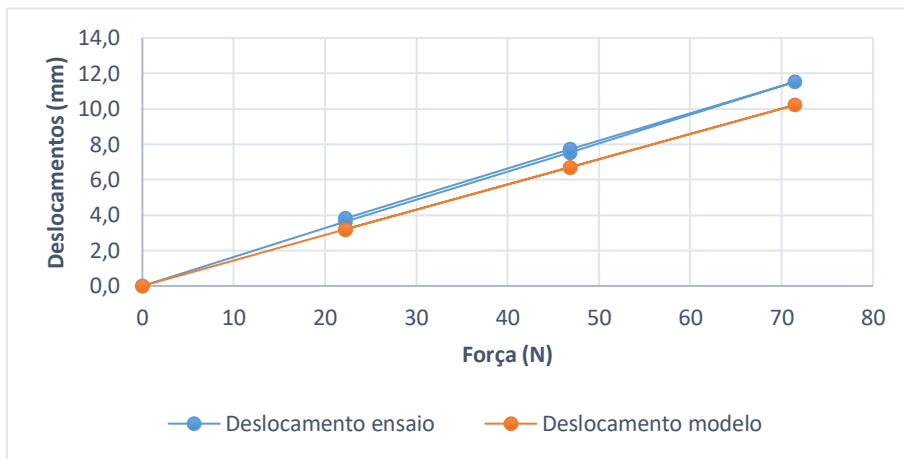


Figura 4.29 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE1.

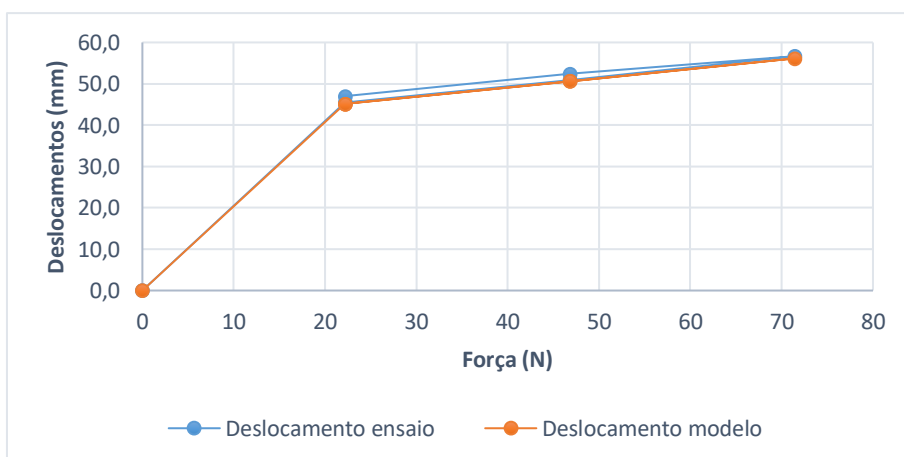


Figura 4.30 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE2.

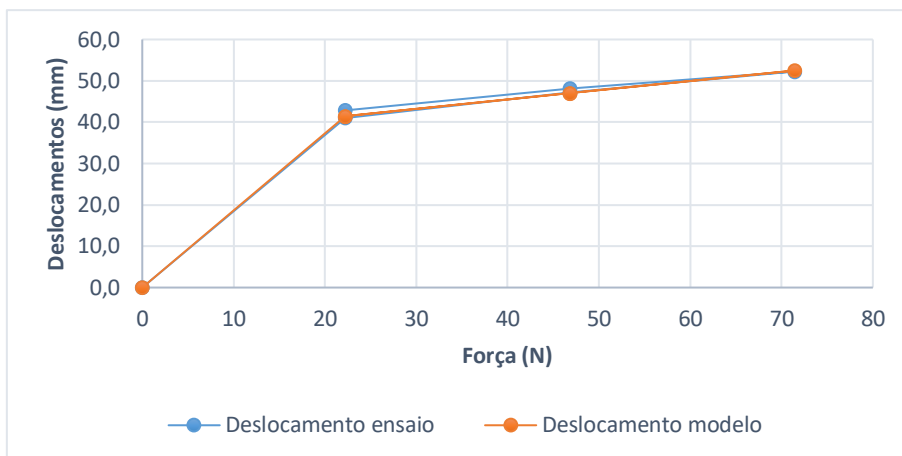


Figura 4.31 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE3.

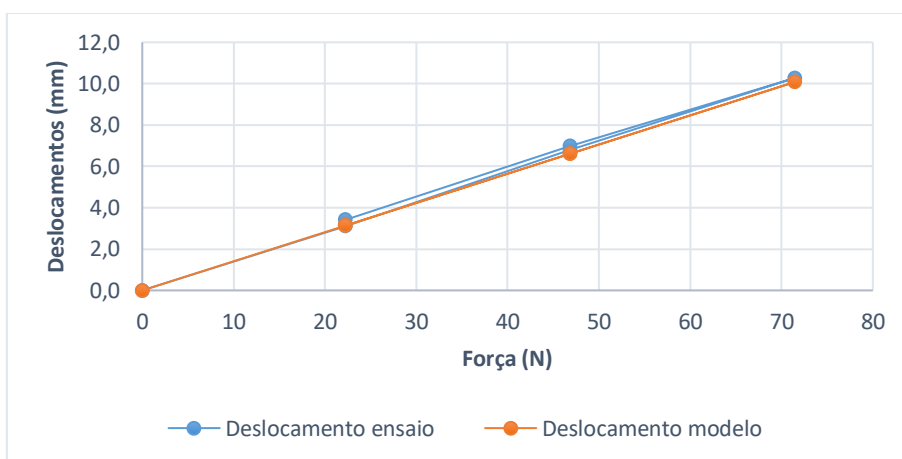


Figura 4.32 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE7.

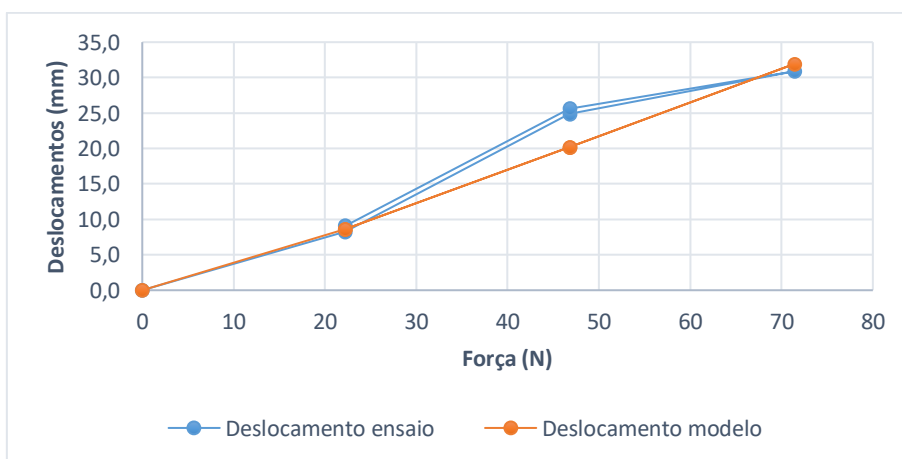


Figura 4.33 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE9.

A evolução dos deslocamentos, que é possível observar na Figura 4.33, deve-se à conjugação de molas de compressão com molas de tração. O facto de as molas de tração não permitirem que se atinja a deformação máxima das molas de tração resulta num gráfico que não é linear, e que se deve

exclusivamente à deformação das molas de compressão. Este comportamento está relacionado com o facto da relação dos pesos introduzidos não ser linear. O segundo carregamento introduzido é aproximadamente o dobro do primeiro, ao passo que o terceiro carregamento não é o dobro do segundo, resultando numa introdução não linear das cargas.

Como é possível observar obteve-se uma aproximação significativa entre os valores obtidos pela via experimental e os obtidos através do modelo numérico de barras. Na generalidade dos casos os deslocamentos medidos experimentalmente são superiores aos obtidos através do modelo.

As Figura 4.34 a Figura 4.37 apresentam os gráficos das comparações feitas, nos extensómetros submetidos a compressões, no nível 0, onde se verificam as maiores extensões dos ensaios. As comparações expostas são as que se referem aos ensaios alvos de análise no Capítulo 3 desta dissertação, sendo possível consultar todas as comparações executadas para esta fase do trabalho no anexo.

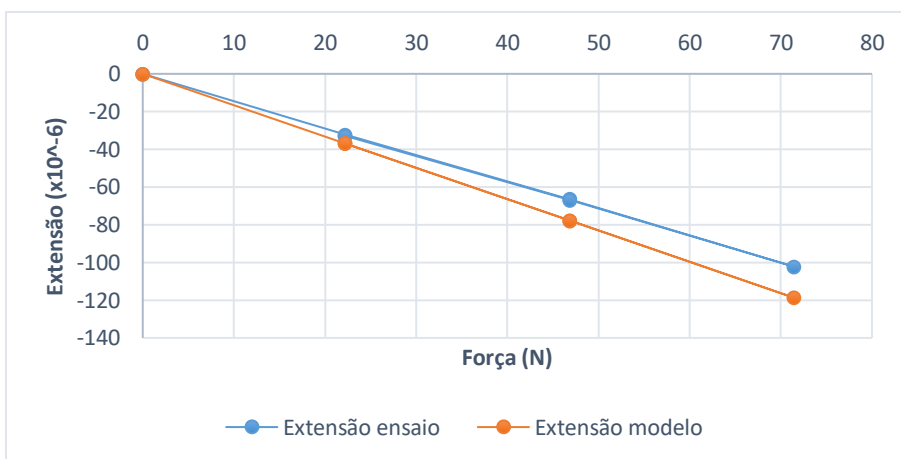


Figura 4.34 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE1.

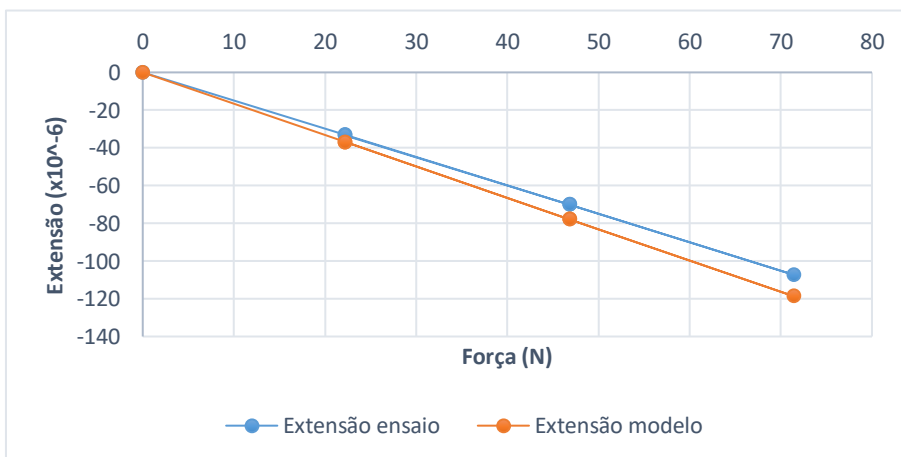


Figura 4.35 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE4.

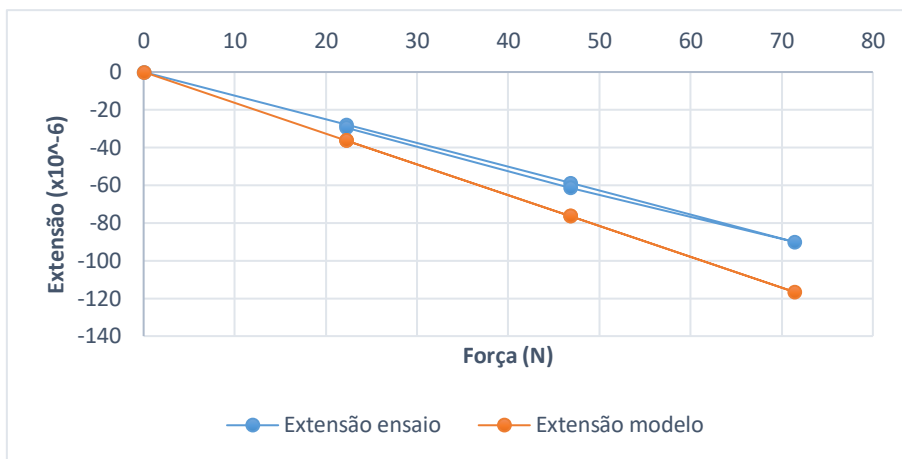


Figura 4.36 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE7.

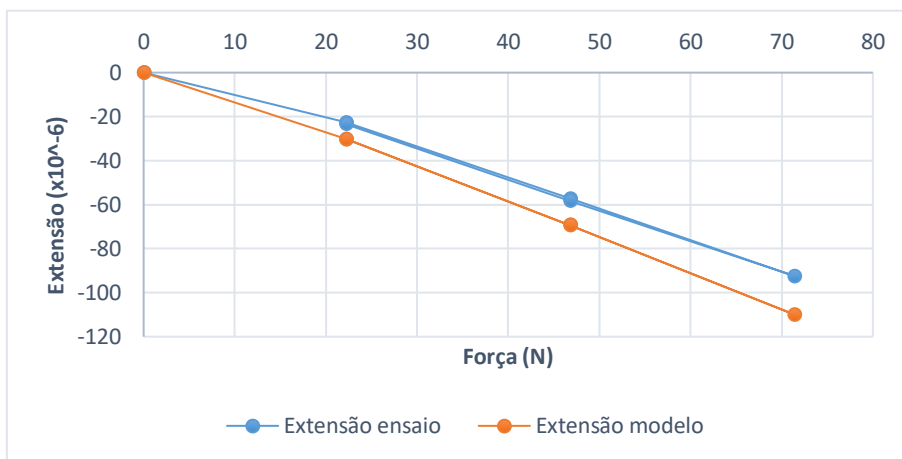


Figura 4.37 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE8.

Da análise comparativa dos resultados das extensões, é possível observar um erro, que no geral sendo superiores ao expectável, pode ser considerado como aceitável. Também acontece que os extensómetros comprimidos, apresentam um diferencial menor que os extensómetros tracionados.

Por último, nas Figura 4.38 a Figura 4.42 ilustram a representação gráfica da evolução das rotações nos ensaios analisados anteriormente. Foi selecionada a comparação das rotações medidas no inclinómetro aplicado no nível 2, secção onde se observam as rotações mais elevadas.

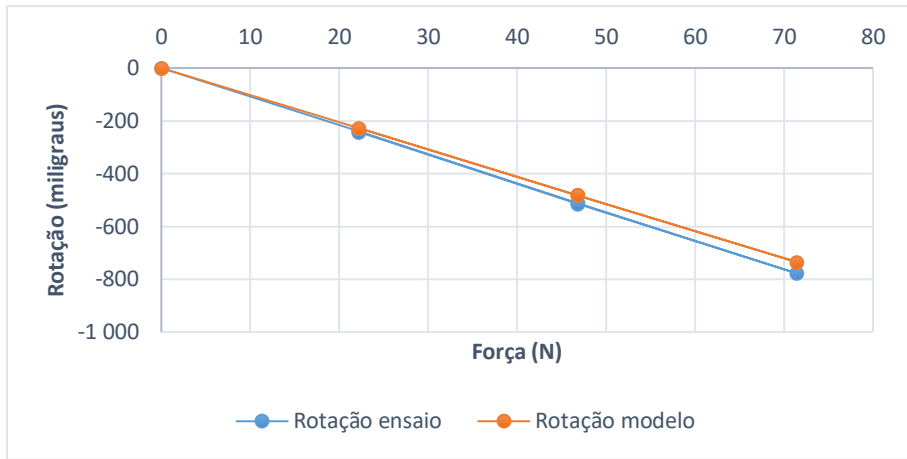


Figura 4.38 - Força vs rotações do I-N2 no EE1.

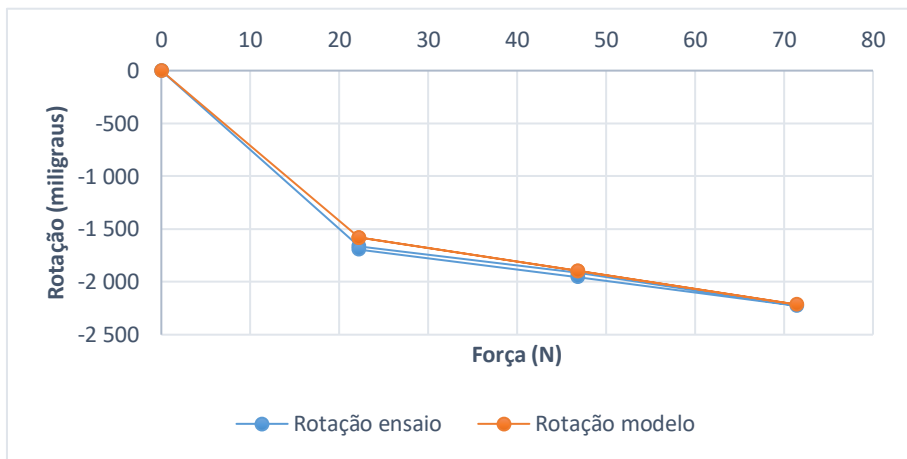


Figura 4.39 - Força vs rotações do I-N2 no EE2.

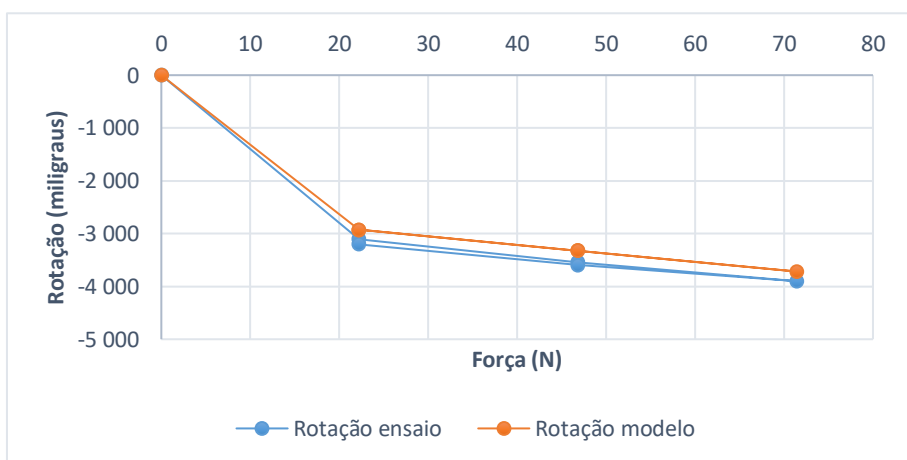


Figura 4.40 - Força vs rotações do I-N2 no EE3.

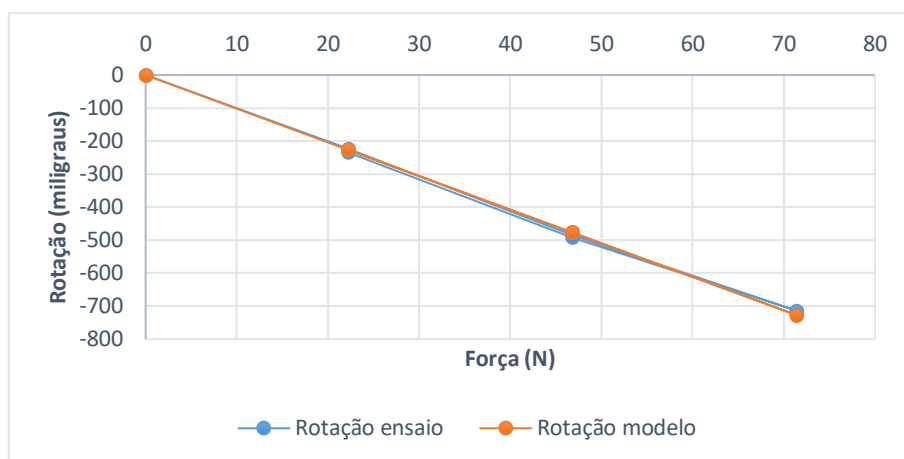


Figura 4.41 - Força vs rotações do I-N2 no EE7.

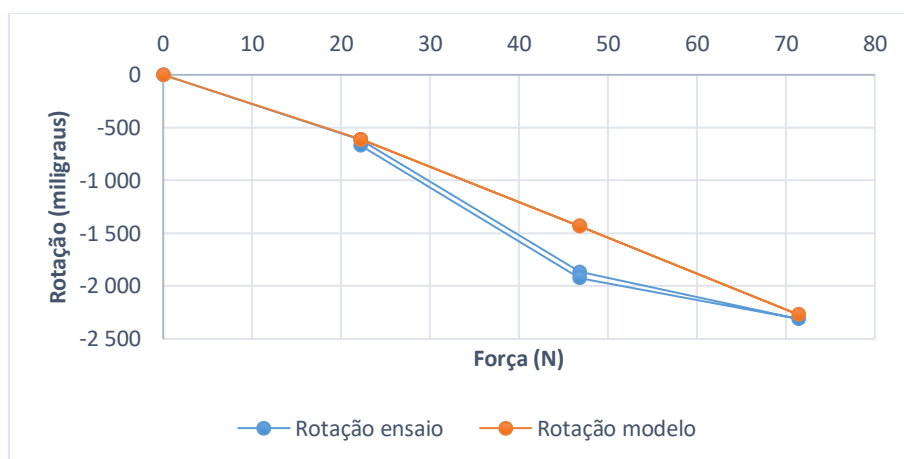


Figura 4.42 - Força vs rotações do I-N2 no EE9.

A evolução das rotações observadas no EE9 (consultar Figura 4.42) segue o verificado para os deslocamentos, onde a não linearidade das cargas aplicadas se traduz numa não linearidade das extensões obtidas no ensaio.

A análise das comparações referentes aos valores experimentais com os do modelo de barra conclui que existe uma discrepância significativamente baixa entre os mesmos, tendo em consideração a unidade em que são apresentados os valores. Os diferenciais observados estão em concordância com o que se verifica nos deslocamentos apresentados.

4.5.2.2 Resultados da análise modal

Os resultados dos ensaios dinâmicos são obtidos através da medição da resposta às acelerações impostas na estrutura, devido ao impulso que lhe é aplicado, e que permite a avaliação das frequências naturais e dos respetivos modos de vibração.

A disposição dos acelerómetros uniaxiais na estrutura permite captar os dois primeiros modos de vibração na direção do impulso. Os acelerómetros A-N1 e A-N2 captam a frequência dos modos de vibração 1 e 2 coincidentes com o movimento da estrutura, isto porque a sua localização é coincidente com os nodos da estrutura, isto é, a deformada da estrutura passa exatamente pelos pontos onde são aplicados os acelerómetros, que dá origem a um ponto nulo ou de reduzida definição na leitura do sensor. Os sensores em questão não são capazes de captar qualquer modo de vibração perpendicular ao movimento da estrutura, devido ao facto de a deformada acontecer no sentido perpendicular ao movimento.

As Tabela 4.59 a Tabela 4.63 apresentam os valores das frequências identificadas experimentalmente para os dois primeiros modos de vibração no sentido do movimento, em comparação com os obtidos através do modelo de barras. A sequência em seguida apresentada respeita a sequência de realização dos ensaios dinâmicos apresentada anteriormente. Para a presente comparação foram selecionados os ensaios dinâmicos analisados, nos quais se considera a introdução de massas apenas no nível 2.

Tabela 4.59 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED1.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,15	4,54	-0,39	-9
2º	27,78	26,99	0,79	3

Tabela 4.60 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED2.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,88	1,13	-0,25	-28
2º	18,87	12,82	6,05	32

Tabela 4.61 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED3.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,83	1,26	-0,43	-52
2º	19,75	23,53	-3,78	-19

Tabela 4.62 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED5.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,27	4,56	-0,29	-7
2º	28,15	27,03	1,12	4

Tabela 4.63 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED8.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,25	1,41	53
2º	20,43	18,88	1,55	8

É possível observar, para a situação de massas adicional escolhida, dos resultados comparativos da análise dinâmica a proximidade significativa nas frequências obtidas. Na generalidade dos casos a frequência obtida experimentalmente é superior à do modelo, confirmando a maior rigidez do modelo de barras quando comparado com o modelo físico.

4.5.3 Comparação dos resultados experimentais com o modelo de casca

4.5.3.1 Resultados do ensaio estático

Nas Figura 4.43 a Figura 4.47 é feita representação gráfica da evolução dos deslocamentos calculados através do modelo de elementos finitos de casca comparativamente com os obtidos experimentalmente. Os valores dos gráficos apresentados correspondem aos deslocamentos dos ensaios cujo comportamento estático foi analisado no Capítulo 3. Os valores apresentados coincidem com os obtidos para o LVDT-N2, da secção onde se medem os maiores deslocamentos horizontais.

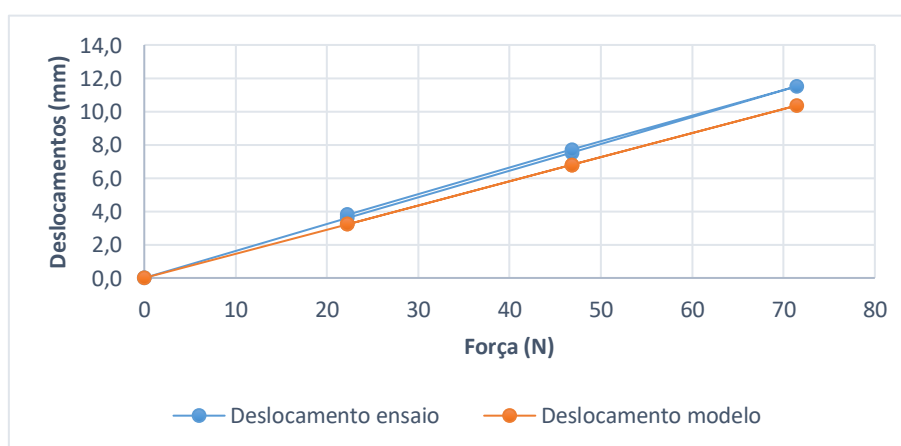


Figura 4.43 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE1.

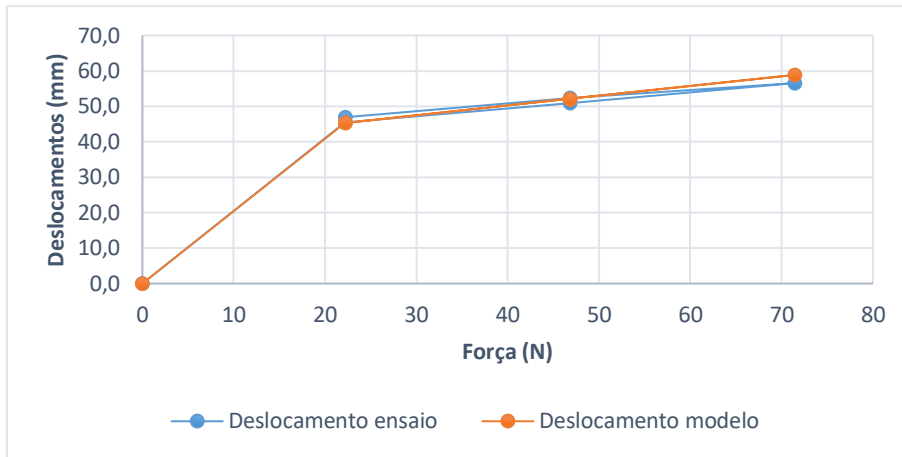


Figura 4.44 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE2.

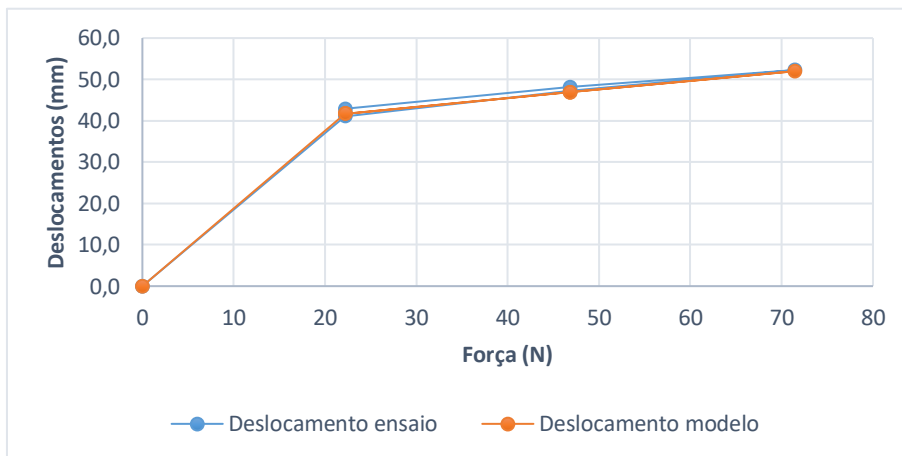


Figura 4.45 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE3.

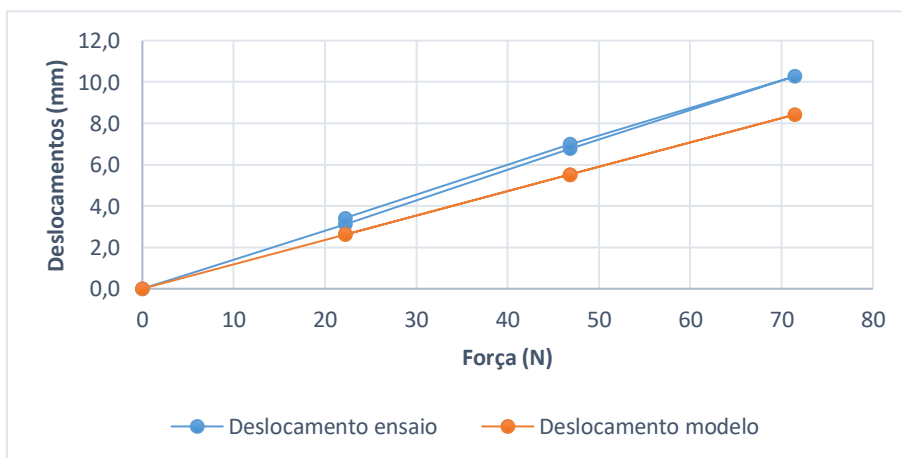


Figura 4.46 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE7.

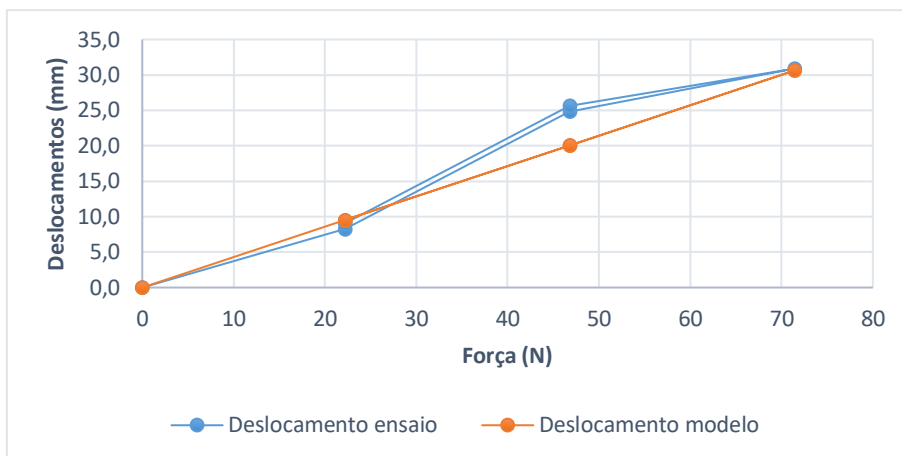


Figura 4.47 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE9.

Mais uma vez, é possível observar da análise da Figura 4.47 a influência da não linearidade das cargas introduzidas na resposta da estrutura.

Da abordagem comparativa realizada para os deslocamentos, é possível constatar que se obtiveram resultados bastante satisfatórios, dado que os diferenciais de deslocamentos obtidos entre a via experimental e o modelo de cascas são consideravelmente baixos. No entanto, é de salientar que nas descargas o diferencial aumenta ligeiramente. Este aumento pode ser relacionado com o atrito oferecido pela roldana onde passa o cabo de suspensão que suporta as cargas aplicadas. Este fenómeno é visível através das representações gráficas oferecidas. Na fase inicial de carregamento é visível que as retas praticamente se sobrepõem, ou seja, apresentam o mesmo declive, havendo um ligeiro desfasamento quando introduzidos o segundo e o terceiro patamar de carga.

A representação gráfica da comparação das extensões obtidas nos ensaios estudados é executada nas Figura 4.48 a Figura 4.51.

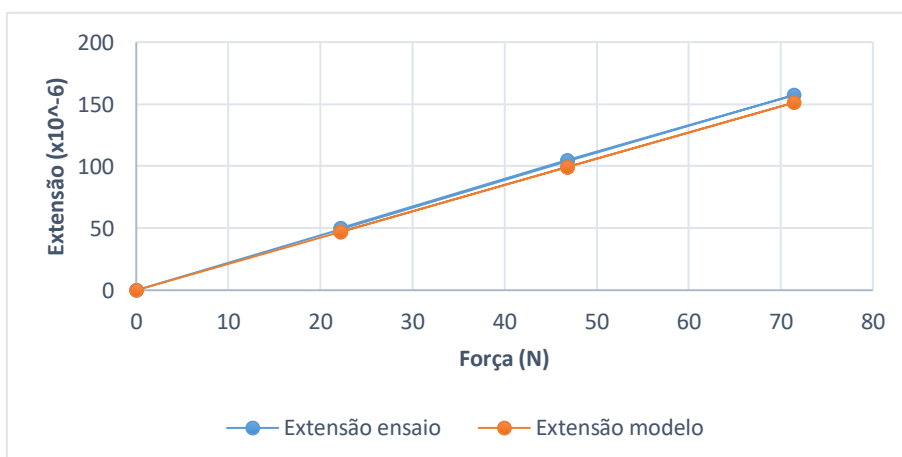


Figura 4.48 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE1.

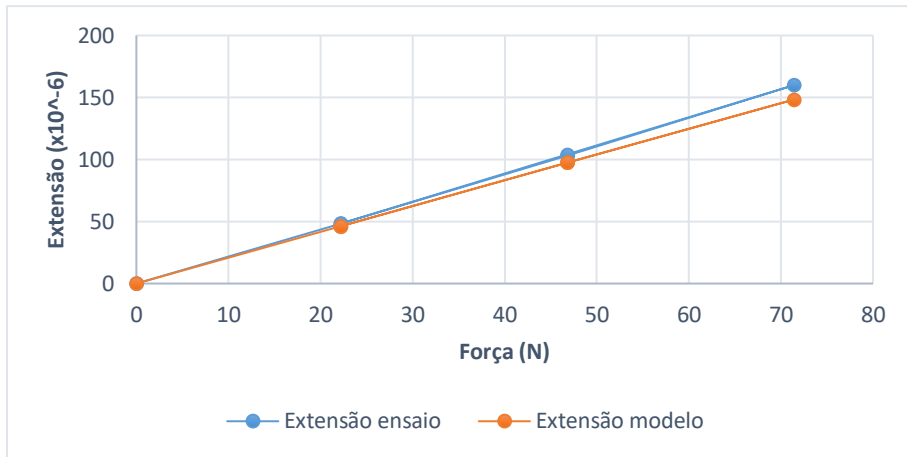


Figura 4.49 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE4.

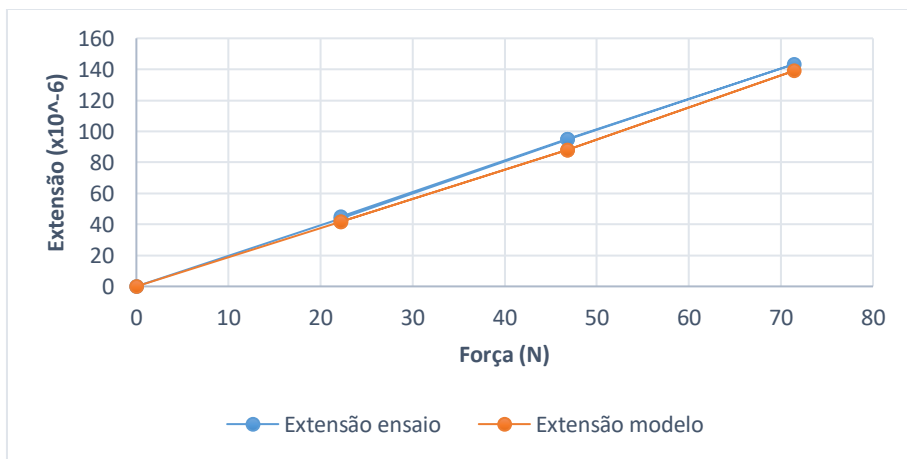


Figura 4.50 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE7.

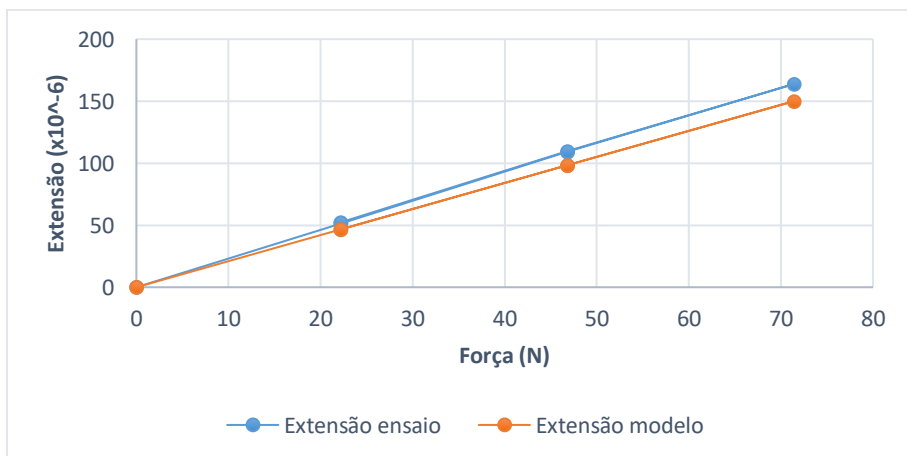


Figura 4.51 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE8.

Os resultados comparativos do modelo de casca em relação aos experimentais apresentam-se ligeiramente mais aproximados. Mais uma vez, é possível verificar que as extensões não se relacionam com a rigidez, mas sim com o momento atuante, em estruturas isostáticas.

Para finalizar, as Figura 4.52 a Figura 4.56 demonstram a representação gráfica da comparação das rotações para os ensaios estudados no capítulo anterior.

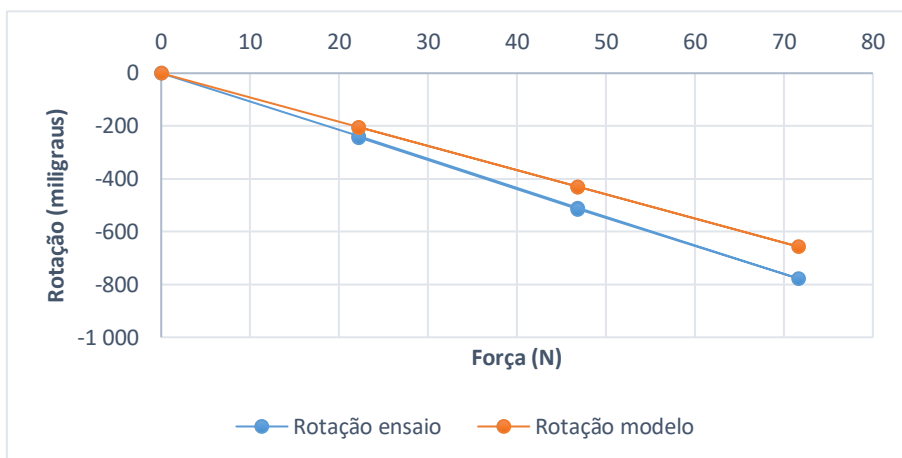


Figura 4.52 - Força vs rotação para I-N2 no EE1.

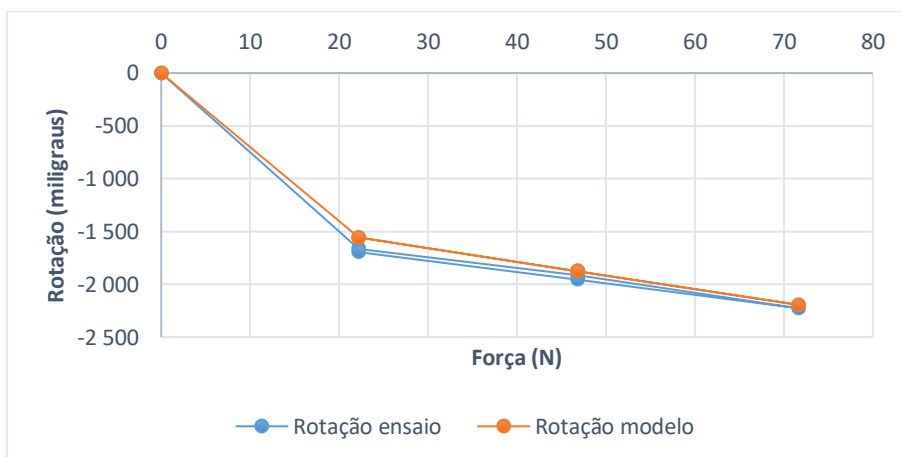


Figura 4.53 - Força vs rotação para I-N2 no EE2.

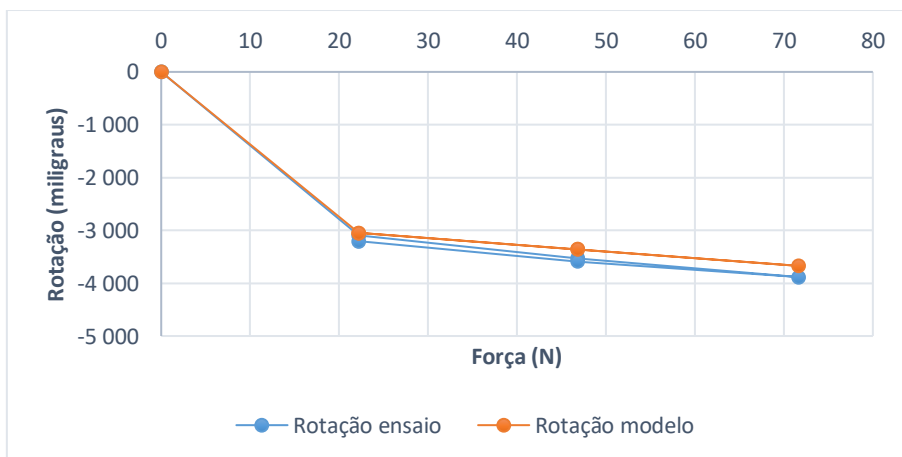


Figura 4.54 - Força vs rotação para I-N2 no EE3.

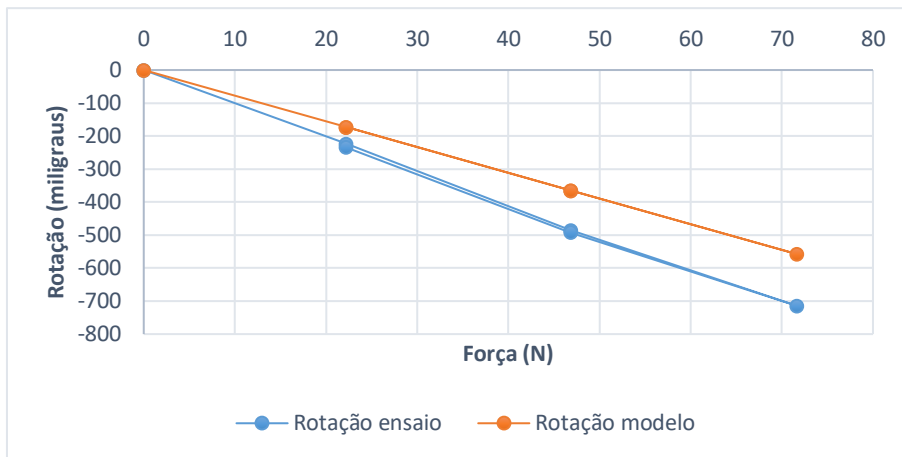


Figura 4.55 - Força vs rotação para I-N2 no EE7.

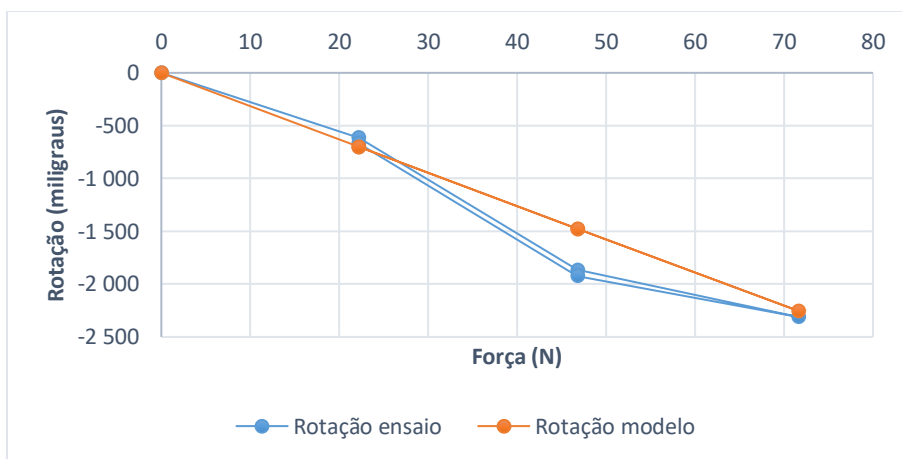


Figura 4.56 - Força vs rotação para I-N2 no EE9.

O desenvolvimento das rotações observado através da Figura 4.56 está de acordo com o descrito para o desenvolvimento dos deslocamentos, e verifica-se também a dependência do comportamento da estrutura face à não linearidade dos carregamentos aplicados.

À imagem do sucedido com os deslocamentos, os resultados comparativos das rotações apresentam uma aproximação bastante satisfatória. É possível concluir que, de certa forma, as rotações acompanham os deslocamentos.

4.5.3.2 Resultados da análise modal

No ponto que se segue, a partir dos ensaios dinâmicos realizados no modelo físico e da análise modal calculada no modelo de elementos finitos de casca, considerando diferentes configurações de massas adicionais nos níveis 1 e 2, procedeu-se à comparação das frequências dos modos de vibração identificados.

As Tabela 4.64 a Tabela 4.68 mostram os valores comparativos das frequências para os ensaios realizados e estudados no Capítulo 3, dos quais foram selecionados os que correspondem à aplicação de massas nos dois níveis da estrutura.

Tabela 4.64 - Valores comparativos de frequências naturais no ED1.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,05	4,34	-0,29	-7
2º	18,29	19,98	-1,69	-9

Tabela 4.65 - Valores comparativos de frequências naturais no ED2.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,93	1,05	0,88	46
2º	13,35	13,61	-0,26	-2

Tabela 4.66 - Valores comparativos de frequências naturais no ED3.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,90	1,26	-0,36	-40
2º	10,84	9,61	1,23	11

Tabela 4.67 - Valores comparativos de frequências naturais no ED5.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,25	4,49	-0,24	-6
2º	18,65	20,27	-1,62	-9

Tabela 4.68 - Valores comparativos de frequências naturais no ED8.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,17	1,49	24
2º	13,72	13,64	0,08	9

Os resultados da análise modal obtidos no modelo numérico de casca, quando comparados com as características dinâmicas experimentais, revelam uma redução do diferencial entre ambos, em relação ao modelo numérico de barras. A partir da análise destes resultados conclui-se que os modelos numéricos apresentam uma rigidez mais elevada quando comparados com o modelo físico.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do presente capítulo foram apresentadas duas metodologias distintas para a análise do comportamento estrutural, estático e dinâmico, do demonstrador em estudo. O primeiro método é um modelo numérico de barras, enquanto o segundo se trata de um modelo de elementos finitos de casca.

A utilização de ambos os modelos fornece resultados interessantes e que podem ser considerados satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais. Não obstante não ter obtido em nenhum dos casos os resultados exatos conforme os obtidos nos ensaios realizadas, é possível afirmar que as diferenças são reduzidas, as aproximações muito razoáveis, e assim concluir que as duas abordagens utilizadas são representativas da realidade.

Nos modelos realizados, de barras e de casca, foi também estudada a influência que as alterações de rigidez na estrutura, simulando a introdução de molas. Nesta componente é de realçar que, com as devidas calibrações nos modelos, os resultados que daí se obtêm se aproximam consideravelmente do comportamento que a estrutura apresentou nos ensaios realizados.

É de salientar que, após feita a análise detalhada dos valores obtidos, o modelo de elementos finitos de casca é que parece aproximar-se mais do comportamento real do modelo físico. Quando comparados os dois modelos, é de notar que algumas das simplificações inerentes ao modelo de barras fazem com que este se distancie um pouco da realidade, quando confrontado com o modelo de casca. Dentro das simplificações, merecem especial realce as que estão relacionadas com as condições de apoio, que conforme mencionado no decorrer deste capítulo, conferem maior rigidez ao modelo de barras do que ao modelo de casca.

O estudo do comportamento estrutural fornece informações importantes sobre as estruturas, e com resultados que se aproximam significativamente do comportamento real das estruturas. Pode então afirmar-se que os modelos de elementos finitos poderão ser muito eficientes e a sua utilização muito fiável, na avaliação do comportamento das estruturas.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

No decorrer dos últimos anos a monitorização da integridade estrutural tem sido um tema em constante progressão, e que aliado aos desenvolvimentos tecnológicos atuais, figura em diversas áreas da engenharia civil. Atualmente o interesse pela via experimental na avaliação do comportamento de estruturas, tem observado um intenso crescimento. O intuito da avaliação experimental é obter informação que possa ser útil na validação dos modelos numéricos, e também na caracterização global do estado das estruturas.

Um sistema de monitorização estrutural funcional permite a visualização e o tratamento de dados, a observação e a monitorização de estrutura, fornecendo informação importante para a uma melhor compreensão do comportamento das estruturas. A informação obtida através dos sistemas de monitorização estrutural, fazendo o acompanhamento ao longo do período de vida útil das estruturas permite uma manutenção eficiente e a deteção de eventuais danos, contribuindo decisivamente na preservação da segurança das estruturas.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação teve como principal objetivo o estudo de um modelo laboratorial para a monitorização estrutural, e que conta com um plano de monitorização onde se aplicam diversos sensores na estrutura que possuem a capacidade de a resposta da estrutura nas diversas situações impostas. Para a caracterização do comportamento da estrutura é realizada uma campanha de ensaios em ambiente laboratorial.

O trabalho realizado contribui decisivamente para o conhecimento das potencialidades dos sistemas de monitorização. Foi possível o contacto direto com a instrumentação de estruturas em contexto laboratorial. Este contacto foi importante para o conhecimento do funcionamento de alguns dos sensores e equipamentos de aquisição de dados que compõe um sistema de monitorização.

As grandezas identificadas com recurso ao sistema de monitorização permitiram recolher informação importante acerca do comportamento da estrutura analisada. Os resultados obtidos experimentalmente

foram utilizados no desenvolvimento de modelos numéricos. A abordagem utilizada permitiu uma melhor compreensão do funcionamento real das estruturas.

Foi observado também o comportamento da estrutura às alterações de rigidez, que no caso do trabalho presente foram conferidas através da introdução de molas. A introdução das molas na estrutura teve uma grande influência no comportamento da estrutura. Foi possível identificar que as molas introduzem na estrutura dois tipos de comportamento: (i) numa primeira fase condicionada à deformação das molas; (ii) e numa segunda fase, quando não é possível às molas deformarem-se mais, o comportamento é condicionado pela deformação dos elementos que constituem a estrutura.

As medições resultantes dos ensaios estáticos, nomeadamente ao nível dos deslocamentos, extensões e rotações, foram importantes na compreensão e identificação das características mecânicas da estrutura.

Os ensaios realizados através da introdução de cargas e descargas, permitiram observar que a estrutura responde em regime elástico voltando à sua posição inicial. Este comportamento foi também observado quando aplicadas as molas no modelo físico. As ligeiras diferenças que se observaram, em fases sucessivas de carga e descarga, foram causadas pelo atrito inerente aos equipamentos auxiliares, nomeadamente o provocado pelos sensores utilizados e também pela roldana.

Através dos ensaios dinâmicos é possível avaliar a rigidez global da estrutura, apoiada na caracterização das frequências próprias e nos deslocamentos modais. Os ensaios dinâmicos deixam pistas quanto à necessidade de uma calibração eficaz dos modelos numéricos, dado que se apresentam significativamente mais rígidos do que o modelo físico, em grande parte devido às condições de apoio.

Outro aspeto que merece realce são os sistemas de aquisição de visualização e tratamento de dados. Estes promovem a agilidade na realização dos ensaios e na extração de conclusões sobre os valores obtidos.

Com estes trabalhos é possível concluir sobre a adequabilidade dos sistemas de monitorização. Estes sistemas produzem resultados considerados relevante e fiáveis quanto ao comportamento das estruturas. A comparação com modelos de elementos finitos promove a confiança nos resultados que se extraem através dos sistemas de monitorização, e dão suporte a uma análise mais detalhada do comportamento estrutural.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho, foi estudado o comportamento de uma estrutura sujeita a várias condicionantes estruturais, que são conferidas pelas mudanças de rigidez pontuais, introduzidas com a

utilização de molas de vários tipos. O estudo das alterações de rigidez é importante para retirar conclusões sobre estruturas reais.

Os estudos tais como os realizados na presente dissertação fornecem dados relevantes na avaliação do comportamento estrutural, e também sobre as aplicações dos sistemas de monitorização. Desta forma, é importante que trabalhos como o presente se continuem a realizar. Em estudos futuros, os sistemas de monitorização estrutural, podem ser aplicados a outros esquemas estruturais, e onde se utilizem materiais diferentes dos utilizados.

No que diz respeito ao estudo das alterações de rigidez, nomeadamente às introduzidas com a aplicação de molas, alterando assim a flexibilidade global da estrutura, trabalhos futuros poderão contemplar a utilização de molas de diferente rigidez, de modo a obter um melhor controlo sobre o comportamento global da estrutura.

O tema da monitorização da integridade estrutural é vasto e atual, merecendo, desta forma, ser continuado no contexto da investigação aplicada.


REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K., & Pervizpour, M. (2003). *Development of a model health monitoring guide for major bridges*. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute.
- Bakht, B., Humar, J., Jaladi, J., Mufti, A., Newhook, J., & Rahman, S. (2001). *Guidelines for structural health monitoring*. ISIS Canada, Intelligent Sensing for Innovative Structures.
- Banthia, N., Bisby, L., Britton, R., Cheng, R., Fallis, G., Hutchinson, R., . . . Wegner, L. (2004). *An introduction to structural health monitoring additional ISIS educational modules composites for construction*.
- Cavadas, F. J. (2008). *Monitorização e análise do comportamento de pontes metálicas antigas: A ponte Eiffel*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Costa, B. J. (2012). *Structural identification of old steel bridges: Monitoring and rehabilitation assessment*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Dytran Instruments Inc. (11 de Agosto de 2017). *Dytran Instruments - ACCELEROMETERS*. Obtido de <http://www.dytran.com/Accelerometers-C84.aspx>
- Enckell, M. (2011). *Lessons learned in structural health monitoring of bridges using advanced sensor technology*. Suécia.
- Faria, A. M. (2010). *Avaliação do desempenho de sistemas de monitorização de estruturas*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Félix, C. M. (2002). *Monitorização do comportamento de estruturas de betão*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Félix, C. M. (2004). *Monitorização e análise do comportamento de obras de arte*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Félix, C., Rodrigues, C., Faria, R., & Figueiras, J. (2012). *Monitorização na construção e na conservação de obras de arte. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Figueiras, J. (2008). Monitorização da integridade estrutural de obras de arte. *BE2008 - Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*. Guimarães.
- Figueiras, J., Rodrigues, C., Figueiras, H., & Félix, C. (2016). Experiência no desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização de estruturas. *Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016*. Coimbra.
- Figueiredo, E. J. (2006). *Monitorização e avaliação do comportamento de obras de arte*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto.
- Glišić, B., & Inaudi, D. (2007). *Fibre optic methods for structural health monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd.
- HBM FiberSensing. (31 de Agosto de 2017). *FiberSensing*. Obtido de <http://www.fibersensing.com/>
- IMI Sensors. (30 de Agosto de 2017). *PCB Piezotronics Div*. Obtido de <http://www.imi-sensors.com/>
- Magalhães, S. D. (2015). *Conceção e análise de um demonstrador para a monitorização estrutural*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Mitutoyo Corporation. (2015). *Catálogo de instrumentos de medição*. PT-19001.
- RDP Electronics, Ltd. (17 de Agosto de 2017). *RDP Electronics - LDC Series DC to DC LVDT Displacement Transducer*. Obtido de <http://www.rdpe.com/uk/lcd.htm>
- Ribeiro, L. M. (2013). *Técnicas de deteção de dano estrutural com base na monitorização*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Rocha, T. L. (2004). *Modelagem de estruturas inteligentes*. Tese de Mestrado. Universidade Estadual Paulista.
- Rodrigues, C. F. (2011). *Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto.
- Rodrigues, C., Sousa, C., Figueiras, H., Faria, R., & Figueiras, J. (2015). Monitorização e vigilância estrutural de pontes de betão em estado crítico de conservação - o caso da Ponte de Foz Dão. *Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto*.
- Sherborne Sensors. (1 de Agosto de 2017). *Sherborne Sensors - Inclinometers*. Obtido de <http://www.sherbornesensors.com/international/products/category/inclinometers>
- Vishay Precision Group, Inc. (8 de Agosto de 2017). *VPG - Stress Analysis Strain Gages*. Obtido de <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/>

ANEXO I – MANUAL DE LIGAÇÕES: EXTENSÓMETROS

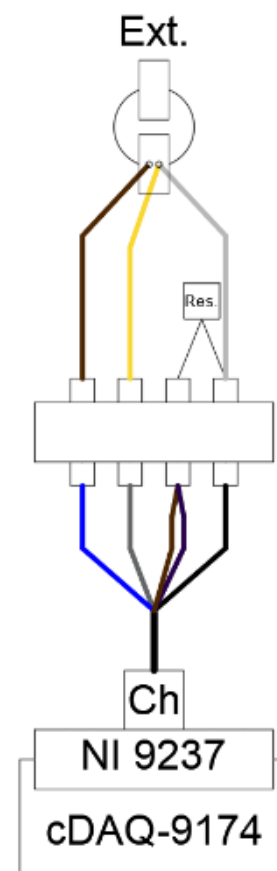
 Instituto Superior de Engenharia do Porto	Manual de Ligação	Laboratório de Estruturas
	Extensómetros	

Tipo de Ligação	Meia Ponte
Resistência	120 Ohm


	Cor
1	Preto
10	Castanho
2	Cinzento
3	Branco
4	Vermelho
5	Laranja
6	Azul
7	Roxo
8	Amarelo
9	Verde

➤ Esquema de ligação:

	Cor	
1	Preto	SC
10	Castanho	x
2	Cinzento	AI+
3	Branco	x
4	Vermelho	x
5	Laranja	x
6	Azul	EX+
7	Roxo	EX-
8	Amarelo	x
9	Verde	SC



ANEXO II – MANUAL DE LIGAÇÕES: LVDT'S

 Instituto Superior de Engenharia do Porto	Manual de Ligação	Laboratório de Estruturas
	LVDT's	

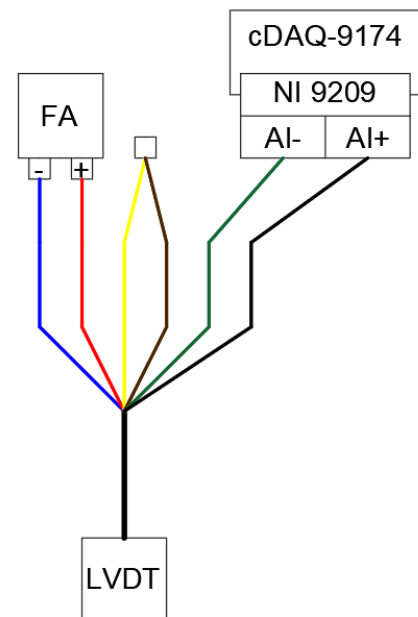
Tipo	Nº de Série	Constante de Sensibilidade (mV/mm)
LDC1000	185453	89,57
	185454	90,39
	185455	89,72
LDC2000C	185458	45,18
	185462	44,90

Fonte de Alimentação 6 – 18V


NI cDAQ-9174 Módulo
NI 9209

➤ Esquema de ligação:

	Cor	
Fonte de Alimentação (6 – 18V)	Amarelo	Castanho
	Castanho	Amarelo
	Vermelho	+6 – +18V
	Azul	Supply Com. (0V)
	Preto	Output Low (-)
	Verde	Output high (+)
	Shield	Instrument ground



ANEXO III – MANUAL DE LIGAÇÕES: INCLINÓMETROS

 Instituto Superior de Engenharia do Porto	Manual de Ligação	Laboratório de Estruturas
	Inclinómetros	

Tipo	Nº de Série	Scale Factor (Volts/Sen de angulo)	Sensibilidade (V/miligräu)
LSOC - 3	100222	95,523	0,0017
	100223	95,541	0,0017

Fonte de Alimentação ± 5V - ± 12V

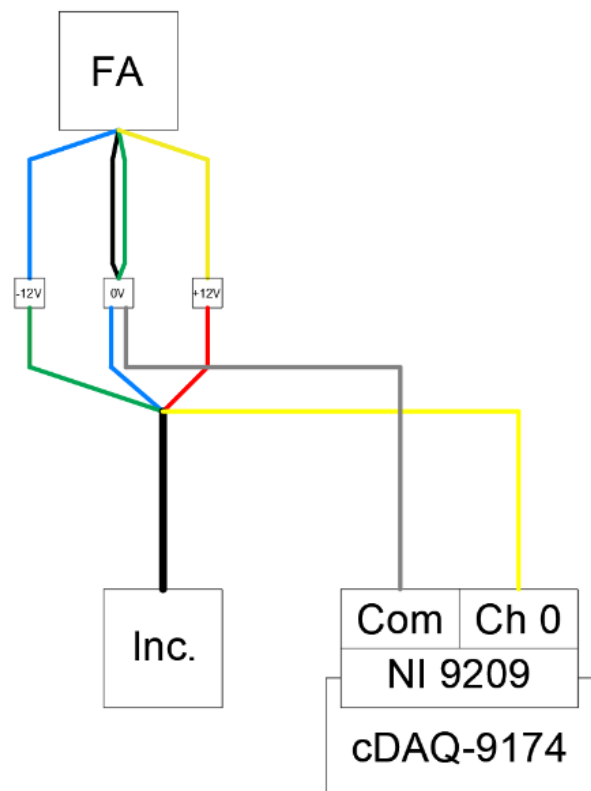
NI cDAQ-9174	Módulo
	NI 9209

➤ Esquema de ligação:

Fonte de Alimentação (FA de um PC)		Cor
+12V		Amarelo
0V		Verde/Preto
-12V		Azul

Cabo Inclinómetro		Cor	
A	Vermelho	+12V	
B	Azul	0V	
C	Verde	-12V	
D	Amarelo	OUT*	
E	Branco	x	
F	Preto	x	

(*) → ± 5VDC



Módulo cDAQ-9174	OUT (Amarelo)
	Chanel 0 (AI+)

ANEXO IV – RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

Medição de deslocamentos:

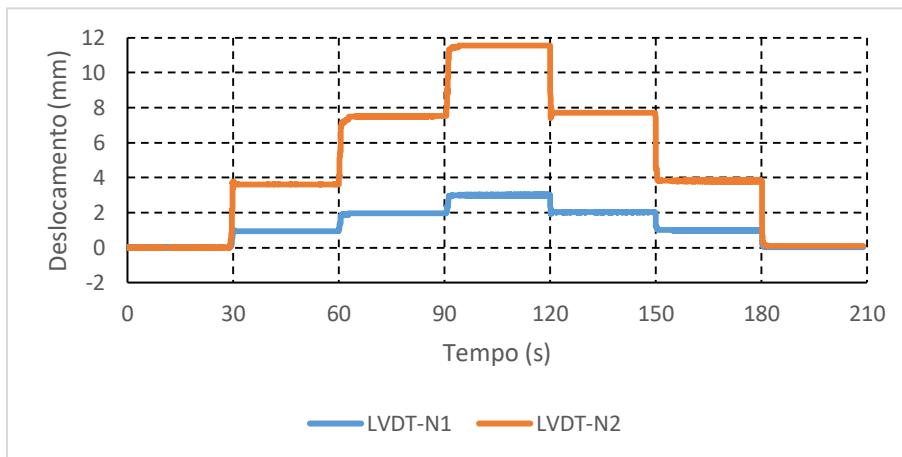


Figura A4. 1 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE1.

Tabela A4. 1 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE1 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	0,937	0,930	0,934	0,0053
	2	1,964	1,952	1,958	0,0087
	3	3,006	2,980	2,993	0,0183
	2	2,021	2,020	2,020	0,0006
	1	1,005	0,995	1,000	0,0068
LVDT-N2	1	3,619	3,616	3,618	0,0020
	2	7,518	7,505	7,512	0,0094
	3	11,550	11,470	11,510	0,0564
	2	7,710	7,710	7,710	0,0001
	1	3,818	3,806	3,812	0,0078

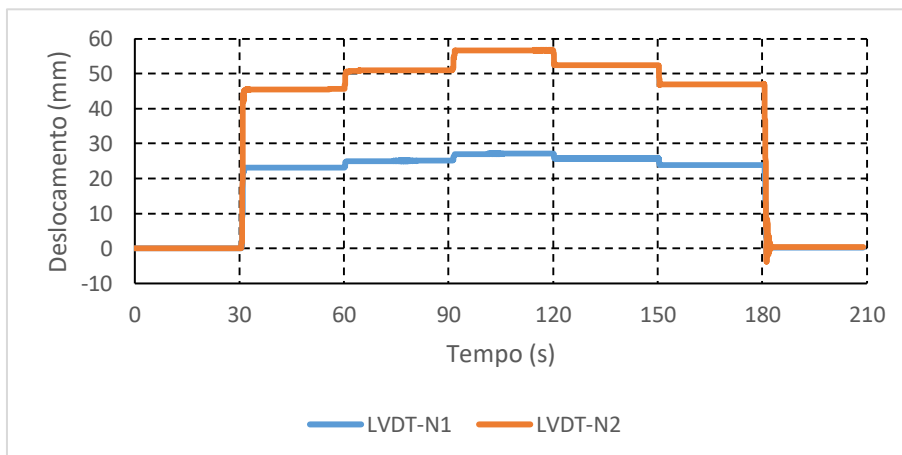


Figura A4. 2 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE2.

Tabela A4. 2 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE2 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	23,157	23,111	23,134	0,0326
	2	25,069	24,991	25,030	0,0556
	3	27,087	27,022	27,055	0,0461
	2	25,777	25,770	25,774	0,0049
	1	23,862	23,860	23,861	0,0019
LVDT-N2	1	45,575	45,464	45,520	0,0784
	2	50,993	50,831	50,912	0,1140
	3	56,716	56,612	56,664	0,0742
	2	52,404	52,387	52,395	0,0121
	1	46,970	46,959	46,964	0,0074

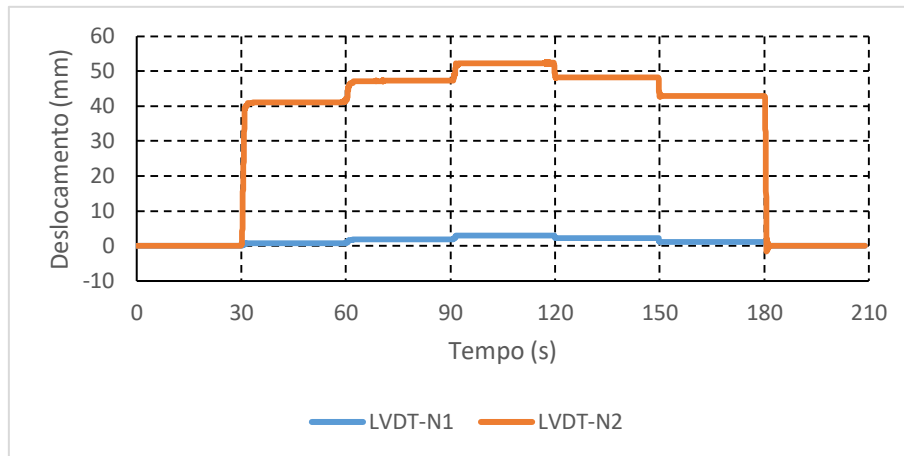


Figura A4. 3 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE3.

Tabela A4. 3 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE3 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	0,811	0,804	0,807	0,0053
	2	1,878	1,870	1,874	0,0059
	3	2,947	2,940	2,943	0,0054
	2	2,242	1,218	1,730	0,7243
	1	1,182	1,182	1,182	0,0004
LVDT-N2	1	41,093	41,018	41,055	0,0528
	2	47,288	47,122	47,205	0,1177
	3	52,330	52,200	52,265	0,0915
	2	48,150	48,129	48,139	0,0145
	1	42,907	42,854	42,880	0,0371

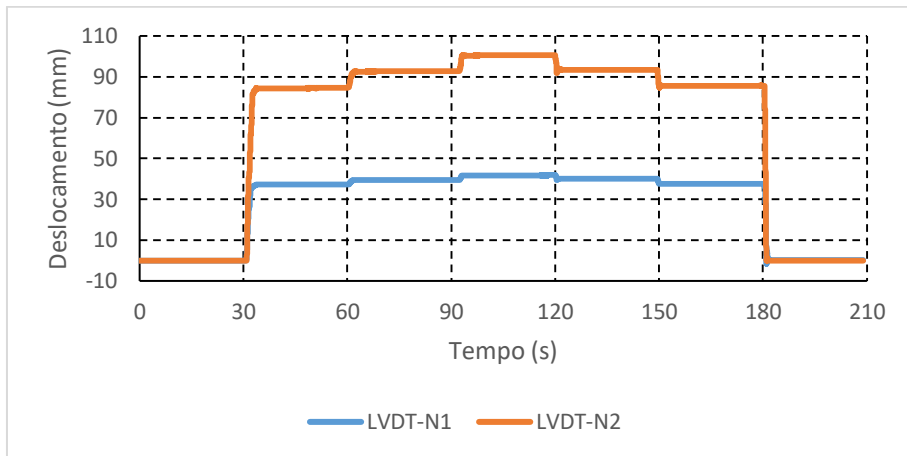


Figura A4. 4 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE4.

Tabela A4. 4 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE4 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	37,241	37,197	37,219	0,0308
	2	39,577	39,569	39,573	0,0056
	3	41,837	41,749	41,793	0,0621
	2	39,949	39,948	39,948	0,0007
	1	37,737	37,735	37,736	0,0013
LVDT-N2	1	84,547	84,457	84,507	0,0701
	2	92,793	92,672	92,733	0,0858
	3	100,720	100,535	100,628	0,1304
	2	93,581	93,576	93,577	0,0032
	1	85,654	85,652	85,653	0,0013

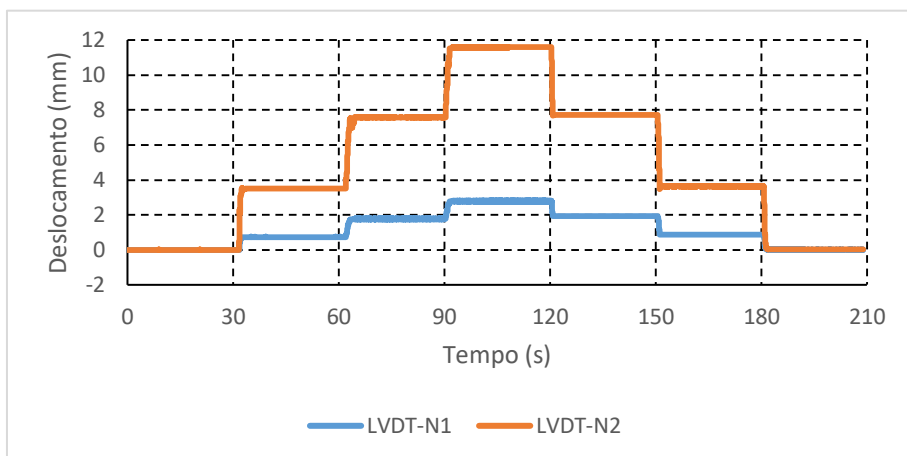


Figura A4. 5 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE5.

Tabela A4. 5 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE5 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	0,738	0,737	0,738	0,0007
	2	1,764	1,606	1,685	0,1119
	3	2,791	2,787	2,789	0,0031
	2	1,934	1,932	1,933	0,0013
	1	0,874	0,871	0,872	0,0020
LVDT-N2	1	3,505	3,504	3,504	0,0072
	2	7,586	7,585	7,586	0,0007
	3	11,589	11,580	11,584	0,0066
	2	7,723	7,722	7,722	0,0008
	1	3,640	3,638	3,639	0,0009

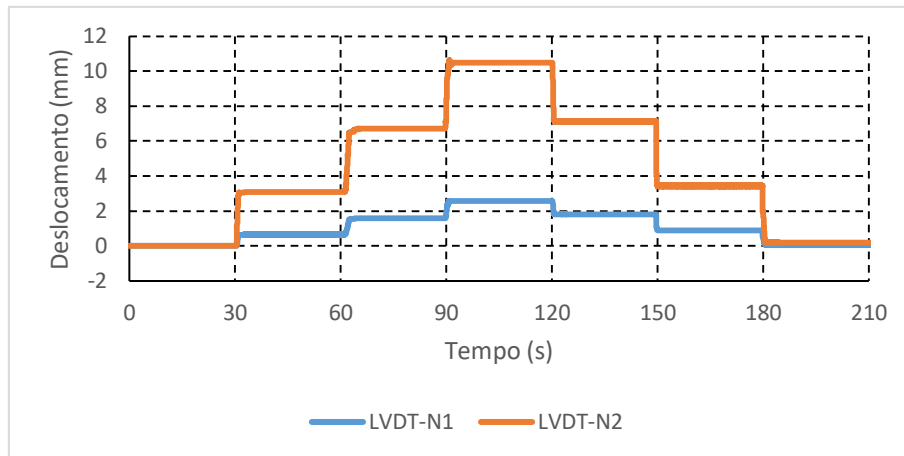


Figura A4. 6 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE6.

