

MONITORIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO DE UMA PÁ DE UMA TURBINA EÓLICA

JOÃO GABRIEL CASAIS PEREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientadora: Professora Doutora Elsa de Sá Caetano

Coorientador: Doutor Pedro Gil Marques de Queirós Ferreira

JUNHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

Sometimes my genius is... it's almost frightening

Jeremy Clarkson

AGRADECIMENTOS

O meu agradecimento vai para todos os que de alguma forma fizeram parte da minha vida durante esta etapa tão longa e importante. Quer pela tristeza, alegria ou apenas distração durante estes tempos, todos foram uma parte importante deste período. Um agradecimento mais sentido às pessoas que através da amizade e dos ensinamentos proporcionados, permitiram a conclusão deste percurso, em especial:

- À Professora Doutora Elsa Caetano pela disponibilidade demonstrada, pelo esforço depositado em mim para que eu adquirisse os conhecimentos importantes durante todo o processo e pela orientação proporcionada durante este;
- À equipa da Fibersail pelo impulsionamento deste trabalho e pela disponibilização do mais diverso equipamento utilizado na sua realização, em especial ao Doutor Pedro Ferreira que sempre me acompanhou durante todo o percurso e por toda a disponibilidade demonstrada sempre que necessitei;
- Aos meus amigos e colegas João Vítor, Bruno Santos, Mafalda Ramos e Artur Junqueira pelo convívio proporcionado, pela ajuda e por todo o aconselhamento durante este percurso;
- Aos meus amigos mais chegados por todo apoio nas horas más e nas horas boas, pela constante confiança na pessoa que sou e por sempre acreditarem nas minhas capacidades;
- Aos meus pais, que me deram tudo o que tinham para que eu pudesse estar onde estou, pelas suas lutas diárias e pela confiança que sempre depositaram em mim.

RESUMO

O trabalho realizado teve como principal objetivo a validação de um sensor ótico, baseado em sensores de *Bragg*, para a sua aplicação na monitorização de pás eólicas. Para isto, utilizou-se este na análise um modelo físico que possui características semelhantes a uma pá eólica.

Inicialmente é apresentado um estado de arte relativo à energia eólica e o seu crescimento atual devido à elevada aposta nas energias renováveis como alternativas energéticas. São detalhadas as principais características dos equipamentos que permitem a exploração desta energia, as turbinas eólicas. E por fim, a importância da constante monitorização de equipamentos e estruturas como estas.

De seguida, são detalhadas as características do modelo físico que será analisado e o porquê de este ser uma estrutura tão interessante. Ainda neste capítulo, será referenciado o diverso equipamento usado durante a análise deste e os ensaios experimentais previstos para a obtenção de conclusões.

A realização de modelos numéricos foi essencial para a análise dos resultados, permitindo a comparação de resultados e a realização de previsões. São explicados os processos usados na modelação destes e as opções tomadas durante a sua realização.

Antes da realização dos ensaios experimentais foi necessária a calibração de um sistema de monitorização de imagem e dos modelos numéricos, pelo que serão explicados os processos utilizados na calibração experimental destes.

Por último, serão apresentados os resultados obtidos na realização de ensaios de natureza estática e de natureza dinâmica, realizando a comparação entre diversos modos de monitorização e percebendo o potencial do sensor ótico em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: monitorização de pás de turbinas eólicas, sensores óticos, modelo físico de uma pá eólica, análise modal, análise de deformações totais

ABSTRACT

The presented work aims to validate a new optical sensor, based on Bragg sensors, that can be applied to the monitoring of wind turbines blades. To achieve this goal, it was used a physic model that has very similar characteristics of a wind turbine blade.

Initially, it is presented why wind energy is becoming an attractive source of power as an alternative to the more conventional energy sources. Next, is explained some of the most important characteristics of wind turbines and why their monitoring is so important.

In the next section, the physic model's characteristics are explained in detail and why it is such an interesting structure. It is presented the tests that are planned to do on it, and the equipment that will be necessary.

During the analysis of the optic sensor there were numeric models that were based on the physic model, so that we could have the ability to compare a lot of results and to predict some of the actions of the structure. The process behind those numeric models is explained and the modelling options made along the way.

Before we could do the experimental tests, there was a need to calibrate the results of the numeric models and the results of an image monitoring system that was implemented to obtain results of deformations.

In the end, all the results obtain in the static tests and the dynamic tests will be compiled and compared, so we could come to conclusions on the possibilities of optical sensors implementation on wind turbines blades monitoring.

KEYWORDS: monitoring of wind turbine blades, optical sensors, physic model of a wind turbine blade, modal analysis, total deformation analysis

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. MÉTODOS	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 TURBINAS EÓLICAS – ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA	3
2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA	5
2.2.1 ENERGIA EÓLICA OFFSHORE	6
2.2.2. ENERGIA EÓLICA EM PORTUGAL.....	6
2.3. TURBINAS EÓLICAS	7
2.3.1. TURBINAS DE EIXO VERTICAL (VAWTs).....	7
2.3.2. TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL (HAWTs).....	9
2.4. FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS.....	12
2.4.1. SAPATAS	12
2.4.2. ESTACAS.....	13
2.5. TORRES DAS TURBINAS EÓLICAS.....	14
2.5.1. TORRES TUBULARES	16
2.5.2. TORRES DE TRELIÇAS.....	17
2.5.3. TORRES ESPIADAS	18
2.6. PÁS DAS TURBINAS EÓLICAS	18
2.6.1. FORMA DAS PÁS DE TURBINAS EÓLICAS	19
2.6.2. SECÇÃO TRANSVERSAL DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS	20
2.6.3. MATERIAIS USADOS.....	21
2.6.3.1. Fibras de vidro e de carbono.....	21
2.6.3.2. Compósitos híbridos.....	22
2.6.3.3. Uso da nano-engenharia em polímeros e compósitos	22
2.6.4. CARGAS NAS PÁS.....	22
2.6.4.1. Cargas aerodinâmicas	22
2.6.4.2. Ação dinâmica.....	23
2.6.4.3. Cargas gravíticas	23

2.6.5. DEFINIÇÃO DAS CARGAS DE PROJETO	23
2.6.5.1. Deformada <i>flapwise</i>	24
2.6.5.2. Deformada <i>edgewise</i>	24
2.6.5.3. Fadiga estrutural	25
2.7. IMPORTÂNCIA DA MONITORIZAÇÃO DAS PÁS EÓLICAS	25
2.7.1. MONITORIZAÇÃO UTILIZADA NAS PÁS	25
2.8. SENSORES ÓTICOS	26
2.8.1. SENSORES DE BRAGG	26
2.8.2. SENSOR EM ESTUDO	26
3 MODELO FÍSICO	29
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	30
3.2.1. DISPOSITIVO DE SUPORTE	30
3.2.2. BARRA	31
3.2.3. SECÇÃO TRANSVERSAL	33
3.2.3.1 Características das secções transversais	36
3.2.4. MATERIAL	37
3.2.5. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	38
3.2.5.1. Sistema de Imagem	38
3.2.5.2. Sensor ótico	39
3.2.5.3. Suportes do sensor ótico	41
3.2.5.4. Extensómetros	42
3.3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	43
3.3.1. ENSAIO ESTATICO	44
3.3.2. ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE	45
3.3.3. ENSAIO DE VIBRAÇÃO FORÇADA	45
4 MODELOS NUMÉRICOS	47
4.1. INTRODUÇÃO	47
4.2. ANÁLISE NÃO LINEAR	47
4.3. GEOMETRIA	48
4.4. MODELO DE BARRAS	55
4.4.1. DEFINIÇÃO DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS	56
4.5. MODELO DE CASCA	64
4.5.1. DEFINIÇÃO DO MODELO E DA MALHA	65
4.6. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA	73

4.6.1. VERIFICAÇÃO DA SECÇÃO CRÍTICA	73
4.6.2. VERIFICAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDADURA	82
5 CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL	87
5.1. INTRODUÇÃO	87
5.2. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE IMAGEM	87
5.3. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	91
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	97
6.1. INTRODUÇÃO	97
6.2. ENSAIO ESTÁTICO	97
6.2.1. DEFORMADA EM <i>FLAP</i>	98
6.2.2. DEFORMADA EM <i>EDGE</i>	109
6.3. ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE	114
6.4. ENSAIO DE VIBRAÇÃO FORÇADA	122
7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	125
7.1. CONCLUSÕES	125
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 – TURBINAS EÓLICAS – ESTADO DE ARTE

Figura 2.1 – Formação dos ventos [2]	4
Figura 2.2 – Moinho de vento [3].....	4
Figura 2.3 – Diferentes fontes de energia utilizadas por mês em Portugal [8]	7
Figura 2.4 - Turbina Savonius [9]	8
Figura 2.5 – Turbina Darrieus [10]	8
Figura 2.6 – Nacelle de uma turbina eólica [13].....	9
Figura 2.7 – Componentes de uma <i>nacelle</i> [14]	10
Figura 2.8 – Exploração de uma turbina eólica [15].....	10
Figura 2.9 – Curva energética exemplo [16]	11
Figura 2.10 – Curvas energéticas de diferentes modelos [17]	11
Figura 2.11 – Sapata circular [18]	13
Figura 2.12 – Sapata heptagonal [19].....	13
Figura 2.13 – Sapata de estacas [21]	14
Figura 2.14 – Fundação flutuante [22]	14
Figura 2.15 – Velocidade do vento em relação à altura [23]	15
Figura 2.16 – Aumento espetável das turbinas eólicas [24]	15
Figura 2.17 – Interior de uma torre tubular [25]	16
Figura 2.18 – Torre tubular [26].....	17
Figura 2.19 – Torre de treliças [27]	17
Figura 2.20 – Torre espiada [28]	18
Figura 2.21 – Exemplificação da teoria de Betz [30].....	19
Figura 2.22 – Principais secções de uma pá eólica [29].....	20
Figura 2.23 – Esquema estrutural de uma pá eólica [31]	20
Figura 2.24 – Secção transversal de uma pá eólica [31]	21
Figura 2.25 – Decomposição das cargas geradas pelo impacto do vento numa pá de uma turbina eólica [29].....	22
Figura 2.26 – Duas direções de deformadas [33]	23
Figura 2.27 – Deformada flapwise [29]	24
Figura 2.28 – Deformada <i>edgewise</i> [29]	24
Figura 2.29 – Funcionamento de um sensor de <i>Bragg</i> [35].....	26
Figura 2.30 – Diferenças entre extensões [36]	27

CAPÍTULO 3 – MODELO FÍSICO

Figura 3.1 – Modelo físico	29
Figura 3.2 – Dispositivo de suporte	30
Figura 3.3 – Planta do dispositivo de suporte	30
Figura 3.4 – Troço retilíneo	31
Figura 3.5 – Dimensões do troço retilíneo.....	31
Figura 3.6 – Troço curvilíneo	32
Figura 3.7 – Dimensões do troço curvilíneo	32
Figura 3.8 – Peça de ligação dos dois troços da barra.....	33
Figura 3.9 – Planta da peça de ligação	33
Figura 3.10 – Vista lateral da peça de ligação	33
Figura 3.11 – Secção transversal teórica.....	34
Figura 3.12 – Secção transversal do troço retilíneo: dimensões reais	34
Figura 3.13 – Secção transversal do troço curvilíneo	35
Figura 3.14 – Imperfeições das secções transversais do troço curvilíneo.....	35
Figura 3.15 – Eixos considerados	36
Figura 3.16 – Diagrama tensão-extensão do material utilizado [37].....	37
Figura 3.17 – Alvos superiores.....	38
Figura 3.18 – Alvos laterais	38
Figura 3.19 – Sensor ótico com suportes e alvos de imagem	40
Figura 3.20 – Cálculo das curvaturas locais	40
Figura 3.21 – Suportes do sensor ótico.....	41
Figura 3.22 – Extensómetros óticos	43
Figura 3.23 – Aplicação dos extensómetros	43
Figura 3.24 – Cargas concentradas do ensaio estático	44
Figura 3.25 – Excitador mecânico	45

CAPÍTULO 4 – MODELOS NUMÉRICOS

Figura 4.1 – Coordenadas do troço retilíneo	49
Figura 4.2 – Troço curvilíneo na bancada de trabalhos	49
Figura 4.3 – Posição dos pontos medidos em relação aos eixos definidos.....	50
Figura 4.4 – Rotação de eixos para a posição real.....	51
Figura 4.5 – Gráfico com as coordenadas antes e depois da rotação de eixos	52
Figura 4.6 – Definição do material no SAP2000	54
Figura 4.7 – Definição dos apoios em correspondência com os cordões de soldadura.....	55

Figura 4.8 – Definição da secção transversal do troço retilíneo	56
Figura 4.9 – Propriedades da secção transversal do troço retilíneo.....	57
Figura 4.10 – Definição da secção transversal do troço curvilíneo	57
Figura 4.11 – Propriedades da secção transversal do troço curvilíneo	58
Figura 4.12 – Definição do centro geométrico do modelo de barras	58
Figura 4.13 – Aplicação da carga dos parafusos.....	59
Figura 4.14 – Aplicação da carga da peça de ligação	59
Figura 4.15 – Gancho soldado à ponta final da barra.....	60
Figura 4.16 – Aplicação da carga do gancho.....	60
Figura 4.17 – Caso de carga dos alvos de imagem.....	61
Figura 4.18 – Caso de carga do sensor ótico	61
Figura 4.19 – Caso de carga dos suportes do sensor	62
Figura 4.20 – Árvore de casos de carga	62
Figura 4.21 – Definição da fonte de massa	63
Figura 4.22 – Massa total do modelo de barras.....	63
Figura 4.23 – Deformada do caso de carga “Suportes”	64
Figura 4.24 – Definição das características dos elementos de casca	65
Figura 4.25 – Geometria indeformada do modelo de casca.....	66
Figura 4.26 – Pormenor da modelação dos apoios	66
Figura 4.27 – Detalhe da malha na zona inicial de apoio do modelo	67
Figura 4.28 – Aplicação da carga do gancho no modelo de casca	68
Figura 4.29 – Aplicação da carga da peça de ligação no modelo de casca.....	68
Figura 4.30 – Caso de carga dos alvos de imagem no modelo de casca	69
Figura 4.31 – Aplicação da carga do sensor no modelo de casca	69
Figura 4.32 – Caso de carga dos suportes do sensor no modelo de casca.....	70
Figura 4.33 – Árvore de casos de carga no modelo de casca.....	70
Figura 4.34 – Massa total do modelo de casca	71
Figura 4.35 – Deformada para o caso de carga “Suportes” no modelo de casca	71
Figura 4.36 – Deformadas dos dois modelos numéricos em comparação com a posição indeformada	72
Figura 4.37 – Diagrama de momentos no modelo de barras	73
Figura 4.38 – Valor do momento na secção crítica.....	74
Figura 4.39 – Tipos de secções transversais segundo o Eurocódigo 9 [37]	75
Figura 4.40 – Parâmetros de esbelteza [37]	75
Figura 4.41 – Valores tabelados do parâmetro de esbelteza [37]	76

Figura 4.42 – Características da liga de alumínio [37]	76
Figura 4.43 – Classificação de secções transversais segundo o parâmetro de esbelteza [37]	77
Figura 4.44 – Curva de rutura de uma secção de classe 4 [37].....	77
Figura 4.45 – Constantes C1 e C2 [37]	78
Figura 4.46 – Secção transversal efetiva	79
Figura 4.47 – Divisão da secção transversal em áreas diferentes	79
Figura 4.48 – Localização do eixo neutro efetivo	80
Figura 4.49 – Características de um cordão de soldadura	83
Figura 4.50 – Reações calculadas a partir do modelo de barras.....	83
Figura 4.51 – Rotação das reações	84
Figura 4.52 – Divisão das reações	84
Figura 4.53 – Dimensões do cordão de soldadura	85
Figura 4.54 – Representação das parcelas da tensão perpendicular.....	86

CAPÍTULO 5 – CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL

Figura 5.1 – Medição interior dos alvos.....	88
Figura 5.2 – Deformada em <i>flap</i> de ensaio para calibração do sistema de imagem	89
Figura 5.3 – Deformada em <i>edge</i> de ensaio para calibração do sistema de imagem.....	89
Figura 5.4 – Regressão linear para a deformada em <i>flap</i>	90
Figura 5.5 – Regressão linear para a deformada em <i>edge</i>	91
Figura 5.6 – Modelação inicial dos apoios do modelo de casca.....	91
Figura 5.7 – Exemplificação das medições efetuadas a laser	92
Figura 5.8 – Deformação referente à colocação do sensor ótico	93
Figura 5.9 – Deformação referente à colocação dos suportes	93
Figura 5.10 – Deformação referentes à colocação do sensor ótico com o modelo de casca atualizado ...	94
Figura 5.11 - Deformação referente à colocação dos suportes com o modelo de casca atualizado	95

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAS

Figura 6.1 – Medições a laser das deformadas em relação ao solo.....	98
Figura 6.2 – Comparação das deformações experimentais e dos modelos numéricos para o caso DifTotal-1	99
Figura 6.3 – Comparação das deformações experimentais e dos modelos numéricos para o caso DifTotal-2	100
Figura 6.4 – Comparação das deformações experimentais e dos modelos numéricos para o caso DifTotal-3	101
Figura 6.5 – Informação obtida pelo sistema de imagem para o ensaio estático em <i>flap</i>	102

Figura 6.6 – Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso DifTotal-1 SI	103
Figura 6.7 - Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso DifTotal-2 SI	103
Figura 6.8 – Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso DifTotal-3 SI	104
Figura 6.9 – Informação obtida pelo sensor ótico para o ensaio estático em flap.....	105
Figura 6.10 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso DifTotal-1 Sensor	105
Figura 6.11 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso DifTotal-2 Sensor	106
Figura 6.12 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso DifTotal-3 Sensor	107
Figura 6.13 – Dados obtidos pelos extensómetros óticos no ensaio estático em flap	108
Figura 6.14 – Deformação da face superior obtida através do modelo de casca	109
Figura 6.15 – Resultados das medições a laser para os deslocamentos em edge	110
Figura 6.16 – Dados obtidos pelo sistema de imagem no ensaio estático em edge.....	110
Figura 6.17 – Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso Conf-D1 SI	111
Figura 6.18 – Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso Conf-D2 SI	111
Figura 6.19 – Dados obtidos pelo sensor ótico no ensaio estático em edge	112
Figura 6.20 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso Conf-D1 Sensor	113
Figura 6.21 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso Conf-D2 Sensor	113
Figura 6.22 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o deslocamento inicial em flap	114
Figura 6.23 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o deslocamento inicial em flap	115
Figura 6.24 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o impulso em flap	115
Figura 6.25 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o impulso em flap	116
Figura 6.26 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o deslocamento inicial em edge	116
Figura 6.27 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o deslocamento inicial em edge	117
Figura 6.28 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o impulso em edge	117
Figura 6.29 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o impulso em edge	118
Figura 6.30 – Dados obtidos pelo extensómetro ótico para o deslocamento inicial em flap	119
Figura 6.31 – Função densidade espectral de potência da extensão com os valores obtidos para as frequências naturais	119
Figura 6.32 – Primeiro modo de vibração cuja direção é em flap ($f = 0,46396$ Hz)	120

Figura 6.33 – Segundo modo de vibração cuja direção é em edge ($f = 0,97173$ Hz).....	120
Figura 6.34 – Terceiro modo de vibração cuja direção é em flap ($f = 2,61426$ Hz)	120
Figura 6.35 – Quarto modo de vibração cuja direção é em edge ($f = 5,35925$ Hz)	121
Figura 6.36 – Quinto modo de vibração cuja direção é em flap ($f = 7,10407$ Hz).....	121
Figura 6.37 – Sexto modo de vibração cuja direção é em edge ($f = 13,98311$ Hz)	121
Figura 6.38 – Dados obtidos pelo sensor ótico para a amplitude de resposta em flap	123
Figura 6.39 – Dados obtidos pelo extensómetro para a amplitude de resposta em flap	123
Figura 6.40 – Dados obtidos pelo sensor ótico para a amplitude de resposta em edge	124
Figura 6.41 – Dados obtidos pelo extensómetro ótico para a amplitude de resposta em edge	124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1– Massa e localização dos alvos de imagem	39
Tabela 2– Massa e localização dos suportes do sensor	42
Tabela 3– Massa das cargas do ensaio estático	45
Tabela 4 – Coordenadas dos pontos medidos	50
Tabela 5 – Coordenadas dos pontos depois da rotação de eixos	52
Tabela 6 – Coordenadas dos pontos finais.....	53
Tabela 7 – Diferença das deformadas máximas entre análise não linear e linear	72
Tabela 8 – Intervalo de deslocamentos medidos a laser	88
Tabela 9 – Intervalo de deslocamentos obtidos pelo sistema de imagem.....	90
Tabela 10 – Localização dos pontos de medição a laser	98
Tabela 11 – Resultados das extensões obtidos pelos extensómetros óticos e pelos modelos numéricos	108
Tabela 12 – Primeiro modo de vibração e amortecimento para os casos de deslocamentos iniciais.....	118
Tabela 13 – Resultados das frequências naturais obtidas experimentalmente e a partir dos modelos numéricos	122

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

C_p – Coeficiente de energia

E – Módulo de Young [MPa]

G – Módulo de corte [MPa]

ν – Coeficiente de Poisson

ρ – Densidade [g/cm^3]

f_u – Tensão de cedência do alumínio [MPa]

f_c – Tensão limite de proporcionalidade associada à extensão de 0,2% [MPa]

β – Parâmetro de esbelteza

b_{eff} – Espessura efetiva [m]

A_{eff} – Área efetiva [m^2]

I_{eff} – Momento de inércia efetivo [m^4]

ρ_c – Fator de redução de espessura

$M_{el,Rd}$ – Momento resistente elástico [kN.m]

$\tau_{\perp}$ – Tensão normal ao plano de rotura [kPa]

$\sigma_{\perp}$ – Tensão tangencial ao plano de rotura perpendicular ao eixo do cordão [kPa]

$\tau_{\parallel}$ – Tensão tangencial paralela ao eixo do cordão [kPa]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O desenvolvimento deste projeto tem como base o objetivo de implementar um sistema de monitorização de sensores óticos, baseado em sensores de *Bragg*, na monitorização de pás de turbinas eólicas. Inicialmente, a ideia surgiu pela implementação desta tecnologia nos barcos à vela, utilizando esta para reconstruir a forma das velas das embarcações em tempo real, surgindo assim uma alternativa a outros métodos usados, como os sistemas de monitorização de imagem. Os resultados desta experiência foram promissores e a possibilidade de implementação deste tipo de monitorização a outras áreas levaram à criação de uma start-up com o nome de Fibersail, que tem vindo a desenvolver esta tecnologia com esse objetivo. Atualmente, o alvo principal deste desenvolvimento é a implementação destes sensores para a monitorização de pás de turbinas eólicas. Hoje em dia, as opções e os métodos disponíveis para a monitorização destas não são muitas, pelo que este desenvolvimento pode ser uma alternativa viável para um processo de extrema importância devido às características e a funcionalidade destas estruturas.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a validação do sensor e das suas possibilidades. Para isto, a Fibersail dispõe de um modelo físico que apresenta características estruturais muito parecidas a uma pá de uma turbina eólica que será usado para a realização de ensaios experimentais.

O objetivo destes ensaios será a instrumentação do modelo físico com a rede de sensores de deformação de fibra ótica e com outros métodos alternativos para a obtenção de resultados de natureza estática e dinâmica, permitindo assim a comparação de resultados provenientes de diferentes métodos de monitorização. Estas comparações permitirão chegar a conclusões sobre as capacidades atuais do sensor ótico em estudo e ajudar a esclarecer o caminho que o desenvolvimento desta tecnologia deverá percorrer para tirar todas as vantagens possíveis desta.

1.3. MÉTODOS

O método principal para atingir os objetivos definidos já foi referido, que passa pela utilização do modelo físico desenvolvido pela Fibersail para o estudo das pás de turbinas eólicas. As características desta estrutura são muito interessantes. O modelo é composto por uma consola de 9 metros em alumínio que apresenta uma elevada deformabilidade, pelo que durante o desenvolvimento deste trabalho também foi muito interessante fazer o estudo de uma estrutura como esta e perceber o seu comportamento durante os ensaios planeados.

Outro método usado para o desenvolvimento deste tema foi a realização de modelos numéricos que simulassem o comportamento do modelo físico usado. Os modelos numéricos permitiram o estudo da estrutura duma maneira não evasiva e de um ponto de vista teórico, pelo que os seus resultados são informação muito importante para validação dos resultados do sensor ótico e para o entendimento do comportamento da estrutura.

Os ensaios planeados para o desenvolvimento deste trabalho são de natureza estática e dinâmica. Os ensaios estáticos deverão ser mais simples e permitirão esclarecer a capacidade do sensor em estudo de reconstruir as deformadas totais da estrutura. Já os ensaios dinâmicos permitirão testar a resposta do sensor para a monitorização da estrutura em tempo real devido ao movimento que será aplicado nesta. Estes ensaios também permitirão explorar as capacidades dos dados obtidos pelo sensor, que poderão ser úteis na determinação de certas propriedades, como por exemplo as frequências naturais da estrutura.

No final, os resultados obtidos pelos diversos métodos utilizados serão comparados para tirar conclusões finais em relação ao sensor e também ao comportamento do modelo físico como estrutura.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No começo deste documento será apresentado um estado de arte com o objetivo de situar o leitor para os avanços realizadas na produção de energia eólica e em como esta tem vindo, cada vez mais, a ser uma alternativa para a produção de energia em relação a fontes de energia mais convencionais. Serão também exploradas as características principais das turbinas eólicas e em como estas estruturas têm características próprias que são necessárias monitorizar para que não existam problemas graves e para que a sua exploração seja possível.

No capítulo seguinte o modelo físico usado será descrito detalhadamente, tendo em conta as suas características geométricas, os detalhes da peça e o material usado, que fazem desta uma estrutura tão incomum na área da engenharia civil. Neste capítulo serão descritos os equipamentos usados no modelo físico durante os ensaios e o objetivo de cada um.

De seguida, o processo de modelação dos dois modelos numéricos realizados será explicado. As opções tomadas para cada um deles e as razões por detrás destas, seguido de uma breve comparação entre os resultados obtidos por ambos.

O capítulo seguinte diz respeito à calibração do sistema de monitorização de imagem e dos modelos numéricos, que foi necessária realizar para que os dados obtidos por estes métodos pudessem ser usados como comparação.

Por último, será feita uma apresentação dos resultados obtidos com a comparação destes e uma descrição das principais diferenças.

TURBINAS EÓLICAS – ESTADO DE ARTE

2.1. APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a energia que provém da utilização do vento. Atualmente, este termo está bastante associado à produção de energia elétrica, através de aerogeradores, tendo em conta a aposta crescente que existe nas energias renováveis como uma solução para a crise energética e a falta de sustentabilidade das energias não renováveis.

Quando o sol aquece a superfície terrestre, o ar que se encontra mais próximo desta vai aquecer, causando assim diferenças de pressão nas camadas de ar que consequentemente criam o movimento do ar entre estas e assim, o vento. No entanto, existe uma irregularidade da transferência de energia solar na superfície da Terra, causada por motivos como:

- Os ângulos de incidência das radiações solares com a superfície terrestre, sendo no equador praticamente iguais a 90° , tornando assim esta na que recebe mais radiação solar. Nas regiões polares os raios solares são praticamente tangentes à superfície terrestre, o que apresenta o efeito contrário;
- As características da superfície terrestre, podendo haver grandes massas de água (oceanos), grandes superfícies com ou sem vegetação, montanhas, desertos ou glaciares;
- O próprio movimento de translação da Terra.

Então, esta irregularidade de transferência de energia, provoca grandes diferenças de pressão, causando assim o movimento irregular do ar em todo o planeta, a que chamamos de vento, um elemento tão poderoso que pode ser utilizado para a produção de energia elétrica. A Figura 2.1 representa a formação dos ventos e a movimentação destes. As setas vermelhas representam o movimento ascensional do ar quente e as setas azuis representam o movimento descendente do ar frio [1].

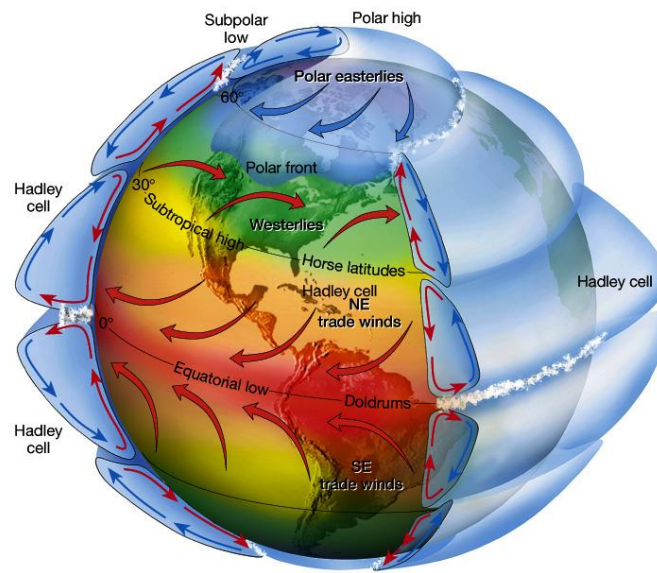


Figura 2.1 – Formação dos ventos [2]

No entanto, recorda-se que a produção de energia elétrica não constitui a única forma de aproveitamento da energia eólica. Na antiguidade, esta era já aproveitada para a movimentação de embarcações através da vela, algo que foi particularmente marcante na história portuguesa com os descobrimentos. Mas a nível mundial, talvez tenha sido mais marcante o aproveitamento de energia eólica pelos moinhos de vento (Figura 2.2) que eram usados na moagem de grãos para a produção de farinha e mais tarde para a bombagem de água.



Figura 2.2 – Moinho de vento [3]

Foi no século XIX, que surgiram pela primeira vez algumas invenções com o objetivo de usar a força do vento para produzir eletricidade, com tecnologia muito baseada no tradicional moinho de vento. Durante a maior parte do século XX o interesse nesta forma de produção de energia elétrica foi muito reduzido, o que provocou um limitado desenvolvimento durante esse período. Tudo mudou a partir de 1973 quando os preços do petróleo dispararam, aumentando a investigação em soluções que não exigissem petróleo [4].

Mais recentemente, esta área tem continuado a desenvolver-se devido ao aumento da poluição provocada pela queima de combustíveis fósseis e também pela falta de sustentabilidade das energias não renováveis, o que motiva cada vez maior adesão por parte da população. Foi necessário encontrar alternativas, e a energia eólica tem sido uma destas. Sendo uma exploração de energia praticamente inesgotável, sem emissão de gases poluentes e que não gera resíduos, existiu então um desenvolvimento nesta área para explorar o vento como produtor de energia.

A partir de 1973, os Estados Unidos da América investiram no desenvolvimento da energia eólica com o objetivo de avançar a tecnologia e permitir que grandes turbinas eólicas fossem viáveis, sendo a NASA a responsável por desenvolver um programa que permitisse a criação de uma indústria de turbinas eólicas nos Estados Unidos da América. No entanto, foi na Dinamarca que surgiram os maiores avanços nesta área. No ano de 1978 foi construído um modelo revolucionário, que foi pioneiro em diversas tecnologias que ainda hoje são usadas na construção de aerogeradores. Hoje em dia, praticamente todas as turbinas comerciais têm semelhanças ao chamado *“Danish Model”*, que diz respeito a um modelo com uma estrutura leve composto por três pás [5].

2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA

A principal vantagem que impulsionou o desenvolvimento da energia eólica foi a necessidade de haver uma dependência menor dos combustíveis fósseis para a produção de energia. E desde então, foi possível testemunhar outras vantagens que fazem da energia eólica uma alternativa viável e rentável.

Tendo como “matéria-prima” um fenómeno natural como o vento, esta exploração de energia torna-se praticamente inesgotável e sobrepondo o facto de não emitir gases poluentes ou qualquer tipo de resíduos e ainda combater a emissão de gases de efeito de estufa, faz com que a energia eólica seja uma solução ótima para os tempos da atualidade, em que temas como a sustentabilidade e a diminuição da poluição são tão importantes na nossa sociedade. Para além destas, a produção de energia elétrica através da energia eólica também traz vantagens económicas, relacionadas com a criação de emprego, normalmente até em zonas menos desenvolvidas, com a exploração de terrenos não cultivados através da criação de parques eólicos, reduzindo a dependência de importação energética de alguns países, principalmente de combustíveis fósseis, e ainda permite uma poupança em relação à aquisição de direitos de emissão de CO₂ para cumprir o protocolo de Quioto [6].