Tabela A4. 6 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE6 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	0,657	0,656	0,656	0,0012
	2	1,594	1,592	1,593	0,0013
	3	2,583	2,579	2,581	0,0032
	2	1,820	1,818	1,819	0,0017
	1	0,883	0,882	0,882	0,0008
LVDT-N2	1	3,087	3,085	3,086	0,0012
	2	6,716	6,712	6,714	0,0024
	3	10,494	10,491	10,492	0,0023
	2	7,138	7,137	7,138	0,0009
	1	3,438	3,436	3,437	0,0012

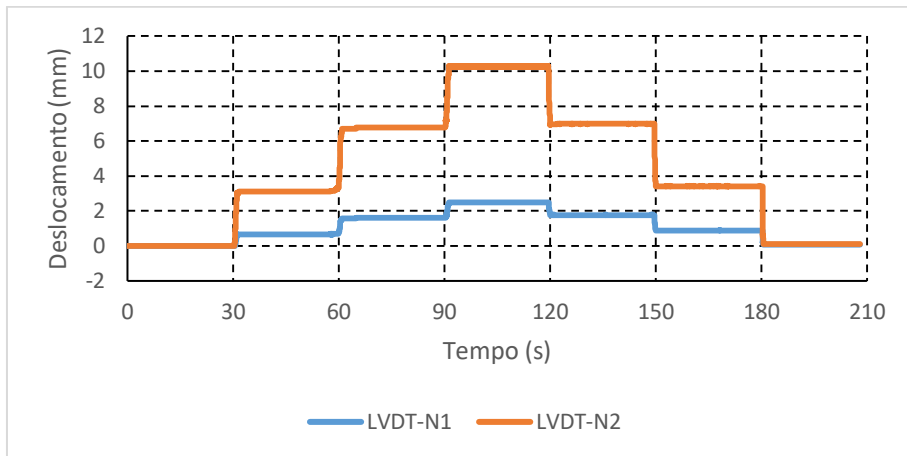


Figura A4. 7 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE7.

Tabela A4. 7 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE7 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	0,672	0,670	0,671	0,0014
	2	1,605	1,604	1,605	0,0004
	3	2,485	2,484	2,484	0,0013
	2	1,772	1,770	1,771	0,0013
	1	0,891	0,889	0,890	0,0018
LVDT-N2	1	3,116	3,115	3,116	0,0009
	2	6,775	6,775	6,775	0,0001
	3	10,269	10,267	10,268	0,0012
	2	6,984	6,977	6,981	0,0049
	1	3,418	3,417	3,418	0,0007

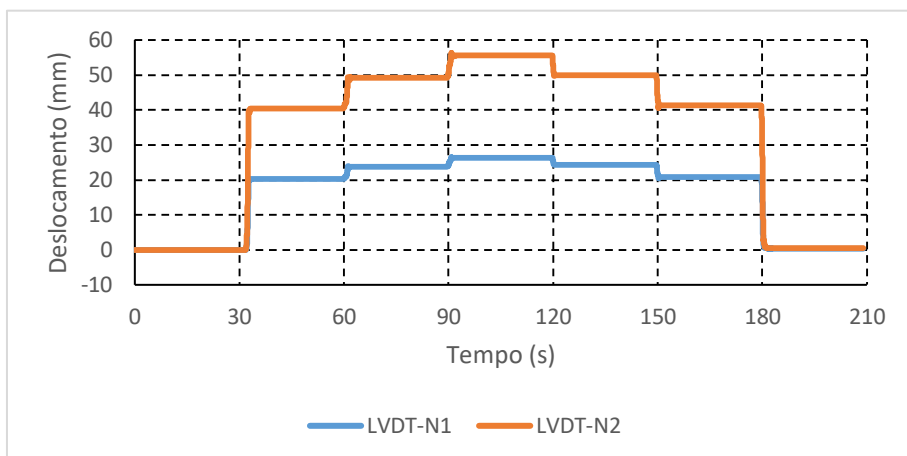


Figura A4. 8 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE8.

Tabela A4. 8 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE8 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	20,230	20,228	20,229	0,0010
	2	23,838	23,838	23,838	0,0003
	3	26,258	26,245	26,251	0,0095
	2	24,277	24,274	24,276	0,0021
	1	20,740	20,740	20,740	0,0003
LVDT-N2	1	40,487	40,487	40,487	0,0001
	2	50,413	49,133	49,773	0,9053
	3	55,593	55,557	55,575	0,0260
	2	49,852	49,848	49,850	0,0032
	1	41,281	41,278	41,279	0,0019

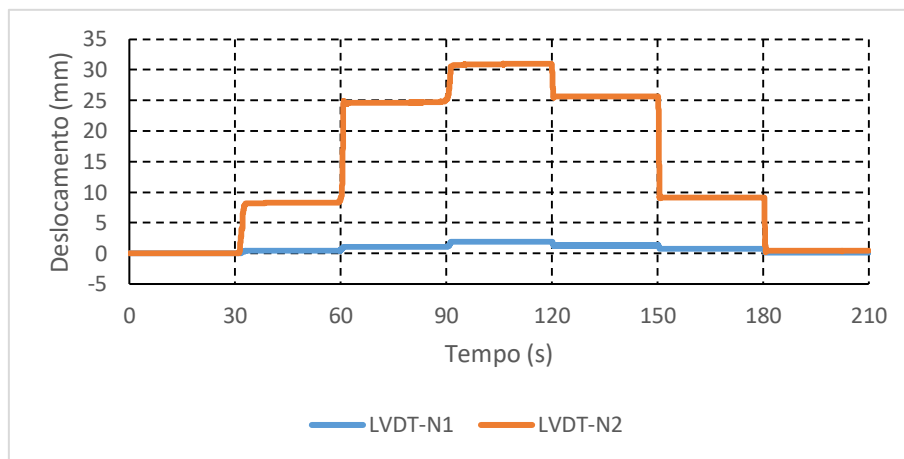


Figura A4. 9 - Deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 e LVDT-N2 no EE9.

Tabela A4. 9 - Valores estatísticos dos LVDT's no EE9 (em mm).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
LVDT-N1	1	0,433	0,432	0,433	0,0008
	2	1,086	1,069	1,078	0,0118
	3	1,902	1,895	1,898	0,0048
	2	1,328	1,327	1,327	0,0008
	1	0,775	0,774	0,775	0,0011
LVDT-N2	1	8,269	8,260	8,264	0,0065
	2	25,119	24,573	24,846	0,3863
	3	30,984	30,787	30,886	0,1395
	2	25,639	25,639	25,639	0,0002
	1	9,085	9,083	9,084	0,0011

Medição da rotação:

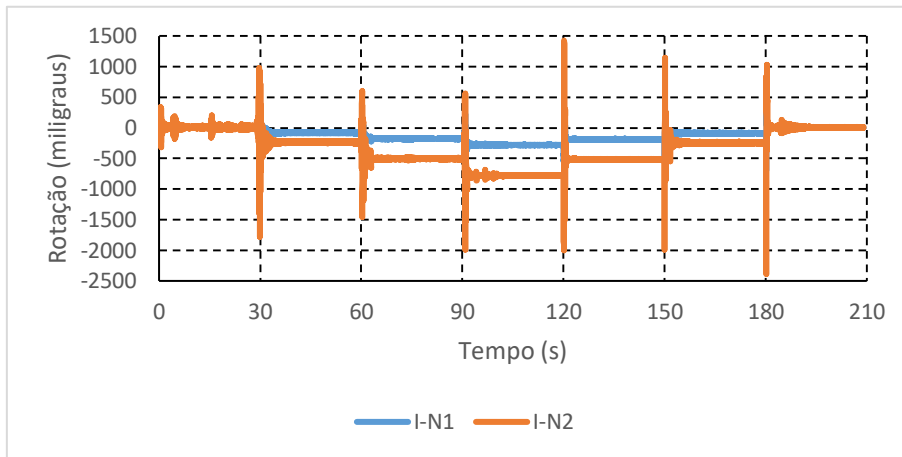


Figura A4. 10 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE1.

Tabela A4. 10 - Valores estatísticos dos inclinómetros no EE1 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-83,7	-86,7	-85,2	2,1376
	2	-176,7	-180,0	-178,4	2,2907
	3	-270,5	-274,4	-272,5	2,7935
	2	-179,0	-181,2	-180,1	1,5995
	1	-81,6	-90,6	-86,1	6,3980
I-N2	1	-239,1	-240,5	-239,8	0,9894
	2	-508,5	-512,7	-510,6	2,9402
	3	-774,6	-779,8	-777,2	3,6566
	2	-512,6	-516,1	-514,4	2,5095
	1	-238,7	-247,9	-243,3	6,5290

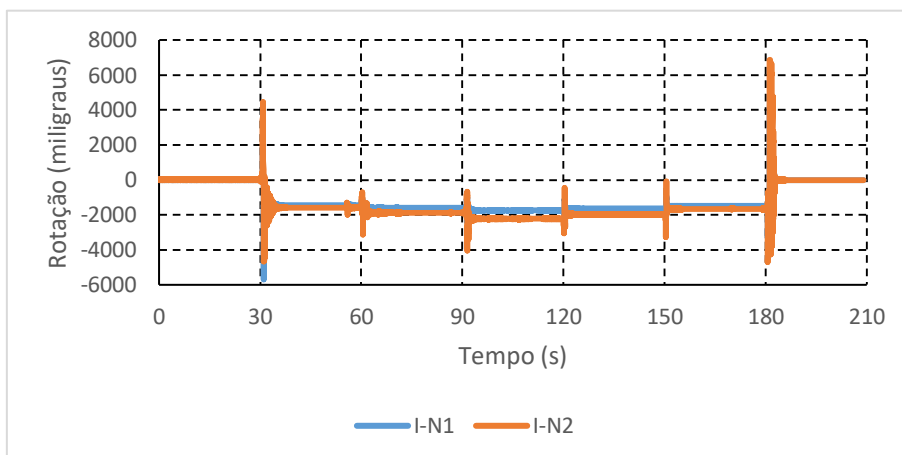


Figura A4. 11 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE2.

Tabela A4. 11 - Valores estatísticos dos inclinômetros no EE2 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-1452,0	-1490,7	-1471,3	27,3974
	2	-1603,3	-1609,5	-1606,4	4,3567
	3	-1744,2	-1753,8	-1749,0	6,7420
	2	-1627,7	-1637,6	-1632,7	7,0255
	1	-1495,2	-1501,7	-1498,4	4,5445
	I-N2	1	-1622,5	-1706,0	-1664,3
2		-1898,0	-1932,8	-1915,4	24,5912
3		-2199,2	-2253,3	-2226,2	38,2820
2		-1949,2	-1977,7	-1963,5	20,1493
1		-1682,6	-1703,1	-1692,9	14,4961

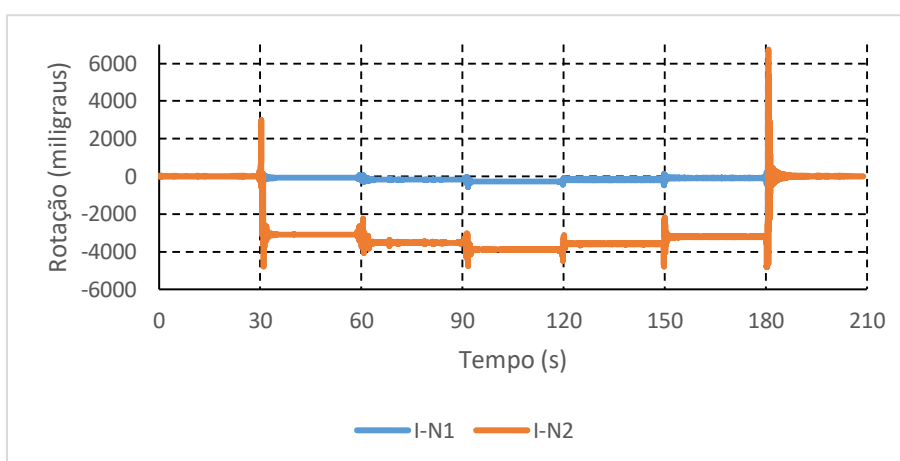


Figura A4. 12 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE3.

Tabela A4. 12 - Valores estatísticos dos inclinômetros no EE3 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-79,6	-83,7	-81,7	2,9366
	2	-175,7	-182,1	-178,9	4,1090
	3	-160,9	-272,2	-216,6	4,5345
	2	-180,9	-187,2	-184,0	4,4524
	1	-84,7	-85,4	-85,0	0,5360
	I-N2	1	-3096,8	-3104,3	-3100,5
2		-3516,8	-3538,9	-3527,8	15,6453
3		-3867,3	-3900,0	-3883,7	23,1758
2		-3580,3	-3593,8	-3587,1	9,5603
1		-3201,6	-3213,8	-3207,7	8,6592

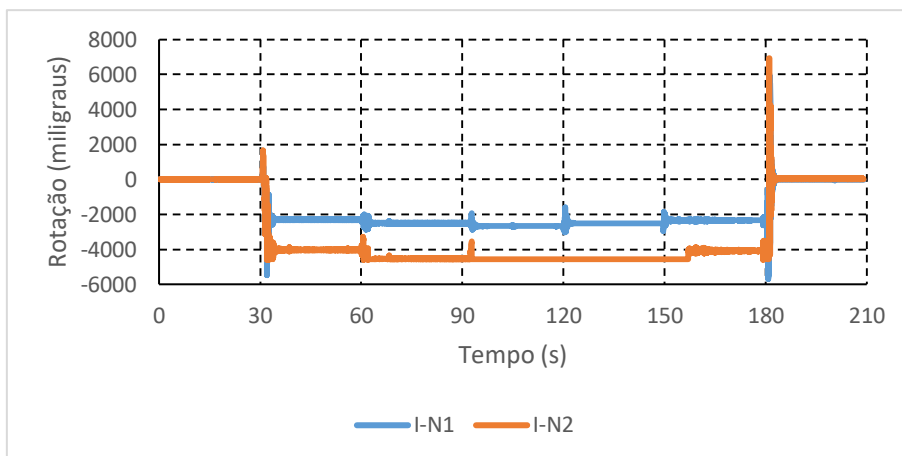


Figura A4. 13 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE4.

Tabela A4. 13 - Valores estatísticos dos inclinômetros no EE4 (em m^o).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-2314,9	-2325,9	-2320,4	7,8461
	2	-2495,5	-2498,0	-2496,8	1,7799
	3	-2674,7	-2682,0	-2678,4	5,1988
	2	-2503,6	-2510,9	-2507,3	5,1504
	1	-2343,8	-2345,1	-2344,4	0,9436
	1	-4032,9	-4045,7	-4039,3	9,0180
I-N2	2	-4545,4	-4549,0	-4547,2	2,5673
	3	-4568,5	-4569,8	-4569,1	0,9189
	2	-4570,4	-4571,6	-4571,0	0,8431
	1	-4047,3	-4047,3	-4069,5	31,4195

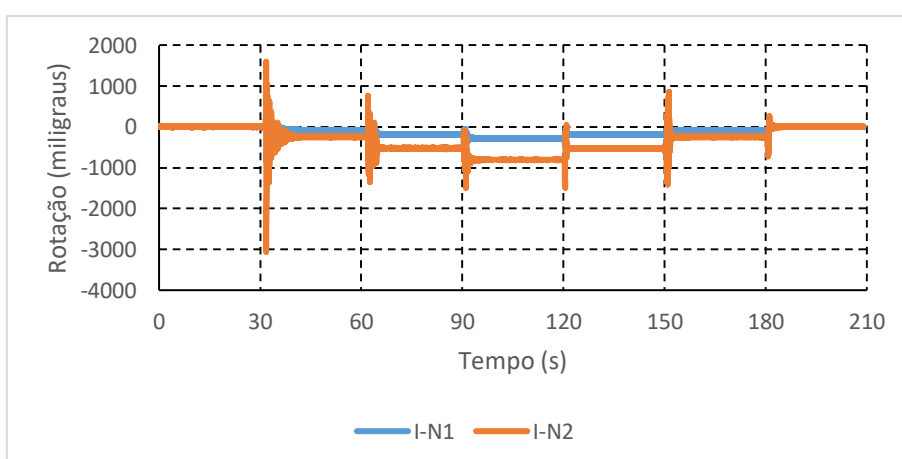


Figura A4. 14 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE5.

Tabela A4. 14 - Valores estatísticos dos inclinômetros no EE5 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-78,7	-84,2	-81,4	3,9470
	2	-169,6	-178,6	-174,1	6,3365
	3	-270,4	-275,8	-273,1	3,7881
	2	-178,1	-178,6	-178,4	0,2898
	1	-80,8	-88,4	-84,6	5,3629
I-N2	1	-243,1	-243,7	-243,4	0,4297
	2	-513,9	-529,3	-521,6	10,9357
	3	-806,0	-807,4	-806,7	1,0241
	2	-522,2	-526,9	-524,6	3,3726
	1	-242,3	-246,7	-244,5	3,1285

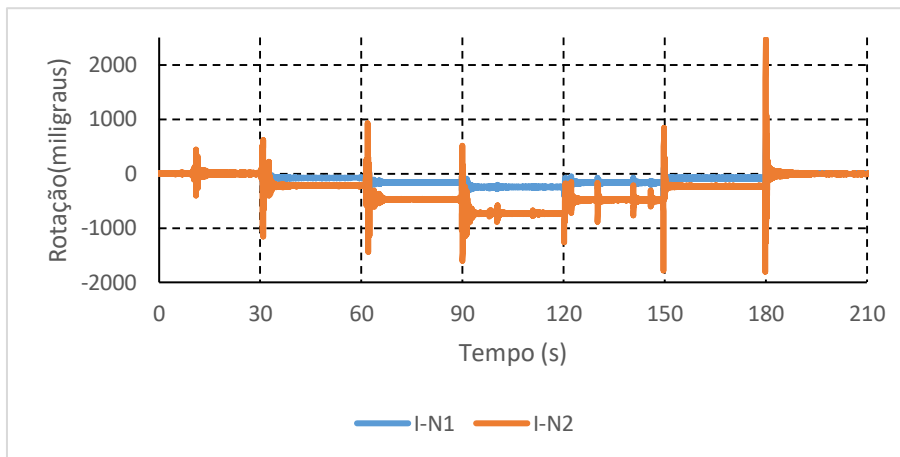


Figura A4. 15 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE6.

Tabela A4. 15 - Valores estatísticos dos inclinômetros no EE6 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-77,5	-78,1	-77,8	0,4339
	2	-161,9	-164,8	-163,3	2,0661
	3	-252,0	-258,2	-255,1	4,3714
	2	-163,3	-165,4	-164,3	1,5222
	1	-80,0	-81,2	-80,6	0,8400
I-N2	1	-219,9	-219,9	-224,4	6,3544
	2	-476,0	-478,3	-477,1	1,5801
	3	-732,1	-737,5	-734,8	3,7613
	2	-478,6	-486,6	-482,6	5,6822
	1	-225,1	-226,4	-225,8	0,9378

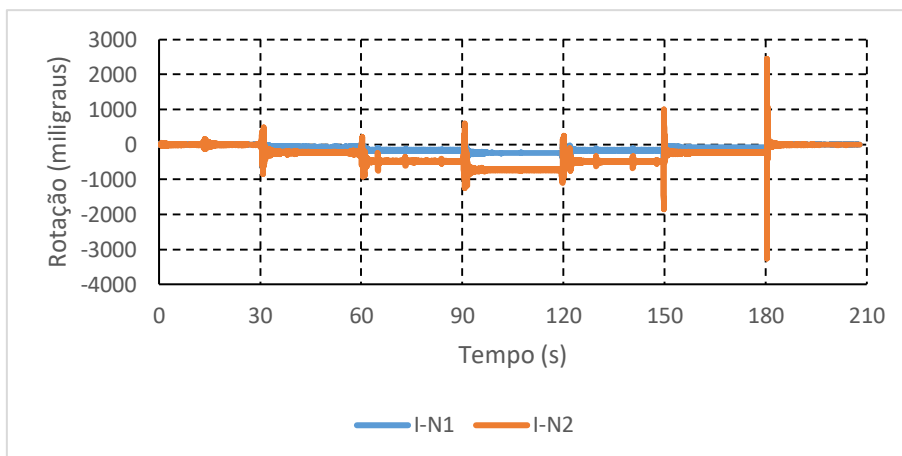


Figura A4. 16 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE7.

Tabela A4. 16 - Valores estatísticos dos inclinômetros no EE7 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-76,2	-88,8	-82,5	8,8954
	2	-162,4	-164,0	-163,2	1,1324
	3	-228,9	-242,7	-235,8	9,7607
	2	-162,9	-167,8	-165,3	3,4268
	1	-82,3	-84,7	-83,5	1,7173
I-N2	1	-231,2	-226,9	-222,9	5,6701
	2	-483,9	-486,8	-485,3	2,0550
	3	-702,2	-725,4	-713,8	16,4096
	2	-482,0	-502,5	-492,2	14,4640
	1	-230,4	-238,9	-233,7	4,6618

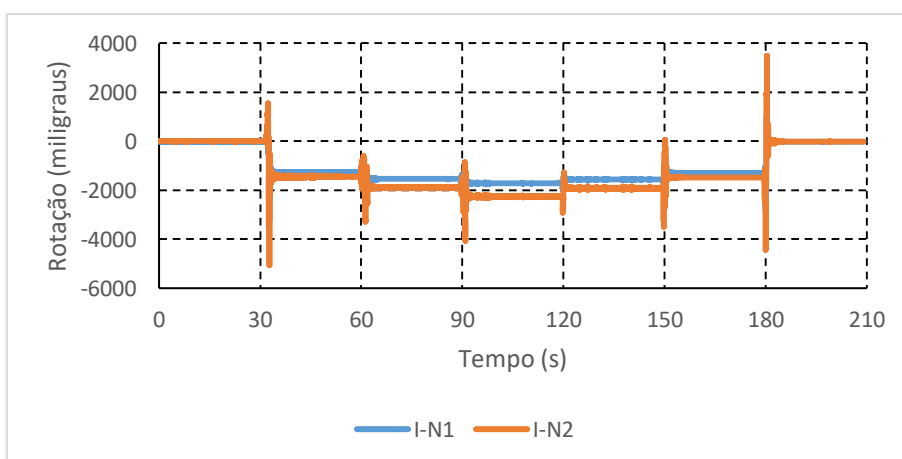


Figura A4. 17 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE8.

Tabela A4. 17 - Valores estatísticos dos inclinómetros no EE8 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-1287,9	-1292,5	-1290,2	3,2758
	2	-1536,6	-1537,1	-1536,8	0,3466
	3	-1711,9	-1714,4	-1713,2	1,7610
	2	-1553,3	-1555,6	-1554,5	1,6248
	1	-1306,1	-1320,3	-1313,2	10,0605
	I-N2	1	-1454,5	-1464,8	-1459,6
2		-1884,9	-1885,9	-1885,4	0,6475
3		-2257,2	-2266,9	-2262,1	6,8309
2		-1911,7	-1912,7	-1912,1	0,7143
1		-1477,1	-1479,1	-1478,1	1,4144

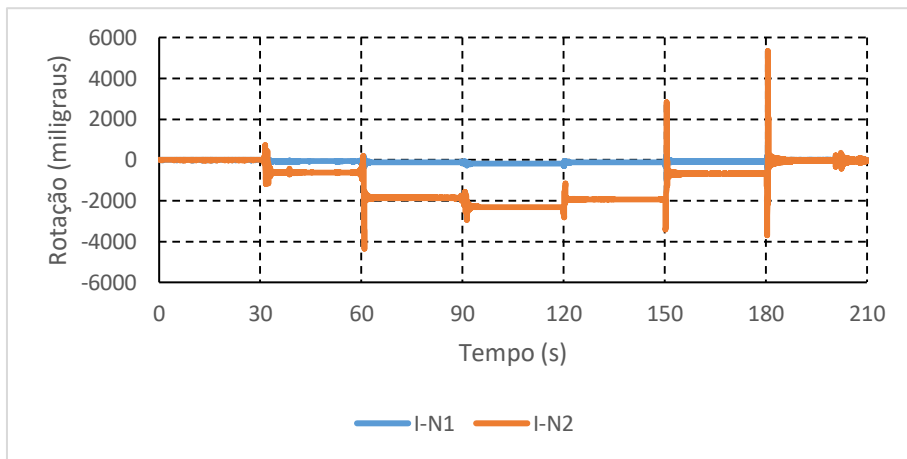


Figura A4. 18 - Rotações medidas pelo I-N1 e I-N2 no EE9.

Tabela A4. 18 - Valores estatísticos dos inclinómetros no EE9 (em m°).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
I-N1	1	-64,4	-64,4	-64,4	0,0142
	2	-114,1	-122,4	-118,3	5,8894
	3	-188,3	-189,3	-188,8	0,6811
	2	-118,3	-121,6	-119,9	2,3927
	1	-63,4	-71,1	-67,3	5,4492
	I-N2	1	-607,5	-619,3	-613,4
2		-1858,3	-1858,3	-1865,1	9,5403
3		-2303,4	-2317,8	-2310,6	10,1299
2		-1921,1	-1926,9	-1924,0	4,1468
1		-666,6	-666,6	-668,2	2,2665

Medição das extensões:

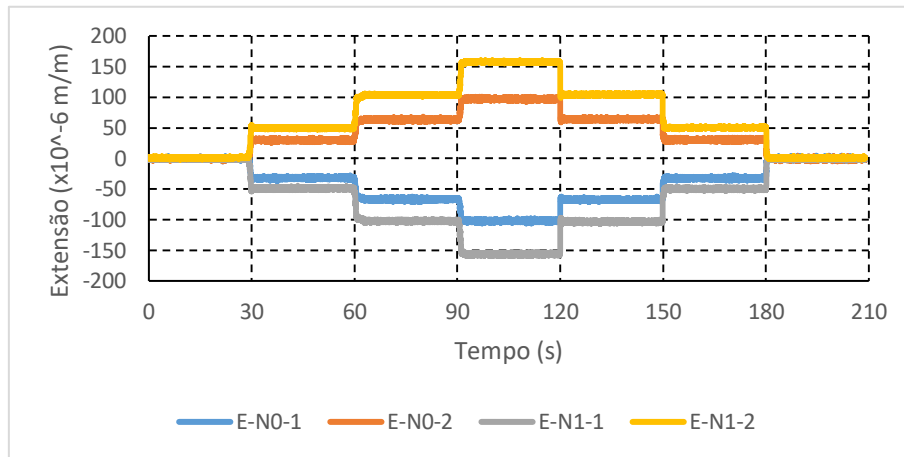


Figura A4. 19 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE1.

Tabela A4. 19 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE1 (10^{-6} m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-32,1	-32,3	-32,2	0,1234
	2	-65,7	-67,0	-66,4	0,9606
	3	-101,9	-102,4	-102,2	0,2913
E-N0-2	2	-65,8	-68,0	-66,9	1,4949
	1	-33,0	-33,0	-33,0	0,0087
	1	30,1	28,8	29,4	0,9016
E-N1-1	2	65,0	61,9	63,5	2,2127
	3	98,0	96,6	97,3	0,9853
	2	64,0	63,4	63,7	0,4142
E-N1-2	1	31,3	30,1	30,7	0,8410
	1	-49,4	-49,7	-49,5	0,2267
	2	-101,8	-102,0	-101,9	0,1956
E-N1-1	3	-155,7	-156,1	-155,9	0,2710
	2	-102,4	-103,3	-102,9	0,6635
	1	-49,3	-50,9	-50,1	1,1074
E-N1-2	1	49,2	49,2	49,2	0,0099
	2	103,9	103,8	103,8	0,1380
	3	157,8	156,6	157,2	0,8075
E-N1-2	2	104,8	104,8	104,8	0,0331
	1	51,1	49,2	50,1	1,3710

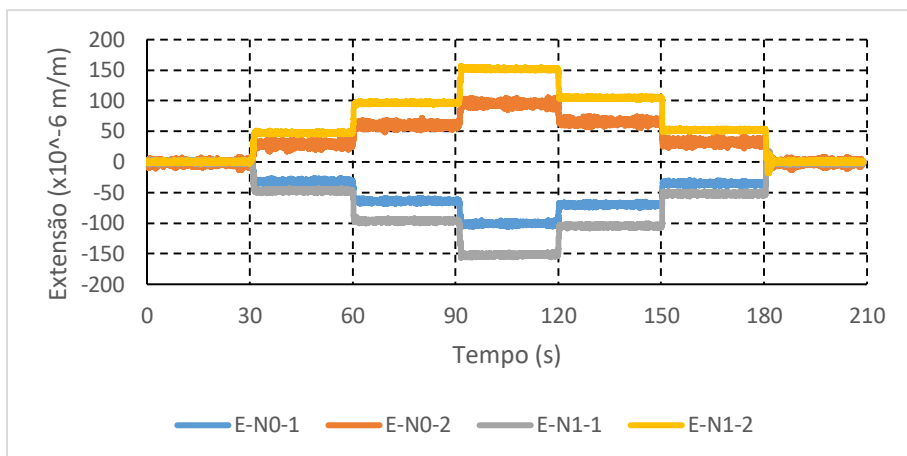


Figura A4. 20 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE2.

Tabela A4. 20 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE2 (10^{-6} m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-31,8	-32,4	-32,1	0,3704
	2	-64,3	-66,4	-65,3	1,4665
	3	-98,2	-102,1	-100,1	2,7084
	2	-68,4	-69,2	-68,8	0,5649
	1	-33,0	-33,8	-33,4	0,5229
E-N0-2	1	29,3	24,2	26,8	3,6057
	2	61,9	60,3	61,1	1,1132
	3	102,7	96,0	99,4	4,6953
	2	67,5	63,2	65,3	3,0683
	1	32,8	26,6	29,7	4,4030
E-N1-1	1	-47,8	-48,2	-48,0	0,3163
	2	-96,6	-98,7	-97,7	1,5426
	3	-152,1	-152,4	-152,3	0,1991
	2	-104,7	-106,3	-105,5	1,1315
	1	-51,6	-52,4	-52,0	0,7100
E-N1-2	1	49,4	48,5	49,0	0,6445
	2	98,7	96,3	97,5	1,6808
	3	154,2	150,2	152,2	2,7743
	2	104,5	104,0	104,2	0,3496
	1	51,8	50,0	50,9	1,3419

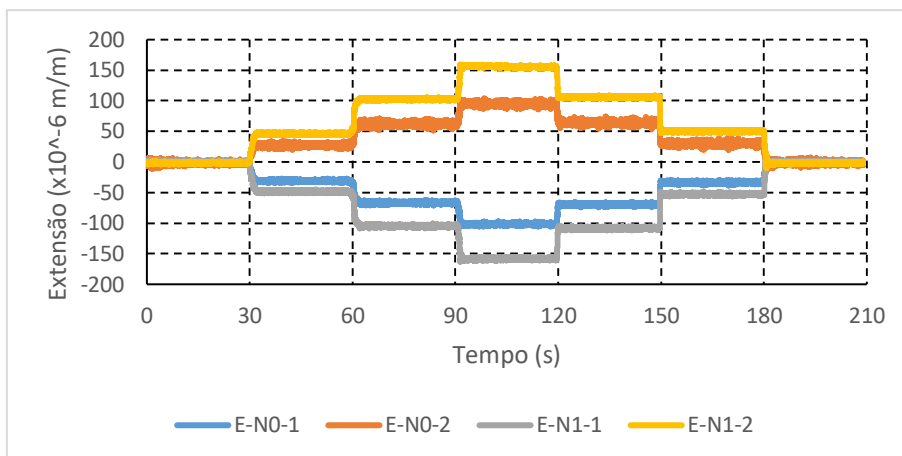


Figura A4. 21 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE3.

Tabela A4. 21 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE3 (x10⁻⁶ m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-30,1	-30,7	-30,3869	0,3914
	2	-66,7	-69,2	-67,9491	1,7972
	3	-101,2	-101,3	-101,2415	0,1208
	2	-70,7	-71,6	-71,1355	0,6744
	1	-32,1	-34,5	-33,3170	1,6788
E-N0-2	1	31,7	25,9	29,2596	3,4225
	2	62,3	59,3	60,8059	2,1694
	3	96,8	95,9	96,3791	0,6149
	2	63,8	60,7	62,2089	2,1997
	1	31,3	30,2	30,7982	0,7278
E-N1-1	1	-48,8	-49,1	-48,9741	0,2568
	2	-104,1	-104,5	-104,2729	0,2729
	3	-158,0	-159,0	-158,5223	0,6699
	2	-107,0	-109,7	-108,3840	1,9078
	1	-52,6	-55,0	-53,7733	1,6666
E-N1-2	1	46,9	44,9	45,9343	0,8439
	2	103,5	101,9	102,7102	1,1255
	3	156,6	156,0	156,3291	0,3955
	2	105,9	105,3	105,5938	0,3731
	1	49,8	48,5	49,3482	0,6527

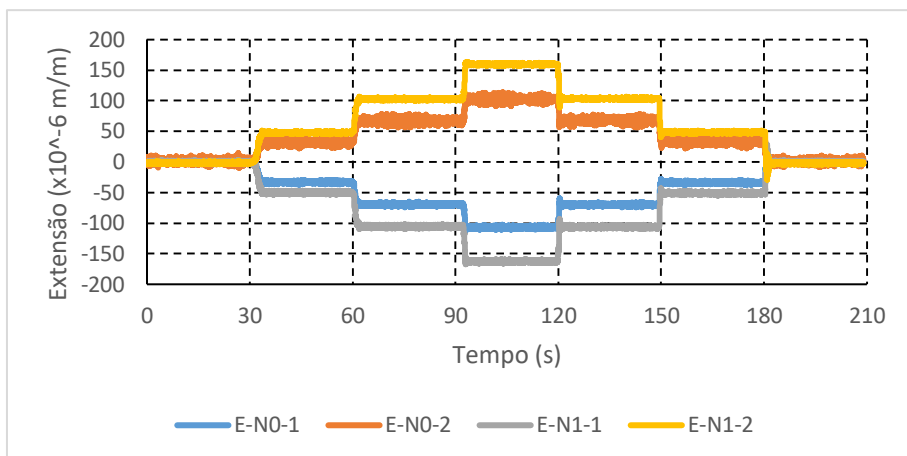


Figura A4. 22 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE4.

Tabela A4. 22 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE4 (10^{-6} m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-33,0	-33,1	-33,1	0,0952
	2	-68,5	-71,3	-69,9	1,9822
	3	-105,4	-109,1	-107,3	2,6361
E-N0-2	2	-69,7	-70,2	-69,9	0,2929
	1	-33,4	-33,5	-33,4	0,0897
	1	36,3	31,9	34,1	3,1181
E-N1-1	2	69,1	61,2	65,1	5,6092
	3	104,4	99,0	101,7	3,7524
	2	66,3	64,9	65,6	1,0140
E-N1-2	1	36,8	32,2	34,5	3,2795
	1	-50,5	-51,9	-51,2	0,9676
	2	-104,2	-106,3	-105,3	1,4513
E-N1-1	3	-161,7	-161,8	-161,8	0,1014
	2	-104,3	-106,4	-105,4	1,5284
	1	-51,0	-51,4	-51,2	0,3078
E-N1-2	1	48,6	48,1	48,3	0,3526
	2	103,6	102,0	102,8	1,1129
	3	160,0	159,8	159,9	0,0994
E-N1-2	2	105,5	102,6	104,1	2,1081
	1	48,6	48,4	48,5	0,1025

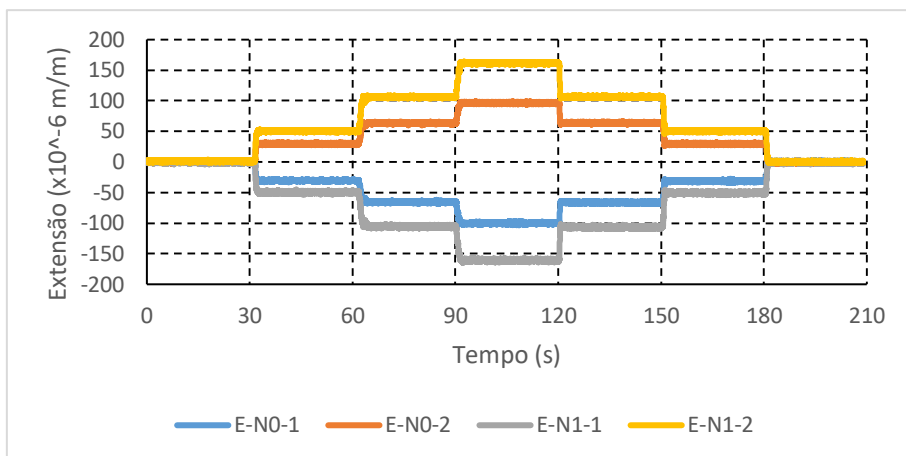


Figura A4. 23 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Tabela A4. 23 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-26,1	-31,8	-29,0	4,0836
	2	-61,8	-66,3	-64,0	3,2037
	3	-99,7	-101,4	-100,5	1,1821
E-N0-2	2	-66,4	-66,9	-66,6	0,3529
	1	-30,0	-30,1	-30,0	0,1060
	1	28,9	26,3	27,6	1,8333
E-N1-1	2	63,7	59,7	61,7	2,7979
	3	97,1	96,3	96,7	0,5067
	2	63,6	63,5	63,5	0,0742
E-N1-2	1	30,8	29,1	29,9	1,2190
	1	-44,7	-49,7	-47,2	3,5668
	2	-100,0	-105,5	-102,7	3,8737
E-N1-1	3	-159,0	-162,1	-160,5	2,1231
	2	-105,9	-106,9	-106,4	0,7148
	1	-48,4	-50,1	-49,2	1,2240
E-N1-2	1	50,0	49,0	49,5	0,7503
	2	106,6	101,7	104,2	3,4805
	3	161,1	160,4	160,8	0,4709
E-N1-2	2	106,1	105,8	105,9	0,1730
	1	51,2	49,8	50,5	0,9900

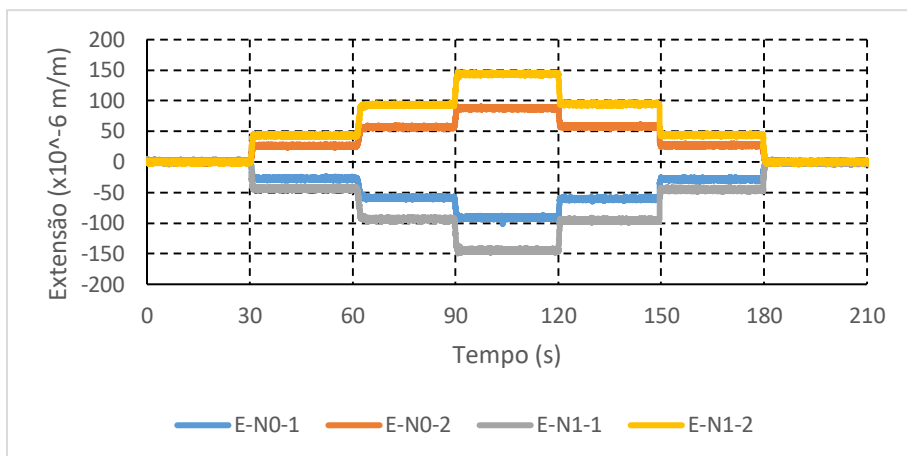


Figura A4. 24 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE6.

Tabela A4. 24 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-25,4	-26,7	-26,0	0,9238
	2	-58,1	-60,1	-59,1	1,4072
	3	-90,4	-91,8	-91,1	1,0155
E-N0-2	2	-58,9	-60,5	-59,7	1,1174
	1	-24,9	-27,7	-26,3	1,9690
	1	27,9	27,2	27,5	0,4898
E-N1-1	2	56,4	56,2	56,3	0,0527
	3	87,9	85,8	86,8	1,5167
	2	58,2	56,5	57,4	1,1905
E-N1-2	1	29,2	27,3	28,2	1,3119
	1	-44,6	-44,7	-44,6	0,0570
	2	-93,1	-93,5	-93,3	0,2996
E-N1-1	3	-145,8	-146,4	-146,1	0,4529
	2	-97,3	-97,3	-95,8	2,1592
	1	-46,1	-46,3	-46,2	0,1567
E-N1-2	1	44,3	42,7	43,5	1,1406
	2	95,3	91,7	93,5	2,4812
	3	143,5	142,4	143,0	0,7544
E-N1-2	2	94,9	93,4	94,2	1,0555
	1	43,7	43,3	43,6	0,3339

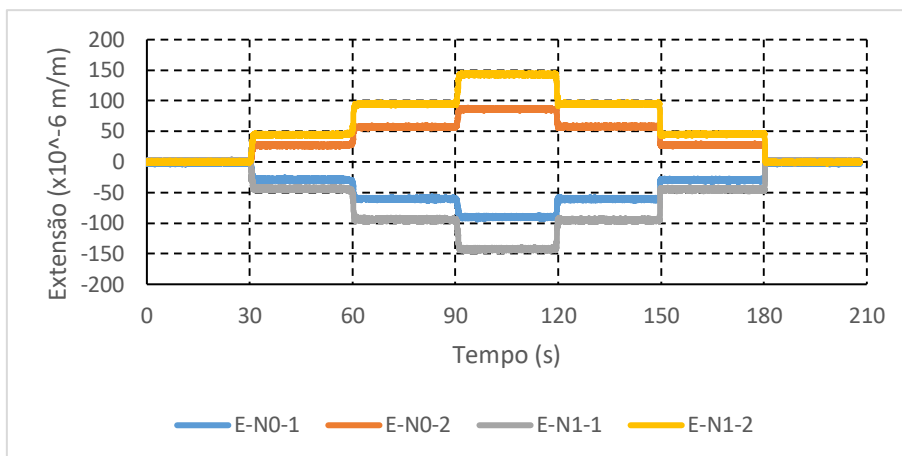


Figura A4. 25 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE7.

Tabela A4. 25 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-27,2	-28,4	-27,8	0,8625
	2	-58,6	-59,1	-58,8	0,3579
	3	-89,7	-90,5	-90,1	0,5573
	2	-61,0	-61,7	-61,4	0,5108
	1	-28,2	-30,5	-29,4	1,6258
E-N0-2	1	27,3	27,2	27,3	0,0466
	2	57,9	57,1	57,5	0,6125
	3	85,8	85,5	85,7	0,2596
	2	57,6	57,5	57,5	0,0916
	1	28,0	28,0	28,0	0,0221
E-N1-1	1	-44,0	-45,3	-44,7	0,9220
	2	-93,8	-95,3	-94,5	1,0542
	3	-141,5	-142,9	-142,2	0,9922
	2	-94,6	-95,4	-95,0	0,5856
	1	-43,5	-45,9	-44,7	1,6667
E-N1-2	1	44,1	43,3	43,7	1,5896
	2	95,1	94,5	94,8	0,4591
	3	143,6	142,9	143,3	0,5124
	2	95,0	95,0	95,0	0,0095
	1	44,7	44,6	45,0	0,6232

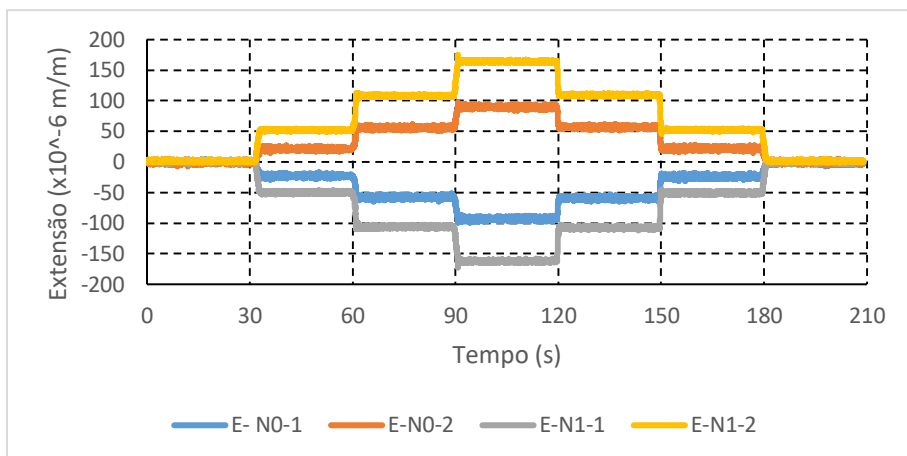


Figura A4. 26 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE8.

Tabela A4. 26 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-22,4	-22,9	-22,7	0,3214
	2	-57,2	-57,4	-57,3	0,1587
	3	-91,7	-93,2	-92,5	1,0236
E-N0-2	2	-57,8	-58,7	-58,3	0,6369
	1	-23,1	-23,6	-23,4	0,2991
	1	22,0	18,0	20,0	2,7897
E-N1-1	2	59,2	55,9	57,5	2,3340
	3	90,0	89,6	89,8	0,2829
	2	58,7	57,7	58,2	0,6878
E-N1-2	1	21,6	21,4	21,5	0,1385
	1	-50,3	-50,6	-50,4	0,2359
	2	-106,9	-107,3	-107,0	0,2733
E-N1-2	3	-160,9	-161,8	-161,4	0,6385
	2	-107,0	-107,8	-107,4	0,5871
	1	-49,9	-51,1	-50,5	0,8492
E-N1-2	1	52,8	50,3	51,5	1,7322
	2	109,2	109,0	109,1	0,1176
	3	164,4	163,3	163,8	0,7776
E-N1-2	2	109,8	109,2	109,5	0,4158
	1	52,4	51,9	52,1	0,3828

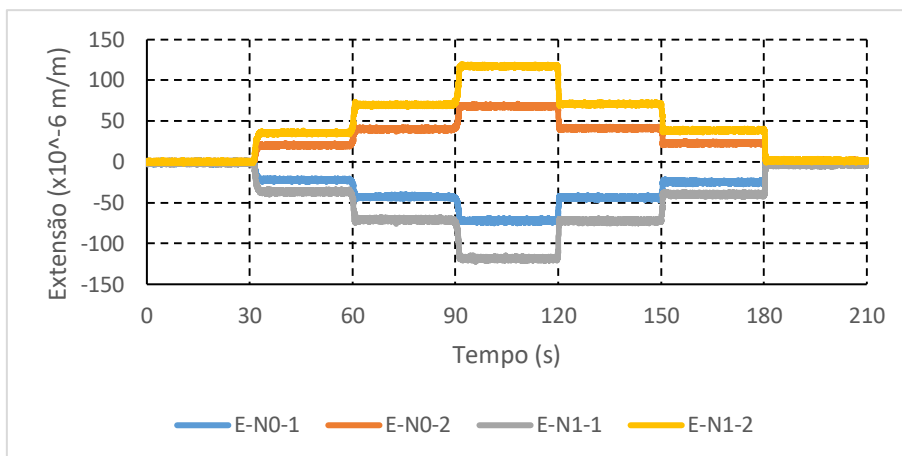
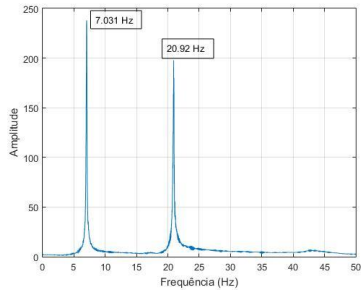


Figura A4. 27 - Extensões medidas pelo E-N0-1, E-N0-2, E-N1-1 e E-N1-2 no EE9.

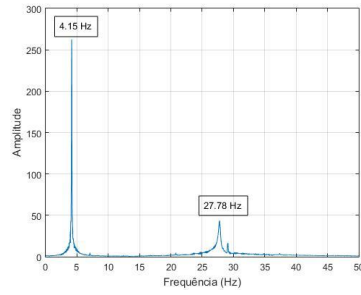
Tabela A4. 27 - Valores estatísticos dos extensômetros no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

	Patamar	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
E-N0-1	1	-21,6	-26,7	-24,1	3,6018
	2	-42,9	-44,2	-43,6	0,8783
	3	-72,6	-73,3	-72,9	0,4723
E-N0-2	2	-43,1	-44,7	-43,9	1,1318
	1	-25,1	-25,8	-25,5	0,5463
	1	24,4	20,3	22,3	2,8990
E-N1-1	2	41,2	40,3	40,7	0,5685
	3	67,8	67,1	67,4	0,5256
	2	41,5	41,2	41,3	0,2299
E-N1-2	1	23,1	22,3	22,7	0,5655
	1	-36,0	-44,5	-40,2	6,0291
	2	-70,7	-73,7	-72,2	2,1496
E-N1-1	3	-117,9	-118,4	-118,1	0,3978
	2	-72,6	-73,1	-72,9	0,3524
	1	-39,9	-41,4	-40,6	1,1029
E-N1-2	1	36,7	35,4	36,1	0,8887
	2	70,9	69,5	70,2	0,9632
	3	117,7	116,9	117,3	0,5020
E-N1-2	2	71,7	71,0	71,4	0,4924
	1	39,7	38,2	39,0	1,0569

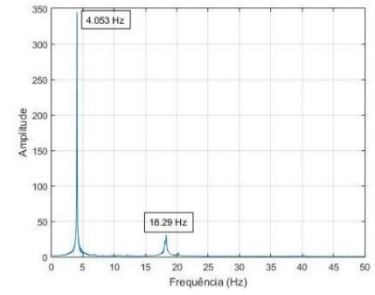
ANEXO V – RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS



a) ED1.1

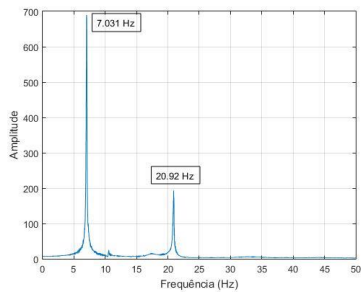


b) ED1.2

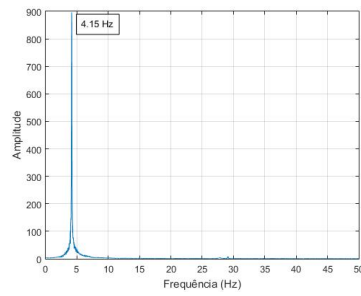


c) ED1.3

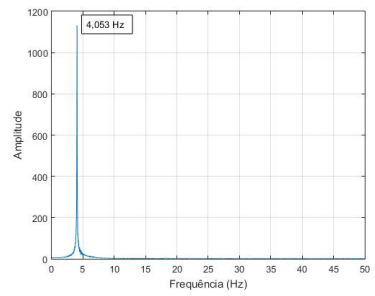
Figura A5. 1 - Espectros de frequência no ED1 (A-N1).



a) ED1.1

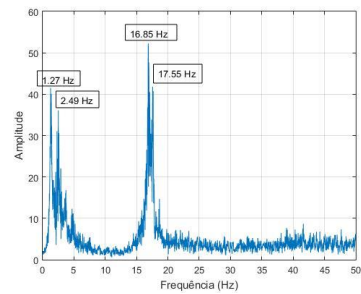


b) ED1.2

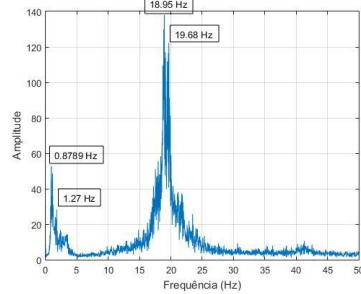


c) ED1.3

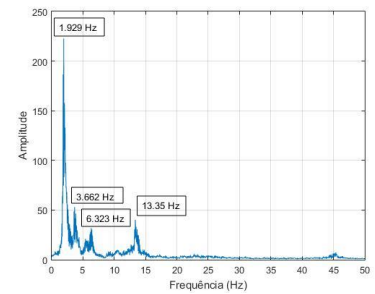
Figura A5. 2 - Espectros de frequência no ED1 (A-N2).



a) ED2.1

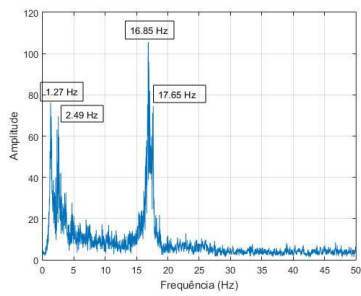


b) ED2.2

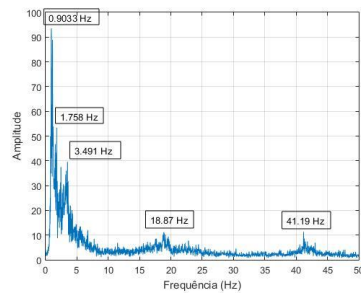


c) ED2.3

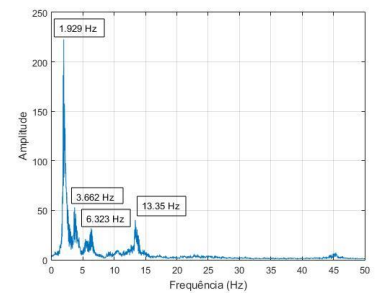
Figura A5. 3 - Espectros de frequência no ED2 (A-N1).



a) ED2.1

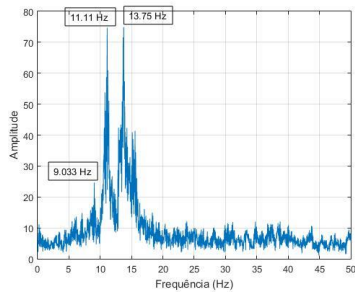


b) ED2.2

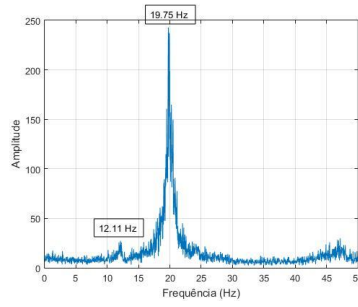


c) ED2.3

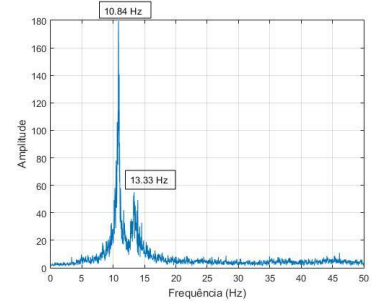
Figura A5. 4 - Espectros de frequência no ED2 (A-N2).



a) ED3.1

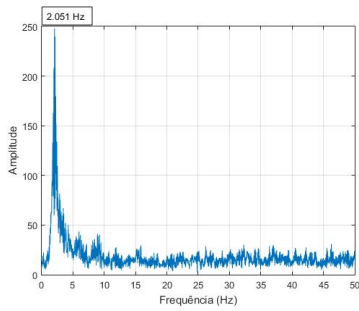


b) ED3.2

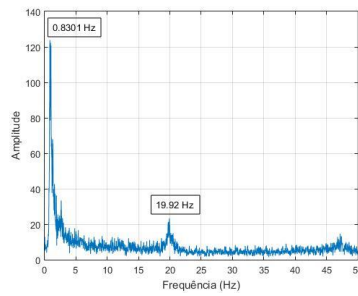


c) ED3.3

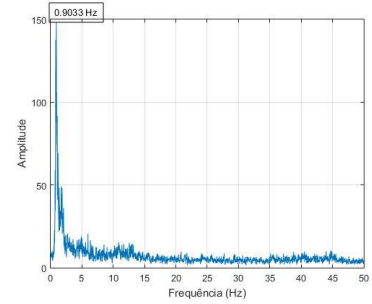
Figura A5. 5 - Espectros de frequência no ED3 (A-N1).



a) ED3.1

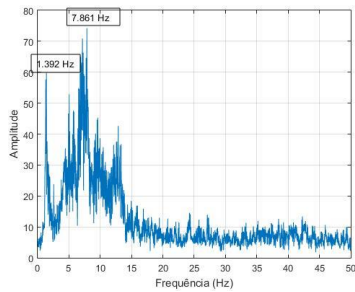


b) ED3.2

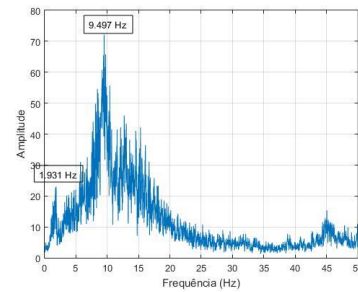


c) ED3.3

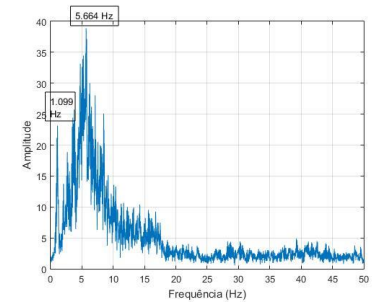
Figura A5. 6 - Espectros de frequência no ED3 (A-N2).



a) ED4.1

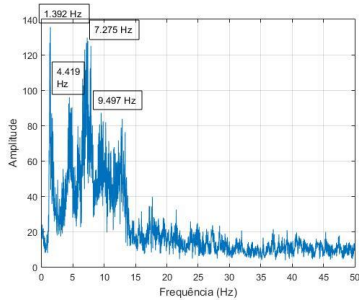


b) ED4.2

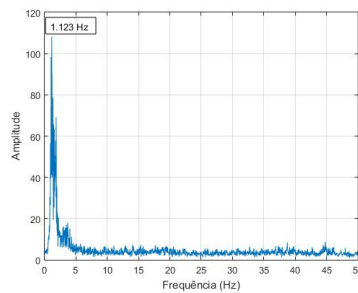


c) ED4.3

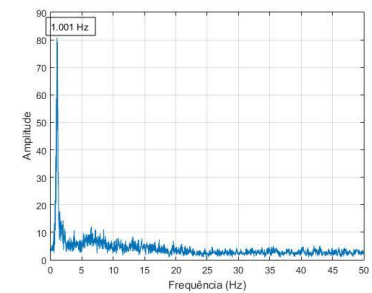
Figura A5. 7 - Espectros de frequência no ED4 (A-N1).



a) ED4.1

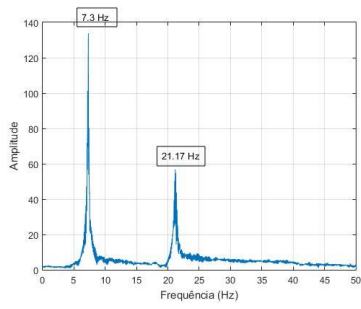


b) ED4.2

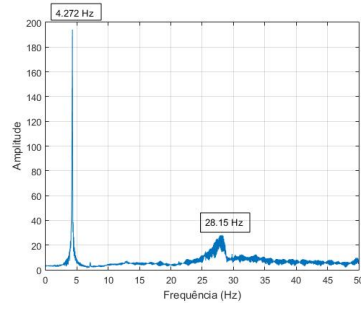


c) ED4.3

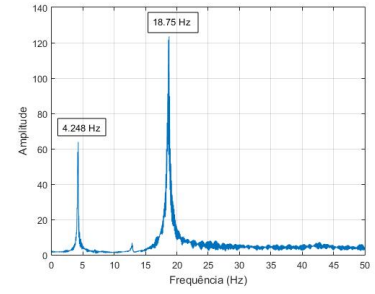
Figura A5. 8 - Espectros de frequência no ED4 (A-N2).



a) ED5.1

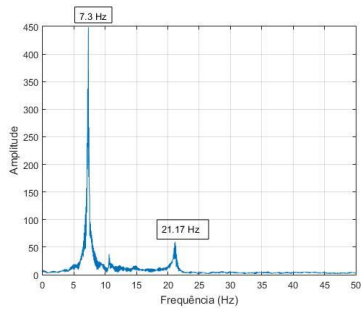


b) ED5.2

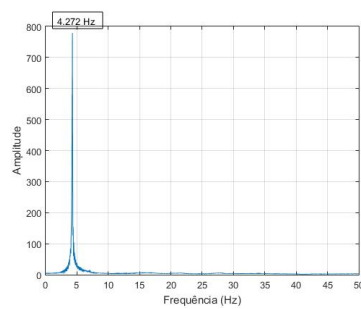


c) ED5.3

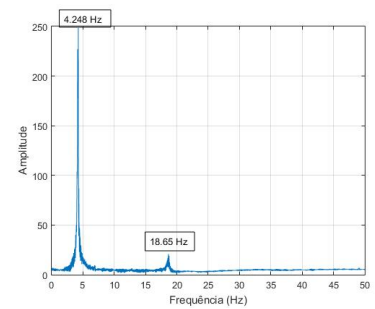
Figura A5. 9 - Espetros de frequência no ED5 (A-N1).



a) ED5.1

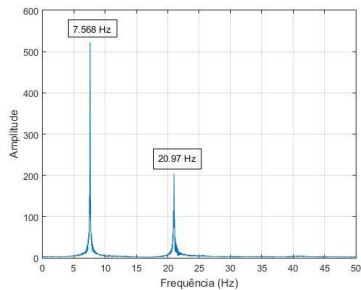


b) ED5.2

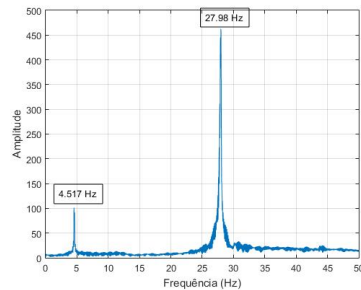


c) ED5.3

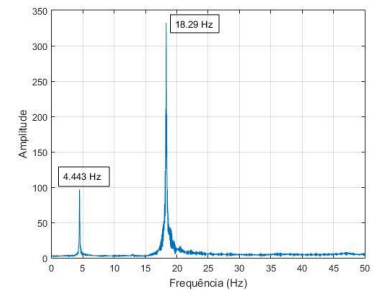
Figura A5. 10 - Espetros de frequência no ED5 (A-N2).



a) ED6.1

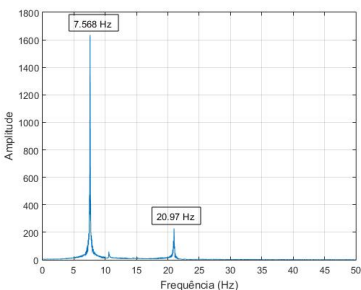


b) ED6.2

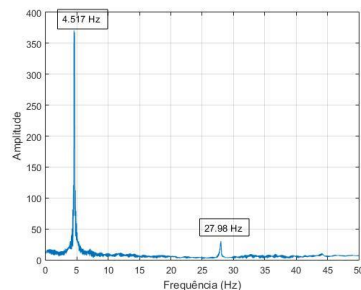


c) ED6.3

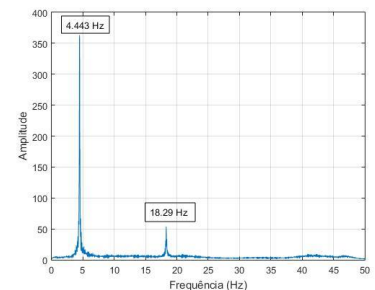
Figura A5. 11 - Espetros de frequência no ED6 (A-N1).



a) ED6.1

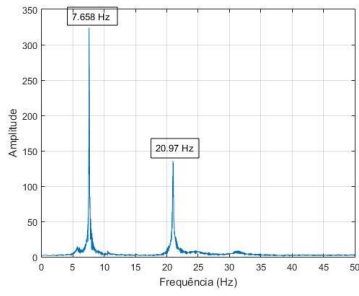


b) ED6.2

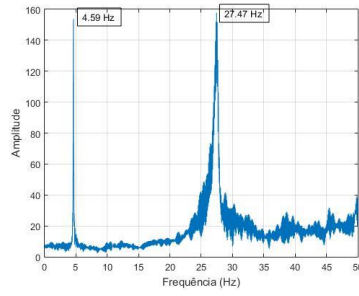


c) ED6.3

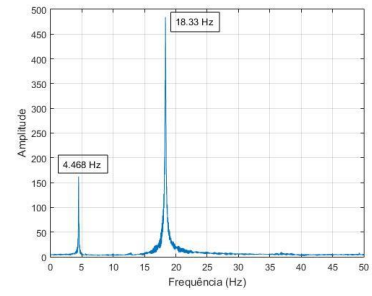
Figura A5. 12 - Espetros de frequência no ED6 (A-N2).



a) ED7.1

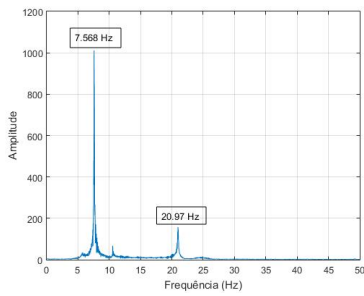


b) ED7.2

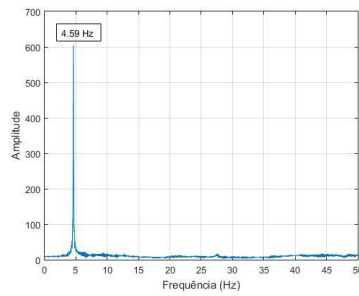


c) ED7.3

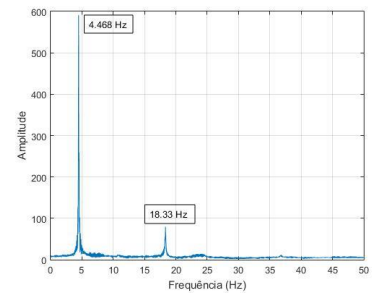
Figura A5. 13 - Espectros de frequência no ED7 (A-N1).



a) ED7.1

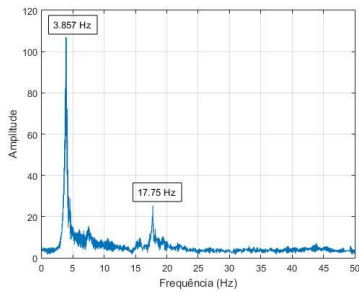


b) ED7.2

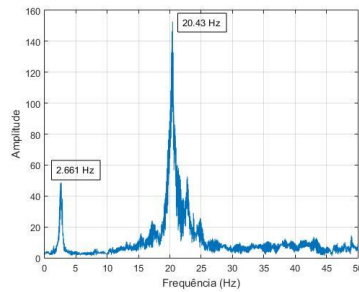


c) ED7.3

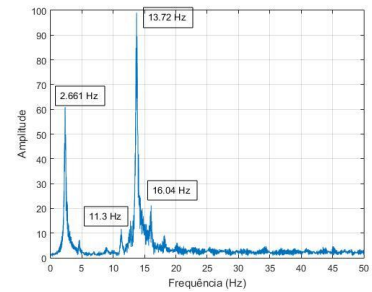
Figura A5. 14 - Espectros de frequência no ED7 (A-N2).



a) ED8.1

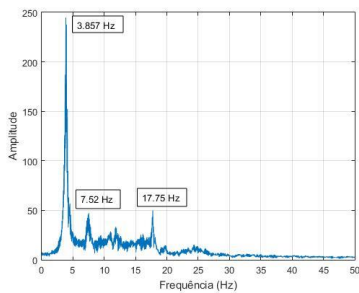


b) ED8.2

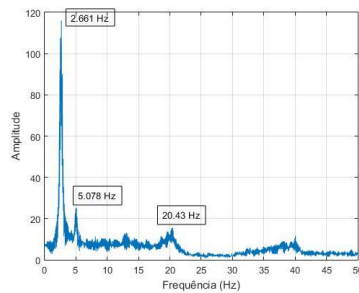


c) ED8.3

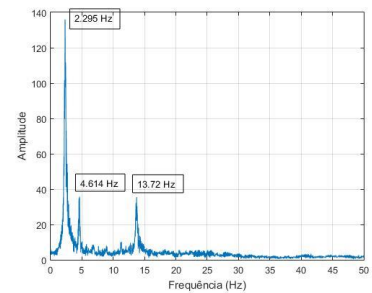
Figura A5. 15 - Espectros de frequência no ED8 (A-N1).



a) ED8.1

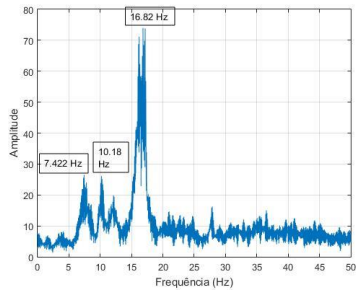


b) ED8.2

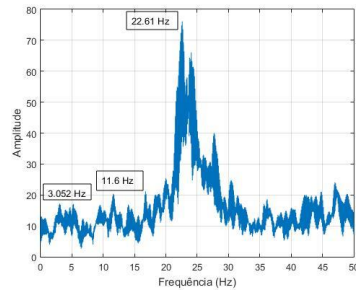


c) ED8.3

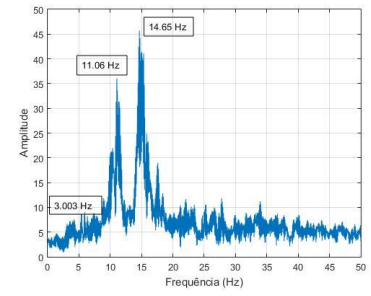
Figura A5. 16 - Espectros de frequência no ED8 (A-N2).



a) ED9.1

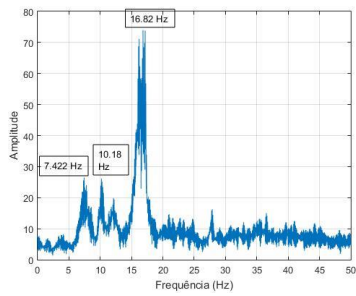


b) ED9.2

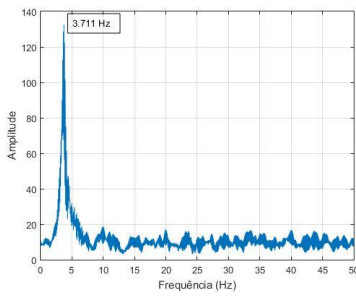


c) ED9.3

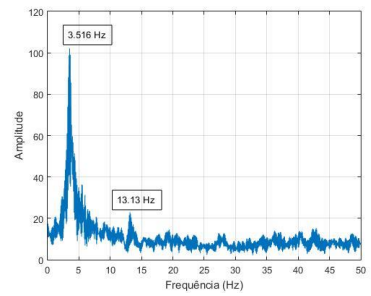
Figura A5. 17 - Espectros de frequência no ED9 (A-N1).



a) ED9.1



b) ED9.2



c) ED9.3

Figura A5. 18 - Espectros de frequência no ED9 (A-N2).

ANEXO VI – ANÁLISE ESTÁTICA DO MODELO NUMÉRICO DE BARRAS

Resultados dos deslocamentos:

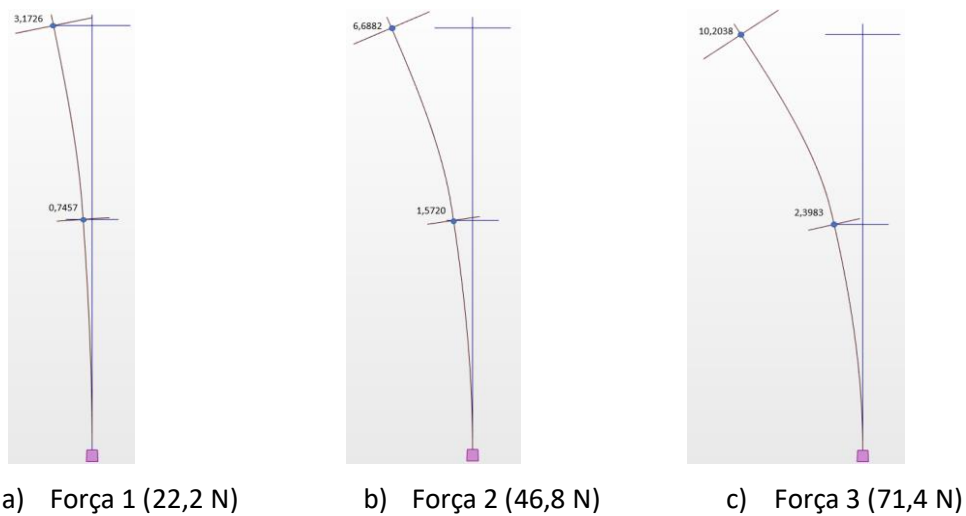


Figura A6. 1 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE1 (em mm).

Tabela A6. 1 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE1 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,746	3,173
2	46,8	1,572	6,688
3	71,4	2,398	10,204

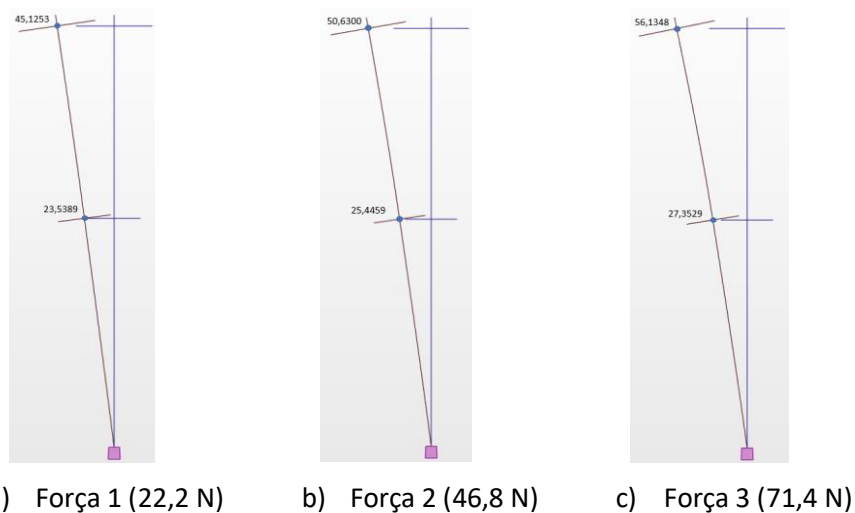
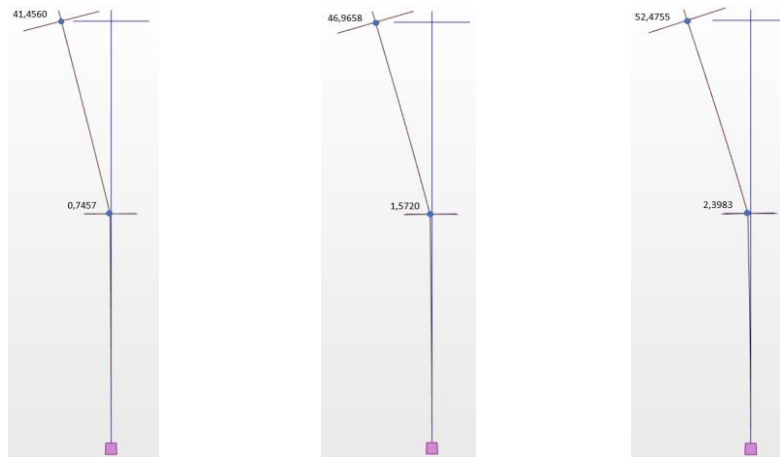


Figura A6. 2 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE2 (em mm).

Tabela A6. 2 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE2 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	23,539	45,125
2	46,8	25,446	50,630
3	71,4	27,353	56,135

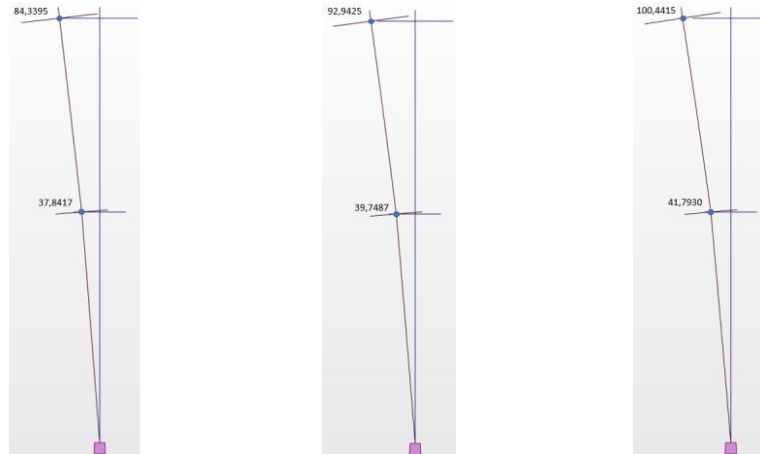


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 3 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE3 (em mm).

Tabela A6. 3 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE3 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,746	41,456
2	46,8	1,572	46,966
3	71,4	2,398	52,476

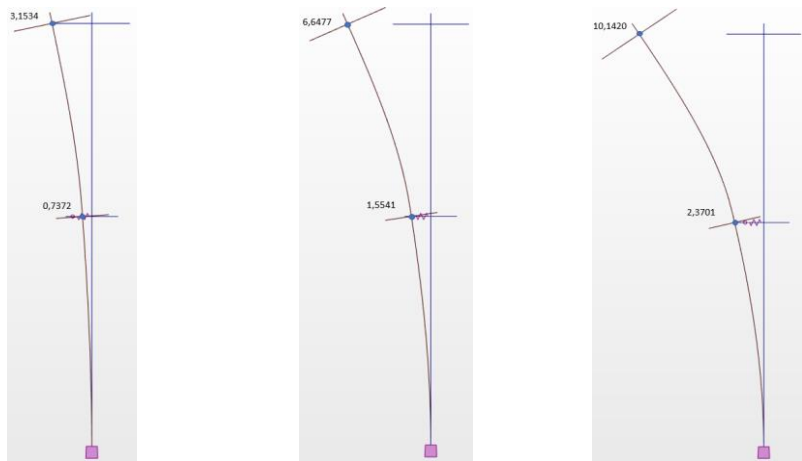


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 4 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE4 (em mm).

Tabela A6. 4 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE4 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	37,842	84,340
2	46,8	39,749	92,943
3	71,4	41,793	100,442

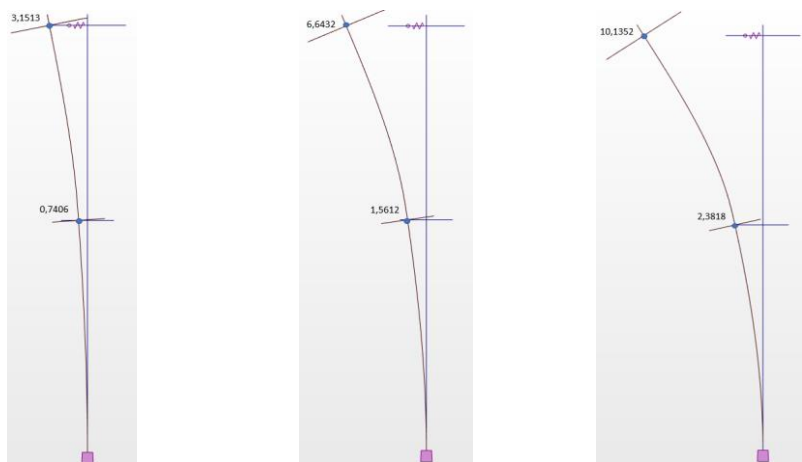


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 5 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE5 (em mm).

Tabela A6. 5 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE5 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,737	3,153
2	46,8	1,554	6,648
3	71,4	2,370	10,142

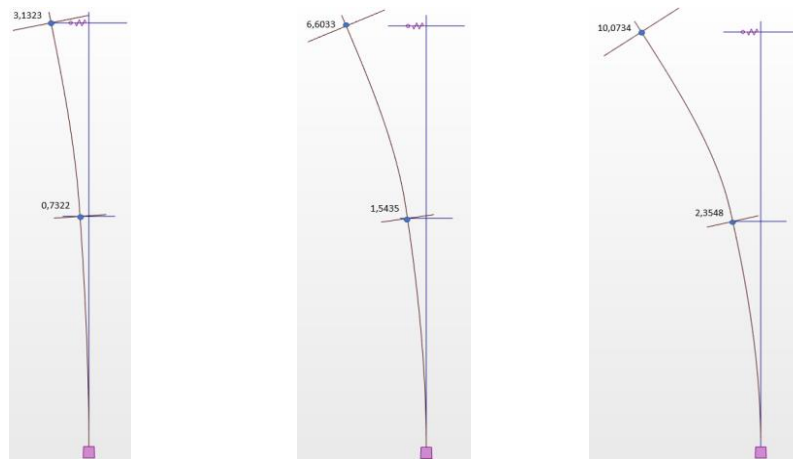


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 6 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE6 (em mm).

Tabela A6. 6 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE6 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,741	3,151
2	46,8	1,561	6,643
3	71,4	2,382	10,135

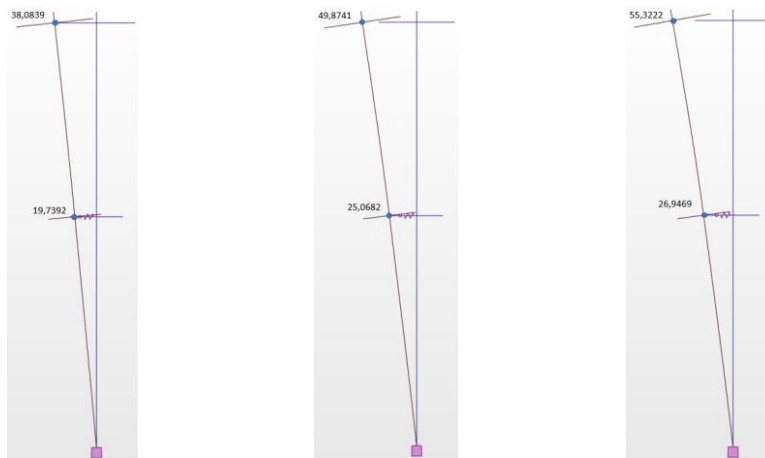


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 7 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE7 (em mm).

Tabela A6. 7 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE7 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,732	3,132
2	46,8	1,544	6,603
3	71,4	2,355	10,073

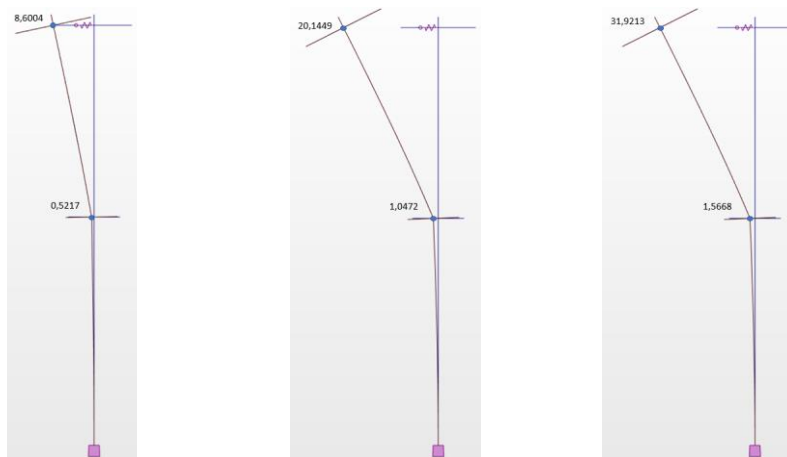


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 8 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE8 (em mm).

Tabela A6. 8 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE8 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	19,739	38,084
2	46,8	25,068	49,874
3	71,4	26,947	55,322



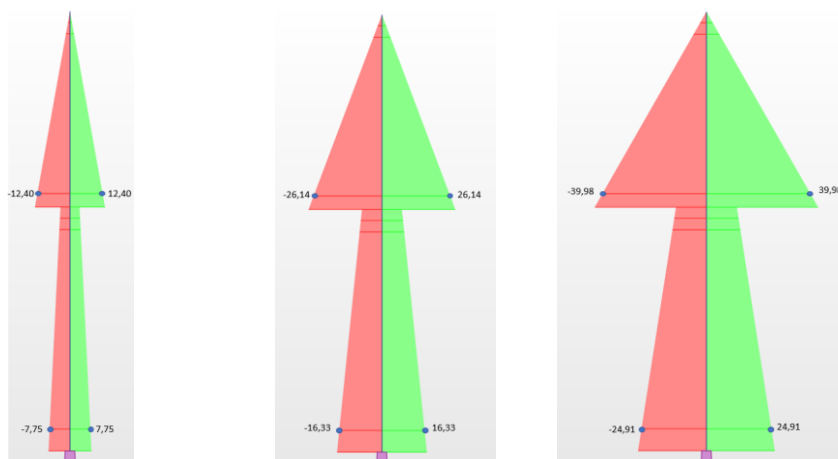
a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 9 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de barras representativo do EE9 (em mm).

Tabela A6. 9 - Deslocamentos do modelo de barras representativo do EE9 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,522	8,600
2	46,8	1,047	20,145
3	71,4	1,567	31,921

Extensões no modelo numérico de barras:



a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 10 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE1 (em MPa).

Tabela A6. 10 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,9	36,9	-59,0	59,0
2	46,8	-77,8	77,8	-124,5	124,5
3	71,4	-118,6	118,6	-190,4	190,4

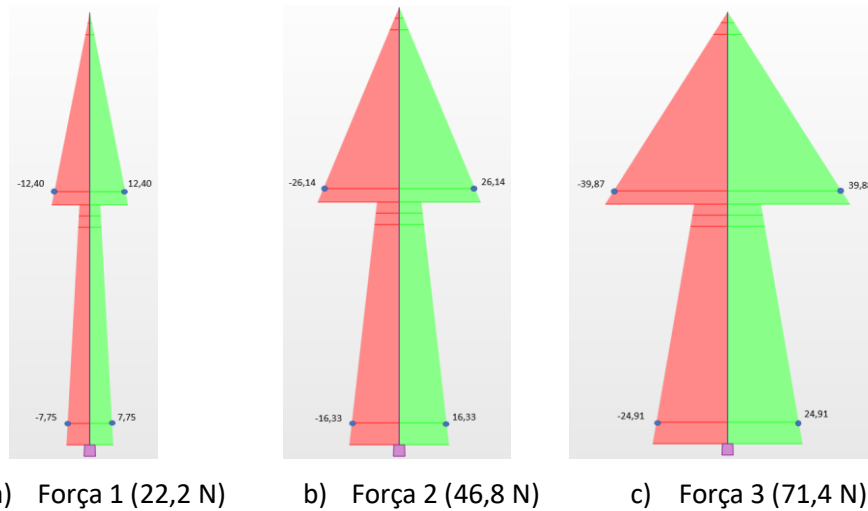


Figura A6. 11 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE2 (em MPa).

Tabela A6. 11 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,9	36,9	-59,0	59,0
2	46,8	-77,8	77,8	-124,5	124,5
3	71,4	-118,6	118,6	-189,9	189,9

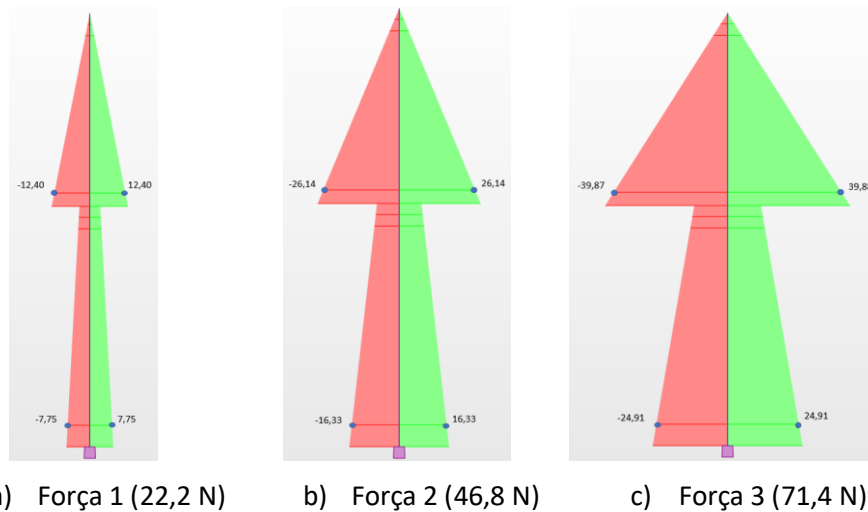


Figura A6. 12 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE3 (em MPa).

Tabela A6. 12 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,9	36,9	-59,0	59,0
2	46,8	-77,8	77,8	-124,5	124,5
3	71,4	-118,6	118,6	-189,9	189,9

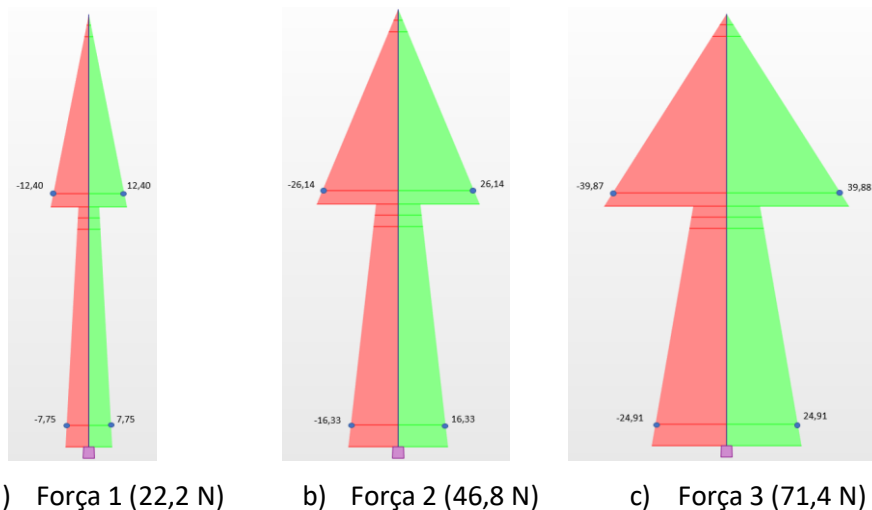


Figura A6. 13 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE4 (em MPa).

Tabela A6. 13 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,9	36,9	-59,0	59,0
2	46,8	-77,8	77,8	-124,5	124,5
3	71,4	-118,6	118,6	-189,9	189,9

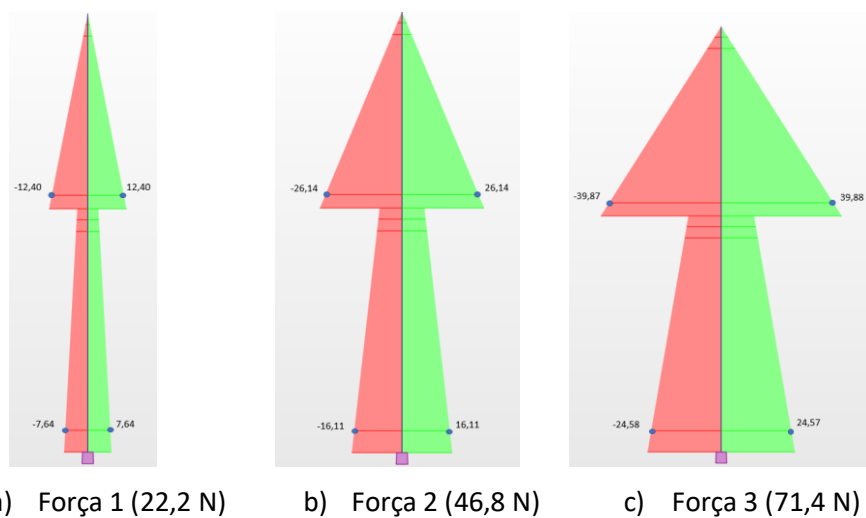


Figura A6. 14 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE5 (em MPa).

Tabela A6. 14 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1 ($\times 10^{-6}$)	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,4	36,4	-59,0	59,0
2	46,8	-76,7	76,7	-124,5	124,5
3	71,4	-117,0	117,0	-189,9	189,9

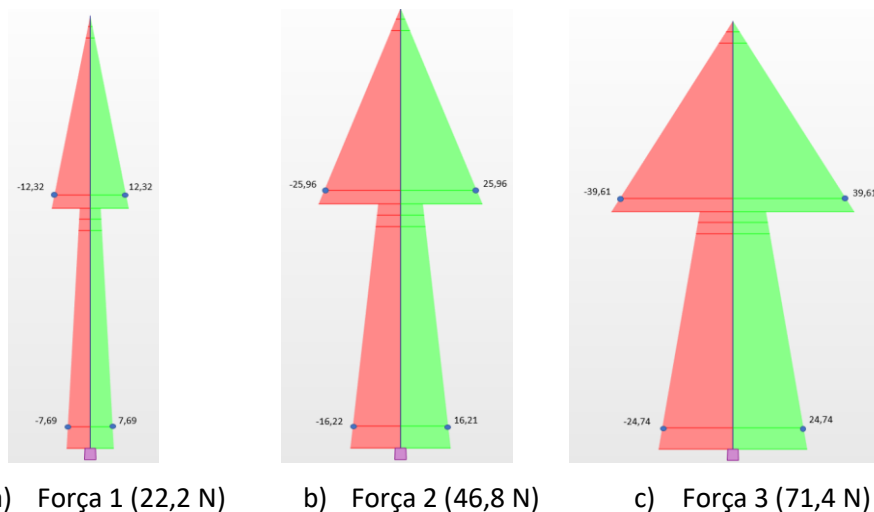


Figura A6. 15 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE6 (em MPa).

Tabela A6. 15 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1 ($\times 10^{-6}$)	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,6	36,6	-58,7	58,7
2	46,8	-76,2	77,2	-124,5	123,6
3	71,4	-117,8	117,8	-175,8	175,8

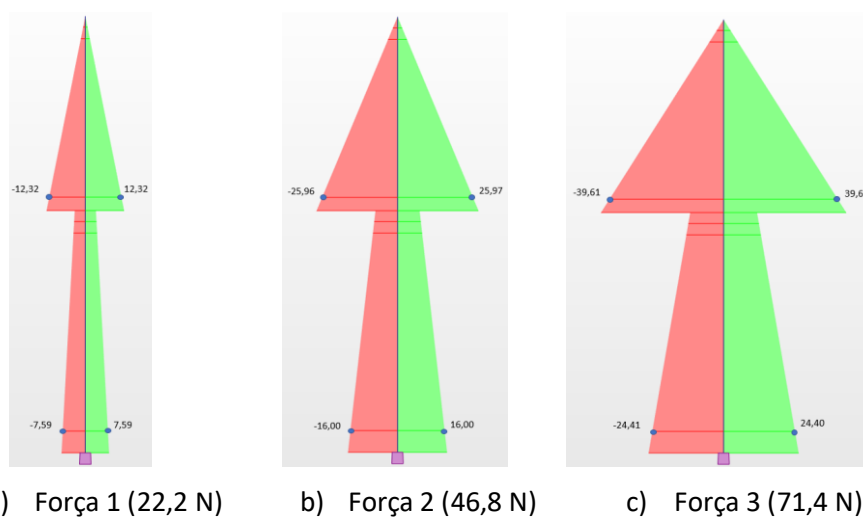
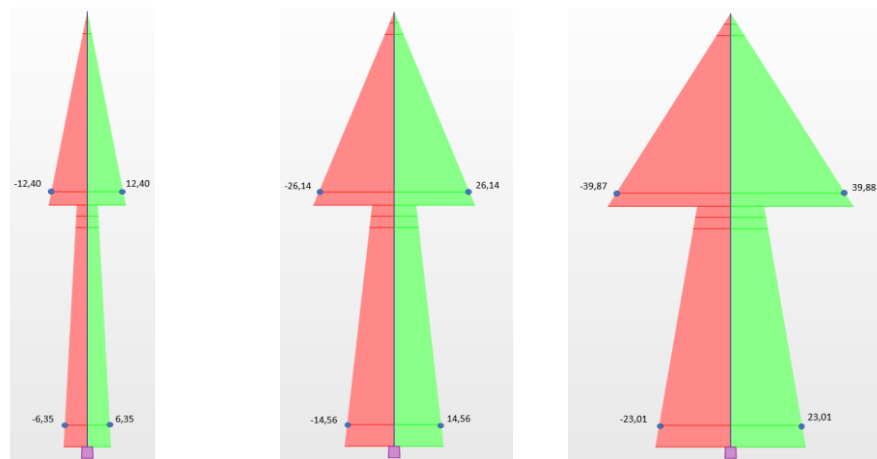


Figura A6. 16 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE7 (em MPa).

Tabela A6. 16 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-36,1	36,1	-58,6	58,7
2	46,8	-76,2	76,2	-123,6	123,7
3	71,4	-116,6	116,2	-188,6	188,6

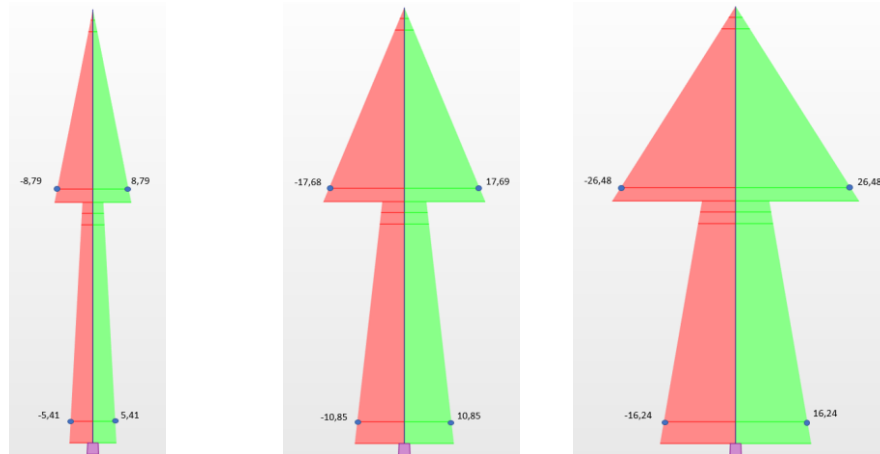


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 17 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE8 (em MPa).

Tabela A6. 17 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-30,2	30,2	-59,0	59,0
2	46,8	-69,3	69,3	-124,5	124,5
3	71,4	-110,0	110,0	-189,9	189,9



a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A6. 18 - Diagrama de tensões no modelo de barras representativo do EE9 (em MPa).

Tabela A6. 18 - Extensões obtidas no modelo de barras representativo do EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-25,8	25,8	-47,9	47,9
2	46,8	-51,7	51,7	-84,2	84,2
3	71,4	-77,3	77,3	-126,1	126,1

Rotações no modelo numérico de barras:

Tabela A6. 19 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE1 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-79,0	-228,4
2	46,8	-166,4	-481,4
3	71,4	-254,0	-734,4

Tabela A6. 20 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE2 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-1430,9	-1580,3
2	46,8	-1582,5	-1897,4
3	71,4	-1734,1	-2214,6

Tabela A6. 21 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE3 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-79,0	-2929,7
2	46,8	-166,5	-3323,4
3	71,4	-254,0	-3717,2

Tabela A6. 22 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE4 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-2279,2	-3338,0
2	46,8	-2430,8	-3873,8
3	71,4	-2582,5	-4331,7

Tabela A6. 23 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE5 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-78,2	227,6
2	46,8	-164,9	479,8
3	71,4	-251,6	732,0

Tabela A6. 24 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE6 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-78,4	-226,9
2	46,8	-165,3	-478,3
3	71,4	-252,3	-729,7

Tabela A6. 25 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE7 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	0,0222	-77,7	-226,1
2	0,0468	-163,8	-476,7
3	0,0714	-249,9	-727,3

Tabela A6. 26 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE8 (em m°).

Força	Força acumulada (kN)	I-N1	I-N2
1	22,2	-1202,2	-1351,5
2	46,8	-1555,8	-1870,7
3	71,4	-1705,4	-2185,9

Tabela A6. 27 - Rotações obtidas no modelo de barras representativo do EE9 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-55,3	-612,0
2	46,8	-111,1	-1432,5
3	71,4	-166,3	2269,4

ANEXO VII – ANÁLISE MODAL DO MODELO NUMÉRICO DE BARRAS

Massas no nível 1:

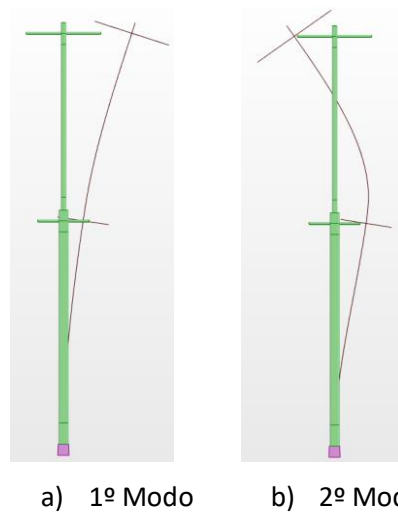


Figura A7. 1 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED1.1.

Tabela A7. 1 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,07	0,12
2	22,27	0,04

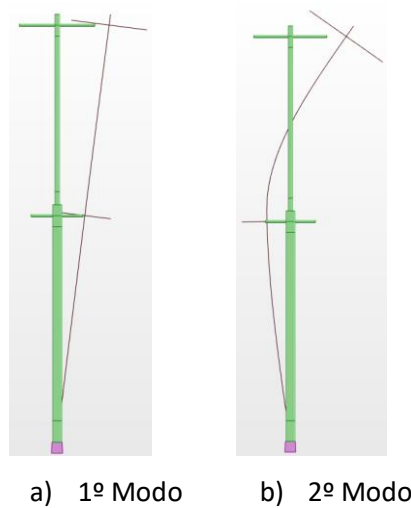


Figura A7. 2 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED2.1.

Tabela A7. 2 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,59	0,62
2	17,63	0,06

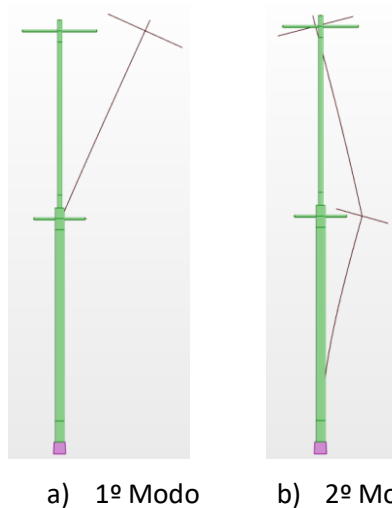


Figura A7. 3 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED3.1.

Tabela A7. 3 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,55	0,39
2	13,91	0,07

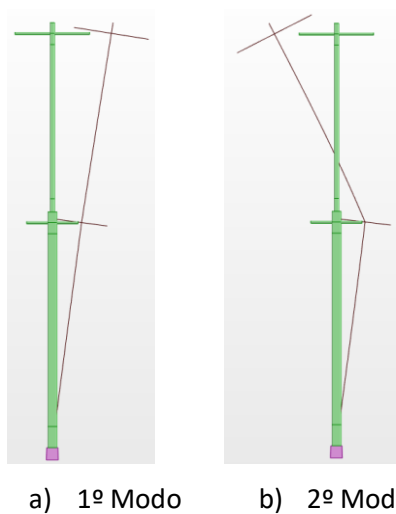


Figura A7. 4 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED4.1.

Tabela A7. 4 - Valores das frequências naturais representativos do ED4.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,25	0,8
2	5,96	0,17

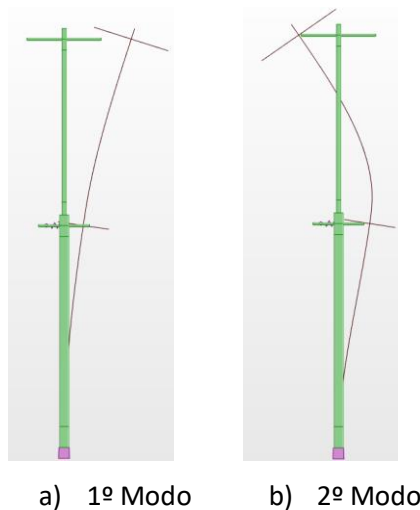


Figura A7. 5 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED5.1.

Tabela A7. 5 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,11	0,12
2	22,31	0,04

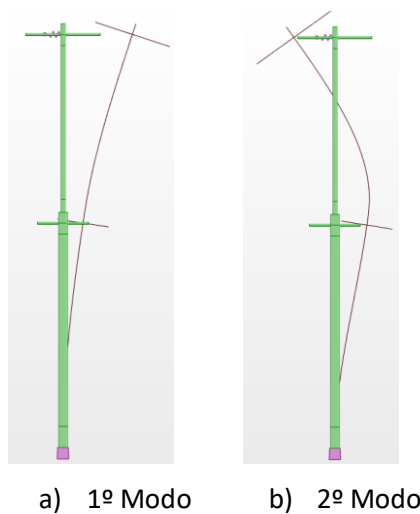


Figura A7. 6 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED6.1.

Tabela A7. 6 - Valores das frequências naturais representativos do ED6.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,10	0,12
2	22,28	0,04

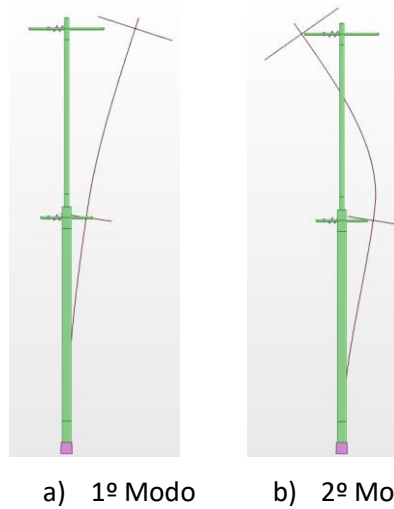


Figura A7. 7 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED7.1.

Tabela A7. 7 - Valores das frequências naturais representativos do ED7.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,14	0,12
2	22,31	0,04

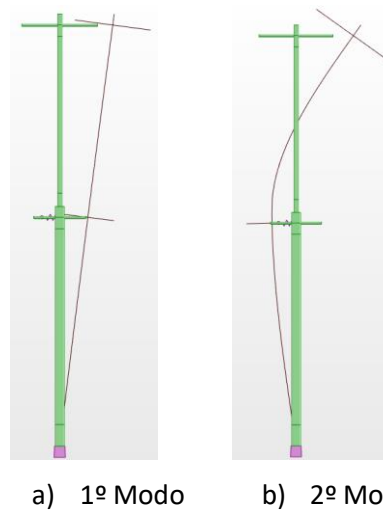


Figura A7. 8 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED8.1.

Tabela A7. 8 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,76	0,57
2	17,64	0,06

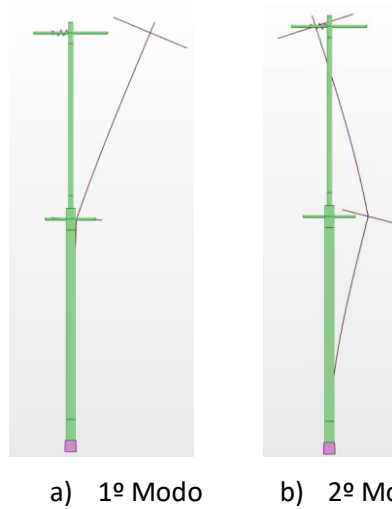


Figura A7. 9 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED9.1.

Tabela A7. 9 - Valores das frequências naturais representativos do ED9.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	5,56	0,18
2	14,81	0,07

Massas no nível 2:

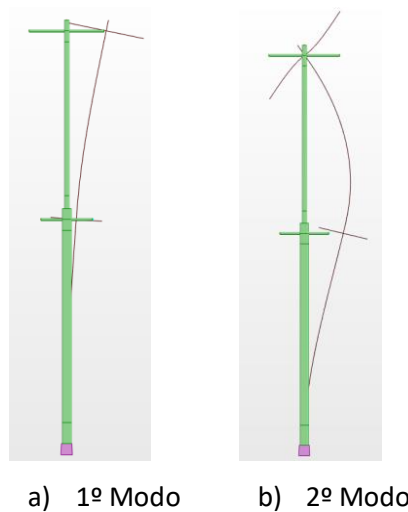
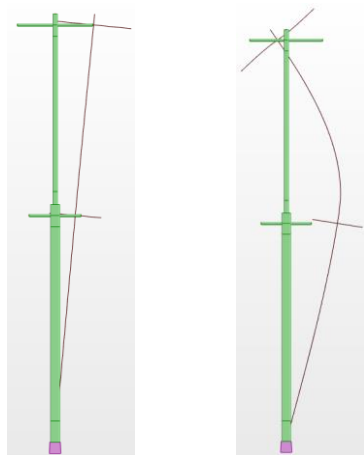


Figura A7. 10 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED1.2.

Tabela A7. 10 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,54	0,22
2	26,99	0,04

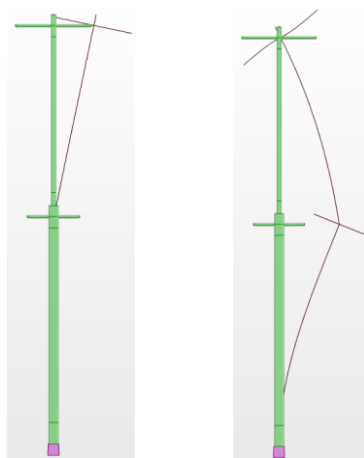


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 11 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED2.2.

Tabela A7. 11 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,13	0,88
2	12,82	0,08

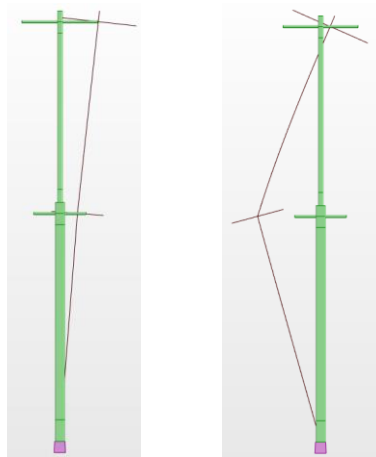


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 12 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED3.2.

Tabela A7. 12 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	23,53	0,04

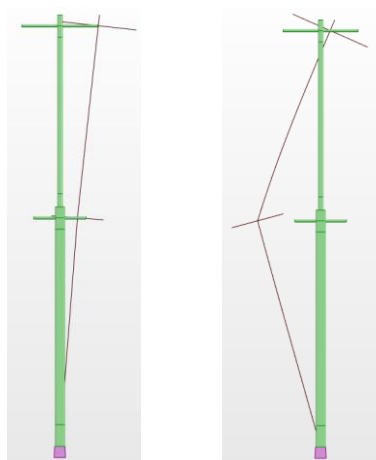


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 13 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED4.2.

Tabela A7. 13 - Valores das frequências naturais representativos do ED4.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,85	1,18
2	7,51	0,13



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 14 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED5.2.

Tabela A7. 14 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	5,56	0,22
2	27,03	0,04

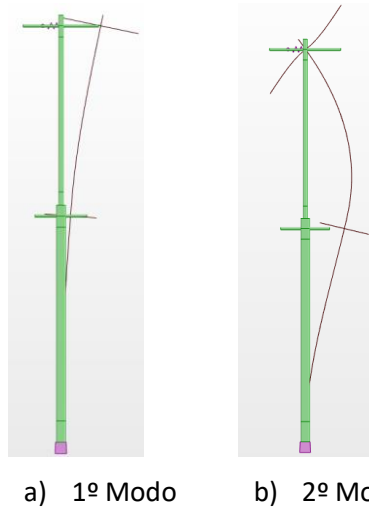


Figura A7. 15 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED6.2.

Tabela A7. 15 - Valores das frequências naturais representativos do ED6.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,56	0,22
2	26,99	0,04

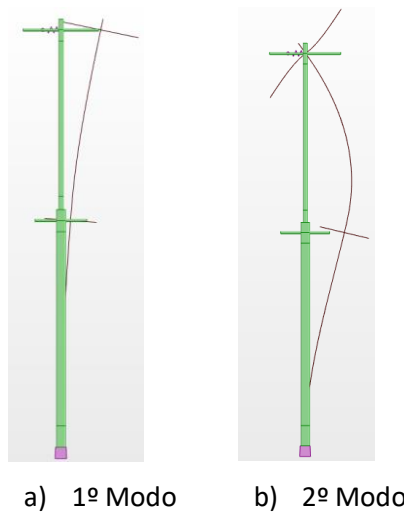
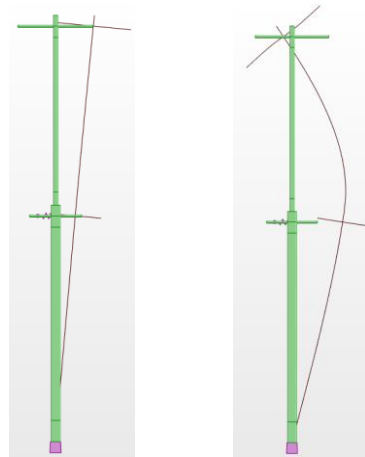


Figura A7. 16 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED7.2.

Tabela A7. 16 - Valores das frequências naturais representativos do ED7.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,57	0,22
2	27,03	0,04

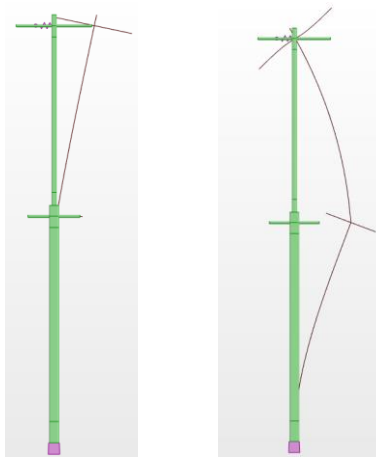


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 17 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED8.2.

Tabela A7. 17 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,25	0,8
2	18,88	0,05



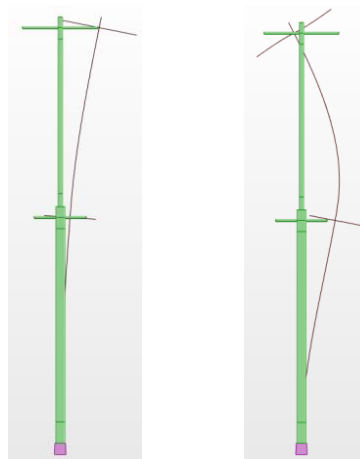
a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 18 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED9.2.

Tabela A7. 18 - Valores das frequências naturais representativos do ED9.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,79	0,36
2	24,25	0,04

Massas nos dois níveis:

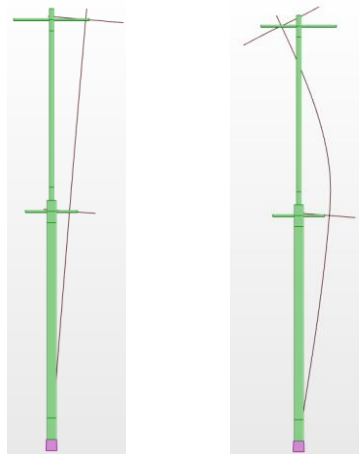


c) 1º Modo d) 2º Modo

Figura A7. 19 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED1.3.

Tabela A7. 19 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,44	0,23
2	19,06	0,05

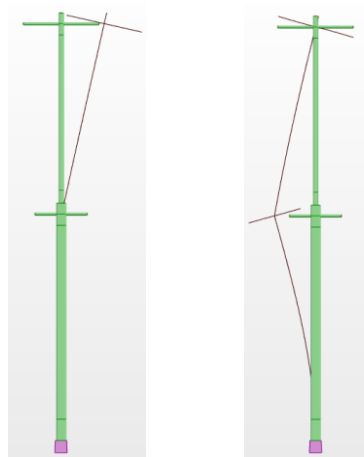


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 20 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED2.3.

Tabela A7. 20 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,04	0,96
2	12,92	0,08

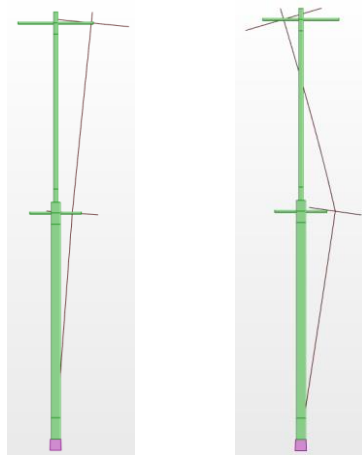


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 21 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED3.3.

Tabela A7. 21 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	13,75	0,07

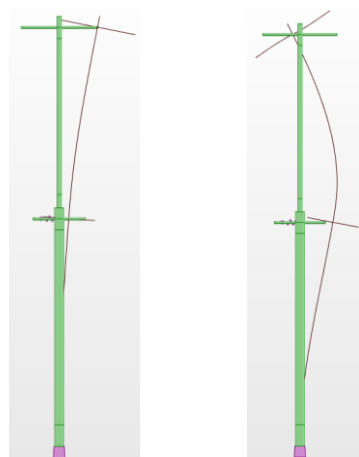


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 22 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED4.3.

Tabela A7. 22 - Valores das frequências naturais representativos do ED4.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,79	1,27
2	4,61	0,22

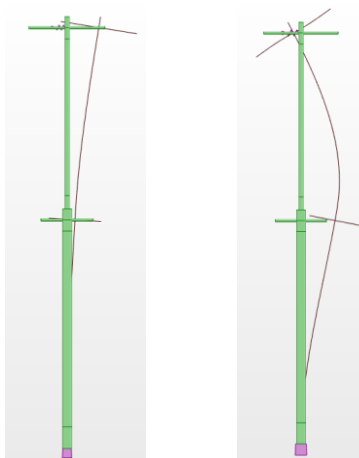


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 23 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED5.3.

Tabela A7. 23 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,46	0,22
2	19,11	0,05

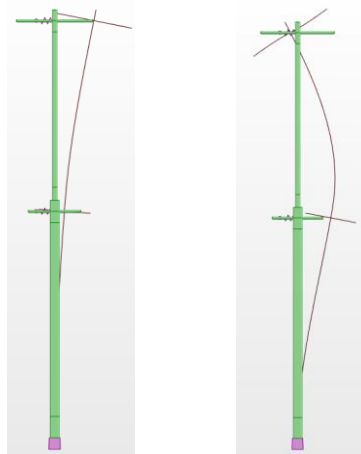


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 24 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED6.3.

Tabela A7. 24 - Valores das frequências naturais representativos do ED6.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,46	0,22
2	19,06	0,05

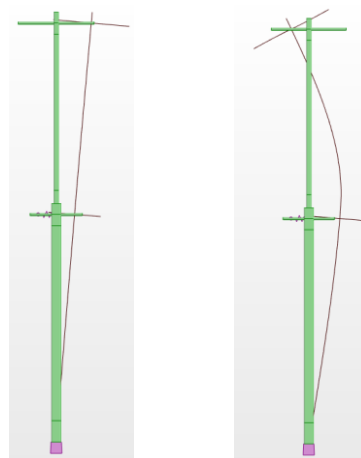


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 25 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED7.3.

Tabela A7. 25 - Valores das frequências naturais representativos do ED7.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,47	0,22
2	19,11	0,05

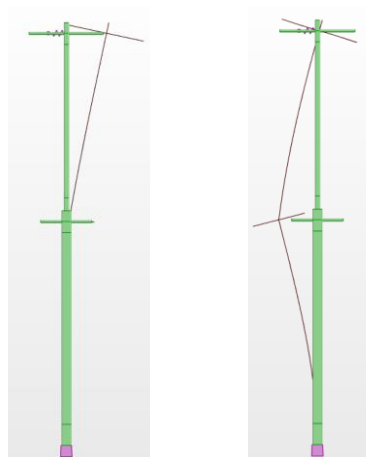


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A7. 26 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED8.3.

Tabela A7. 26 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,15	0,87
2	12,95	0,08



a) 1º Modo

b) 2º Modo

Figura A7. 27 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED9.3.

Tabela A7. 27 - Valores das frequências naturais representativos do ED9.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,78	0,36
2	14,47	0,07

**ANEXO VIII – ANÁLISE ESTÁTICA DO MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS
FINITOS DE CASCA**

Resultados dos deslocamentos:

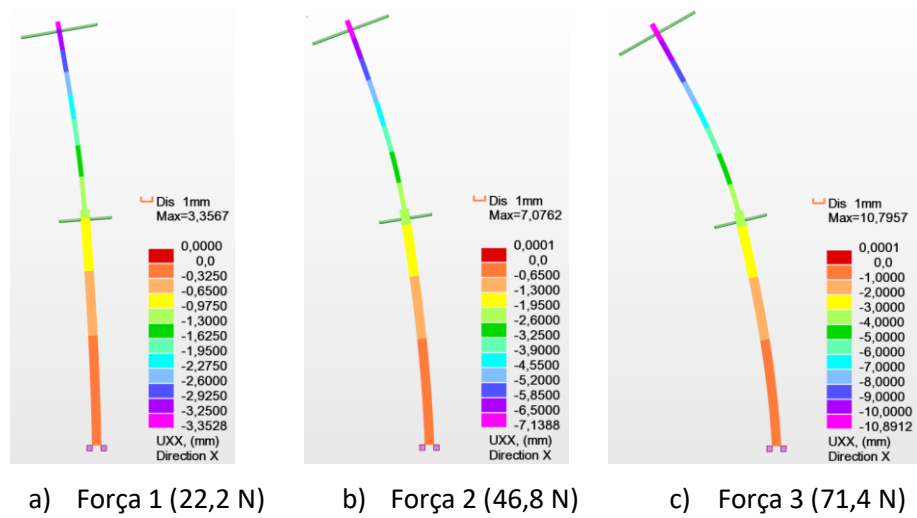


Figura A8. 1 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE1 (em mm).

Tabela A8. 1 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE1 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,970	3,219
2	46,8	2,046	6,786
3	71,4	3,121	10,354

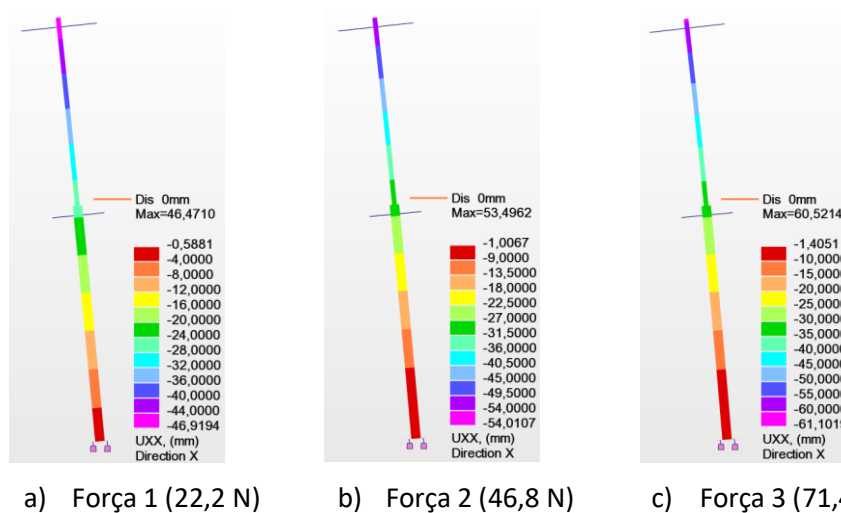


Figura A8. 2 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE2 (em mm).

Tabela A8. 2 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE2 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	24,168	45,300
2	46,8	27,186	52,085
3	71,4	30,204	58,869

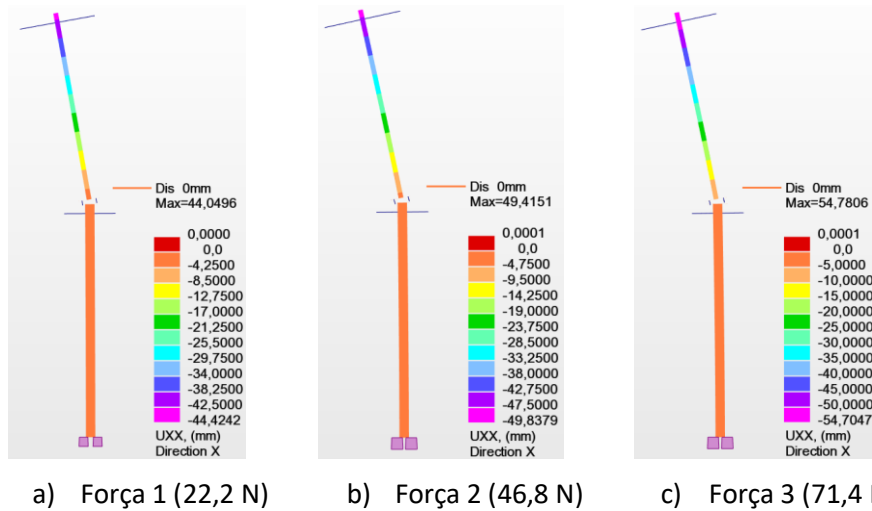


Figura A8. 3 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE3 (em mm).

Tabela A8. 3 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE3 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	0,0222	0,975	41,722
2	0,0468	2,056	46,854
3	0,0714	3,137	51,981

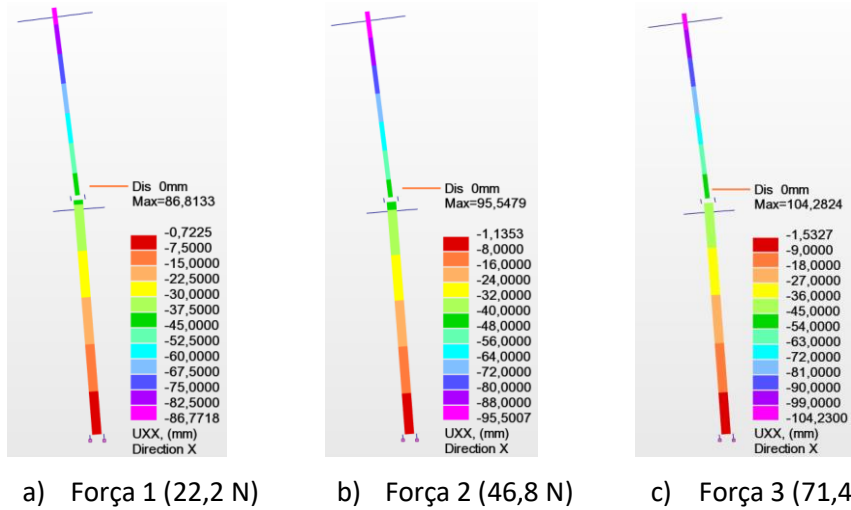
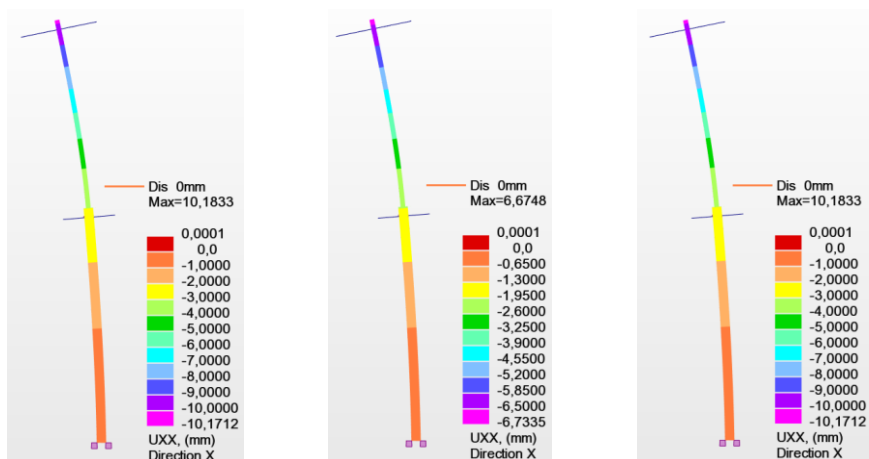


Figura A8. 4 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE4 (em mm).

Tabela A8. 4 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE4 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	36,611	84,235
2	46,8	39,660	92,664
3	71,4	42,709	101,093

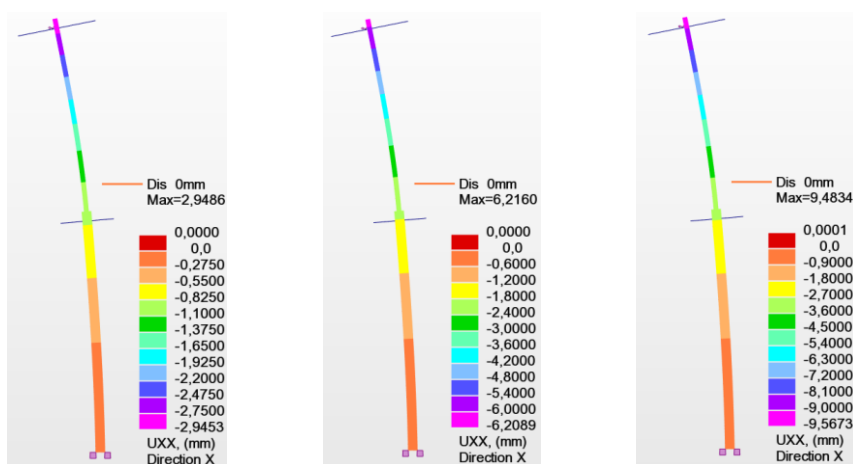


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 5 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE5 (em mm).

Tabela A8. 5 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE5 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,874	3,016
2	46,8	1,843	6,358
3	71,4	2,811	9,700

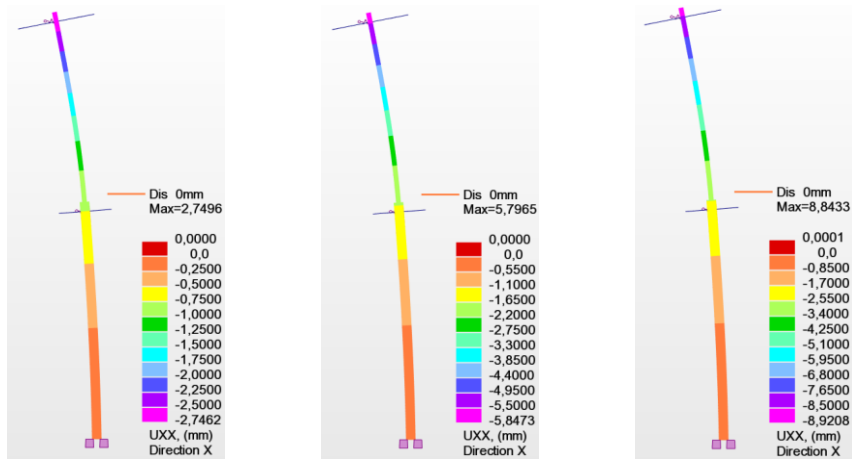


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 6 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE6 (em mm).

Tabela A8. 6 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE6 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,844	2,812
2	46,8	1,778	5,927
3	71,4	2,713	9,043

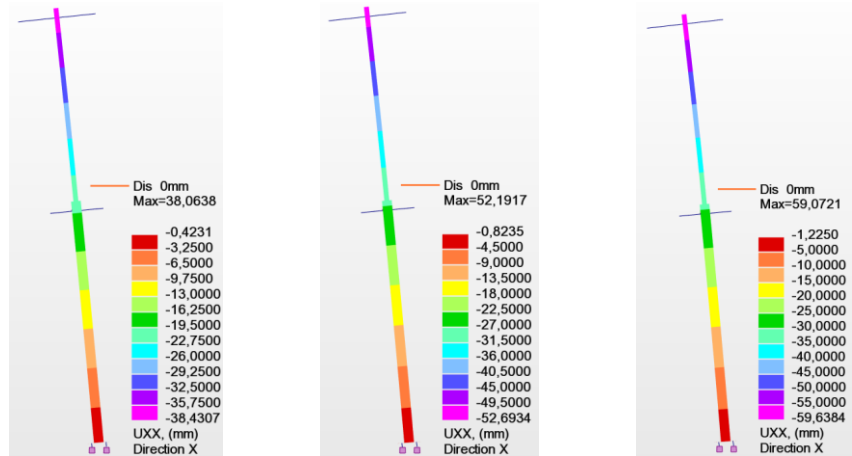


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 7 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE7 (em mm).

Tabela A8. 7 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE7 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	0,0222	0,746	2,617
2	0,0468	1,586	5,518
3	0,0714	2,319	8,419

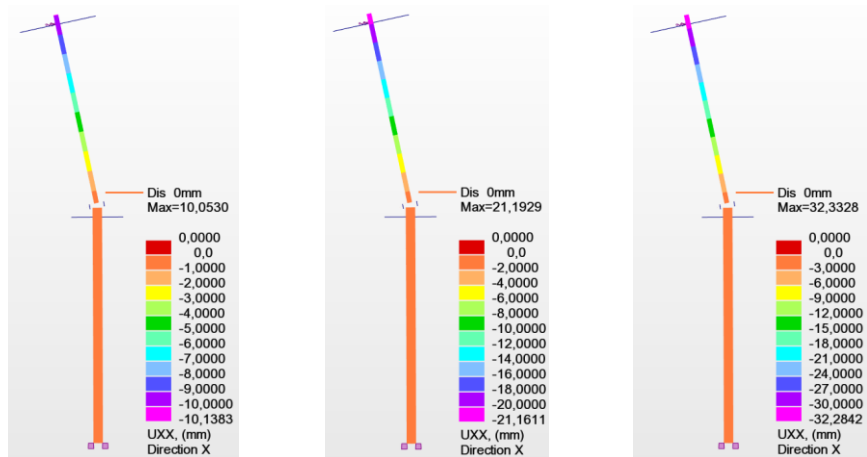


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 8 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE8 (em mm).

Tabela A8. 8 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE8 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	19,640	37,091
2	46,8	26,441	50,808
3	71,4	29,376	57,452



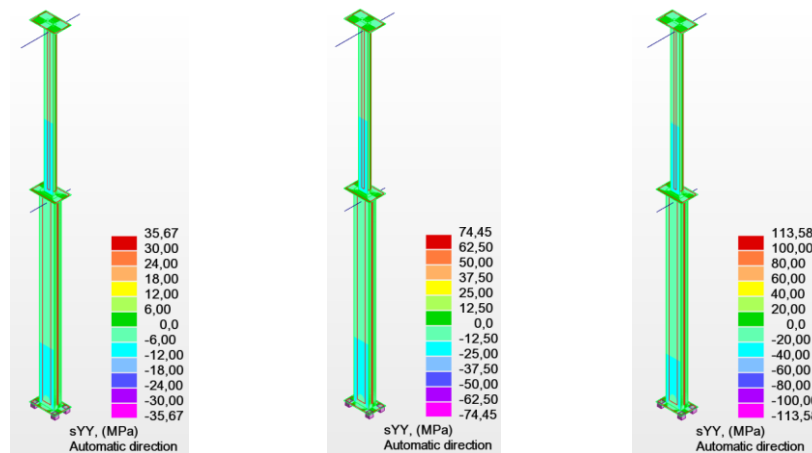
a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 9 - Deformada da estrutura obtida pelo modelo de casca representativo do EE9 (em mm).

Tabela A8. 9 - Deslocamentos do modelo de casca representativo do EE9 (em mm).

Força	Força acumulada (N)	LVDT-N1	LVDT-N2
1	22,2	0,199	9,517
2	46,8	0,419	20,064
3	71,4	0,634	30,610

Extensões no modelo numérico de barras:

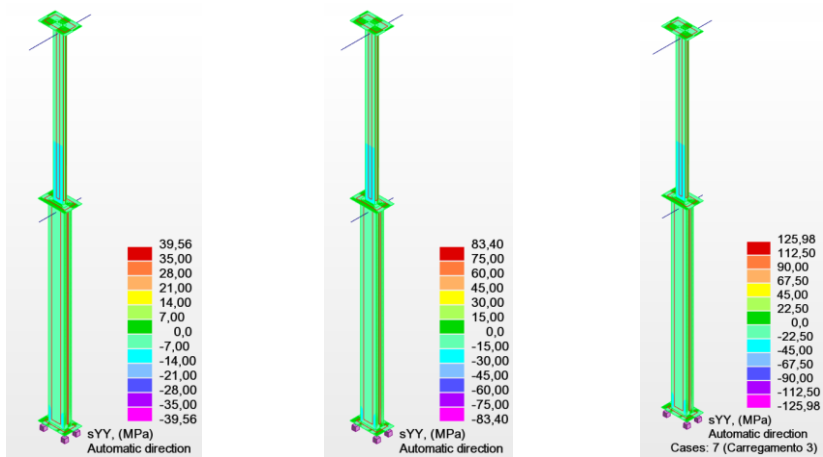


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 10 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE1 (em MPa).

Tabela A8. 10 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-31,8	31,8	-47,0	47,0
2	46,8	-67,1	67,1	-99,0	99,0
3	71,4	-102,2	102,2	-151,1	151,1

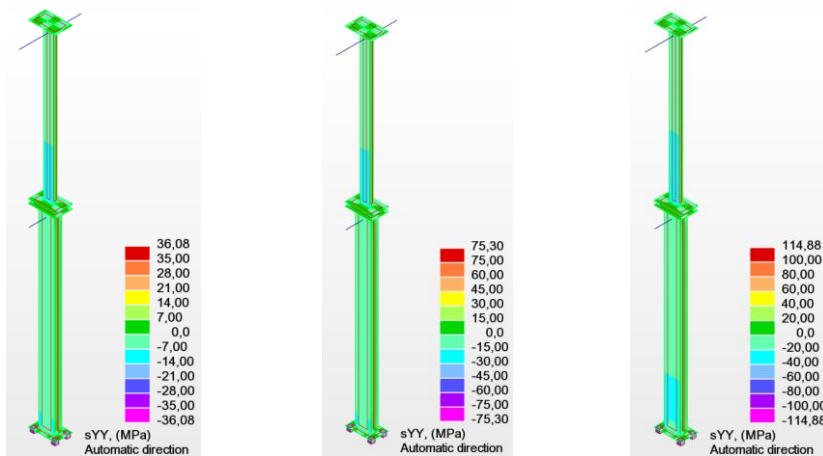


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 11 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE2 (em MPa).

Tabela A8. 11 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-31,8	31,8	-47,0	47,0
2	46,8	-66,7	66,8	-99,1	99,1
3	71,4	-101,9	101,9	-151,1	151,1

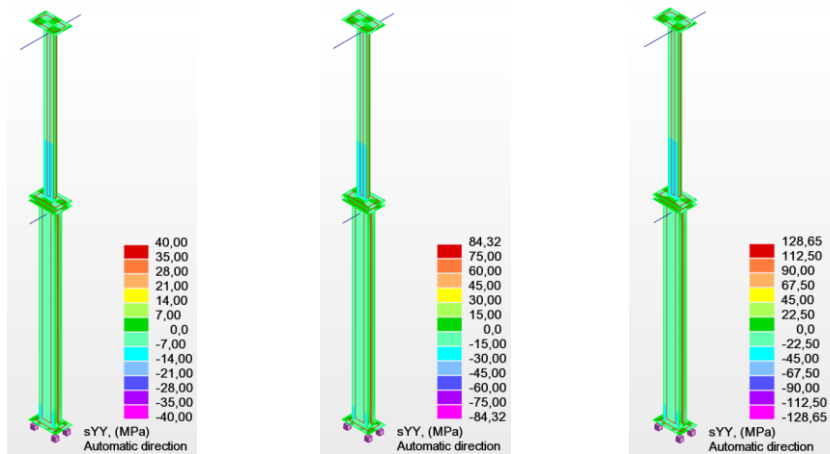


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 12 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE3 (em MPa).

Tabela A8. 12 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-31,8	31,8	-46,4	46,4
2	46,8	-67,0	67,0	-97,8	97,8
3	71,4	-101,9	101,9	-149,1	149,1

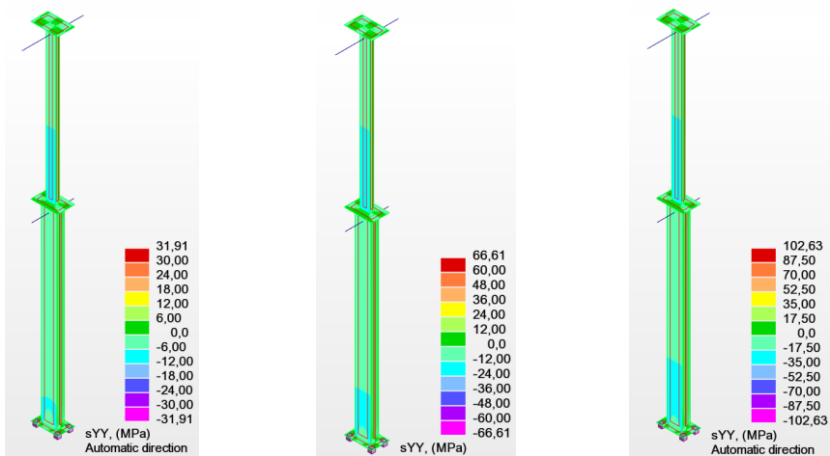


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 13 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE4 (em MPa).

Tabela A8. 13 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-31,5	31,5	-46,3	46,3
2	46,8	-66,4	66,4	-97,5	97,6
3	71,4	-101,3	101,3	-148,9	148,9

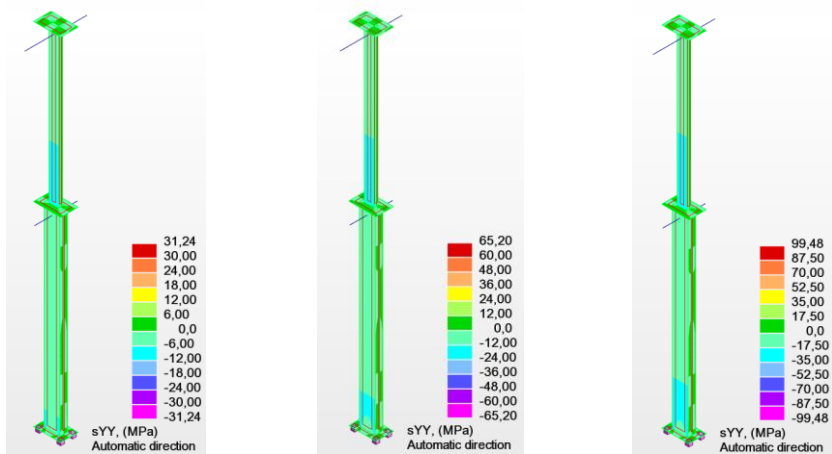


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 14 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE5 (em MPa).

Tabela A8. 14 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-28,5	28,5	-45,9	45,9
2	46,8	-60,8	60,8	-96,7	96,7
3	71,4	-92,8	92,8	-147,6	147,6

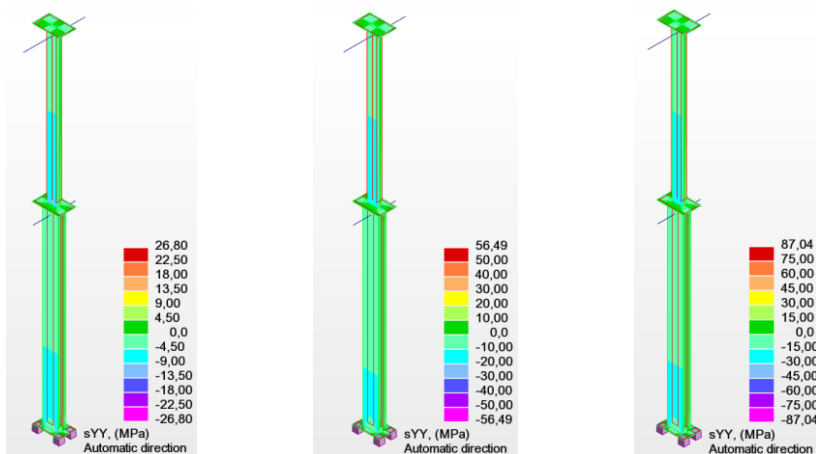


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 15 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE6 (em MPa).

Tabela A8. 15 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-28,0	28,0	-45,9	45,9
2	46,8	-59,0	59,0	-96,7	96,7
3	71,4	-89,6	89,6	-147,6	147,6

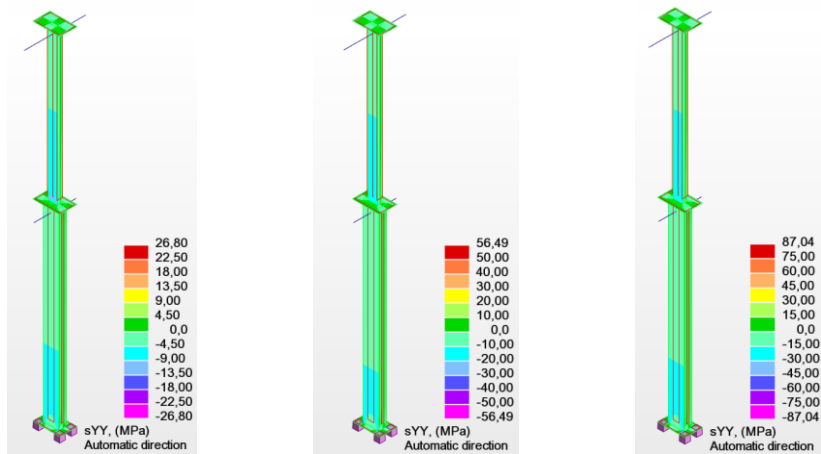


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 16 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE7 (em MPa).

Tabela A8. 16 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-24,5	24,5	-41,7	41,7
2	46,8	-51,7	51,7	-88,0	88,0
3	71,4	-82,9	82,9	-139,0	139,0

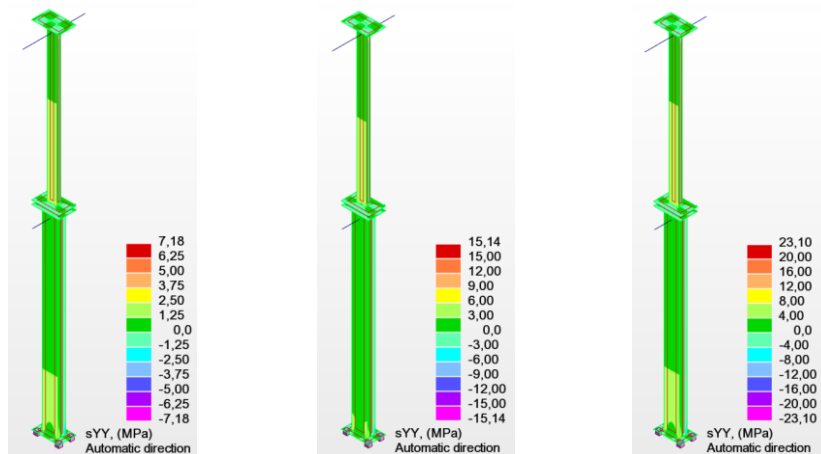


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 17 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE8 (em MPa).

Tabela A8. 17 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-24,2	24,2	-46,6	46,6
2	46,8	-54,5	54,5	-98,3	98,3
3	71,4	-86,1	86,1	-150,0	1450,0



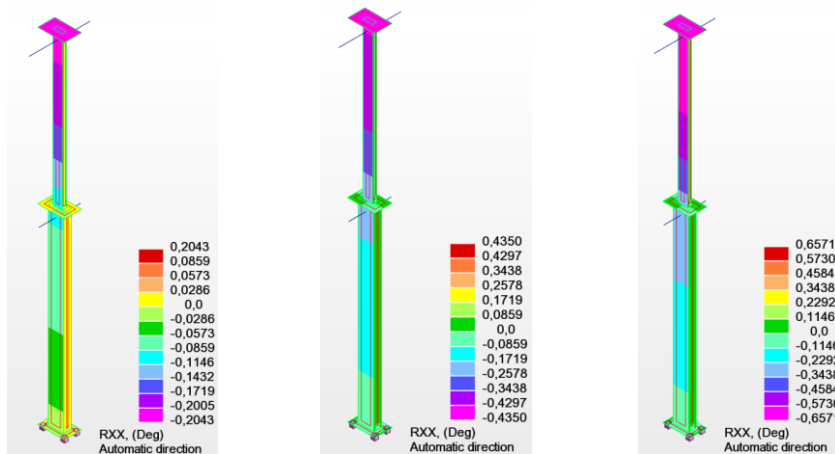
a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 18 - Diagrama de tensões no modelo de casca representativo do EE9 (em MPa).

Tabela A8. 18 - Extensões obtidas no modelo de casca representativo do EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Força	Força acumulada (N)	E-N0-1	E-N0-2	E-N1-1	E-N1-2
1	22,2	-6,6	6,6	-10,5	10,5
2	46,8	-13,8	13,8	-22,1	22,1
3	71,4	-21,1	21,1	-33,9	33,9

Rotações no modelo numérico de casca:

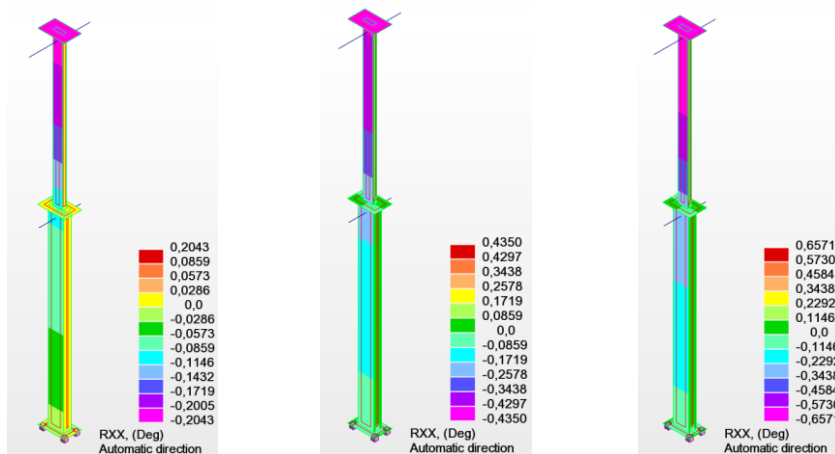


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 19 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE1 (em graus).