A energia eólica também apresenta desvantagens. A principal desvantagem é a irregularidade do vento. Sendo um fenómeno natural, é impossível controlar o comportamento deste, pelo que a produção de energia elétrica vai estar muito dependente da intensidade do vento e da regularidade deste. Os parques eólicos provocam uma alteração muito grande na paisagem natural. As zonas de exploração dos parques eólicos são sobretudo localizadas em zonas rurais e com pouca intervenção humana, como cadeias montanhosas, o que provoca um impacto visual negativo nestas zonas. O ruído provocado constantemente pelo som do vento em contacto com as pás também é uma desvantagem, principalmente para populações que possam existir na proximidade.

2.2.1 ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

Como o nome indica, a energia eólica offshore, tem como principal característica a localização do parque eólico em alto mar. Mais recentemente, este tipo de exploração tem vindo a despertar o interesse dos operadores, pois permite uma produção de energia mais eficaz e também combate algumas desvantagens presentes nos parques eólicos *Onshore*.

A maior diferença estrutural entre os aerogeradores *Offshores* e os aerogeradores *Onshore* está nas fundações e no custo de construção devido à elevada dificuldade da construção marítima. No entanto, em alto mar o vento apresenta velocidades muito mais constantes, o que permite que a exploração seja feita de uma forma mais regular e assim, com maior eficácia. São também contornados outros problemas, como o impacto visual ou o impacto do som.

As desvantagens associadas às explorações *Offshore*, são: o custo mais elevado de construção e manutenção quando comparado com o das explorações *Onshore* e a nível ambiental, pois pode provocar a alteração de ecossistemas e também o risco de colisão de aves com os aerogeradores.

2.2.2. ENERGIA EÓLICA EM PORTUGAL

A energia eólica em Portugal começou a ser explorada inicialmente nos arquipélagos, primeiro no arquipélago da Madeira, em 1986, depois no arquipélago dos Açores, em 1988 e finalmente em Portugal Continental, em 1992. Atualmente a energia eólica em Portugal é das energias renováveis mais importantes, devido a um investimento elevado que existiu no país com o objetivo que cerca de 35% da energia produzida em Portugal em 2030 deverá ter como recurso fontes renováveis, que foi estabelecido pelo Parlamento Europeu e o Conselho da EU [7].

Em Portugal, os parques eólicos localizam-se principalmente em zonas montanhosas e junto à costa, devido ao facto de estes serem implantados apenas em zonas onde a velocidade média anual do vento excede 6 m/s, sendo o Alentejo a região do país com piores características para este investimento.

Segundo a Associação Portuguesa de Energias Renováveis, em janeiro de 2022, cerca de 59,70% da energia gerada em Portugal Continental teve origem renovável, sendo a energia eólica cerca de 31,27% dessa energia [8].

Na Figura 2.3, podemos perceber a importância da exploração de energia eólica para Portugal, sendo atualmente a energia renovável mais utilizada. Habitualmente, a energia hídrica é maior fonte de energias renováveis, com exceção dos meses de verão. No entanto, em janeiro de 2022, a energia eólica continua a ser a fonte de energias renováveis mais utilizada em Portugal, ultrapassando assim a energia hídrica.

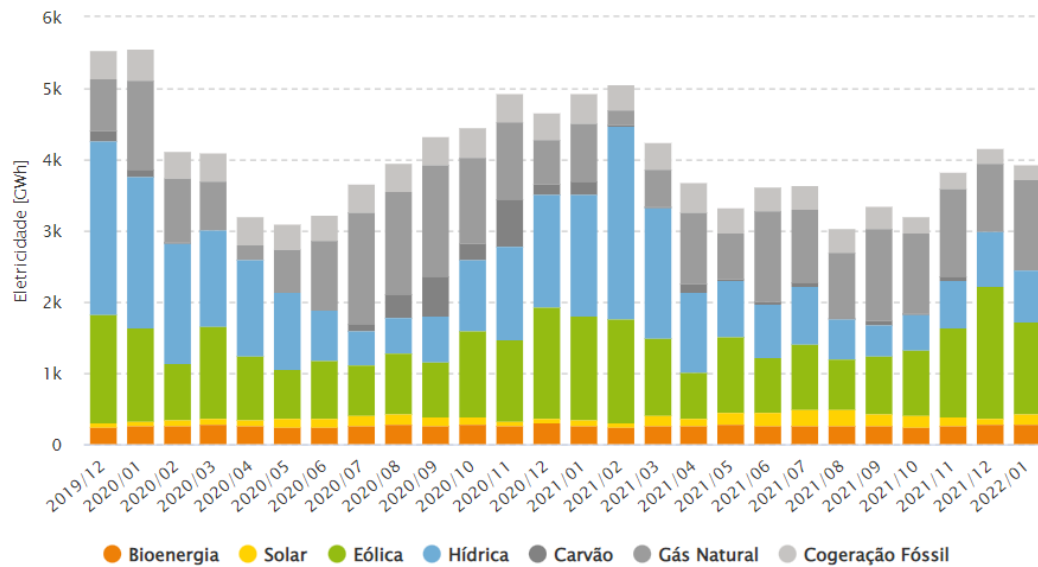


Figura 2.3 – Diferentes fontes de energia utilizadas por mês em Portugal [8]

2.3. TURBINAS EÓLICAS

Os aerogeradores, ou turbinas eólicas, são os equipamentos que permitem a exploração da energia eólica, ou seja, a transformação da energia cinética do vento em energia elétrica. As turbinas eólicas têm vindo a fazer parte das nossas paisagens, devido à aposta crescente na energia eólica, pelas razões já indicadas atrás. Estes equipamentos podem ser divididos em dois tipos:

2.3.1. TURBINAS DE EIXO VERTICAL (VAWTs)

Estas turbinas eólicas apresentam o rotor principal orientado na vertical. A principal vantagem deste modelo é o facto de não ser necessário que a turbina esteja orientada na direção do vento. Esta característica, provocou interesse durante o século XX e durante este período foram criados dois modelos principais para turbinas de eixo vertical. As turbinas Savonius e as turbinas Darrieus que estão apresentadas na Figura 2.4 e na Figura 2.5, respetivamente.



Figura 2.4 - Turbina Savonius [9]



Figura 2.5 – Turbina Darrieus [10]

Outra vantagem presente nas turbinas de eixo vertical, reside no facto dos principais componentes mecânicos estarem perto do solo, o que torna a sua acessibilidade mais fácil e consequentemente a sua manutenção. No entanto, as vantagens apresentadas anteriormente não são suficientes para tornar este modelo eficaz. O facto de estarem mais próximas do solo, onde o vento tem menos velocidade e a maior complexidade de fabrico dos modelos para larga escala, fazem com que as turbinas de eixo vertical não sejam viáveis para a produção de eletricidade [11].

2.3.2. TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL (HAWTs)

Este tipo de turbinas eólicas é o que estamos mais habituados a ver nas nossas paisagens e é também aquele que tem maior importância para o conteúdo deste documento, logo será dada uma maior ênfase a estas turbinas.

Para este tipo de turbinas eólicas, já é necessário o alinhamento com a direção do vento, com o objetivo de que o vento flua na direção paralela ao eixo de rotação. Como já referido anteriormente, hoje em dia a maior parte das turbinas comercializadas tem como referência o modelo Dinamarquês (“*Danish Model*”), ou seja, um modelo em altura e constituído por três pás.

Uma típica turbina eólica é constituída por quatro grupos principais que são: as pás, o rotor, a torre e a *nacelle*. [12]

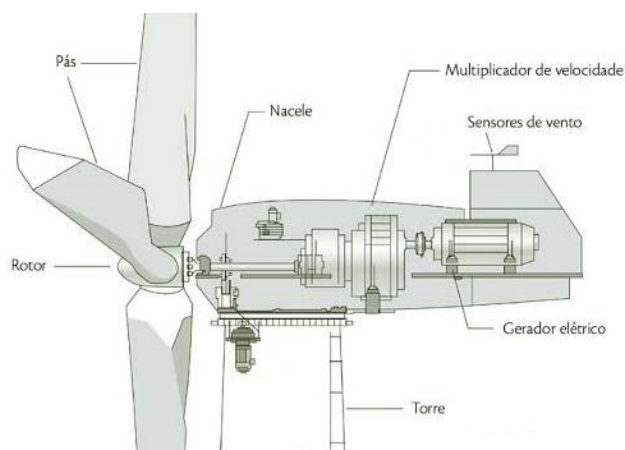


Figura 2.6 – *Nacelle* de uma turbina eólica [13]

De acordo com a representação da Figura 2.6, o rotor é o nome atribuído ao elemento que suporta as pás através do cubo e faz a ligação à *nacelle*. O rotor também pode ser designado em conjunto com as pás, isto é, quando se fala no tamanho do rotor, fala-se da distância do eixo até à extremidade das pás. A rotação do rotor é induzida pelo movimento provocado pelo vento ao incidir nas pás. Em alguns modelos o rotor tem um sistema hidráulico que permite o movimento das pás para diferentes posições, o que tem como objetivo otimizar a força recebida pelo vento. A *nacelle* é um elemento instalado no topo da torre e que funciona como um compartimento para os elementos responsáveis pela transformação da energia cinética em energia elétrica, possuindo um sistema hidráulico que permite a rotação em torno da torre para otimização da produção, um sistema de travagem e vários sistemas eletrotécnicos, como exemplificado na Figura 2.7.

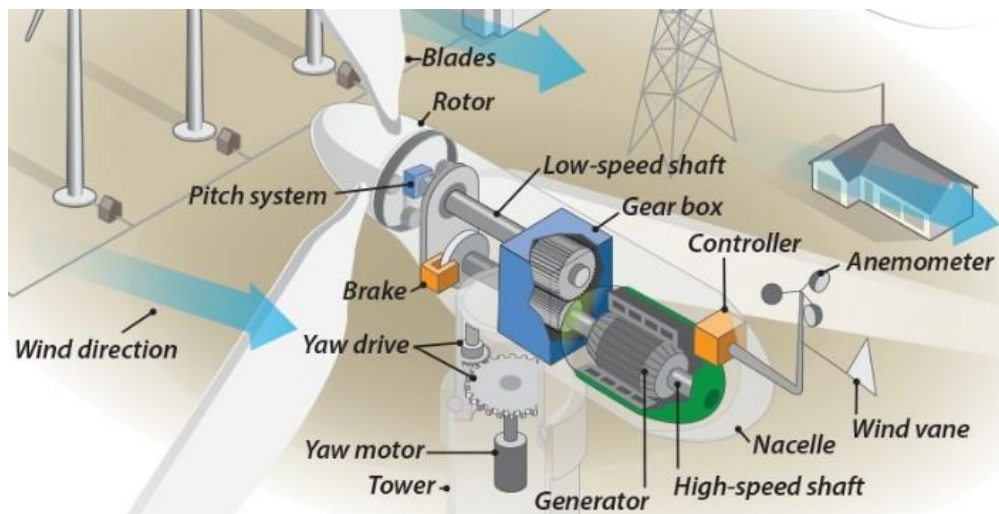


Figura 2.7 – Componentes de uma nacelle [14]

Uma das vantagens da energia eólica é o facto do processo de transformação da energia cinética do vento em energia elétrica não ser muito complicado. Depois de conhecermos os principais elementos das turbinas eólicas, torna-se mais fácil de compreender este processo. As pás eólicas têm uma forma aerodinâmica com o objetivo de otimizar a interação com o vento e provocar o seu movimento em volta do rotor, transformando assim a energia do vento, em energia mecânica. No entanto, este movimento está presente no eixo de baixa velocidade e é considerado lento (cerca de 19 a 30 rpm), logo é necessária uma transmissão ou uma caixa de velocidades que transforme o movimento para o eixo de altas rotações (cerca de 1500 rpm). Estas altas rotações são necessárias para que o gerador consiga funcionar, o que é muito importante, porque este elemento é responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica.

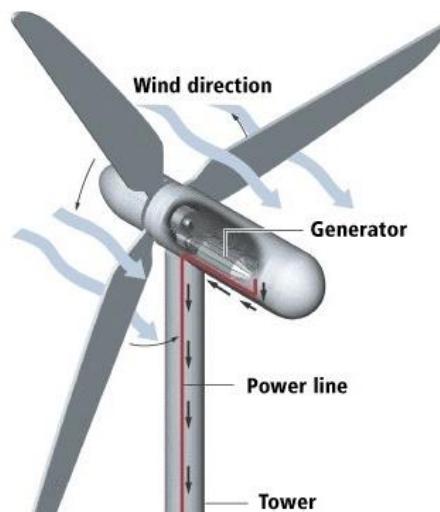


Figura 2.8 – Exploração de uma turbina eólica [15]

No mercado, existem muitas turbinas eólicas com características diferentes. Algumas destas características serão desenvolvidas de uma maneira mais profunda ao longo deste documento. Referem-se alguns exemplos:

- O número de pás;
- A forma, o material usado e o método construtivo das pás;
- A orientação do rotor: a favor do vento ou a contravento;
- Os diferentes equipamentos disponíveis no mercado, como a transmissão e os geradores, etc.

Todas estas diferentes características fazem com que as diferentes turbinas possuam diferentes desempenhos na produção de energia elétrica. No entanto, cada turbina eólica possui uma curva energética característica que permite prever o seu desempenho, tendo em conta apenas a velocidade do vento e o tamanho do rotor [11].

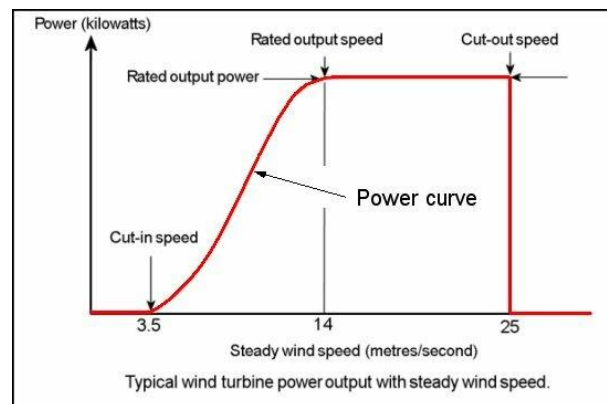


Figura 2.9 - Curva energética exemplo [16]

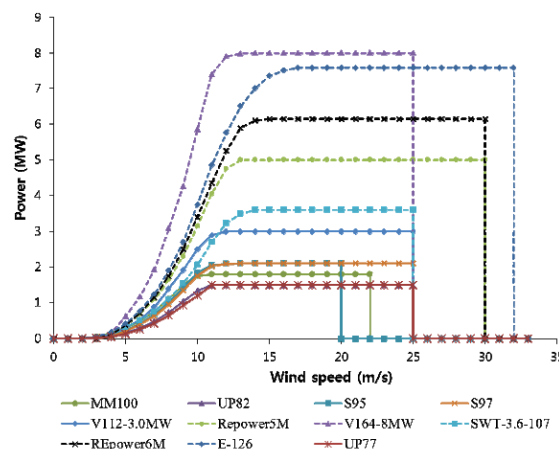


Figura 2.10 – Curvas energéticas de diferentes modelos [17]

Na Figura 2.9 é apresentada uma curva energética padrão que apresenta os valores mais importantes na caracterização do desempenho das turbinas. Estes valores são o *cut-in speed* que representa a velocidade

mínima que esta necessita para produzir energia útil, o *rated output speed*, designado como velocidade nominal, que é a velocidade do vento a que o gerador consegue produzir o máximo de energia e o *cut-out speed* que diz respeito à velocidade máxima do vento a que a turbina consegue funcionar, normalmente diferente de modelo para modelo, valor acima do qual a turbina é bloqueada por razões de segurança.

Na Figura 2.10 estão representadas diferentes curvas energéticas para diferentes modelos de turbinas eólicas como um exemplo da grande diversidade existente no mercado atual.

Outros elementos presentes nos aerogeradores, que são importantes referir, são os anemômetros e os cataventos, que são instrumentos que permitem medir a velocidade e a direção do vento para o sistema da turbina implementar o melhor posicionamento desta e assim otimizar a produção de energia, e é importante também referir todo o tipo de equipamento que permite o transporte da energia elétrica produzida, como por exemplo, cabos e transformadores [11].

2.4. FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS

As fundações das turbinas eólicas são responsáveis pela transmissão de todos os esforços da estrutura para o terreno. Neste caso em particular, devido à elevada ação dinâmica e também à elevada influência do vento nestas estruturas, as turbinas vão estar sujeitas a elevadas forças horizontais que resultarão em elevados momentos fletores na fundação. Sendo assim, as fundações são elementos estruturais muito importantes.

Tal como nos edifícios mais correntes, os tipos de fundações usadas vão depender essencialmente do tipo de solo onde as turbinas eólicas serão implantadas e das profundidades que serão necessárias atingir para verificar a estabilidade.

2.4.1. SAPATAS

As sapatas são consideradas fundações diretas e são usadas quando o terreno de implantação possui boas características de resistência muito perto da superfície e não é necessário atingir elevadas profundidades para obter a resistência necessária por parte do solo para garantir a estabilidade. No entanto, as sapatas dos aerogeradores, possuem normalmente grandes dimensões devido à complexidade dos esforços presentes nestes.

Usualmente, a forma das sapatas é circular (Figura 2.11) para existir uma distribuição dos esforços uniforme e para otimizar o material necessário para a sua execução. No entanto, outras formas poderão ser usadas, como os polígonos regulares (Figura 2.12) para facilitar a sua execução.



Figura 2.11 - Sapata circular [18]



Figura 2.12 – Sapata heptagonal [19]

2.4.2. ESTACAS

As estacas, também denominadas por fundações indiretas, sendo usadas quando os terrenos onde serão implantadas as turbinas não possuem uma boa resistência perto da superfície. Sendo assim, é necessário usar estacas que permitem transmitir os esforços até uma profundidade onde o solo tenha uma resistência capaz de os dissipar.

Nas turbinas *onshore*, os tipos de estacas usados podem ser: mono-estaca, quando apenas uma estaca é utilizada, que habitualmente possui grandes dimensões; ou multi-estacas (Figura 2.13), quando várias estacas de dimensões mais reduzidas são usadas, as quais estão ligadas entre si por um maciço de encabeçamento localizado muito perto da superfície e que faz a ligação destas à torre das turbinas eólicas [20].



Figura 2.13 – Sapata de estacas [21]

É importante também referir, que em turbinas eólicas *offshore*, a maioria das fundações usadas são de estacas, devido à profundidade necessária para atingir o fundo do oceano. No entanto, existem novas soluções inovadoras a ser estudadas para ultrapassar estas grandes profundidades, como por exemplo, as baseadas em plataformas flutuantes (Figura 2.14).



Figura 2.14 – Fundação flutuante [22]

2.5. TORRES DAS TURBINAS EÓLICAS

As torres das turbinas, são os elementos estruturais de maior importância. Estas são responsáveis pelo suporte da *nacelle*, do rotor e das pás, transmitindo estas cargas para a fundação. No entanto, existe outra função essencial das torres, que é proporcionar uma altura elevada aos elementos que suporta, e que são os elementos responsáveis pela produção de energia elétrica. A velocidade do vento aumenta com a

altura em relação ao solo, conforme evidenciado na Figura 2.15. Deste modo, é essencial que esta seja maximizada para otimizar a energia elétrica produzida.

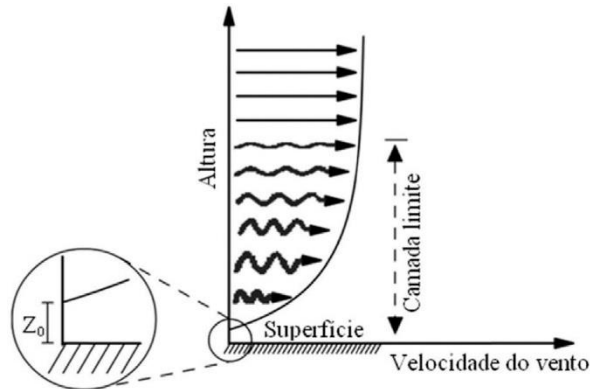


Figura 2.15 – Velocidade do vento em relação à altura [23]

Consequentemente, as dimensões das turbinas eólicas têm vindo a aumentar progressivamente ao longo do tempo (Figura 2.16), devido ao maior investimento nas energias renováveis, com o objetivo de estas terem um maior impacto na produção de energia elétrica. As torres são elementos essenciais para que se consiga tirar o maior proveito da velocidade do vento.

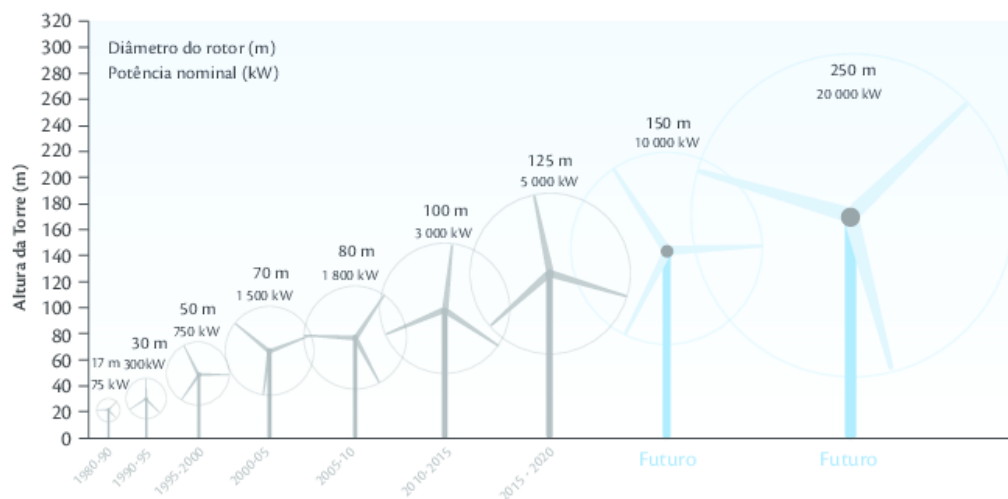


Figura 2.16 – Aumento espectável das turbinas eólicas [24]

Do ponto de vista estrutural, as turbinas eólicas mais comuns atualmente, as que seguem o modelo dinamarquês, são consideradas estruturas leves tendo em conta as suas dimensões. Então, as torres, como são o maior elemento destas, são normalmente ocas para reduzir o peso, mas também para permitir um

acesso interior à *nacelle*, no caso de manutenções e para permitirem a passagem de equipamentos elétricos, como cabos, usados no transporte da energia elétrica produzida (Figura 2.17) [11].

2.5.1. TORRES TUBULARES

As torres tubulares (Figura 2.18) são as mais usadas no suporte de turbinas eólicas. Estas podem ser feitas em aço ou betão. As torres feitas em aço são pré-fabricadas. Uma das maiores dificuldades em relação a estas, é o seu transporte para o local onde será implantado o aerogerador. As torres construídas em betão, ao contrário das de aço, podem ser construídas *in situ* e não necessitam de um transporte muito complicado para o local de implantação, permitindo assim que não existam limites nas dimensões das secções usadas.

Qualquer que seja o material usado, a estrutura deste tipo de torres apresenta sempre a mesma filosofia. O diâmetro das secções diminui da base para o topo, resultando numa estrutura cónica, que permite garantir a sua estabilidade apesar do seu interior ser oco [11].

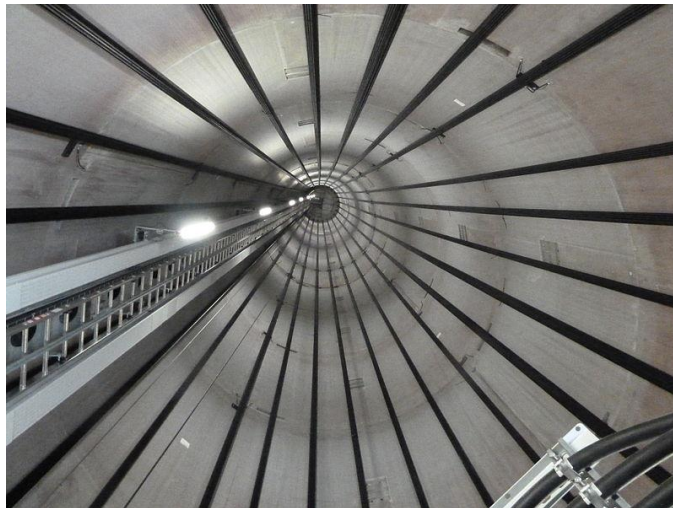


Figura 2.17– Interior de uma torre tubular [25]



Figura 2.18 – Torre tubular [26]

2.5.2. TORRES DE TRELIÇAS

Estes tipos de torres (Figura 2.19) são constituídos por perfis metálicos reduzidos, o que permite uma elevada redução do peso da estrutura. O facto de serem pré-fabricadas e possuírem tamanho reduzido, permite que o seu transporte e a sua montagem, no local de implantação da turbina eólica, sejam relativamente fáceis. Apesar destas vantagens, comparativamente às torres tubulares, estas não possuem alturas muito elevadas, que, como já foi referido anteriormente, são cada vez mais essenciais para maximizar a energia produzida [11].



Figura 2.19 – Torre de treliças [27]

2.5.3. TORRES ESPIADAS

As torres espiadas (Figura 2.20) são constituídas por uma torre principal de tamanho reduzido, chamada de mastro, que é depois, equilibrada por cabos de aço que se encontram ancorados ao solo. Esta solução é mais económica, devido ao seu tamanho menor e é usada apenas para alturas menores. Contudo o acesso à *nacelle* e ao rotor são difíceis, o que pode complicar a manutenção destas estruturas [11].



Figura 2.20 – Torre espiada [28]

2.6. PÁS DAS TURBINAS EÓLICAS

As pás das turbinas eólicas têm como principal função capturar o vento e transferir as cargas aplicadas por este para o rotor como uma força de momento. Para este processo ser otimizado, foi necessário um avanço nos conhecimentos da aerodinâmica e também dos materiais usados na construção das pás, sendo assim possível a realização de turbinas eólicas mais eficientes.

No entanto, existe um limite físico para a quantidade de energia que poderá ser extraída do vento. A teoria de Betz diz-nos que a eficiência máxima de uma turbina eólica será de 59,3%, independentemente das características das pás [29]. A produção de energia a partir do vento é feita pelo escoamento deste ao passar pelas pás. Durante este processo, devido à força exercida pelo vento nas pás, existe uma redução de energia cinética do vento e, consequentemente, da sua velocidade no fim do processo (Figura 2.21). Para que a extração de energia fosse de 100% a velocidade do vento final teria que ser nula e o seu fluxo deveria terminar após o atravessamento das pás. Como esta situação não é possível, conclui-se que não se consegue utilizar toda a energia cinética do vento. Desde então, o dimensionamento das turbinas eólicas, principalmente das pás, tem como objetivo aproximar-se do coeficiente de energia (C_p) máximo, ou seja, $C_p = 0,593$, conhecido como o limite de Betz. Atualmente, as turbinas eólicas mais próximas deste valor são as que possuem três pás, com um coeficiente de energia teórico de $C_p = 0,500$ [29].

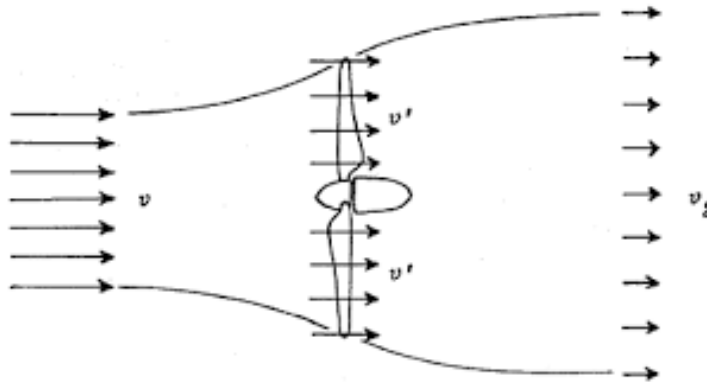


Figura 2.21 – Exemplificação da teoria de Betz [30]

2.6.1. FORMA DAS PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

A forma das pás de turbinas eólicas é determinada por três componentes principais (Figura 2.22) que possuem diferentes objetivos, nomeadamente estruturais e aerodinâmicos. Estes grupos são:

- *Root*: trata-se da zona de transição entre a pá e o rotor, assegurando a conexão entre estes. Por este motivo, é também a zona das pás que vai ter maiores esforços, conduzindo a força do vento absorvida pelas pás até ao rotor, garantido a estabilidade das pás como elemento estrutural. Portanto, a sua principal função é de carácter estrutural;
- *Tip*: trata-se da zona mais crítica aerodinamicamente, sendo estudada com o objetivo de maximizar a captação das forças do vento. Como é a zona mais distante da pá ao rotor, as forças exercidas nesta irão provocar elevados momentos, e assim, otimizar, a força cinética do vento. São usadas secções mais finas e geometrias que permitem obter menos perdas e reduzir a poluição sonora provocada pelas turbinas;
- *Secção Central*: esta secção incorpora funções aerodinâmicas, por ser uma zona muito considerável da pá, mas também é indispensável do ponto de vista estrutural, pois assegura a transição entre a *root* e a *tip*. Devido a isto, são usadas as secções mais finas possíveis que sejam estruturalmente resistentes.

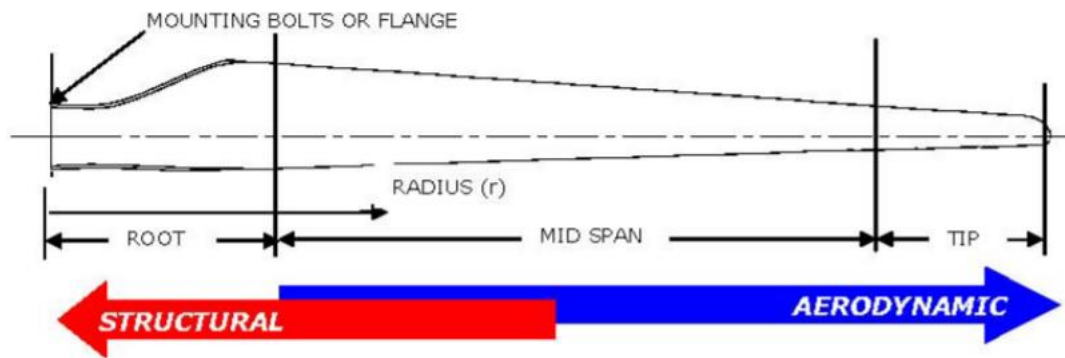


Figura 2.22 – Principais secções de uma pá eólica [29]

2.6.2. SECÇÃO TRANSVERSAL DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

As pás de turbinas eólicas são compostas por duas cascas, uma que se encontra no lado de pressão (*Pressure side*) e a outra no lado de sucção (*Suction Side*). As cascas são o elemento que está em contacto com o exterior, tendo assim uma elevada importância para a proteção das pás, mas também pela geometria aerodinâmica necessária ao aproveitamento da força do vento. As duas cascas são coladas com o auxílio de adesivos e no seu interior existem longarinas (*Spar caps*) e almas (*Shear webs*). A Figura 2.23 esquematiza-se sumariamente os diversos componentes referidos [31].

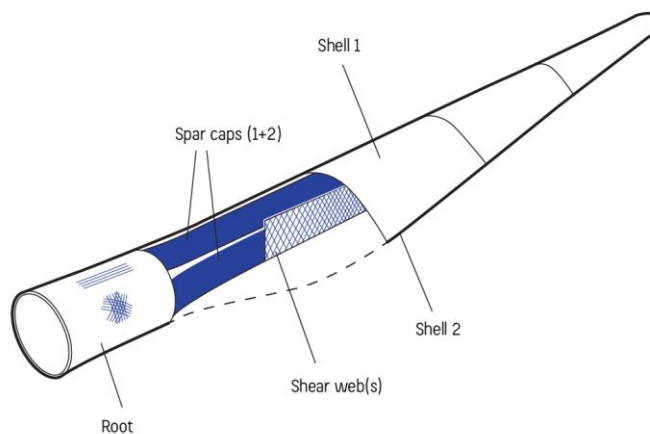


Figura 2.23 – Esquema estrutural de uma pá eólica [31]

As longarinas são elementos estruturais que se encontram longitudinalmente ao longo das cascas e que têm como principal objetivo colaborar nas distribuições dos esforços e cargas presentes nas pás até à *root*. As almas fazem a ligação entre as longarinas presentes na casca do lado de sucção com a casca do lado de pressão, mantendo assim a geometria das pás.