Tabela A8. 19 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE1 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-87,7	-204,1
2	46,8	-184,8	-430,3
3	71,4	-282,2	-656,5

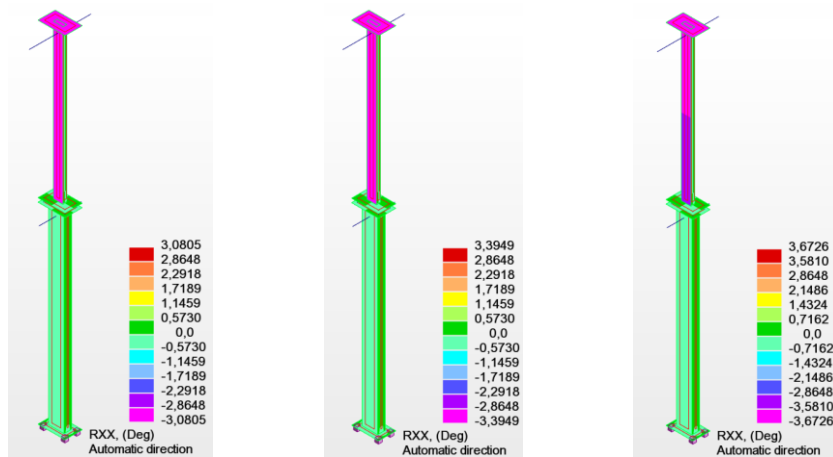


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 20 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE2 (em graus).

Tabela A8. 20 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE2 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-1441,3	-1557,2
2	46,8	-1630,3	-1875,4
3	71,4	-1819,1	-2193,7

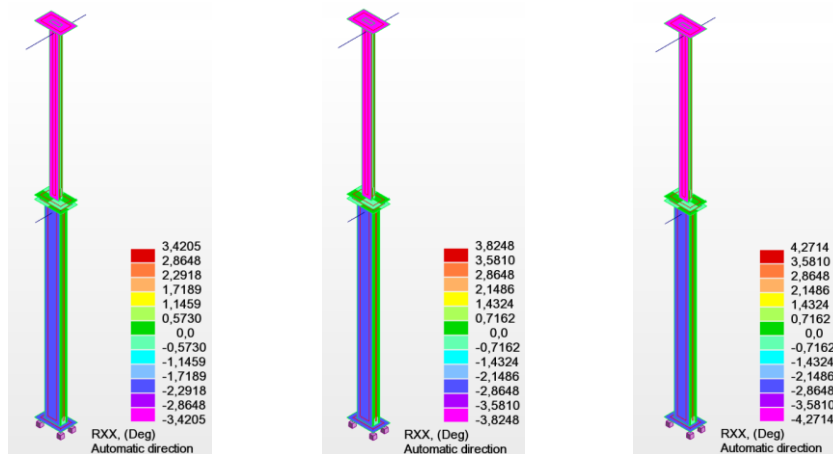


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 21 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE3 (em graus).

Tabela A8. 21 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE3 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-89,3	-3049,7
2	46,8	-188,2	-3360,7
3	71,4	-287,1	-3671,7

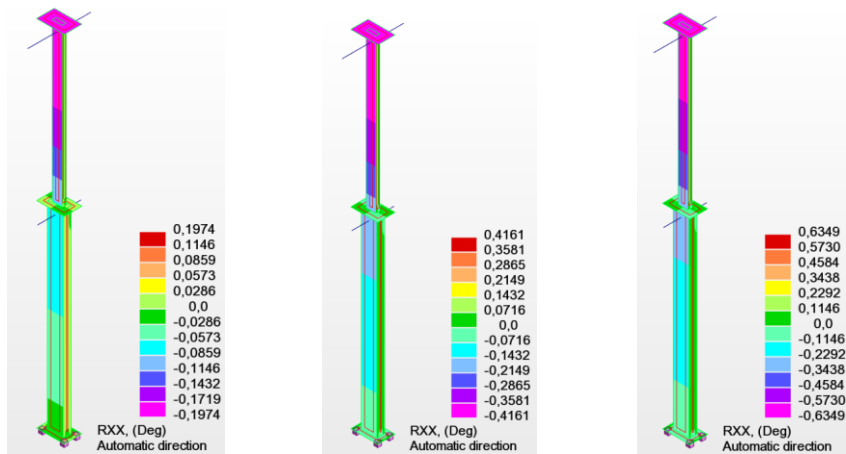


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 22 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE4 (em graus).

Tabela A8. 22 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE4 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-2178,9	-3420,2
2	46,8	-2370,5	-3824,2
3	71,4	-2562,5	-4228,3

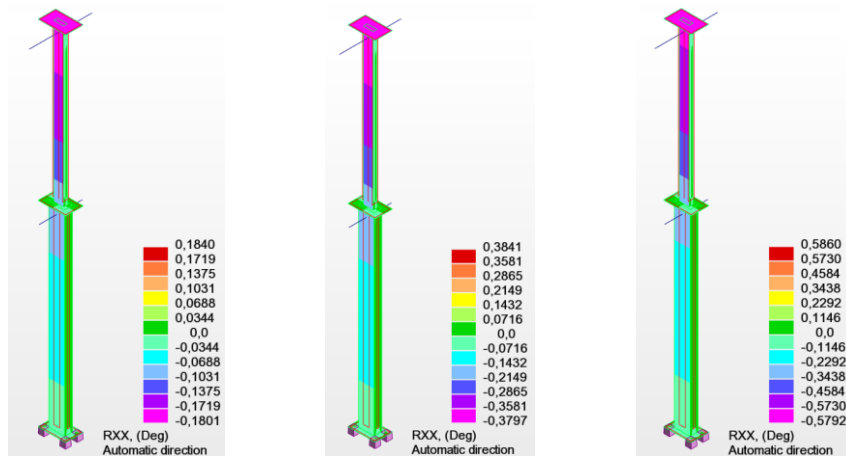


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 23 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE5 (em graus).

Tabela A8. 23 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE5 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-80,9	-197,1
2	46,8	-170,6	-415,6
3	71,4	-260,3	-634,0

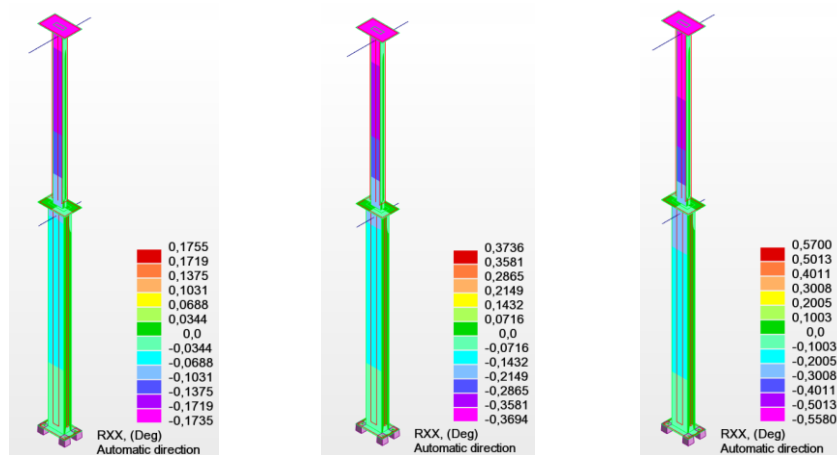


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 24 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE6 (em graus).

Tabela A8. 24 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE6 (em mo).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-76,7	-179,8
2	46,8	-161,7	-379,1
3	71,4	-246,7	-578,4

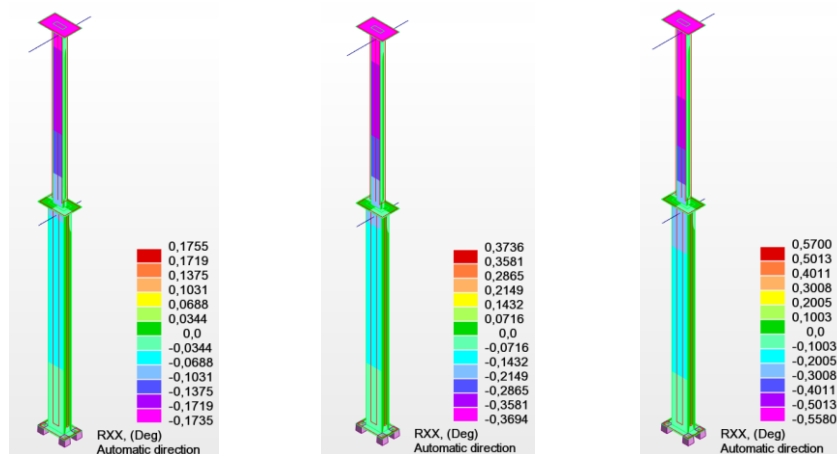


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 25 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE7 (em graus).

Tabela A8. 25 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE7 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-69,6	-173,3
2	46,8	-146,8	-365,2
3	71,4	-223,9	-557,2

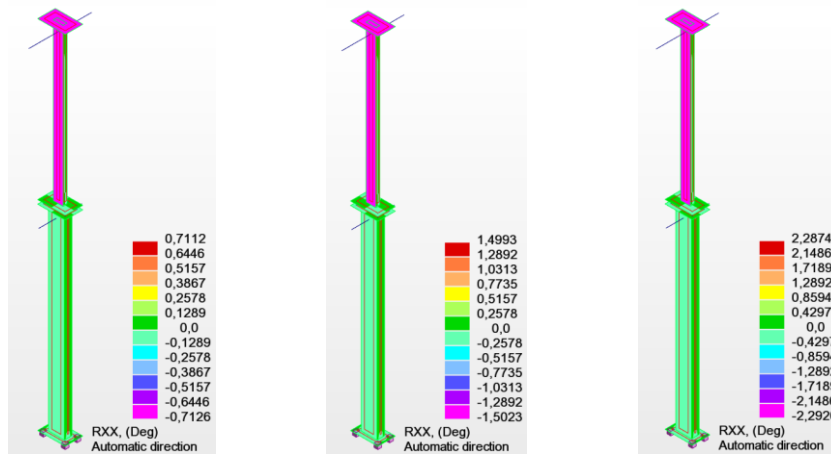


a) Força 1 (22,2 N) b) Força 2 (46,8 N) c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 26 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE8 (em graus).

Tabela A8. 26 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE8 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-1177,6	-1293,5
2	46,8	-1592,4	-1837,4
3	71,4	-1775,3	-2151,4



a) Força 1 (22,2 N)

b) Força 2 (46,8 N)

c) Força 3 (71,4 N)

Figura A8. 27 - Diagrama de rotações no modelo de casca representativo do EE9 (em graus).

Tabela A8. 27 - Rotações obtidas no modelo de casca representativo do EE9 (em m°).

Força	Força acumulada (N)	I-N1	I-N2
1	22,2	-18,4	-700,6
2	46,8	-38,8	-1476,9
3	71,4	-59,2	-2253,2

ANEXO IX – ANÁLISE MODAL DO MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS DE CASCA

Massas no nível 1:

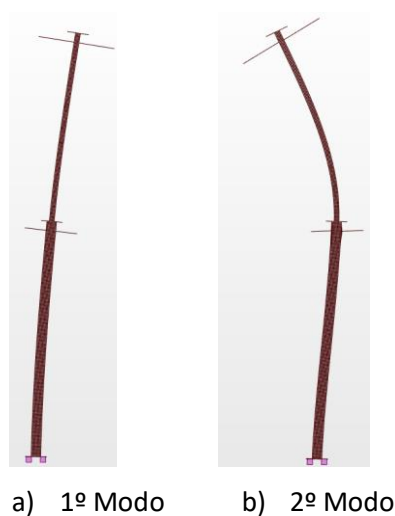


Figura A9. 1 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED1.1.

Tabela A9. 1 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	7,59	0,13
2	23,32	0,04



Figura A9. 2 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED2.1.

Tabela A9. 2 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,60	0,63
2	17,58	0,06



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 3 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED3.1.

Tabela A9. 3 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,59	0,39
2	11,75	0,09

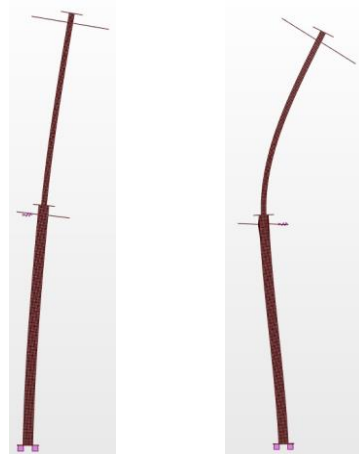


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 4 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED4.1.

Tabela A9. 4 - Valores das frequências naturais representativos do ED4.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	5,63	0,18

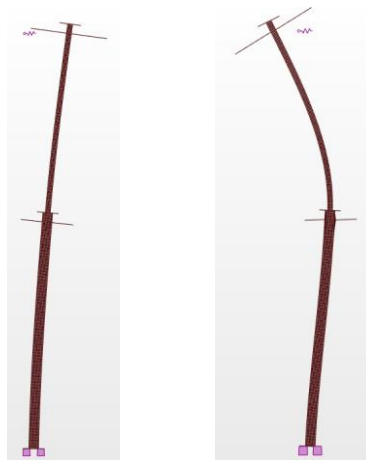


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 5 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED5.1.

Tabela A9. 5 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	7,91	0,13
2	23,49	0,04



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 6 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED6.1.

Tabela A9. 6 - Valores das frequências naturais representativos do ED6.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,06	0,12
2	23,43	0,04



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 7 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED7.1.

Tabela A9. 7 - Valores das frequências naturais representativos do ED7.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	8,50	0,12
2	23,67	0,04



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 8 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED8.1.

Tabela A9. 8 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,78	0,56
2	17,59	0,06



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 9 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 1 representativa do ED9.1.

Tabela A9. 9 - Valores das frequências naturais representativos do ED9.1.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	5,47	0,18
2	11,76	0,09

Massas no nível 2:



c) 1º Modo d) 2º Modo

Figura A9. 10 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED1.2.

Tabela A9. 10 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,49	0,22
2	33,64	0,03



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 11 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED2.2.

Tabela A9. 11 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,15	0,87
2	19,63	0,05



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 12 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED3.2.

Tabela A9. 12 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	20,67	0,05

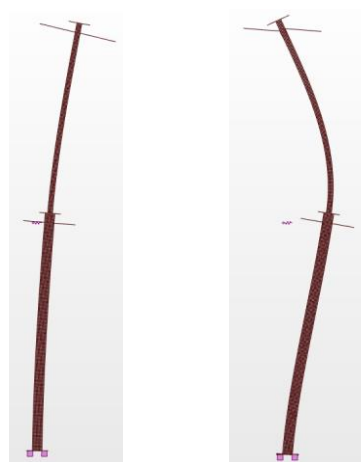


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 13 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED4.2.

Tabela A9. 13 - Valores das frequências naturais representativos do ED4.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,85	1,18
2	6,83	0,15



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 14 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED5.2.

Tabela A9. 14 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,63	0,22
2	31,19	0,03

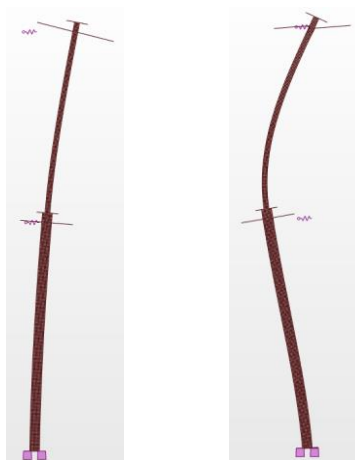


a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 15 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED6.2.

Tabela A9. 15 - Valores das frequências naturais representativos do ED6.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,79	0,21
2	33,64	0,03



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 16 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED7.2.

Tabela A9. 16 - Valores das frequências naturais representativos do ED7.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,98	0,20
2	34,41	0,03



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 17 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED8.2.

Tabela A9. 17 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,27	0,79
2	19,68	0,05



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 18 - Deformada dos modos de vibração para massas no nível 2 representativa do ED9.2.

Tabela A9. 18 - Valores das frequências naturais representativos do ED9.2.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,66	0,38
2	20,67	0,05

Massas nos dois níveis:

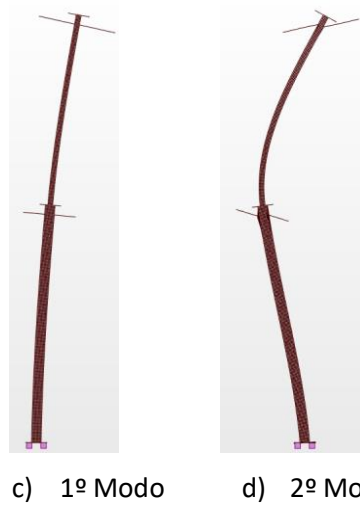


Figura A9. 19 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED1.3.

Tabela A9. 19 - Valores das frequências naturais representativos do ED1.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,34	0,23
2	19,98	0,05



Figura A9. 20 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED2.3.

Tabela A9. 20 - Valores das frequências naturais representativos do ED2.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,05	0,95
2	13,61	0,07



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 21 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED3.3.

Tabela A9. 21 - Valores das frequências naturais representativos do ED3.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,26	0,79
2	9,61	0,10



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 22 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED4.3.

Tabela A9. 22 - Valores das frequências naturais representativos do ED4.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,79	1,27
2	4,28	0,23



Figura A9. 23 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED5.3.

Tabela A9. 23 - Valores das frequências naturais representativos do ED5.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,49	0,22
2	20,27	0,05



Figura A9. 24 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED6.3.

Tabela A9. 24 - Valores das frequências naturais representativos do ED6.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,63	0,22
2	19,99	0,05



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 25 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED7.3.

Tabela A9. 25 - Valores das frequências naturais representativos do ED7.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,82	0,21
2	20,390	0,05



a) 1º Modo b) 2º Modo

Figura A9. 26 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED8.3.

Tabela A9. 26 - Valores das frequências naturais representativos do ED8.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,17	0,85
2	13,64	0,07



a) 1º Modo

b) 2º Modo

Figura A9. 27 - Deformada dos modos de vibração para massas nos dois níveis representativa do ED9.3.

Tabela A9. 27 - Valores das frequências naturais representativos do ED9.3.

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	2,66	0,38
2	12,00	0,08

ANEXO X – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Comparação entre o modelo de barras e o modelo de casca:

- Deslocamentos:

Tabela A10. 1 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE1 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,746	0,970	0,225	23
2	46,8	1,572	2,046	0,474	23
3	71,4	2,398	3,121	0,723	23

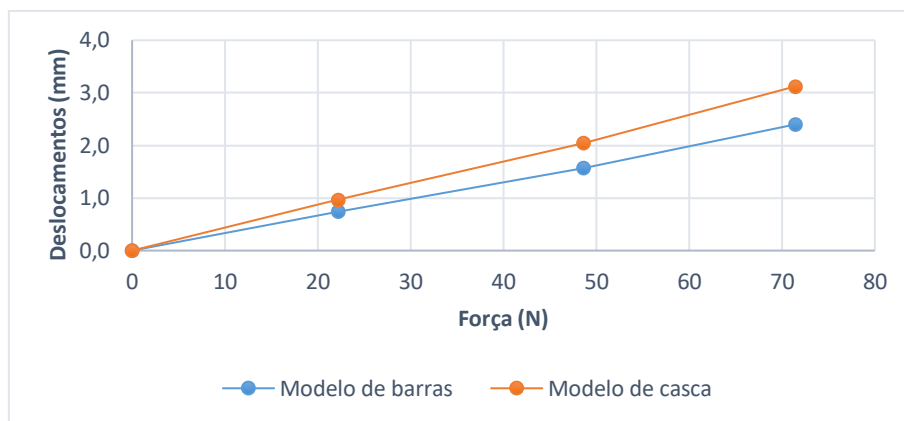


Figura A10. 1 - Comparação deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE1.

Tabela A10. 2 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE1 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,173	3,219	0,047	1
2	46,8	6,688	6,786	0,098	1
3	71,4	10,204	10,354	0,150	1

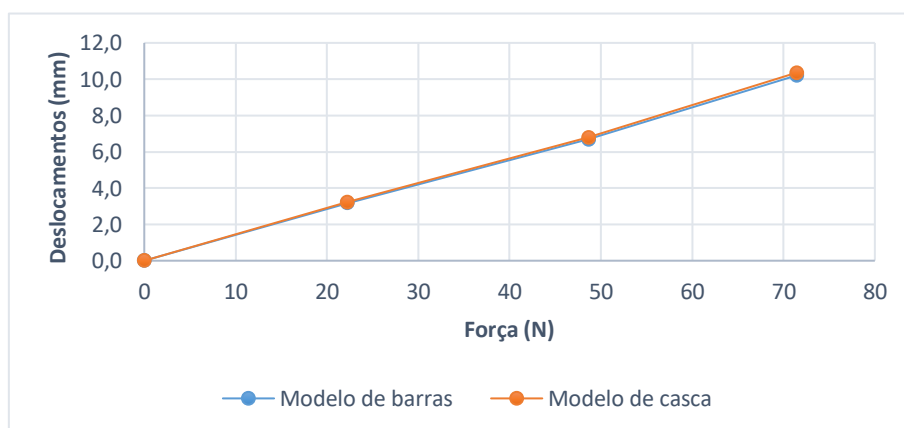


Figura A10. 2 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE1.

Tabela A10. 3 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE2 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	23,539	24,168	0,629	3
2	46,8	25,446	27,186	1,740	6
3	71,4	27,353	30,204	2,851	9

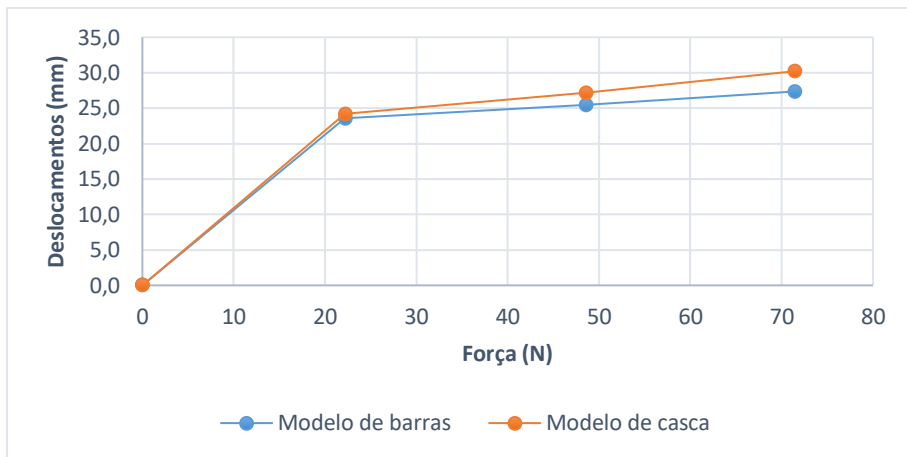


Figura A10. 3 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE2.

Tabela A10. 4 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE2 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	45,125	45,300	0,174	0
2	46,8	50,630	52,085	1,454	3
3	71,4	56,135	58,861	2,727	5

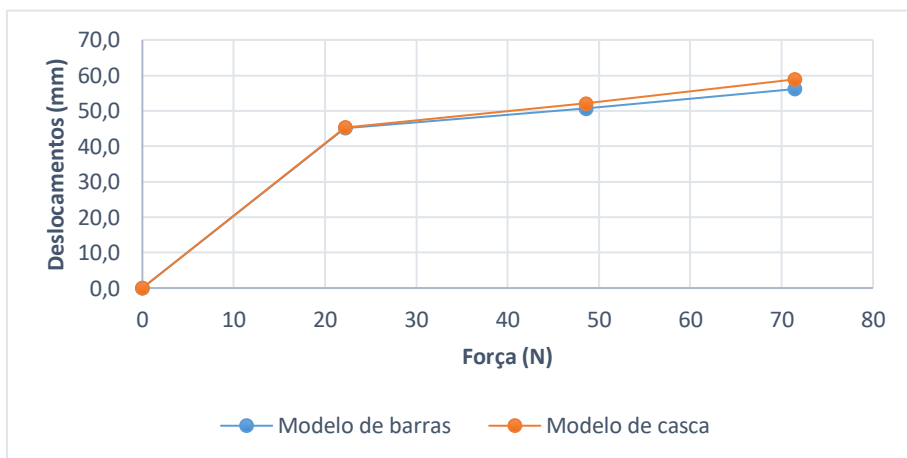


Figura A10. 4 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e casca no EE2.

Tabela A10. 5 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE3 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,746	0,975	0,230	24
2	46,8	1,572	2,056	0,484	24
3	71,4	2,398	3,137	0,739	24

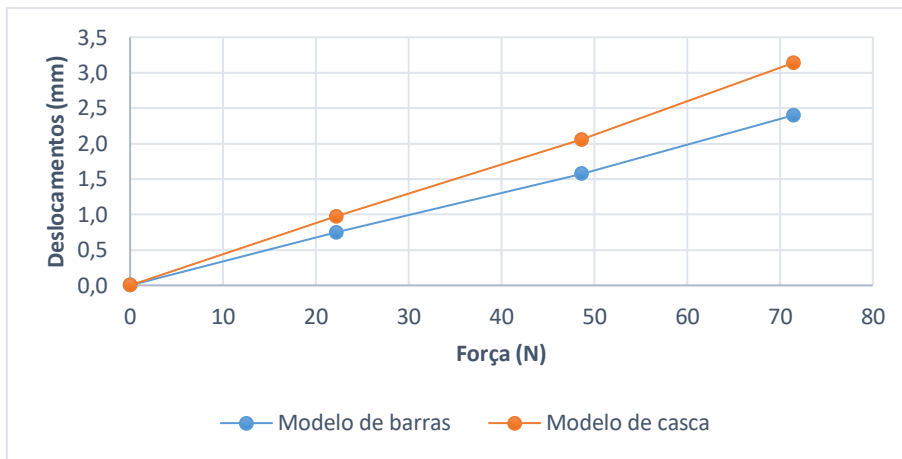


Figura A10. 5 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE3.

Tabela A10. 6 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE3 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	41,456	41,722	0,266	1
2	46,8	46,966	46,851	-0,114	0
3	71,4	52,4756	51,981	-0,495	-1

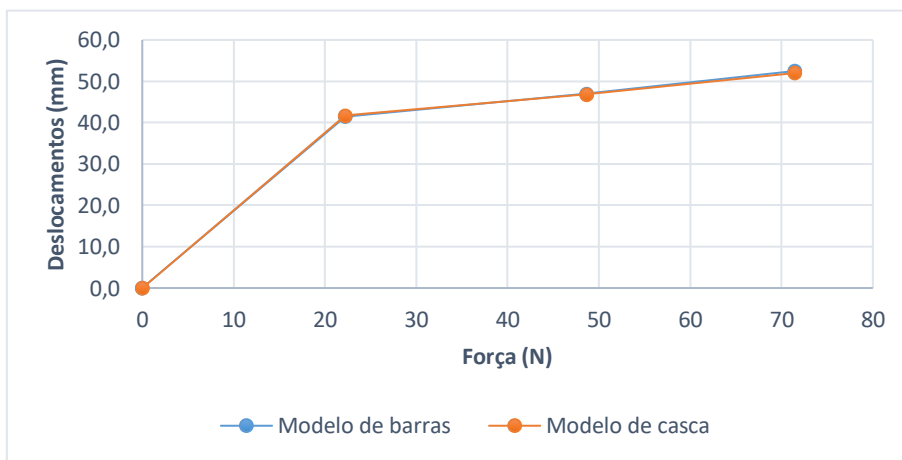


Figura A10. 6 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE3.

Tabela A10. 7 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE4 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	37,842	36,611	-1,230	-3
2	46,8	39,749	39,660	-0,089	0
3	71,4	41,793	42,709	0,916	2

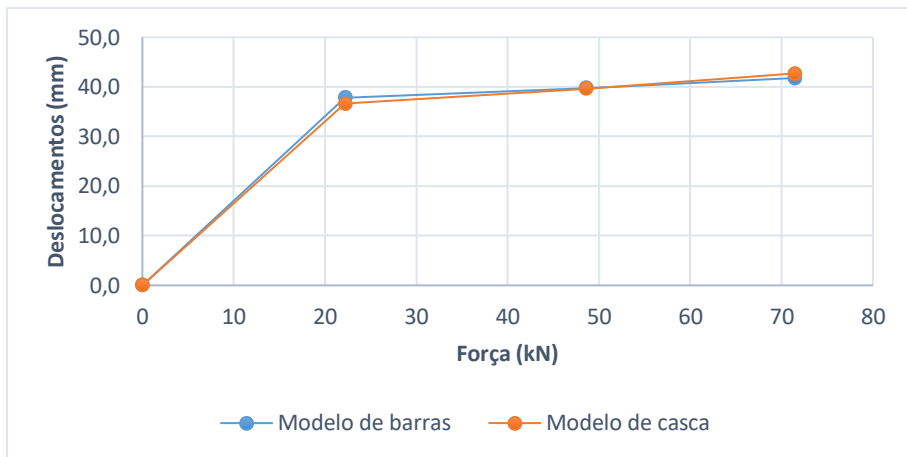


Figura A10. 7 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE4.

Tabela A10. 8 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE4 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	84,340	84,234	-0,105	0
2	46,8	92,943	92,664	-0,279	0
3	71,4	100,442	101,092	0,651	1

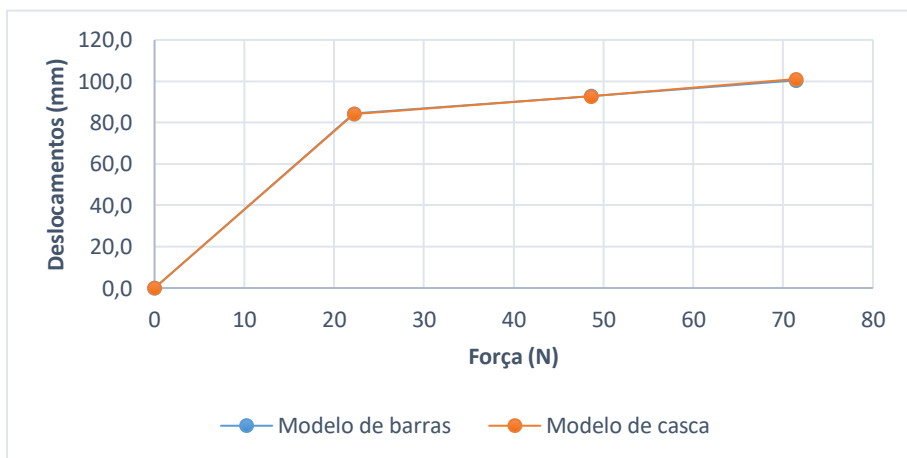


Figura A10. 8 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE4.

Tabela A10. 9 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE5 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,737	0,874	0,137	16
2	46,8	1,554	1,843	0,289	16
3	71,4	2,370	2,811	0,441	16

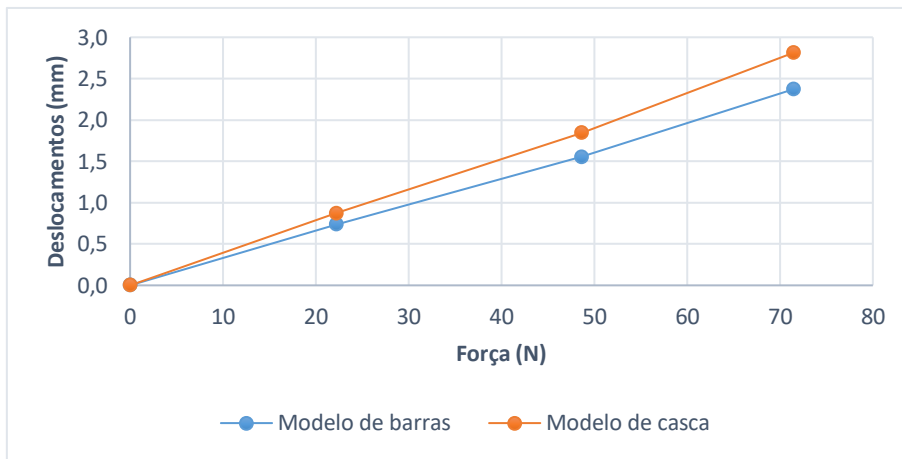


Figura A10. 9 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE5.

Tabela A10. 10 – Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE5 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,153	3,016	-0,137	-5
2	46,8	6,648	6,358	-0,289	-5
3	71,4	10,142	9,700	-0,442	-5

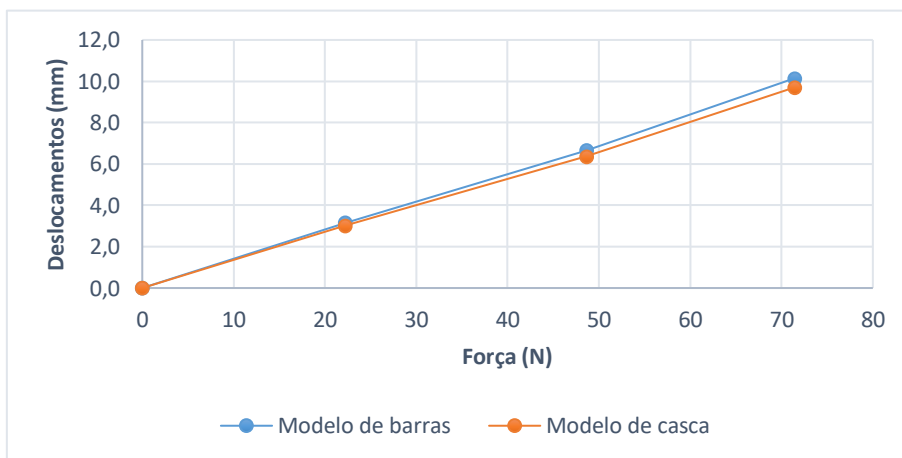


Figura A10. 10 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE5.

Tabela A10. 11 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE6 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,741	0,844	0,103	12
2	46,8	1,561	1,778	0,217	12
3	71,4	2,382	2,713	0,331	12

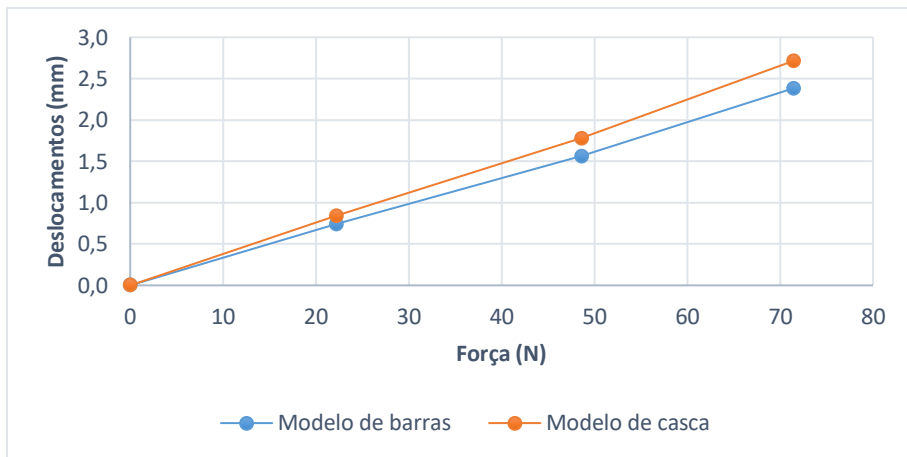


Figura A10. 11 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE6.

Tabela A10. 12 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE6 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,151	2,812	-0,340	-12
2	46,8	6,643	5,9273	-0,716	-12
3	71,4	10,135	9,0430	-1,092	-12

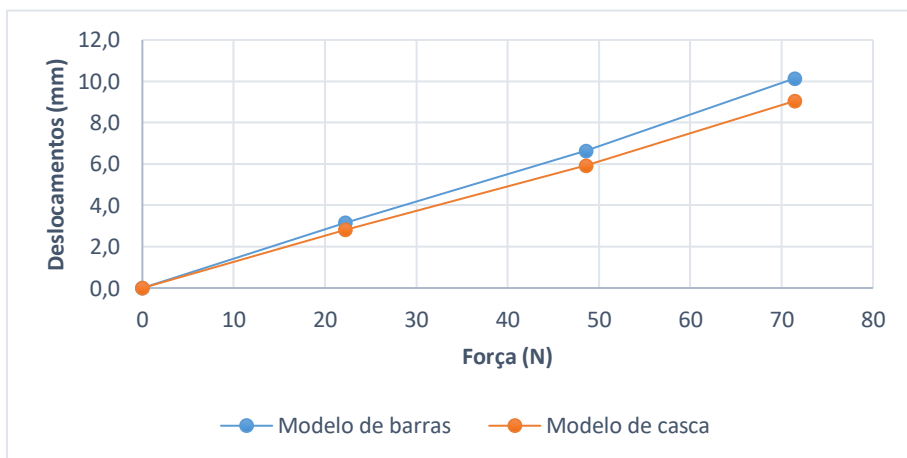


Figura A10. 12 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE6.

Tabela A10. 13 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE7 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,732	0,746	0,014	2
2	46,8	1,544	1,589	0,045	3
3	71,4	2,355	2,399	0,045	2

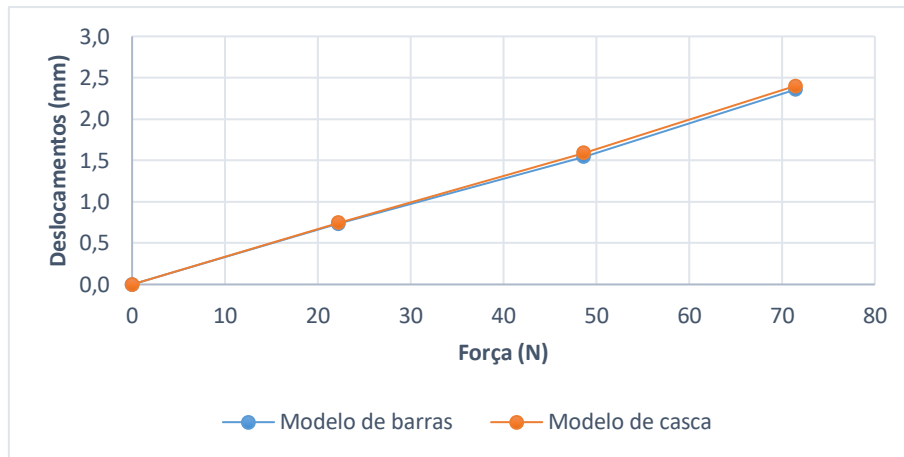


Figura A10. 13 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE7.

Tabela A10. 14 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE7 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,132	2,618	-0,515	-20
2	46,8	6,603	5,518	-1,085	-20
3	71,4	10,073	8,419	-1,655	-20

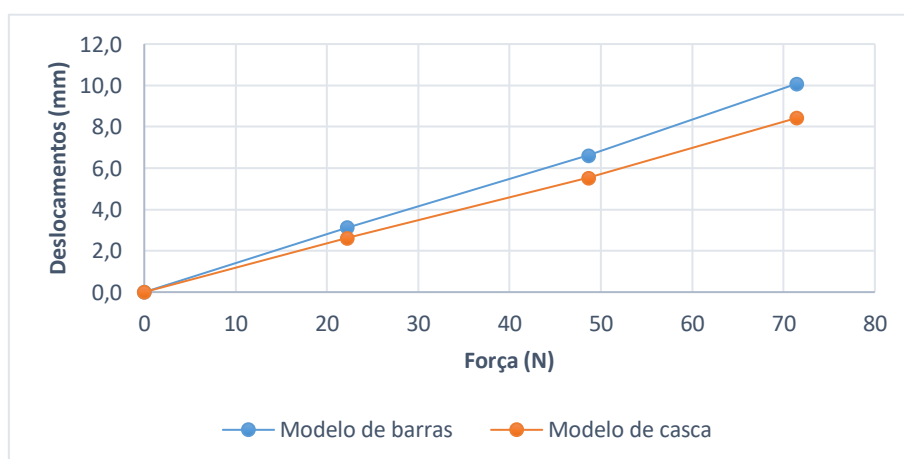


Figura A10. 14 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE7.

Tabela A10. 15 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE8 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	19,739	19,640	-0,099	-1
2	46,8	25,068	26,441	1,373	5
3	71,4	26,947	29,376	2,430	8

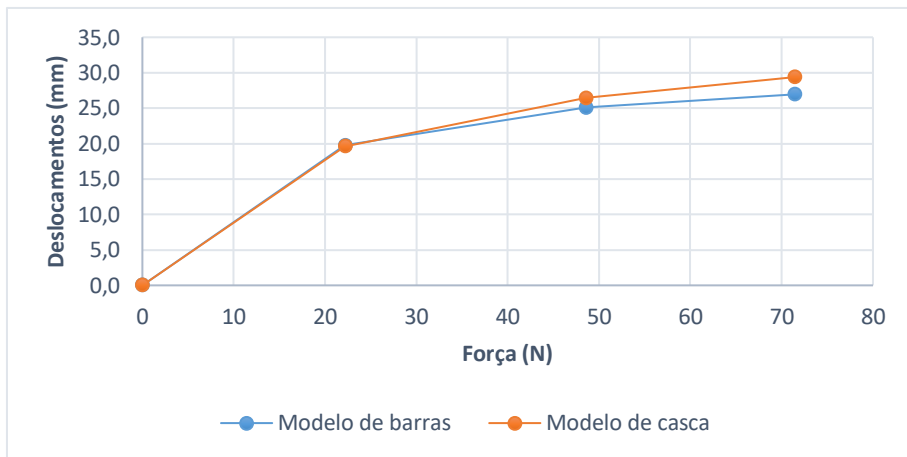


Figura A10. 15 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE8.

Tabela A10. 16 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE8 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	38,084	37,091	-0,993	-3
2	46,8	49,874	50,809	0,934	2
3	71,4	55,322	57,452	2,129	4

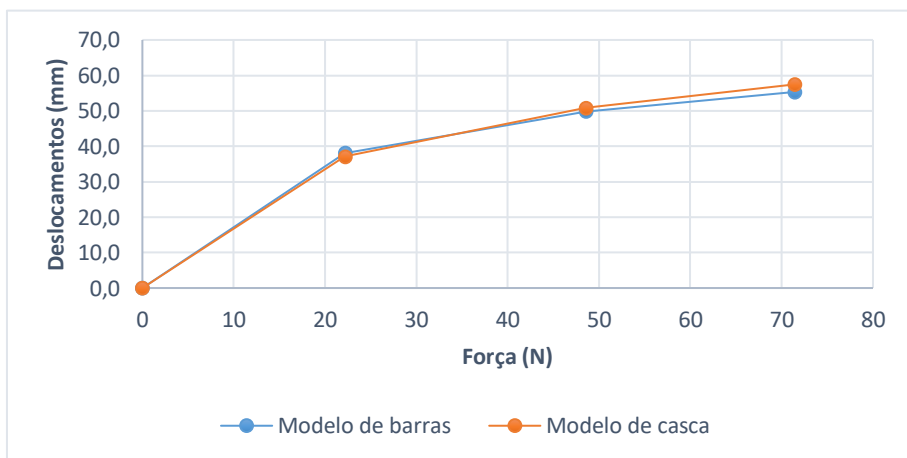


Figura A10. 16 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE8.

Tabela A10. 17 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 1 para o EE9 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,522	0,199	-0,323	-163
2	46,8	1,047	0,419	-0,629	-150
3	71,4	1,567	0,634	-0,933	-147

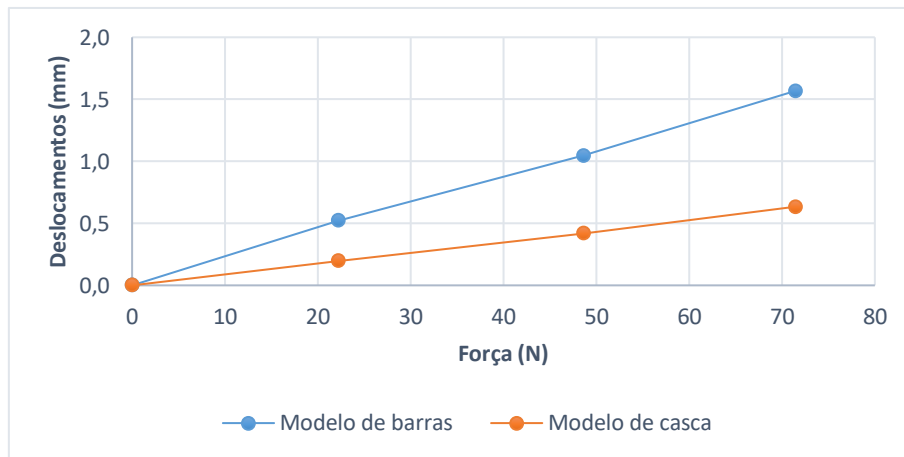


Figura A10. 17 - Comparação dos deslocamentos no nível 1 entre modelo de barras e de casca no EE9.

Tabela A10. 18 - Comparação deslocamentos modelo de barras vs casca no nível 2 para o EE9 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	8,600	9,517	0,917	10
2	46,8	20,145	20,064	-0,081	0
3	71,4	31,921	30,610	-1,312	-4

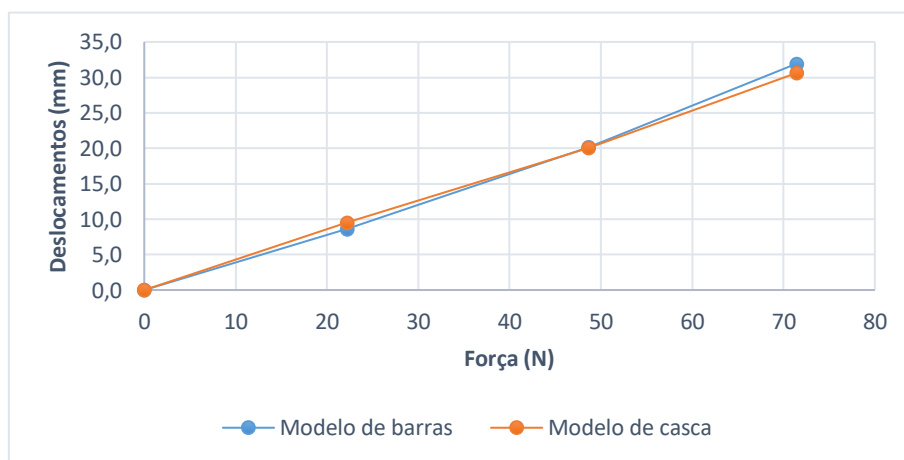


Figura A10. 18 - Comparação dos deslocamentos no nível 2 entre modelo de barras e de casca no EE9.

- **Extensões:**

Tabela A10. 19 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,9	-31,8	5,1	-16
2	46,8	-77,8	-67,1	10,7	-16
3	71,4	-118,6	-102,2	16,4	-16

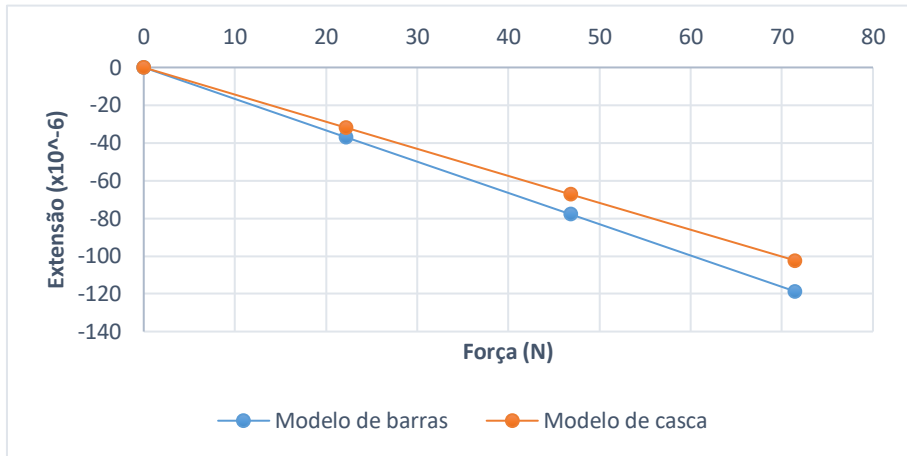


Figura A10. 19 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE1.

Tabela A10. 20 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,9	31,8	-5,1	-16
2	46,8	77,8	67,1	-10,7	-16
3	71,4	118,6	102,2	-16,4	-16

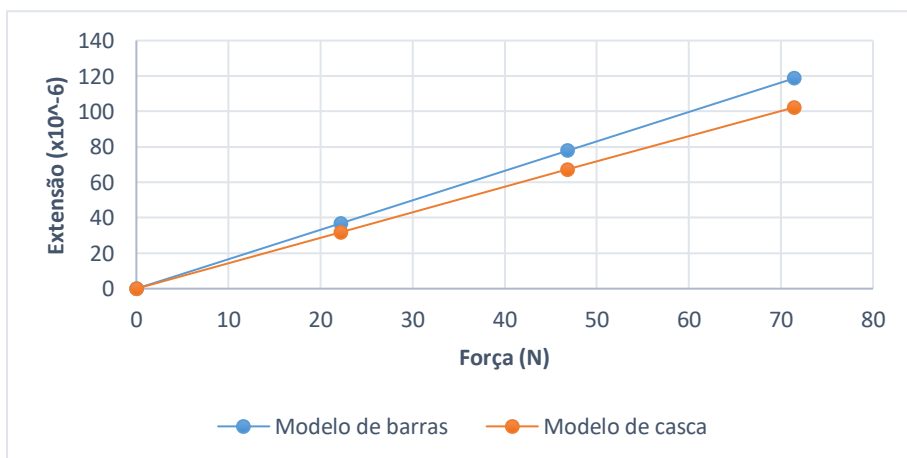


Figura A10. 20 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE1.

Tabela A10. 21 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-59,0	-47,0	12,0	-26
2	46,8	-124,5	-99,05	25,4	-26
3	71,4	-190,4	-151,1	39,2	-26

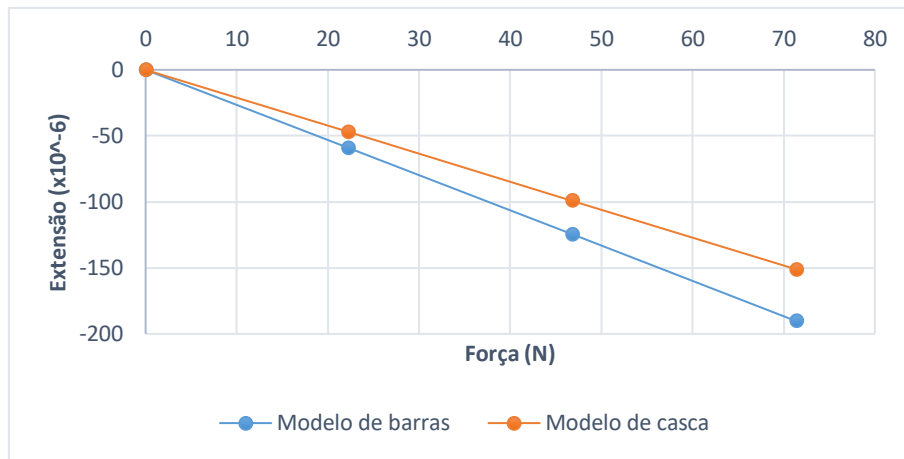


Figura A10. 21 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE1.

Tabela A10. 22 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	59,0	47,0	-12,0	-26
2	46,8	124,5	99,0	-25,4	-26
3	71,4	190,4	151,1	-39,2	-26

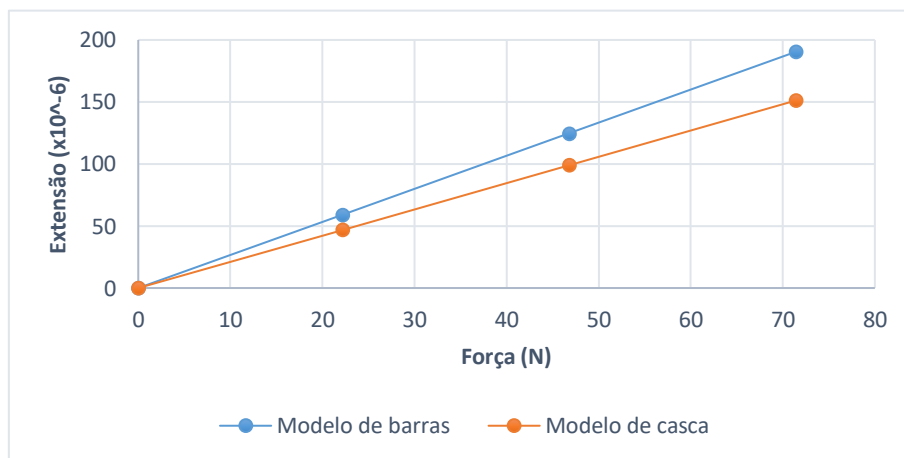


Figura A10. 22 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE1.

Tabela A10. 23 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,9	-31,8	5,1	-16
2	46,8	-77,8	-66,8	11,0	-16
3	71,4	-118,6	-101,9	16,8	-16

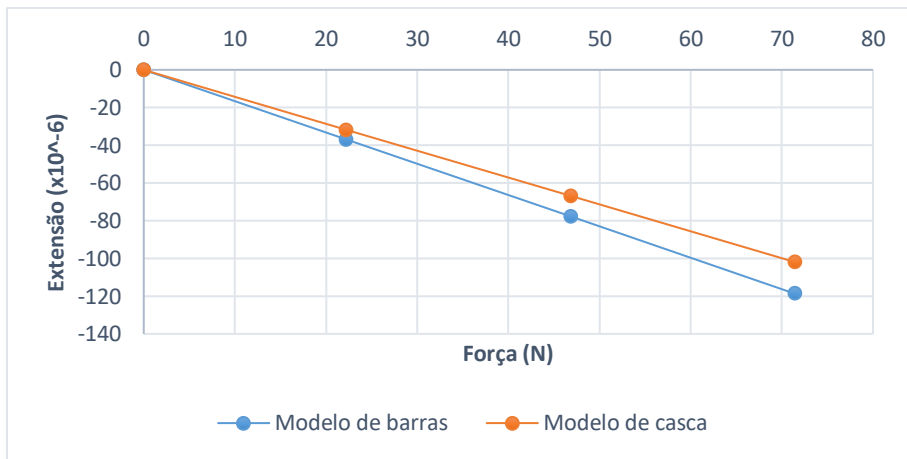


Figura A10. 23 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE2.

Tabela A10. 24 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,9	31,8	-5,1	-16
2	46,8	77,8	66,8	-11,0	-16
3	71,4	118,6	101,9	-16,8	-16

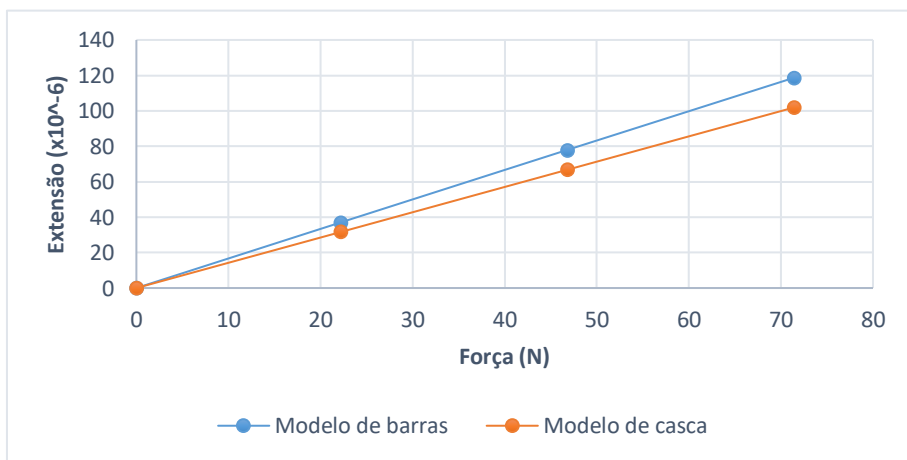


Figura A10. 24 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE2.

Tabela A10. 25 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-59,0	-47,0	12,0	-26
2	46,8	-124,5	-99,1	25,4	-26
3	71,4	-189,9	-151,2	38,7	-26

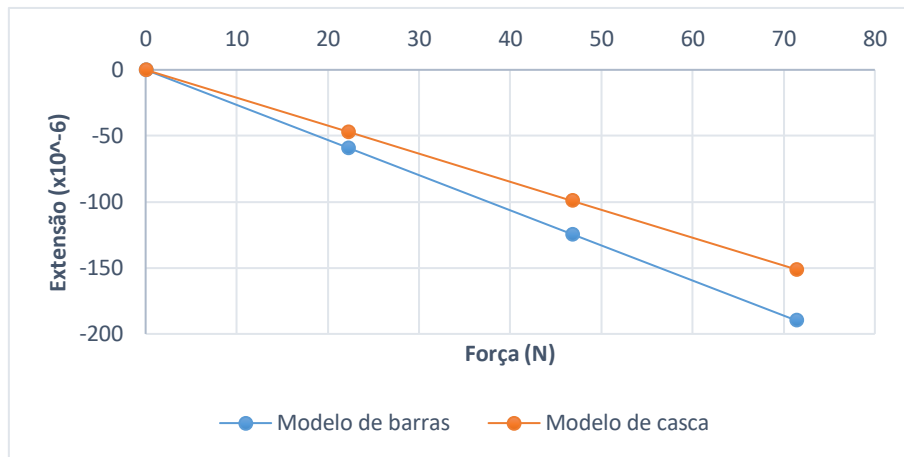


Figura A10. 25 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE2.

Tabela A10. 26 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	59,0	47,0	-12,0	-26
2	46,8	124,5	99,1	-25,4	-26
3	71,4	189,9	151,2	-38,7	-26

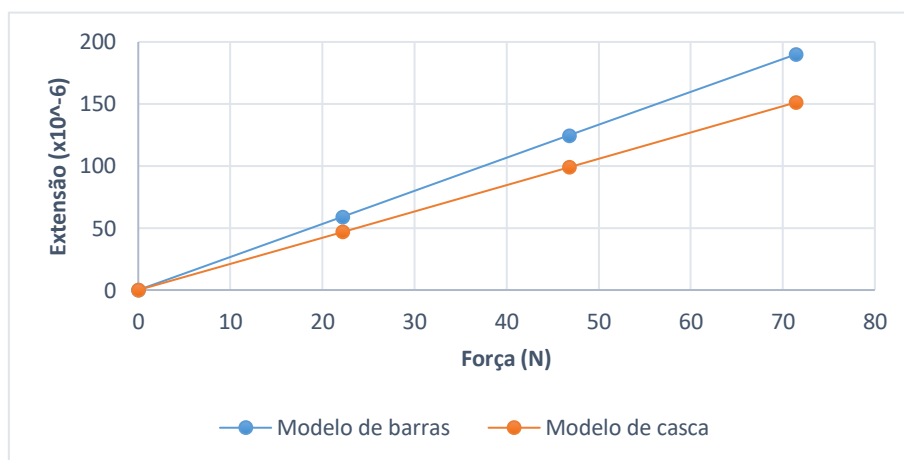


Figura A10. 26 -Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE2.

Tabela A10. 27 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,9	-31,8	5,1	-16
2	46,8	-77,8	-67,0	10,8	-16
3	71,4	-118,6	-103,8	14,8	-14

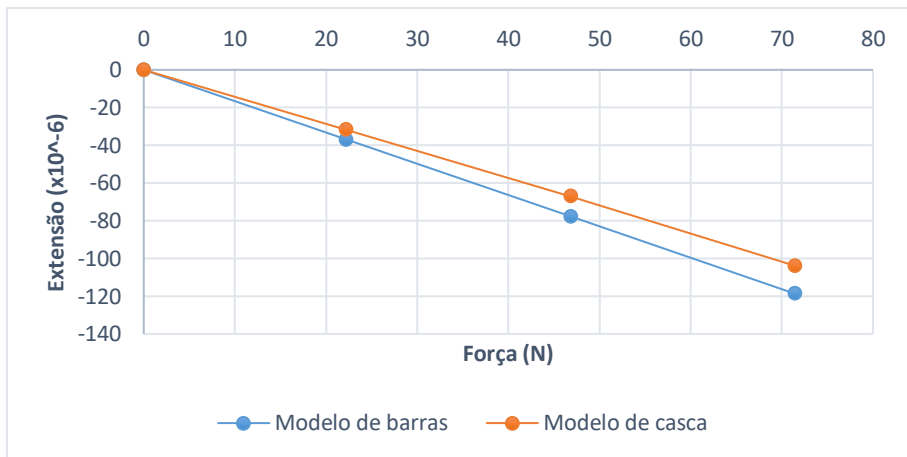


Figura A10. 27 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE3.

Tabela A10. 28 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,9	31,8	-5,1	-16
2	46,8	77,8	67,0	-10,8	-16
3	71,4	118,6	103,8	-14,8	-14

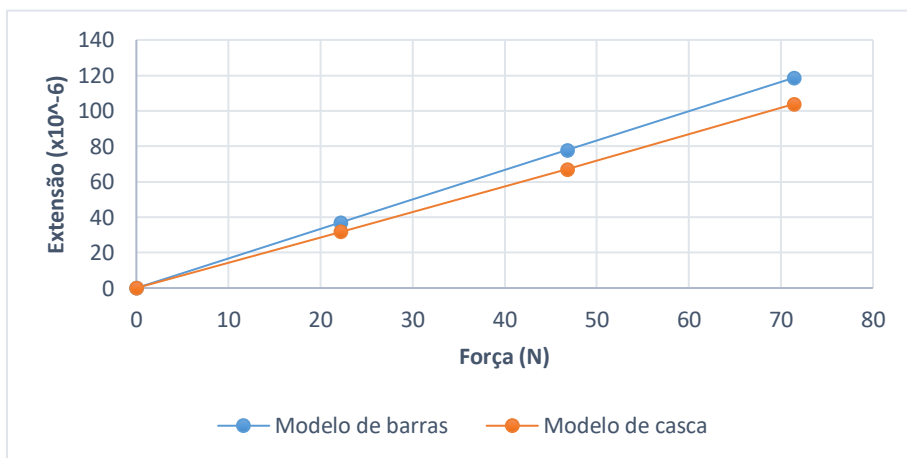


Figura A10. 28 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE3.

Tabela A10. 29 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-59,0	-46,4	12,7	-27
2	46,8	-124,5	-97,8	26,7	-27
3	71,4	-189,8	-149,1	40,7	-27

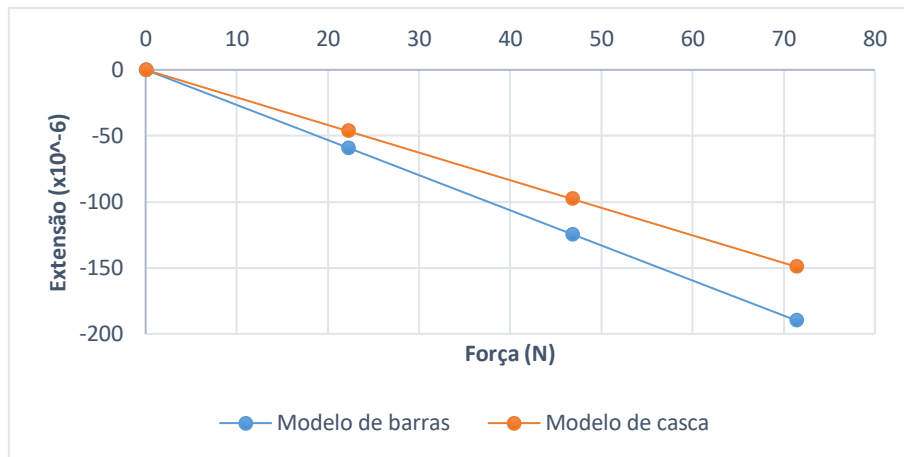


Figura A10. 29 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE3.

Tabela A10. 30 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	59,0	46,4	-12,7	-27
2	46,8	124,5	97,8	-26,7	-27
3	71,4	189,9	149,1	-40,8	-27

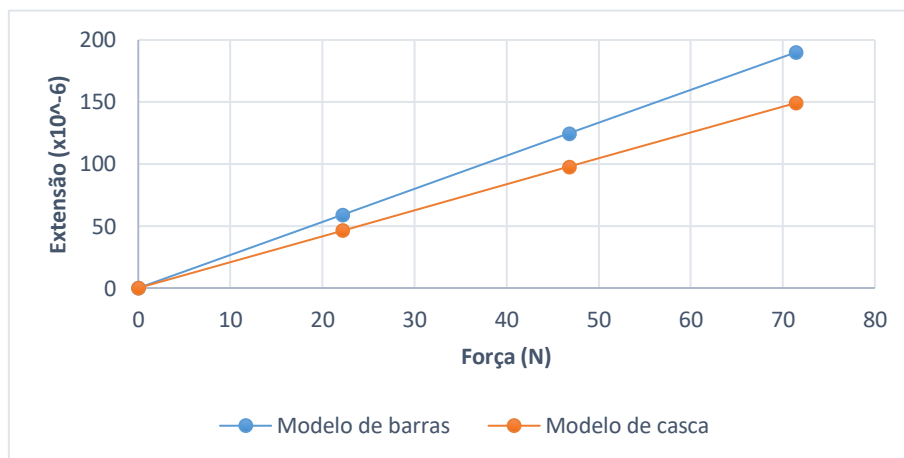


Figura A10. 30 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE3.

Tabela A10. 31 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,9	-31,5	5,4	-17
2	46,8	-77,8	-66,4	11,3	-17
3	71,4	-118,6	-101,3	17,3	-17

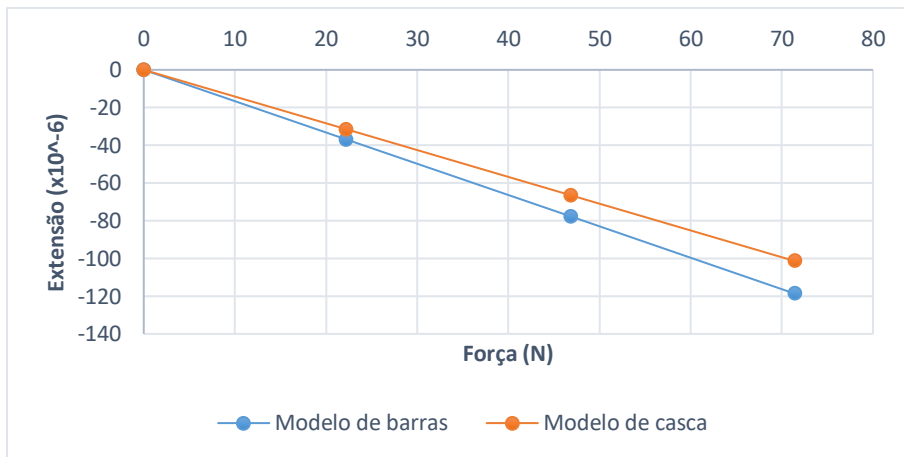


Figura A10. 31 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE4.

Tabela A10. 32 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,9	31,5	-5,4	-17
2	46,8	77,7	66,4	-11,3	-17
3	71,4	118,6	101,3	-17,3	-17

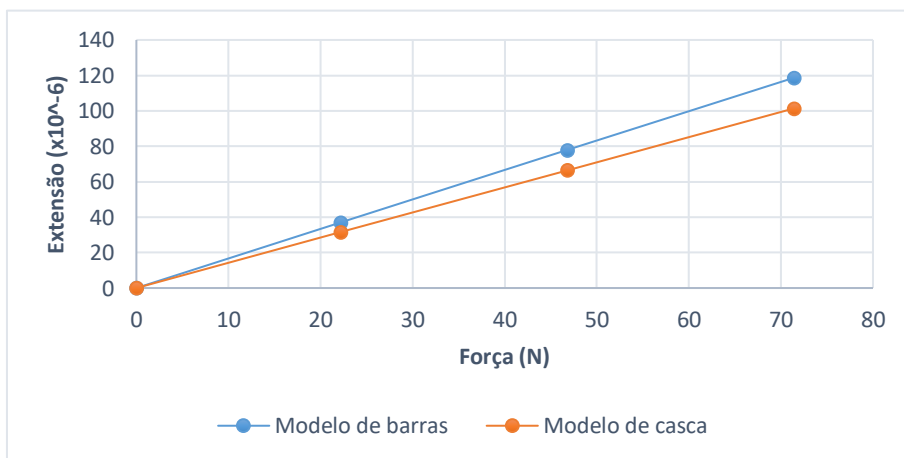


Figura A10. 32 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE4.

Tabela A10. 33 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-59,0	-46,2	12,8	-28
2	46,8	-124,5	-97,6	26,9	-28
3	71,4	-189,9	-148,9	41,0	-28

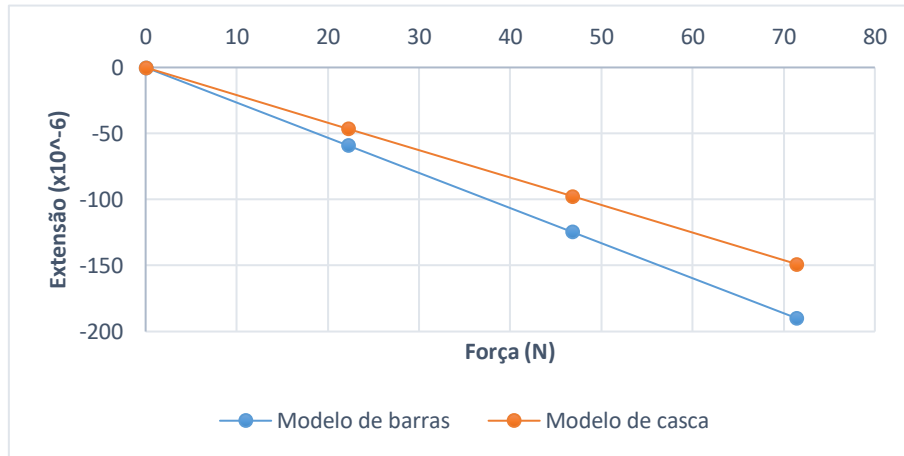


Figura A10. 33 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE4.

Tabela A10. 34 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	59,0	46,3	-12,8	-28
2	46,8	124,5	97,6	-26,9	-28
3	71,4	189,9	148,3	-41,6	-28

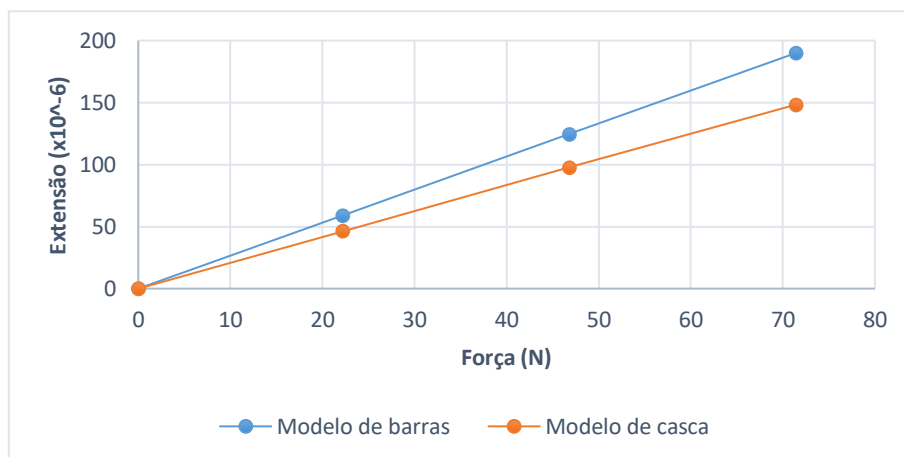


Figura A10. 34 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE4.

Tabela A10. 35 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,4	-28,5	7,9	-28
2	46,8	-76,7	-60,8	15,9	-26
3	71,4	-117,0	-92,8	24,2	-26

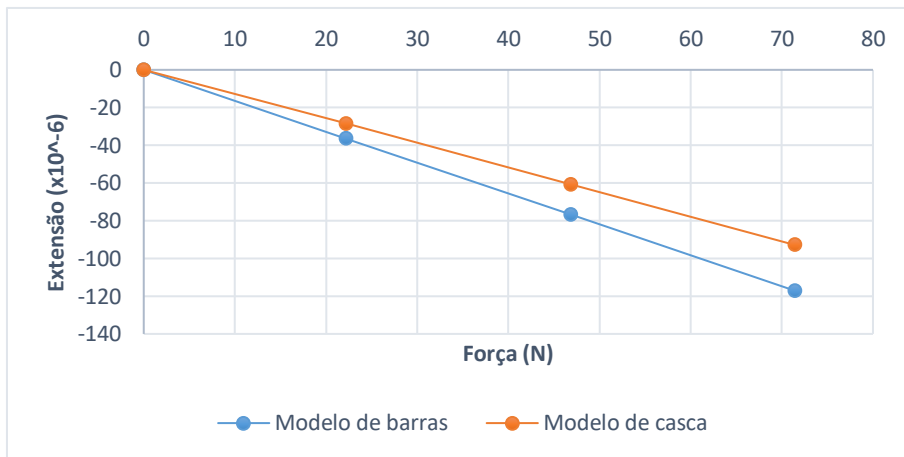


Figura A10. 35 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE5.

Tabela A10. 36 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,4	28,5	-7,9	-28
2	46,8	76,7	60,8	-15,9	-26
3	71,4	117,0	92,8	-24,2	-26

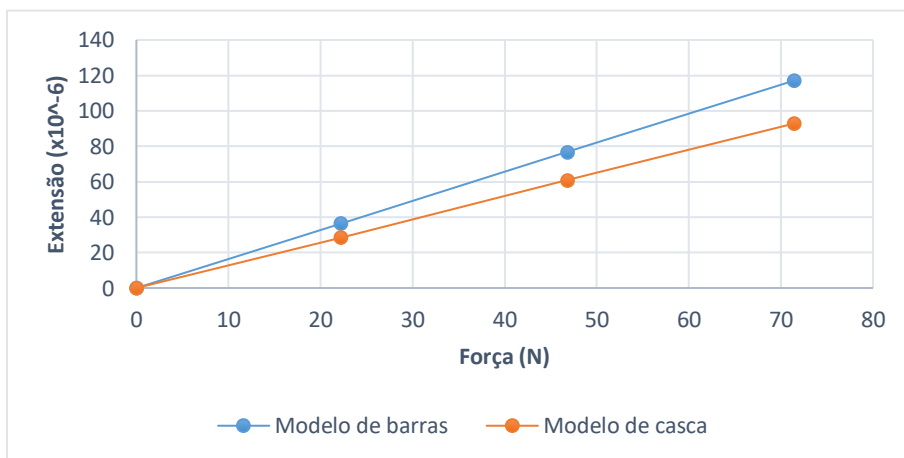


Figura A10. 36 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE5.

Tabela A10. 37 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-59,0	-45,9	13,1	-29
2	46,8	-124,5	-96,7	27,8	-29
3	71,4	-189,9	-147,6	42,3	-29

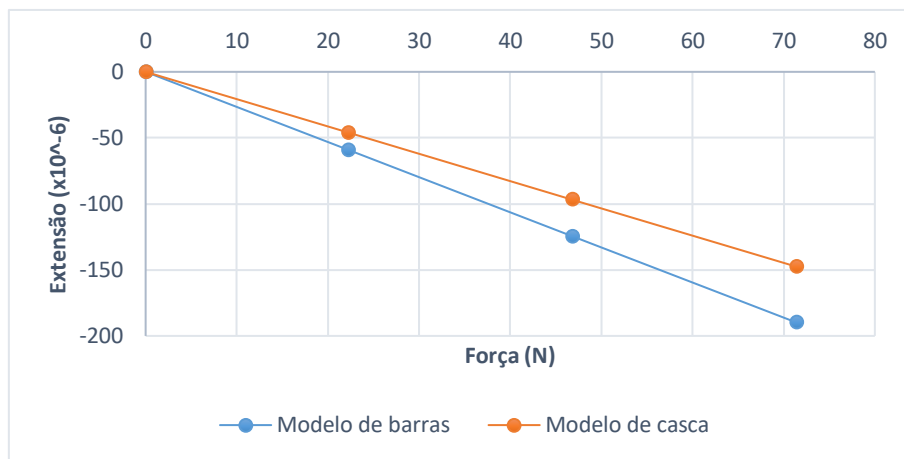


Figura A10. 37 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE5.

Tabela A10. 38 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	59,0	45,9	-13,1	-29
2	46,8	124,5	96,7	-27,8	-29
3	71,4	189,9	147,6	-42,3	-29

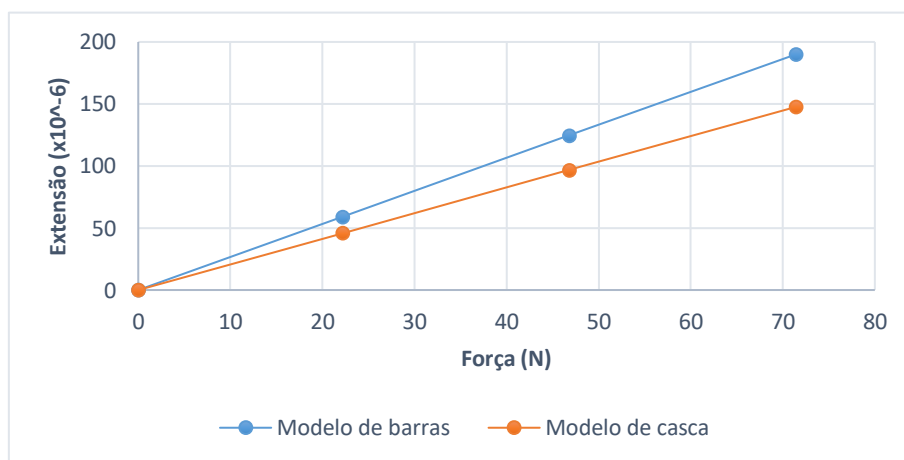


Figura A10. 38 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE5.

Tabela A10. 39 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,6	-28,0	8,7	-31
2	46,8	-77,2	-59,0	18,2	-31
3	71,4	-117,8	-89,6	28,2	-31

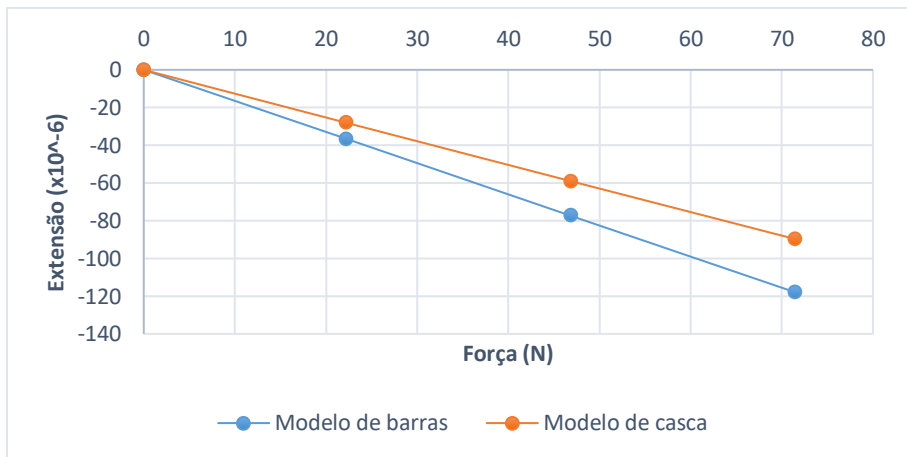


Figura A10. 39 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE6.

Tabela A10. 40 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,6	28,0	-8,7	-31
2	46,8	77,2	59,0	-18,1	-31
3	71,4	117,8	89,6	-28,2	-31

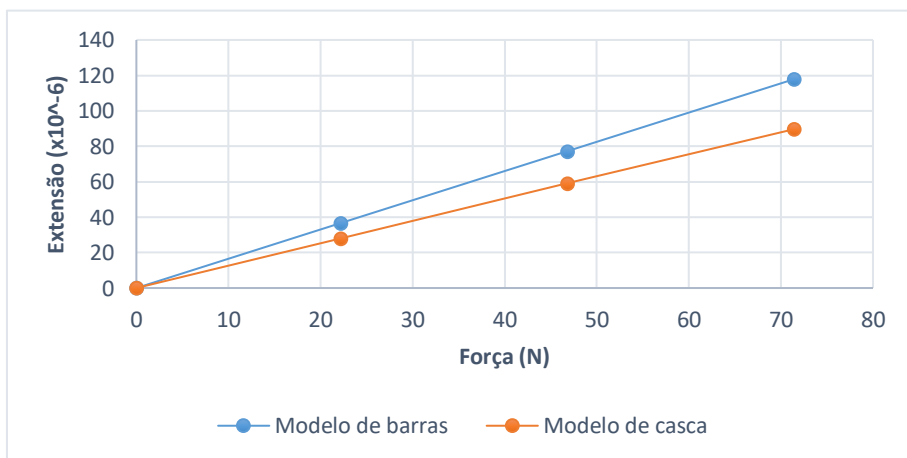


Figura A10. 40 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE6.

Tabela A10. 41 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-58,7	-41,3	17,3	-42
2	46,8	-123,6	-87,1	36,5	-42
3	71,4	-175,8	-133,0	42,8	-32

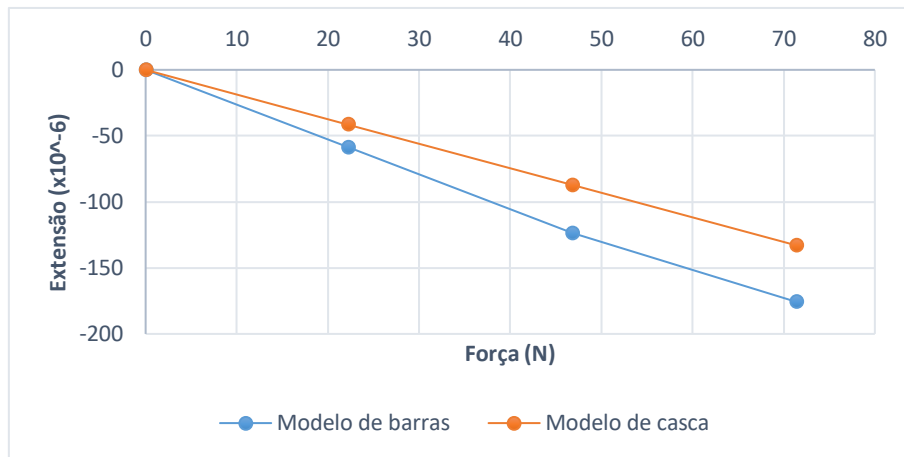


Figura A10. 41 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE6.

Tabela A10. 42 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	58,7	41,3	-17,3	-42
2	46,8	123,6	87,1	-36,5	-42
3	71,4	175,8	133,0	-42,8	-32

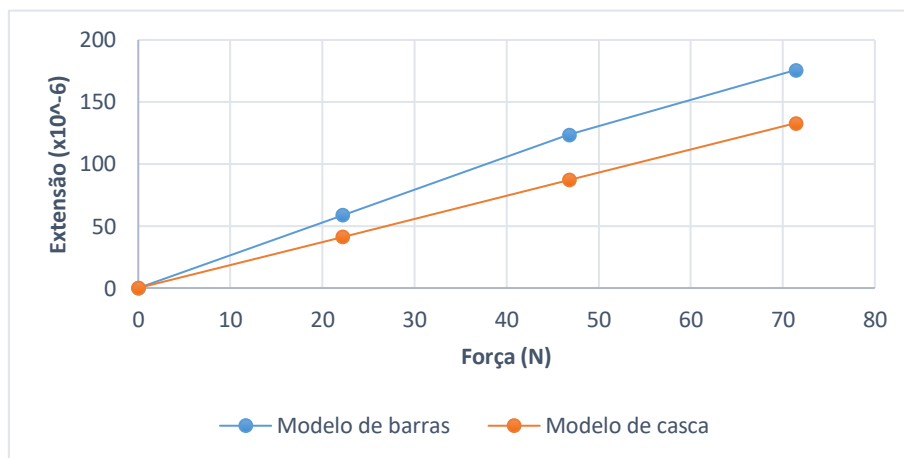


Figura A10. 42 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE6.

Tabela A10. 43 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-36,1429	-24,5238	11,6191	-47
2	46,8	-76,1905	-51,7143	24,4762	-47
3	71,4	-116,6238	-82,8500	33,7738	-41

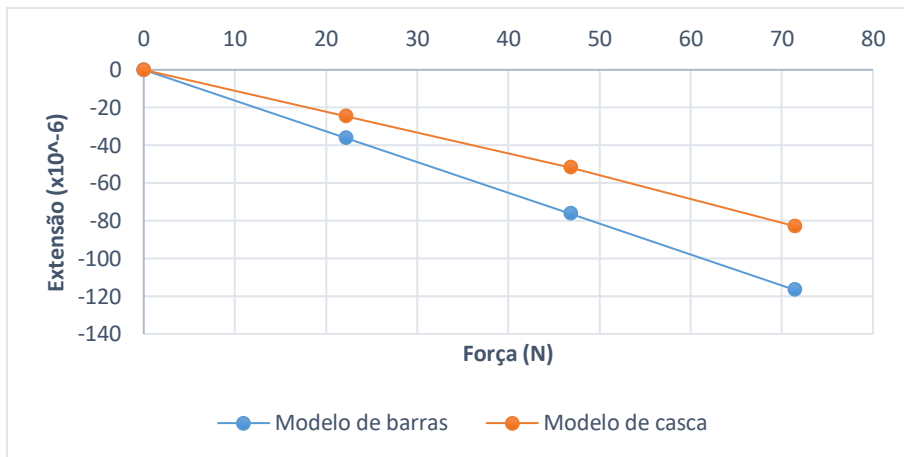


Figura A10. 43 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE7.

Tabela A10. 44 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,1	24,5	-11,6	-47
2	46,8	76,2	51,7	-24,5	-47
3	71,4	116,2	82,9	-33,3	-40

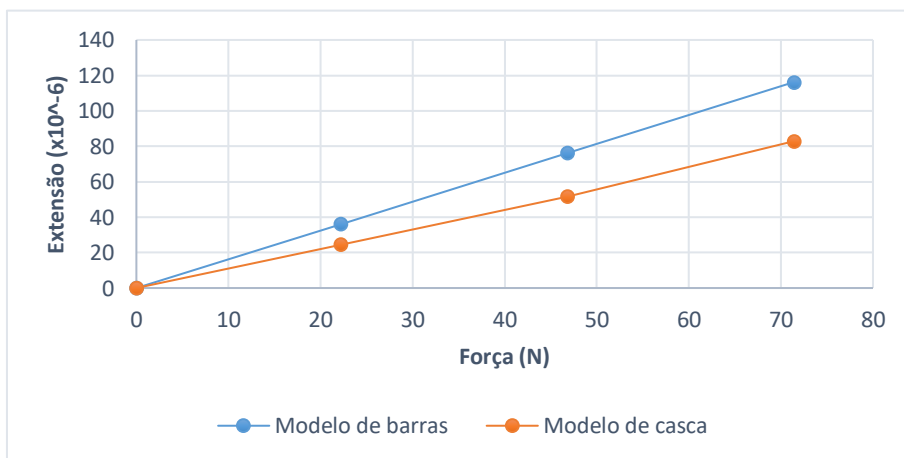


Figura A10. 44 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE7.

Tabela A10. 45 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-58,7	-41,7	17,0	-41
2	46,8	-123,6	-88,0	35,6	-40
3	71,4	-188,6	-139,0	49,6	-36

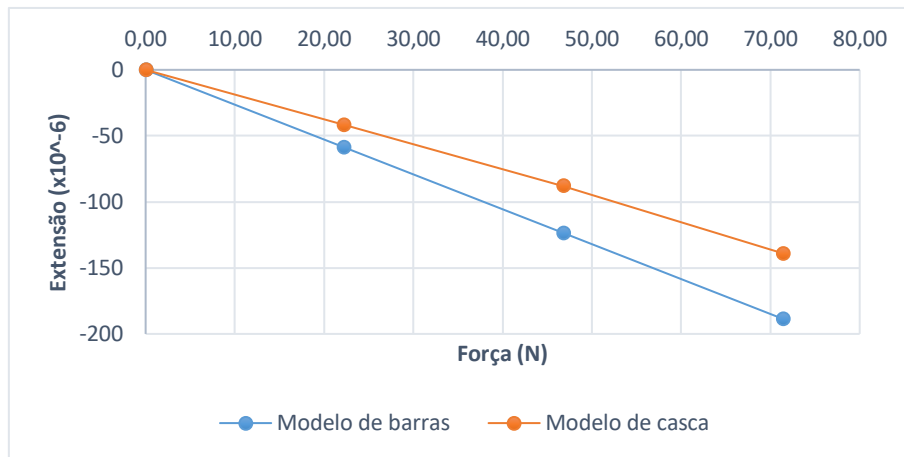


Figura A10. 45 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE7.

Tabela A10. 46 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	58,7	41,7	-17,0	-41
2	46,8	123,7	88,0	-35,7	-41
3	71,4	188,6	139,0	-49,6	-36

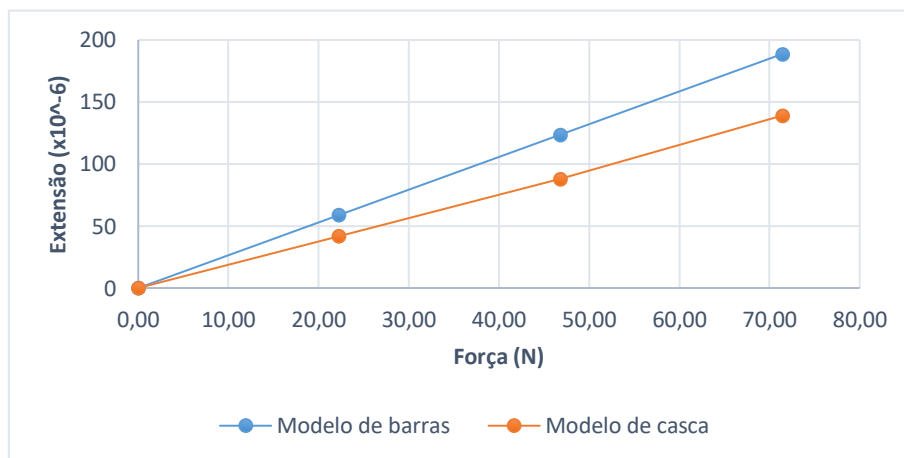


Figura A10. 46 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE7.

Tabela A10. 47 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-30,2	-24,2	6,0	-25
2	46,8	-69,3	-54,5	14,9	-27
3	71,4	-110,0	-86,1	23,9	-28

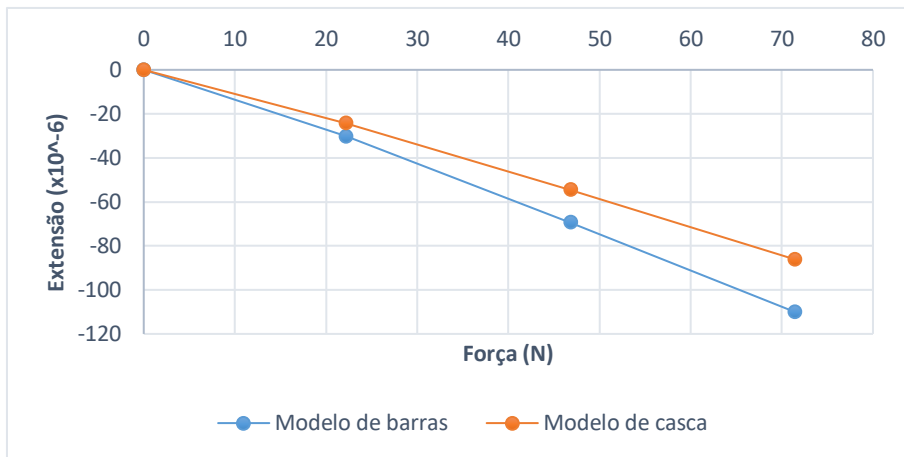


Figura A10. 47 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE8.

Tabela A10. 48 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	30,2	24,2	-6,0	-25
2	46,8	69,3	54,5	-14,9	-27
3	71,4	110,0	86,1	-23,9	-28

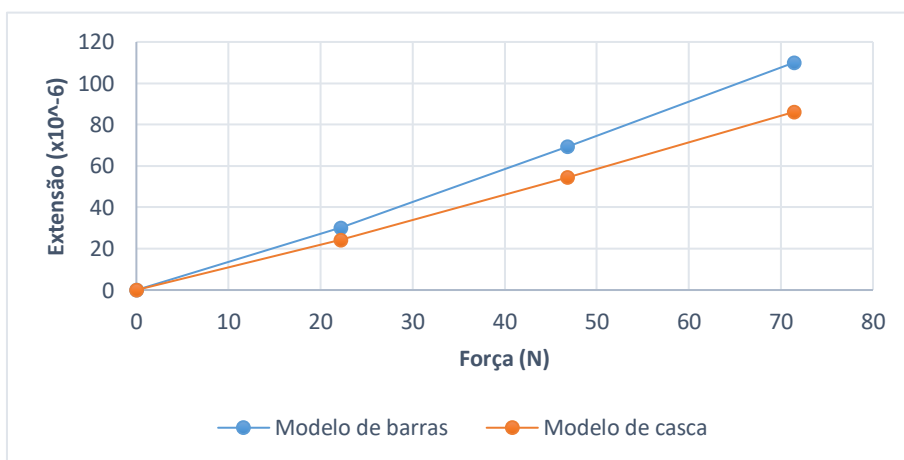


Figura A10. 48 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE8.

Tabela A10. 49 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-59,0	-46,6	12,4	-27
2	46,8	-124,5	-98,3	26,2	-27
3	71,4	-189,9	-150,0	39,9	-27

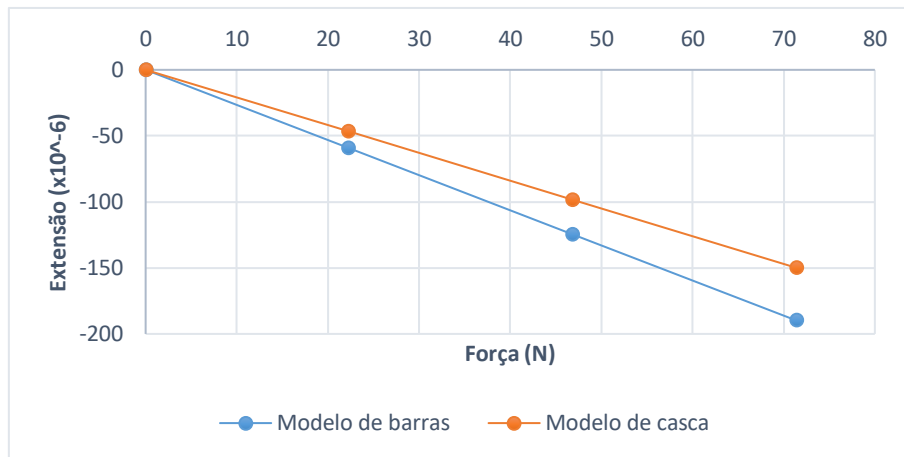


Figura A10. 49 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE8.

Tabela A10. 50 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	59,0	46,6	-12,4	-27
2	46,8	124,5	98,3	-26,2	-27
3	71,4	189,9	150,0	-40,0	-27

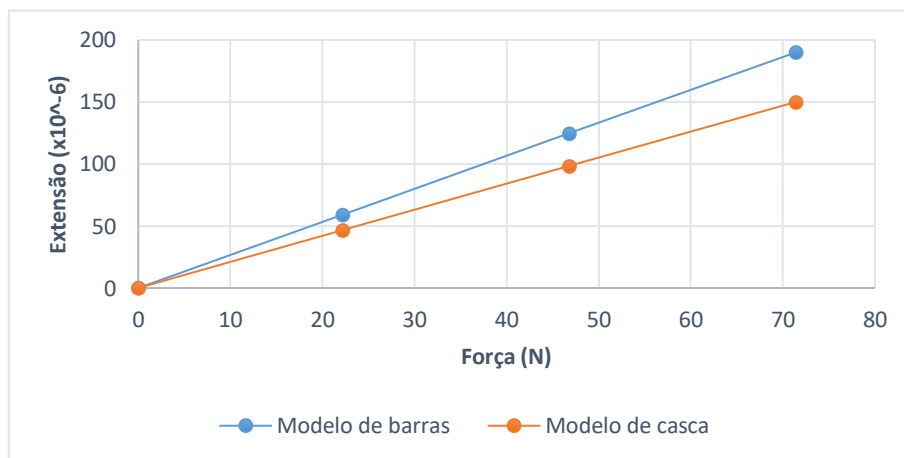


Figura A10. 50 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE8.

Tabela A10. 51 - Análise comparativa das extensões no E-N0-1 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-25,8	-6,7	19,1	-287
2	46,8	-51,7	-13,8	37,9	-274
3	71,4	-77,3	-21,1	56,2	-267

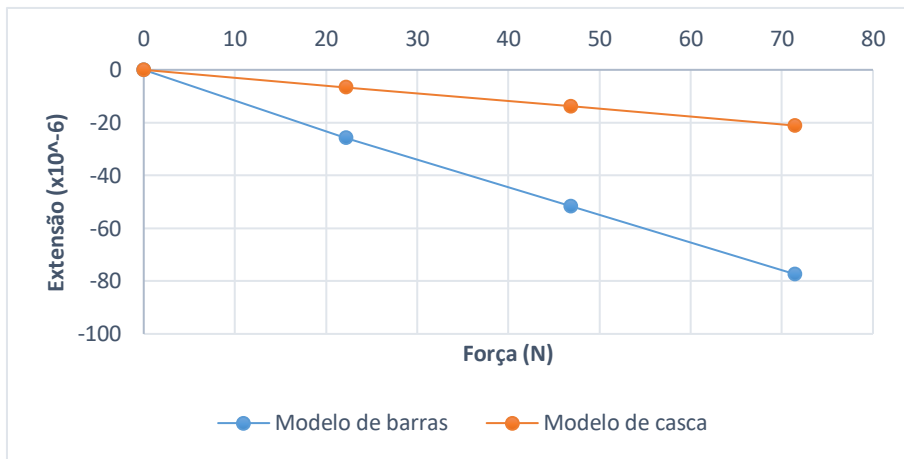


Figura A10. 51 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-1 no EE9.

Tabela A10. 52 - Análise comparativa das extensões no E-N0-2 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	25,8	6,6	-19,2	-292
2	46,8	51,7	13,8	-37,9	-274
3	71,4	77,3	21,1	-56,2	-267

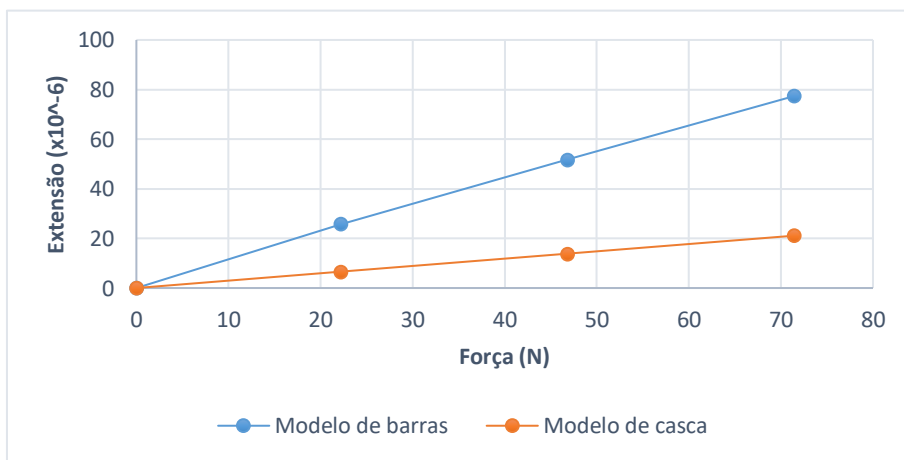


Figura A10. 52 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N0-2 no EE9.

Tabela A10. 53 - Análise comparativa das extensões no E-N1-1 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-41,9	-10,5	31,3	-298
2	46,8	-84,2	-22,1	62,1	-281
3	71,4	-126,1	-33,9	92,2	-272

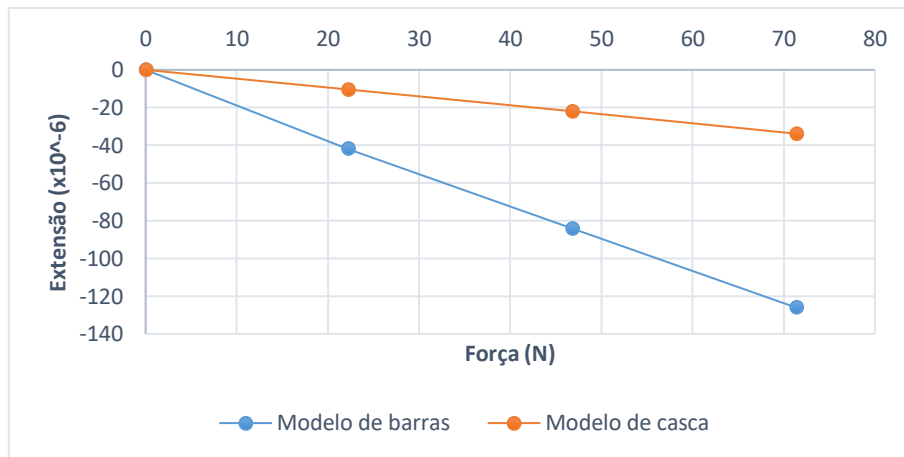


Figura A10. 53 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-1 no EE9.

Tabela A10. 54 - Análise comparativa das extensões no E-N1-2 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	41,9	10,5	-31,3	-298
2	46,8	84,2	22,1	-62,1	-281
3	71,4	126,1	33,9	-92,2	-272

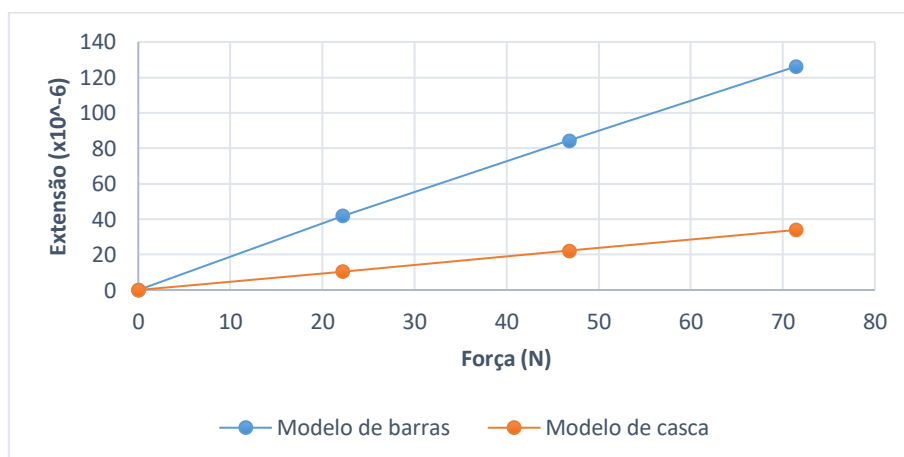


Figura A10. 54 - Comparação das extensões entre modelos numéricos do extensômetro E-N1-2 no EE9.

- Rotações:**

Tabela A10. 55 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE1 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-79,0	-87,7	-8,7	10
2	46,8	-166,5	-184,8	-18,3	10
3	71,4	-254,0	-282,0	-28,0	10

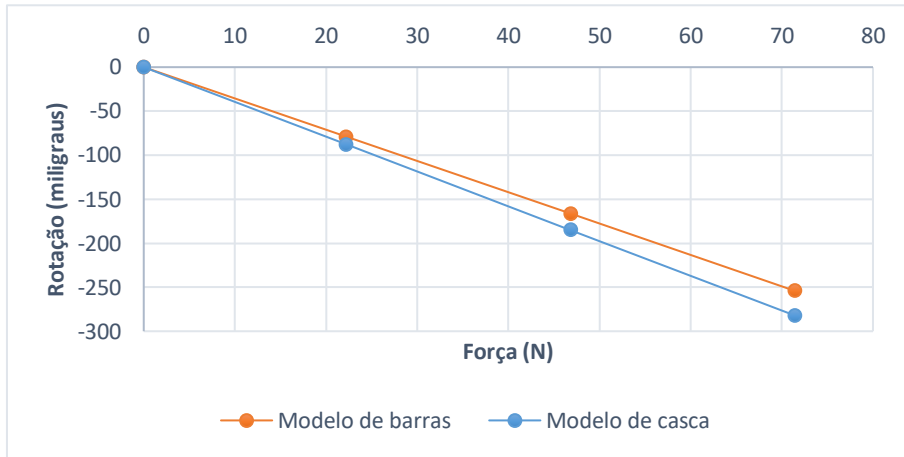


Figura A10. 55 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE1.

Tabela A10. 56 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE1 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-228,4	-204,1	24,2	-12
2	46,8	-481,4	-430,3	51,0	-12
3	71,4	-734,4	-656,5	77,9	-12

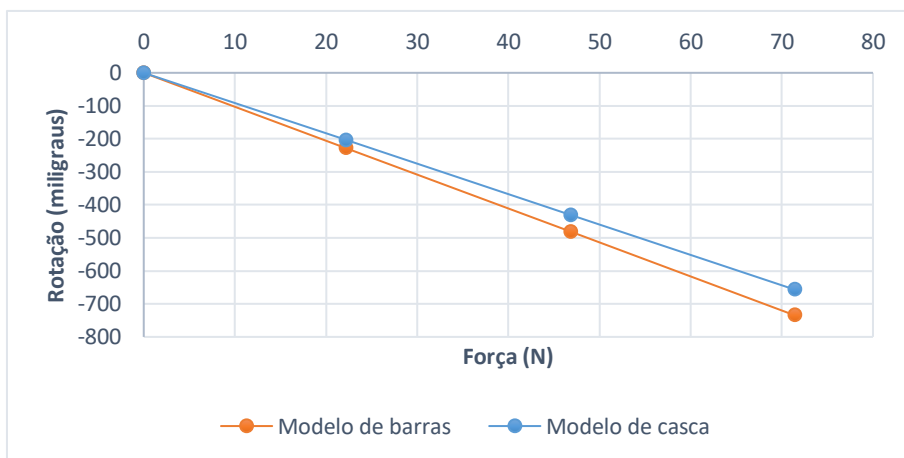


Figura A10. 56 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE1.

Tabela A10. 57 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE2 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1430,9	-1441,3	-10,4	1
2	46,8	-1582,5	-1630,3	-47,8	3
3	71,4	-1734,1	-1819,1	-85,0	5

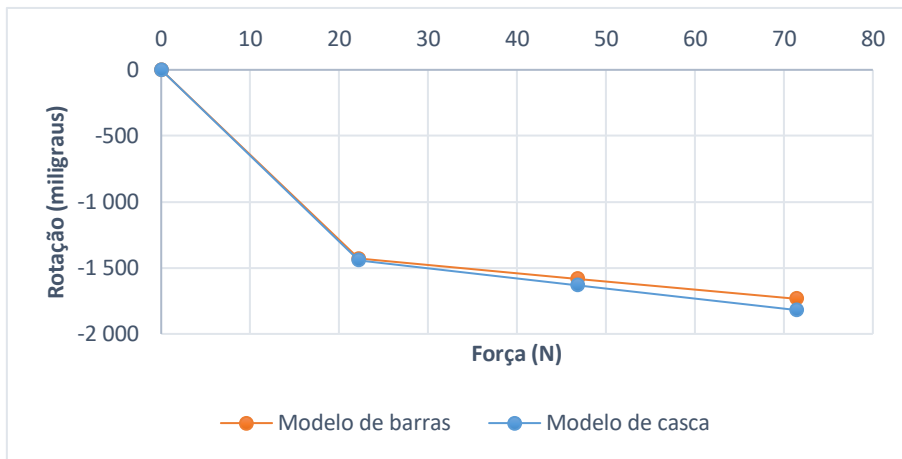


Figura A10. 57 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE2.

Tabela A10. 58 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE2 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1580,3	-1557,2	-23,1	-1
2	46,8	-1897,4	-1875,4	-22,0	-1
3	71,4	-2214,6	-2193,7	-20,9	-1

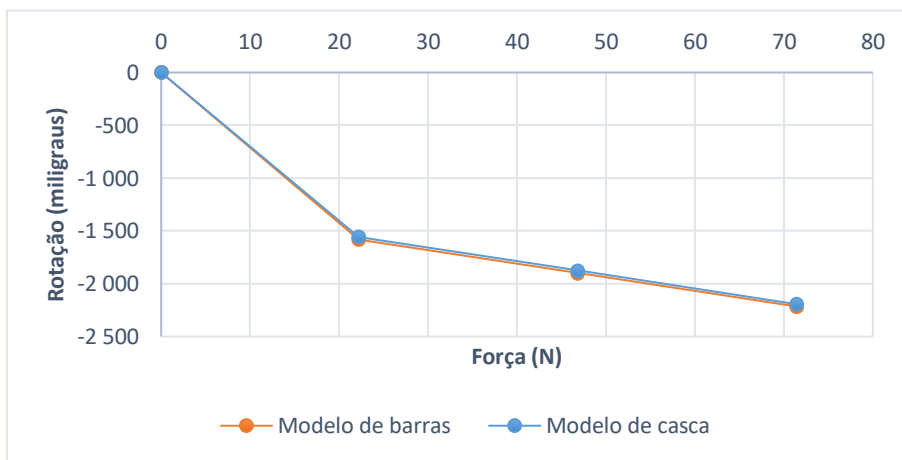


Figura A10. 58 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE2.

Tabela A10. 59 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE3 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-79,0	-89,3	-10,3	12
2	46,8	-166,5	-188,2	-21,7	12
3	71,4	-254,0	-287,1	-33,1	12

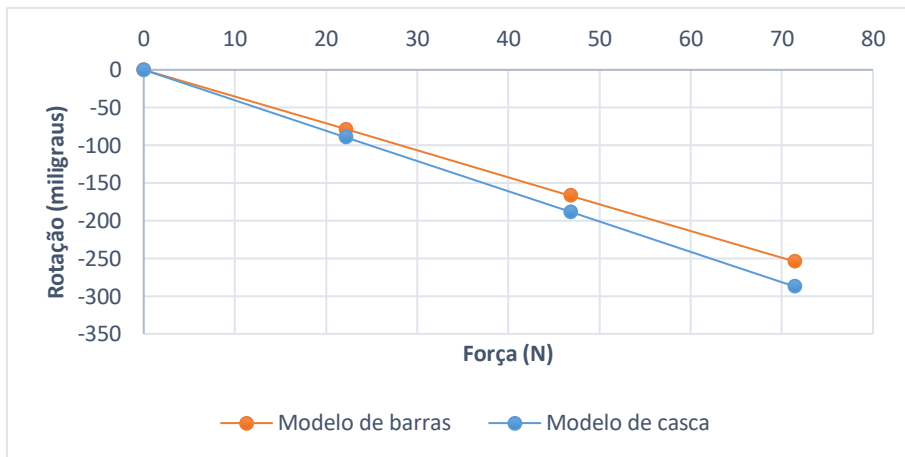


Figura A10. 59 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE3.

Tabela A10. 60 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE3 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-2929,7	-3049,7	-120,0	4
2	46,8	-3323,4	-3360,7	-37,3	4
3	71,4	-3717,2	-3671,7	45,5	-1

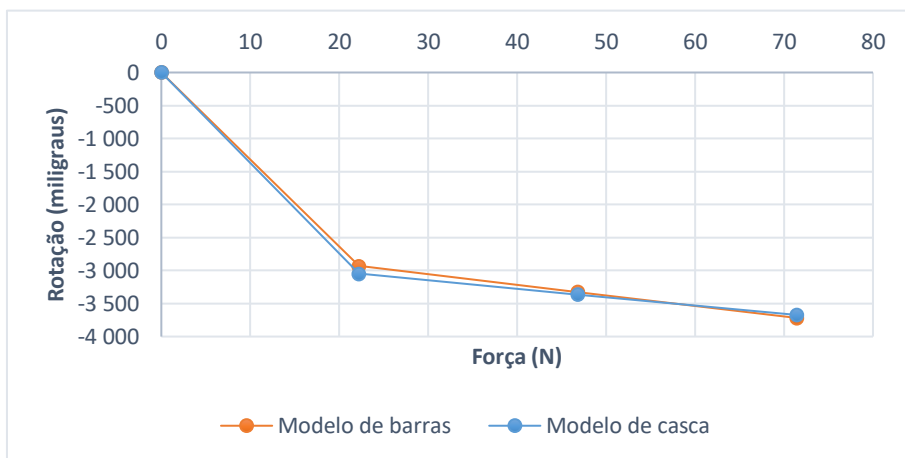


Figura A10. 60 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE3.

Tabela A10. 61 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE4 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-2279,2	-2178,5	100,8	-5
2	46,8	-2430,8	-2370,5	60,4	-3
3	71,4	-2582,5	-2562,5	20,0	-1

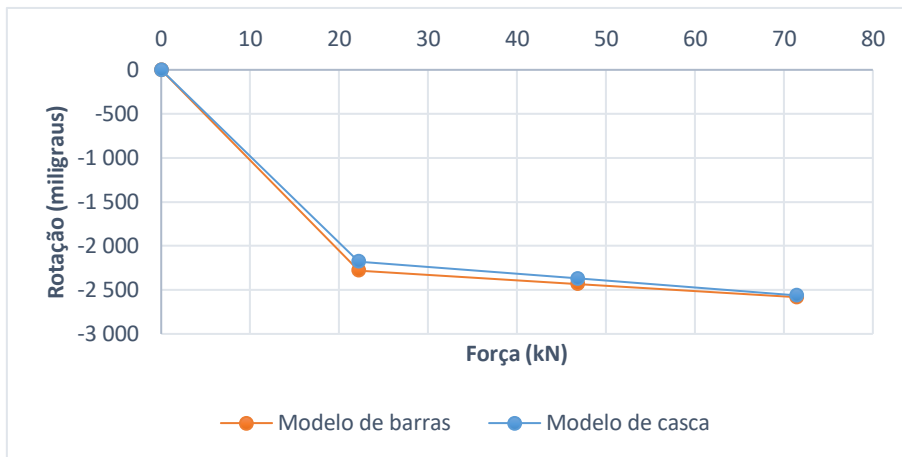


Figura A10. 61 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE4.

Tabela A10. 62 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE4 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-3338,1	-3420,2	-82,1	2
2	46,8	-3873,8	-3824,2	49,6	-1
3	71,4	-4331,7	-4228,3	103,4	-2

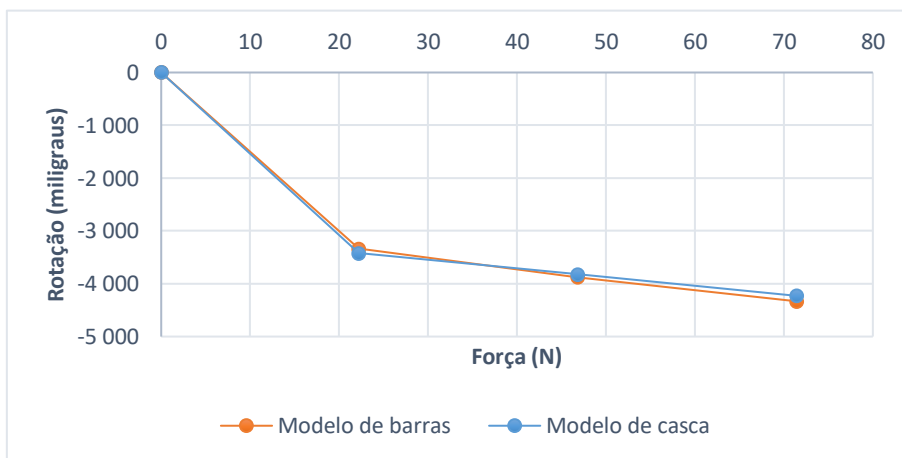


Figura A10. 62 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE4.

Tabela A10. 63 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE5 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barra	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-78,2	-80,9	-2,7	3
2	46,8	-164,9	-170,6	-5,7	3
3	71,4	-251,6	-260,3	-8,8	3

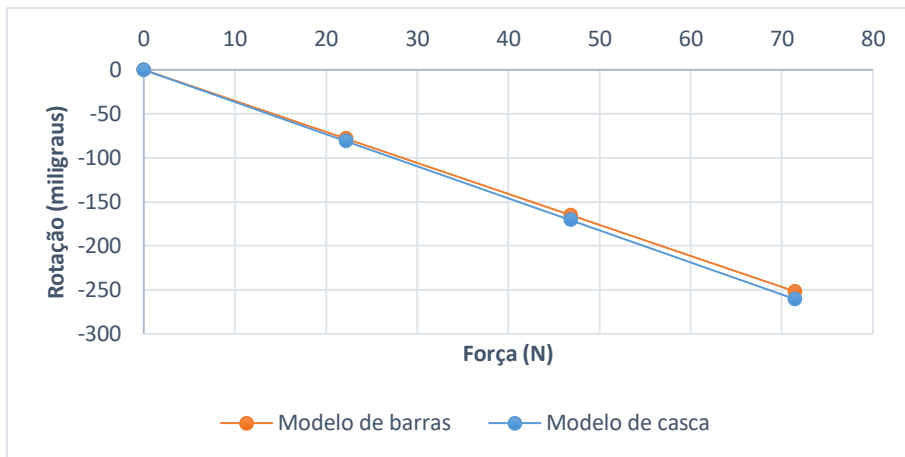


Figura A10. 63 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE5.

Tabela A10. 64 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE5 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-227,6	-197,1	30,5	-15
2	46,8	-479,8	-415,6	64,2	-15
3	71,4	-732,0	-634,0	98,0	-15

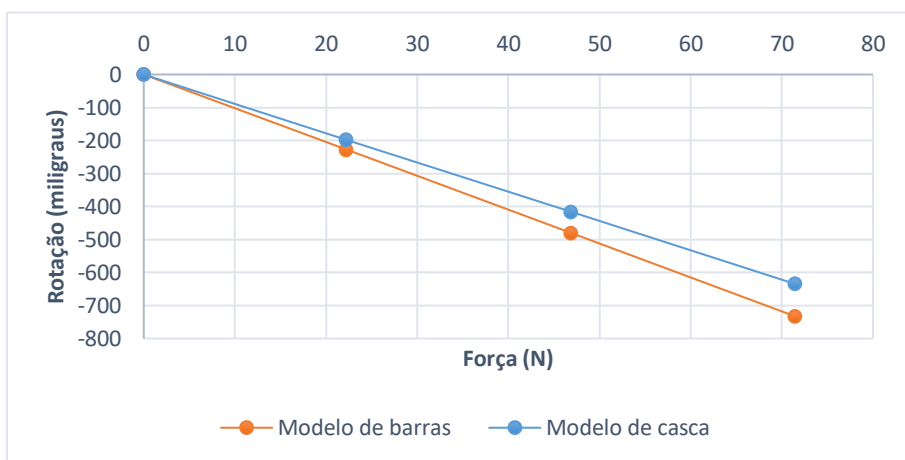


Figura A10. 64 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE5.

Tabela A10. 65 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE6 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-78,4	-76,7	1,7	-2
2	46,8	-165,3	-161,7	3,7	-2
3	71,4	-252,3	-246,7	5,6	-2

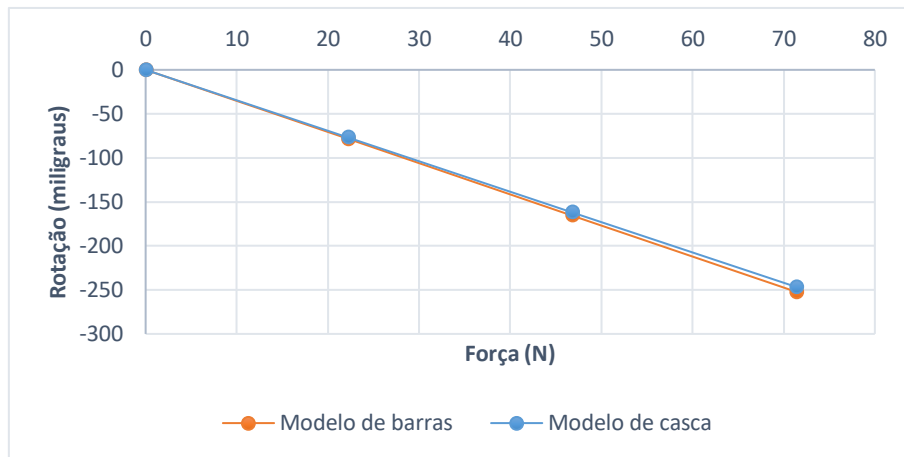


Figura A10. 65 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE6.

Tabela A10. 66 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE6 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-226,9	-179,8	47,0	-26
2	46,8	-478,3	-379,1	99,1	-26
3	71,4	-729,7	-578,4	151,2	-26

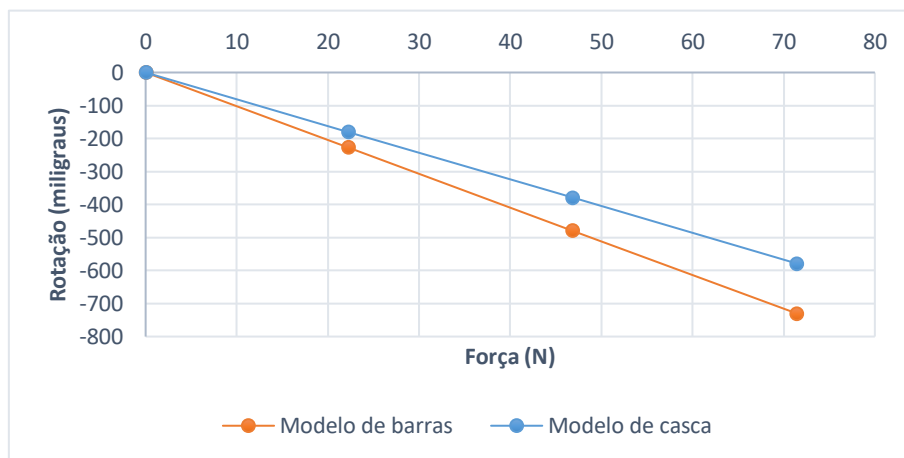


Figura A10. 66 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE6.

Tabela A10. 67 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE7 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-77,7	-69,6	8,1	-12
2	46,8	-163,8	-146,8	17,0	-12
3	71,4	-249,9	-223,9	25,9	-12

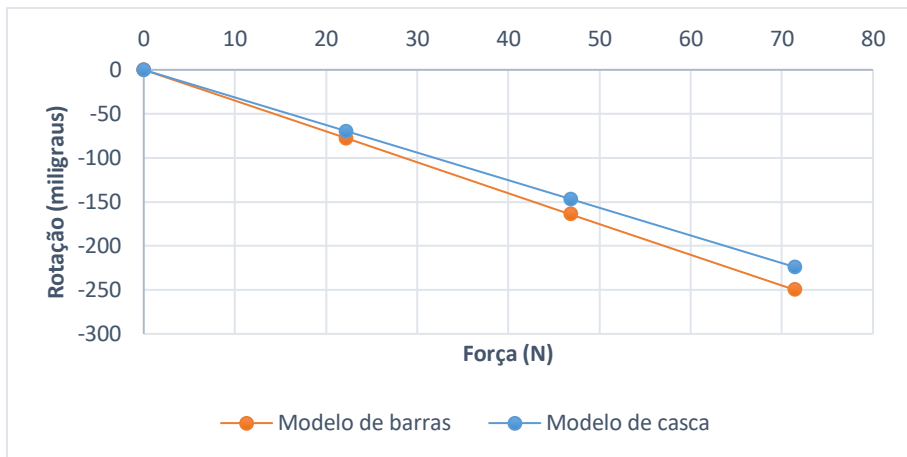


Figura A10. 67 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE7.

Tabela A10. 68 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE7 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-226,1	-173,3	52,9	-31
2	46,8	-476,7	-365,3	111,4	-31
3	71,4	-727,3	-557,2	170,0	-31

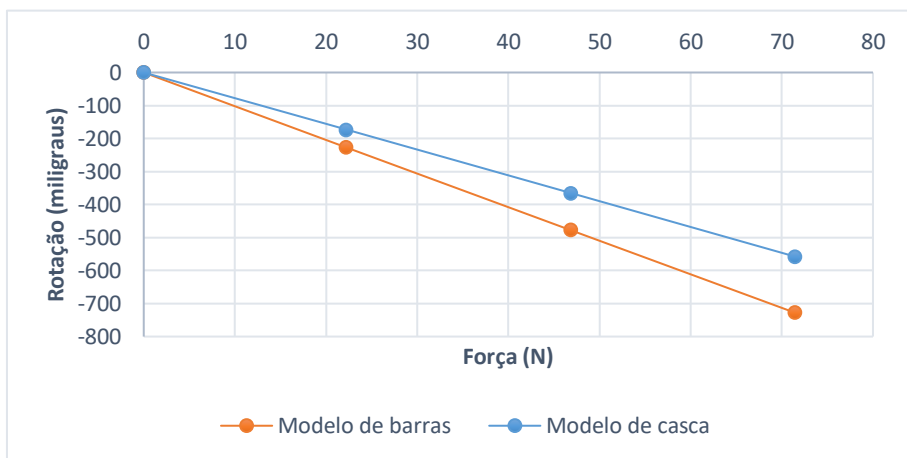


Figura A10. 68 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE7.

Tabela A10. 69 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE8 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1202,2	-1177,6	24,6	-2
2	46,8	-1555,8	-1592,4	-36,6	2
3	71,4	-1705,4	-1775,3	-69,9	4

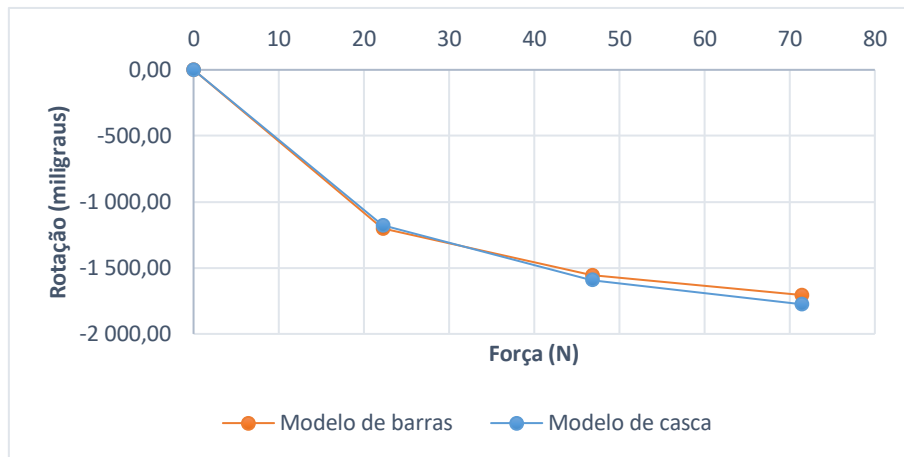


Figura A10. 69 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE8.

Tabela A10. 70 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE8 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1351,5	-1293,5	58,0	-4
2	46,8	-1870,7	-1837,4	33,3	-2
3	71,4	-2185,9	-2151,4	34,5	-2

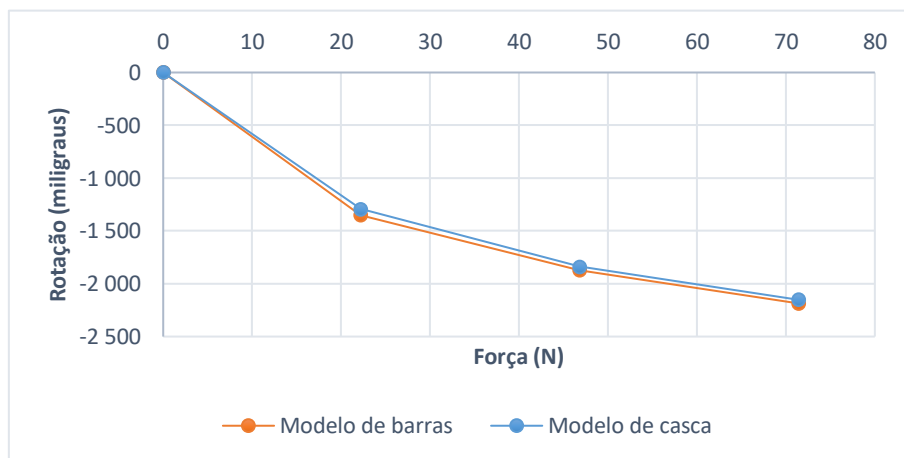


Figura A10. 70 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE8.

Tabela A10. 71 - Comparação das rotações no nível 1 para o EE9 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-55,3	-18,4	36,9	-201
2	46,8	-111,1	-38,8	72,3	-186
3	71,4	-166,3	-59,2	107,1	-181

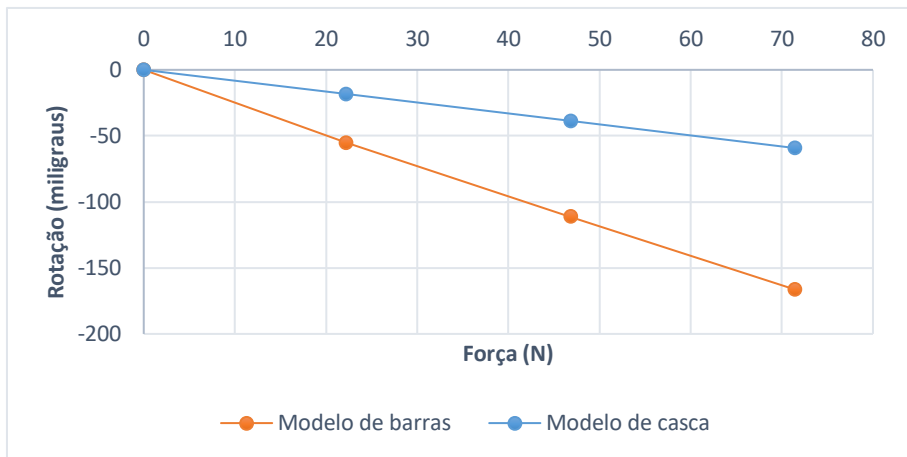


Figura A10. 71 - Comparação das rotações entre modelos no nível 1 para o EE9.

Tabela A10. 72 - Comparação das rotações no nível 2 para o EE9 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Modelo de barras	Modelo de casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-612,0	-700,6	-88,5	13
2	46,8	-1432,5	-1476,9	-44,4	3
3	71,4	-2269,4	-2253,2	-16,2	-1

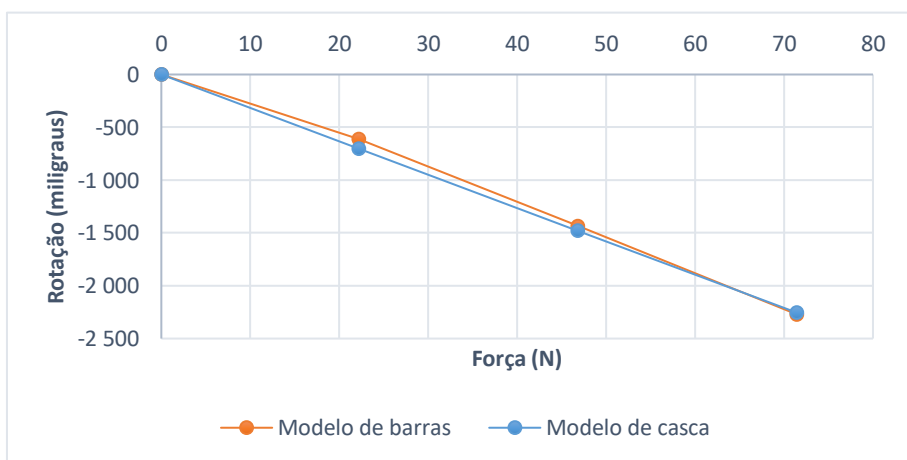


Figura A10. 72 - Comparação das rotações entre modelos no nível 2 para o EE9.

- **Análise modal:**

Massas no nível 1:

Tabela A10. 73 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED1.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	8,07	7,59	-0,48	-6
2º	22,27	23,32	1,05	5

Tabela A10. 74 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED2.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,59	1,60	0,01	1
2º	17,63	17,58	-0,05	0

Tabela A10. 75 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED3.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,55	2,59	0,04	2
2º	13,91	11,75	-2,16	-18

Tabela A10. 76 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED4.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,25	1,26	0,01	1
2º	5,96	5,63	-0,33	-6

Tabela A10. 77 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED5.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	8,11	7,91	-0,20	-3
2º	22,31	23,49	1,18	5

Tabela A10. 78 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED6.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	8,10	8,06	-0,04	0
2º	22,28	23,43	1,15	5

Tabela A10. 79 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED7.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	8,14	8,50	0,36	4
2º	22,31	23,67	1,36	6

Tabela A10. 80 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED8.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,76	1,78	0,02	1
2º	17,64	17,59	-0,05	0

Tabela A10. 81 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED9.1 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	5,56	5,47	-0,09	-2
2º	14,81	11,76	-3,05	-26

Massas no nível 2:

Tabela A10. 82 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED1.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,54	4,49	-0,05	-1
2º	26,99	33,64	6,65	20

Tabela A10. 83 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED2.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,13	1,15	0,02	2
2º	12,82	19,63	6,81	35

Tabela A10. 84 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED3.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,26	1,26	0,00	0
2º	23,53	20,67	2,86	14

Tabela A10. 85 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED4.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,85	0,85	0,00	0
2º	7,51	6,83	-0,68	-10

Tabela A10. 86 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED5.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,56	4,63	0,07	2
2º	27,03	34,19	7,16	21

Tabela A10. 87 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED6.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,56	4,79	0,23	5
2º	26,99	33,64	6,65	20

Tabela A10. 88 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED7.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,57	4,98	0,41	8
2º	27,03	34,41	7,38	21

Tabela A10. 89 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED8.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,25	1,27	0,02	2
2º	18,88	19,68	0,80	4

Tabela A10. 90 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED9.2 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,79	2,66	-0,13	-5
2º	24,25	20,67	-3,58	-17

Massas nos dois níveis:

Tabela A10. 91 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED1.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,44	4,34	-0,10	-2
2º	19,06	19,98	0,92	5

Tabela A10. 92 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED2.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,04	1,05	0,01	1
2º	12,92	13,61	0,69	5

Tabela A10. 93 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED3.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,26	1,26	0,00	0
2º	13,75	9,61	-4,14	-43

Tabela A10. 94 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED4.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,79	0,79	0,00	0
2º	4,61	4,28	-0,33	-8

Tabela A10. 95 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED5.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,46	4,49	0,03	1
2º	19,11	20,27	1,16	6

Tabela A10. 96 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED6.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,46	4,63	0,17	4
2º	19,06	19,99	0,93	5

Tabela A10. 97 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED7.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,47	4,82	0,35	7
2º	19,11	20,39	1,28	6

Tabela A10. 98 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED8.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,15	1,17	0,02	2
2º	12,95	13,64	0,69	5

Tabela A10. 99 - Comparação das frequências nos modelos representativos do ED9.3 (em Hz).

Modos	Modelo barras	Modelo casca	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,78	2,66	-0,12	-5
2º	14,47	12,00	-2,47	-21

Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de barras:

- Deslocamentos:

Tabela A10. 100 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE1 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,934	0,746	0,188	20
2	46,8	1,958	1,572	0,386	20
3	71,4	2,993	2,398	0,595	20
2	46,8	2,021	1,572	0,449	22
1	22,2	1,000	0,746	0,254	25

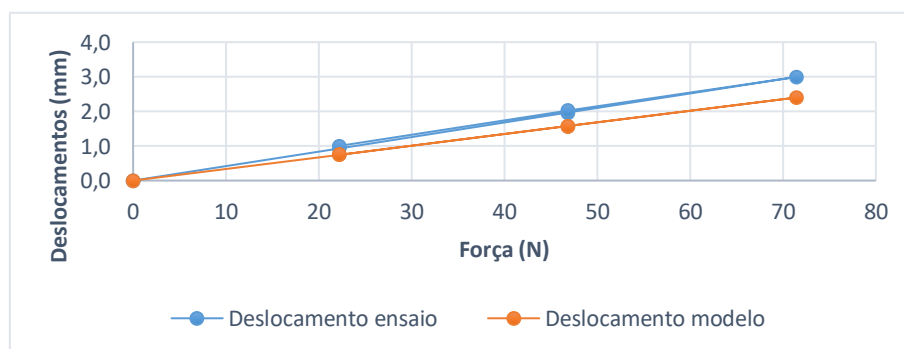


Figura A10. 73 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE1.

Tabela A10. 101 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE1 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,618	3,173	0,445	12
2	46,8	7,512	6,688	0,823	11
3	71,4	11,510	10,204	1,306	11
2	46,8	7,710	6,688	1,022	13
1	22,2	3,812	3,173	0,639	17

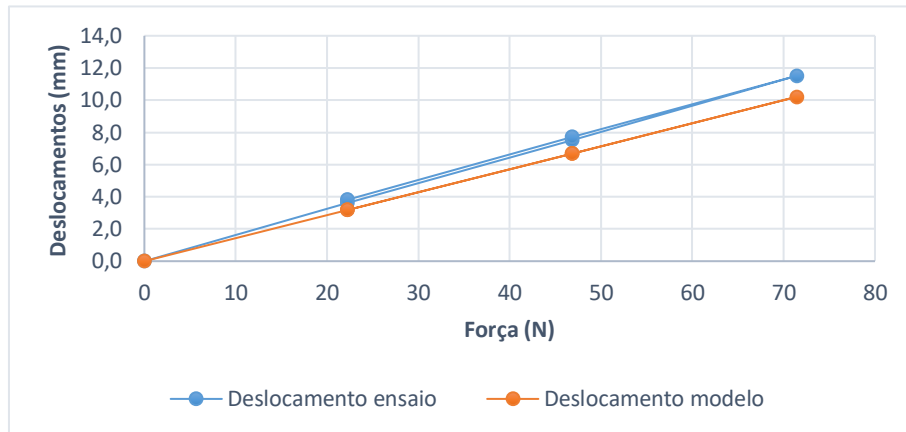


Figura A10. 74 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE1.

Tabela A10. 102 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE2 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	23,134	23,539	-0,405	-2
2	46,8	25,030	25,446	-0,416	-2
3	71,4	27,059	27,353	-0,294	-1
2	46,8	25,775	25,446	0,329	1
1	22,2	23,861	23,539	0,322	1

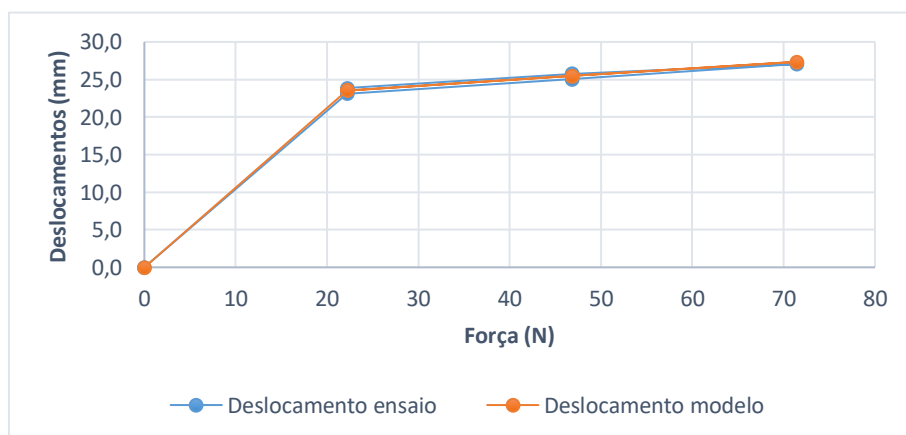


Figura A10. 75 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE2.

Tabela A10. 103 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE2 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	45,520	45,125	0,394	1
2	46,8	50,912	50,630	0,282	1
3	71,4	56,664	56,135	0,529	1
2	46,8	52,395	50,630	1,765	3
1	22,2	46,964	45,125	1,839	4

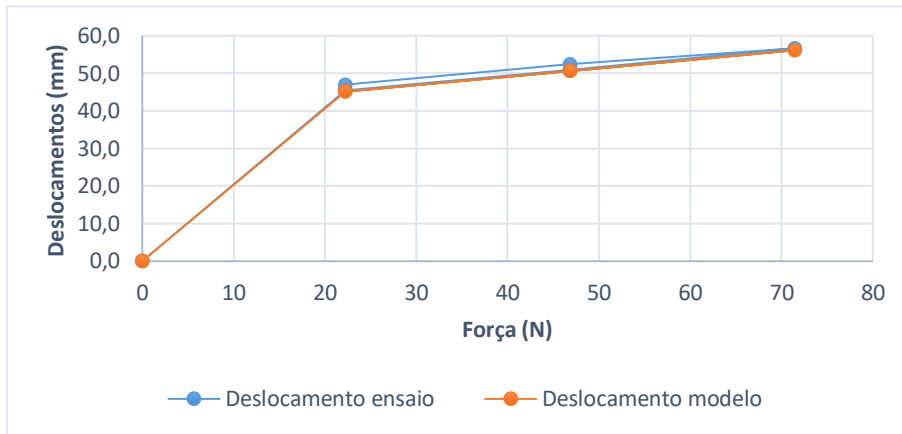


Figura A10. 76 - orça vs deslocamento no nível 2 para o EE2.

Tabela A10. 104 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE3 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,807	0,746	0,062	8
2	46,8	1,874	1,572	0,302	16
3	71,4	2,943	2,398	0,545	19
2	46,8	1,730	1,572	0,158	9
1	22,2	1,182	0,746	0,436	37

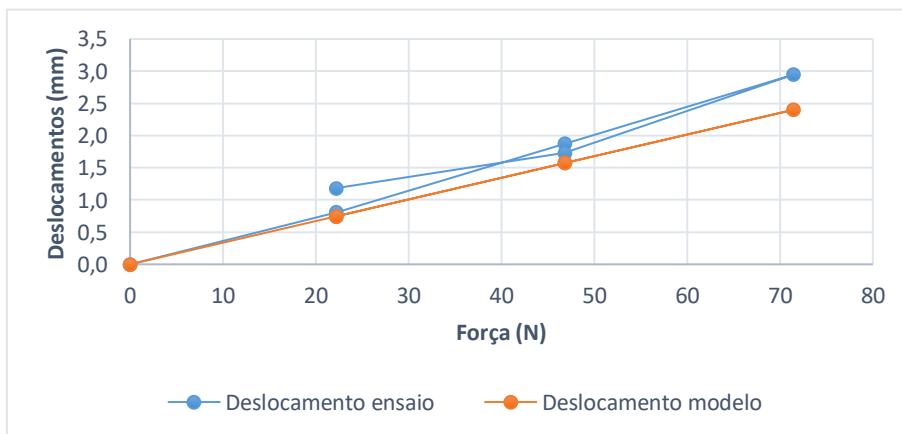


Figura A10. 77 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE3.

Tabela A10. 105 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE3 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	41,055	41,456	-0,401	-1
2	46,8	47,205	46,966	0,239	1
3	71,4	52,265	52,476	0,210	0
2	46,8	48,140	46,966	1,174	2
1	22,2	42,881	41,456	1,425	3

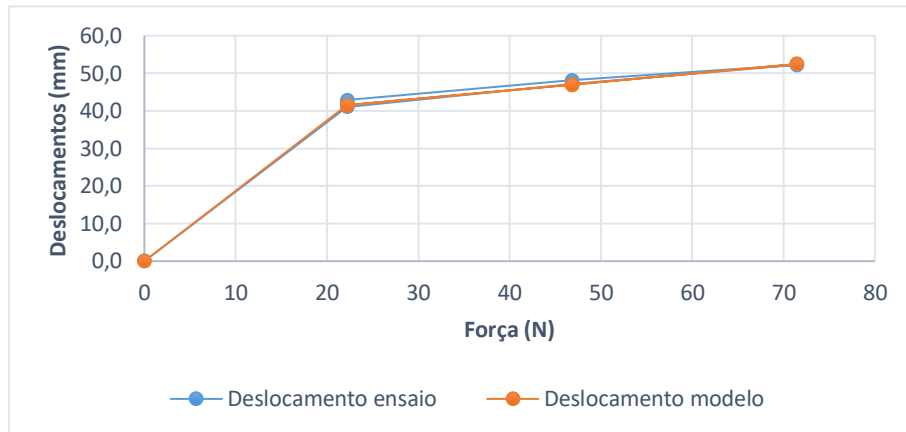


Figura A10. 78 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE3.

Tabela A10. 106 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE4 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	37,219	37,842	-0,623	-2
2	46,8	39,573	39,749	-0,176	0
3	71,4	41,793	41,793	0,000	0
2	46,8	39,948	39,749	0,200	0
1	22,2	37,736	37,842	-0,106	0

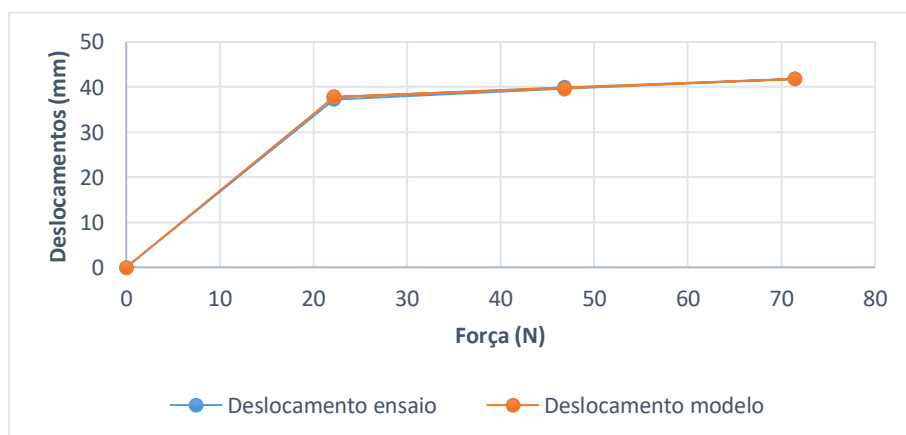


Figura A10. 79 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE4.

Tabela A10. 107 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE4 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	84,507	84,340	0,168	0
2	46,8	92,733	92,943	-0,210	0
3	71,4	100,628	100,442	0,186	0
2	46,8	93,577	92,943	0,634	1
1	22,2	85,653	84,340	1,312	2

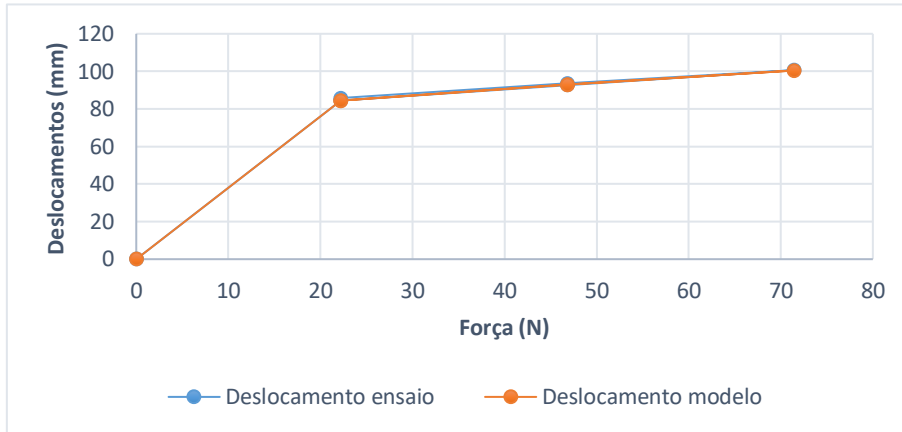


Figura A10. 80 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE4.

Tabela A10. 108 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE5 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,738	0,737	0,001	0
2	46,8	1,685	1,554	0,131	8
3	71,4	2,789	2,370	0,419	15
2	46,8	1,933	1,554	0,379	20
1	22,2	0,872	0,737	0,135	15

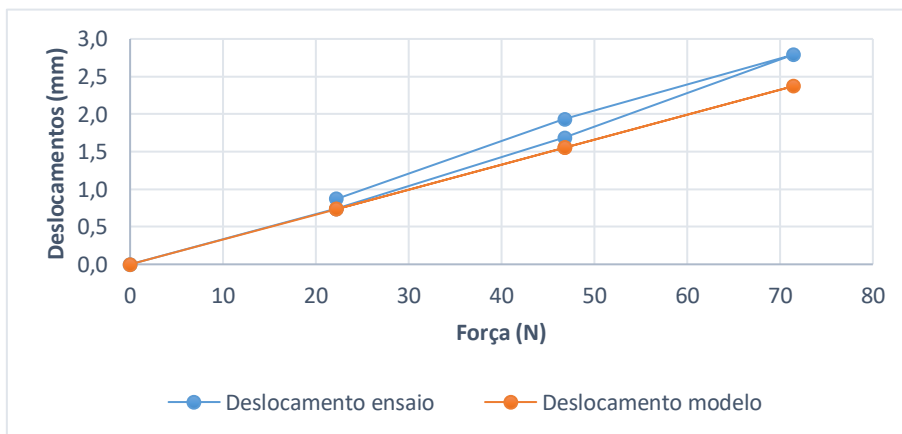


Figura A10. 81 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE5.