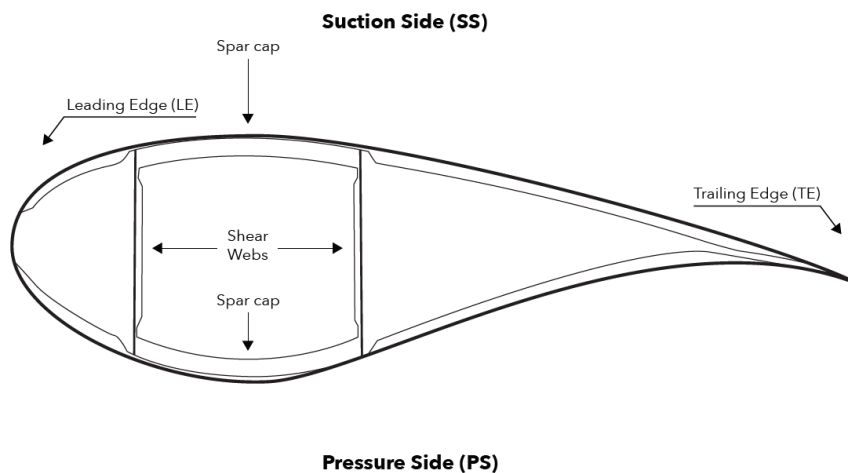


Figura 2.24 – Seção transversal de uma pá eólica [31]

2.6.3. MATERIAIS USADOS

Como já referido anteriormente, a otimização das turbinas eólicas tem indicado que os modelos mais leves apresentam melhores resultados. Por esta razão, o material usado no fabrico dos diversos componentes tem variado ao longo do tempo. Atualmente, todos os elementos de uma turbina eólica são fabricados usando metal, com a exceção da *nacelle* e das pás, que são geralmente feitos de materiais compósitos, sendo as pás o elemento mais caro de produzir.

2.6.3.1. Fibras de vidro e de carbono

Os compósitos são formados por fibras e pelas resinas que proporcionam uma ligação entre as fibras. No entanto, a rigidez dos compósitos é determinada pela rigidez das fibras usadas e a sua quantidade. Quando aumentamos a percentagem de fibras usadas em relação à resina, a rigidez e as tensões resistentes do compósito aumentam também, mas é necessário que esta percentagem seja equilibrada, para que exista resina suficiente para fazer a ligação entre as fibras.

No caso das pás eólicas, o compósito mais usado é a conjugação de fibras de vidro e de resina *epoxy* [32]. Para melhorar certas características dos compósitos, são usados reforços de outras fibras que têm objetivos característicos. As fibras de *E-glass*, são tipicamente usadas nas pás eólicas, devido à sua elevada resistência elétrica, com o objetivo de proteger as pás de relâmpagos. Existem diversas fibras que podem ser usadas como reforço.

As fibras de carbono são uma alternativa às fibras de vidro, possuindo uma rigidez mais elevada e uma densidade menor, o que resulta no fabrico de elementos mais rígidos e, no entanto, mais leves. Por outro lado, estas fibras apresentam baixa resistência a forças de compressão, são mais facilmente danificadas e, comparativamente, às fibras de vidro são muito mais caras [32].

2.6.3.2. Compósitos híbridos

A solução de compósitos híbridos baseia-se na utilização de diferentes tipos de fibras, normalmente de vidro e carbono, com o objetivo de encontrar um meio termo ideal que forneça ao compósito as diferentes vantagens das diferentes fibras. Pode ser criado um compósito mais leve usando uma percentagem de fibra de carbono, tentando manter a resistência que as fibras de vidro possuem [32].

2.6.3.3. Uso da nano-engenharia em polímeros e compósitos

Mais recentemente, expandindo a solução de compósitos híbridos, existem estudos que têm como objetivo o desenvolvimento de reforços de carbono com dimensões muito reduzidas, cerca de 0,5% do peso total do compósito. Estes reforços, chamados de nanotubos, encontram-se dentro do compósito e o seu funcionamento é semelhante ao das armaduras usadas no betão. O facto de serem tão pequenos, permitem reduzir os custos da fibra de carbono usada e alguns estudos revelam que a resistência à fadiga e a força à compressão podem ser melhorados usando este método [32].

2.6.4. CARGAS NAS PÁS

2.6.4.1. Cargas aerodinâmicas

As cargas aerodinâmicas são as mais importantes, pois são estas que representam a absorção da energia cinética do vento resultando no movimento das pás eólicas. Quando existe impacto do vento numa pá eólica, resultam deste fenómeno duas cargas principais, uma de sustentação (*lift*) e uma de arrasto (*drag*). A carga de sustentação tem uma direção perpendicular à posição da pá, resultando numa componente com a direção do movimento do rotor. A força de arrasto apresenta uma direção paralela à posição da pá, e a sua componente perpendicular tem uma direção contrária ao movimento. A resultante destas duas componentes é responsável pelo movimento do rotor (Figura 2.25) [29].

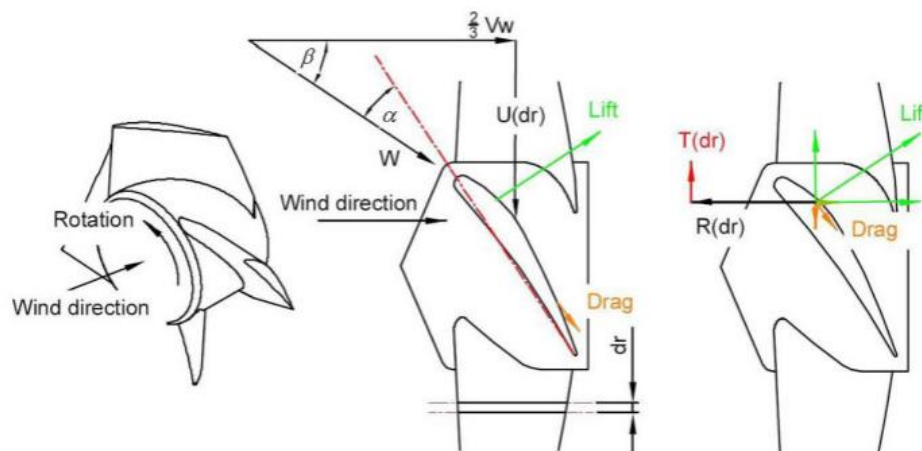


Figura 2.25 – Decomposição das cargas geradas pelo impacto do vento numa pá de uma turbina eólica [29]

2.6.4.2. Ação dinâmica

As turbinas eólicas são estruturas especiais devido ao seu movimento. É muito importante o estudo das ações dinâmicas na estrutura porque, sendo esta considerada uma estrutura leve apresenta uma flexibilidade muito grande, principalmente nas pás. Acrescentando o movimento que acontece nestas, torna-se obrigatório fazer o estudo das diferentes frequências naturais que ocorrem na estrutura das turbinas, em particular com o objetivo de prevenir o fenômeno de ressonância nestas.

No caso das pás, estas apresentam várias frequências naturais, dependendo da direção da vibração, da rigidez e da distribuição de massas de cada uma. A ressonância pode ocorrer, quando forças externas aplicadas na pá resultem em frequências próximas das frequências naturais destas, provocando assim grandes oscilações na estrutura, do que poderá resultar o colapso desta [29].

2.6.4.3. Cargas gravíticas

Estas cargas estão associadas ao peso da estrutura. No caso das pás, como estas são elementos “leves”, tais cargas em muitos casos não são críticas [29]. No entanto, com o aumento crescente do diâmetro do rotor e, conseqüentemente, do comprimento de cada pá, as cargas gravíticas são cada vez mais importantes devido às forças centrífugas geradas no rotor.

2.6.5. DEFINIÇÃO DAS CARGAS DE PROJETO

As principais consequências das cargas aplicadas nas pás eólicas são as deformadas causadas nas duas direções de cada pá, as deformadas *edgewise* e as deformadas *flapwise* (Figura 2.26).

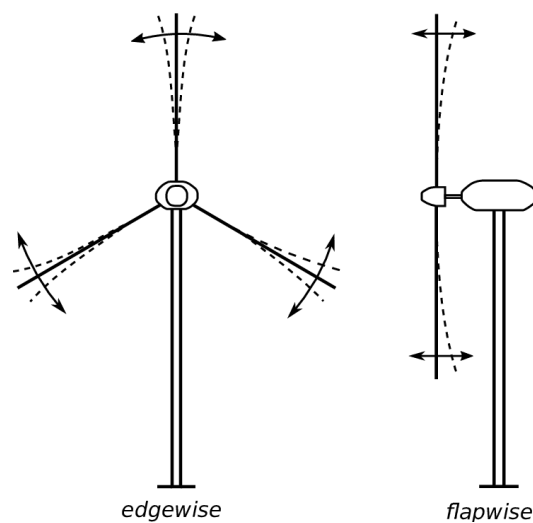


Figura 2.26 – Duas direções de deformadas [33]

2.6.5.1. Deformada *flapwise*

As cargas críticas que provocam esta deformada são as cargas aerodinâmicas. Para o cálculo das ações, é suficiente considerar a pá como uma consola onde está aplicada uma carga uniformemente distribuída [29]. Esta simplificação torna muito mais fácil a interpretação física do que acontece nas pás. Os momentos causados pelas cargas distribuídas tornam essencial o reforço estrutural das pás na zona da *root*, devido às tensões de tração e de compressão que ocorrem nas secções transversais.

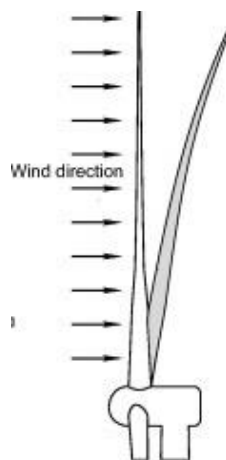


Figura 2.27– Deformada *flapwise* [29]

2.6.5.2. Deformada *edgewise*

Esta deformada é semelhante à *flapwise*, só que as principais cargas responsáveis por esta, são forças gravíticas. Por esta razão, tal como estas cargas, em muitos casos, estas deformadas não são consideradas críticas. No entanto, com o aumento do comprimento das pás pode ter relevância fazer o seu estudo [29].

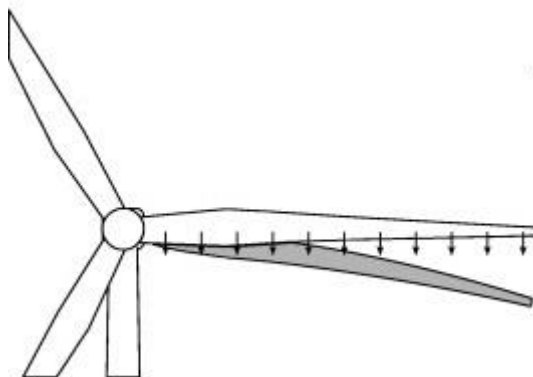


Figura 2.28 – Deformada *edgewise* [29]

2.6.5.3. Fadiga estrutural

A fadiga das pás é muito importante de considerar, pois estas estão a ser sujeitas a cargas rítmicas, isto é, cargas que se repetem e que não são totalmente contínuas no tempo, devido ao seu movimento característico. O efeito da fadiga resulta do carregamento cíclico da estrutura a longo prazo e a solução para o seu controlo passa por diminuir a amplitude dos ciclos de tensão. No entanto, para isto é necessário que os materiais usados sejam mais resistentes a este fenómeno, ou que as secções transversais sejam de maiores dimensões o que torna o seu dimensionamento menos eficiente. Por esta razão, em muitos casos, a fadiga é o efeito mais importante no dimensionamento das pás [29].

2.7. IMPORTÂNCIA DA MONITORIZAÇÃO DAS PÁS EÓLICAS

As turbinas eólicas são equipamentos que, para a sua otimização, deverão estar em funcionamento contínuo a maior parte da sua vida. Logo, a monitorização geral destas é muito importante para garantir o seu funcionamento e a sua segurança.

Na realização deste documento, o foco estará na monitorização das pás das turbinas eólicas. A monitorização destas é fundamental, pois são um elemento que recebe esforços e cargas de diferentes naturezas, desde os esforços do ponto de vista estrutural, passando pelas cargas aerodinâmicas resultantes do vento e até à resistência necessária para sobreviver a fenómenos naturais, como por exemplo, relâmpagos [31].

2.7.1. MONITORIZAÇÃO UTILIZADA NAS PÁS

A maioria da monitorização usada nas turbinas eólicas está relacionada com os equipamentos mecânicos, como a transmissão e o gerador. No entanto, é necessária a monitorização estrutural dos diferentes elementos, com o objetivo de recolher informação que permita a realização de uma manutenção planeada ou, em último caso, a paragem do funcionamento da turbina por existir risco de falha estrutural.

No caso das pás, os métodos de monitorização mais comuns são:

- **Análises de vibrações:** este é o método mais comum usado nas turbinas eólicas, para quase todos os componentes destas. Baseia-se na medição das vibrações, a partir de diferentes sensores, como por exemplo, acelerómetros, e a informação recolhida é estudada e avaliada;
- **Emissão acústica:** o sistema de monitorização de emissão acústica tem o mesmo princípio que o método de análise de vibrações. Contudo, este sistema é mais usado com o objetivo de detetar falhas e fendas nos materiais, pois é mais prático de colocar em funcionamento. Os sensores acústicos são apenas colados, com colas especiais, e apenas gravam diretamente os sons;
- **Medição de tensões:** atualmente, este método, é o mais importante no controlo das pás eólicas. O uso de extensómetros, permite monitorizar as tensões presentes nas secções críticas das pás e assim fazer o seu controlo, para que não atinjam tensões muito elevadas [31].

No desenvolvimento deste trabalho o estudo do modelo físico, que tem como objetivo a simulação de uma pá eólica, será acompanhado com o estudo de um sensor ótico. O desenvolvimento deste sensor tem como objetivo a introdução de um método inovador na monitorização das pás das turbinas eólicas. Enquanto

existem atualmente equipamentos que permitem monitorizar grandezas importantes para o estudo em tempo real das pás, como os extensómetros, este sensor tem como meta permitir a deteção da forma completa destas em tempo real, permitindo assim uma monitorização mais completa.

2.8. SENSORES ÓTICOS

2.8.1. SENSORES DE BRAGG

O sensor ótico em estudo usa sensores de *Bragg* na sua composição. Estes são designados internacionalmente por *Fiber Bragg Gratings* (FGB) e são usados em determinados troços de fibras óticas. Os sensores de *Bragg* possuem a capacidade de refletir espectros controlados de luz da fibra ótica, o que permite que as potencialidades destes sejam imensas, em redes de comunicação são apenas usados como filtros e refletores, mas atualmente a sua potencialidade como sensores tem vindo a ser cada vez mais explorada, particularmente para medições de variações de deformação e de temperatura.

Um sensor de *Bragg* contém uma rede de refração que permite uma variação elevada de diferentes níveis de refração no núcleo da fibra ótica. A luz, ao chegar ao sensor, irá sofrer diferentes índices de refração, dependendo da posição em que a fibra ótica se encontra, ocorrendo reflexões parciais localizadas da luz (Figura 2.29). No entanto, a maior parte do espectro passa pelo núcleo da fibra ótica sem sofrer qualquer alteração com exceção de um pequeno troço do espectro de luz que é refletido de volta e permite, através do seu comprimento de onda, determinar as extensões no sensor e as variações de temperatura [34].

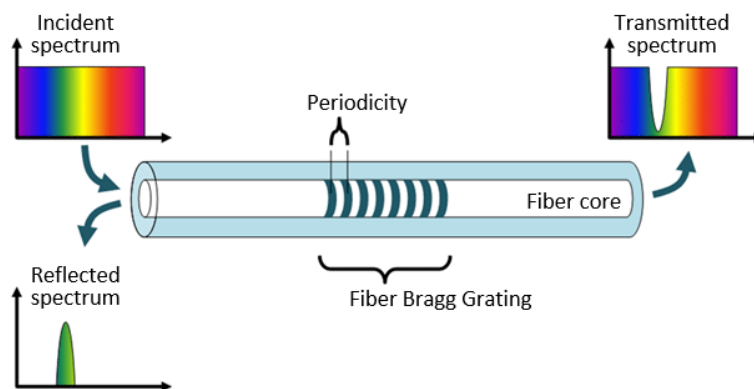


Figura 2.29 – Funcionamento de um sensor de *Bragg* [35]

2.8.2. SENSOR EM ESTUDO

O objetivo do sensor ótico em estudo, consiste na determinação de deformadas completas de pás eólicas. Isto é possível ao criar um sensor que acompanhe o comprimento das pás e possua uma boa fixação a esta. No caso do sensor usado neste projeto, este possui um corpo rígido composto por fibra de vidro e é colocado

numa face da estrutura em estudo. Dentro do corpo rígido do sensor estão quatro fibras óticas que percorrem o seu comprimento, duas delas mais próximas da parte superior do próprio sensor e as outras duas na parte inferior. Ao longo do comprimento destas, serão instrumentadas secções com sensores de *Bragg*. O objetivo destas secções, que contêm quatro sensores de *Bragg*, é de efetuar a medição de extensões a partir destes. Teoricamente, com estas quatro medições será possível determinar a curvatura local da célula em dois sentidos, a partir da diferença de extensões determinadas em cada sensor de *Bragg* (Figura 2.1) [36].

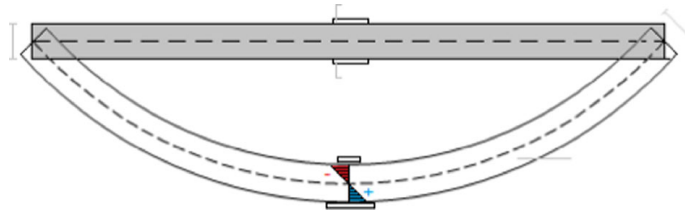


Figura 2.30 – Diferenças entre extensões [36]

Ao determinar a curvatura local em vários pontos de todo o comprimento em que se encontra aplicado o sensor, é possível reconstruir toda a deformada através da integração das várias curvaturas locais e da interpolação destas [36]. Como no nosso estudo será usado apenas um sensor ótico, a fixação deste ao modelo físico será importante para que seja capaz de reproduzir as deformações da estrutura.

3

MODELO FÍSICO

3.1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento desta dissertação, o objetivo é fazer a avaliação e o estudo dos sensores de fibra ótica desenvolvidos pela empresa da Fibersail, com a função de monitorização de pás eólicas. Para este efeito, a empresa possui um modelo físico (Figura 3.1), que desenvolveu com a finalidade de realizar ensaios e experiências para a obtenção de dados que possam ser úteis na avaliação e no desenvolvimento desta tecnologia.

O modelo físico tem como principal objetivo simular estruturalmente uma pá eólica. No entanto, como referido anteriormente, para o estudo de cargas estáticas, dinâmicas e as deformadas resultantes, as pás podem ser vistas como uma consola que se encontra encastrada numa extremidade apenas. O modelo desenvolvido, com um comprimento de nove metros e uma secção transversal tubular de $100 \times 40 \times 2 \text{ mm}$ foi produzido numa liga de alumínio AW 6060 T66, o que faz com que este apresente uma grande flexibilidade e permita simular mais facilmente grandes deformadas, compatíveis com as deformadas nas pás de turbinas eólicas.



Figura 3.1 – Modelo físico

3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

3.2.1. DISPOSITIVO DE SUPORTE

O encastramento da barra é realizado através da sua ligação à estrutura representada na Figura 3.2, que procura restringir todos os movimentos, como qualquer deslocamento e rotações.



Figura 3.2 – Dispositivo de suporte

Este dispositivo, apresenta uma continuidade com a barra numa extensão de um metro. Este pequeno troço da barra é o único que se encontra fixo e apenas por oito ligações de soldadura, sendo estas simétricas, ou seja, quatro do lado esquerdo e quatro do lado direito. Cada soldadura tem uma extensão de 10,5 cm. A distância entre cordões de soldadura é variável (18cm; 20,5 cm e 19,5 cm), sendo que as soldaduras que se encontram nos extremos não têm nenhuma folga em relação à parte inferior. Estas soldaduras fazem a ligação entre a barra principal e uma chapa metálica inferior do mesmo material. Por sua vez, esta chapa inferior possui oito ligações aparafusadas, aproximadamente a meio do comprimento de cada soldadura, que transportam os esforços para o resto da estrutura que faz a ligação ao solo (Figura 3.3).

Para além de ser o único elemento de suporte, este dispositivo apresenta duas características importantes. A sua altura em relação ao solo e uma inclinação inicial da chapa de apoio da barra, com um ângulo de $7,86^\circ$ com a horizontal, que são fundamentais devido ao elevado comprimento da barra para que as deformadas desta não toquem no solo e seja assim possível realizar os ensaios.

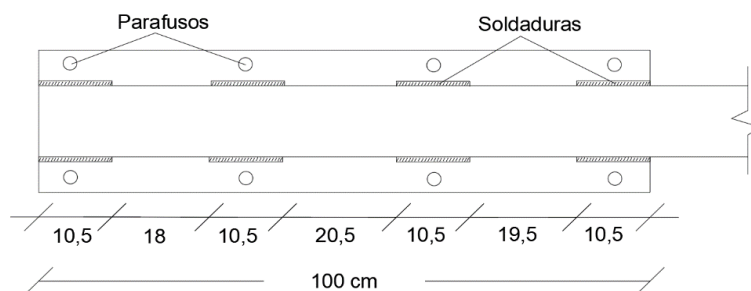


Figura 3.3 – Planta do dispositivo de suporte

3.2.2. BARRA

A barra é o elemento principal deste modelo físico, por o objetivo ser estudar o seu comportamento em diversos casos diferentes. Na barra serão colocados os sensores em estudo e os diversos equipamentos que permitirão realizar as avaliações ao comportamento desta. Este elemento é dividido em dois troços. Um troço inicial, com comprimento total de 3,993 metros, dos quais 1 metro diz respeito à continuidade que se encontra fixo no dispositivo de suporte, logo, este troço inicial faz a ligação direta ao sistema de apoio (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Troço retilíneo

A principal diferença deste troço e o segundo, diz respeito ao facto de este ser completamente retilíneo. Ao longo da realização deste trabalho, foi sempre considerado o ponto de origem na separação do sistema de apoio e do resto da barra, de modo a considerarmos toda a parcela da estrutura que não está apoiada como uma consola encastrada numa extremidade. Portanto, foi considerado que o troço retilíneo da barra, possui 2,993 metros (Figura 3.5).

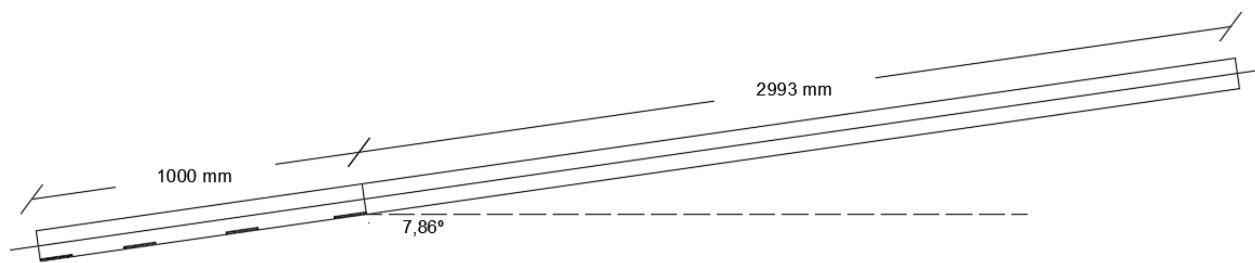


Figura 3.5 – Dimensões do troço retilíneo

O segundo troço da barra, constituído pelo mesmo material do troço inicial, apresenta uma curvatura (Figura 3.6) constante ao longo do seu comprimento. Esta característica tem como função contrariar as elevadas deformadas da estrutura, para que seja possível ensaiar esta, sem que exista contacto com o solo.



Figura 3.6 – Troço curvilíneo

Esta parte da barra apresenta um comprimento do arco na face superior de 6,005 metros e na face inferior de 6,015 metros, representado na Figura 3.7. Para se obter o comprimento total da barra sem considerar o dispositivo de suporte, com o objetivo de termos uma consola encastrada, considera-se o eixo médio da secção. Portanto, o comprimento no eixo da secção deste troço tem 6,010 metros. Somando ao comprimento do troço inicial a barra possui um comprimento total de 9,003 metros.

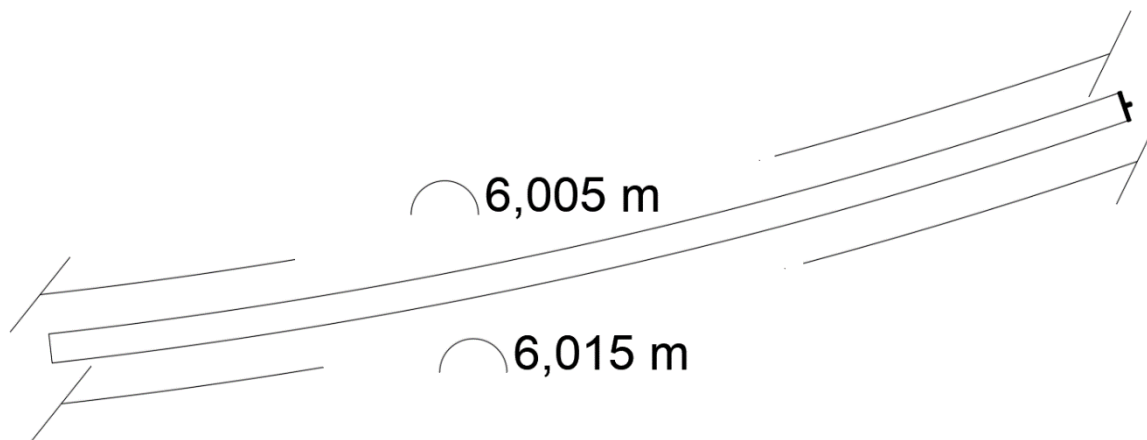


Figura 3.7 – Dimensões do troço curvilíneo

Os dois troços da barra estão conectados por uma ligação presente no final do troço retilíneo (Figura 3.8). Esta ligação possui uma secção cheia, ao contrário de toda a barra, e faz o preenchimento interior das secções dos dois troços. Para auxiliar o suporte da ligação aos dois troços e obter um apoio mais coeso, esta possui oito ligações aparafusadas nas secções laterais, sendo quatro delas do lado direito e as outras quatro no lado

esquerdo. Das oito ligações aparafusadas, quatro delas fazem a ligação ao troço inicial retilíneo e as outras quatro ao segundo troço curvilíneo.



Figura 3.8 – Peça de ligação dos dois troços da barra

A ligação tem um comprimento total de 27 centímetros, sendo metade destes, 13,5 centímetros, para cada um dos diferentes troços. Esta ligação encontra-se soldada à secção interior do troço retilíneo.

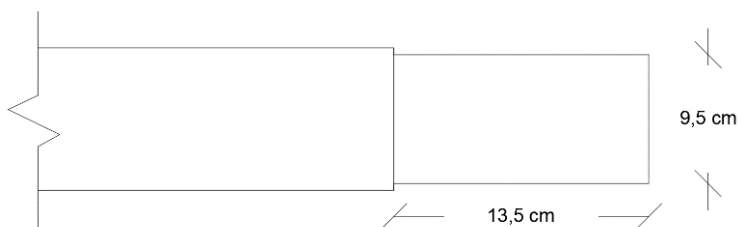


Figura 3.9 – Planta da peça de ligação

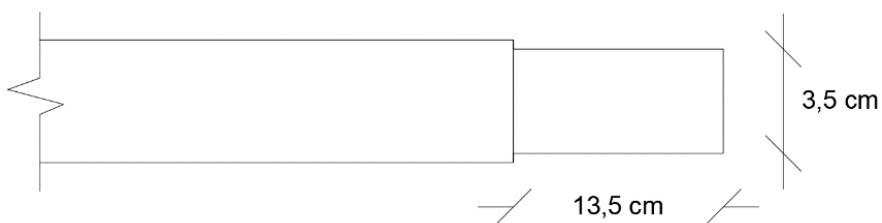


Figura 3.10 – Vista lateral da peça de ligação

3.2.3. SECÇÃO TRANSVERSAL

A secção transversal teórica (Figura 3.11) para todo o nosso modelo físico, é uma secção retangular tubular, isto é, apresenta uma secção vazia no seu interior com o objetivo de tornar o modelo físico mais flexível e

deformável. A secção transversal retangular apresenta uma largura de 100 milímetros, uma altura de 40 milímetros e uma espessura de 2 milímetros.

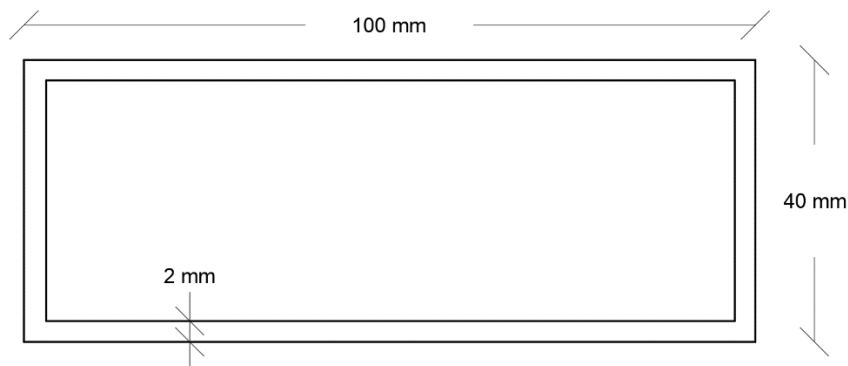


Figura 3.11 – Secção transversal teórica

No entanto, efetuaram-se medições para comprovar os valores teóricos da secção transversal da barra ao longo desta. Concluiu-se que existem defeitos nestes valores, nos dois troços da barra, sendo que cada um destes troços apresentava dimensões diferentes. No caso do troço retilíneo, este apresenta uma largura de 101 milímetros, ou seja, um aumento de um milímetro em relação ao valor teórico, uma altura de 39 milímetros, uma diferença de menos um milímetro e a espessura manteve-se no valor teórico de 2 milímetros (Figura 3.12). No caso deste troço, a diferença nas medidas deve-se, muito provavelmente, a um erro de fabrico efetuado durante a produção deste troço.

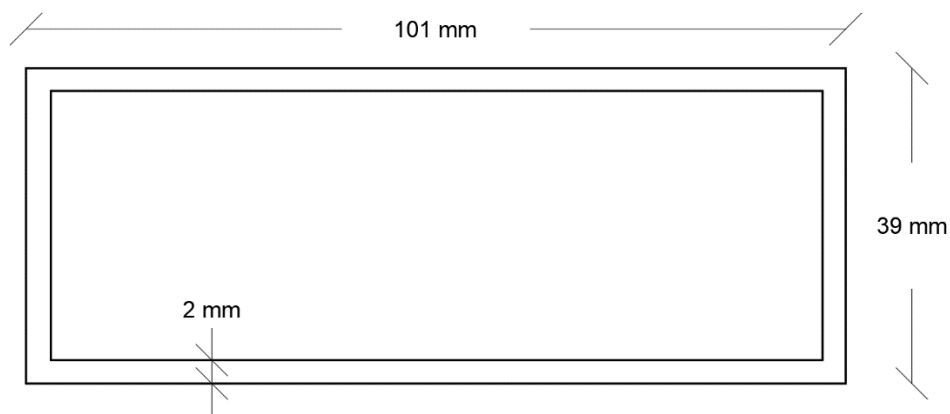


Figura 3.12 – Secção transversal do troço retilíneo: medições reais

No troço curvilíneo do modelo também existem diferenças. A largura da secção transversal é igual à do troço retilíneo, ou seja, 101 milímetros, e a altura é de 38 milímetros, um milímetro a menos do que no outro

troço, a espessura é de 2 milímetros, não havendo assim diferenças na espessura de todo o modelo em relação aos valores teóricos (Figura 3.13).