Tabela A10. 109 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE5 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,504	3,153	0,351	10
2	46,8	7,586	6,648	0,938	12
3	71,4	11,584	10,142	1,442	12
2	46,8	7,722	6,648	1,075	14
1	22,2	3,639	3,153	0,486	13

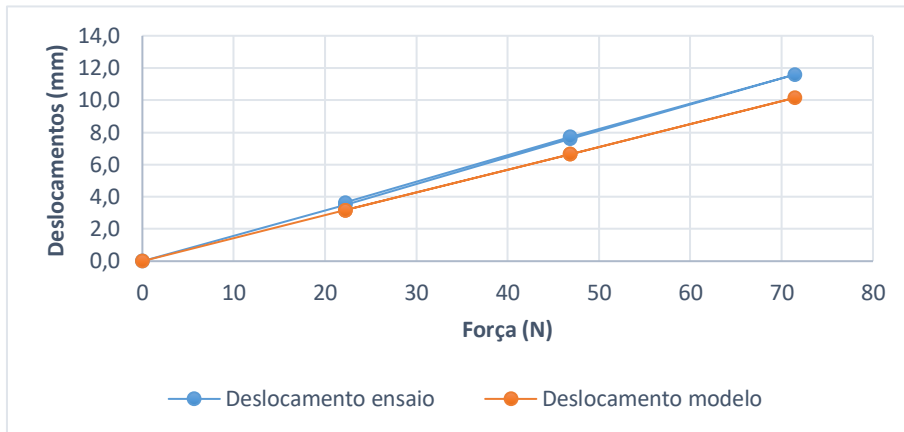


Figura A10. 82 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE5.

Tabela A10. 110 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE6 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,656	0,741	-0,084	-13
2	46,8	1,593	1,561	0,032	2
3	71,4	2,581	2,382	0,200	8
2	46,8	1,819	1,561	0,258	14
1	22,2	0,882	0,741	0,142	16

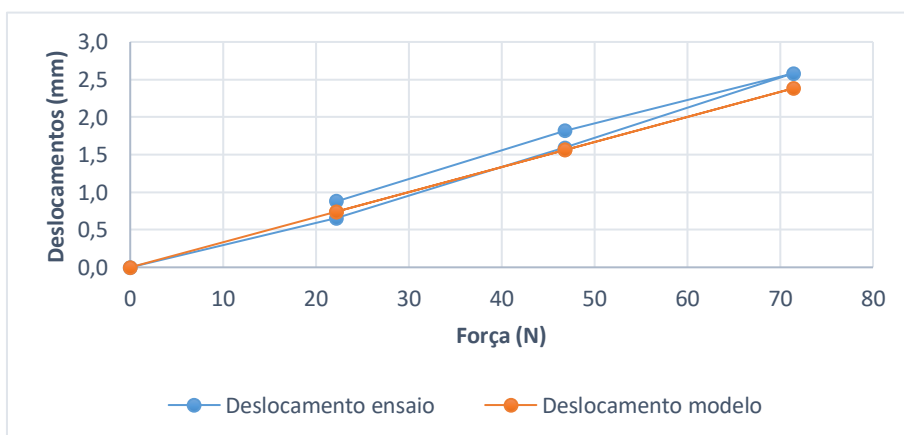


Figura A10. 83 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE6.

Tabela A10. 111 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE6 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,086	3,151	-0,066	-2
2	46,8	6,714	6,643	0,071	1
3	71,4	10,492	10,135	0,357	3
2	46,8	7,138	6,643	0,494	7
1	22,2	3,437	3,151	0,286	8

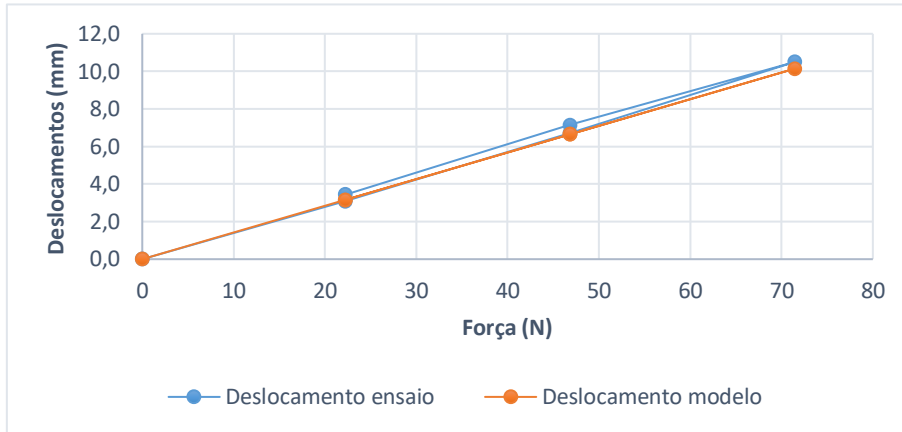


Figura A10. 84 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE6.

Tabela A10. 112 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE7 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,671	0,732	-0,061	-9
2	46,8	1,604	1,544	0,061	4
3	71,4	2,484	2,355	0,130	5
2	46,8	1,771	1,544	0,228	13
1	22,2	0,890	0,732	0,158	18

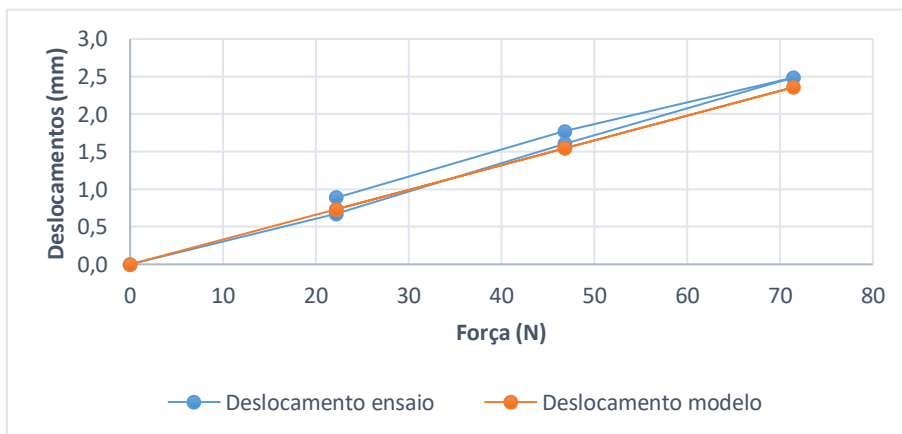


Figura A10. 85 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE7.

Tabela A10. 113 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE7 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,116	3,132	-0,017	-1
2	46,8	6,775	6,603	0,172	3
3	71,4	10,268	10,073	0,195	2
2	46,8	6,981	6,603	0,377	5
1	22,2	3,418	3,132	0,286	8

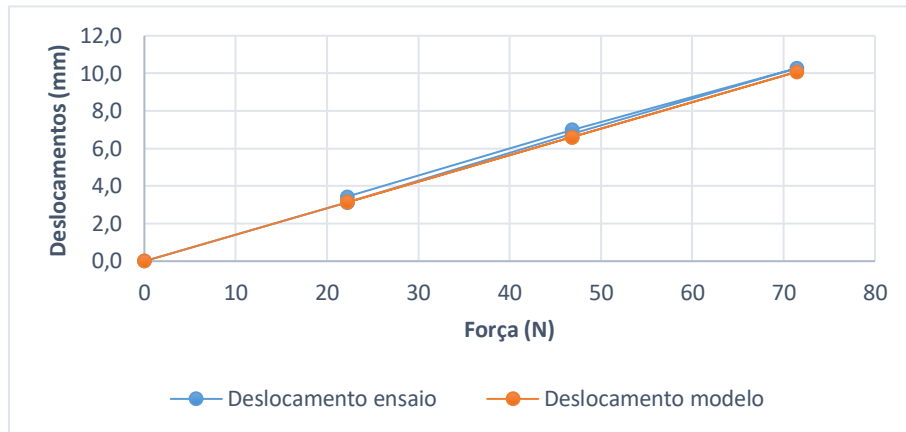


Figura A10. 86 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE7.

Tabela A10. 114 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE8 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	20,229	19,739	0,490	2
2	46,8	23,838	25,068	-1,230	-5
3	71,4	26,251	26,947	-0,696	-3
2	46,8	24,276	25,068	-0,793	-3
1	22,2	20,740	19,739	1,001	5

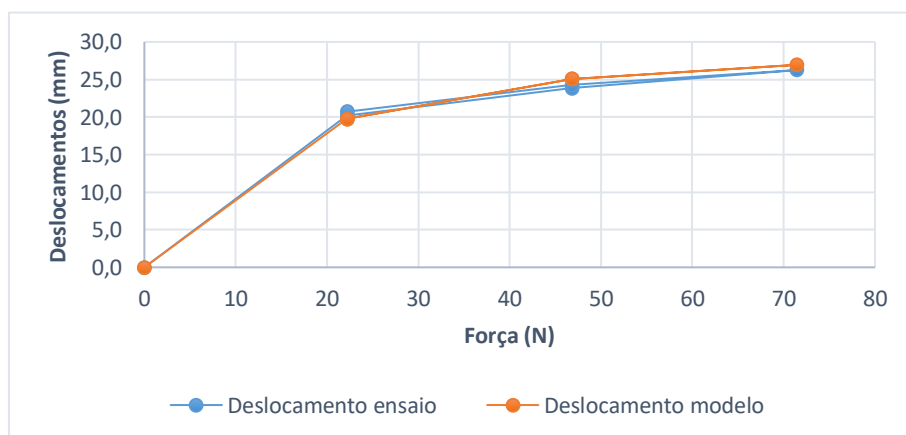


Figura A10. 87 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE8.

Tabela A10. 115 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE8 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	40,487	38,084	2,403	6
2	46,8	49,773	49,874	-0,101	0
3	71,4	55,575	55,322	0,252	0
2	46,8	49,850	49,874	-0,024	0
1	22,2	41,279	38,084	3,195	8

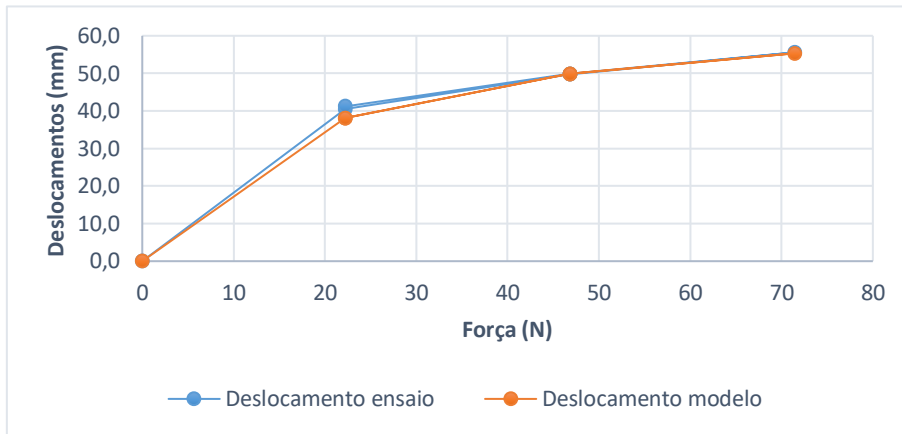


Figura A10. 88 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE8.

Tabela A10. 116 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE9 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,433	0,522	-0,089	-21
2	46,8	1,078	1,047	0,031	3
3	71,4	1,898	1,567	0,331	17
2	46,8	1,327	1,047	0,280	21
1	22,2	0,775	0,522	0,253	33

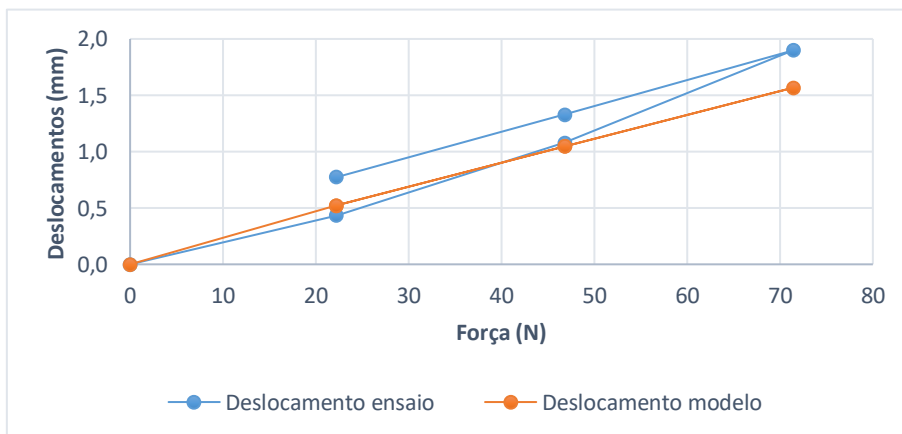


Figura A10. 89 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE9.

Tabela A10. 117 - Valores comparativos dos deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE9 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	8,264	8,600	-0,336	-4
2	46,8	24,846	20,145	4,701	19
3	71,4	30,886	31,921	-1,035	-3
2	46,8	25,639	20,145	5,494	21
1	22,2	9,084	8,600	0,484	5

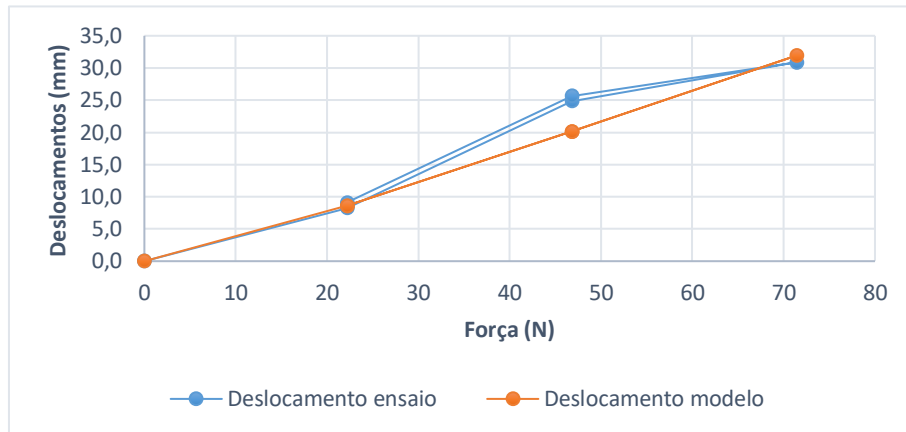


Figura A10. 90 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE9.

- Extensões:**

Tabela A10. 118 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-32,2	-36,9	4,7	-15
2	46,8	-66,4	-77,4	11,4	-17
3	71,4	-102,2	-118,6	16,5	-16
2	46,8	-66,9	-77,8	10,9	-16
1	22,2	-33,0	-36,9	3,9	-12

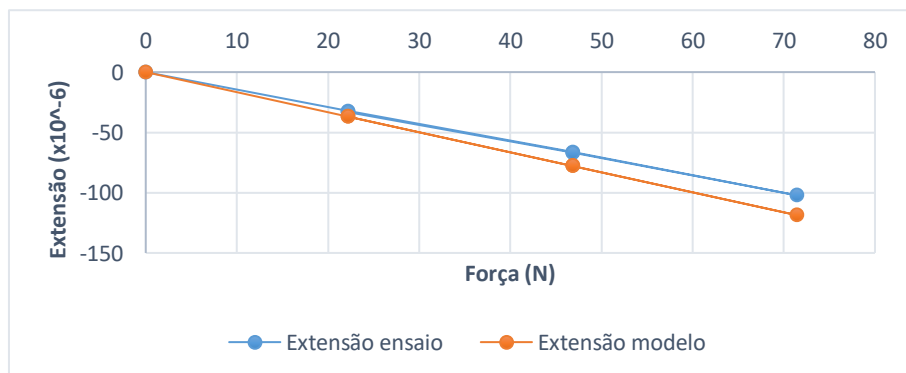


Figura A10. 91 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE1.

Tabela A10. 119 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	29,4	36,9	-7,5	-25
2	46,8	63,5	77,8	-14,3	-23
3	71,4	97,3	118,6	-21,3	-22
2	46,8	63,7	77,8	-14,1	-22
1	22,2	30,7	36,9	-6,2	-20

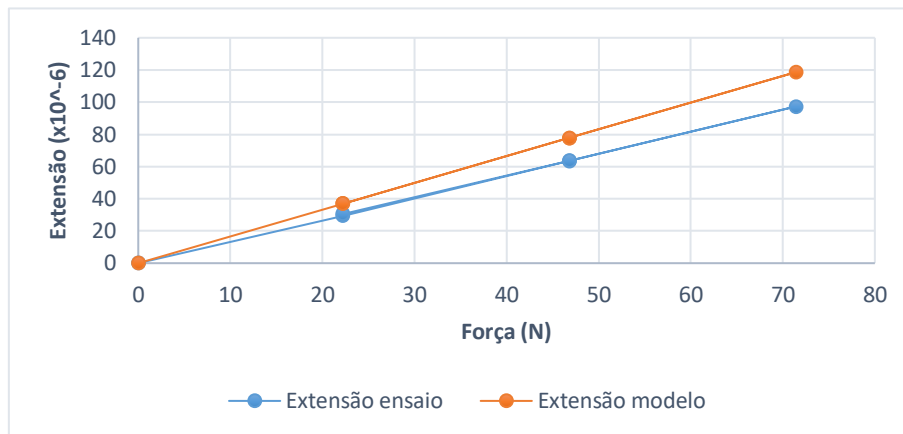


Figura A10. 92 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE1.

Tabela A10. 120 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-49,5	-59,0	9,5	-19
2	46,8	-101,9	-124,5	22,8	-22
3	71,4	-155,9	-190,4	34,5	-22
2	46,8	-102,9	-124,5	21,6	-21
1	22,2	-50,1	-59,0	8,9	-18

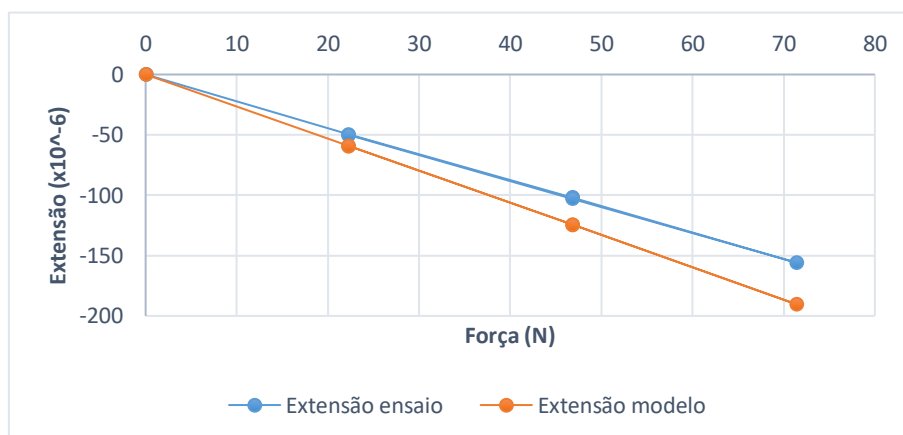


Figura A10. 93 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE1.

Tabela A10. 121 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	49,2	59,0	-9,8	-20
2	46,8	103,8	124,5	-20,6	-20
3	71,4	157,2	190,4	-33,2	-21
2	46,8	104,8	124,5	-19,7	-19
1	22,2	50,1	59,0	-8,9	-18

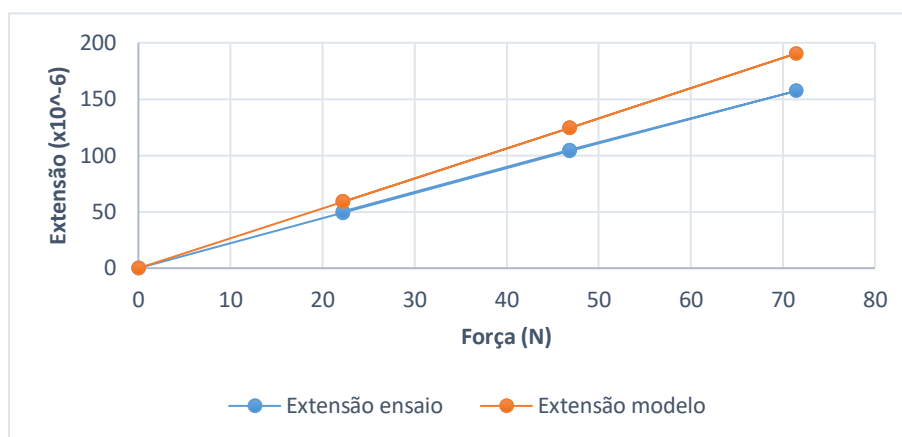


Figura A10. 94 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE1.

Tabela A10. 122 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-32,1	-36,9	4,8	-15
2	46,8	-65,3	-77,8	12,4	-19
3	71,4	-100,1	-118,6	18,5	-18
2	46,8	-68,8	-77,8	9,0	-13
1	22,2	-33,4	-36,9	3,5	-11

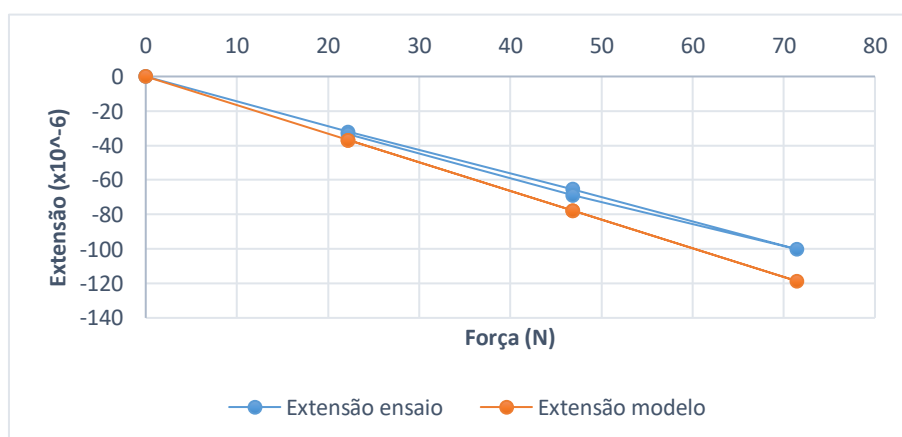


Figura A10. 95 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE2.

Tabela A10. 123 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	26,8	36,9	-10,1	-38
2	46,8	61,0	77,8	-16,7	-27
3	71,4	99,3	118,6	-19,3	-19
2	46,8	65,3	77,8	-12,4	-19
1	22,2	29,7	36,9	-7,2	-24

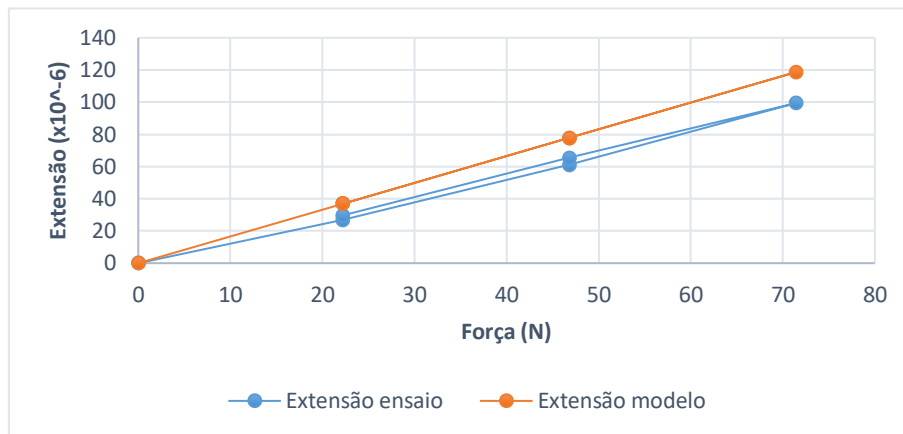


Figura A10. 96 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE2.

Tabela A10. 124 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-48,0	-59,0	11,0	-23
2	46,8	-97,7	-124,5	26,8	-27
3	71,4	-152,3	-190,4	38,1	-25
2	46,8	-105,5	-124,5	19,0	-18
1	22,2	-52,0	-59,0	7,1	-14

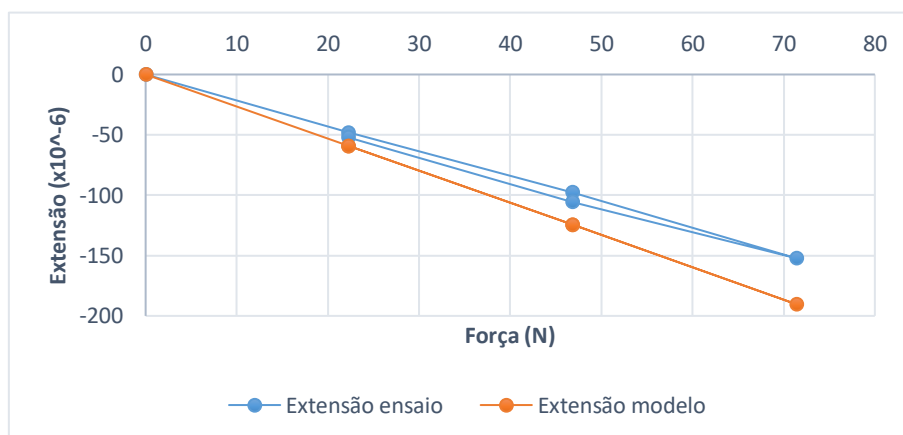


Figura A10. 97 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE2.

Tabela A10. 125 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	49,0	59,0	-10,1	-21
2	46,8	97,5	124,5	-26,9	-28
3	71,4	152,2	190,4	-38,2	-25
2	46,8	104,2	124,5	-20,2	-19
1	22,2	50,9	59,0	-8,1	-16

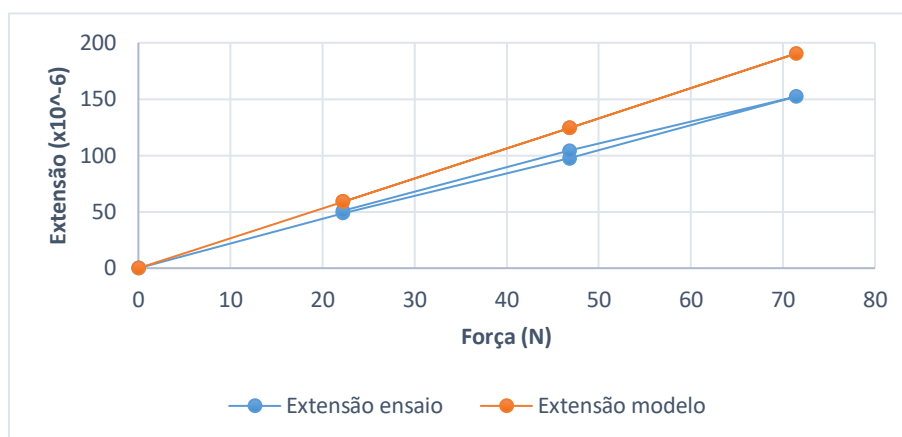


Figura A10. 98 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE2.

Tabela A10. 126 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-30,4	-36,9	6,5	-21
2	46,8	-67,9	-77,8	9,8	-14
3	71,4	-101,2	-118,6	17,4	-17
2	46,8	-71,1	-77,8	6,6	-9
1	22,2	-33,3	-36,9	3,6	-11

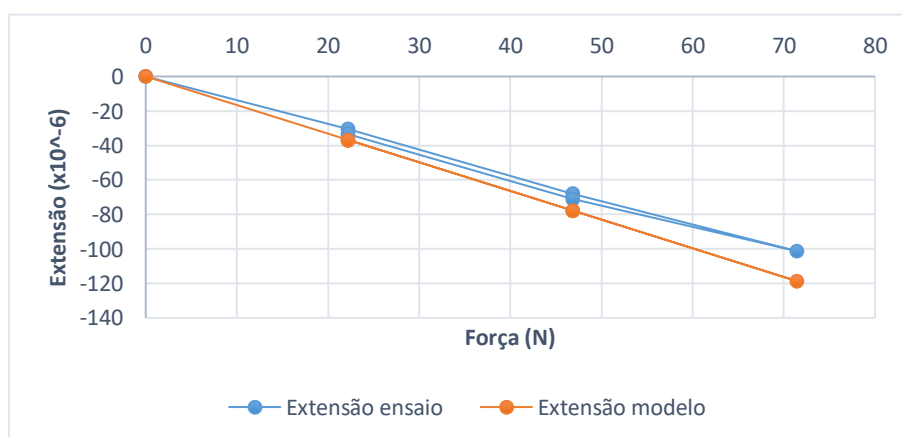


Figura A10. 99 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE3.

Tabela A10. 127 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	29,3	36,9	-7,6	-26
2	46,8	60,8	77,8	-17,0	-28
3	71,4	96,4	118,6	-22,2	-23
2	46,8	62,2	77,8	-15,6	-25
1	22,2	30,8	36,9	-6,1	-20

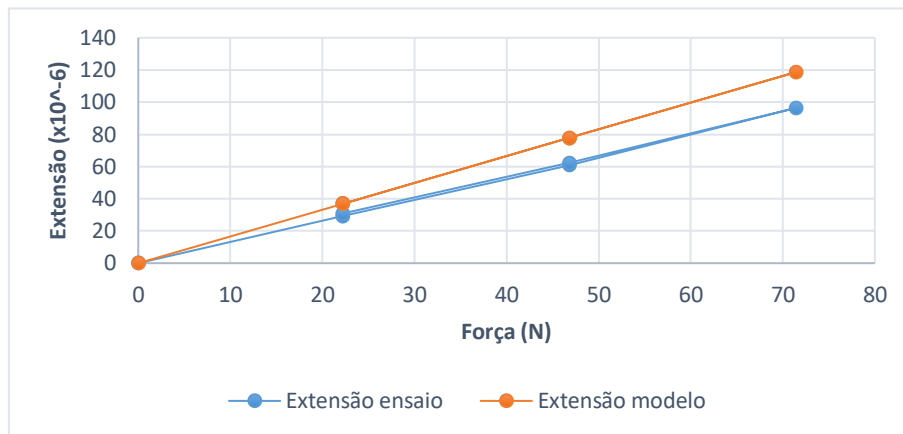


Figura A10. 100 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE3.

Tabela A10. 128 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-49,0	-59,0	10,1	-21
2	46,8	-104,3	-124,5	20,2	-19
3	71,4	-158,5	-189,8	31,3	-20
2	46,8	-108,4	-124,5	16,1	-15
1	22,2	-53,8	-59,0	5,3	-10

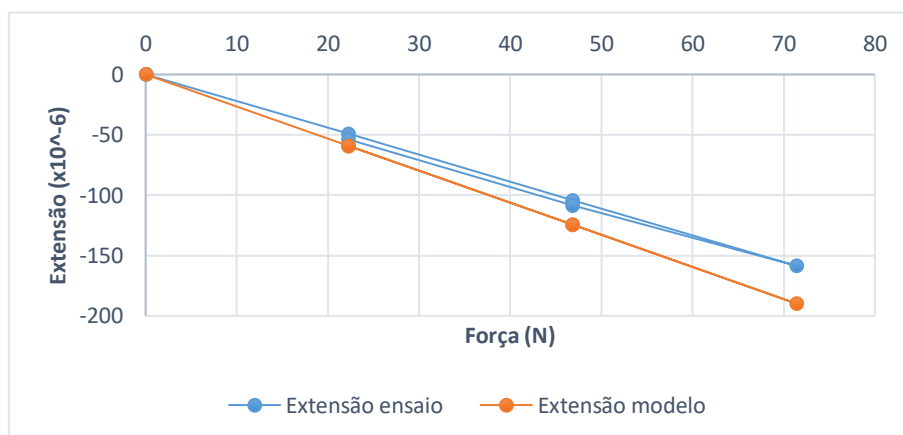


Figura A10. 101 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE3.

Tabela A10. 129 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	45,9	59,0	-13,1	-29
2	46,8	102,7	124,5	-21,8	-21
3	71,4	156,3	189,9	-33,6	-21
2	46,8	105,6	124,5	-18,8	-18
1	22,2	49,3	59,0	-9,7	-20

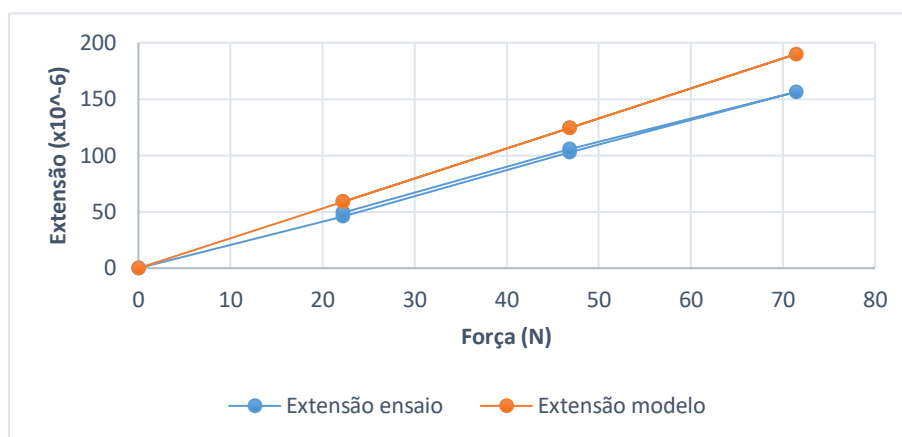


Figura A10. 102 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE3.

Tabela A10. 130 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-33,1	-36,9	3,8	-12
2	46,8	-69,9	-77,8	7,8	-11
3	71,4	-107,3	-118,6	11,3	-11
2	46,8	-69,9	-77,8	7,8	-11
1	22,2	-33,4	-36,9	3,5	-10

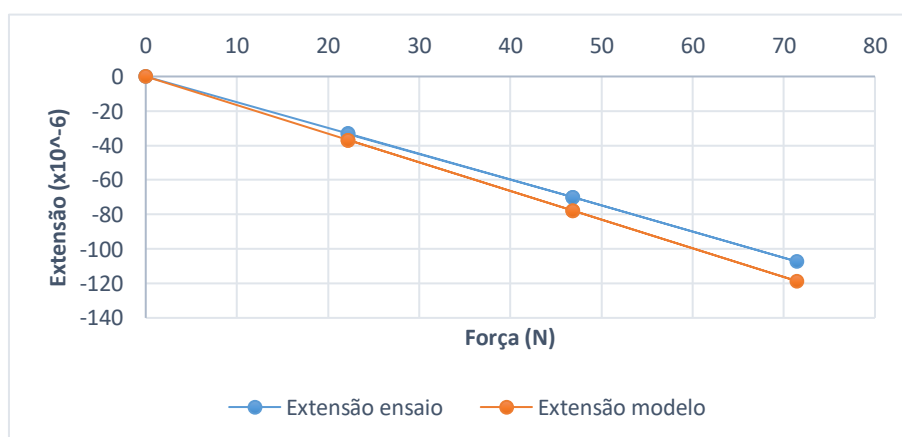


Figura A10. 103 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE4.

Tabela A10. 131 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	34,1	36,9	-2,8	-8
2	46,8	65,1	77,8	-12,6	-19
3	71,4	101,7	118,6	-16,9	-17
2	46,8	65,5	77,8	-12,2	-19
1	22,2	34,5	36,9	-2,4	-7

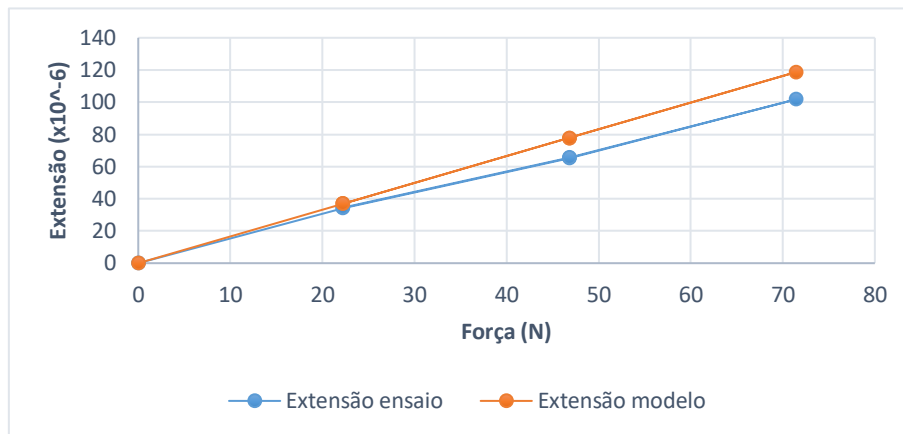


Figura A10. 104 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE4.

Tabela A10. 132 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-51,2	-59,0	7,9	-15
2	46,8	-105,3	-124,5	19,2	-18
3	71,4	-161,8	-189,9	28,1	-17
2	46,8	-105,4	-124,5	19,1	-18
1	22,2	-51,2	-59,0	7,8	-15

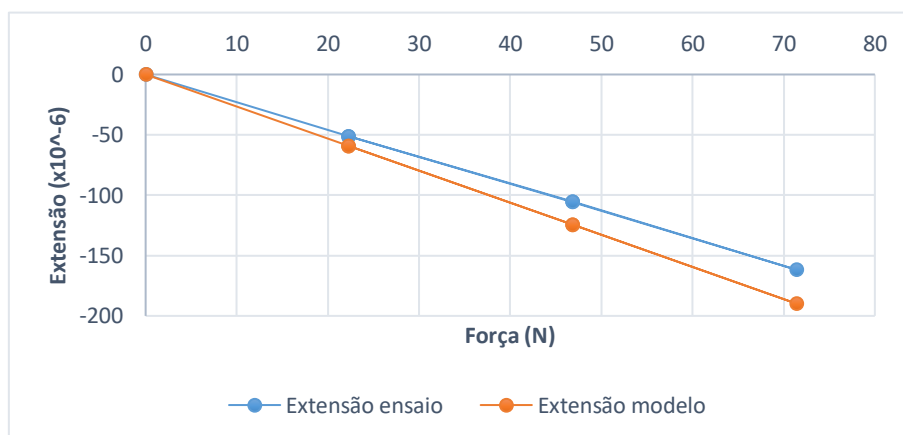


Figura A10. 105 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE4.

Tabela A10. 133 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	48,3	-59,0	-10,7	-22
2	46,8	102,8	-124,5	-21,6	-21
3	71,4	159,9	-189,9	-30,0	-19
2	46,8	104,1	-124,5	-20,4	-20
1	22,2	48,5	-59,0	-10,5	-22

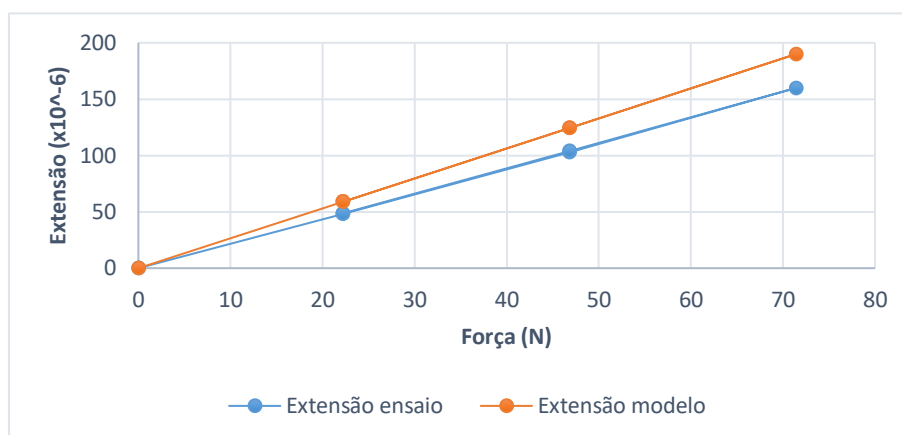


Figura A10. 106 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE4.

Tabela A10. 134 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-29,0	-36,4	7,4	-26
2	46,8	-64,0	-76,7	12,7	-20
3	71,4	-100,5	-117,0	16,5	-16
2	46,8	-66,6	-76,7	10,1	-15
1	22,2	-30,0	-36,4	6,3	-21

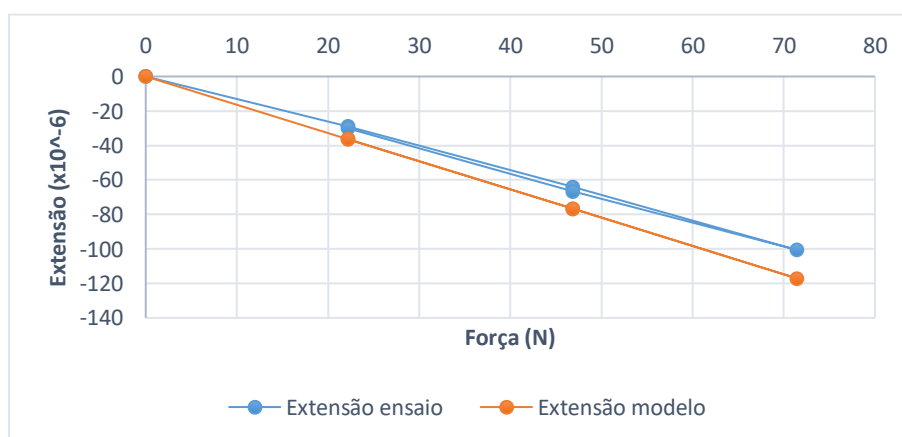


Figura A10. 107 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE5.

Tabela A10. 135 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	27,6	36,4	-8,8	-32
2	46,8	61,7	76,7	-15,0	-24
3	71,4	96,7	117,0	-20,3	-21
2	46,8	63,5	76,7	-13,2	-21
1	22,2	29,9	36,4	-6,4	-22

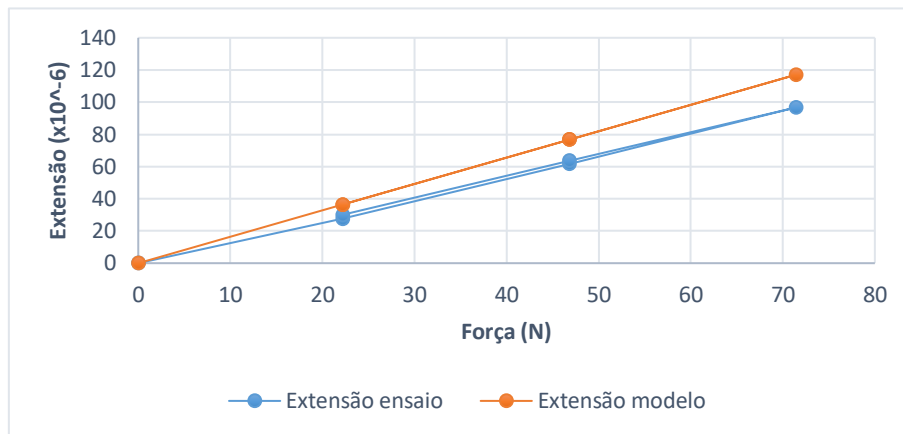


Figura A10. 108 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE5.

Tabela A10. 136 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-47,2	-59,0	11,9	-25
2	46,8	-102,8	-124,5	21,7	-21
3	71,4	-160,6	-189,9	29,3	-18
2	46,8	-106,4	-124,5	18,1	-17
1	22,2	-49,3	-59,0	9,8	-20

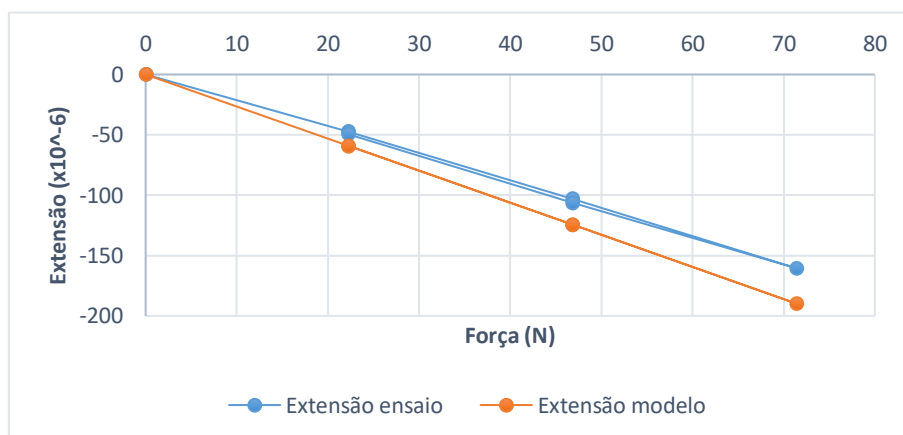


Figura A10. 109 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE5.

Tabela A10. 137 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	49,5	59,0	-9,5	-19
2	46,8	104,2	124,5	-20,2	-19
3	71,4	160,8	189,9	-29,1	-18
2	46,8	105,9	124,5	-18,5	-18
1	22,2	50,5	59,0	-8,5	-17

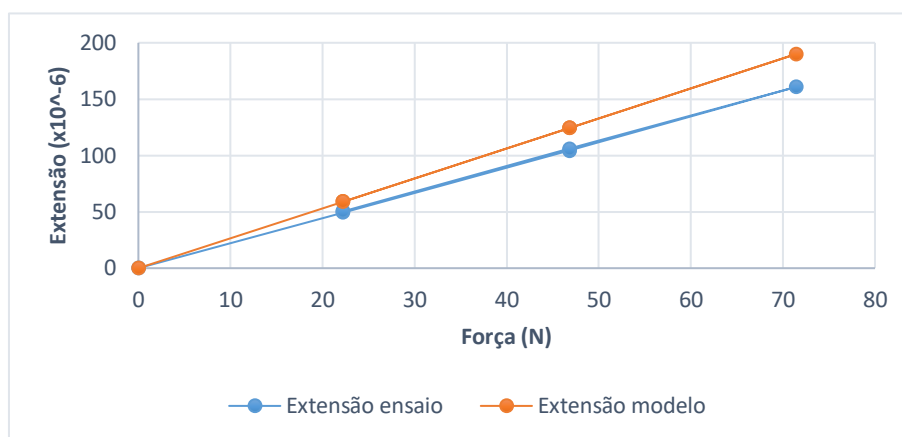


Figura A10. 110 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE5.

Tabela A10. 138 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-26,0	-36,6	10,6	-41
2	46,8	-59,1	-77,2	18,0	-31
3	71,4	-91,1	-117,8	26,7	-29
2	46,8	-59,7	-77,2	17,5	-29
1	22,2	-26,3	-36,6	10,2	-39

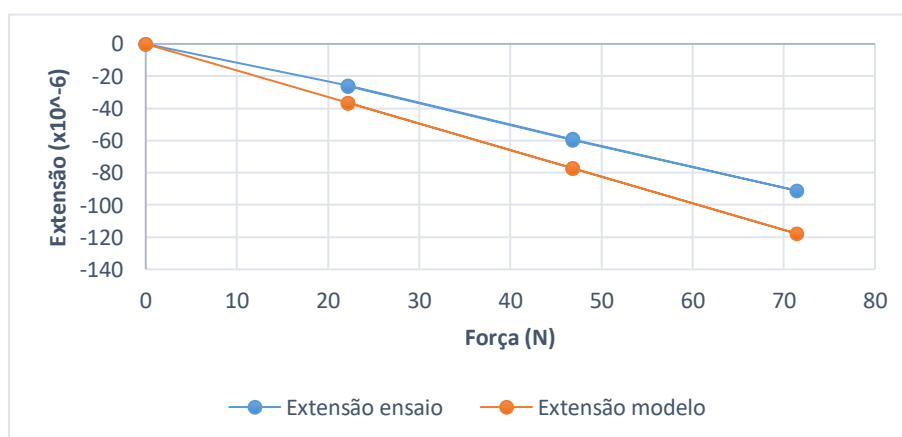


Figura A10. 111 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE6.

Tabela A10. 139 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	27,5	36,6	-9,1	-33
2	46,8	56,3	77,2	-20,9	-37
3	71,4	86,8	117,8	-31,0	-36
2	46,8	57,4	77,2	-19,8	-35
1	22,2	28,3	36,6	-8,4	-30

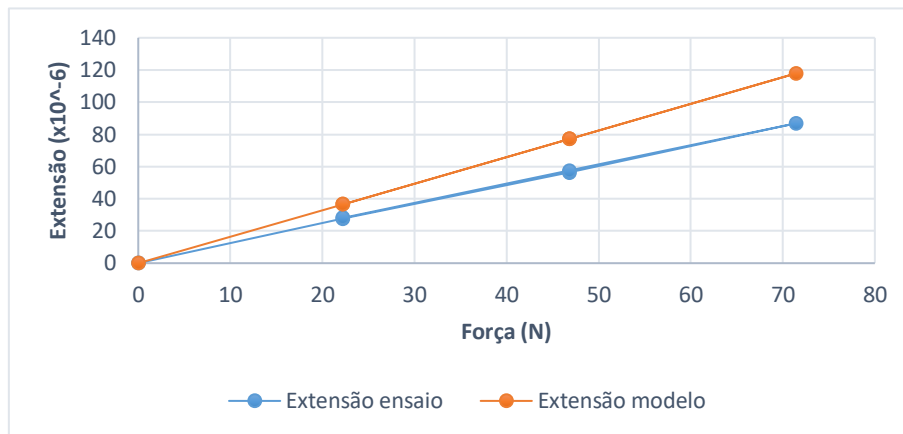


Figura A10. 112 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE6.

Tabela A10. 140 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-44,6	-58,7	14,0	-31
2	46,8	-93,3	-123,6	30,3	-32
3	71,4	-146,1	-175,8	29,6	-20
2	46,8	-95,8	-123,6	27,8	-29
1	22,2	-46,2	-58,7	12,4	-27

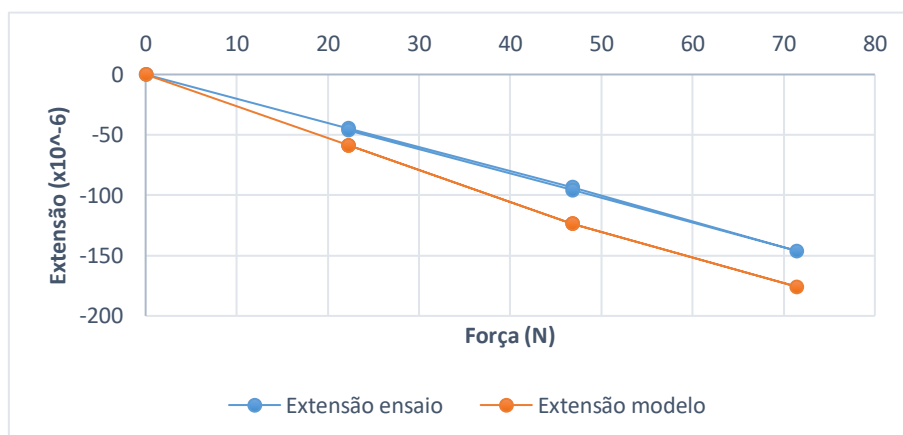


Figura A10. 113 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE6.

Tabela A10. 141 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	43,5	58,7	-15,2	-35
2	46,8	93,5	123,6	-30,1	-32
3	71,4	143,0	175,8	-32,8	-23
2	46,8	94,2	123,6	-29,4	-31
1	22,2	43,6	58,7	-15,1	-35

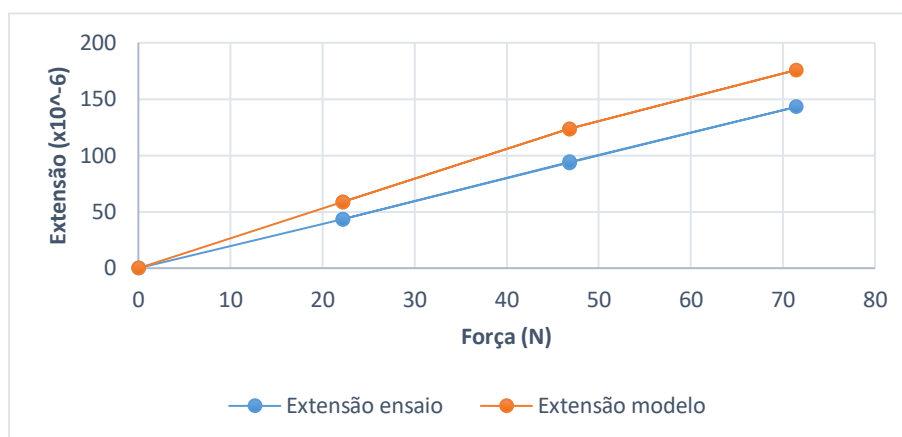


Figura A10. 114 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE6.

Tabela A10. 142 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-27,8	-36,1	8,3	-30
2	46,8	-58,8	-76,2	17,4	-30
3	71,4	-90,1	-116,6	26,5	-29
2	46,8	-61,3	-76,2	14,8	-24
1	22,2	-29,4	-36,1	6,8	-23

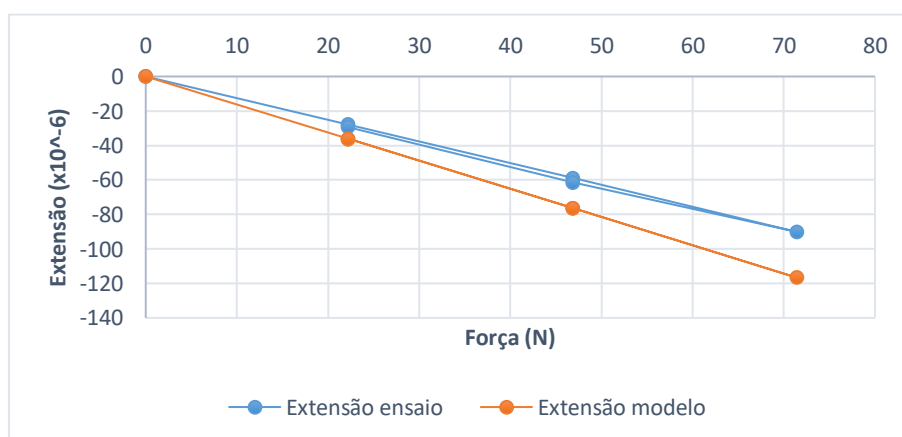


Figura A10. 115 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE7.

Tabela A10. 143 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	27,3	36,1	-8,9	-33
2	46,8	57,5	76,2	-18,7	-33
3	71,4	85,7	116,2	-30,5	-36
2	46,8	57,5	76,2	-18,7	-32
1	22,2	28,0	36,1	-8,1	-29

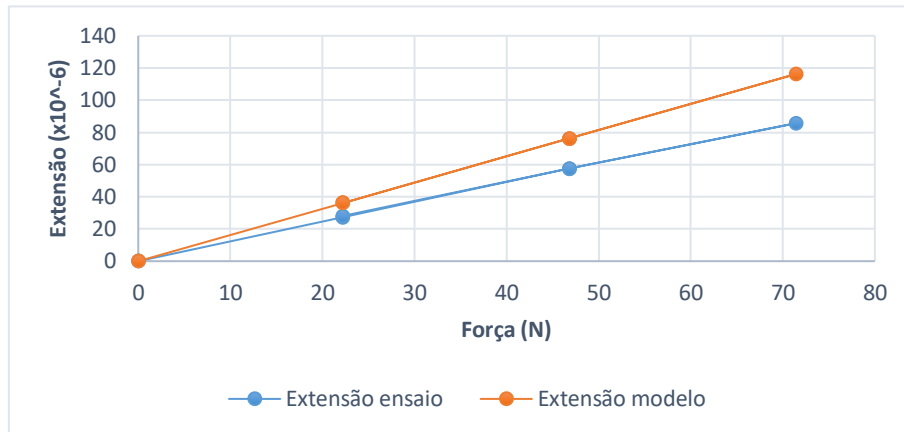


Figura A10. 116 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE7.

Tabela A10. 144 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-44,7	-58,7	14,0	-31
2	46,8	-94,5	-123,6	29,1	-31
3	71,4	-142,2	-188,6	46,5	-33
2	46,8	-95,0	-123,6	28,6	-30
1	22,2	-44,7	-58,7	14,0	-31

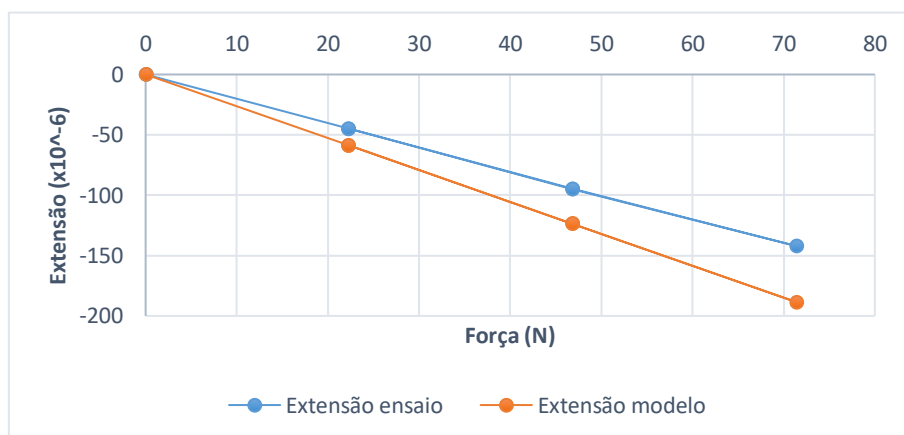


Figura A10. 117 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE7.

Tabela A10. 145 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	43,7	58,7	-14,9	-34
2	46,8	94,8	123,7	-28,9	-30
3	71,4	143,3	188,6	-45,3	-32
2	46,8	95,0	123,7	-28,7	-30
1	22,2	45,0	58,7	-13,6	-30

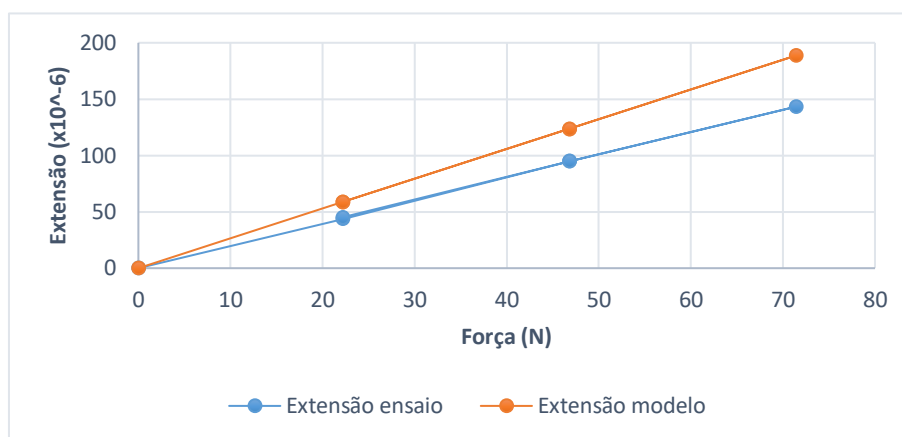


Figura A10. 118 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE7.

Tabela A10. 146 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-22,7	-30,2	7,6	-33
2	46,8	-57,3	-69,3	12,0	-21
3	71,4	-92,5	-110,0	17,5	-19
2	46,8	-58,3	-69,3	11,0	-19
1	22,2	-23,4	-30,2	6,9	-29

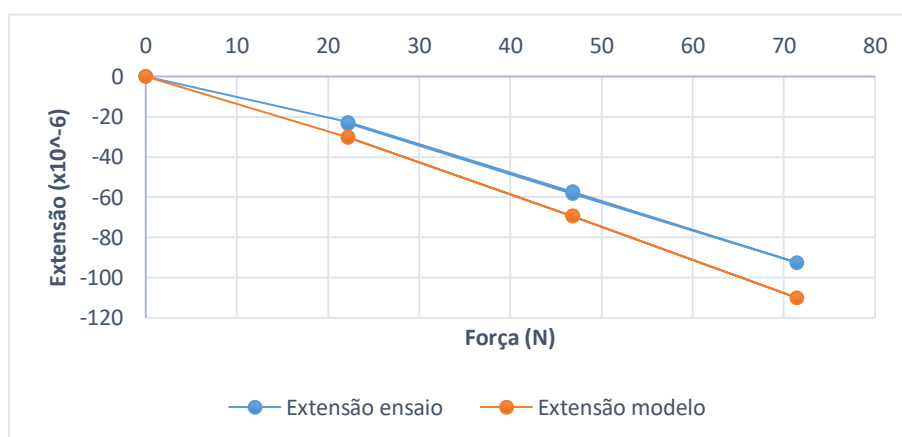


Figura A10. 119 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE8.

Tabela A10. 147 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	20,0	30,2	-10,2	-51
2	46,8	57,5	69,3	-11,8	-20
3	71,4	89,8	110,0	-20,2	-22
2	46,8	58,1	69,3	-11,2	-19
1	22,2	21,5	30,2	-8,7	-40

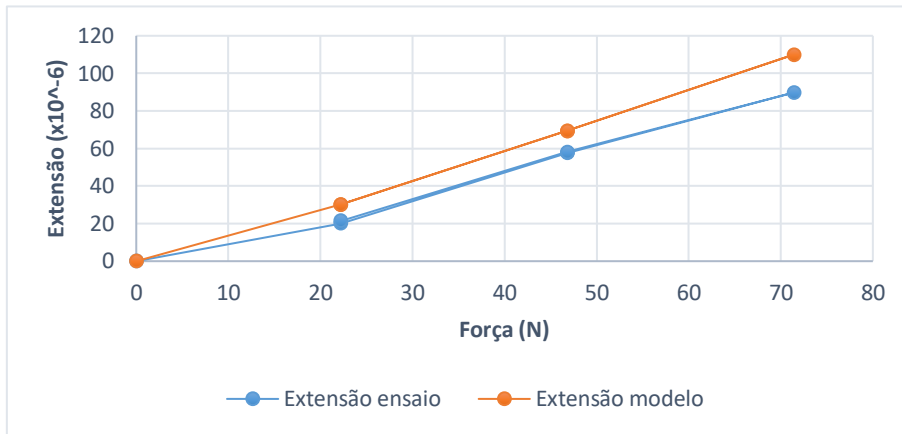


Figura A10. 120 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE8.

Tabela A10. 148 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-50,5	-59,0	8,6	-17
2	46,8	-107,1	-124,5	17,4	-16
3	71,4	-161,4	-189,9	28,5	-18
2	46,8	-107,4	-124,5	17,1	-16
1	22,2	-50,5	-59,0	8,6	-17

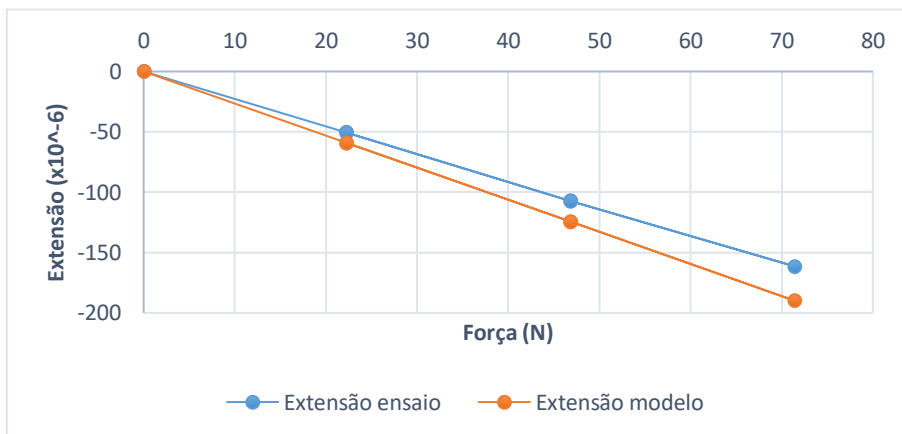


Figura A10. 121 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE8.

Tabela A10. 149 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	51,5	59,0	-7,5	-15
2	46,8	109,1	124,5	-15,4	-14
3	71,4	163,8	189,9	-26,1	-16
2	46,8	109,5	124,45	-15,0	-14
1	22,2	52,1	59,0	-6,9	-13

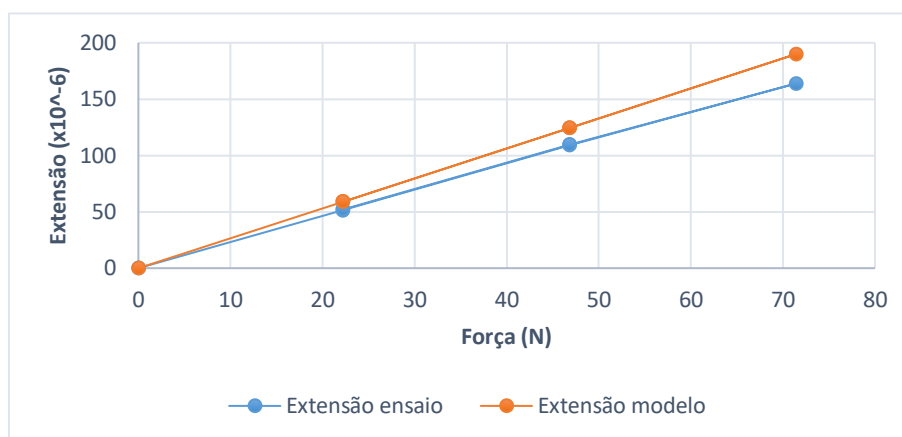


Figura A10. 122 - Força vs extensão no E-N1-2 para o EE8.

Tabela A10. 150 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-1 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-24,1	-25,8	1,6	-7
2	46,8	-43,6	-51,7	8,1	-19
3	71,4	-72,9	-77,3	4,4	-6
2	46,8	-43,9	-51,7	7,8	-18
1	22,2	-25,5	-25,8	0,3	-1

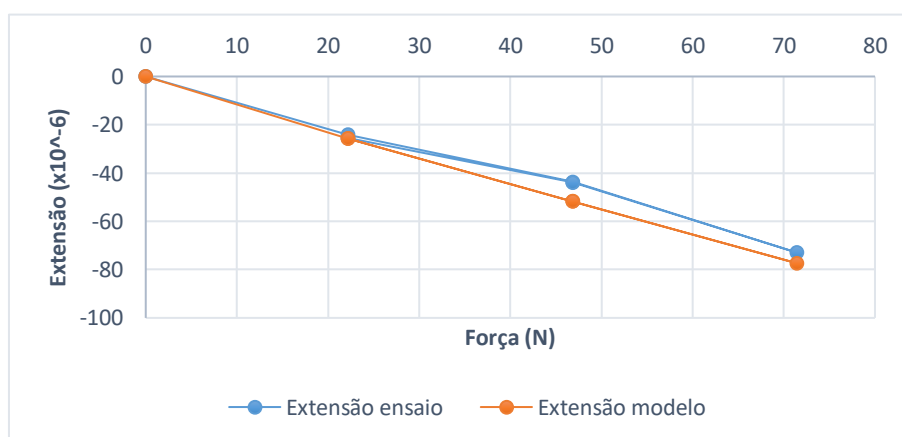


Figura A10. 123 - Força vs extensão no E-N0-1 para o EE9.

Tabela A10. 151 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N0-2 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	22,3	25,8	-3,4	-15
2	46,8	40,7	51,7	-10,9	-27
3	71,4	67,5	77,3	-9,9	-15
2	46,8	41,3	51,7	-10,3	-25
1	22,2	22,7	25,8	-3,0	-13

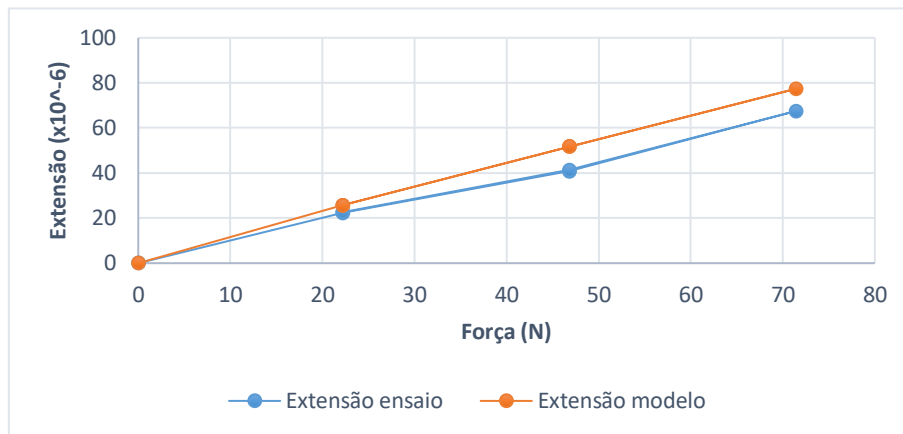


Figura A10. 124 - Força vs extensão no E-N0-2 para o EE9.

Tabela A10. 152 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-1 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-40,2	-41,9	1,6	-4
2	46,8	-72,2	-84,2	12,0	-17
3	71,4	-118,1	-126,1	7,9	-7
2	46,8	-72,9	-84,2	11,3	-16
1	22,2	-40,6	-41,9	1,2	-3

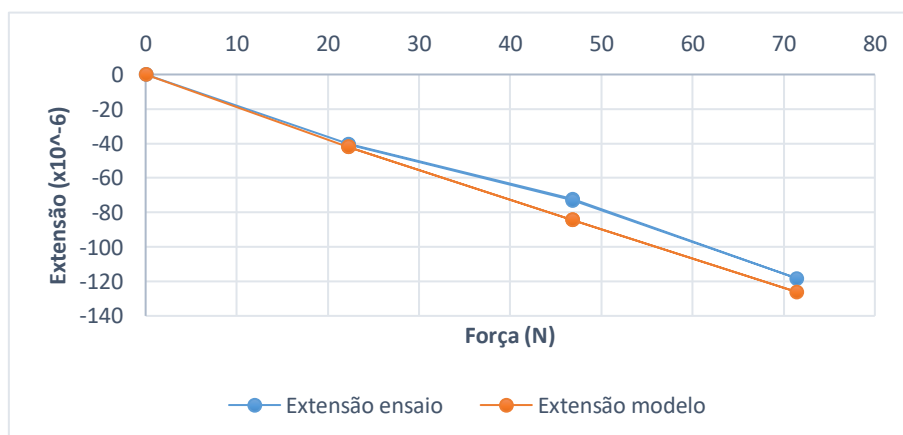


Figura A10. 125 - Força vs extensão no E-N1-1 para o EE9.

Tabela A10. 153 - Valores comparativos das extensões registadas pelo E-N1-2 no EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,1	41,9	-5,8	-16
2	46,8	70,2	84,2	-14,0	-20
3	71,4	117,3	126,1	-8,8	-7
2	46,8	71,4	84,2	-12,9	-18
1	22,2	39,0	41,9	-2,9	-7

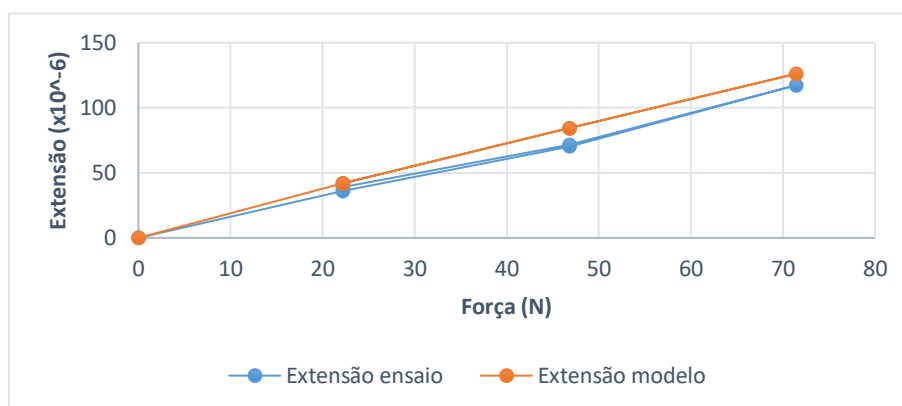


Figura A10. 126 - Gráfico força vs extensão no E-N1-2 para o EE9.

- Rotações:**

Tabela A10. 154 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE1 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-85,2	-79,0	-6,2	7
2	46,8	-178,3	-166,5	-11,9	7
3	71,4	-272,5	-254,0	-18,5	7
2	46,8	-180,1	-166,5	-13,6	8
1	22,2	-86,1	-79,0	-7,1	8

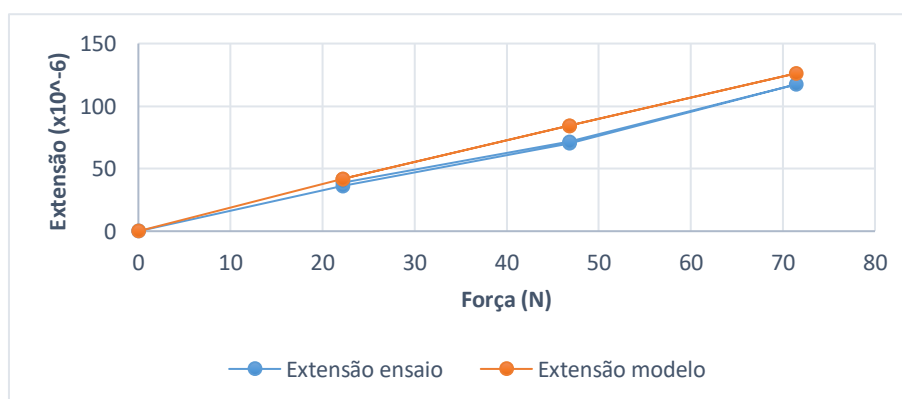


Figura A10. 127 - Força vs rotações do I-N1 no EE1.

Tabela A10. 155 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE1 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-238,8	-228,4	-10,4	4
2	46,8	-510,6	-481,4	-29,2	6
3	71,4	-777,2	-734,4	-42,8	6
2	46,8	-514,4	-481,4	-33,0	6
1	22,2	-243,3	-228,4	-15,0	6

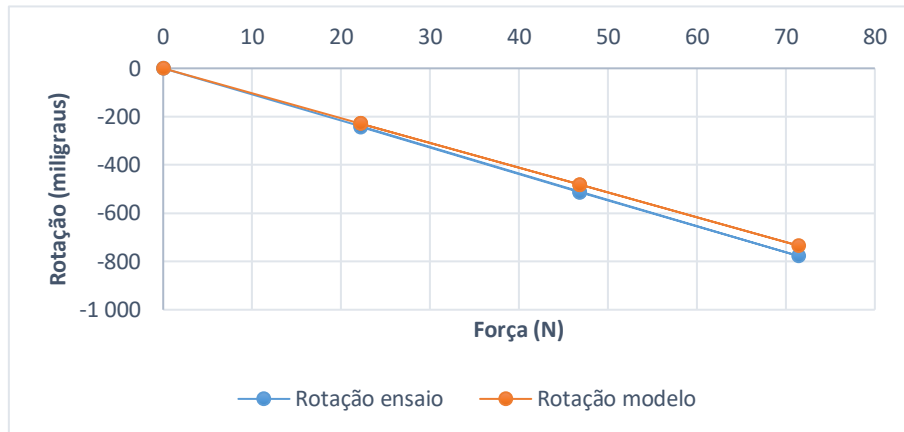


Figura A10. 128 - Força vs rotações do I-N2 no EE1.