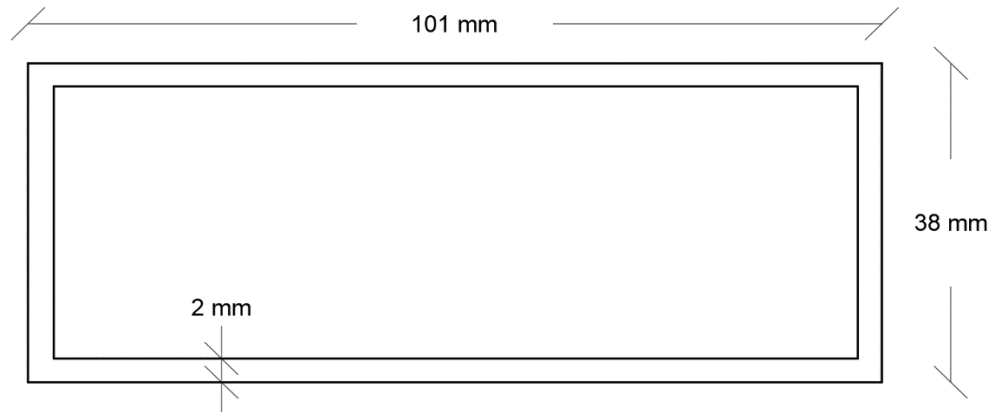


Figura 3.13 – Secção transversal do troço curvilíneo: medições reais

A única diferença em relação ao troço retilíneo está no valor da altura. Esta diferença deve-se ao facto de o troço curvilíneo apresentar algumas deformações (Figura 3.14) em várias secções transversais ao longo da barra. No entanto, estas deformações, são responsáveis por proporcionar a característica curvilínea a este troço.



Figura 3.14 – Imperfeições das secções transversais do troço curvilíneo

3.2.3.1 Características das secções transversais

Com o objetivo de mais tarde confirmar que as secções transversais estavam corretamente modeladas no modelo numérico, efetuou-se o cálculo da área e os momentos de inércia de ambas as secções. No cálculo dos momentos de inércia, os eixos considerados encontram-se representados na Figura 3.15.

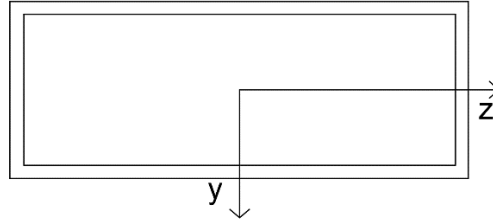


Figura 3.15 – Eixos considerados

Secção transversal do troço retilíneo

$$A = (101 \times 39) - (97 \times 35) = 544 \text{ mm}^2 = 5,44 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_z = \frac{101 \times 39^3}{12} - \frac{97 \times 35^3}{12} = 152695,3 \text{ mm}^4 = 1,527 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_y = \frac{39 \times 101^3}{12} - \frac{35 \times 97^3}{12} = 686515,3 \text{ mm}^4 = 6,865 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Secção transversal do troço curvilíneo

$$A = (101 \times 38) - (97 \times 34) = 540 \text{ mm}^2 = 5,40 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_z = \frac{101 \times 38^3}{12} - \frac{97 \times 34^3}{12} = 144132 \text{ mm}^4 = 1,441 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_y = \frac{38 \times 101^3}{12} - \frac{34 \times 97^3}{12} = 676713 \text{ mm}^4 = 6,767 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

3.2.4. MATERIAL

O material usado na concepção do modelo físico é uma liga de alumínio designada por EN-AW 6060 T66. Esta liga possui uma resistência média quando comparada com outras ligas de alumínio, uma grande facilidade de realizar soldaduras e é habitualmente usada para secções transversais complexas. No caso do modelo físico em estudo, a secção transversal deste não é complexa, mas possui uma espessura constante de 2 mm. Portanto, o uso desta liga de alumínio provou ser vantajoso para a concepção de um perfil com uma espessura tão pequena.

O uso do alumínio como o material deste modelo físico tem como objetivos que este fosse uma estrutura rígida, capaz de resistir a diversos tipos de cargas aplicadas para realizar os estudos previstos e, no entanto, que fosse uma estrutura muito leve, para simular as pás eólicas, e que apresentasse elevada flexibilidade, com o objetivo de obter uma elevada amplitude de deformações para a realização de ensaios.

Para a realização dos estudos, é essencial conhecer as propriedades do material usado no modelo físico. Neste caso, como foi usada uma liga de alumínio, existe informação detalhada sobre as suas características, que são as seguintes:

- Módulo de Young (E): 70000 MPa
- Módulo de corte (G): 27000 MPa
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,3
- Densidade (ρ): 2,70 g/cm³

Em relação às resistências do material, este apresenta uma tensão de cedência (f_u) de 215 MPa e um valor característico da tensão limite de proporcionalidade associada à extensão de 0,2% ($f_c = R_{p0,2}$) de 160 MPa [37].

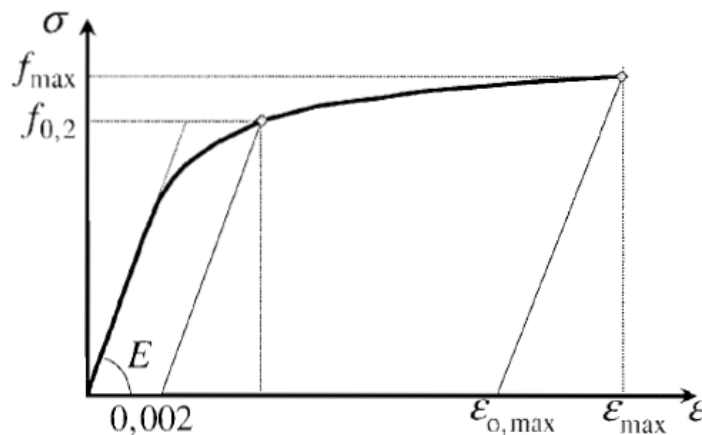


Figura 3.16 – Diagrama tensão-extensão do material utilizado [37]

3.2.5. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

No desenvolvimento deste projeto e no estudo do modelo físico, são necessários diversos equipamentos para a realização dos ensaios experimentais planejados. É necessário, portanto, fazer uma caracterização mais aprofundada dos objetos e ferramentas que terão um impacto direto no modelo físico, principalmente, os que serão colocados fisicamente no modelo para que seja possível identificar as consequências que estes terão e também para que seja possível garantir a segurança. As características destes equipamentos são também importantes para o desenvolvimento de um modelo numérico preciso, visto que qualquer objeto colocado no modelo físico terá um impacto neste e o objetivo do modelo numérico é simular de forma real o comportamento do modelo físico.

Durante o processo de montagem de todos os equipamentos usados ao longo do trabalho, foram realizadas medições das massas de cada um e também da localização exata da sua aplicação no modelo físico com o objetivo de efetuar uma modelação numérica precisa, posteriormente, como já foi referido, mas também para existir um controlo sobre a aplicação destes equipamentos no modelo físico. Por exemplo, quando fosse necessário retirar qualquer objeto usado do modelo, saberíamos exatamente que objeto colocar e a sua localização quando este fosse colocado de novo no modelo. Isto para que não houvesse qualquer tipo de alterações e assim fosse possível a comparação de resultados anteriores com resultados posteriores.

3.2.5.1. Sistema de Imagem

O objetivo do sistema de imagem utilizado é de localizar a posição da barra em estudo no espaço, ou seja, conseguir acompanhar quaisquer deslocamentos que esta tenha. Para isto, o sistema de imagem conta com duas câmaras diferentes, uma câmara posicionada exatamente em cima do modelo para acompanhar deslocamentos em *edge* e outra câmara posicionada na lateral para acompanhar deslocamentos em *flap*. Para que este processo seja possível, é necessário aplicar no modelo alvos que as câmaras sejam capazes de acompanhar e identificar. No total foram aplicados 16 alvos diferentes, 8 superiores para a câmara superior (Figura 3.17) e 8 laterais para a câmara lateral acompanhar (Figura 3.18). Desta forma, foi criado um sistema em que os respetivos alvos superiores e laterais se encontrassem na mesma localização do modelo e depois de agrupados tivéssemos um total de oito alvos que foram identificados de 0 a 7.



Figura 3.17 – Alvos superiores



Figura 3.18 – Alvos laterais

Através da captação através das câmaras dos alvos laterais e superiores, o sistema de imagem utiliza um software, que foi adquirido pela empresa da Fibersail, capaz de localizar com precisão a posição de cada alvo e assim permitir medir deformadas e deslocamentos que ocorram nestes pontos, sendo assim, um ótimo processo para ajudar na verificação de resultados obtidos nos ensaios a realizar.

A fixação destes alvos ao modelo físico foi realizada de uma forma não convencional, com o objetivo de reduzir a massa aplicada no modelo. Foram utilizados pequenos ímanes, um colado ao modelo e outro colado ao alvo e atração magnética fazia a ligação entre o alvo e o modelo. Para que não houvesse movimento nesta ligação magnética foram usadas fitas plásticas que restringissem a rotação dos ímanes.

Depois de definido o processo de aplicação dos alvos no modelo, foram medidas as massas de cada alvo individual e decidido qual seria a sua localização final. Estes parâmetros estão apresentados na Tabela 1. É importante referir que quando se fala da localização de aplicação no modelo, esta é a distância ao centro de origem deste. O centro de origem definido é a secção que faz a transição entre o dispositivo de suporte e o resto da barra suspensa, como referido anteriormente.

Tabela 1– Massa e localização dos alvos de imagem

Número do alvo	Localização [m]	Massa [g]	Peso [kN]
0	0,02	131,427	0,00128886
1	1,27	131,173	0,00128637
2	2,54	163,015	0,00159863
3	3,81	130,788	0,00128259
4	5,09	130,068	0,00127553
5	6,36	130,342	0,00127822
6	7,63	137,175	0,00134523
7	8,90	161,088	0,00157973

3.2.5.2. Sensor ótico

O sensor ótico em estudo é colocado na face superior do modelo físico (Figura 3.19) e exatamente no eixo de simetria deste. Este sensor é composto por um compósito de fibra de vidro que percorre todo o comprimento da barra e que lhe garante resistência, proteção aos sensores e fibras óticas no seu interior e também a flexibilidade que é necessária para efetuar leituras.



Figura 3.19 – Sensor ótico com suportes e alvos de imagem

No interior, o compósito é percorrido por fibras óticas ao longo do seu comprimento e em certas localizações existem secções instrumentadas com sensores de *Bragg*. Destes, dois são colocados lado a lado na face superior do compósito e os outros dois na face inferior. A partir das medições de extensões efetuadas pelos sensores de *Bragg* é possível calcular as curvaturas nas secções instrumentadas através das diferenças entre as extensões existentes nesta e a distância relativa dos sensores (Figura 3.20).

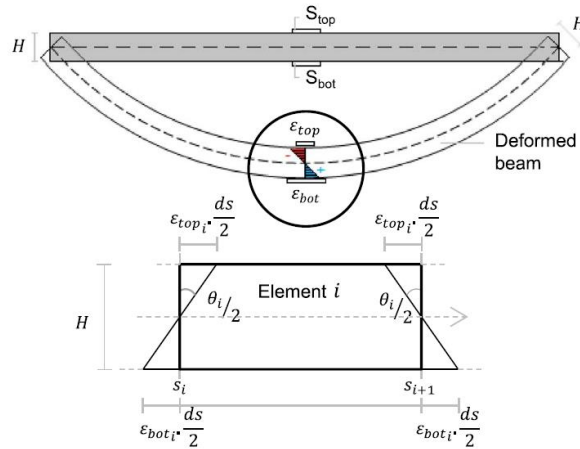


Figura 3.20 – Cálculo das curvaturas locais

$$K(s) = \frac{\varepsilon_{bot} - \varepsilon_{top}}{H} \quad (1.1)$$

Com os quatro sensores, é possível realizar este processo para as duas direções, em *flap* e em *edge* porque conseguimos obter diferenças de extensões nos dois planos. Ao obter as curvaturas de todas as secções que se encontram instrumentadas é possível através da sua interpolação e integração, estimar e prever a deformada total ao longo do modelo físico.

Devido ao facto de o sensor percorrer o comprimento total da barra, foi medida a massa de outro sensor equivalente com o comprimento exato de um metro. Isto permite saber a massa total do sensor em estudo mais facilmente, isto porque, devido ao grande comprimento deste seria difícil efetuar a sua medição total. Outro ponto positivo está na modelação, porque fica assim possível representar a carga do sensor por uma carga distribuída ao longo da barra. A massa do sensor por metro é então de 176,208 gramas, resultando num peso de 0,001728 kN/m.

3.2.5.3. Suportes do sensor ótico

Para a fixação do sensor ótico foram usados vários grampos e encaixes. Como referido anteriormente, para os resultados obtidos pelo sensor é muito importante que este esteja sempre na mesma posição, evitando diferenças desnecessárias que ponham em causa a qualidade dos resultados obtidos. As posições de cada suporte usado, foram colocadas de meio em meio metro a partir da origem da barra, com a exceção de um suporte que foi usado na parte final desta para melhorar a fixação do sensor nesta zona.

Cada suporte é composto por dois grampos iguais e um encaixe de plástico produzido numa impressora 3D e dimensionado especificamente para esta função (Figura 3.21). O encaixe tem a função de não permitir deslocamentos do sensor nos dois sentidos horizontais, mas também no sentido ascendente, e assim, permitir que o sensor esteja sempre em contacto com a barra. No entanto, os encaixes não têm a capacidade de suportar o sensor, e então, são usados os grampos para prender o encaixe à barra e assim não permitir qualquer tipo de movimento.



Figura 3.21 – Suportes do sensor ótico

No total foram usados 19 suportes deste género. Cada suporte foi numerado para identificação e as suas posições foram definidas no modelo físico para quando fosse necessário a sua remoção, fosse possível voltar a colocar os mesmos suportes no sítio correto e na posição onde foram colocados anteriormente (Tabela 2).

Tabela 2– Massa e localização dos suportes do sensor

Suporte	Localização [m]	Massa [g]	Peso [kN]
1	0,5	173,818	0,001704581
2	1	173,75	0,001703914
3	1,5	175,662	0,001722665
4	2	174,555	0,001711809
5	2,5	174,462	0,001710896
6	3	173,821	0,00170461
7	3,5	176,582	0,001731687
8	4	174,708	0,001713309
9	4,5	175,422	0,001720311
10	5	174,606	0,001712309
11	5,5	173,57	0,001702149
12	6	175,242	0,001718546
13	6,5	175,599	0,001722047
14	7	176,266	0,001728588
15	7,5	174,388	0,001710171
16	8	175,341	0,001719517
17	8,5	175,843	0,00172444
18	8,8	174,402	0,001710308
19	9	173,962	0,001705993

Para cada suporte foi medida a sua massa individual, permitindo assim, saber as suas diferenças com o objetivo de evitar erros grosseiros na sua modelação.

3.2.5.4. Extensómetros

No modelo físico, foram aplicados dois extensómetros óticos adquiridos a uma empresa independente que também usam a tecnologia de sensores de *Bragg* (Figura 3.22). O objetivo é usar os resultados obtidos por

estes como objeto de comparação com os modelos numéricos executados. Os dois extensómetros foram colocados apenas numa secção escolhida que se encontra a vinte e cinco centímetros da origem da barra e foram colados, um na face superior e outro na face inferior (Figura 3.23). O uso destes extensómetros tem como objetivo, para além da comparação de valores com os modelos numéricos, o controlo das extensões exercidas nesta secção próxima da origem da barra, para que não seja aplicado demasiado esforço nesta, pondo em causa a sua segurança.

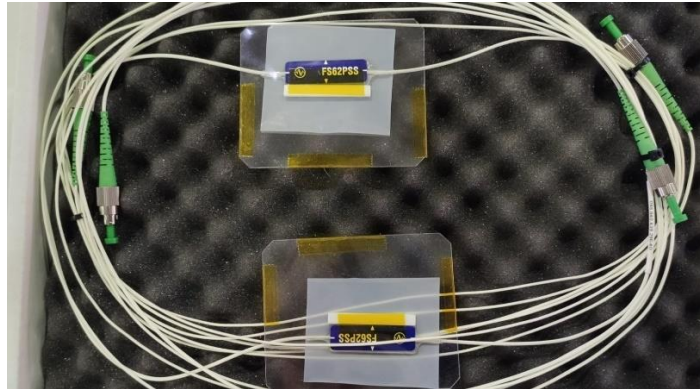


Figura 3.22– Extensómetros óticos

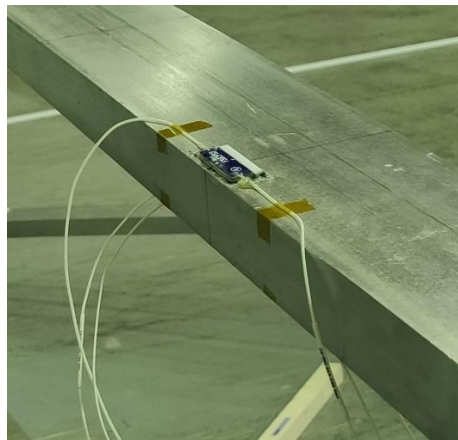


Figura 3.23 – Aplicação dos extensómetros

3.3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Durante a realização deste projeto, o objetivo principal foca-se na realização de ensaios do modelo físico, com o objetivo de verificar os resultados do sensor ótico em estudo, e desta forma, perceber se o desenvolvimento deste está a seguir o caminho correto. Durante a realização dos ensaios procurou-se usar diversos meios de obtenção de resultados para existir mais informação de comparação com o sensor a ser desenvolvido. Os ensaios planeados podem ser divididos em duas categorias. Ensaio estático que consiste na aplicação de uma carga concentrada no modelo físico e no estudo da resposta deste e ensaios dinâmicos, que têm como objetivo perceber como o modelo físico reage ao movimento e também entender como o sensor se comporta em casos de carga desta natureza e se os resultados deste estão a evoluir na direção certa.

3.3.1. ENSAIO ESTÁTICO

O ensaio estático é o mais simples a ser efetuado. Durante o seu planeamento foram estabelecidos diferentes casos de carga. O ensaio realizou-se de uma forma constante, ou seja, partimos duma posição inicial e fomos percorrendo os diferentes casos de carga. Estes casos de carga iniciam-se com a montagem do modelo físico, ou seja, as massas dos equipamentos usados no modelo, que foram descritos anteriormente, foram usados como diferentes combinações. Inicialmente, as únicas cargas aplicadas ao modelo são o seu peso próprio e os alvos utilizados pelo sistema de imagem, isto porque, decidimos obter resultados deste sistema desde o momento inicial. De seguida, foi colocado o sensor ótico no modelo físico adicionando assim a carga solicitada por este e nesta etapa começaram as medições efetuadas por este. Posteriormente, foram adicionados os suportes do sensor ótico, que se prevê ser o caso mais gravoso por todo o equipamento usado ter o maior peso, comparativamente aos restantes. Nesta fase, o modelo físico possui todo o equipamento descrito anteriormente. Na continuação deste processo, foram colocadas três cargas adicionais para desenvolver e prolongar o ensaio estático (Figura 3.24). Estas três cargas foram colocadas progressivamente, com o objetivo de efetuar três casos de carga diferentes e foram aplicadas na mesma localização, a 8,5825 metros da origem do modelo físico.

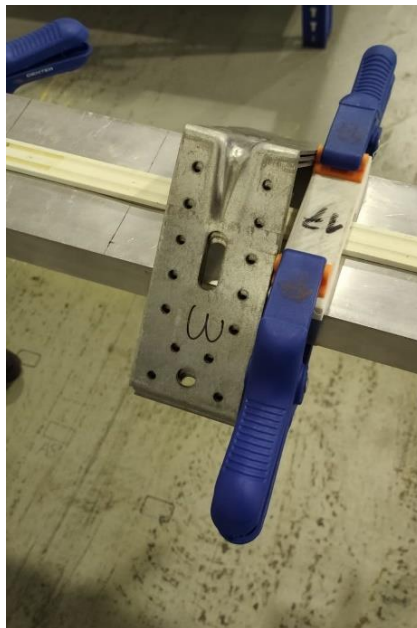


Figura 3.24 – Cargas concentradas do ensaio estático

As características individuais de cada carga, estão representadas na Tabela 3 e são designadas de carga P1, para a primeira carga aplicada, P2 para a segunda e P3 para a última carga aplicada na barra.

Tabela 3– Massa das cargas do ensaio estático

Carga	Massa [g]	Peso [kN]
P1	342,396	-0,00335776
P2	343,239	-0,00336603
P3	342,626	-0,00336001

Ao aplicar cada caso de carga, foi efetuado um intervalo de tempo para que a estrutura estabilizasse e pudessem ser feitas as medições necessárias.

3.3.2. ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE

O ensaio de vibração livre previsto para o modelo físico tem como principal objetivo identificar experimentalmente as frequências naturais da estrutura. No caso das pás eólicas, estas têm frequências naturais dependentes do eixo de vibração, ou seja, em *edge* e *flap*. Estas frequências naturais são frequências que as pás adotam quando são sujeitas a um impacto único, ou a um deslocamento inicial da sua posição indeformada, sem ser influenciada por forças externas [31]. Na realização do ensaio de vibração livre, a viga será induzida por um deslocamento inicial e por um impulso aplicado na ponta e nas duas direções em *edge* e em *flap*.

3.3.3. ENSAIO DE VIBRAÇÃO FORÇADA

O objetivo deste ensaio é caracterizar a resposta da estrutura sujeita a uma carga pontual dinâmica, que será induzida por um excitador mecânico (Figura 3.25).

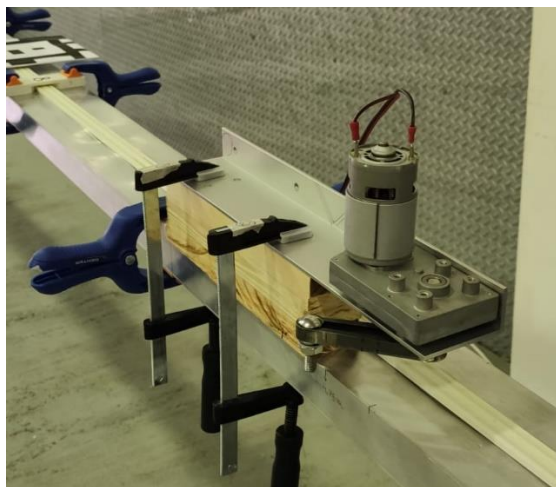


Figura 3.25 – Excitador mecânico

Este excitador será aplicado a meio vão da barra, de forma a identificar a voltagem necessária a aplicar ao excitador, com o objetivo de sincronizar a frequência natural da estrutura, respetivamente, em *flap* e em *edge*. A caracterização da resposta da estrutura é realizada através da medição simultânea da amplitude de deslocamentos em vários pontos da viga, quer através do sistema de monitorização baseado em fibras óticas, quer através de um sistema de monitorização de imagem, e do registo da voltagem crescente e disponível aplicado ao aparelho, ao longo do ensaio.

4.1. INTRODUÇÃO

Os softwares de cálculo que permitem a modelação dos mais diversos tipos de estruturas são ferramentas essenciais no mundo atual da engenharia civil, pois têm a capacidade de prever os mais variados fenómenos possíveis, dentro da capacidade de cada software e dos conhecimentos matemáticos utilizados por estes. Como tal, foi de extremo interesse realizar um modelo numérico baseado no modelo físico usado durante o estudo do sensor ótico para se prever as diversas reações deste aos ensaios que iriam ser efetuados, para se obter mais um meio de comparação com os diversos resultados obtidos nestes ensaios e também para conseguirmos perceber um pouco melhor a estrutura em si, visto ser uma estrutura incomum, devido à sua geometria e ao material usado nesta.

Para esta etapa, foram realizados dois modelos numéricos diferentes com o objetivo de simular o modelo físico, obter mais informações diferenciadas nestas simulações e também com o objetivo de comparar a informação dos dois modelos e, se possível, chegar a conclusões entre os dois. Ficou desde cedo planeado que os dois modelos seriam realizados no software SAP 2000. As principais vantagens do uso deste software foram a grande facilidade deste para definir os diferentes casos de carga numa análise não linear, algo útil para uma estrutura deste género, a fácil manipulação de toda a informação do programa, por vezes até através de folhas de Excel, facilitando o tratamento desta e também as suas análises dinâmicas a estruturas, sendo possível fazer a avaliação individual de cada modo de vibração. Inicialmente foi realizado um simples modelo de elementos de barras. Este modelo foi importante para a definição inicial da geometria complexa da barra, e a sua simplicidade foi útil inicialmente para aprendermos um pouco sobre os comportamentos do modelo físico. Mais tarde, surgiu a necessidade de fazer um modelo um pouco mais detalhado. Deste modo, através da geometria do modelo de barras foi criado um modelo de elementos de casca, que permitisse a criação de malhas, e assim, o uso do método dos elementos finitos para fazer a avaliação do modelo.

4.2. ANÁLISE NÃO LINEAR

Como referido anteriormente, a análise não linear teve uma grande importância na escolha do software a ser usado, neste caso, o SAP 2000. O estudo não linear de estruturas é importante para obtermos uma maior precisão da realidade possível, isto porque, os métodos lineares são apenas uma aproximação ao comportamento real das estruturas, o que para o dimensionamento e a verificação da segurança destas é

aceitável, visto que, pelo lado da segurança o sobredimensionamento é aceitável. No entanto, como está a ser realizado um estudo aprofundado do modelo físico, é essencial a utilização de um comportamento não linear da estrutura, neste caso, um comportamento não linear geométrico porque é espetável que as deformações da estrutura sejam muito elevadas.

Em análises lineares, a resistência do material estrutural usado está maximizada à análise elástica deste. Em estruturas metálicas, com materiais muito dúcteis como alumínio, sabemos que existe uma resistência plástica adicional, após o material ultrapassar a sua elasticidade. Em análises lineares, as deformações adicionais consequentes da ductilidade não são tidas em conta, sendo assim uma razão adicional para o uso duma análise não linear no estudo do comportamento da estrutura.

As boas práticas de modelação em conjunto com o manual do SAP 2000, aconselham que para estruturas muito esbeltas como o modelo físico em estudo, para além, de uma análise não linear seja também realizada uma análise que tenha em conta grandes deslocamentos [38].

4.3. GEOMETRIA

Inicialmente, é necessário conhecer as mais diversas dimensões do modelo físico para que a sua modelação seja possível. Ao fazer uma análise rigorosa a esta estrutura, torna-se ainda mais importante que a sua geometria seja corretamente modelada, principalmente quando o modelo físico em estudo tem uma forma fora do habitual.

No SAP 2000, a modelação da geometria é realizada utilizando coordenadas expressas em relação a um referencial ortogonal direto (x ; y ; z) para qualquer um dos nós que utilizemos para definir a forma do modelo. Definiu-se a origem do nosso modelo físico na secção de transição do dispositivo de suporte e o resto da barra e foi necessário que todas as medidas tiradas ao modelo fossem definidas em relação a esta secção inicial. Inicialmente, todas as coordenadas calculadas e medidas foram do eixo da secção, as quais foram utilizadas na construção do modelo de barras e na definição da forma inicial do modelo.

Para o troço retilíneo da barra o processo não foi difícil, devido à sua geometria simples. Com o ângulo de inclinação de $7,86^\circ$ e com as distâncias já referidas anteriormente, definiram-se três nós para a modelação deste troço. Um destes nós, é a origem do referencial, logo possui coordenadas (0; 0; 0) que, como já referido, diz respeito à secção entre o dispositivo de suporte e a barra. O segundo ponto diz respeito ao nó final do troço retilíneo e da transição para o troço curvilíneo, e tem coordenadas (2,965; 0; 0,409). O último ponto é a outra extremidade do troço retilíneo, e está no final do dispositivo de suporte, com as coordenadas (-0,9906; 0; -0,1368). Apesar do objetivo do modelo físico, e do dispositivo de suporte presente neste ser de simular uma consola encastrada, decidiu-se modelar a parte da barra que está associada ao sistema de suporte e modelar os apoios de forma mais real, em vez de se considerar um encastramento perfeito (Figura 4.1).

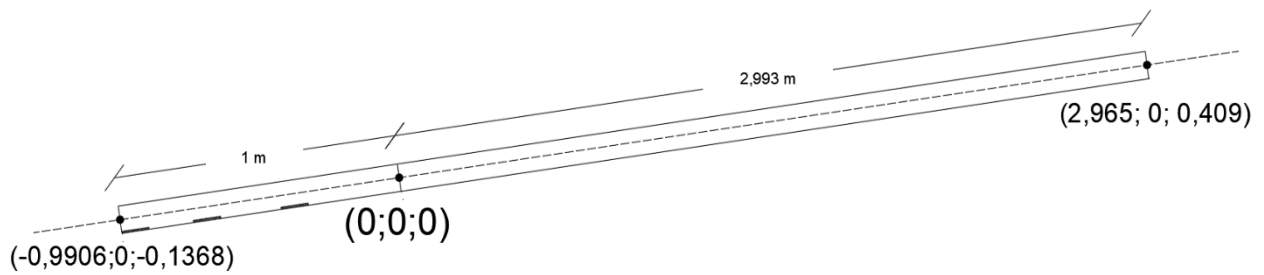


Figura 4.1 – Coordenadas do trecho retilíneo

O trecho curvilíneo da barra foi o que causou maior dificuldade inicial na modelação. A sua geometria curva, fez com que fosse impossível calcular de forma precisa as coordenadas de vários pontos em relação à origem do modelo, portanto, foi necessário utilizar um método um pouco mais complicado. Fez-se a desmontagem do trecho curvilíneo do restante modelo físico, colocou-se este numa bancada de trabalhos (Figura 4.2) e nesta marcou-se à volta do modelo a sua posição para que não houvesse alterações nesta e assim, efetuar erro nas medições.



Figura 4.2 – Troço curvilíneo na bancada de trabalhos

Com um comprimento total de 6,005 metros, o trecho curvilíneo, foi dividido em seis troços com aproximadamente um metro cada, criando assim setes pontos de medição, sendo que um deles é a interceção com o trecho retilíneo e já temos as coordenadas finais deste. Os seis pontos restantes, são os pontos que no final irão definir a geometria do trecho curvilíneo no modelo numérico. Para efetuar as medições destes pontos, foi criado um sistema de eixos para organizar estas e obter coordenadas, como representado na Figura 55.

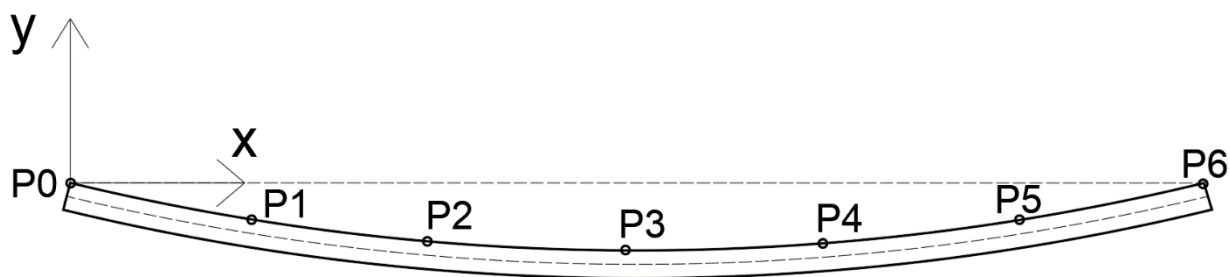


Figura 4.3 – Posição dos pontos medidos em relação aos eixos definidos

Dado que os pontos medidos não eram do eixo central da secção, portanto, foi ainda necessário fazer a sua translação até este eixo. Foram obtidos os resultados presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas dos pontos medidos

Pontos	X	Y
P0	0	0
P1	0,933	-0,1185
P2	1,985	-0,214
P3	2,984	-0,255
P4	3,981	-0,231
P5	4,979	-0,145
P6	5,978	0

Após as medições efetuadas nas bancadas de trabalho, e tiradas coordenadas locais do troço curvilíneo, é necessário colocar estas na posição em que se encontra realmente o troço. Inicialmente, foi necessário realizar uma rotação de eixos, para que teoricamente, o troço curvilíneo ficasse na sua posição real. Esta posição teórica, foi considerada a partir de o ângulo de inclinação inicial de $7,86^\circ$. Como o troço retilíneo apresenta ao longo de todo o seu comprimento esta inclinação, o troço inicial, entre P0 e P1, da parte curvilínea deverá ter a continuação dessa mesma inclinação, e assim, é possível efetuar uma simples rotação de eixos (Figura 4.4) usando uma matriz de rotação, resultando no cálculo direto das novas coordenadas dos seis pontos.

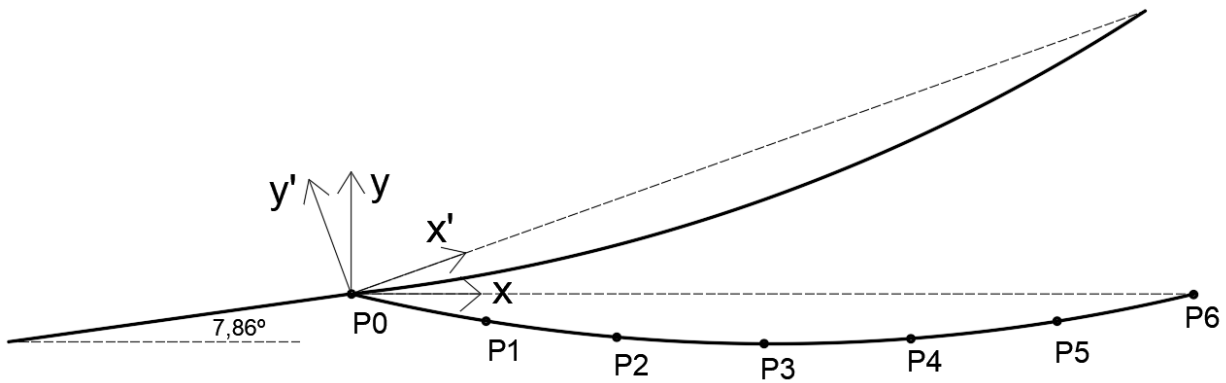


Figura 4.4 – Rotação de eixos para a posição real

O ângulo de rotação será o ângulo de inclinação inicial mais o ângulo da primeira parte do troço curvilíneo (θ_1). Este é possível calcular através das coordenadas de P1.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{0,1185}{0,993}\right) = 6,805^\circ$$

$$\theta = 7,86^\circ + 6,805^\circ = 14,665^\circ$$

Com o ângulo de rotação definido, falta apenas aplicar a matriz de rotação aos pontos medidos inicialmente. Sendo este, um passo que se trata em apenas duas dimensões, a matriz de rotação necessária é a seguinte:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

O ponto P0, continuará com as mesmas coordenadas tratando-se do ponto de origem do eixo usado. Os restantes pontos terão novas coordenadas e para haver diferenciação, em relação aos anteriores, estes serão identificados da seguinte forma (P'1; P'2; P'3; P'4; P'5; P'6). O cálculo das coordenadas destes pontos foi efetuado no Excel de uma forma automatizada, mas, para a confirmação de resultados, foi efetuado o cálculo manual para o ponto P'1.

$$x'_1 = \cos 14,665^\circ \times x_1 - \sin 14,665^\circ \times y_1 = 0,932605077$$

$$y'_1 = \sin 14,665^\circ \times x_1 + \cos 14,665^\circ \times y_1 = 0,121568992$$

Resultando assim, no ponto P'1, com coordenadas (0,932605077; 0,121568992). Os resultados de todas as rotações de coordenadas, estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Coordenadas dos pontos depois da rotação de eixos

Pontos'	x'	y'
P'0	0	0
P'1	0,93260508	0,121568992
P'2	1,97451039	0,295516017
P'3	2,95134455	0,50876946
P'4	3,90978775	0,784398963
P'5	4,85350178	1,120261774
P'6	5,78324615	1,51345563

O Excel, foi uma ferramenta bastante útil, na resolução de cálculos de natureza geométrica porque, para além da automatização destes, permitiu através de gráficos (Figura 4.5), a interpretação dos resultados de uma forma mais elucidativa e ajudou a perceber se estes faziam sentido e se estariam corretos. Neste passo, ao realizarmos gráficos com as coordenadas antigas (linha azul) e com as coordenadas rodadas (linha laranja), é possível perceber a rotação total do troço retilíneo e que o processo utilizado foi corretamente executado e o objetivo inicial cumprido.

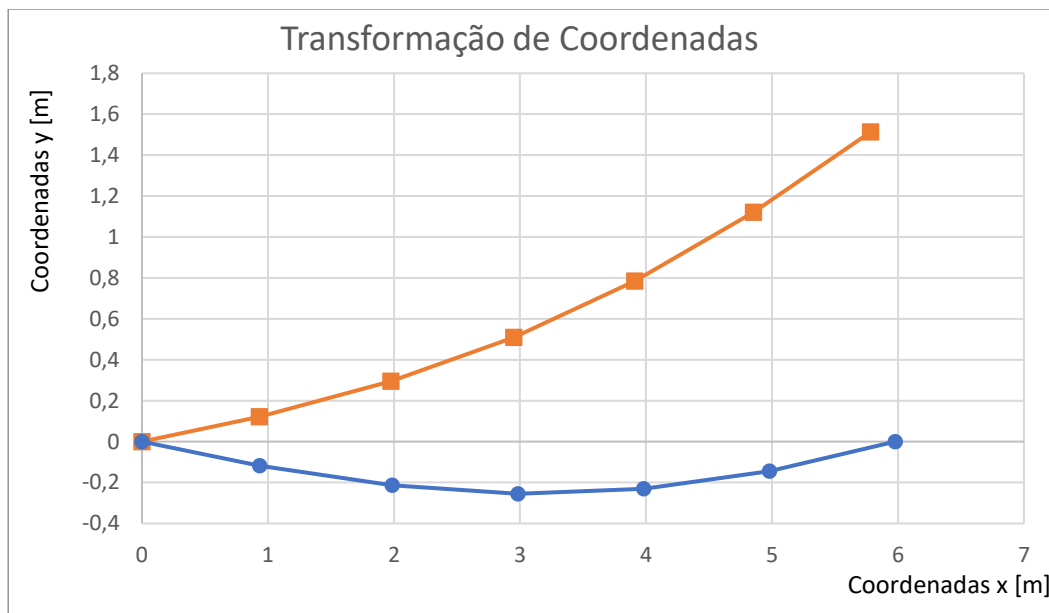


Figura 4.5 – Gráfico com as coordenadas antes e depois da rotação de eixos

Para a conclusão do processo geométrico todo, falta apenas aplicar uma translação do eixo utilizado na rotação de coordenadas para o eixo real, que se encontram no troço retilíneo. Esta é a etapa mais fácil, e

simplesmente, é dado para o ponto P'0 as suas coordenadas reais já calculadas anteriormente para o troço retilíneo, ficando assim com as coordenadas (2,965; 0,409). Para os restantes pontos, é apenas necessário a adição das coordenadas locais já calculadas às coordenadas do ponto P'0, para obter as suas coordenadas finais. Estas coordenadas encontram-se representadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Coordenadas dos pontos finais

Pontos finais	Xf	Zf
P0	2,965	0,409
P1	3,898	0,531
P2	4,940	0,705
P3	5,916	0,918
P4	6,875	1,193
P5	7,819	1,529
P6	8,748	1,922

Com os pontos finais de todo o modelo físico, é agora possível começar a sua modelação geométrica no SAP 2000.

Antes de entrar em detalhe para cada um dos modelos realizados, é importante esclarecer as opções de modelação que são comuns aos dois modelos.

A primeira característica que tem de ser comum aos dois modelos, é o material usado na modelação destes. As características da liga de alumínio usada já foram referidas anteriormente neste documento, e na modelação foram usadas estas na definição do material a ser usado para toda a estrutura com o nome de 6060-T66 (Figura 4.6).

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 6060T66

Material Type: Aluminum

Material Grade: Alloy 6060 T66

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 26,478

Mass per Unit Volume: 2,7

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 70000000

Poisson, U: 0,3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 2,300E-05

Shear Modulus, G: 26923077

Other Properties For Aluminum Materials

Aluminum Type: Wrought

Aluminum Alloy Designation: 6060-T66

Compressive Yield Strength, Fcy: 160000

Tensile Yield Strength, Fty: 160000

Tensile Ultimate Strength, Ftu: 215000

Shear Ultimate Strength, Fsu: 160000

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 4.6 – Definição do material no SAP2000

É importante salientar, no entanto, as principais características do material. Como o coeficiente de Poisson (ν) com o valor de 0.3, o módulo de Young (E) com 70000 MPa e a densidade (ρ) de $2,70 \text{ g/cm}^3$ que terá extrema importância no cálculo do peso próprio e também nas análises dinâmicas do modelo.

Outra opção da modelação que será comum aos dois modelos, são os casos de carga considerados para a avaliação destes. Como referido anteriormente, a massa de grande parte do equipamento usado no modelo físico foi considerada nos casos de carga e mais tarde também, foram consideradas as cargas usadas no ensaio estático. Para a modelação, é importante definirmos os casos de carga e organizarmos corretamente as cargas definidas em cada um deles, com o objetivo de não existirem diferenças entre os dois modelos. Ao realizar uma análise não linear no SAP 2000, é possível colocar uma ordem de carregamento dos casos de carga usados. Esta funcionalidade foi usada para simular a montagem do modelo físico e a colocação das cargas uma de cada vez. A ordem em que serão referidos os diferentes casos de carga, é a ordem em que estes foram definidos no modelo numérico.

O caso de carga inicial é denominado por “DEAD”, e é um caso de carga que o software usa para fazer o cálculo automático da estrutura modelada, usando as propriedades do material, portanto, este caso de carga é referente apenas ao peso próprio teórico da estrutura. No entanto, como o caso de carga anterior é calculado de forma automática pelo SAP 2000, as imperfeições e alguns detalhes do modelo físico não serão contabilizados para este. O caso de carga seguinte tem o nome de “Massas”, e o seu objetivo é aplicar as cargas dos detalhes do modelo físico que contribuem para o peso próprio, mas que não são realizados no

primeiro caso de carga. Por exemplo, a peça usada na transição dos dois troços, vai ter influência no peso próprio da estrutura e a sua massa terá influência na análise dinâmica. Depois de definirmos estes dois casos, que dizem respeito apenas ao peso próprio do modelo físico, foi definido um caso de carga com o nome de “Alvos”. Este caso diz respeito à aplicação dos pesos dos alvos usados pelo sistema de imagem para seguir os movimentos da barra. Este equipamento foi o primeiro a ser colocado, para podermos obter informação do sistema de imagem para os seguintes casos de carga a ser colocados. O caso de carga seguinte diz respeito à colocação do sensor ótico, denominado de “sensor” e posteriormente, foram colocados os suportes deste, com o nome de “suportes”. Todos estes casos de carga são a base do modelo físico, pois todo este equipamento foi usado durante os ensaios realizados. Posteriormente, na realização destes, foram definidos os casos de carga com os nomes “confP1”, “confP2” e “confP3”, que dizem respeito à aplicação das três cargas usadas na execução do ensaio estático.

As condições de fronteira usadas nos dois modelos são outra característica que deve ser comum para os dois modelos realizados. A barra está apenas conectada ao dispositivo de suporte por ligações soldadas, então os apoios considerados para a sua modelação devem ter o objetivo de simular a ligação efetuada pelos cordões de soldadura. Cada cordão de soldadura tem o comprimento 10,5 centímetros, e a sua modelação foi efetuada colocando três apoios duplos no intervalo deste comprimento, nas localizações de cada cordão de soldadura. Foram considerados dois apoios duplos nas extremidades de cada cordão e outro exatamente a meio do seu comprimento (Figura 4.7).

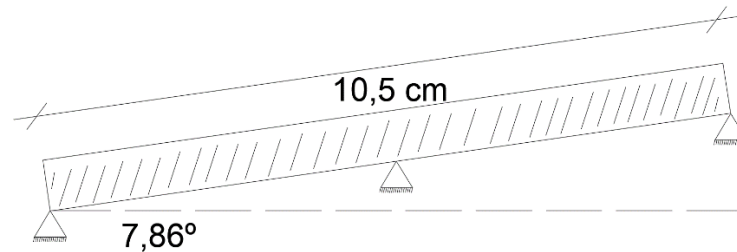


Figura 4.7 – Definição dos apoios em correspondência com os cordões de soldadura

No entanto, no modelo numérico de barras, a barra é apenas representada no seu eixo neutro da secção. Então, foram apenas modelados quatro cordões de soldadura no eixo da secção ao contrário do que acontece na realidade em que os pares de cordões de soldadura se encontram nas extremidades inferiores da secção. Para o modelo de casca, é possível fazer uma modelação mais real e definir os oito cordões de soldadura como no modelo físico.

4.4. MODELO DE BARRAS

A execução do modelo de barras foi a primeira a ser realizada. Este modelo permitiu definir a estrutura geométrica do modelo através do eixo neutro de toda a barra e permitiu executar uma análise inicial do comportamento da estrutura, com o objetivo de perceber de uma forma simples as suas características iniciais.

A expectativa inicial para este modelo, sendo um modelo mais simples, seria de que os seus resultados não fossem tão exatos comparativamente ao modelo de casca, que apresenta um maior detalhe na sua modelação. Isto porque, ao modelar os diferentes aspetos, como cargas aplicadas no modelo e até o posicionamento dos apoios da barra, estamos a trabalhar sempre em relação ao eixo geométrico das secções, obrigando o modelo a fazer uma distribuição dos esforços que poderá não ser a mais aproximada da realidade.

4.4.1. DEFINIÇÃO DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Posteriormente à definição geométrica do modelo foi necessário definir as secções transversais das barras utilizadas neste. Como referido anteriormente, após efetuadas medições no modelo físico chegou-se à conclusão de que na realidade existem duas secções transversais diferentes ao longo da barra e que são diferentes da secção transversal teórica que foi dimensionada inicialmente.

No troço retilíneo da barra a secção transversal possui 39 milímetros de altura e 101 de largura, com 2 milímetros de espessura. Ao usar as ferramentas do modelo, foi possível definir esta secção facilmente (Figura 4.8).

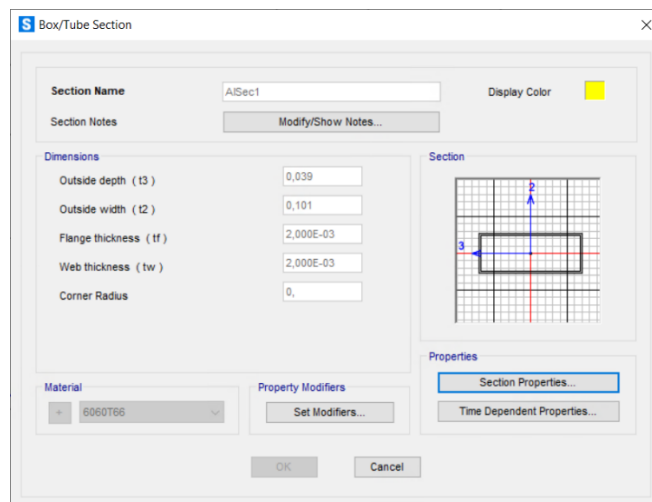


Figura 4.8 – Definição da secção transversal do troço retilíneo

Para confirmar que a secção foi definida corretamente, foram consultadas as propriedades calculadas pelo software (Figura 4.9) para esta e verificou-se que a sua área e o seu momento de inércia do eixo Z, que no modelo é denominado por eixo 3, apresentam valores iguais aos calculados manualmente e referidos anteriormente. Confirmando assim, que a sua definição no SAP 2000 está correta.

Property Data

Section Name: AISec1

Properties

Cross-section (axial) area	5,440E-04	Section modulus about 3 axis	7,831E-06
Moment of Inertia about 3 axis	1,527E-07	Section modulus about 2 axis	1,359E-05
Moment of Inertia about 2 axis	6,865E-07	Plastic modulus about 3 axis	8,699E-06
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	1,713E-05
Shear area in 2 direction	1,560E-04	Radius of Gyration about 3 axis	0,0168
Shear area in 3 direction	4,040E-04	Radius of Gyration about 2 axis	0,0355
Torsional constant	3,946E-07	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

OK

Figura 4.9 – Propriedades da secção transversal do troço retilíneo

Para o troço curvilíneo, foi efetuado exatamente o mesmo processo com as medições correspondentes à sua secção. E pela verificação das propriedades calculadas pelo software, foi também possível confirmar que o seu dimensionamento foi efetuado corretamente.

Box/Tube Section

Section Name: AISec2

Section Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Display Color: ■

Dimensions

Outside depth (t3) : 0,038

Outside width (t2) : 0,101

Flange thickness (tf) : 2,000E-03

Web thickness (tw) : 2,000E-03

Corner Radius : 0,

Material

6060T66

Property Modifiers

[Set Modifiers...](#)

Section

[Section Properties...](#)

[Time Dependent Properties...](#)

OK Cancel

Figura 4.10 – Definição da secção transversal do troço curvilíneo

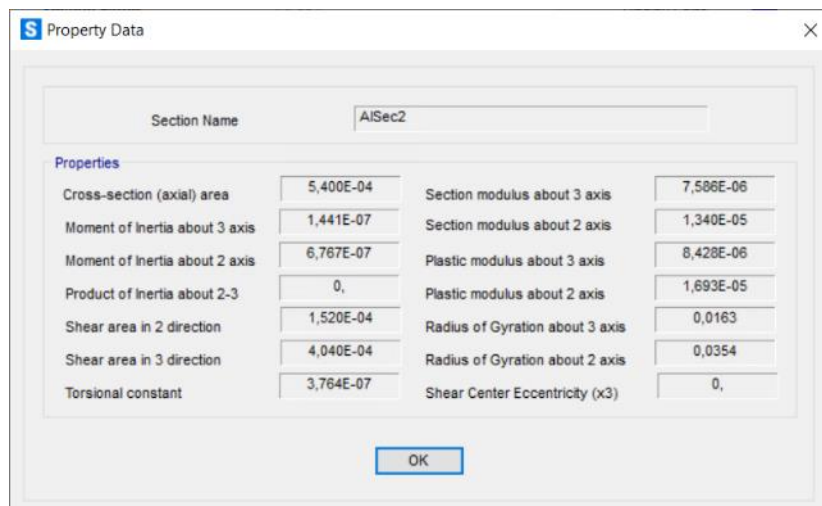


Figura 4.11 – Propriedades da secção transversal do troço curvilíneo

Após realizados estes passos e a definição dos apoios da forma descrita anteriormente, é possível verificar visualmente a partir do software o aspeto do modelo (Figura 4.12) e se este faz sentido.

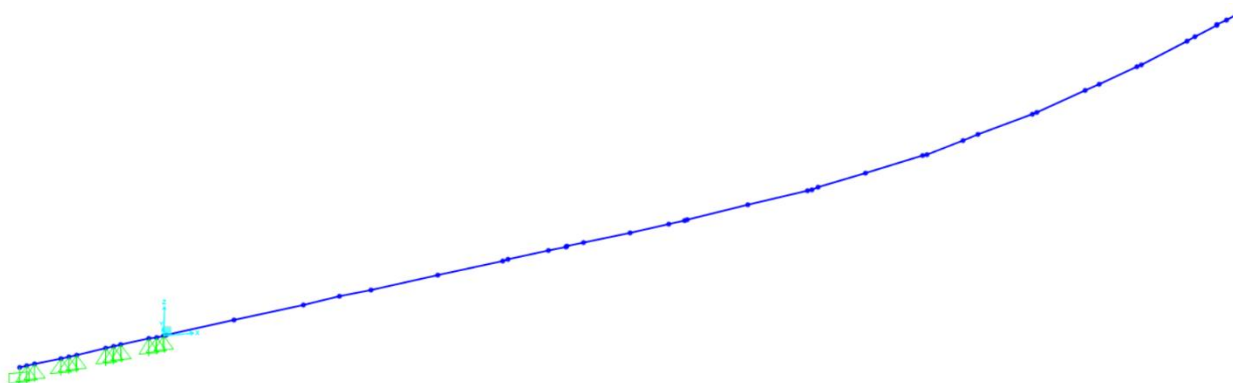


Figura 4.12 – Definição do centro geométrico do modelo de barras

Ao verificar a sua forma geométrica, esta faz sentido, apesar de se encontrar na posição indeformada, que na realidade nunca é atingida pelo modelo físico devido ao peso próprio e a elevada deformabilidade deste. Nesta fase, foi possível concluir que, para a realização de ensaios e medições, seria quase impossível colocar o modelo físico nesta posição indeformada, por esta ser muito específica e muito complexa de atingir na realidade.

Definida a geometria do modelo numérico, é possível começar a criar os casos de carga definidos anteriormente. A aplicação de cargas será sempre efetuada no centro geométrico de onde estas são aplicadas no modelo real, e para a sua aplicação é necessário modelar um nó na sua localização. O caso de carga “DEAD”, que calcula automaticamente o peso próprio da estrutura, foi efetuado primeiro com o objetivo de comparar com medições de massa efetuadas no modelo físico. No total foram adicionadas três cargas devido a imperfeições geométricas que não são possíveis modelar. A primeira diz respeito às ligações

aparafusadas usadas na conexão dos dois troços da barra. Os parafusos foram pesados e contam com um peso de $0,001233 \text{ kN}$ (Figura 4.13).

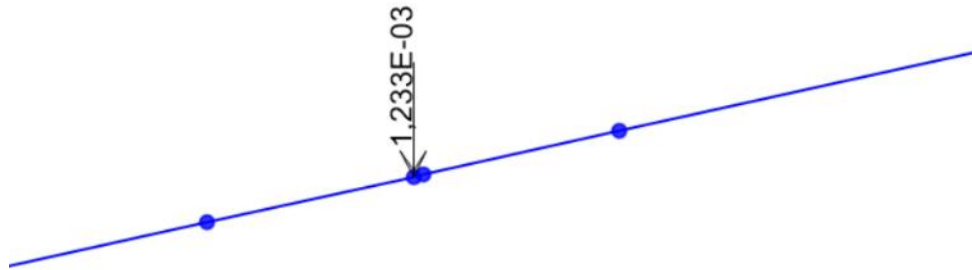


Figura 4.13 – Aplicação da carga dos parafusos

As outras duas cargas necessitaram de ser medidas usando métodos indiretos. Para efetuar a medição da barra maciça que se encontra no interior do modelo físico para fazer a conexão entre os dois troços e está soldada ao troço retilíneo, foi efetuada a medição da massa total do troço retilíneo, que apresenta 14 kg . A esta massa total foi retirado o peso próprio da barra calculado pelo modelo, com o valor de $0,01423 \text{ kN/m}$, o peso próprio do troço a que a barra está soldada e também retirado o peso próprio das soldaduras. Para calcular as massas destes, foi calculado o volume de cada peça e multiplicou-se este pela densidade da liga de alumínio EN-AW 6060 T66. O resultado final para a barra maciça foi de $3,1382 \text{ kg}$, que equivale a $0,1143 \text{ kN/m}$ (Figura 4.14).

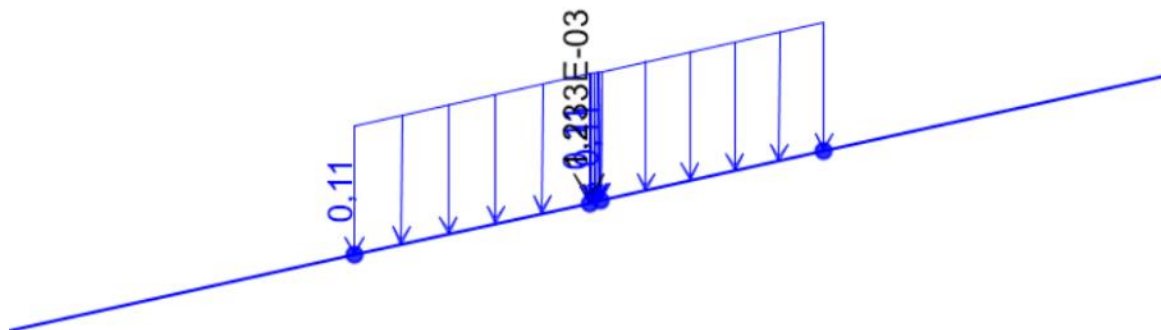


Figura 4.14 – Aplicação da carga da peça de ligação

Na extremidade final do troço curvilíneo, existe um dispositivo soldado para facilitar o manuseamento da barra (Figura 4.15).



Figura 4.15 – Gancho soldado à ponta final da barra

Por se encontrar localizado exatamente na extremidade do modelo físico, é previsível que este terá uma grande influência para os resultados do modelo, portanto a caracterização deste é muito importante. Para obtermos a sua massa, foi medida a massa total do troço curvilíneo da barra. Este possui 9,1 kg, que com o comprimento de 6,010 metros equivale a 0,0149 kN/m. No software, o peso próprio do modelo é de 0,01423 kN/m. Podemos assim concluir que o peso concentrado desta imperfeição será de $4,0267 \times 10^{-3} \text{ kN}$ (Figura 4.16).

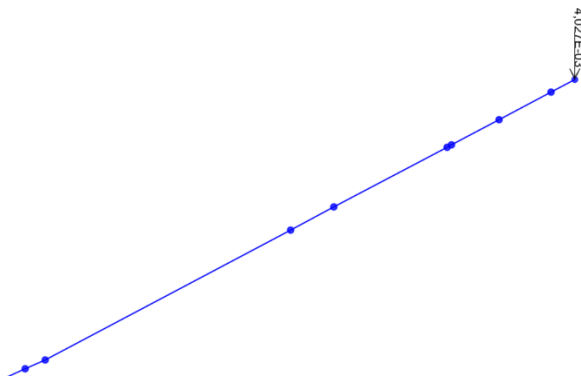


Figura 4.16 – Aplicação da carga do gancho

O caso de carga “Alvos” diz respeito à aplicação do peso dos alvos do sistema de imagem. A parte mais complicada da sua modelação foi definir a localização de cada um dos nós onde seriam aplicadas as cargas de cada um dos alvos. Durante este processo foi usada a ferramenta do SAP 2000 para a divisão das barras,

O caso de carga correspondente ao sensor ótico, foi definido apenas por uma carga distribuída ao longo do comprimento de todo o modelo (Figura 4.18).

E por último, os suportes do sensor ótico foram modelados de forma semelhante aos alvos do sistema de imagem, ou seja, recorrendo à ferramenta de divisão de barras. Como estes se encontram num intervalo de meio em meio metro, os nós criados para este caso foram uma ajuda quando era necessário definir uma localização nova no modelo (Figura 4.19).

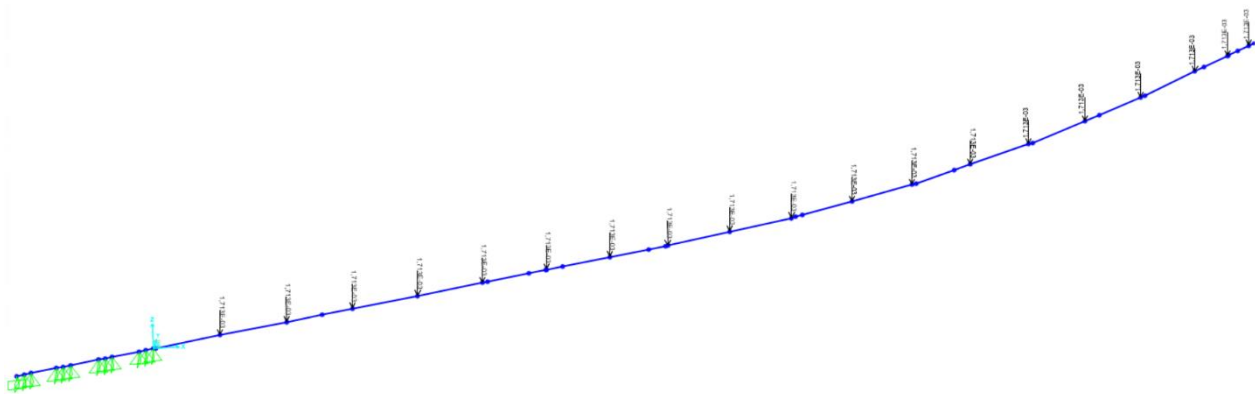


Figura 4.19 – Caso de carga dos suportes do sensor

Ainda em relação à definição dos casos de carga, o SAP 2000 tem uma funcionalidade muito interessante para o estudo do modelo físico. É possível interligar e enquadrar todos os casos de carga pela ordem pretendida (Figura 4.20), ou seja, podemos aplicar um caso de carga a seguir ao outro, que foi exatamente o que foi efetuado durante a montagem do modelo físico.

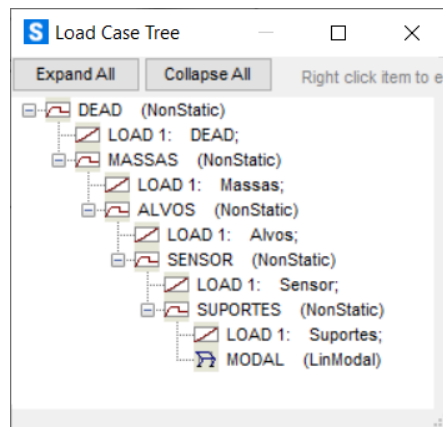


Figura 4.20 – Árvore de casos de carga

Todas as cargas aplicadas no modelo numérico são, na realidade, cargas provenientes da massa dos equipamentos usados ou do próprio modelo físico. Este detalhe é de extrema importância para a análise modal no modelo numérico, visto que a massa aplicada tem um impacto importante na ação dinâmica de qualquer estrutura. Ao definir o caso de carga modal no SAP2000, o software assume uma fonte de massa padrão que diz respeito apenas ao peso próprio calculado automaticamente por este. É, portanto, necessário definir uma fonte de massa para o modelo que contém todas as cargas correspondentes aos equipamentos e imperfeições que não foram contabilizados no peso próprio da estrutura. Ao definir esta fonte de massa, apenas é necessário definir os casos de carga que queremos que sejam contabilizados como massas no modelo, e assim, estas cargas aplicadas com o objetivo de simular os equipamentos usados, vão também

considerar estas como massa adicional no modelo (Figura 4.21). Os casos de carga escolhidos para a fonte de massa foram o caso “Massas”, visto que o objetivo deste é contabilizar as cargas referentes ao peso próprio que não são contabilizadas automaticamente pelo modelo e todos os casos de carga que dizem respeito a equipamento que foi usado na realização de todos os ensaios.

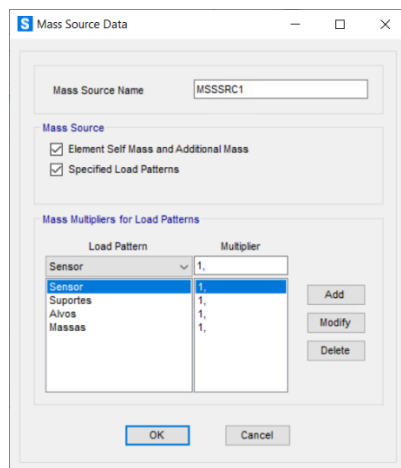


Figura 4.21 – Definição da fonte de massa

No caso do SAP 2000, as massas que são caracterizadas no modelo são distribuídas pelos vários nós da estrutura. Isto permite, que ao verificar as tabelas de resultados, seja possível verificar a massa atribuída a cada nó e também a massa total considerada no modelo. No caso do modelo de barras, com todas a fonte de massa definidas corretamente, a massa total deste é de 24,06 kg (Figura 4.1).

Joint Text	MassSource	U1 KN-s2/m	U2 KN-s2/m	U3 KN-s2/m	R1 KN-m-s2	R2 KN-m-
48	MSSSRC1	0,001127	0,001127	0,001127	0	
SumAccelUX	MSSSRC1	0,02406	0	0	0	
SumAccelUY	MSSSRC1	0	0,02406	0	0	
SumAccelUZ	MSSSRC1	0	0	0,02406	0	

Figura 4.22 – Massa total do modelo de barras

Após todos estes passos, é possível calcular o modelo numérico e obter alguns resultados para fazer uma interpretação inicial do comportamento que será esperado do modelo físico durante a realização dos ensaios. Inicialmente, verificamos qual seria a deformada do modelo no seu extremo suspenso, para o caso de carga

“Suportes”, que engloba todo o equipamento que será usado para os ensaios e o peso próprio do modelo (Figura 4.23). Esta, segundo o modelo numérico, terá uma deformada vertical máxima negativa de 1,8868 metros. Apesar de sabermos desde o início que a barra apresentava uma deformabilidade muito elevada, este valor continua a ser surpreendente, visto se tratar de um deslocamento muito elevado, algo raro na engenharia civil.