Tabela A10. 156 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE2 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1471,3	-1430,9	-40,4	3
2	46,8	-1606,4	-1582,5	-23,9	1
3	71,4	-1749,0	-1734,1	-14,9	1
2	46,8	-1632,7	-1582,5	-50,2	3
1	22,2	-1498,4	-1430,9	-67,6	5

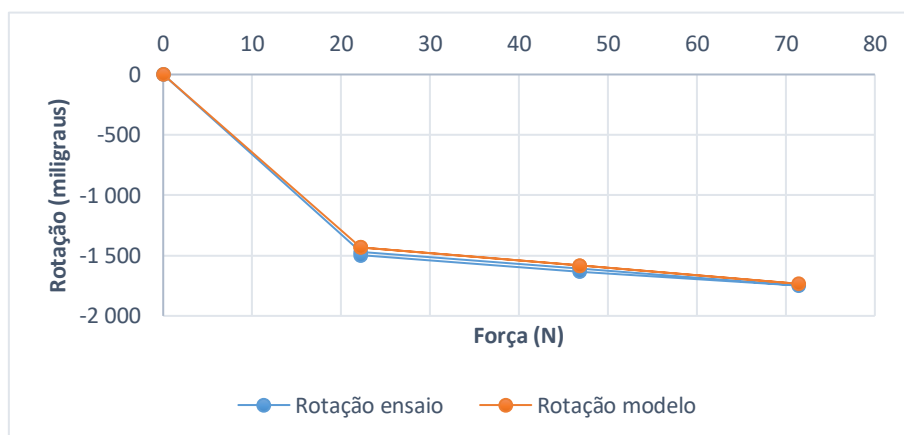


Figura A10. 129 - Força vs rotações do I-N1 no EE2.

Tabela A10. 157 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE2 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1664,3	-1580,2	-84,0	5
2	46,8	-1915,4	-1897,4	-18,0	1
3	71,4	-2226,3	-2214,6	-11,7	1
2	46,8	-1953,5	-1897,4	-56,1	3
1	22,2	-1692,9	-1580,3	112,6	7

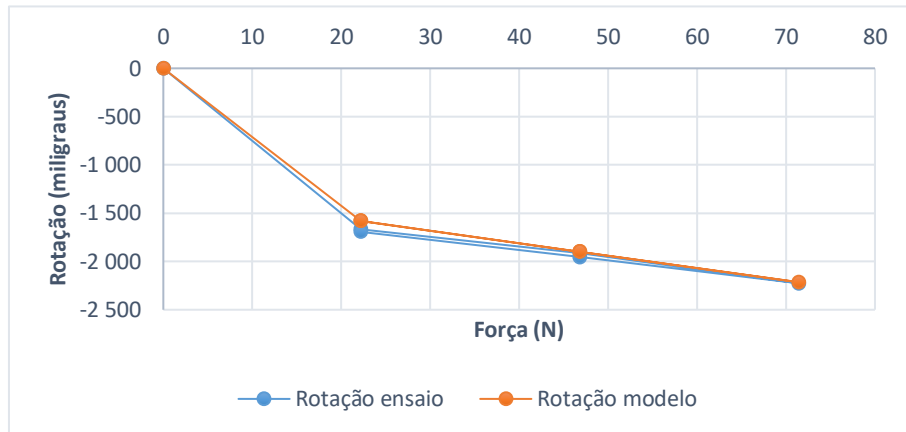


Figura A10. 130 - Força vs rotações do I-N2 no EE2.

Tabela A10. 158 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE3 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-83,7	-79,0	-4,8	6
2	46,8	-182,1	-166,5	-15,6	9
3	71,4	-272,2	-254,0	-18,2	7
2	46,8	-187,2	-166,5	-20,7	11
1	22,2	-85,4	-79,0	-6,5	8

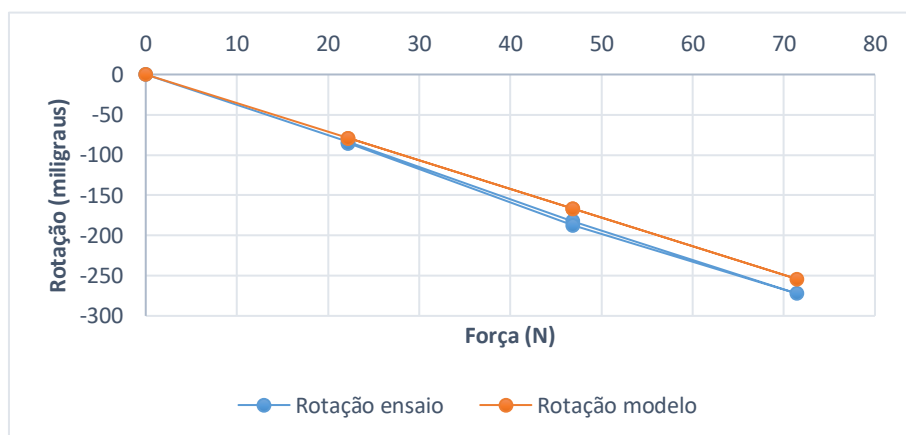


Figura A10. 131 - Força vs rotações do I-N1 no EE3.

Tabela A10. 159 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE3 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-3104,3	-2929,7	-174,6	6
2	46,8	-3538,9	-3323,4	-215,4	6
3	71,4	-3900,0	-3717,2	-182,8	5
2	46,8	-3593,8	-3323,4	-270,4	8
1	22,2	-3201,6	-2929,7	-271,9	8

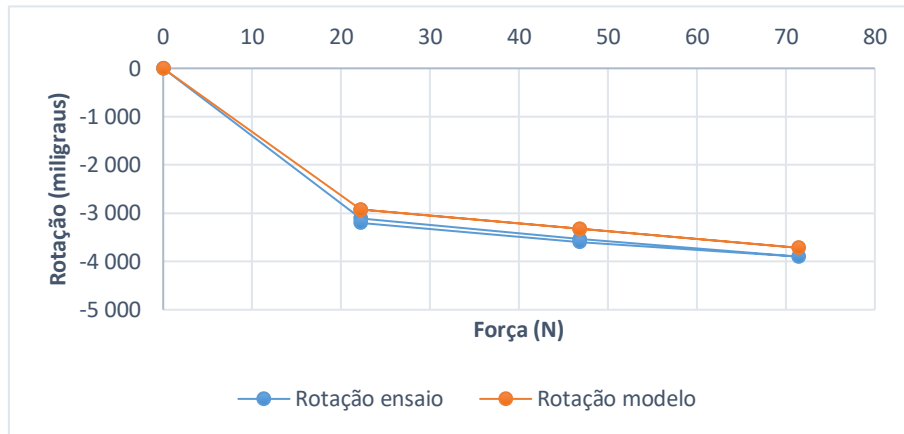


Figura A10. 132 - Força vs rotações do I-N2 no EE3.

Tabela A10. 160 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE4 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-2325,9	-2279,2	-46,7	2
2	46,8	-2498,0	-2430,8	-67,2	3
3	71,4	-2682,0	-2582,5	-99,6	4
2	46,8	-2510,9	-2430,8	-80,1	3
1	22,2	-2345,1	-2279,2	-65,9	3

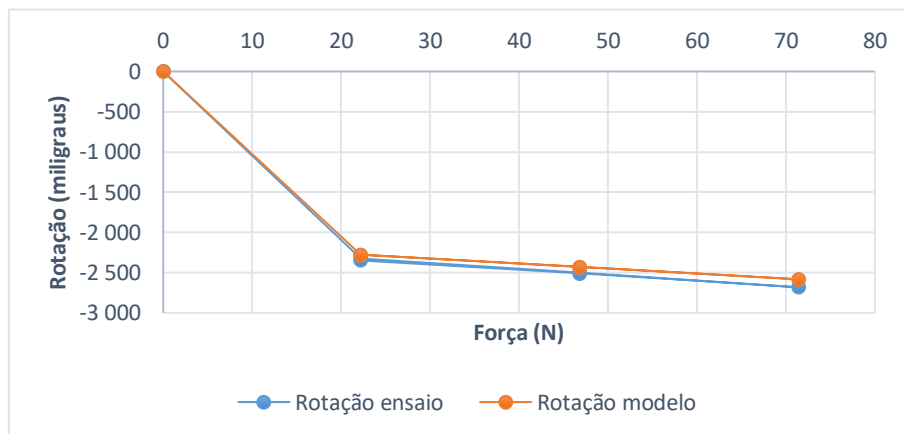


Figura A10. 133 - Força vs rotações do I-N1 no EE4.

Tabela A10. 161 - Valores comparativos das rotações no inclinômetro I-N2 para o EE4 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-4045,7	-3338,1	-707,6	17
2	46,8	-4549,0	-3873,8	-675,2	15
3	71,4	-4569,8	-4331,7	-238,1	5
2	46,8	-4571,6	-3873,8	-697,8	15
1	22,2	-4047,3	-3338,1	-709,3	18

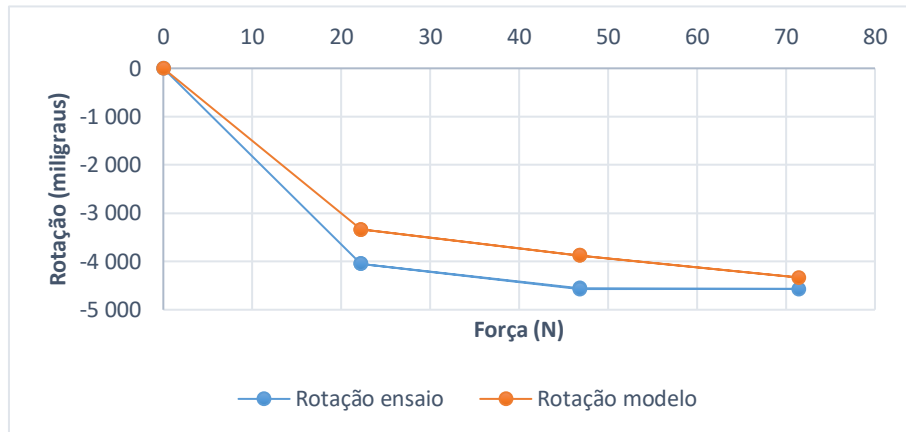


Figura A10. 134 - Força vs rotações do I-N2 no EE4.

Tabela A10. 162 - Valores comparativos das rotações no inclinômetro I-N1 para o EE5 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-84,4	-78,2	-6,2	7
2	46,8	-174,1	-164,9	-9,2	5
3	71,4	-273,1	-251,6	-21,5	8
2	46,8	-178,4	-164,9	-13,5	8
1	22,2	-84,6	-78,2	-6,4	8

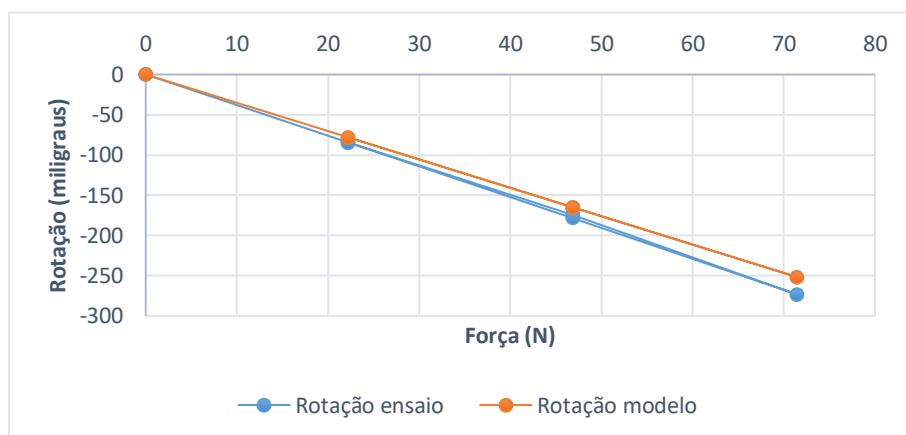


Figura A10. 135 - Força vs rotações do I-N1 no EE5.

Tabela A10. 163 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE5 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-243,4	-227,6	-15,8	6
2	46,8	-521,6	-479,8	-41,8	8
3	71,4	-806,7	-732,0	-74,7	9
2	46,8	-524,6	-479,8	-44,7	9
1	22,2	-244,5	-227,6	-16,9	7

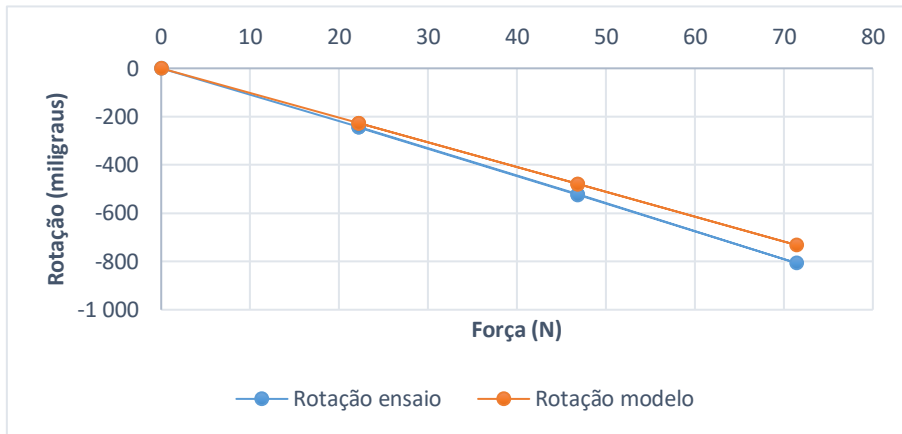


Figura A10. 136 - Gráfico força vs rotações do I-N2 no EE5.

Tabela A10. 164 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE6 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-77,8	-78,4	0,6	-1
2	46,8	-163,3	-165,3	2,0	-1
3	71,4	-255,1	-252,2	-2,8	1
2	46,8	-164,3	-165,3	1,0	-1
1	22,2	-80,6	-78,4	-2,2	3

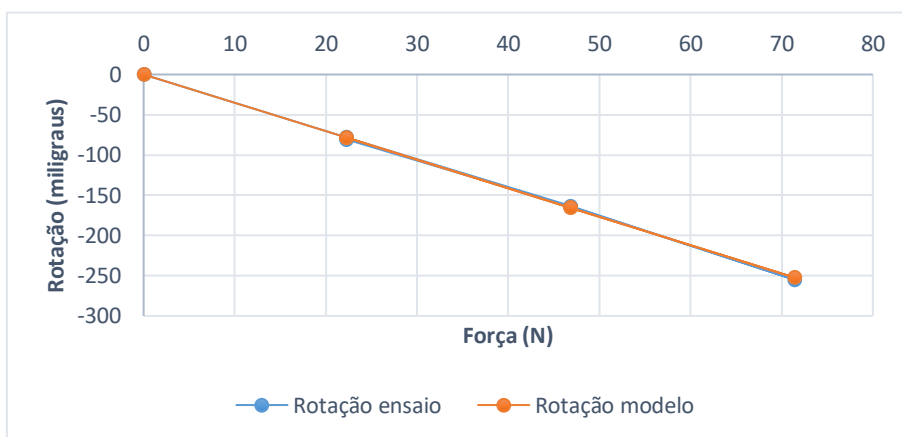


Figura A10. 137 - Força vs rotações do I-N1 no EE6.

Tabela A10. 165 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE6 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-224,4	-226,9	2,5	-1
2	46,8	-477,1	-478,3	1,1	0
3	71,4	-735,8	-729,7	-6,1	1
2	46,8	-482,6	-478,3	-4,4	1
1	22,2	-225,8	-226,9	1,1	0

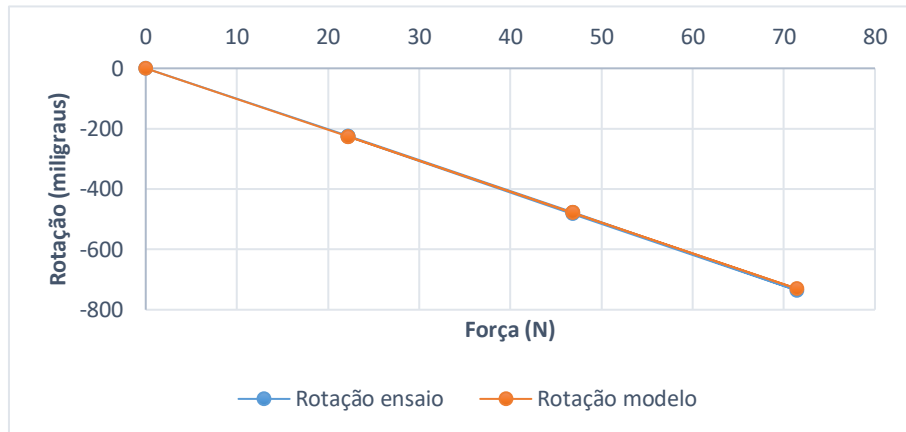


Figura A10. 138 - Força vs rotações do I-N2 no EE6.

Tabela A10. 166 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE7 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-82,5	-77,7	-4,8	6
2	46,8	-163,2	-163,8	0,6	0
3	71,4	-235,8	-249,9	14,0	-6
2	46,8	-165,3	-163,8	-1,6	1
1	22,2	-83,5	-77,7	-5,8	7

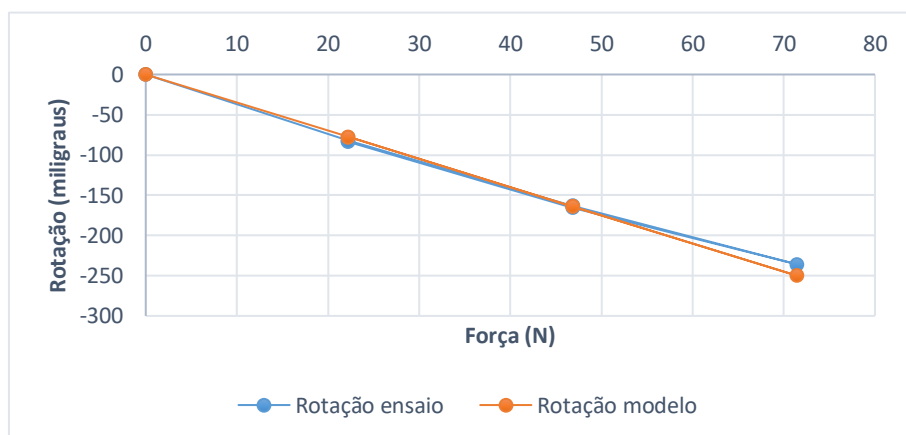


Gráfico força vs rotações do I-N1 no EE7.

Tabela A10. 167 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE7 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-222,9	-226,1	3,2	-1
2	46,8	-485,3	-476,7	-8,6	2
3	71,4	-713,8	-727,3	13,4	-2
2	46,8	-492,2	-476,7	-15,5	3
1	22,2	-233,7	-226,1	-7,6	3

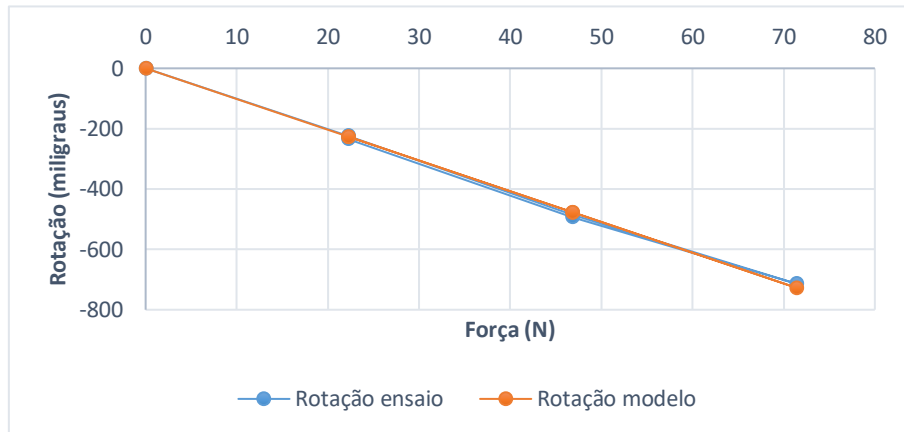


Figura A10. 139 - Força vs rotações do I-N2 no EE7.

Tabela A10. 168 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE8 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1290,2	-1202,2	-88,1	7
2	46,8	-1536,8	-1555,8	19,0	-1
3	71,4	-1713,2	-1705,4	-7,8	0
2	46,8	-1554,5	-1555,8	1,4	0
1	22,2	-1313,2	-1202,2	-111,1	8

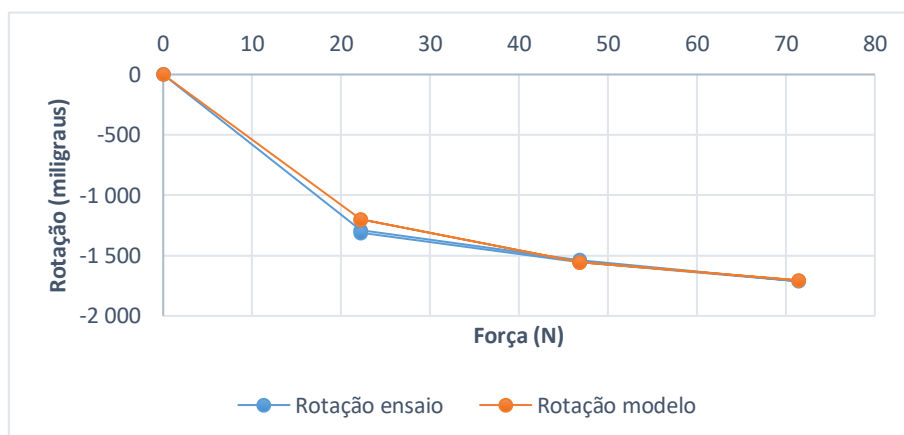


Figura A10. 140 - Força vs rotações do I-N1 no EE8.

Tabela A10. 169 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N2 para o EE8 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1456,6	-1351,5	-105,1	7
2	46,8	-1885,4	-1870,7	-14,7	1
3	71,4	-2262,1	-2185,9	-76,2	3
2	46,8	-1912,1	-1870,7	-41,4	2
1	22,2	-1478,1	-1351,5	-126,6	9

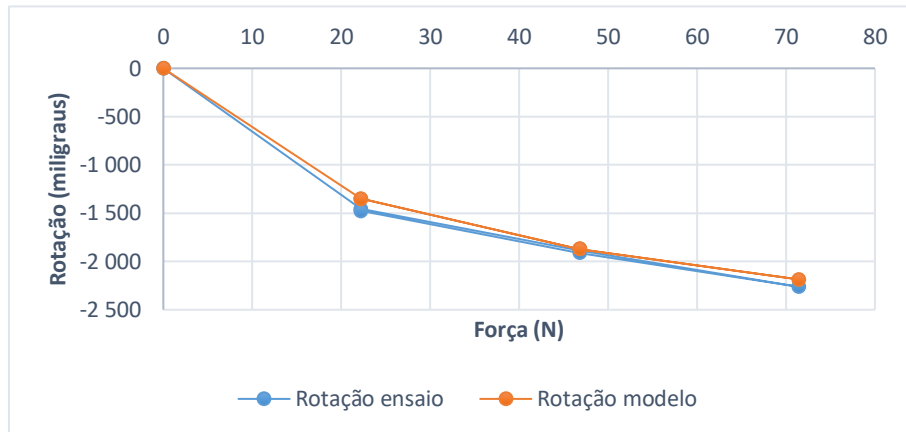


Figura A10. 141 - Força vs rotações do I-N2 no EE8.

Tabela A10. 170 - Valores comparativos das rotações no inclinómetro I-N1 para o EE9 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-64,4	-55,3	-9,0	14
2	46,8	-118,3	-111,1	-7,2	6
3	71,4	-188,8	-166,2	-22,5	12
2	46,8	-119,9	-111,1	-8,8	7
1	22,2	-67,3	-55,3	-11,9	18

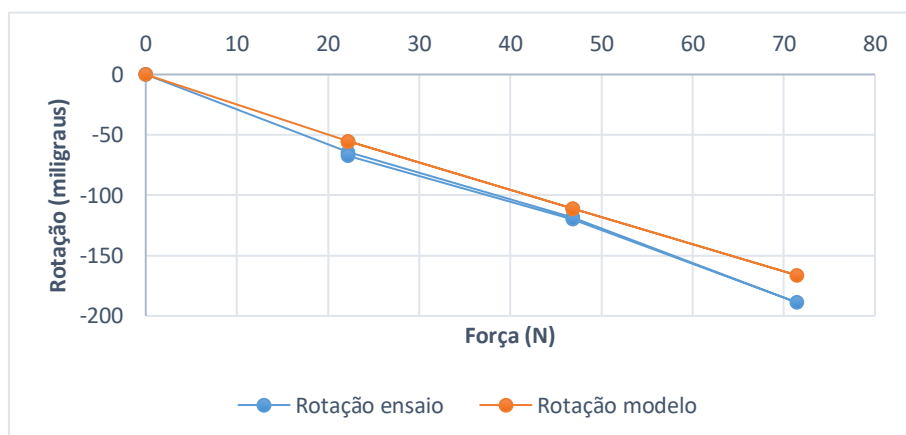


Figura A10. 142 - Força vs rotações do I-N1 no EE9.

Tabela A10. 171 - Valores comparativos das rotações no inclinômetro I-N2 para o EE9 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-613,4	-612,0	1,4	0
2	46,8	-1865,1	-1432,5	432,5	23
3	71,4	-2310,6	-2269,4	41,2	2
2	46,8	-1924,0	-1432,5	491,4	26
1	22,2	-668,2	-612,0	56,2	8

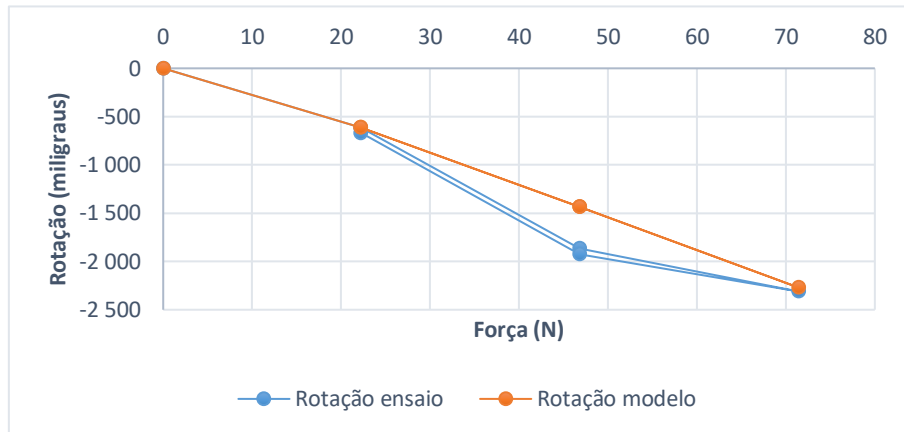


Figura A10. 143 - Força vs rotações do I-N2 no EE9.

- **Análise modal:**

- **Massas no nível 1:**

Tabela A10. 172 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED1.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,03	8,07	-1,04	-15
2º	20,92	22,27	-1,35	-6

Tabela A10. 173 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED2.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,27	1,59	-0,32	-25
2º	16,85	17,63	-0,78	-5

Tabela A10. 174 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED3.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,05	2,55	-0,50	-24
2º	13,75	13,91	-0,16	-1

Tabela A10. 175 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED4.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,39	1,25	0,14	10
2º	4,42	5,96	-1,54	-35

Tabela A10. 176 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED5.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,30	8,11	-0,81	-11
2º	21,17	22,31	-1,14	-5

Tabela A10. 177 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED6.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,57	8,10	-0,53	-7
2º	20,97	22,28	-1,31	-6

Tabela A10. 178 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED7.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,66	8,14	-0,48	-6
2º	20,97	22,31	-1,34	-6

Tabela A10. 179 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED8.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	3,86	1,76	2,10	54
2º	17,75	17,64	0,11	1

Tabela A10. 180 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED9.1.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,42	5,56	1,86	25
2º	16,82	14,81	2,01	12

Massas no nível 2:

Tabela A10. 181 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED1.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,15	4,54	-0,39	-9
2º	27,78	26,99	0,79	3

Tabela A10. 182 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED2.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,88	1,13	-0,25	-28
2º	18,87	12,82	6,05	32

Tabela A10. 183 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED3.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,83	1,26	-0,43	-52
2º	19,75	23,53	-3,78	-19

Tabela A10. 184 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED4.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,12	0,85	0,27	24
2º	9,50	7,51	1,99	21

Tabela A10. 185 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED5.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,27	4,56	-0,29	-7
2º	28,15	27,03	1,12	4

Tabela A10. 186 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED6.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,52	4,56	-0,04	-1
2º	27,98	26,99	0,99	4

Tabela A10. 187 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED7.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,59	4,57	0,02	0
2º	27,47	27,03	0,44	2

Tabela A10. 188 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED8.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,25	1,41	53
2º	20,43	18,88	1,55	8

Tabela A10. 189 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED9.2.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	3,05	2,79	0,26	9
2º	22,61	24,25	-1,64	-7

Massas nos dois níveis:

Tabela A10. 190 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED1.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,05	4,44	-0,39	-10
2º	18,29	19,06	-0,77	-4

Tabela A10. 191 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED2.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,93	1,04	0,89	46
2º	13,35	12,92	0,43	3

Tabela A10. 192 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED3.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,90	1,26	-0,36	-40
2º	10,84	13,75	-2,91	-27

Tabela A10. 193 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED4.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,10	0,79	0,31	28
2º	5,66	4,61	1,05	19

Tabela A10. 194 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED5.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,25	4,46	-0,21	-5
2º	18,65	19,11	-0,46	-2

Tabela A10. 195 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do E6.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,44	4,46	-0,02	0
2º	18,29	19,06	-0,77	-4

Tabela A10. 196 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED7.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,47	4,47	0,00	0
2º	18,33	19,11	-0,78	-4

Tabela A10. 197 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED8.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,15	1,51	57
2º	13,72	12,95	0,77	6

Tabela A10. 198 - Valores comparativos das frequências de vibração representativas do ED9.3.

Modos	Experimental	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	3,52	2,78	0,74	21
2º	13,13	14,47	-1,34	-10

Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de casca:

- **Deslocamentos:**

Tabela A10. 199 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE1 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,934	0,970	-0,037	-4
2	46,8	1,958	2,046	-0,088	-4
3	71,4	2,993	3,121	-0,128	-4
2	46,8	2,021	2,046	-0,025	-1
1	22,2	1,000	0,970	0,030	3

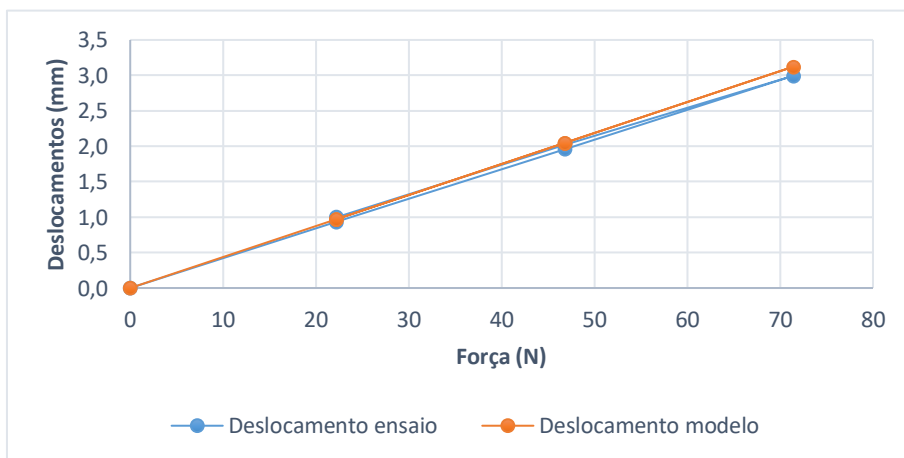


Figura A10. 144 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE1.

Tabela A10. 200 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE1 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,618	3,219	0,399	11
2	46,8	7,512	6,786	0,725	10
3	71,4	11,510	10,354	1,156	10
2	46,8	7,710	6,786	0,924	12
1	22,2	3,812	3,219	0,593	16

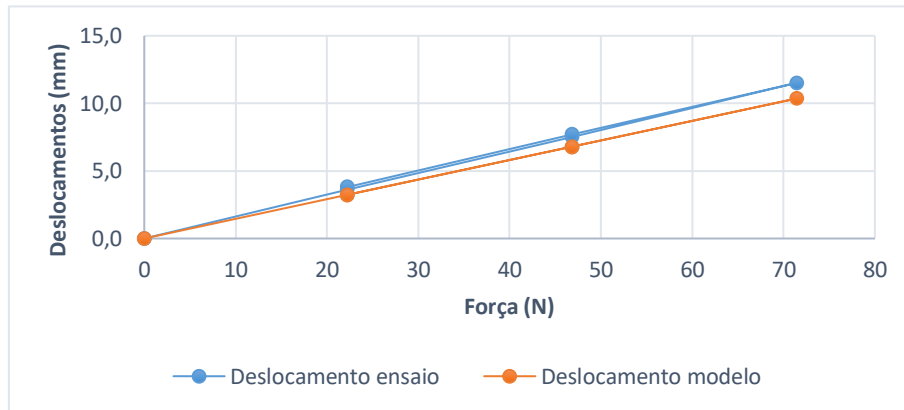


Figura A10. 145 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE1.

Tabela A10. 201 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE2 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	23,134	24,168	-1,034	-4
2	46,8	25,030	27,186	-2,156	-9
3	71,4	27,059	30,204	-3,145	-12
2	46,8	25,775	27,186	-1,411	-5
1	22,2	23,861	24,168	-0,307	-1

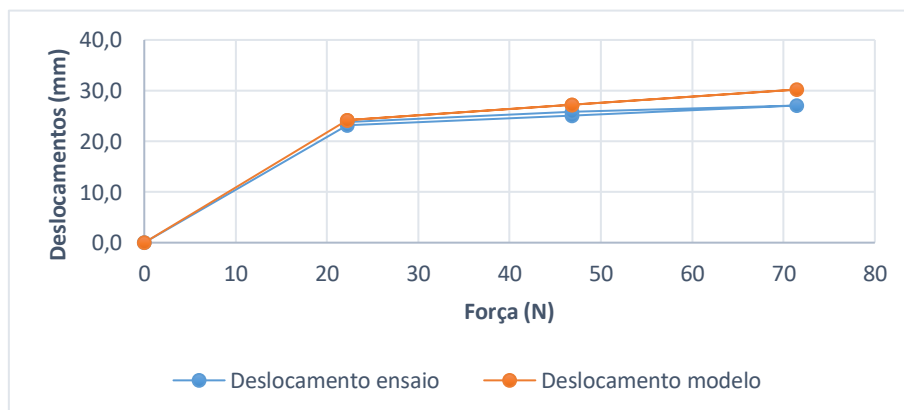


Figura A10. 146 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE2.

Tabela A10. 202 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE2 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	45,520	45,300	0,220	0
2	46,8	50,912	52,085	-1,173	-2
3	71,4	56,554	58,861	-2,307	-4
2	46,8	52,395	52,085	0,311	1
1	22,2	46,964	45,300	1,665	4

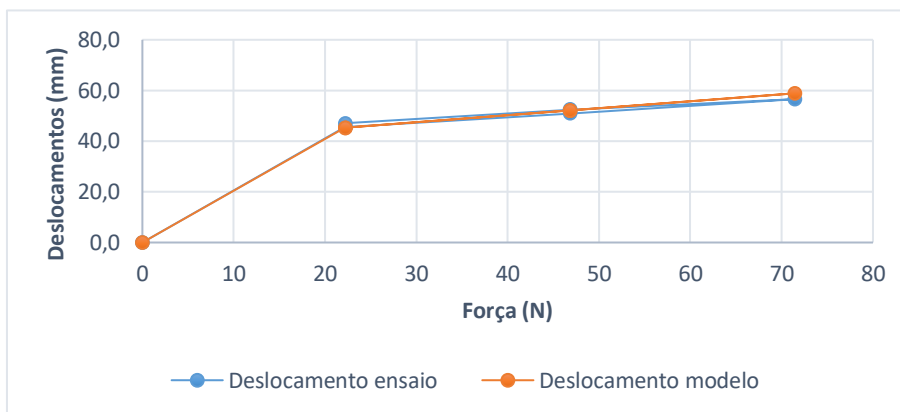


Figura A10. 147 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE2.

Tabela A10. 203 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE3 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,807	0,975	-0,167	-21
2	46,8	1,874	2,056	-0,182	-10
3	71,4	2,943	3,137	-0,194	-7
2	46,8	1,730	2,056	-0,326	-19
1	22,2	1,182	0,975	0,207	17

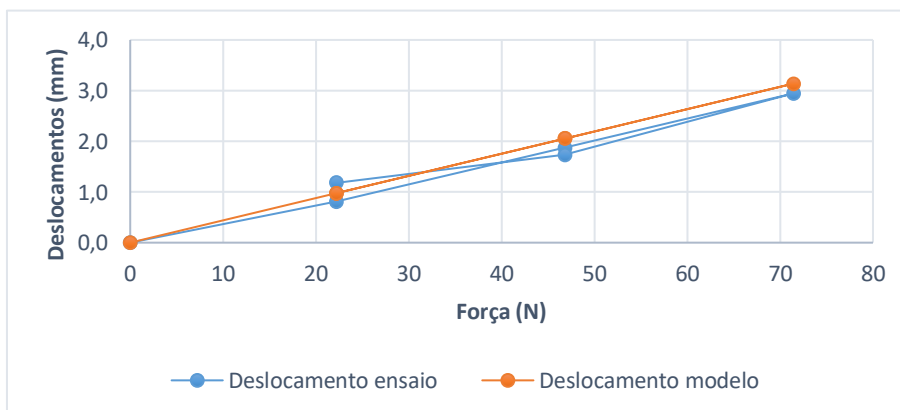


Figura A10. 148 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE3.

Tabela A10. 204 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE3 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	41,055	41,722	-0,667	-2
2	46,8	47,205	46,851	0,354	1
3	71,4	52,265	51,981	0,284	1
2	46,8	48,140	46,851	1,288	3
1	22,2	42,881	41,722	1,159	3

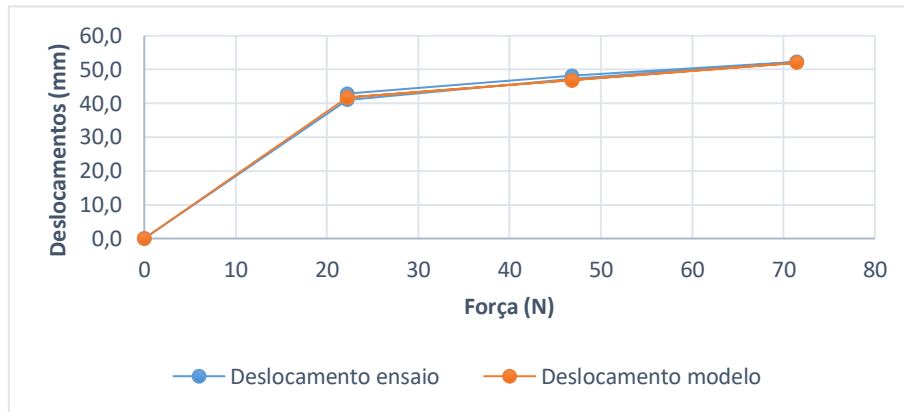


Figura A10. 149 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE3.

Tabela A10. 205 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE4 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	37,219	36,611	0,608	2
2	46,8	39,573	39,660	0,087	0
3	71,4	41,793	42,709	-0,916	-2
2	46,8	39,948	39,660	0,288	1
1	22,2	37,736	36,611	1,125	3

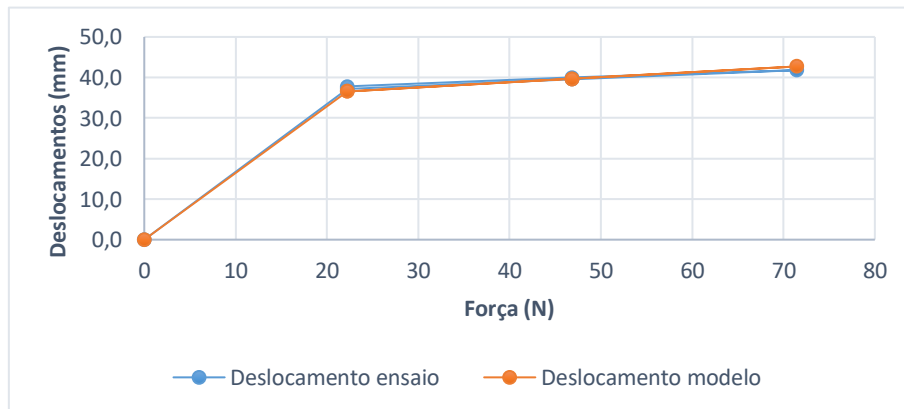


Figura A10. 150 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE4.

Tabela A10. 206 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE4 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	84,507	84,235	0,272	0
2	46,8	92,733	92,664	0,069	0
3	71,4	100,628	101,093	-0,465	0
2	46,8	93,577	92,664	0,913	1
1	22,2	85,653	84,235	1,418	2

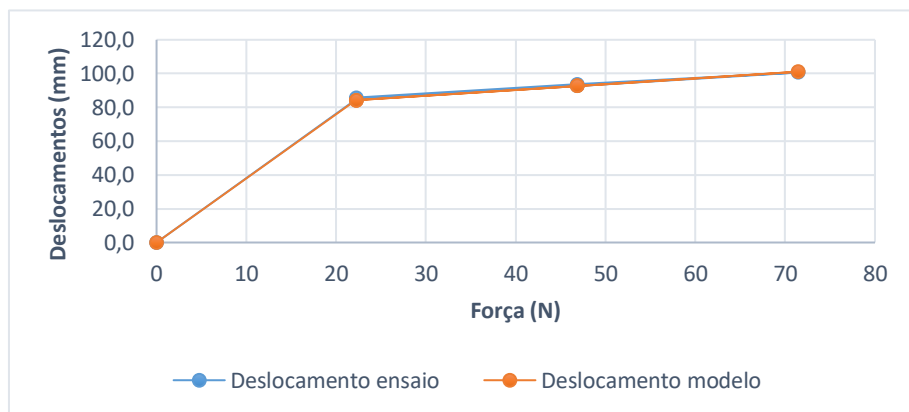


Figura A10. 151 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE4.

Tabela A10. 207 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE5 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,738	0,874	-0,136	-18
2	46,8	1,685	1,843	-0,158	-9
3	71,4	2,789	2,811	-0,022	-1
2	46,8	1,933	1,843	0,091	5
1	22,2	0,872	0,874	-0,002	0

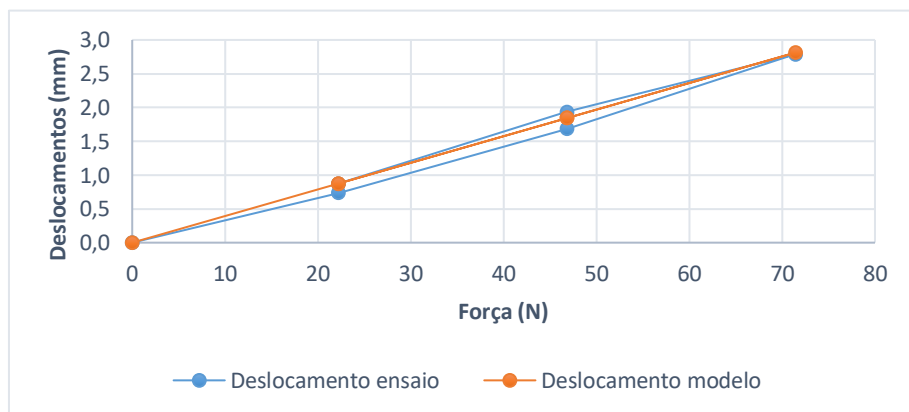


Figura A10. 152 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE5.

Tabela A10. 208 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE5 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,504	3,016	0,488	14
2	46,8	7,586	6,358	1,227	16
3	71,4	11,584	9,700	1,884	16
2	46,8	7,722	6,358	1,364	18
1	22,2	3,639	3,016	0,623	17

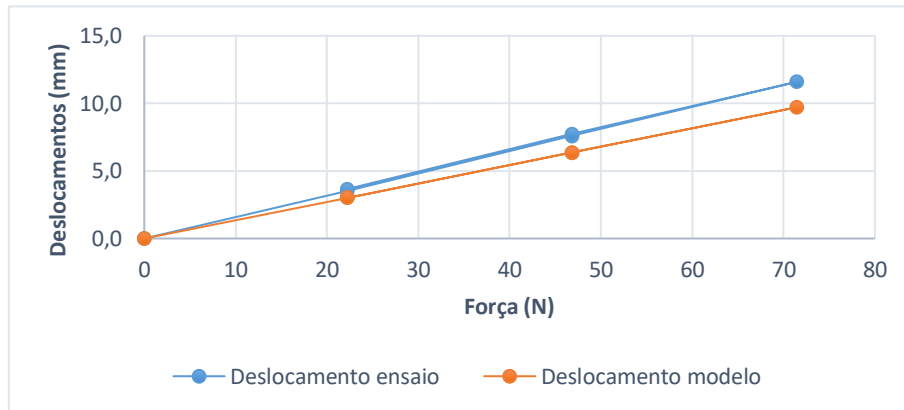


Figura A10. 153 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE5.

Tabela A10. 209 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE6 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,656	0,844	-0,187	-29
2	46,8	1,593	1,778	-0,186	-12
3	71,4	2,581	2,713	-0,132	-5
2	46,8	1,819	1,778	0,041	2
1	22,2	0,882	0,844	0,039	4

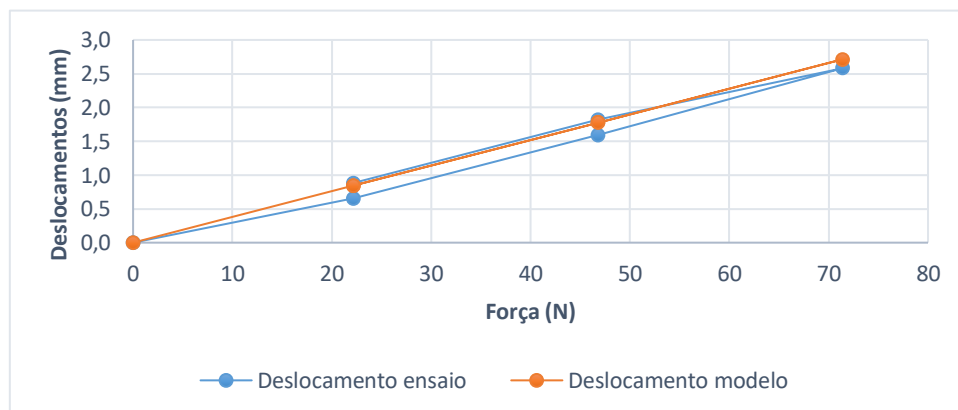


Figura A10. 154 - Gráfico da força vs deslocamento no nível 1 para o EE6.

Tabela A10. 210 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE6 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,086	2,812	0,274	9
2	46,8	6,714	5,927	0,787	12
3	71,4	10,492	9,043	1,449	14
2	46,8	7,137	5,927	1,210	17
1	22,2	3,437	2,812	0,625	18

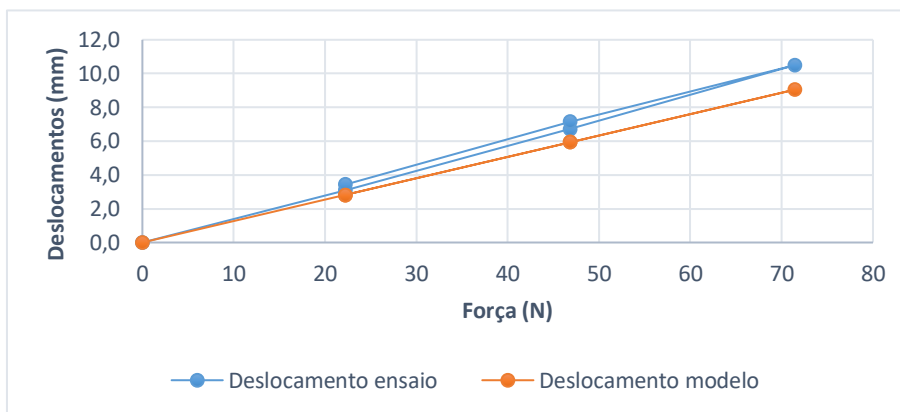


Figura A10. 155 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE6.

Tabela A10. 211 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE7 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,671	0,746	-0,075	-11
2	46,8	1,605	1,589	0,016	1
3	71,4	2,484	2,399	0,085	3
2	46,8	1,771	1,589	0,183	10
1	22,2	0,890	0,746	0,144	16

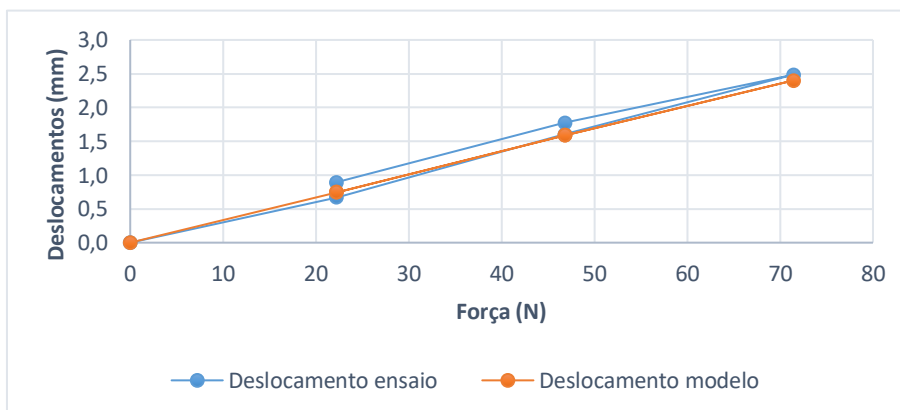


Figura A10. 156 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE7.

Tabela A10. 212 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE7 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	3,116	2,618	0,498	16
2	46,8	6,775	5,518	1,257	19
3	71,4	10,269	8,419	1,849	18
2	46,8	6,981	5,518	1,462	21
1	22,2	3,418	2,618	0,800	23

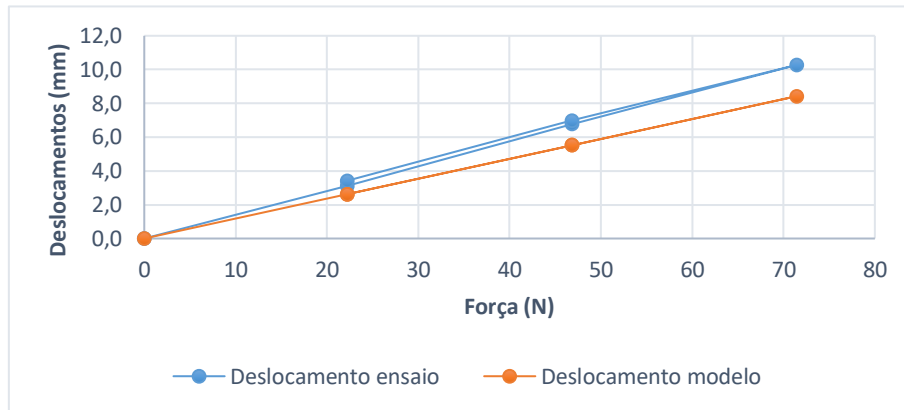


Figura A10. 157 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE7.

Tabela A10. 213 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE8 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	20,229	19,640	0,589	3
2	46,8	23,838	26,441	-2,603	-11
3	71,4	26,251	29,376	-3,125	-12
2	46,8	24,276	26,441	-2,166	-9
1	22,2	20,740	19,640	1,100	5

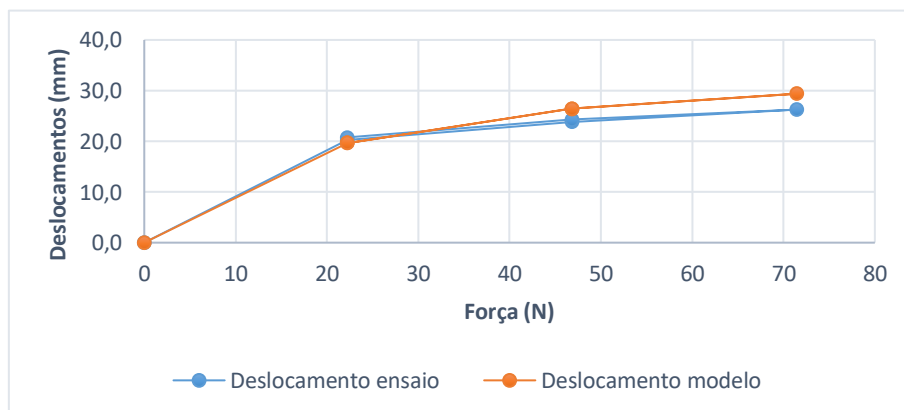


Figura A10. 158 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE8.

Tabela A10. 214 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE8 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	40,487	37,091	3,396	8
2	46,8	49,773	50,809	-1,035	-2
3	71,4	55,575	57,452	-1,877	-3
2	46,8	49,850	50,809	-0,958	-2
1	22,2	41,279	37,091	4,189	10

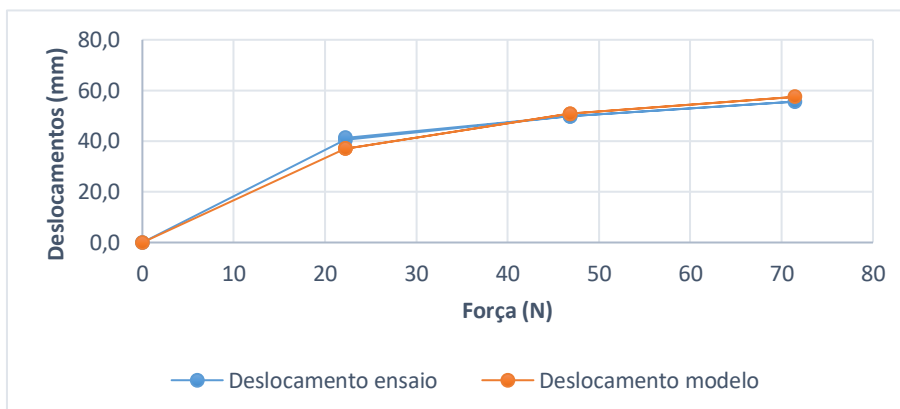


Figura A10. 159 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE8.

Tabela A10. 215 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N1 no EE9 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	0,433	0,199	0,234	54
2	46,8	1,078	0,419	0,659	61
3	71,4	1,898	0,634	1,265	67
2	46,8	1,327	0,419	0,908	68
1	22,2	0,775	0,199	0,576	74

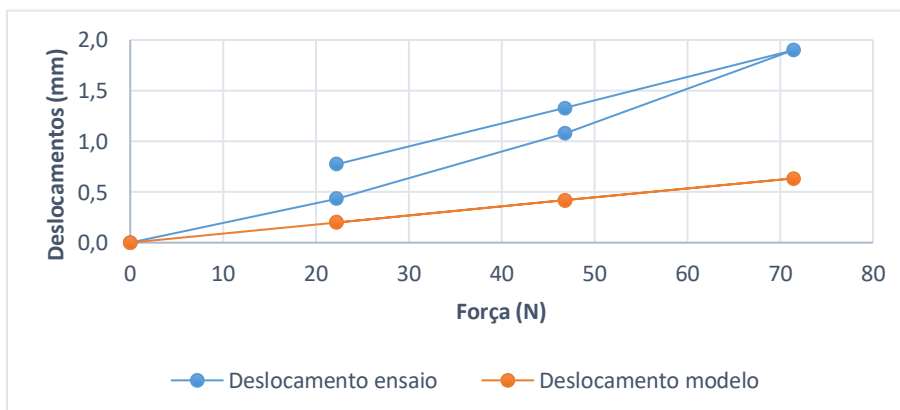


Figura A10. 160 - Força vs deslocamento no nível 1 para o EE9.

Tabela A10. 216 - Valores comparativos de deslocamentos medidos pelo LVDT-N2 no EE9 (em mm).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	8,2644	9,5173	-1,2529	15
2	46,8	24,8463	20,0635	4,7828	19
3	71,4	30,8858	30,6097	0,2761	1
2	46,8	25,6391	20,0635	5,5756	22
1	22,2	9,0840	9,5173	-0,4333	-5

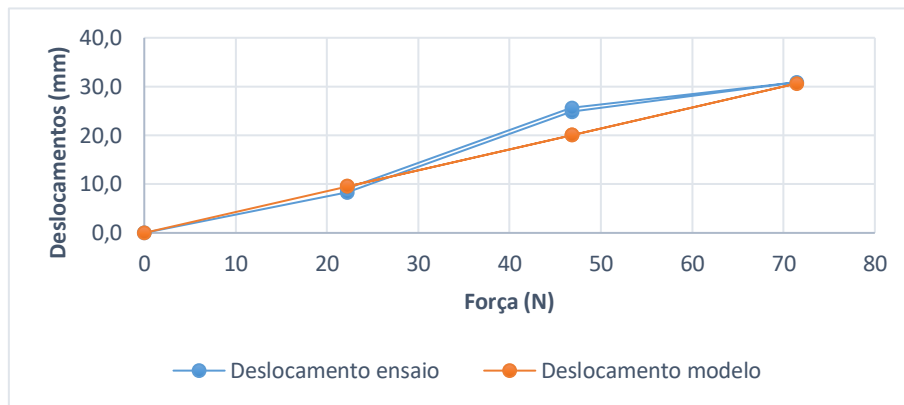


Figura A10. 161 - Força vs deslocamento no nível 2 para o EE9.

- Extensões:**

Tabela A10. 217 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-32,2	-31,8	-0,4	1
2	46,8	-66,4	-67,1	0,7	-1
3	71,4	-102,2	-102,2	0,1	0
2	46,8	-66,9	-67,1	0,1	0
1	22,2	-33,0	-31,8	-1,2	4

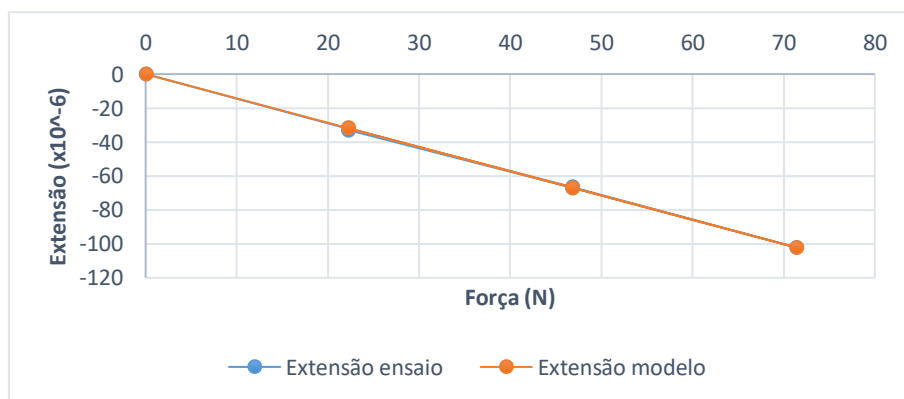


Figura A10. 162 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE1.

Tabela A10. 218 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	29,4	31,8	-2,4	-8
2	46,8	63,5	67,1	-3,6	-6
3	71,4	97,2	102,2	-4,9	-5
2	46,8	63,7	67,1	-3,4	-5
1	22,2	30,7	31,8	-1,1	-4

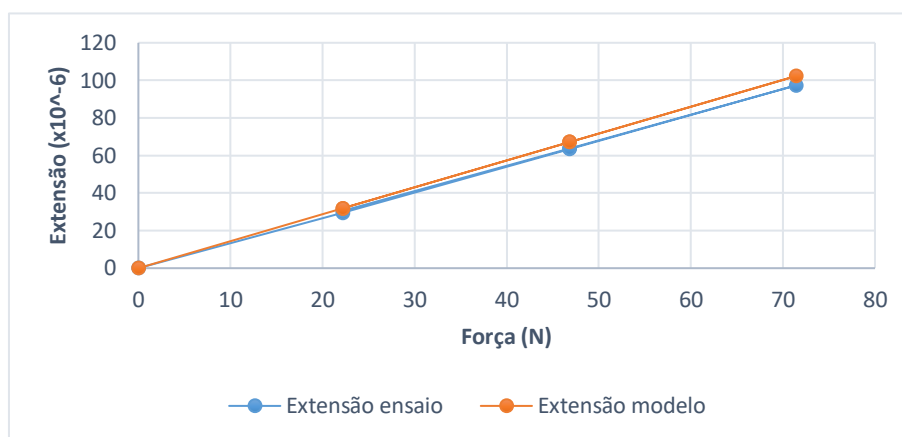


Figura A10. 163 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE1.

Tabela A10. 219 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-49,5	-47,0	-2,5	5
2	46,8	-101,9	-99,0	-2,9	3
3	71,4	-155,9	-151,1	-4,8	3
2	46,8	-102,89	-99,0	-3,8	4
1	22,2	-50,1	-47,0	-3,1	6

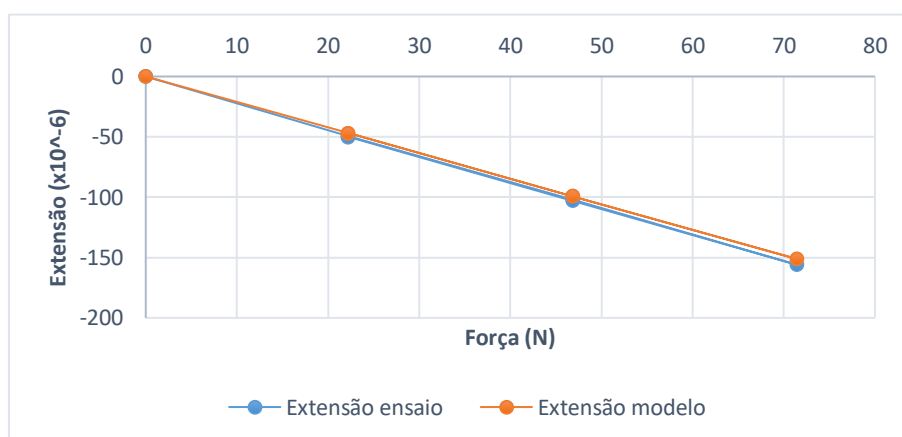


Figura A10. 164 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE1.

Tabela A10. 220 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE1 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	49,2	47,0	2,2	5
2	46,8	103,8	99,0	4,8	5
3	71,4	157,2	151,1	6,1	4
2	46,8	104,8	99,0	5,7	5
1	22,2	50,1	47,0	3,1	6

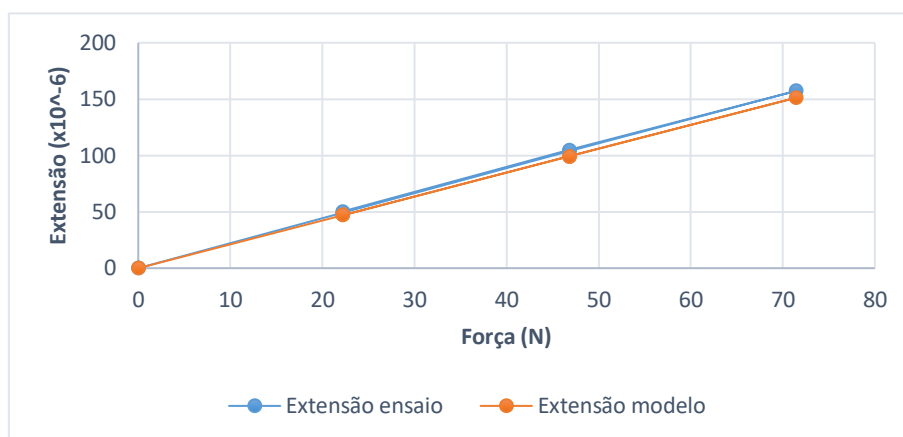


Figura A10. 165 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE1.

Tabela A10. 221 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-32,1	-31,8	-0,3	1
2	46,8	-65,3	-66,8	1,4	-2
3	71,4	-100,1	-101,9	1,7	-2
2	46,8	-68,8	-66,8	-2,0	3
1	22,2	-33,4	-31,8	-1,6	5

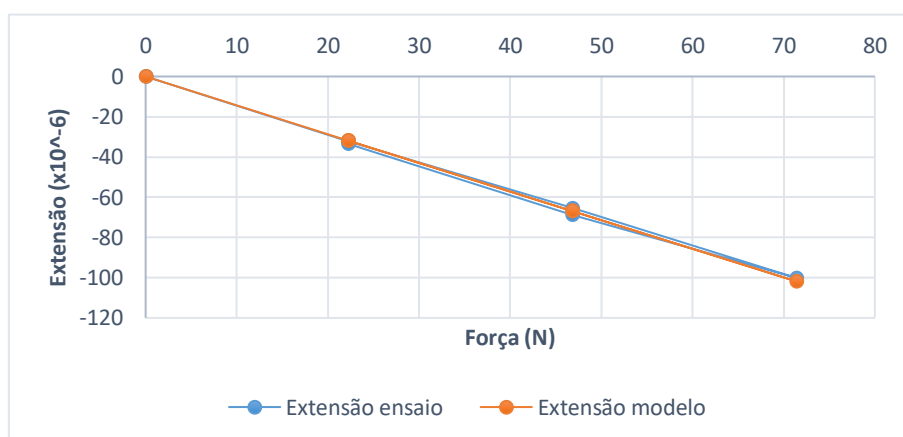


Figura A10. 166 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE2.

Tabela A10. 222 -Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	26,8	31,8	-5,0	-19
2	46,8	61,1	66,8	-5,7	-9
3	71,4	99,4	101,9	-2,5	-3
2	46,8	65,3	66,8	-1,4	-2
1	22,2	29,7	31,8	-2,1	-7

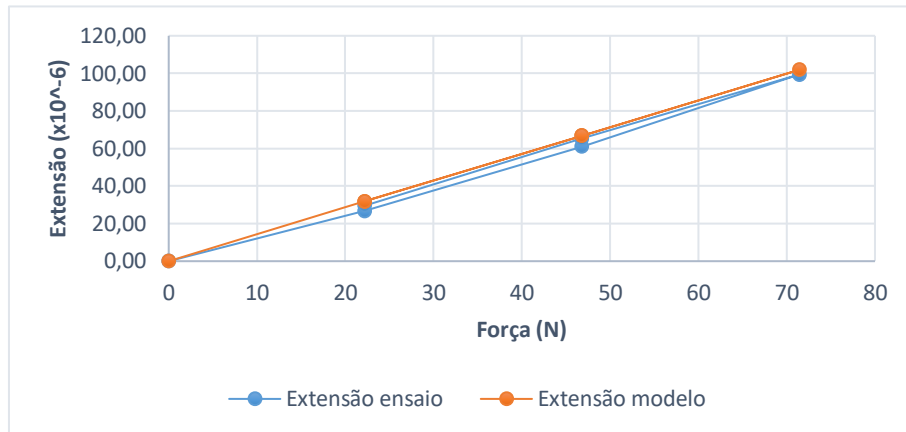


Figura A10. 167 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE2.

Tabela A10. 223 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-48,0	-47,0	-1,0	2
2	46,8	-97,7	-99,1	1,4	-1
3	71,4	-152,3	-151,2	-1,1	1
2	46,8	-105,5	-99,0	-6,4	6
1	22,2	-52,0	-47,0	-5,0	10

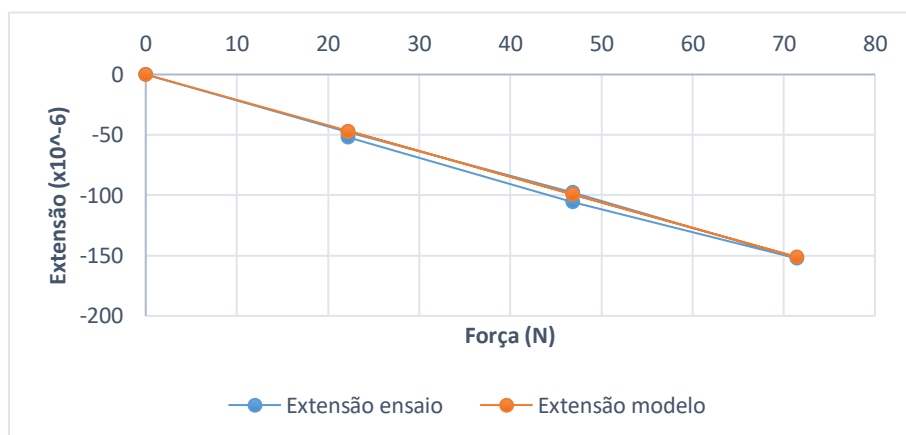


Figura A10. 168 – Força vs extensão no E-N1-1 no EE2.

Tabela A10. 224 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE2 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	49,0	47,0	2,0	4
2	46,8	97,5	99,1	-1,6	-2
3	71,4	152,2	151,2	1,0	1
2	46,8	104,2	99,1	5,1	5
1	22,2	50,9	47,0	3,9	8

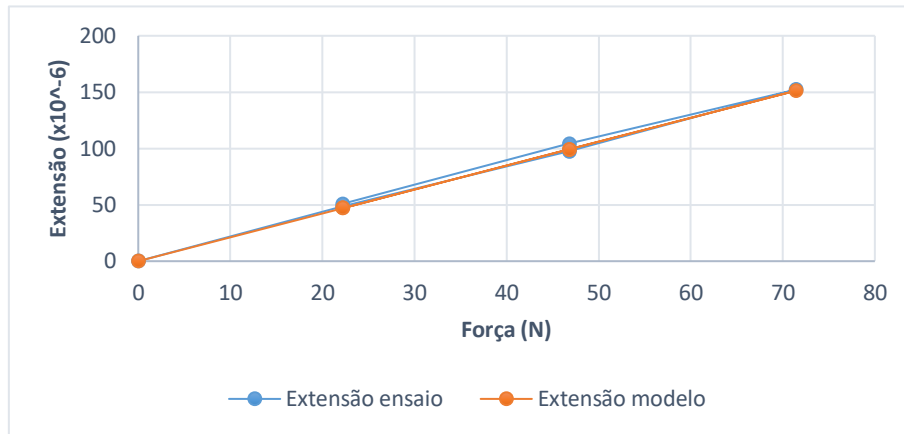


Figura A10. 169 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE2.

Tabela A10. 225 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-30,4	-31,8	1,4	-5
2	46,8	-67,9	-67,0	-1,0	1
3	71,4	-101,2	-103,8	2,7	-3
2	46,8	-71,1	-67,0	-4,2	6
1	22,2	-33,3	-31,8	-1,6	5

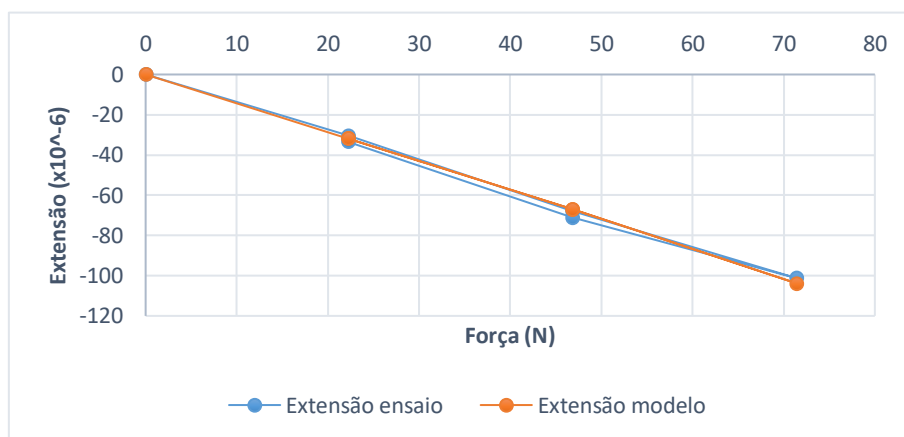


Figura A10. 170 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE3.

Tabela A10. 226 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	29,3	31,8	-2,5	-9
2	46,8	60,8	67,0	-6,1	-10
3	71,4	96,4	103,8	-7,4	-8
2	46,8	62,2	67,0	-4,7	-5
1	22,2	30,8	31,8	-1,0	-3

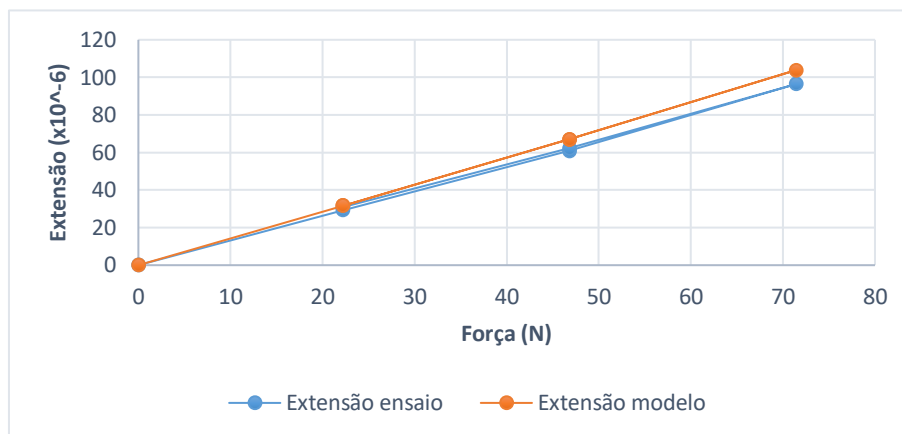


Figura A10. 171 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE3.

Tabela A10. 227 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-49,0	-46,4	-2,6	5
2	46,8	-104,3	-97,8	-6,5	6
3	71,4	-158,5	-149,1	-9,4	6
2	46,8	-108,4	-97,8	-10,6	10
1	22,2	-53,8	-46,4	-7,4	14

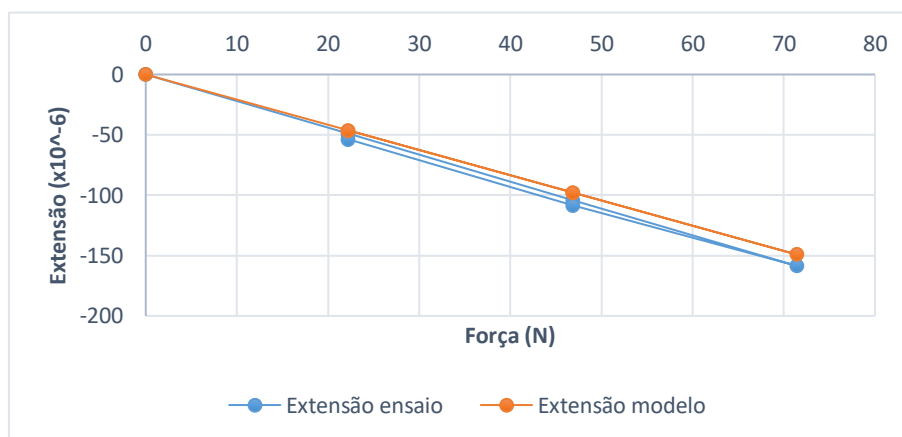


Figura A10. 172 – Força vs extensão no E-N1-1 no EE3.