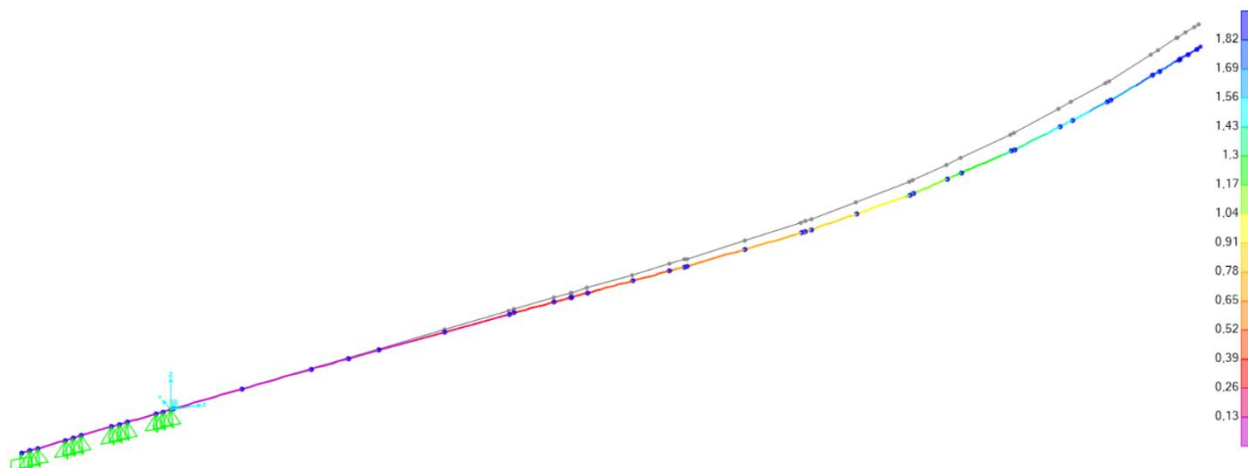


Figura 4.23 – Deformada do caso de carga “Suportes”

Outro valor que tivemos interesse em verificar, foi a frequência do primeiro modo de vibração da estrutura. Esta tem o valor 0,46396 Hz e comporta-se na direção de *flap*. Esta frequência apresenta o valor muito baixo, fazendo sentido por se tratar de uma estrutura muito flexível.

4.5. MODELO DE CASCA

A modelação da barra em estudo com elementos finitos de casca é um processo mais complexo comparativamente ao modelo de barras, tanto que durante a sua modelação inicial os valores obtidos não estariam totalmente corretos, pelo que foi necessária uma calibração dos modelos numéricos, resultando em algumas alterações cruciais no modelo de casca até à sua forma final aqui apresentada. O processo de calibração destes será explorado no capítulo 5 deste documento. A definição da geometria deste passa pela construção da estrutura completa do modelo físico e permite a realização de uma malha de elementos finitos que deverá ser ajustada para a obtenção de resultados mais detalhados. Este modelo permite também a obtenção de resultados em pontos específicos de todas as faces do modelo e em diversos pontos da secção transversal, portanto, é expectável que este modelo tenha uma precisão maior do que o modelo de barras. Será então interessante, a comparação dos dois modelos com os resultados obtidos nos ensaios.

4.5.1. DEFINIÇÃO DO MODELO E DA MALHA

A modelação geométrica do modelo de casca foi realizada tendo por base o modelo de barras efetuado anteriormente. A geometria deste, como já referido, foi feita para o centro geométrico das secções transversais do modelo físico, então é necessário efetuar a translação deste modelo quatro vezes para definir as coordenadas dos vértices das quatro faces de que o modelo é composto. Para as faces superior e inferior, efetuou-se uma translação de 19,5 milímetros positiva segundo o eixo Z, para a face superior e o contrário para a face inferior no troço retilíneo. Para o troço curvilíneo da barra, foi efetuado o mesmo processo com uma translação de 19 milímetros. Na definição das faces laterais a translação efetuada a partir do eixo geométrico da secção transversal foi de 50,5 milímetros segundo o eixo Y para todos os troços da barra. Após este processo efetuado, temos quatro elementos de barra que representam as quatro faces do perfil transversal do modelo. O SAP 2000, possui uma ferramenta com o nome de *extrude*, que permite transformar elementos de barra em áreas e esta foi usada para definir as faces do perfil como áreas, terminando assim, a modelação geométrica da barra.

Com as áreas geradas, é necessário atribuir as características corretas às mesmas. Inicialmente, definem-se estas como elementos de casca fina, atribuindo uma espessura de 2 milímetros a estas e seleciona-se o material de que estas são compostas (Figura 4.24).

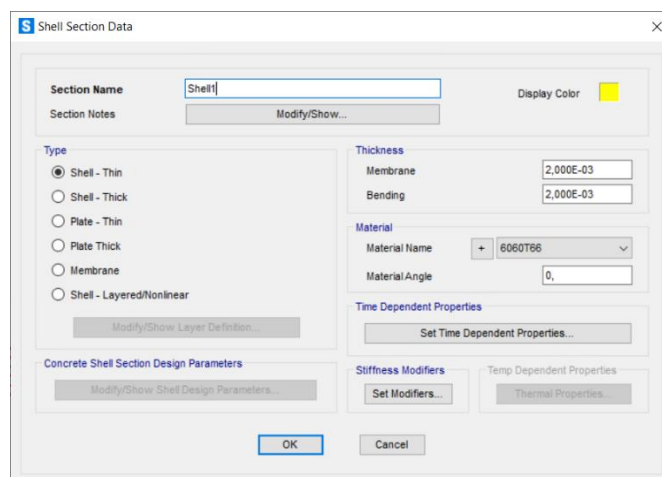


Figura 4.24 – Definição das características dos elementos de casca

Com a geometria principal acabada, verifica-se que o modelo de casca apresenta uma forma mais detalhada do modelo físico como esperado e a sua geometria parece estar correta (Figura 4.25).

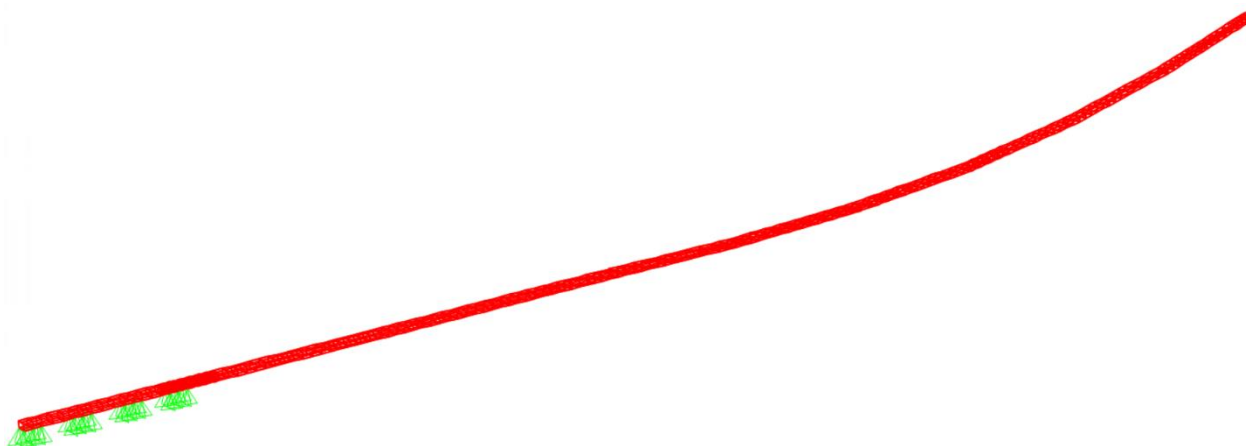


Figura 4.25 – Geometria indeformada do modelo de casca

O modelo de casca permite também, a modelação dos apoios da barra de uma maneira mais semelhante à realidade. No entanto, foi escolhido o mesmo método usado para o modelo de barras, em que cada cordão de soldadura é representado por três apoios duplos no seu comprimento e foram modelados no eixo de simetria da secção transversal, na face inferior (Figura 4.26). A possibilidade de modelar os apoios de uma forma mais aproximada à realidade foi explorada, mas os seus resultados não foram satisfatórios. Esta opção será explorada no capítulo 5 deste documento.

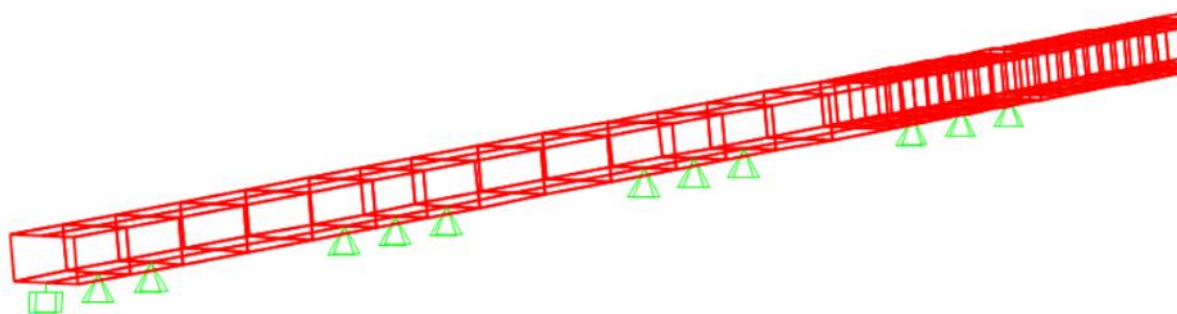


Figura 4.26 – Pormenor da modelação dos apoios

Inicialmente foi feita uma malha de elementos finitos manualmente com o objetivo de fazer uma discretização mais simples e também para formar nós nas suas interseções que tivessem as localizações necessárias para a atribuição de cargas. Posteriormente, foi realizada uma malha automática gerada pelo modelo, com uma discretização mais complexa em que cada elemento de casca tinha uma proporção, entre a sua largura e comprimento, próxima de um, visto que é o aconselhado pelo manual do SAP 2000 para a obtenção de resultados mais coerentes. Esta malha automática só é executada quando o software corre o modelo e calcula os resultados, o que é uma mais-valia para trabalhar mais facilmente no modelo enquanto

este não está pronto para ser executado. Na zona de transição entre os apoios e zona em que a barra fica suspensa, foi efetuada uma malha mais pequena (Figura 4.1), dado prever-se ser esta a zona com tensões mais elevadas e é onde se encontra a secção transversal crítica de todo o modelo. Então é benéfico ter uma malha mais pequena para a obtenção de resultados.

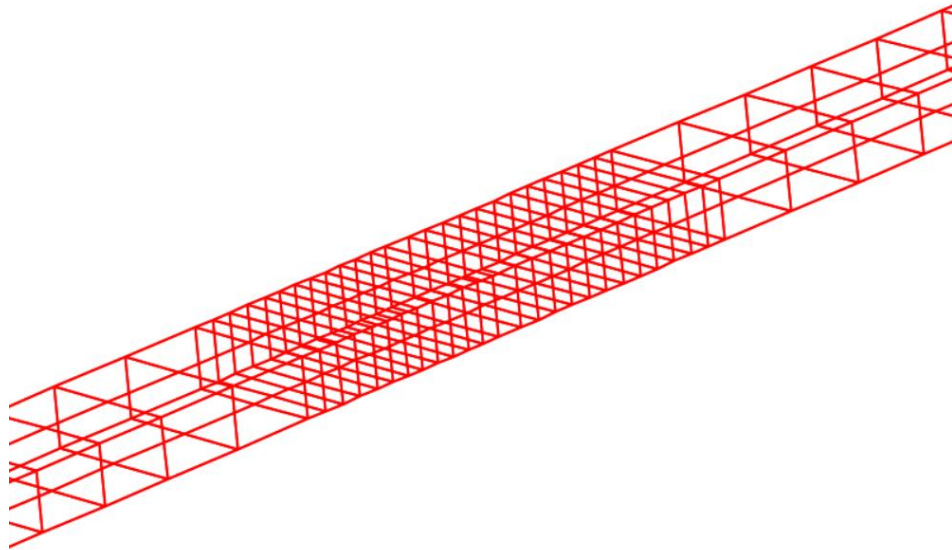


Figura 4.27 – Detalhe da malha na zona inicial de apoio do modelo

O processo de definição de cargas é muito semelhante ao usado para o modelo de barras, com exceção das cargas distribuídas. O modelo de casca não possui elementos de barras, então as cargas distribuídas que foram usadas nestes elementos têm que ser transformadas em cargas distribuídas por áreas e aplicadas nos elementos de casca.

Inicialmente, as imperfeições geométricas do modelo foram modeladas, começando pelas cargas correspondentes aos parafusos da peça de ligação dos dois troços e do gancho que se encontra soldado na ponta da barra (Figura 4.28), foram consideradas cargas concentradas como no modelo de barras e foram aplicadas na face superior do modelo.

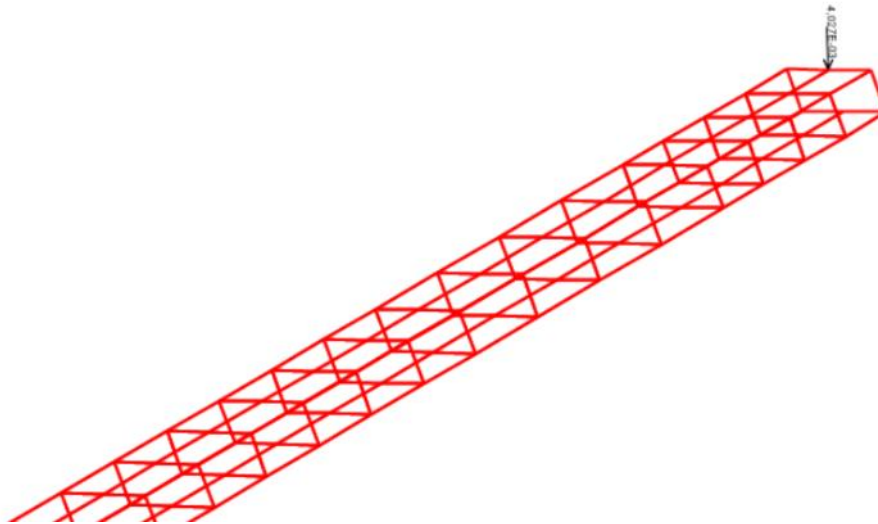


Figura 4.28 – Aplicação da carga do gancho no modelo de casca

No entanto, a peça maciça de ligação entre os dois troços foi alterada para uma carga distribuída por área, com o valor de $1,143 \text{ kN/m}^2$ (Figura 4.29).

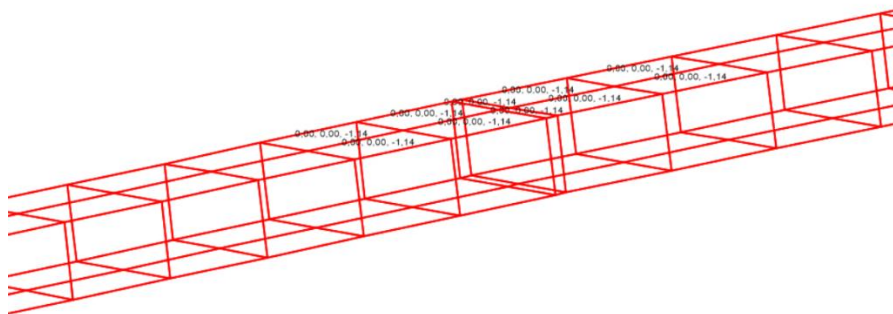


Figura 4.29 – Aplicação da carga da peça de ligação no modelo de casca

O caso de carga dos alvos do sistema de monitorização de imagem, foi aplicado da mesma forma que no modelo de barras (Figura 4.30), como cargas concentradas na face superior do modelo e no eixo de simetria desta.

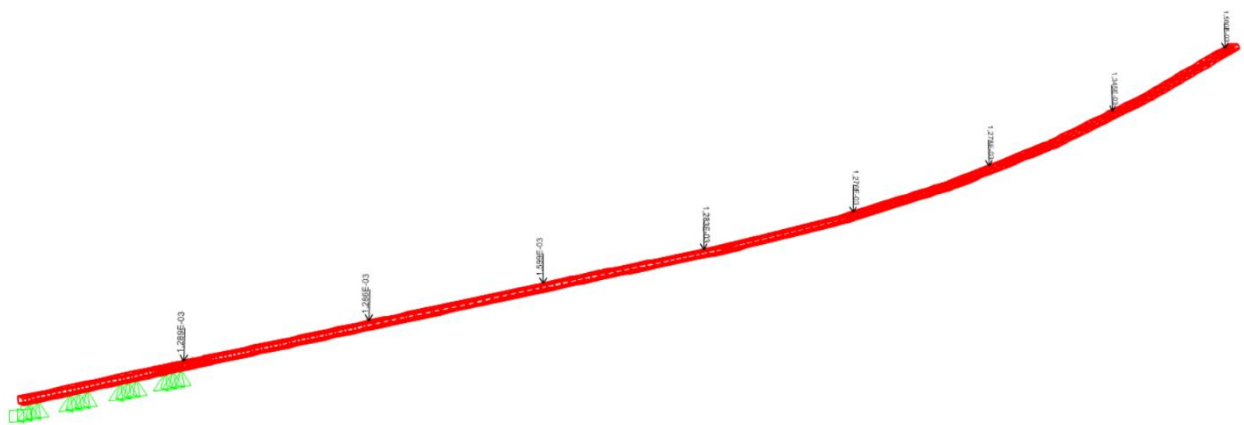


Figura 4.30 – Caso de carga dos alvos de imagem no modelo de casca

Para a simulação da massa do sensor ótico, foi efetuada a mesma alteração que na peça interior de ligação, ou seja, a sua carga distribuída foi alterada para uma carga distribuída em área que percorre todo o comprimento do modelo e foi aplicada na face superior com o valor de $0,01728 \text{ kN/m}^2$ (Figura 4.31).



Figura 4.31 – Aplicação da carga do sensor no modelo de casca

Para o caso de carga referente aos suportes do sensor ótico, as cargas mantiveram-se concentradas e o processo foi o mesmo utilizado no modelo de barras (Figura 4.32).

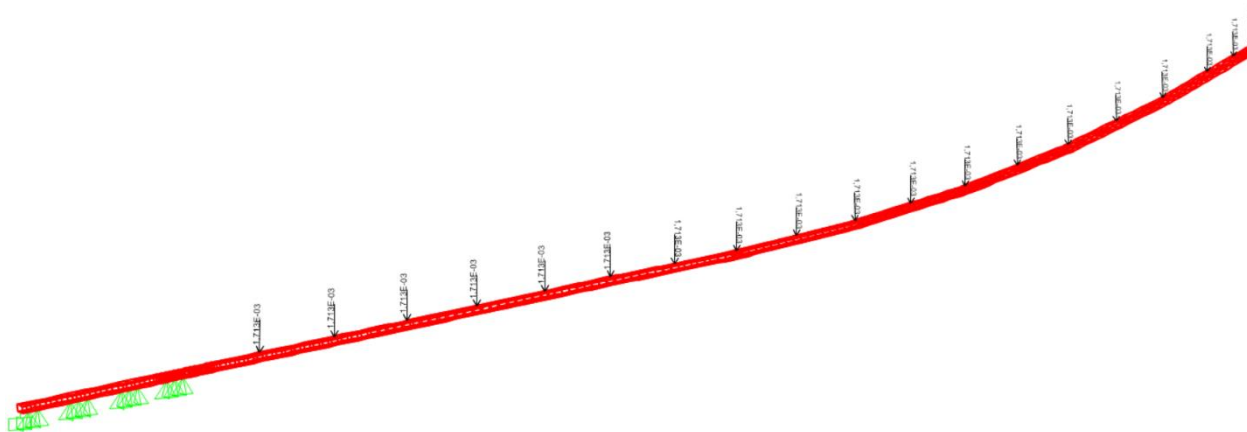


Figura 4.32 – Caso de carga dos suportes do sensor no modelo de casca

As análises aos diferentes casos de carga foram efetuadas da mesma maneira do que no modelo de barras com o objetivo de não haver diferenças nas definições dos dois e assim ser possível a comparação entre estes (Figura 4.33).

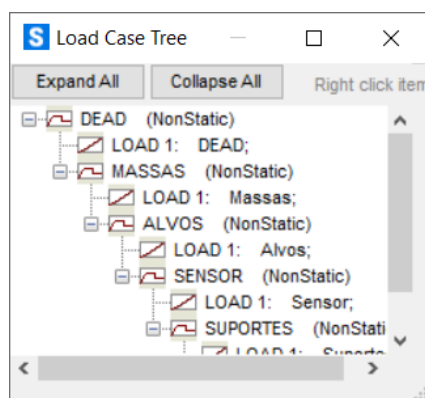


Figura 4.33 – Árvore de casos de carga no modelo de casca

Posteriormente a estes passos, o modelo foi calculado com o objetivo de obter alguns resultados iniciais, para interpretação. Nesta etapa, temos também alguns resultados iniciais do modelo de barras, podendo assim fazer uma breve comparação entre estes.

Inicialmente, foi efetuada a verificação da massa total do modelo de casca. O processo de atribuição das massas de todos os equipamentos utilizados no modelo físico foi igual ao usado no modelo de barras, portanto é expectável que as massas totais dos dois modelos tenham valores semelhantes. O modelo de casca possui uma massa de 24,36 kg (Figura 4.34), o que representa uma diferença de cerca de mais 300 gramas do que o modelo de barras.

S Assembled Joint Masses						
File View Edit Format-Filter-Sort Select Options						
Units: As Note Assembled Joint Masses						
Filter:						
	Joint Text	Mass Source	U1 KN-s2/m	U2 KN-s2/m	U3 KN-s2/m	R1 KN-m-
	~3336	MSSSRC1	7,893E-07	7,893E-07	7,893E-07	
	SumAccelUX	MSSSRC1	0,02436	0	0	
	SumAccelUY	MSSSRC1	0	0,02436	0	
	SumAccelUZ	MSSSRC1	0	0	0,02436	

Figura 4.34 – Massa total do modelo de casca

Ao verificar a deformada para o caso de carga “Suportes”, que aplica todos os equipamentos colocados no modelo físico, esta tem o valor de 1,8492 metros (Figura 4.35).

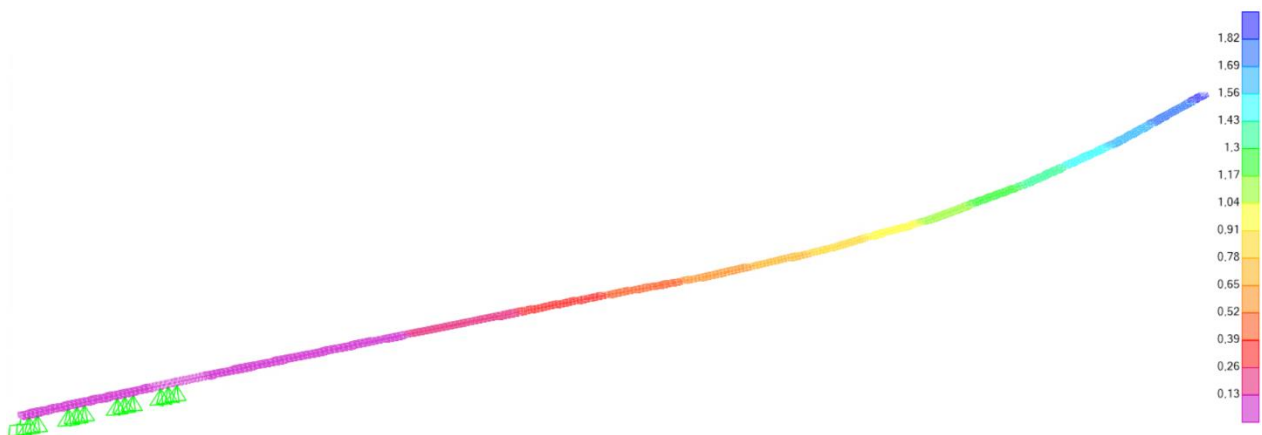


Figura 4.35 – Deformada para o caso de carga “Suportes” no modelo de casca

Foi realizado um gráfico, representado pela Figura 4.36, onde estão presentes as deformadas de cada modelo para o caso de carga “Suportes”. A maior diferença entre estas acontece na ponta da barra, resultando numa diferença de 37 milímetros. Considerando a grandeza da deformada total, o erro relativo será cerca de 2%.

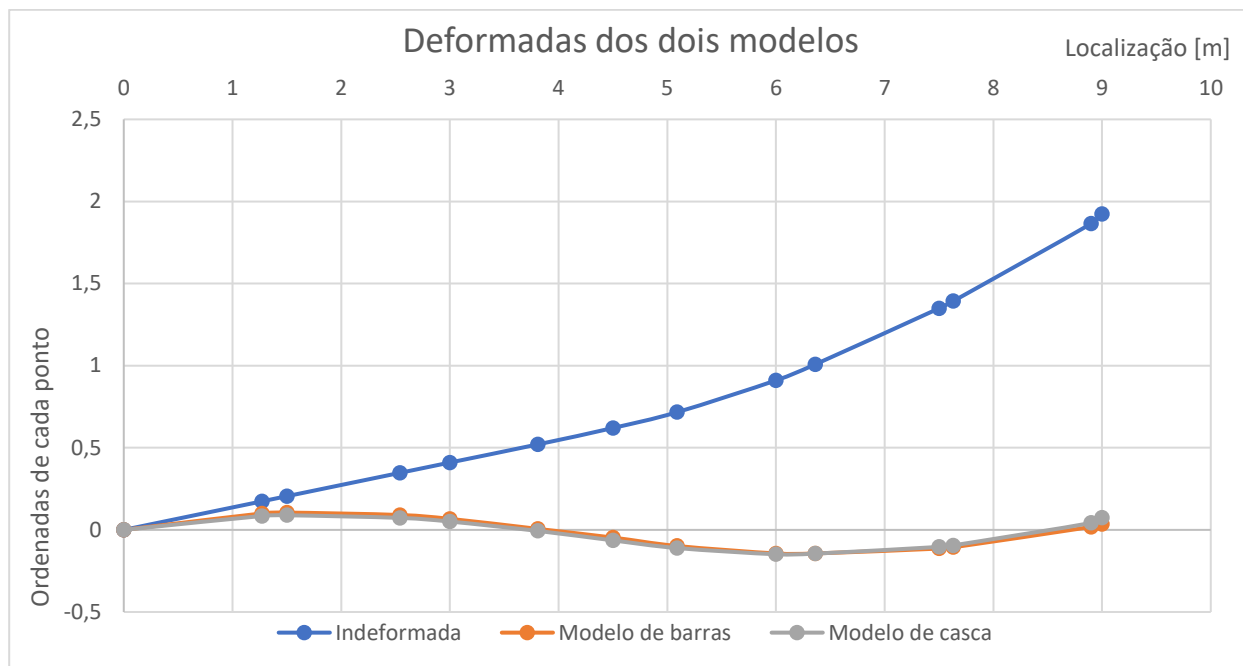


Figura 4.36 – Deformadas dos dois modelos numéricos em comparação com a posição indeformada

Após a execução dos dois modelos e a conclusão de que estes apresentavam resultados semelhantes entre si, foi realizada uma análise linear para cada um, com o objetivo de perceber a contribuição que a análise não linear teve nos dados obtidos. Para efetuar uma comparação simples entre as duas análises, comparamos os valores das deformações obtidos para o caso “Suportes” na ponta da barra, onde os deslocamentos são maiores. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.

No modelo de casca, a análise não linear teve a maior contribuição para a deformada final neste caso de carga, com um aumento de 106 milímetros.

Tabela 7 – Diferença das deformadas máximas entre análise não linear e linear

Análise Realizada	Resultado do modelo de barras [m]	Resultado do modelo de casca [m]
Linear	-1,812	-1,743
Não linear	-1,887	-1,849

4.6. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

Antes de ensaiarmos o modelo físico com qualquer tipo de cargas e esforços, foi verificada a segurança deste. Por ser uma peça muito incomum devido às suas características como o material, a elevada flexibilidade e o facto de representar uma consola com nove metros de comprimento, existiu o interesse de perceber como esta se comportava apenas com o peso próprio, e também para ficarmos com uma noção, se mais tarde, durante os ensaios, as cargas e todo o equipamento que seria colocado na peça, iriam provocar alterações nesta. Como a barra é feita em alumínio, para estas verificações de segurança, foram usadas as normas presentes na versão inglesa do Eurocódigo 9, com o título, Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules.

4.6.1. VERIFICAÇÃO DA SECÇÃO CRÍTICA

Na verificação de segurança da secção crítica, o primeiro passo será identificar a localização desta na nossa estrutura, pois esta secção terá os maiores esforços transversos e de momento. Neste caso, a nossa estrutura é uma consola com apenas um encastramento numa extremidade, portanto, é muito fácil identificar a secção crítica. Esta será a secção do encastramento, que no modelo físico diz respeito à secção do troço retilíneo onde a barra faz o primeiro contacto com o dispositivo de suporte.

Durante esta avaliação, os esforços de momento usados dizem respeito apenas ao caso de carga do peso próprio e o caso de carga que representa as imperfeições do modelo físico. Os dados usados para este foram obtidos a partir do modelo numérico de barras, apresentado anteriormente.

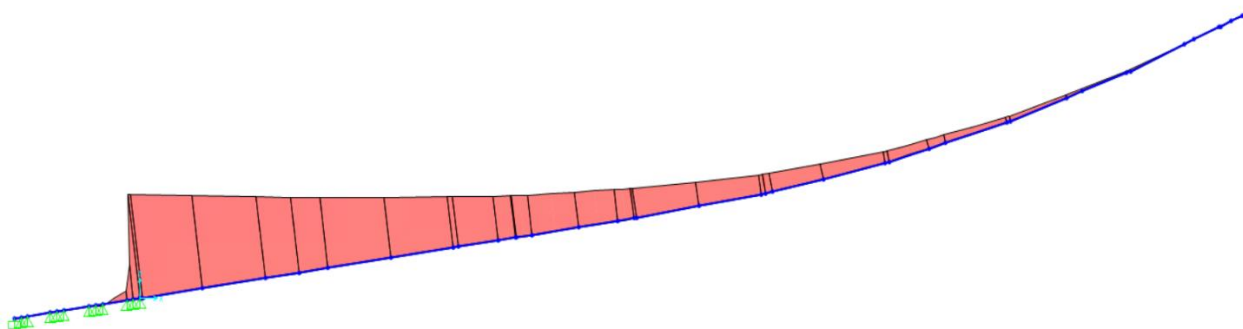


Figura 4.37 – Diagrama de momentos no modelo de barras

Para a extração do resultado do diagrama de momentos foi usado um modelo de barras, pela simplicidade proporcionada por este tipo de modelos para esta tarefa. O resultado obtido para o momento de projeto, para apenas o peso próprio do modelo físico, é de 0,7072 kN.m na secção crítica (Figura 95).

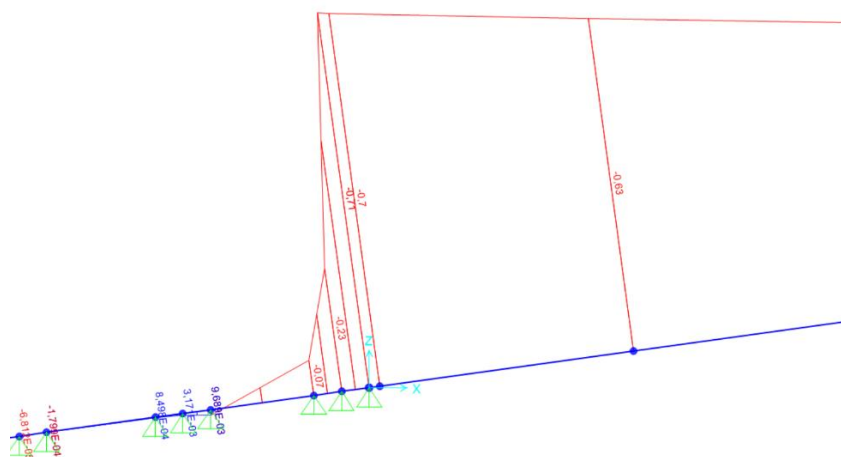


Figura 4.38 – Valor do momento na secção crítica

Posteriormente, foi necessário realizar a classificação da secção crítica, segundo as normas presentes no Eurocódigo 9. A classificação das secções transversais tem como objetivo perceber o quanto a sua resistência e as suas rotações estão dependentes da resistência a encurvaduras e deformadas locais na secção em estudo.

No caso do Eurocódigo 9, existem quatro classes diferentes, muito parecidas com as classes usadas na classificação de secções transversais do Eurocódigo 3, que diz respeito a estruturas de aço.

As quatro classes podem ser descritas da seguinte forma:

- Classe 1 – secções transversais que são capazes de formar uma rótula plástica com capacidade necessária para a realização de uma análise plástica sem perdas de resistência;
- Classe 2 – secções transversais que são capazes de desenvolver o seu momento resistente plástico, mas tem uma capacidade limitada de rotação devido a encurvaduras locais;
- Classe 3 – secções transversais cujas tensões nas fibras extremas comprimidas, calculadas com base na distribuição elástica de tensões, podem atingir a tensão de cedência, mas as encurvaduras locais podem impedir que o momento resistente plástico seja atingido;
- Classe 4 – secções transversais em que as encurvaduras locais não permitem que a tensão de cedência seja atingida em uma, ou mais partes da secção transversal.

A classificação das secções transversais é realizada para as diferentes chapas que a constituem, que podem ser internas quando possuem duas ou mais ligações, ou externas quando têm apenas uma ligação (Figura 4.39). No caso do modelo físico em estudo, este apresenta uma secção tubular, portanto todas as partes presentes nesta são consideradas internas.

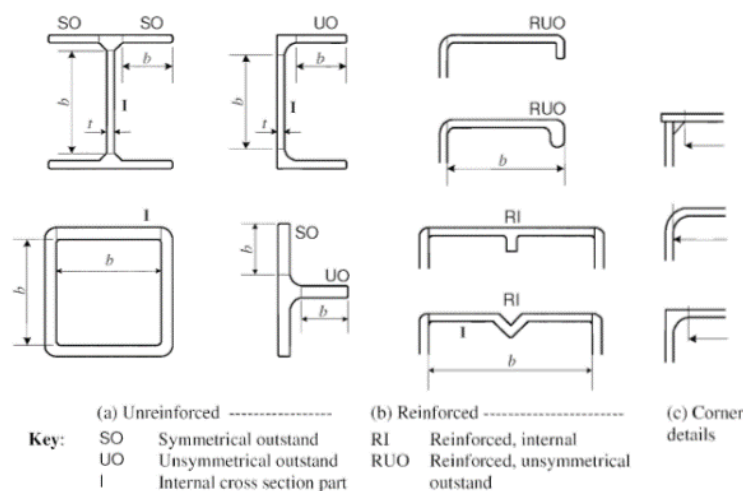


Figure 6.1 - Types of cross-section parts

Figura 4.39 – Tipos de secções transversais segundo o Eurocódigo 9 [37]

Contudo, no cálculo do rácio entre largura e espessura (β), também designado por parâmetro de esbelteza, existem parâmetros a cumprir segundo o Eurocódigo 9 (Figura 4.40).

6.1.4.3 Slenderness parameters

(1) The susceptibility of an un-reinforced flat part to local buckling is defined by the parameter β , which has the following values:

- flat internal parts with no stress gradient or
flat outstands with no stress gradient or peak compression at toe $\beta = b/t$ (6.1)
- internal parts with a stress gradient that results in a neutral axis at the $\frac{b}{4}$ centre $\beta = 0,40 b/t$ (6.2)
- internal parts with stress gradient and outstands with peak compression at root $\beta = \eta b/t$ (6.3)

where:

b is the width of a cross-section part

Figura 4.40 – Parâmetros de esbelteza [37]

Na secção transversal em estudo, vamos ter dois casos diferentes. O banzo inferior que se encontra comprimido, terá o seguinte cálculo:

$$\beta = \frac{b}{t} \quad (1.3)$$

$$\beta = \frac{101}{2} = 50,5$$

As almas do perfil, em que o centro diagrama de tensões coincide com o eixo neutro da secção transversal:

$$\beta = 0,4 \times \frac{b}{t} \quad (1.4)$$

$$\beta = 0,40 \times \frac{39}{2} = 7,8$$

Os valores do parâmetro de esbelteza calculados anteriormente, correspondentes a cada parte da secção transversal, são comparados a valores tabelados no Eurocódigo 9 (Figura 4.41), para se obtêr a sua classificação.

Table 6.2 - Slenderness parameters β_1/ε , β_2/ε and β_3/ε

Material classification according to Table 3.2	Internal part			Outstand part		
	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε
Class A, without welds	11	16	22	3	4,5	6
Class A, with welds	9	13	18	2,5	4	5
Class B, without welds	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Class B, with welds	10	13,5	15	3	3,5	4
$\varepsilon = \sqrt{250/f_o}$, f_o in N/mm ²						

(3) In the Table 6.2, a cross-section part is considered with welds if it contains welding at an edge or at any point within its width. However, a cross-sections part may be considered as without welds if the welds are transversal to the member axis and located at a position of lateral restraint.

Figura 4.41 – Valores tabelados do parâmetro de esbelteza [37]

A liga de alumínio usada no modelo físico é a EN-AW 6060 T66, que segundo o Eurocódigo 9, é referente à classe A, que diz respeito à classe de encurvadura (Figura 4.42).

6060	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	8	50	80	0,42	0,50	B	17
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0,50	0,57	B	14
	ET,EP,ER/B	T6	$t \leq 15$	140	170	8	60	100	0,43	0,59	A	24
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0,38	0,47	A	16
	EP,ET,ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	12	60	100	0,50	0,56	A	12
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	8	65	110	0,41	0,51	A	16
	EP		$3 < t \leq 25$	150	195	8			0,43	0,56	A	18

Figura 4.42 – Características da liga de alumínio [37]

Na localização da secção crítica existem também cordões de soldaduras que fazem a ligação diretamente do perfil a outra placa individual que faz parte do dispositivo de suporte, logo os parâmetros de comparação, segundo a tabela serão:

$$\beta_1 = 9\varepsilon ; \beta_2 = 13\varepsilon ; \beta_3 = 18\varepsilon$$

O coeficiente ε é apenas dependente da tensão limite de proporcionalidade associada à extensão de 0,2% ($f_o = R_{p0,2}$) com o valor de 160 MPa, tenho assim o valor de:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_o}} = \sqrt{\frac{250}{160}} = 1,2$$

Resultando assim nos parâmetros:

$$\beta_1 = 11,25 ; \beta_2 = 16,25 ; \beta_3 = 22,5$$

Ao compararmos os valores obtidos anteriormente, que dizem respeito às diferentes partes do perfil, de acordo com as normas de classificação do Eurocódigo 9 (Figura 4.43), concluímos que o banzo comprimido com o valor de $\beta = 50,5$ se encontra no intervalo de $\beta_3 < \beta$ e, portanto, é de classe 4. As almas do perfil, com o valor de $\beta = 7,8$ encontram-se no intervalo $\beta \leq \beta_1$ sendo estas, de classe 1.

6.1.4.4 Classification of cross-section parts

(1) The classification of parts of cross-sections is linked to the values of the slenderness parameter β as follows:

Parts in beams

$\beta \leq \beta_1$: class 1

$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: class 2

$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: class 3

$\beta_3 < \beta$: class 4

Parts in struts

$\beta \leq \beta_2$: class 1 or 2

$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: class 3

$\beta_3 < \beta$: class 4

Figura 4.43 – Classificação de secções transversais segundo o parâmetro de esbelteza [37]

Segundo o Eurocódigo 9, na classificação das secções transversais, a classe do perfil total considerada é a maior classe, ou seja, a mais desfavorável, das suas diferentes partes que se encontram em compressão. Portanto, a classe final da secção transversal do modelo físico é a classe 4, sendo assim, necessário realizar uma análise elástica durante a verificação de segurança desta.

Como referido anteriormente, para as secções de classe 4, é previsto que ocorra encurvaduras locais na secção, antes que seja atingida a tensão limite de proporcionalidade associada à extensão de 0,2% ($f_{0.2}$) (Figura 4.44), isto devido às zonas da secção transversal que estão a receber tensões de compressão.

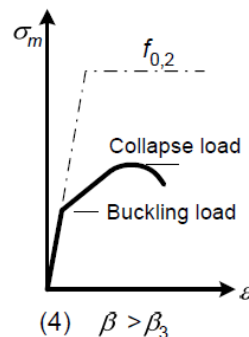


Figura 4.44 – Curva de rutura de uma secção de classe 4 [37]

O Eurocódigo 9 apresenta, no entanto, um método específico para a verificação de segurança de secções transversais de classe 4. Devido às fragilidades locais destas secções, em específicas áreas de compressão, o Eurocódigo 9, propõe uma redução destas áreas e, consequentemente, das propriedades da secção. No caso da secção interna em estudo, apenas o banzo inferior está a receber tensões de compressão, portanto, através das normas do Eurocódigo 9 calcula-se a espessura efetiva (b_{eff}) deste banzo, que consequentemente, fará com que a secção em estudo tenha novas características diferentes, como uma área efetiva (A_{eff}), momentos de inércia efetivos ($I_{y,eff}$ e $I_{z,eff}$) e um novo centro geométrico. Estas novas propriedades da secção transversal, têm como objetivo a redução indireta da resistência desta para valores mais conservativos que permitam verificar a segurança e o uso das secções de classe 4, apesar de estas apresentarem mais condicionantes.

Para reduzirmos a espessura do banzo inferior, que se encontra em compressão, é usado um fator de redução de espessura (ρ_c), usando a fórmula 1.5 presente no Eurocódigo 9.

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \quad \text{se } \beta > \beta_3 \quad (1.5)$$

Este cálculo depende de duas constantes (C_1 e C_2) que são valores tabelados de acordo com as propriedades do material e da secção (Figura 4.45), semelhante aos parâmetros de esbelteza tabelados e calculados anteriormente.

Table 6.3 - Constants C_1 and C_2 in expressions for ρ_c

Material classification according to Table 3.2	Internal part		Outstand part	
	C_1	C_2	C_1	C_2
Class A, without welds	32	220	10	24
Class A, with welds	29	198	9	20
Class B, without welds	29	198	9	20
Class B, with welds	25	150	8	16

Figura 4.45 – Constantes C1 e C2 [37]

Consultando a tabela, concluímos que a secção transversal é de classe A e possui cordões de soldadura, retirando assim os valores das constantes $C_1 = 29$ e $C_2 = 198$, que acrescentando aos valores calculados anteriormente do parâmetro de esbelteza da secção $\beta = 50,5$ e o coeficiente $\varepsilon = 1,25$ permite o cálculo do fator de redução de espessura do banzo inferior.

$$\rho_c = \frac{29}{(50,5/1,25)} - \frac{198}{(50,5/1,25)^2} = 0,5965$$

Utilizando agora o fator de redução de espessura, de acordo com as devidas regras, obtemos a espessura efetiva (b_{eff}) do banzo inferior, reduzindo a espessura real para quase metade.

$$2 \times 0,5965 = 1,193 \text{ mm}$$

Como referido anteriormente, esta redução irá alterar de uma forma significativa a secção transversal real em uma secção transversal efetiva (Figura 4.46), com resistência menor e que será usada na verificação de segurança.

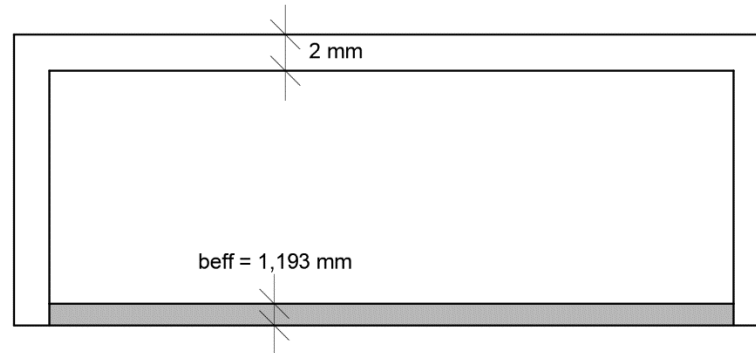


Figura 4.46 – Secção transversal efetiva

Para o cálculo das novas propriedades da secção efetiva, esta foi dividida em quatro áreas diferentes (Figura 4.47) para facilitar os cálculos. Foram usados os eixos representados anteriormente (Figura 3.15), e assim, organizar o cálculo do novo eixo neutro da secção e perceber qual o momento de inércia a calcular para a verificação da segurança.

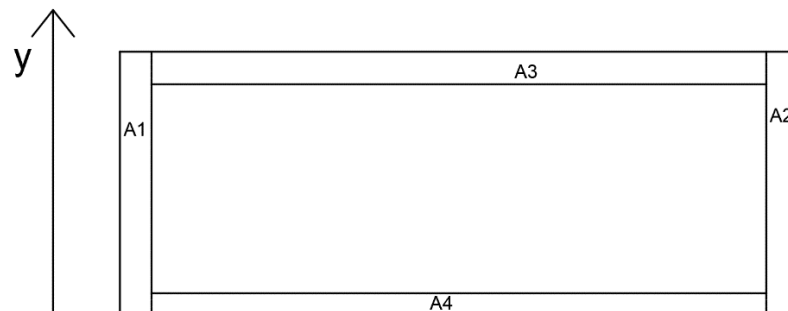


Figura 4.47 – Divisão da secção transversal em áreas diferentes

A área efetiva da secção será a soma de todas as áreas divididas na figura anterior. Tendo A1 e A2 o mesmo valor, a expressão utilizada é a seguinte:

$$A_{eff} = 2 \times A_1 + A_3 + A_4$$

$$A_1 = A_2 = 0,002 \times 0,039 = 7,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_3 = 0,097 \times 0,002 = 1,94 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_4 = 0,097 \times 0,001193 = 1,157 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Resultando, assim, no valor total da área efetiva de:

$$A_{eff} = 2 \times (0,002 \times 0,039) + (0,002 \times 0,097) + (0,001193 \times 0,097) = \mathbf{4,657 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

De seguida, é realizado o cálculo da posição do eixo neutro da secção, que será essencial para o cálculo do momento de inércia. Como a secção efetiva apresenta uma maior área na parte superior, é de prever que o novo eixo neutro terá um movimento ascendente e, assim, que a secção não se mantenha simétrica em ambos os eixos.

$$y_{G,eff} = \frac{2 \times \left(7,8 \times 10^{-5} \times \frac{0,039}{2}\right) + (1,94 \times 10^{-4} \times 0,038) + (1,157 \times 10^{-4} \times \frac{0,001193}{2})}{2 \times 7,8 \times 10^{-5} + 1,94 \times 10^{-4} + 1,157 \times 10^{-4}}$$

$$y_{G,eff} = 0,0225 \text{ m}$$

Esta distância tem origem na parte inferior, como representado na Figura 104, portanto, verifica-se que o eixo neutro efetivo apresenta um movimento ascendente e que a secção deixa de ser simétrica em relação a este (Figura 4.48).



Figura 4.48 – Localização do eixo neutro efetivo

O movimento ascendente do eixo, torna-se importante para o cálculo do momento de inércia. Na realização deste cálculo foi efetuada a diferença do momento de inércia da secção maciça, ou seja, sem a área interior vazia, e entre o momento de inércia da secção vazia. No entanto, os eixos neutros destas secções usadas não

são coincidentes com o eixo neutro efetivo, o que requer especial atenção durante a realização destes cálculos.

$$I_{z,eff} = I_{z,total} - I_{z,vazio}$$

$$I_{z,total} = \left(\left(\frac{0,101 \times 0,039^3}{12} \right) + 0,101 \times 0,039 \times \left(0,0225 - \frac{0,039}{2} \right)^2 \right) = 5,347 \times 10^{-7} m^4$$

$$I_{z,vazio} = \left(\left(\frac{0,097 \times 0,0358^3}{12} \right) + 0,097 \times 0,0358 \times (0,0225 - 0,0191)^2 \right) = 4,110 \times 10^{-7} m^4$$

$$I_{z,eff} = 5,347 \times 10^{-7} - 4,110 \times 10^{-7} = \mathbf{1,237 \times 10^{-7} m^4}$$

Na verificação de segurança da secção crítica, o valor do momento de projeto, já calculado anteriormente com recurso ao modelo numérico ($M_{Ed} = 0,707 kN.m$), é comparado com o valor do momento resistente elástico, por se tratar de uma secção de classe 4. A expressão normalizada pelo Eurocódigo 9 para o cálculo deste valor é a seguinte:

$$M_{el,Rd} = W_{z,eff} \times \frac{f_0}{\gamma_{M1}} \quad (1.6)$$

Sendo γ_{M1} um fator parcial para a resistência de secções transversais de qualquer classe e $W_{z,eff}$ o módulo de secção transversal efetivo.

A realização do cálculo do módulo de secção transversal efetivo depende apenas do momento de inércia da secção efetiva, já determinado anteriormente, e da distância máxima de um extremo da secção ao eixo neutro desta, que neste caso, coincide com o eixo neutro efetivo já avaliado.

$$W_{z,eff} = \frac{I_{z,eff}}{y_{máx}} \quad (1.7)$$

$$W_{z,eff} = \frac{1,237 \times 10^{-7}}{0,0225} = 5,498 \times 10^{-6} m^3$$

Estão assim, reunidas as condições de prosseguir com o cálculo do momento resistente elástico e verificar se estão reunidas as condições de segurança, na secção crítica do modelo físico, apenas para o peso próprio da estrutura.

$$M_{el,Rd} = 5,498 \times 10^{-6} \times \frac{160 \times 10^3}{1,1} = 0,7997 \text{ kN.m}$$

Comparando os valores do momento de projeto e do momento resistente elástico, conclui-se que a verificação de segurança é cumprida de acordo com as normas do Eurocódigo 9.

$$M_{Ed} = 0,707 < 0,7997 = M_{el,Rd}$$

No entanto, com esta simples verificação de segurança é possível perceber que os dois valores estão muito próximos e que é necessária precaução ao colocar cargas adicionais no modelo físico para a realização de ensaios futuros, para não danificar a estrutura. A execução desta etapa realizou-se devido à preocupação dos responsáveis do modelo físico para com o carregamento indevido deste e pelas características anormais de uma estrutura como esta. Como esta preocupação foi confirmada, foi tomada a decisão de não sobrecarregar o modelo físico com mais esforços do que os que já tivessem sido usados em ensaios anteriores, isto é, todos os aparelhos e acessórios que foram colocados no passado para a realização de ensaios na peça continuariam a ser usados, visto que não se verificaram danos ao modelo. Ficou também, definido como objetivo diminuir as cargas dos aparelhos e acessórios, caso fosse possível.

4.6.2. VERIFICAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDADURA

Os cordões de soldadura existentes no modelo físico fazem a ligação entre a barra principal, onde os esforços necessários para a execução de ensaios serão localizados, e o dispositivo de suporte. Portanto, a verificação de segurança destes é também essencial para perceber se as cargas aplicadas na barra vão ter consequências graves nestas ligações.

A barra é conectada por um total de oito cordões de soldadura, como referido anteriormente e representado na Figura 31. Depois de uma análise aos modelos numéricos realizados e que serão explorados posteriormente neste documento, conclui-se que os cordões de soldadura solicitados a um maior esforço, são os cordões que se encontram na secção de transição entre o dispositivo de suporte e resto da barra que está suspensa. Como todos os cordões de soldadura possuem as mesmas dimensões, a verificação de segurança foi realizada apenas para os que se localizam na secção crítica. Ao modelar os vários cordões de soldadura, foram usados apoios duplos, que restringem o movimento nas três dimensões, mas não restringem as rotações nas mesmas. Cada cordão tem um comprimento de dez centímetros e meio, e para a modelação destes foram colocados três apoios duplos em cada, sendo dois em cada uma das extremidades e o restante a meio do comprimento destes (Figura 4.49).

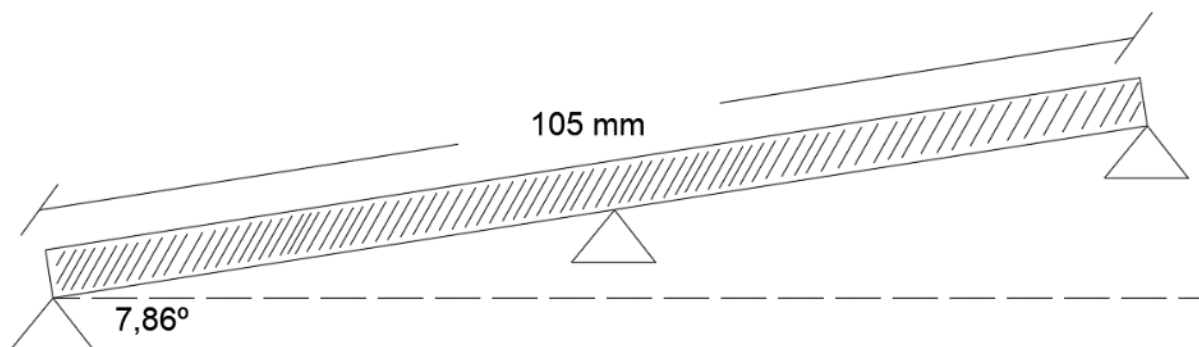


Figura 4.49 – Características de um cordão de soldadura

O objetivo de colocar os três apoios é de verificar o valor das reações em diferentes zonas do cordão de soldadura e assim ter uma percepção de como os esforços se distribuem ao longo deste. No modelo numérico os apoios colocados dizem respeito apenas a um cordão de soldadura porque foram modelados no centro da secção transversal, ou seja, na realidade existem dois cordões de cada lado da barra simétricos como representado na Figura 3.3, mas foram modelados apenas quatro cordões de soldadura porque foram representados na parte central da secção transversal.

As reações obtidas para os apoios referentes ao cordão de soldadura em estudo estão representadas na Figura 4.50, em kN.

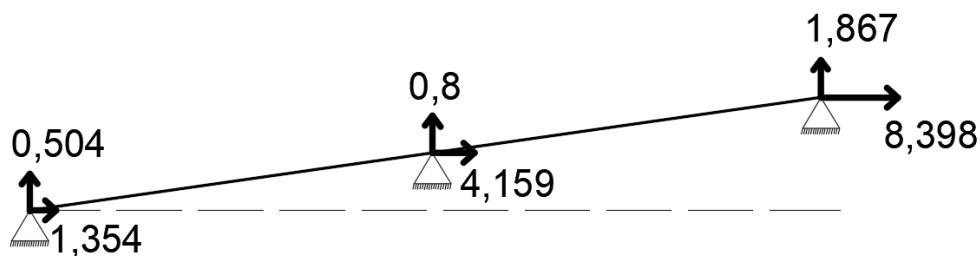


Figura 4.50 – Reações calculadas a partir do modelo de barras

No entanto, para a realização da verificação de segurança destas ligações foi necessário efetuar uma rotação das reações para estas coincidirem com a direção dos cordões de soldadura, que se encontra com o ângulo inicial do modelo físico de $7,86^\circ$. Resultando assim, nas reações apresentadas na Figura 4.51.

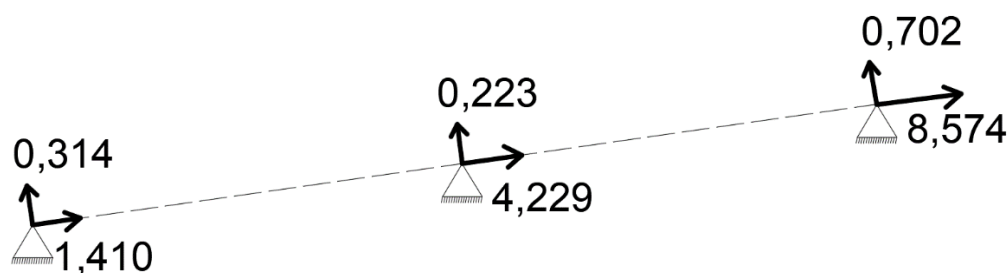


Figura 4.51 – Rotação das reações

Após a rotação efetuada nas reações, o passo final a efetuar é a divisão destas por dois devido ao facto de estes apoios simularem dois cordões de soldadura da peça. A Figura 4.52 representa este processo, a rotação do cordão de soldadura para uma posição horizontal e identifica os pontos onde estão presentes os apoios.

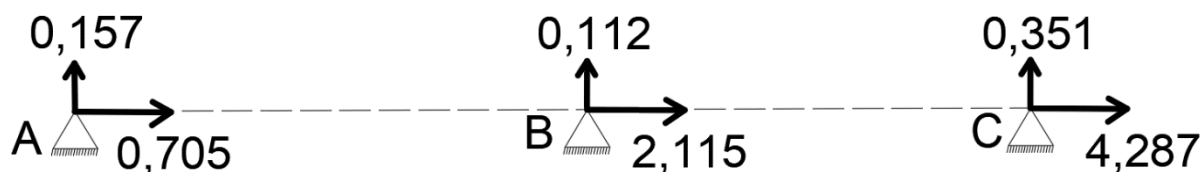


Figura 4.52 – Divisão das reações

A verificação da segurança dos cordões de soldadura, segundo as normas do Eurocódigo 9, deve ter em conta a tensão normal ao plano de rotura ($\tau_{\perp}$), a componente de tensão tangencial ao plano de rotura perpendicular ao eixo do cordão ($\sigma_{\perp}$) e a componente da tensão tangencial paralela ao eixo do cordão ($\tau_{\parallel}$). No caso em estudo todas as componentes existem, sendo assim, necessário a verificação de ambas. O Eurocódigo 9, apresenta expressões usadas para o dimensionamento de cordões de soldadura de acordo com os diferentes tipos de tensões de dimensionamento, sendo necessária a verificação das mesmas. No caso em estudo, os cordões de soldadura já se encontram dimensionados, logo a utilização destas normas será usada para garantir a segurança destes. Como já referido, as ligações de soldadura a serem verificadas, estão sujeitas a tensões perpendiculares e paralelas, logo a verificação necessária, é a seguinte:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_0}{1,25} \quad (1.8)$$

As dimensões necessárias para realizar a verificação de segurança dos cordões de soldadura são o seu comprimento de 10,5 centímetros e o valor máximo da espessura da secção transversal (a), com o valor de 7 milímetros. Contudo, o comprimento do cordão de soldadura usado será menor, isto porque, quando a

soldadura é feita, ficam excessos nos extremos desta, que não devem se quantificados nos cálculos. Estes extremos têm aproximadamente o valor de a , ou seja, sete milímetros, diminuindo assim o comprimento do cordão para noventa e um milímetros (Figura 4.53).

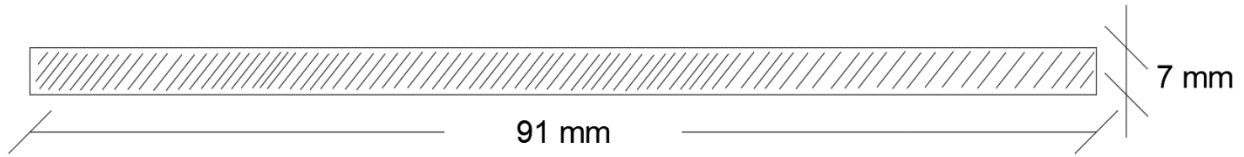


Figura 4.53 – Dimensões do cordão de soldadura

O cálculo das componentes perpendiculares ao eixo do cordão de soldadura é efetuado pela expressão:

$$\sigma = \frac{R}{A} + \frac{M}{I} \times y_{m\acute{a}x} \quad (1.9)$$

Estando assim, dependente do momento provocado pelas reações perpendiculares ao eixo do cordão, do momento de inércia deste e pela distância máxima, que será a distância do centro a um extremo do cordão e terá o valor de quarenta e cinco milímetros e meio.

O momento de inércia de cada cordão de soldadura tem o valor de $I = 4,396 \times 10^{-8} m^4$.

$$I = \frac{7 \times 91^3}{12} = 439583,08 mm^4 = 4,396 \times 10^{-8} m^4$$

O cálculo da reação vertical total tem um valor de 0,62 kN. O momento associado a estas reações foi o valor máximo dos momentos determinados em três pontos representados na Figura 109 e tem o valor de 0,037 kN.m.

Após todas estas etapas, é possível realizar a avaliação da tensão perpendicular ao eixo do cordão.

$$\sigma = \frac{R}{A} + \frac{M}{I} \times y_{m\acute{a}x} = \frac{0,62}{0,091 \times 0,007} + \frac{0,037}{4,396 \times 10^{-8}} \times 0,0455 = 39269,5 kPa$$

No entanto, esta tensão perpendicular ainda tem que ser decomposta em duas parcelas, sendo estas $\sigma_{\perp}$ e $\tau_{\perp}$ (Figura 4.54).

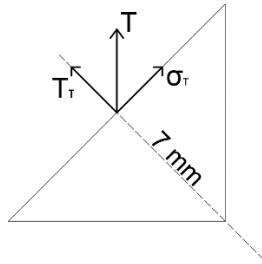


Figura 4.54 – Representação das parcelas da tensão perpendicular

Como cada parcela faz um ângulo de 45° com a tensão normal, estas irão ter o mesmo valor.

$$\sigma_{\perp} = 39269,5 \times \cos 45^\circ = 27767,7 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\perp} = 39269,5 \times \sin 45^\circ = 27767,7 \text{ kPa}$$

Falta apenas o cálculo da parcela paralela ao cordão de soldadura, com o valor de 11156,99 kPa.

$$\tau_{\parallel} = \frac{R}{A} = \frac{7,107}{0,091 \times 0,007} = 11156,99 \text{ kPa}$$

Executando a verificação final de segurança, concluímos que a segurança é verificada para os cordões de soldadura do modelo físico.

$$\sigma_c = \sqrt{27767,7^2 + 3 \times (27767,7^2 + 11156,99^2)} = 57503,31 \text{ kPa}$$

$$\frac{f_0}{1,25} = \frac{160 \times 10^3}{1,25} = 128000 \text{ kPa}$$

$$57503,31 \text{ kPa} < 128000 \text{ kPa}$$

5

CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUÇÃO

Antes da realização dos ensaios experimentais previstos, é necessário fazer a calibração dos vários meios de obtenção de resultados, para que exista uma confiança nos resultados obtidos e assim, seja possível a sua análise detalhada e a consequente retirada de conclusões e comparações.

Inicialmente, foi efetuada uma calibração experimental do sistema de monitorização de imagem com o objetivo de diminuir os erros, por vezes regulares, que foram encontrados em pequenos testes efetuados anteriormente. De seguida, foi efetuada a calibração dos dois modelos numéricos, com vista a assegurar que os seus resultados eram compatíveis com a realidade.

5.2. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE IMAGEM

A calibração do sistema de monitorização de imagem veio da necessidade de alterar a configuração de todo este sistema. Anteriormente, este sistema tinha sido apenas utilizado para captar o troço retilíneo da barra, pelo que com o aumento efetuado a esta com a adição do troço curvilíneo, foi necessário pensar numa nova configuração para o sistema de monitorização de imagem. A maior alteração necessária a este, foi o afastamento das duas câmaras em relação ao modelo físico para que fosse possível captar a imagem do modelo completo com os dois troços juntos. Consequentemente, foi necessário aumentar o tamanho dos alvos colocados para a captação do sistema de imagem com o objetivo de serem mais visíveis em ambas as câmaras. Este aumento do tamanho dos alvos, em relação aos anteriores, foi o que motivou a necessidade de uma nova calibração do sistema.

Neste processo é necessária a alteração de alguns dados no software do sistema de monitorização de imagem. O software usado pelo sistema utiliza as medidas interiores dos alvos (Figura 5.1) para conseguir efetuar a captação destes. Como foi necessário a utilização de novos alvos, é necessário alterar estes valores no software com a nova medida correta para a sua ótima captação.

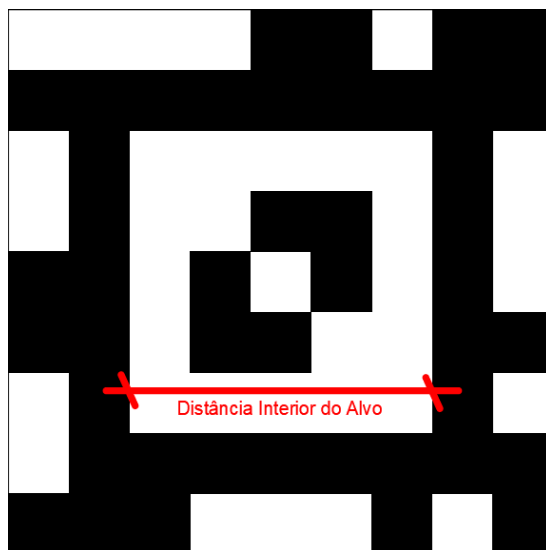


Figura 5.1 – Medição interior dos alvos

Inicialmente, esta medida foi efetuada com uma régua para ser possível perceber a ordem de grandeza desta. A medida obtida foi de aproximadamente 9,6 centímetros. Assim, foram efetuados três ensaios com o objetivo de obter o valor perfeito desta medida que otimizasse o sistema de imagem. Em cada ensaio, foi alterado o valor da medida interior utilizado pelo software. Foram usados os valores 0,094 metros, 0,096 metros e 0,0982 metros, com o objetivo de criar um intervalo onde o resultado final estivesse presente. De seguida, a barra que se encontrava apoiada na mesma posição inicial era solta para criar um intervalo de deslocamento na direção de *flap*. Na direção *edge* era atribuído um deslocamento conhecido em todos os ensaios. Em todos os ensaios foram efetuadas medições com um laser no ponto, onde se encontra o alvo número sete, para determinar o intervalo de deslocamentos em ambas as direções. Estas dimensões eram depois comparadas com os valores obtidos pelo sistema de monitorização de imagem.

Os intervalos de deslocamentos obtidos manualmente por medição laser estão representados na Tabela 8 para cada direção.