Tabela A10. 228 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE3 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	45,9	46,4	-0,4	-1
2	46,8	102,7	97,8	4,9	5
3	71,4	156,3	149,1	7,2	5
2	46,8	105,6	97,8	7,8	7
1	22,2	49,3	46,4	3,0	6

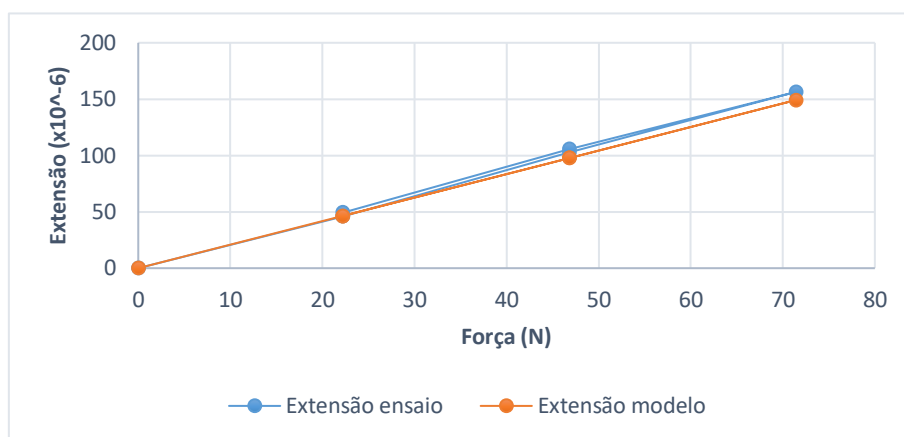


Figura A10. 173 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE3.

Tabela A10. 229 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-33,1	-31,5	-1,5	5
2	46,8	-69,9	-66,4	-3,5	5
3	71,4	-107,3	-101,3	-5,9	6
2	46,8	-69,9	-66,4	-3,5	5
1	22,2	-33,4	-31,5	-1,9	6

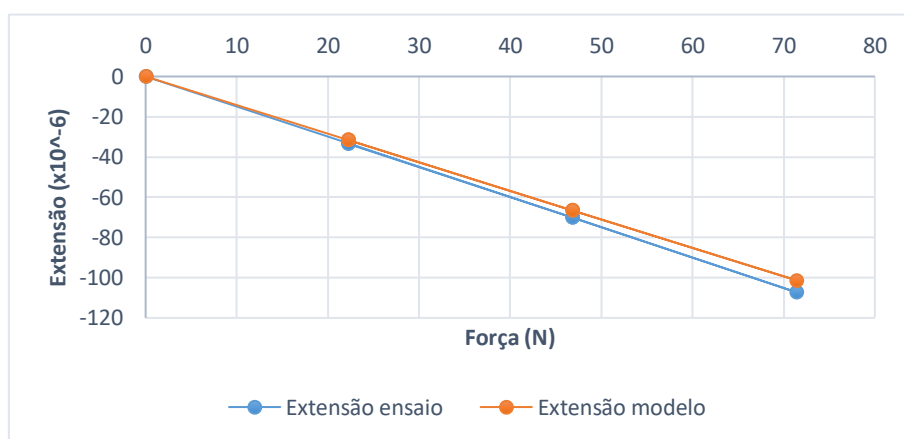


Figura A10. 174 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE4.

Tabela A10. 230 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	34,1	31,5	2,6	8
2	46,8	65,1	66,4	-1,3	-2
3	71,4	101,7	101,3	0,4	0
2	46,8	65,5	66,4	-0,9	-1
1	22,2	34,5	31,5	3,0	9

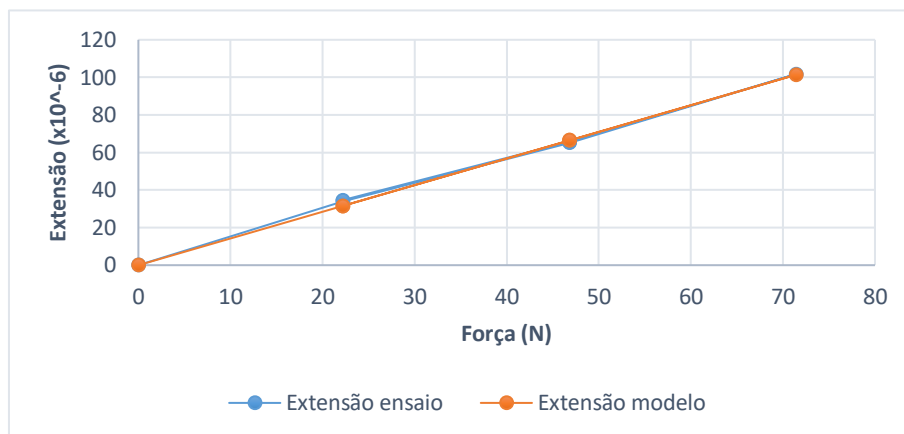


Figura A10. 175 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE4.

Tabela A10. 231 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-51,2	-46,3	-4,9	10
2	46,8	-105,3	-97,6	-7,7	7
3	71,4	-161,8	-148,9	-12,9	8
2	46,8	-105,4	-97,6	-7,8	7
1	22,2	-51,2	-46,3	-4,9	10

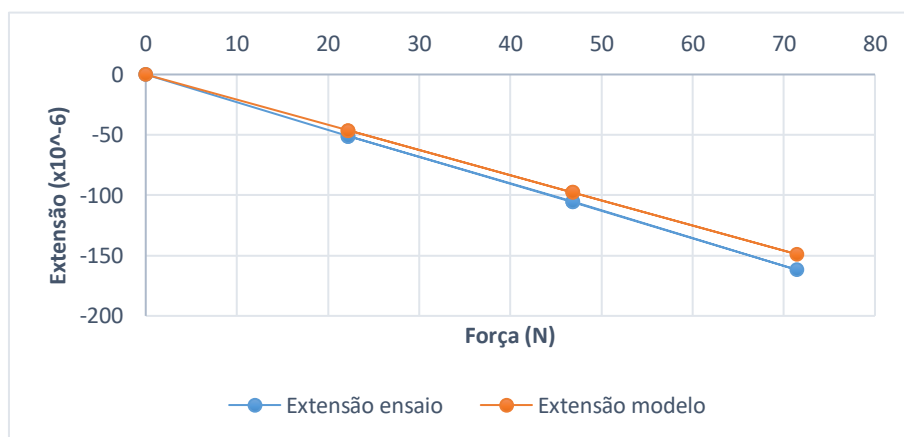


Figura A10. 176 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE4.

Tabela A10. 232 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE4 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	48,3	46,3	2,0	4
2	46,8	102,8	97,6	5,3	5
3	71,4	159,9	148,3	11,6	7
2	46,8	104,1	97,6	6,5	6
1	22,2	48,5	46,3	2,2	5

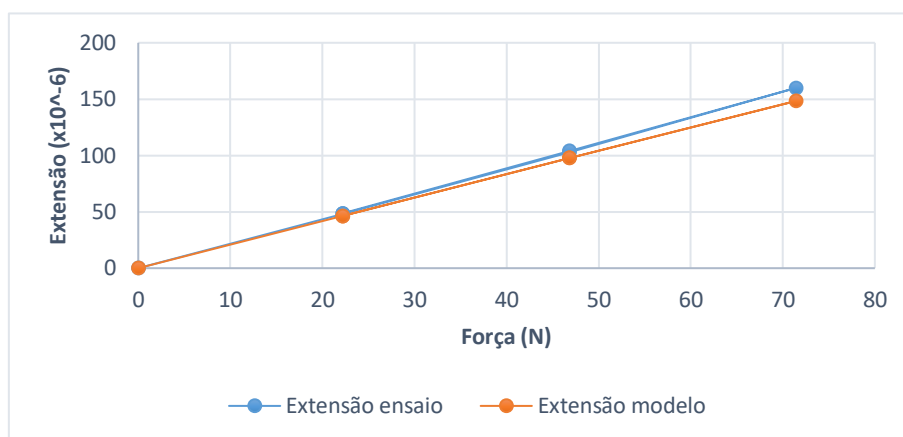


Figura A10. 177 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE4.

Tabela A10. 233 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-29,0	-28,5	-0,4	1
2	46,8	-64,0	-60,8	-3,2	5
3	71,4	-100,5	-92,8	-7,7	8
2	46,8	-66,6	-60,8	-5,8	9
1	22,2	-30,0	-28,5	-1,5	5

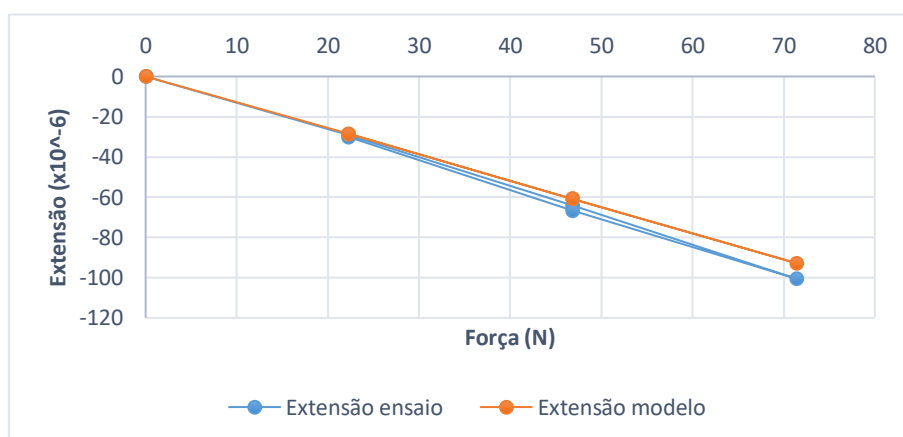


Figura A10. 178 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE5.

Tabela A10. 234 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	27,6	28,5	-0,9	-3
2	46,8	61,7	60,8	0,9	1
3	71,4	96,7	92,8	3,9	4
2	46,8	63,5	60,8	2,7	4
1	22,2	29,9	28,5	1,4	5

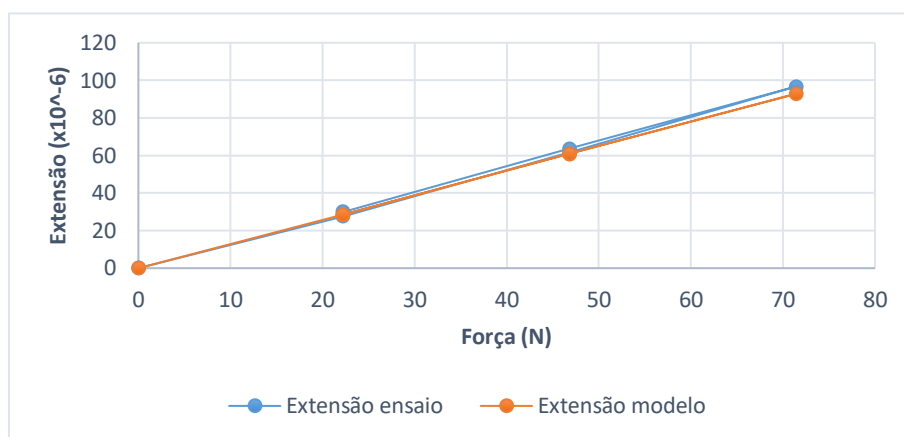


Figura A10. 179 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE5.

Tabela A10. 235 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-47,2	-45,9	-1,3	3
2	46,8	-102,8	-96,7	-6,1	6
3	71,4	-160,6	-147,6	-13,0	8
2	46,8	-106,4	-96,7	-9,7	9
1	22,2	-49,3	-45,9	-3,4	7

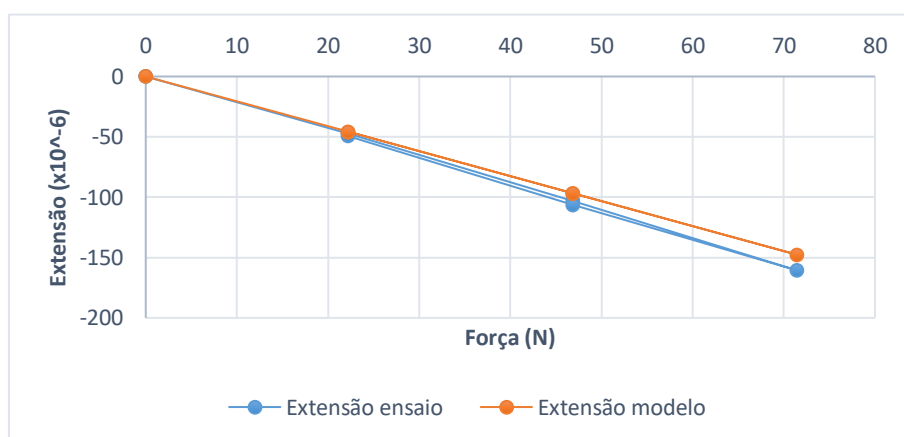


Figura A10. 180 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE5.

Tabela A10. 236 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE5 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	49,5	45,9	3,6	7
2	46,8	104,2	96,7	7,5	7
3	71,4	160,8	147,6	13,2	8
2	46,8	105,9	96,7	9,2	9
1	22,2	50,5	45,9	4,6	9

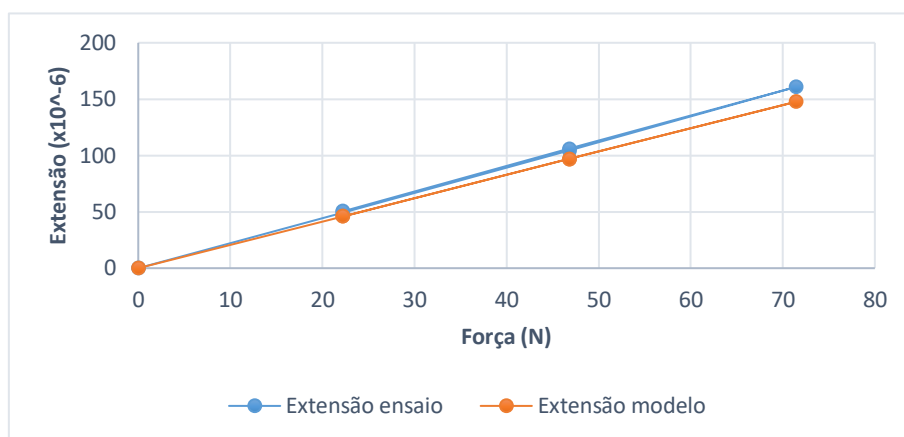


Figura A10. 181 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE5.

Tabela A10. 237 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-26,0	-28,0	1,9	-7
2	46,8	-59,1	-59,0	-0,1	0
3	71,4	-91,1	-89,6	-1,5	2
2	46,8	-59,7	-59,0	-0,7	1
1	22,2	-26,3	-28,0	1,6	-6

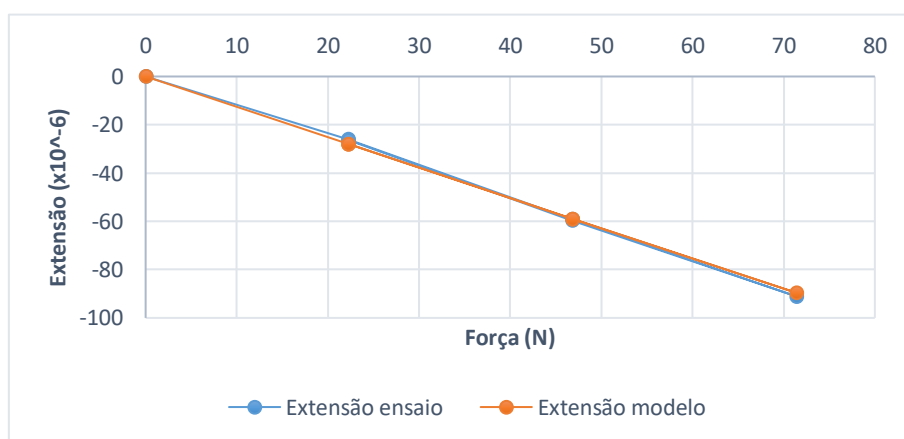


Figura A10. 182 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE6.

Tabela A10. 238 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	27,5	28,0	-0,4	-1
2	46,8	56,3	59,0	-2,7	-5
3	71,4	86,8	89,6	-2,8	-3
2	46,8	57,4	59,0	-1,7	-3
1	22,2	28,3	28,0	0,3	1

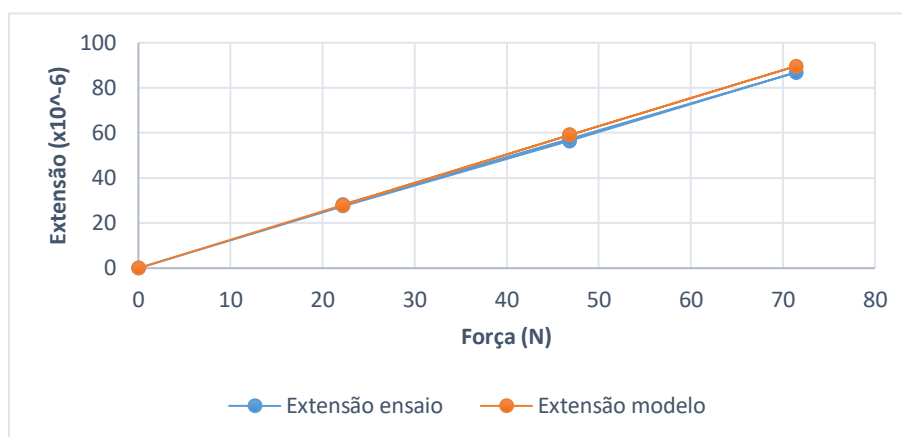


Figura A10. 183 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE6.

Tabela A10. 239 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-44,6	-41,3	-3,3	7
2	46,8	-93,3	-87,1	-6,2	7
3	71,4	-146,1	-133,0	-13,1	9
2	46,8	-95,8	-87,1	-8,6	9
1	22,2	-46,2	-41,3	-4,9	11

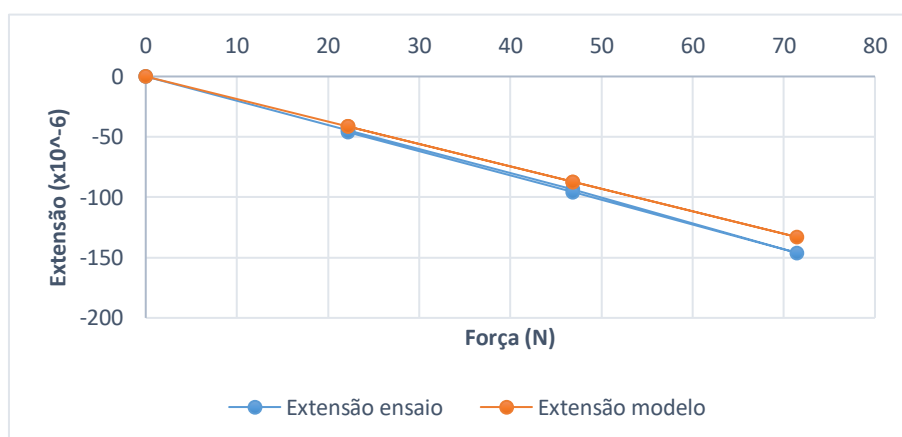


Figura A10. 184 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE6.

Tabela A10. 240 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE6 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	43,5	41,3	2,1	5
2	46,8	93,5	87,1	6,4	7
3	71,4	143,0	133,0	10,1	7
2	46,8	94,2	87,1	7,0	7
1	22,2	43,6	41,3	2,2	5

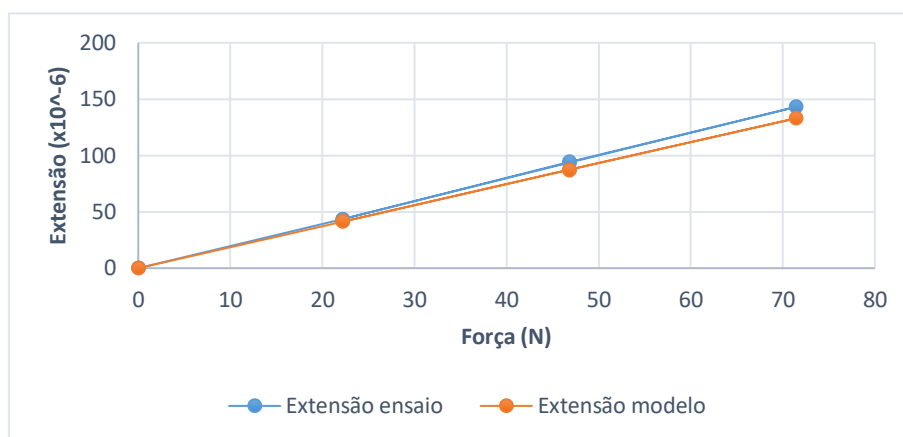


Figura A10. 185 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE6.

Tabela A10. 241 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-27,8	-24,5	-3,2	12
2	46,8	-58,8	-51,7	-7,1	12
3	71,4	-90,1	-82,9	-7,2	8
2	46,8	-61,4	-51,7	-9,6	16
1	22,2	-29,4	-24,5	-4,9	17

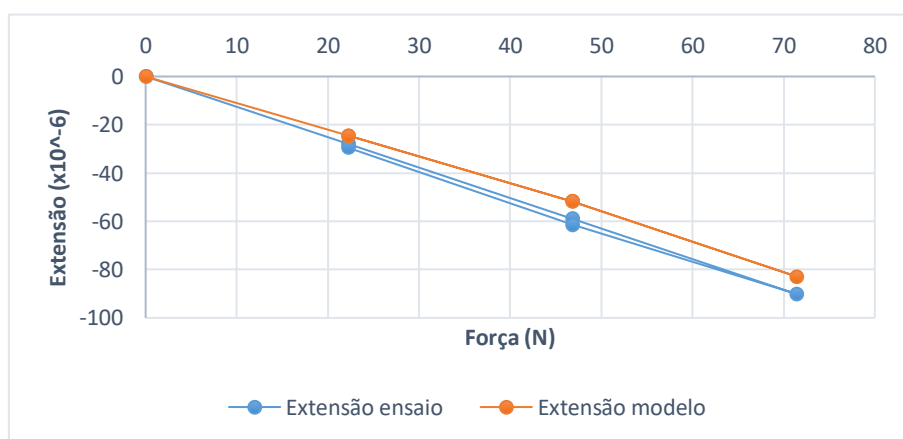


Figura A10. 186 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE7.

Tabela A10. 242 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	27,3	24,5	2,7	10
2	46,8	57,5	51,7	5,8	10
3	71,4	85,7	82,9	2,8	3
2	46,8	57,5	51,7	5,8	10
1	22,2	28,0	24,5	3,5	13

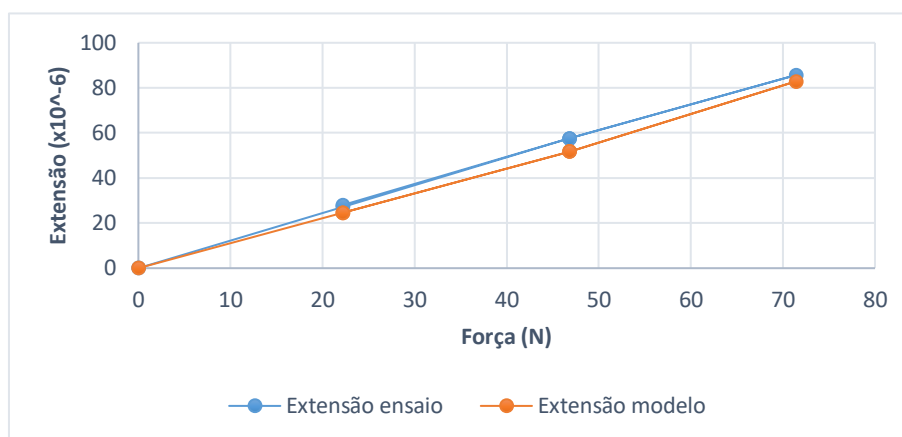


Figura A10. 187 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE7.

Tabela A10. 243 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-44,7	-41,7	-2,9	7
2	46,8	-94,5	-88,0	-6,5	7
3	71,4	-142,2	-139,0	-3,2	2
2	46,8	-95,0	-88,0	-7,0	7
1	22,2	-44,7	-41,7	-3,0	7

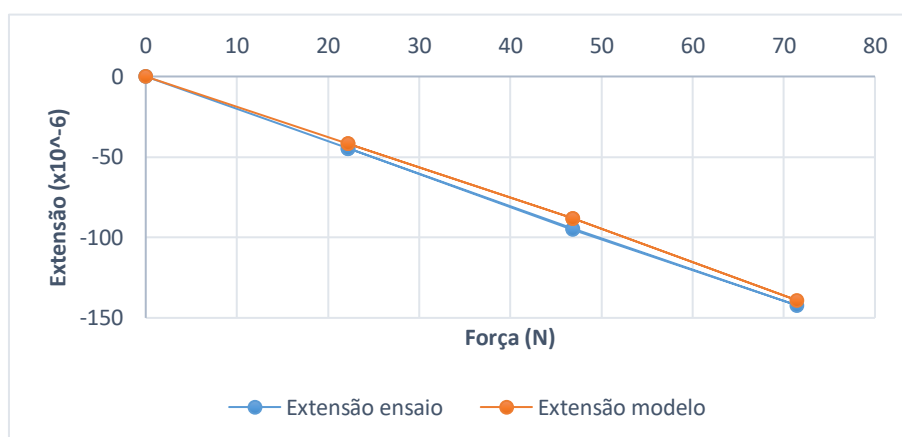


Figura A10. 188 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE7.

Tabela A10. 244 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE7 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	43,7	41,7	2,0	5
2	46,8	94,8	88,0	6,8	7
3	71,4	143,3	139,0	4,3	3
2	46,8	95,0	88,0	7,0	7
1	22,2	45,0	41,7	3,3	7

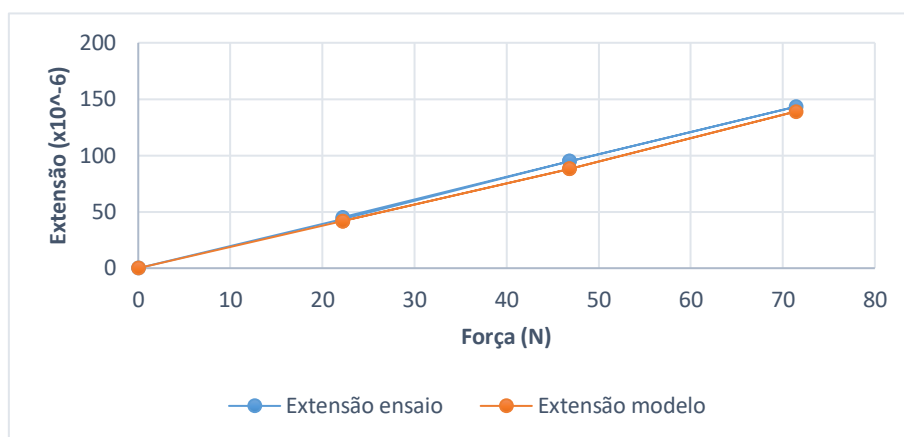


Figura A10. 189 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE7.

Tabela A10. 245 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-22,7	-24,2	1,6	-7
2	46,8	-57,3	-54,5	-2,8	5
3	71,4	-92,5	-86,1	-6,4	7
2	46,8	-58,3	-54,5	-3,8	7
1	22,2	-23,4	-24,2	0,9	-4

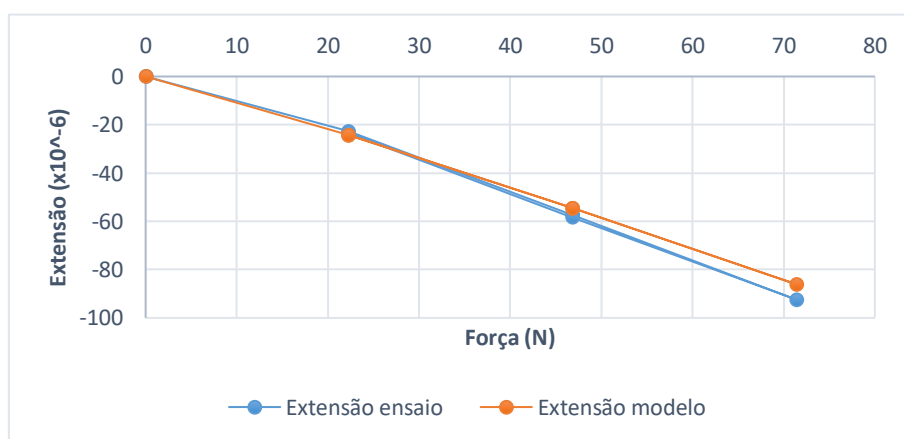


Figura A10. 190 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE8.

Tabela A10. 246 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	20,0	24,2	-4,2	-21
2	46,8	57,5	54,5	3,1	5
3	71,4	89,8	86,1	3,8	4
2	46,8	58,2	54,5	3,7	6
1	22,2	21,5	24,2	-2,7	-12

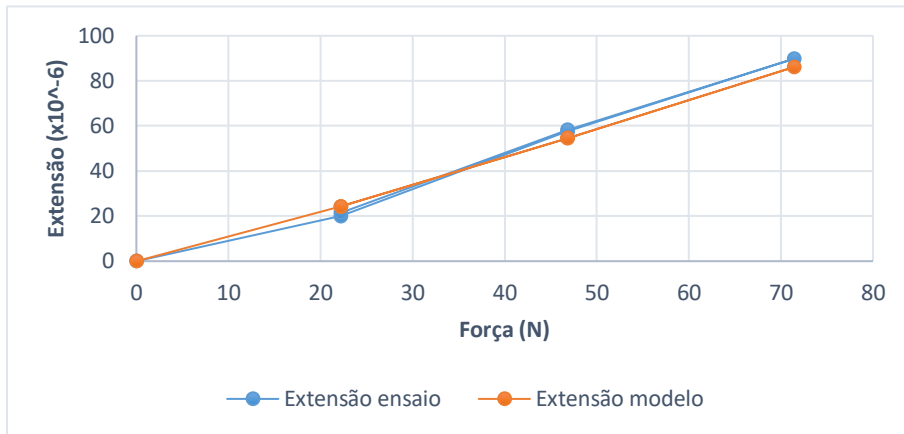


Figura A10. 191 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE8.

Tabela A10. 247 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-50,5	-46,6	-3,8	8
2	46,8	-107,0	-98,3	-8,8	8
3	71,4	-161,4	-150,0	-11,4	7
2	46,8	-107,4	-98,3	-9,1	8
1	22,2	-50,5	-46,6	-3,9	8

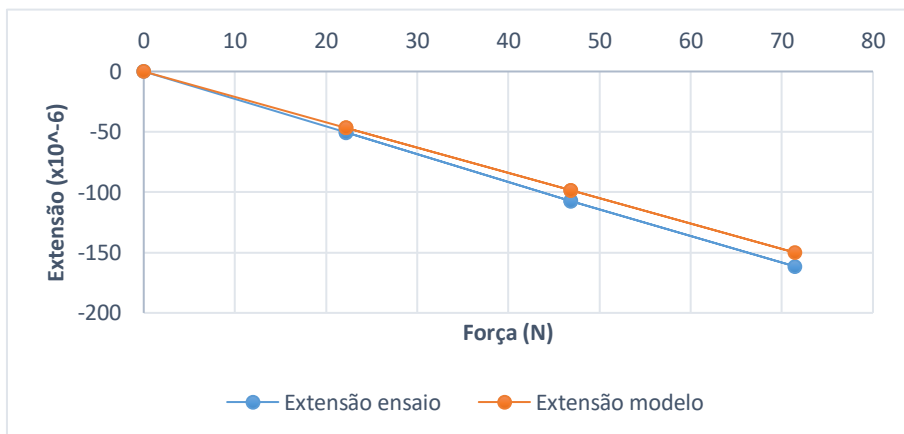


Figura A10. 192 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE8.

Tabela A10. 248 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE8 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	51,5	46,6	4,9	10
2	46,8	109,1	98,3	10,8	10
3	71,4	163,8	1450,0	13,9	8
2	46,8	109,5	98,3	11,2	10
1	22,2	52,1	46,6	5,5	11

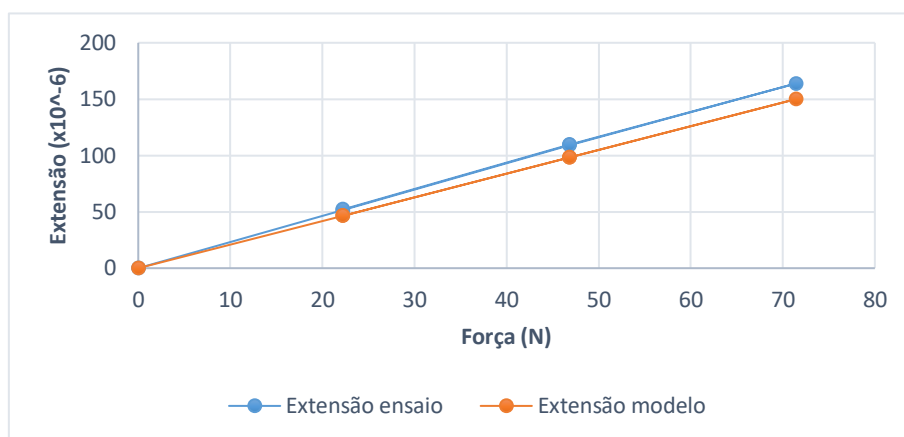


Figura A10. 193 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE8.

Tabela A10. 249 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-1 para o EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-24,1	-6,7	-17,5	72
2	46,8	-43,6	-13,8	-29,8	68
3	71,4	-72,9	-21,1	-51,8	71
2	46,8	-43,9	-13,8	-30,0	69
1	22,2	-25,5	-6,7	-18,8	74

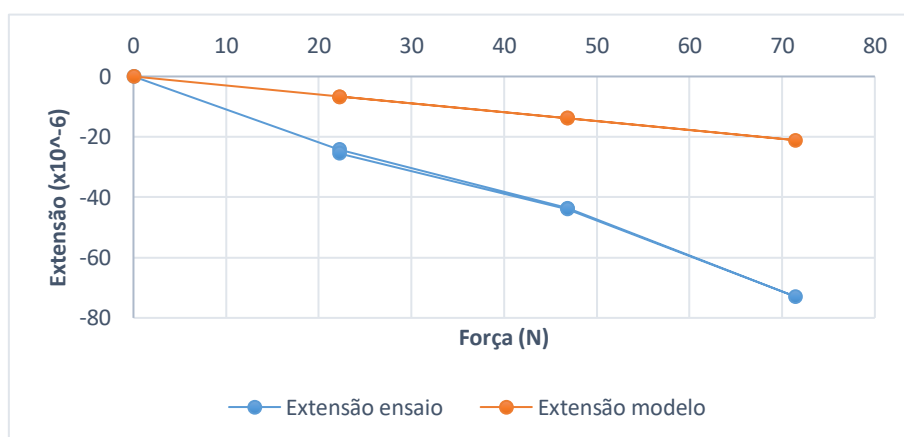


Figura A10. 194 - Força vs extensão no E-N0-1 no EE9.

Tabela A10. 250 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N0-2 para o EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	22,3	6,6	15,7	71
2	46,8	40,7	13,8	26,9	66
3	71,4	67,5	21,1	46,4	69
2	46,8	41,3	13,8	27,5	67
1	22,2	22,7	6,6	16,2	71

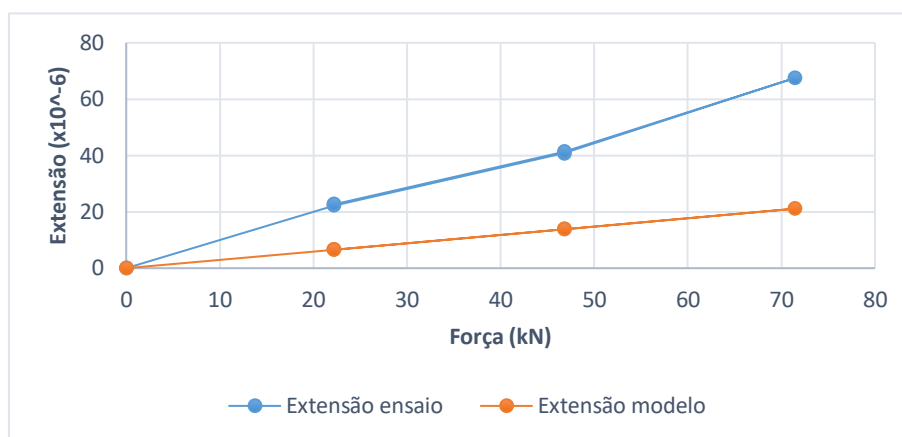


Figura A10. 195 - Força vs extensão no E-N0-2 no EE9.

Tabela A10. 251 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-1 para o EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-40,2	-10,5	-29,7	74
2	46,8	-72,2	-22,1	-50,1	69
3	71,4	-118,1	-33,9	-84,3	71
2	46,8	-72,9	-22,1	-50,8	70
1	22,2	-40,6	-10,5	-30,1	74

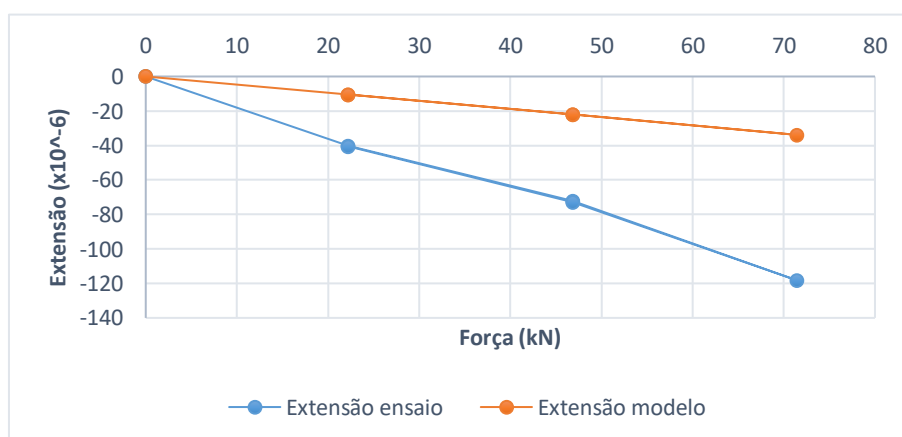


Figura A10. 196 - Força vs extensão no E-N1-1 no EE9.

Tabela A10. 252 - Valores comparativos de extensões registadas no E-N1-2 para o EE9 ($\times 10^{-6}$ m/m).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	36,1	10,5	25,5	71
2	46,8	70,2	22,1	48,1	69
3	71,4	117,3	33,9	83,4	71
2	46,8	71,4	22,1	49,3	69
1	22,2	39,0	10,5	28,4	73

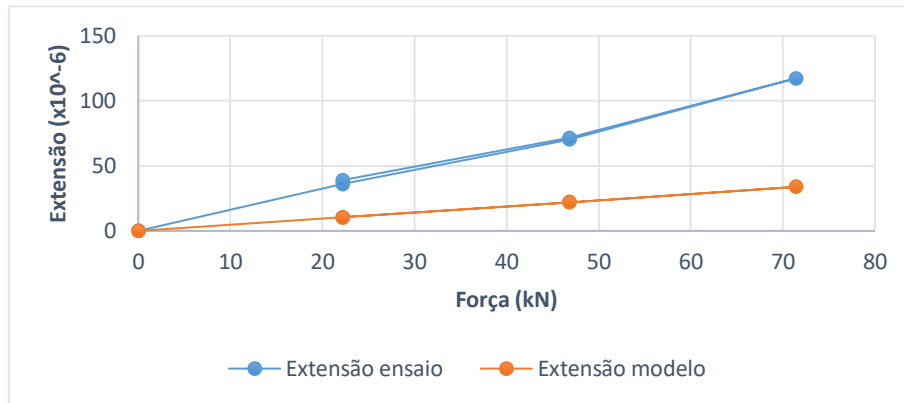


Figura A10. 197 - Força vs extensão no E-N1-2 no EE9.

- Rotações:**

Tabela A10. 253 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE1 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-85,2	-87,7	2,5	-3
2	46,8	-178,4	-184,8	6,5	-4
3	71,4	-272,5	-282,0	9,5	-3
2	46,8	-180,1	-184,8	4,7	-3
1	22,2	-86,1	-87,7	1,6	-2

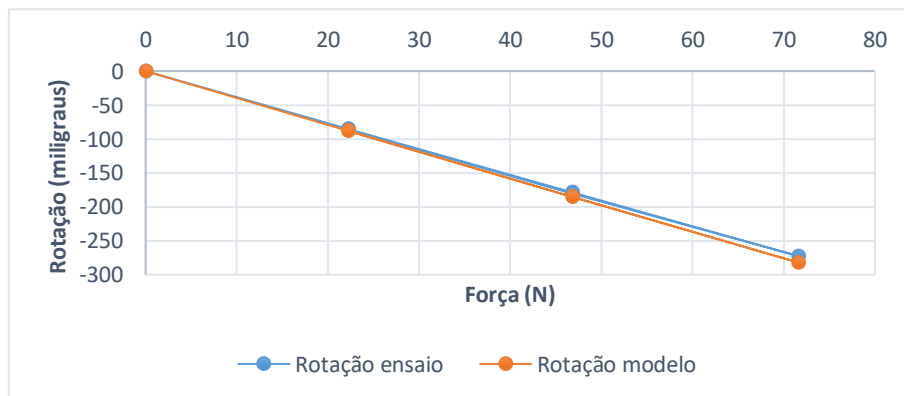


Figura A10. 198 - Força vs rotação para I-N1 no EE1.

Tabela A10. 254 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE1 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-238,8	-204,1	-34,6	15
2	46,8	-510,6	-430,3	-80,3	16
3	71,4	-777,2	-656,5	-120,7	16
2	46,8	-514,4	-430,3	-84,0	16
1	22,2	-243,3	-204,1	-39,2	16

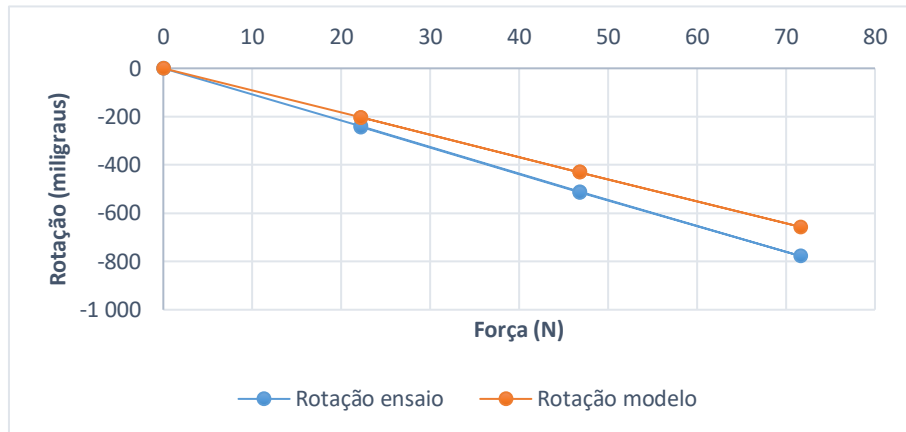


Figura A10. 199 - Força vs rotação para I-N2 no EE1.

Tabela A10. 255 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE2 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1471,3	-1441,3	-30,0	2
2	46,8	-1606,4	-1630,3	23,9	-1
3	71,4	-1749,0	-1819,1	70,1	-4
2	46,8	-1632,7	-1630,3	-2,4	0
1	22,2	-1498,4	-1441,3	-57,2	4

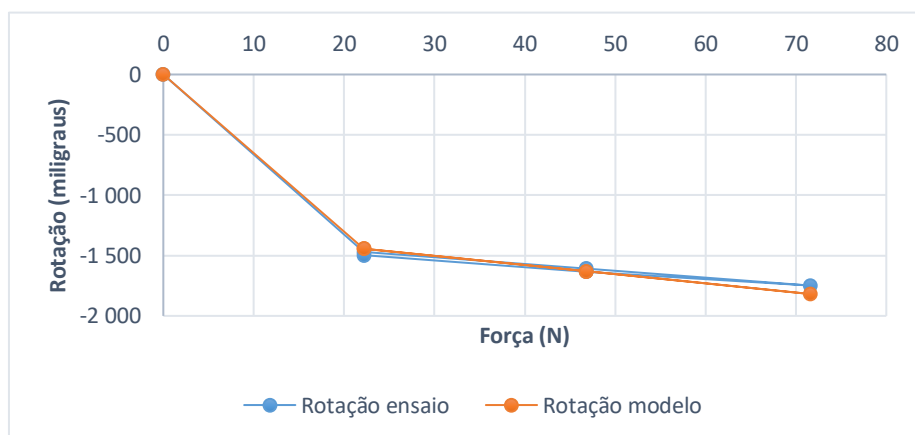


Figura A10. 200 - Força vs rotação para I-N1 no EE2.

Tabela A10. 256 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE2 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1664,3	-1557,2	-107,1	6
2	46,8	-1915,4	-1875,4	-40,0	2
3	71,4	-2226,2	-2193,7	-32,6	1
2	46,8	-1953,4	-1875,4	-78,1	4
1	22,2	-1692,9	-1557,2	-135,7	8

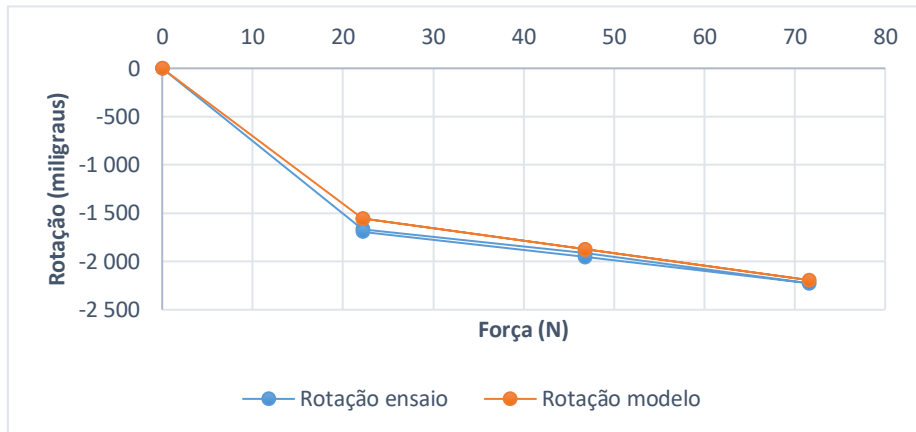


Gráfico força vs rotação para I-N2 no EE2.

Tabela A10. 257 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE3 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-81,7	-89,3	7,6	-9
2	46,8	-178,9	-188,2	9,3	-5
3	71,4	-216,6	-287,1	70,6	-33
2	46,8	-184,0	-188,2	4,2	-2
1	22,2	-85,0	-89,3	4,2	-5

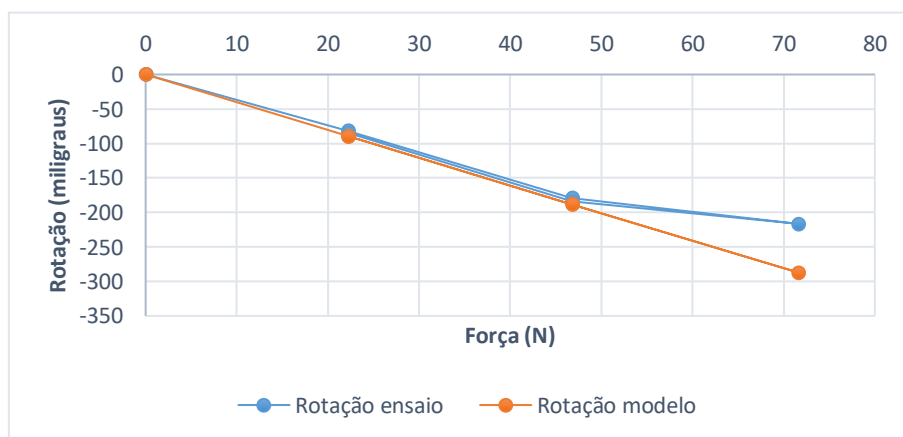


Figura A10. 201 - Força vs rotação para I-N1 no EE3.

Tabela A10. 258 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE3 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-3100,5	-3049,7	-50,8	2
2	46,8	-3527,8	-3360,7	-167,1	5
3	71,4	-3883,7	-3671,7	-211,9	5
2	46,8	-3587,1	-3360,7	-226,3	6
1	22,2	-3207,7	-3049,7	-158,0	5

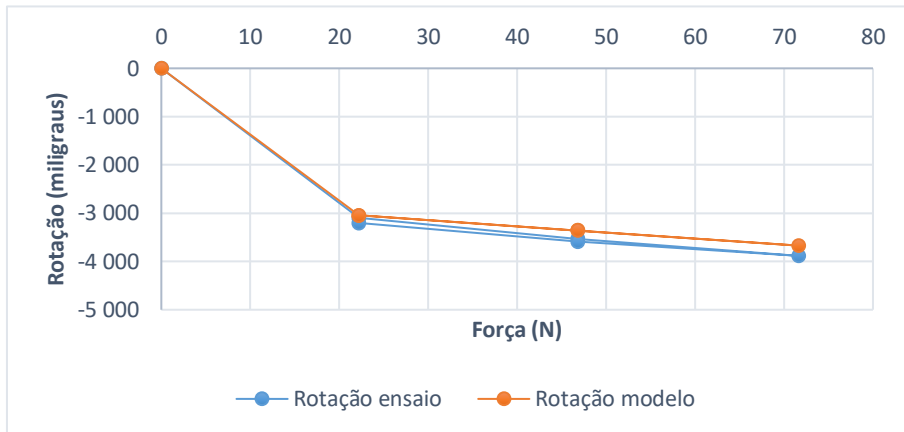


Figura A10. 202 - Força vs rotação para I-N2 no EE3.

Tabela A10. 259 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE4 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-2320,4	-2178,5	-141,9	6
2	46,8	-2496,8	-2370,5	-126,3	5
3	71,4	-2678,4	-2562,5	-115,9	4
2	46,8	-2507,3	-2370,5	-136,8	5
1	22,2	-2344,4	-2178,5	-166,0	7

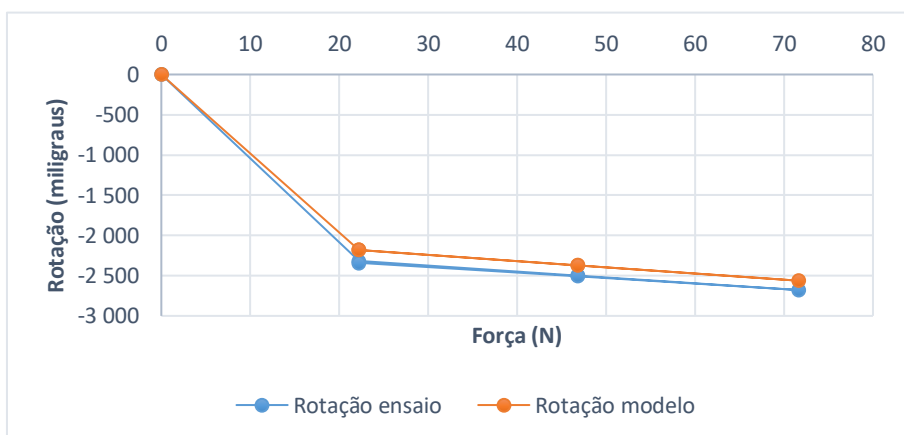


Figura A10. 203 - Gráfico força vs rotação para I-N1 no EE4.

Tabela A10. 260 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE4 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-4039,3	-3420,2	-619,1	15
2	46,8	-4547,2	-3824,2	-722,9	16
3	71,4	-4569,1	-4228,3	-340,8	7
2	46,8	-4571,0	-3824,2	-746,7	16
1	22,2	-4069,5	-3420,2	-649,3	16

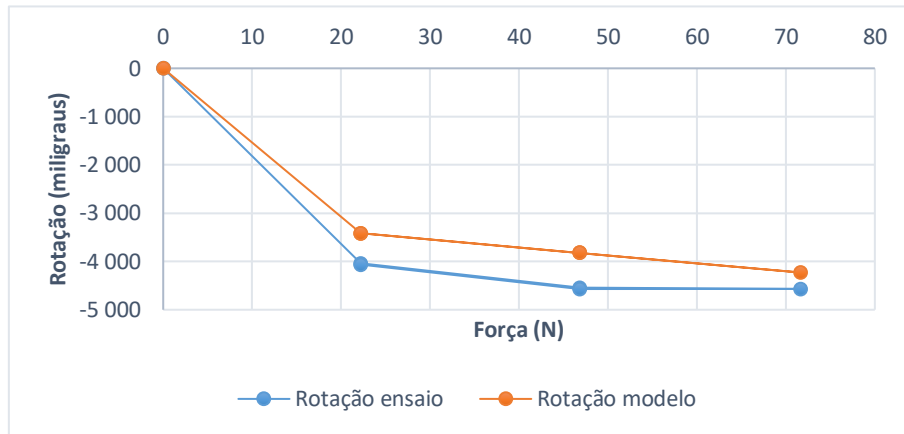


Figura A10. 204 - Gráfico força vs rotação para I-N2 no EE4.

Tabela A10. 261 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE5 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-81,4	-80,9	-0,5	1
2	46,8	-174,1	-170,6	-3,4	2
3	71,4	-273,1	-260,3	-12,8	5
2	46,8	-178,4	-170,6	-7,7	4
1	22,2	-84,6	-80,9	-3,7	4

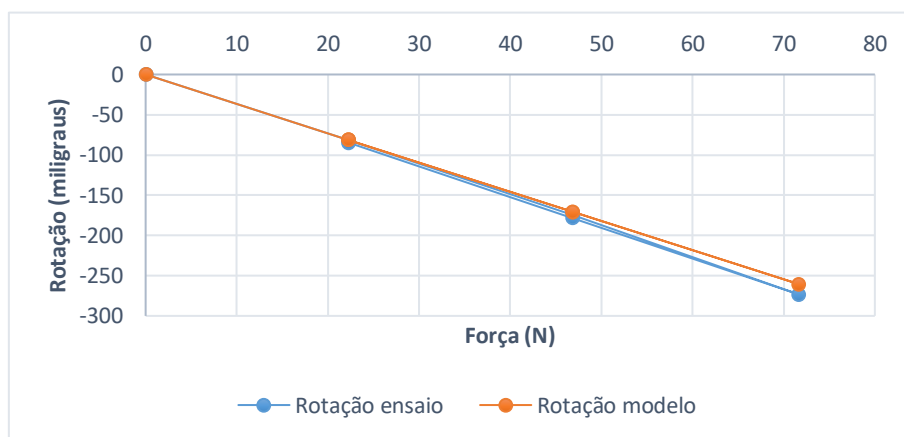


Figura A10. 205 - Força vs rotação para I-N1 no EE5.

Tabela A10. 262 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE5 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-243,4	-197,1	-46,3	19
2	46,8	-521,6	-415,6	-106,0	20
3	71,4	-806,7	-634,0	-172,7	21
2	46,8	-524,6	-415,6	-109,0	21
1	22,2	-244,5	-197,1	-47,4	19

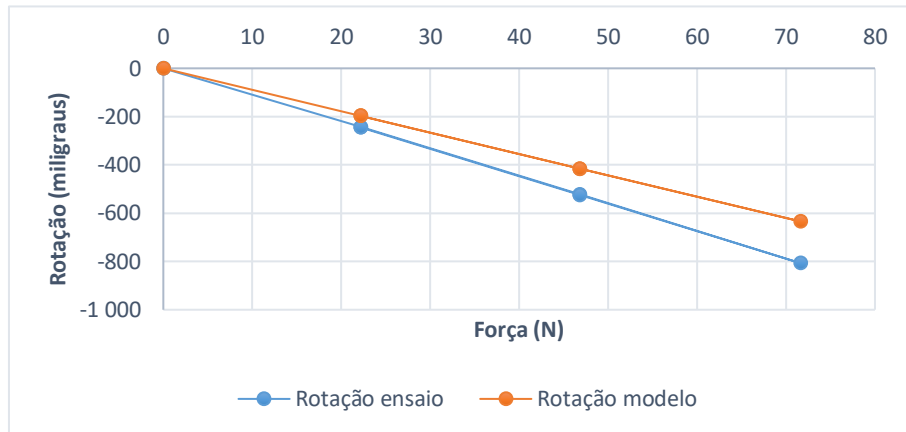


Figura A10. 206 - Força vs rotação para I-N2 no EE5.

Tabela A10. 263 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE6 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-77,8	-76,7	-1,1	1
2	46,8	-163,3	-161,7	-1,6	1
3	71,4	-255,1	-246,7	-8,4	3
2	46,8	-164,3	-161,7	-2,6	2
1	22,2	-80,6	-76,7	-3,9	5

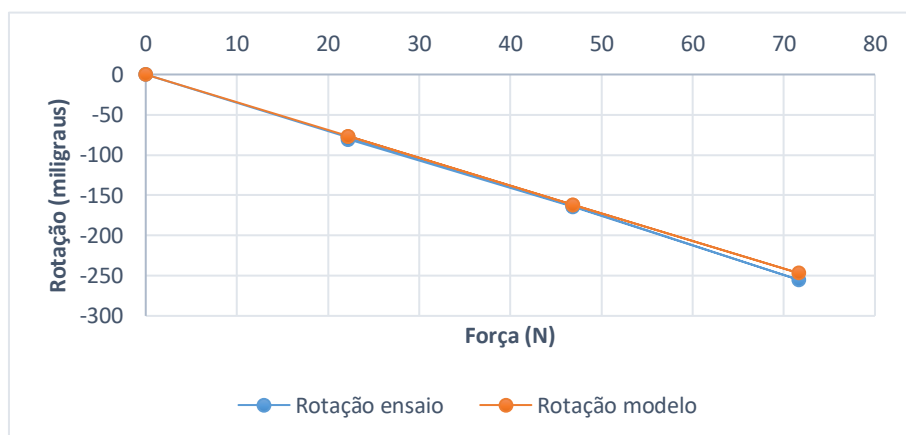


Figura A10. 207 - Força vs rotação para I-N1 no EE6.

Tabela A10. 264 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE6 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-224,4	-179,8	-44,6	20
2	46,8	-477,1	-379,1	-98,0	21
3	71,4	-735,8	-578,4	-157,4	21
2	46,8	-482,6	-379,1	-103,5	21
1	22,2	-225,8	-179,8	-45,9	20

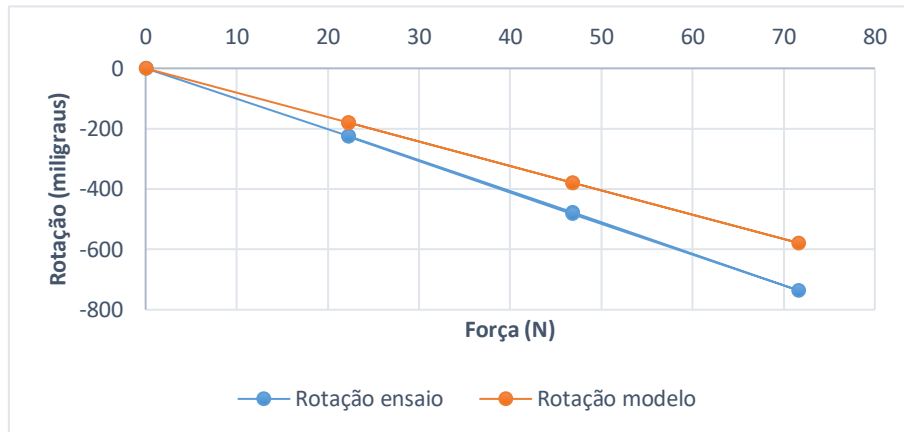


Figura A10. 208 - Força vs rotação para I-N2 no EE6.

Tabela A10. 265 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE7 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-82,5	-69,6	-12,9	16
2	46,8	-163,2	-146,8	-16,4	10
3	71,4	-235,8	-223,9	-11,9	5
2	46,8	-165,3	-146,8	-18,6	11
1	22,2	-83,5	-69,6	-13,9	17

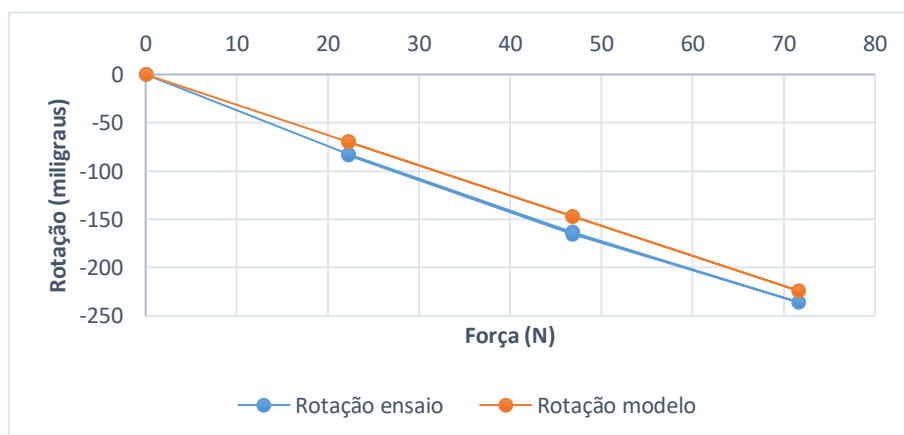


Figura A10. 209 - Força vs rotação para I-N1 no EE7.

Tabela A10. 266 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE7 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-222,9	-173,3	49,6	22
2	46,8	-485,3	-365,36	120,1	25
3	71,4	-713,8	-557,2	156,6	22
2	46,8	-492,2	-365,3	127,0	26
1	22,2	-233,7	-173,2	60,5	26

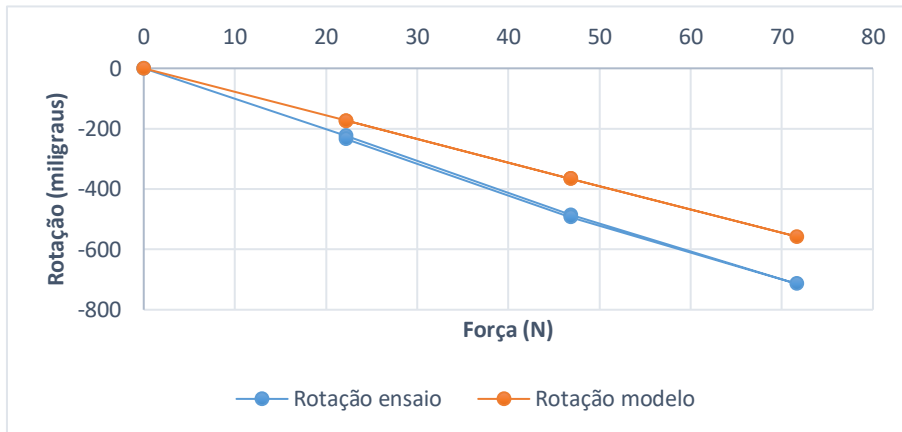


Figura A10. 210 - Força vs rotação para I-N2 no EE7.

Tabela A10. 267 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE8 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1290,2	-1177,6	-112,6	9
2	46,8	-1536,8	-1592,4	55,6	-4
3	71,4	-1713,2	-1775,3	62,1	-4
2	46,8	-1554,5	-1592,4	38,0	-2
1	22,2	-1313,2	-1177,6	-135,7	10

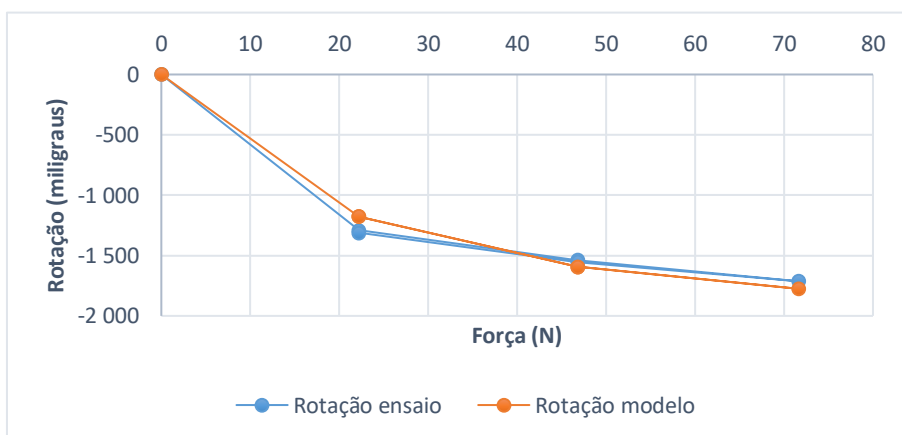


Figura A10. 211 - Força vs rotação para I-N1 no EE8.

Tabela A10. 268 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE8 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-1459,6	-1293,5	-166,1	11
2	46,8	-1885,4	-1837,4	-48,0	3
3	71,4	-2262,1	-2151,4	-110,7	5
2	46,8	-1912,1	-1837,4	-74,8	4
1	22,2	-1478,1	-1293,5	-184,6	12

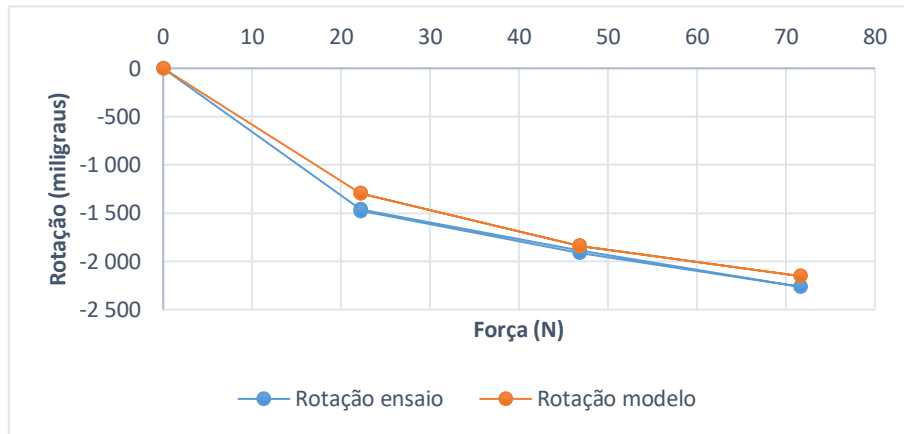


Figura A10. 212 - Gráfico força vs rotação para I-N2 no EE8.

Tabela A10. 269 - Valores comparativos de rotações no I-N1 para o EE9 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-64,4	-18,4	-46,0	71
2	46,8	-118,3	-38,8	-79,5	67
3	71,4	-188,8	-59,2	-129,6	69
2	46,8	-119,9	-38,8	-81,1	68
1	22,2	-67,3	-18,4	-48,9	73

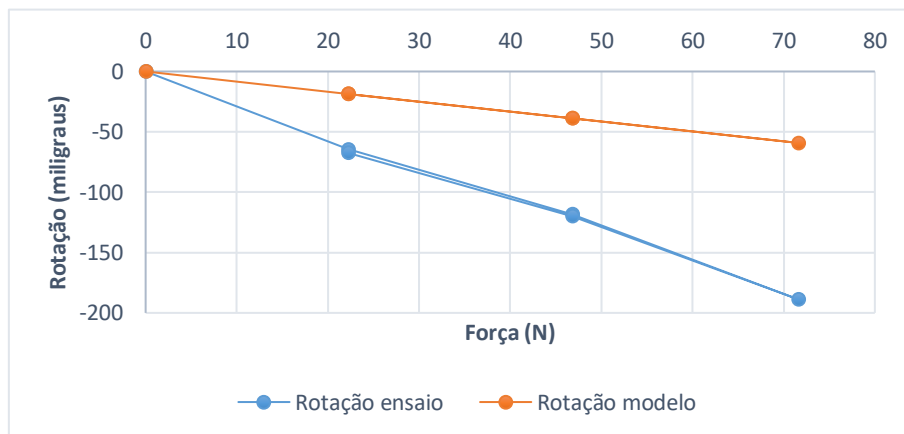


Figura A10. 213 - Força vs rotação para I-N1 no EE9.

Tabela A10. 270 - Valores comparativos de rotações no I-N2 para o EE9 (em m°).

Caso de carga	Força (N)	Ensaio	Modelo	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1	22,2	-613,4	-700,6	87,2	-14
2	46,8	-1865,1	-1476,9	-388,2	21
3	71,4	-2310,6	-2253,2	-57,4	2
2	46,8	-1924,0	-1476,9	-447,1	23
1	22,2	-668,2	-700,6	32,4	-5

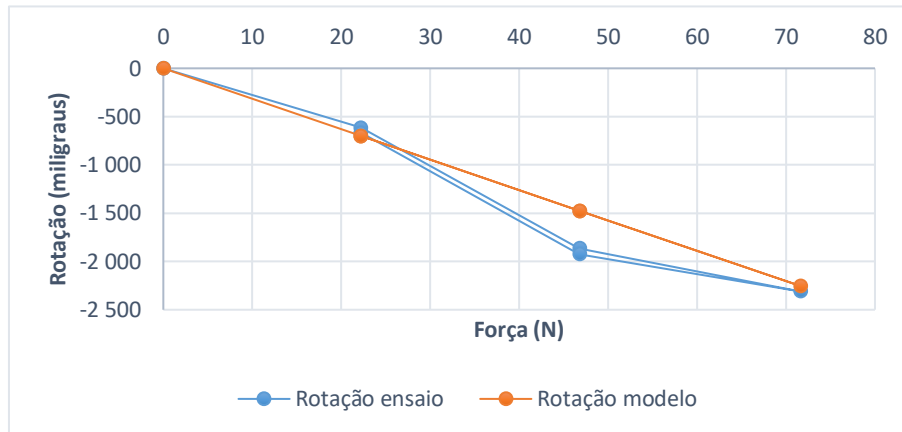


Figura A10. 214 - Força vs rotação para I-N2 no EE9.

- Análise modal:**

- Massas no nível 1:**

Tabela A10. 271 - Valores comparativos de frequências naturais no ED1.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,03	7,59	-0,56	-8
2º	20,92	23,32	-2,40	-11

Tabela A10. 272 - Valores comparativos de frequências naturais no ED2.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,27	1,60	-0,33	-26
2º	16,85	17,58	-0,73	-4

Tabela A10. 273 - Valores comparativos de frequências naturais no ED3.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,05	2,59	-0,54	-26
2º	13,75	11,75	2,00	15

Tabela A10. 274 - Valores comparativos de frequências naturais no ED4.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,39	1,26	0,13	9
2º	4,42	5,63	-1,21	-27

Tabela A10. 275 - Valores comparativos de frequências naturais no ED5.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,30	7,91	-0,61	-8
2º	21,17	23,49	-2,32	-11

Tabela A10. 276 - Valores comparativos de frequências naturais no ED6.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,57	8,06	-0,49	-6
2º	20,97	23,43	-2,46	-12

Tabela A10. 277 - Valores comparativos de frequências naturais no ED7.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,66	8,50	-0,84	-11
2º	20,97	23,67	-2,70	-13

Tabela A10. 278 - Valores comparativos de frequências naturais no ED8.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	3,86	1,78	2,08	54
2º	17,75	17,59	0,16	1

Tabela A10. 279 - Valores comparativos de frequências naturais no ED9.1 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	7,42	5,47	1,95	26
2º	16,82	11,76	5,06	30

Massas no nível 2:

Tabela A10. 280 - Valores comparativos de frequências naturais no ED1.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,15	4,49	-0,34	-8
2º	27,78	33,64	-5,86	-21

Tabela A10. 281 - Valores comparativos de frequências naturais no ED2.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,88	1,15	-0,27	-31
2º	18,87	19,63	-0,76	-4

Tabela A10. 282 - Valores comparativos de frequências naturais no ED3.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,83	1,26	-0,43	-52
2º	19,75	20,67	-0,92	-5

Tabela A10. 283 - Valores comparativos de frequências naturais no ED4.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,12	0,85	0,27	24
2º	9,50	6,83	2,67	28

Tabela A10. 284 - Valores comparativos de frequências naturais no ED5.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,27	4,63	-0,36	-8
2º	28,15	34,19	-6,04	-21

Tabela A10. 285 - Valores comparativos de frequências naturais no ED6.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,52	4,79	-0,27	-6
2º	27,98	33,64	-5,66	-20

Tabela A10. 286 - Valores comparativos de frequências naturais no ED7.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,59	4,98	-0,39	-8
2º	27,47	34,41	-6,94	-25

Tabela A10. 287 - Valores comparativos de frequências naturais no ED8.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,27	1,39	52
2º	20,43	19,68	0,75	4

Tabela A10. 288 - Valores comparativos de frequências naturais no ED9.2 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,27	1,39	13
2º	20,43	19,68	0,75	9

Massas nos dois níveis:

Tabela A10. 289 - Valores comparativos de frequências naturais no ED1.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,05	4,34	-0,29	-7
2º	18,29	19,98	-1,69	-9

Tabela A10. 290 - Valores comparativos de frequências naturais no ED2.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,93	1,05	0,88	46
2º	13,35	13,61	-0,26	-2

Tabela A10. 291 - Valores comparativos de frequências naturais no ED3.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	0,90	1,26	-0,36	-40
2º	10,84	9,61	1,23	11

Tabela A10. 292 - Valores comparativos de frequências naturais no ED4.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	1,10	0,79	0,31	28
2º	5,66	4,28	1,38	24

Tabela A10. 293 - Valores comparativos de frequências naturais no ED5.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,25	4,49	-0,24	-6
2º	18,65	20,27	-1,62	-9

Tabela A10. 294 - Valores comparativos de frequências naturais no ED6.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,44	4,63	-0,19	-4
2º	18,29	19,99	-1,70	-9

Tabela A10. 295 - Valores comparativos de frequências naturais no ED7.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	4,47	4,82	-0,35	-8
2º	18,33	20,39	-2,06	-11

Tabela A10. 296 - Valores comparativos de frequências naturais no ED8.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	2,66	1,17	1,49	56
2º	13,72	13,64	0,08	1

Tabela A10. 297 - Valores comparativos de frequências naturais no ED9.3 (em Hz).

Modos	Experimental	Modelo (Hz)	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1º	3,52	2,66	0,86	24
2º	13,13	12,00	1,13	9