Tabela 8 – Intervalo de deslocamentos medidos a laser

Ensaio [m]	Flap [m]	Edge [m]
0,094	-0,184	0,091
0,096	-0,185	0,091
0,0982	-0,185	0,091

Os resultados obtidos pelo sistema de monitorização de imagem são tratados no Excel. O sistema de imagem regista a localização dos diversos alvos dos pontos a uma taxa de 20Hz, pelo que é necessário o seu tratamento devido à elevada quantidade de informação. Para o ensaio em que foi selecionada a distância de

0,094 metros no software de imagem, vão ser apresentados os dois gráficos obtidos, respetivamente para a deformada de *flap* (Figura 5.2) e a deformada de *edge* (Figura 5.3).

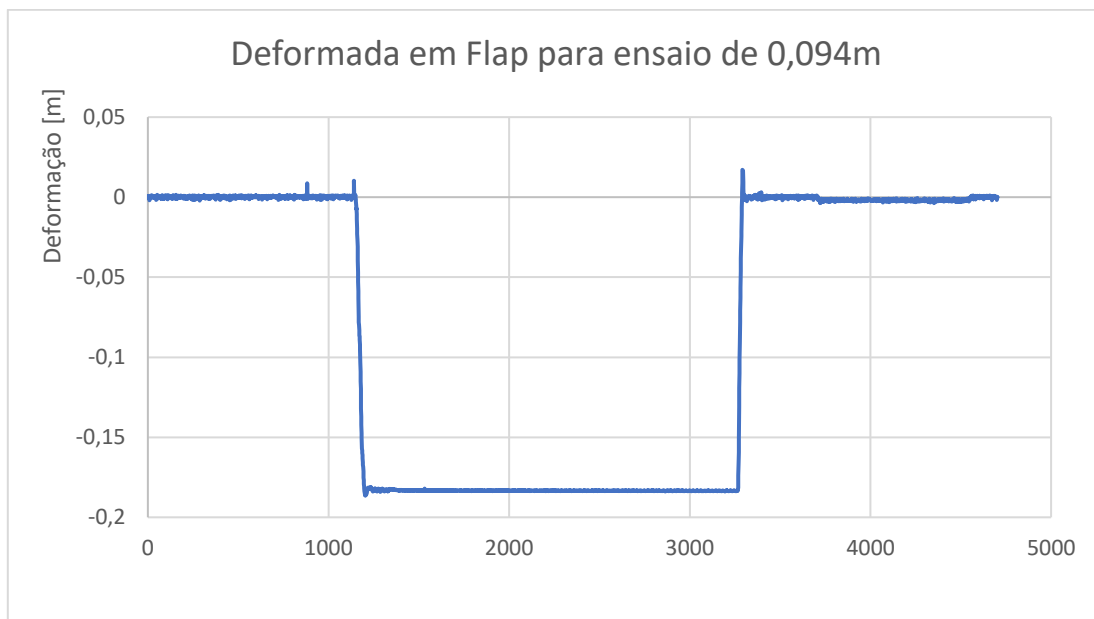


Figura 5.2 – Deformada em *flap* de ensaio para calibração do sistema de imagem

É possível verificar facilmente a deformação no alvo número sete a partir do gráfico. É possível também, verificar que existem muito poucos erros na captação de informação, o que é um indicador que a calibração com o valor de 0,094 metros, encontra-se perto do ideal para a direção de *flap*.

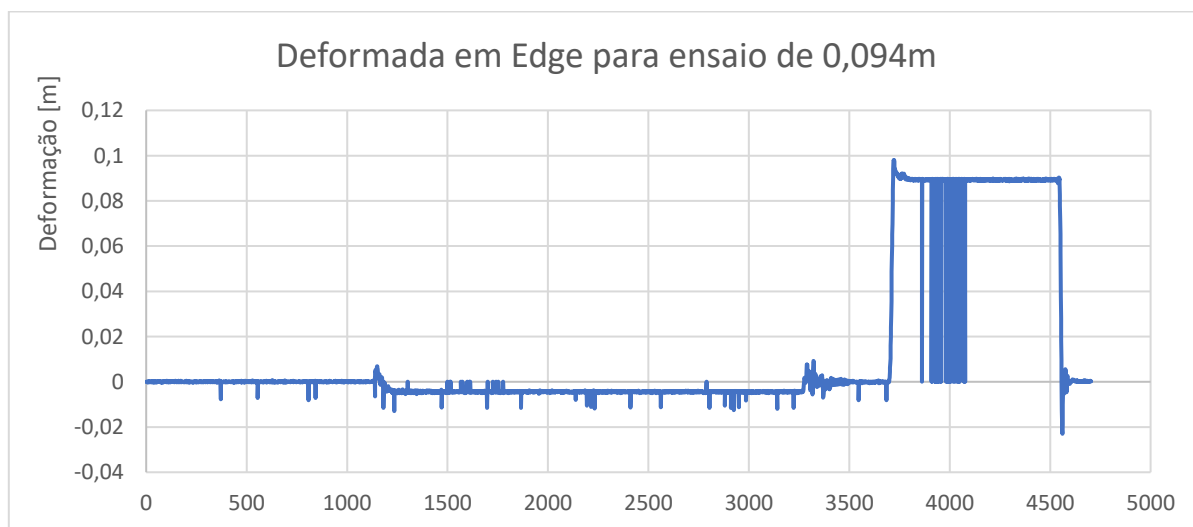


Figura 5.3 – Deformada em *edge* de ensaio para calibração do sistema de imagem

O mesmo não é possível verificar para a direção *edge*, visto que para o valor de 0,094 metros existem muito erros na captação de informação. Estes pontos têm a definição de *outliers*.

No entanto, para conseguirmos chegar a valores de deformadas iguais aos medidos a laser, é necessário fazer uma média de um grande número de pontos fornecidos pelo sistema de imagem, como objetivo de verificar se esta se aproxima dos valores medidos a laser. Ao efetuar este processo, os resultados obtidos pelo sistema de imagem para os três ensaios e para as duas direções estão representados na Tabela 9.

Tabela 9 – Intervalo de deslocamentos obtidos pelo sistema de imagem

Ensaio [m]	Flap [m]	Edge [m]
0,094	-0,18341928	0,089255147
0,096	-0,18722387	0,091109023
0,0982	-0,19127265	0,093592202

Com os valores obtidos experimentalmente através do sistema de imagem para cada valor de calibração, foi possível realizar dois gráficos de regressão linear para cada direção de deformação. O gráfico obtido para a deformada em *flap* encontra-se representado na Figura 5.4.

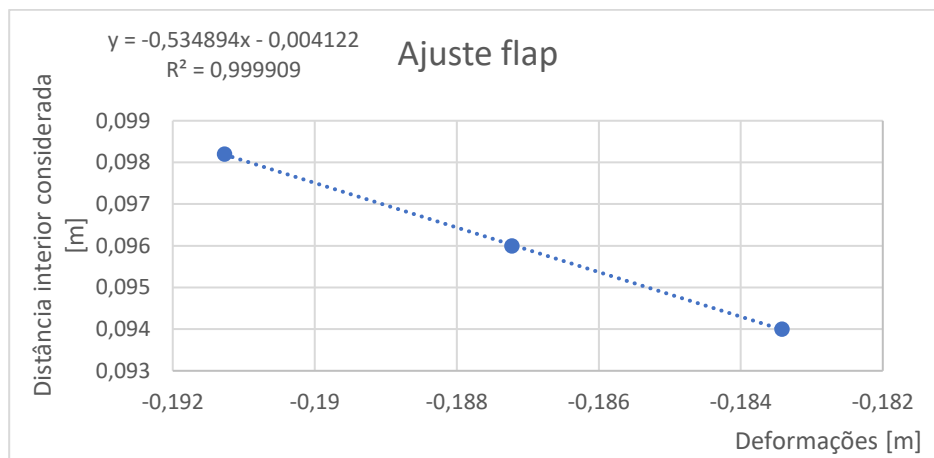


Figura 5.4 – Regressão linear para a deformada em *flap*

Através da equação do gráfico é possível retirar o valor que, teoricamente, otimizará a captação de informação pelo sistema de imagem para a deformada em *flap*, com o menor erro possível. Ao substituir na equação o valor de x pela média dos resultados obtidos com a medição laser (0,18467 m), obtemos o valor de 0,094656 para colocar no software do sistema de imagem como calibração dos alvos laterais que são responsáveis pela captação da deformada em *flap*.

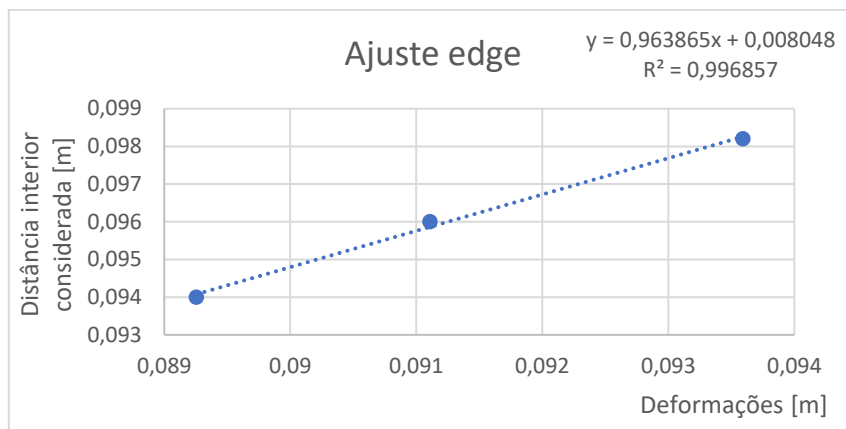


Figura 5.5 – Regressão linear para a deformada em *edge*

Na Figura 5.5, está representado o gráfico usado para a deformada em *edge*. Foi efetuado o mesmo processo que na deformada em *flap*, e obteve-se o valor de calibração de 0,0957597 a colocar no software para os alvos superiores, que têm a capacidade de captação da deformada em *edge*.

5.3. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos numéricos têm o objetivo de verificar os resultados obtidos nos ensaios experimentais para que seja possível existir uma comparação entre estes. No entanto, para sabermos se os resultados obtidos nos dois modelos numéricos faziam sentido e se estes estavam bem modelados, foi necessário efetuar uma calibração experimental que fosse capaz de comparar resultados do modelo físico real com os valores obtidos por estes.

Inicialmente, durante a calibração, o modelo de casca tinha uma disposição de apoios diferentes da descrita no capítulo 4. Os apoios iniciais deste modelo foram modelados com o objetivo de simular a posição correta dos cordões de soldadura do modelo físico, como se encontra ilustrado na Figura 5.6.

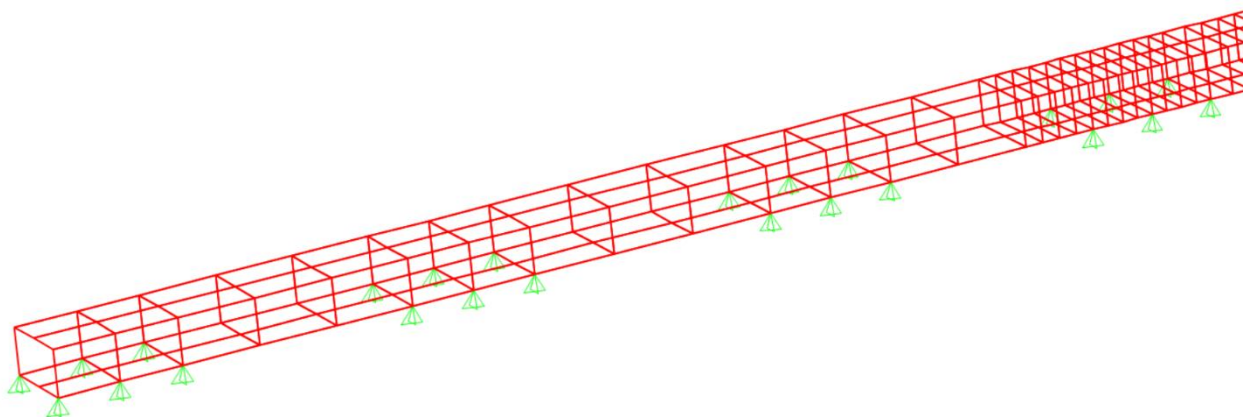


Figura 5.6 – Modelação inicial dos apoios do modelo de casca

O método usado para efetuar a calibração passou pela comparação das deformadas em *flap* do modelo físico, com as mesmas deformadas obtidas nos modelos numéricos, mais especificamente, as diferenças de deformadas entre diferentes casos de carga. Como referido anteriormente, durante a montagem dos equipamentos usados na estrutura foram criados vários casos de carga e durante a montagem destes, tivemos a oportunidade de efetuar medições com um medidor de distâncias a laser das deformadas em *flap*, como representado na Figura 5.7, com o objetivo de calibrar os modelos.

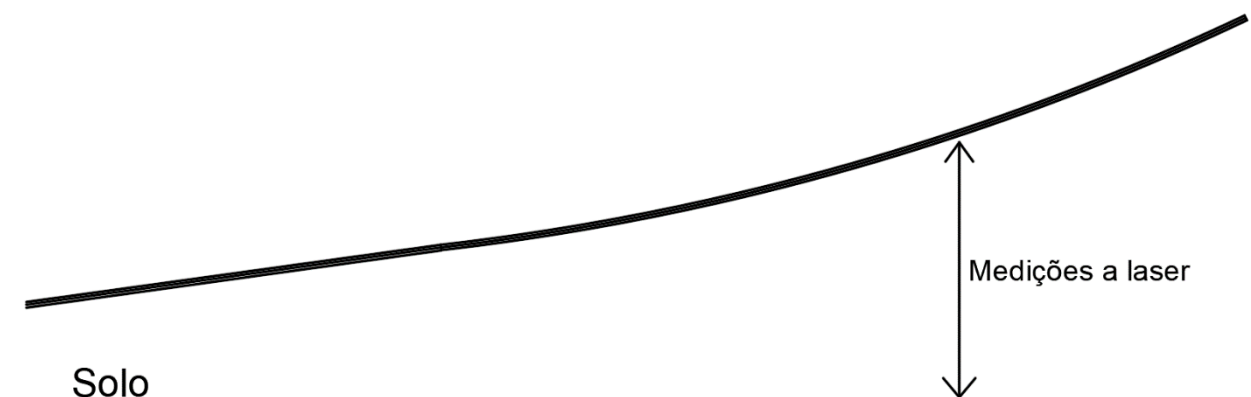


Figura 5.7 – Exemplificação das medições efetuadas a laser

Uma característica muito importante do modelo físico, para a realização de ensaios experimentais é a impossibilidade de este ser colocado na posição indeformada, isto porque, devido ao grande comprimento da barra, à elevada flexibilidade desta e ao seu peso próprio, não é possível a colocação do modelo numa posição indeformada que seja sempre constante. Esta dificuldade impossibilita a comparação de dados das deformadas totais do modelo físico. A solução para a calibração usando valores de deformações, passa por realizar a comparação entre a diferença de deformadas entre cada caso de carga.

As medições a laser durante a montagem do equipamento do modelo físico, foram efetuadas em relação ao solo em doze pontos específicos da barra. Estes pontos foram: os alvos do sistema de imagem, que a sua localização se encontra na Tabela 1 e pontos com localização de 1,5 em 1,5 metros, que coincidiam com a localização de alguns suportes do sensor ótico.

O caso de carga inicial refere-se quando a barra está apenas sujeita ao seu peso próprio e à carga dos alvos do sistema de imagem. O segundo caso de carga considerado foi a colocação do sensor ótico ao longo da barra e por fim, a colocação dos seus suportes. Destes três casos de carga, foi possível calcular duas diferenças de deformação, que correspondem à deformação pela colocação do sensor e depois, pela colocação dos suportes deste em relação ao caso de carga inicial, que permitiram a comparação com os resultados dos modelos físicos.

Depois de compilados os resultados obtidos pelas medições a laser e os dois modelos numéricos, foram então calculadas as diferenças entre casos de carga para estes três métodos. A Figura 5.8 representa os valores obtidos para estas quando foi efetuada a colocação do sensor ótico na barra, ou seja, a primeira diferença de deformação.

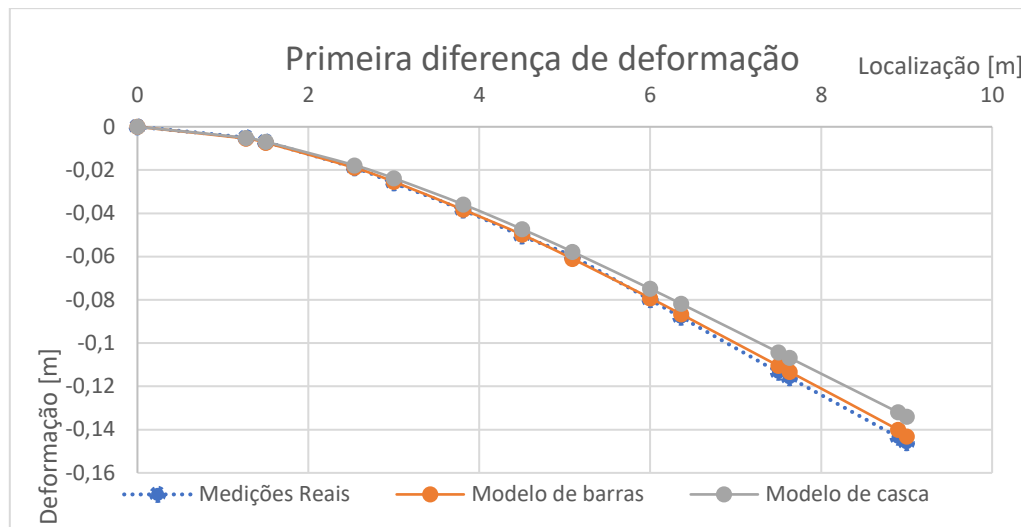


Figura 5.8 – Deformação referente à colocação do sensor ótico

É possível observar visualmente que as diferenças entre o modelo de barras e as medições reais são menores do que as diferenças do modelo de casca em relação às medições reais. Em relação ao modelo de barras, a maior diferença obtida foi na ponta da barra, onde se registou uma diferença de 3 milímetros. Para o modelo de casca, a maior diferença registou-se no mesmo com ponto com um valor de 12 milímetros.

Ao comparar a segunda diferença de deformações, representada pela Figura 5.9, concluímos que o mesmo acontece neste caso.

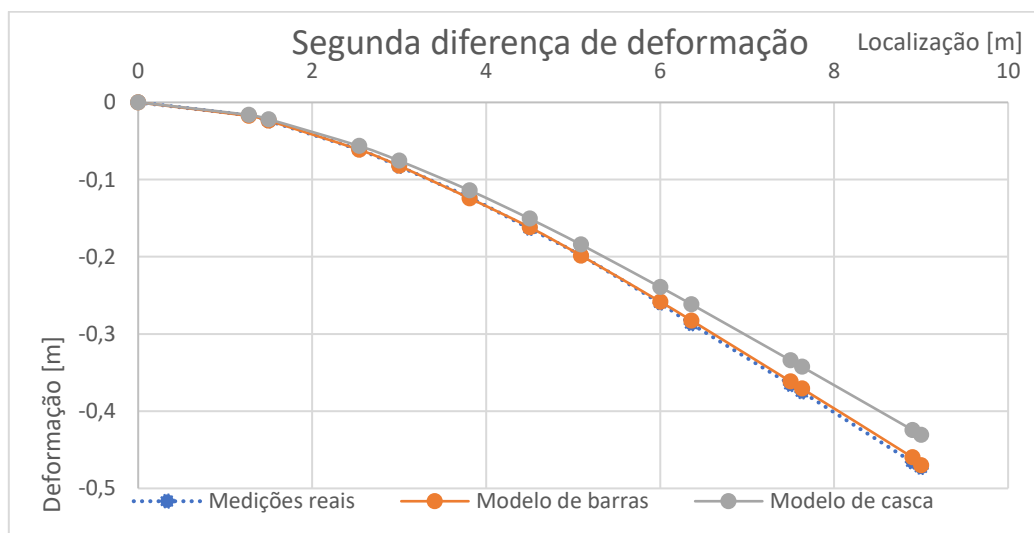


Figura 5.9 – Deformação referente à colocação dos suportes

Visualmente é perceptível a maior diferença de resultados para o modelo de casca. A maior diferença do modelo de barras em relação às medições reais resultou na ponta da barra mais uma vez, com o valor de 3 milímetros, não apresentando alteração em relação ao último caso. Já no modelo de casca a diferença neste ponto é de 42 milímetros, sendo este um valor considerável.

Com a necessidade de alterar o modelo de casca para este ficar mais otimizado, procurou-se as principais diferenças deste em relação ao modelo de barras, visto que este se encontrava com melhores resultados. Como referido anteriormente, a maior diferença entre os dois modelos numéricos foi a modelação dos apoios destes. Então, numa tentativa de melhorar o modelo de casca, os apoios modelados para este, foram alterados de forma a ficarem definidos da mesma forma do que os do modelo de barras (Figura 4.26).

Após esta alteração foi realizada a mesma comparação efetuada anteriormente. Na primeira diferença de deformação (Figura 5.1) foi evidente a aproximação dos resultados do modelo de barras em relação aos outros resultados, sendo a maior diferença atualizada deste para com as medições reais de apenas 1 milímetro, apresentando assim valores mais próximos do que o modelo de barras.

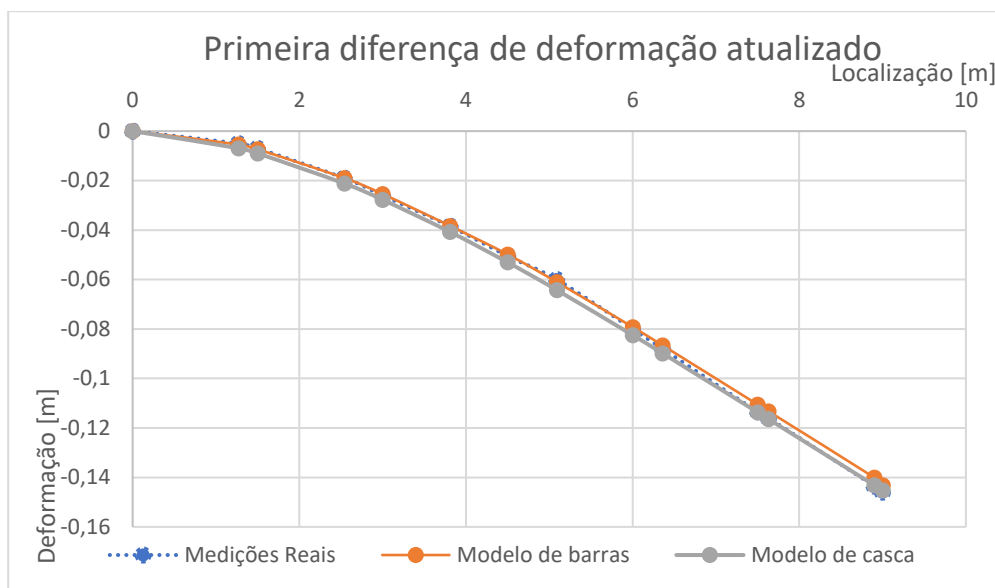


Figura 5.10 – Deformação referentes à colocação do sensor ótico com o modelo de casca atualizado

No caso da segunda diferença de deformação, depois da atualização do modelo de casca, verificou-se a mesma aproximação de resultados por parte deste. A maior diferença registada foi de 6 milímetros.

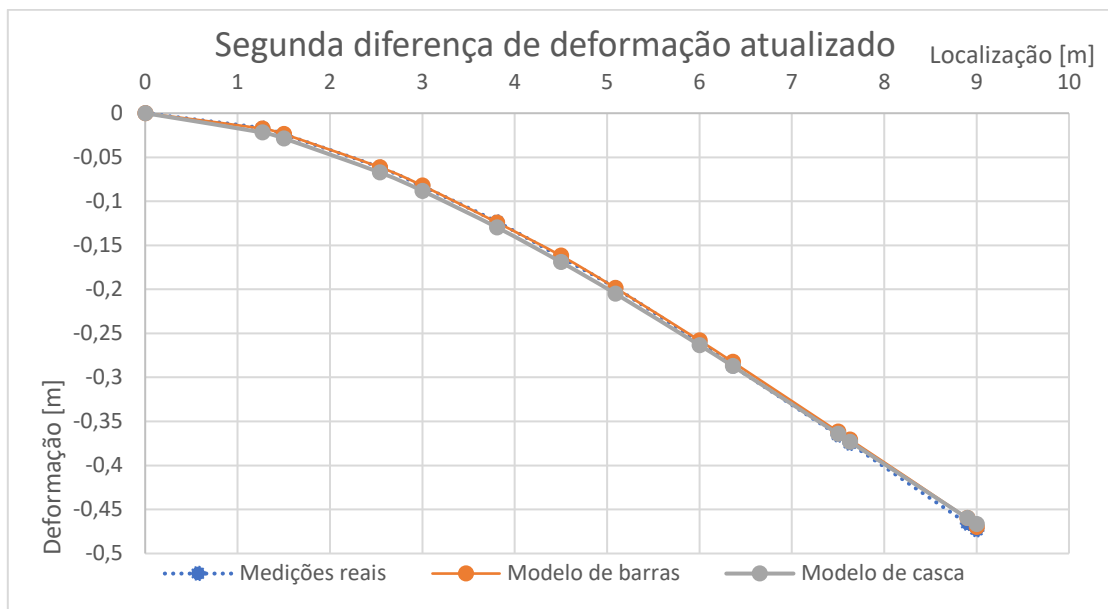


Figura 5.11 - Deformação referente à colocação dos suportes com o modelo de casca atualizado

Outro aspeto que serviu como uma comparação entre os dois modelos foi a frequência do primeiro modo de vibração da estrutura calculado por estes. O modelo de barras apresentou uma frequência de 0,46396 Hz. O modelo de casca, inicialmente, para este modo, apresentava uma frequência de 0,47444 Hz e depois da atualização dos apoios, esta já se verificava ser de 0,46658 Hz, o que representa uma aproximação dos valores calculados pelos dois.

6

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo a análise de toda a informação recolhida ao longo deste projeto. Será realizada a comparação de diversos resultados provenientes dos modelos numéricos e do sistema de monitorização de imagem com os sistemas de monitorização óticos, tirando assim, conclusões em relação aos seus desempenhos nos ensaios realizados. Será também possível, retirar conclusões em relação ao comportamento da estrutura nos diferentes ensaios realizados.

6.2. ENSAIO ESTÁTICO

O ensaio estático da estrutura, foi realizado ao colocar três cargas concentradas sucessivas na mesma localização da barra a 8,5825 metros da origem da barra. No entanto, com a montagem do modelo físico e do equipamento necessário para o seu estudo, foram também realizadas medições com o objetivo de calibrar outros sistemas. A principal característica estudada na realização deste ensaio, foram as deformadas consequentes da aplicação das cargas. Durante a realização de todo o ensaio foram executadas medições a laser do solo até à barra, em pontos específicos, para que seja possível quantificar o valor que cada caso de carga provoca na deformada da estrutura.

Inicialmente, foram comparados os valores dos modelos numéricos e do sistema de monitorização com os valores medidos a laser, que são considerados os valores reais obtidos pela estrutura. Posteriormente, foi feita a comparação de estes com os valores do sensor de monitorização ótico apenas para as três cargas concentradas colocadas no modelo, visto que durante a montagem do equipamento o sensor não estava a monitorizar a estrutura.

A primeira comparação de resultados será feita entre os valores reais da estrutura e os valores obtidos por ambos os modelos numéricos. Os valores reais, foram medidos num total de catorze pontos ao longo da barra, cuja localização se encontra representada na Tabela 10.

Tabela 10 – Localização dos pontos de medição a laser

Abcissa (m)	0	1,27	1,5	2,54	3	3,81	4,5	5,09	6	6,36	7,5	7,63	8,9	9
-------------	---	------	-----	------	---	------	-----	------	---	------	-----	------	-----	---

6.2.1. DEFORMADA EM FLAP

Inicialmente, foi feito um gráfico no Excel com todos valores obtidos nas medições a laser com o objetivo de perceber se estes valores faziam sentido, tendo em atenção que foram medidas as distâncias dos pontos da barra em relação ao solo para os diferentes casos de carga. Estas medições encontram-se representadas na Figura 6.1.

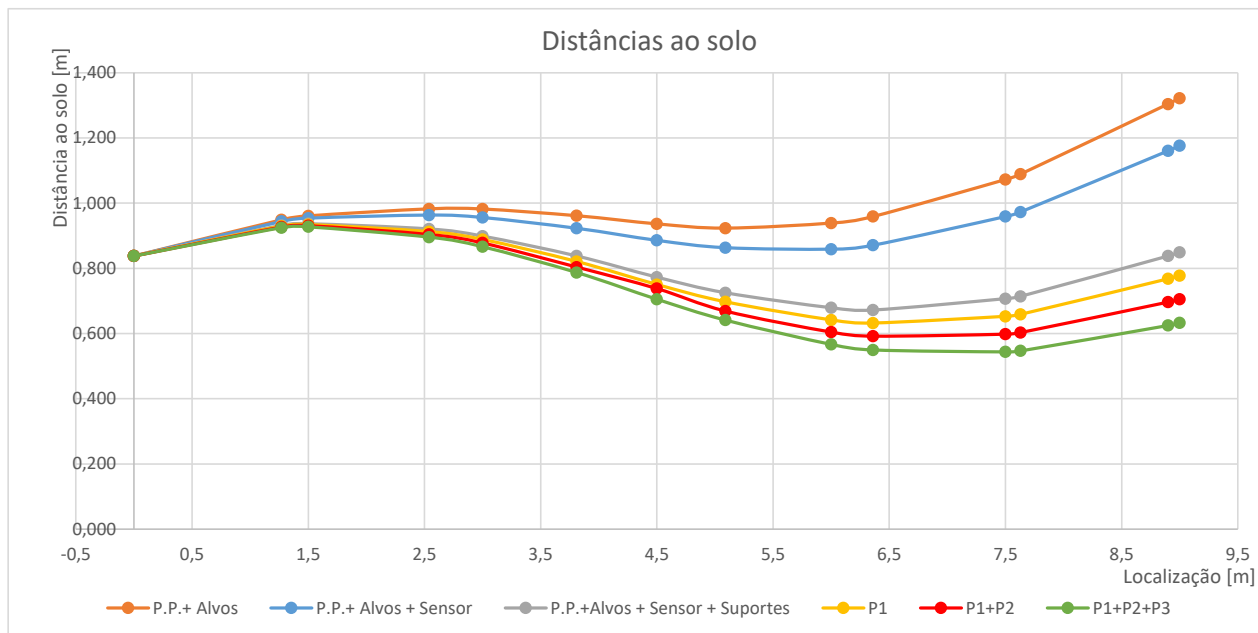


Figura 6.1 – Medições a laser das deformadas em relação ao solo

É possível verificar a partir da Figura 6.1 que os valores, apesar de ser uma medição em relação ao solo, fazem sentido e representam muito bem visualmente as deformadas do modelo para cada caso de carga. A laranja está representada a deformada inicial, que diz respeito ao peso próprio da estrutura mais os alvos de imagem. A linha azul representa a deformada com a adição do sensor ótico ao modelo. De seguida, a cinzento, mostra-se o maior intervalo de deformação com a adição dos suportes do sensor ótico. As três últimas linhas representam a adição das três cargas do ensaio estático. Estas são muito semelhantes em peso, e pela análise inicial das deformadas totais medidas com recurso a laser, parecem ter um intervalo entre si muito parecido, o que faz sentido.

Para a análise das deformadas em *flap*, foram comparadas as deformadas para cada caso de carga em relação à deformada inicial. No caso deste ensaio estático, a deformada inicial diz respeito à configuração do modelo físico com todo o equipamento, ou seja, o caso de carga “Suportes”. No total foram analisados três intervalos

de deformada, que foram denominados de “DifTotal-1”, DifTotal-2” e “DifTotal-3”, significando a adição de cada uma das cargas concentradas usadas para o ensaio estático.

Ao comparar os três intervalos de deformações resultantes das medições experimentais efetuadas a laser com os valores obtidos pelos dois modelos numéricos, é possível concluir que estes apresentam resultados muito semelhantes. No caso DifTotal-1, representado na Figura 6.2, é possível verificar que as linhas de resultados dos modelos e das medições reais são praticamente coincidentes, com exceção do ponto de localização 6,36 metros que apresenta uma ligeira diferença. Neste ponto, a partir das medições reais efetuadas obteve-se um intervalo de deformações de 39,5 milímetros, enquanto no modelo de barras obteve-se 41,2 milímetros e no modelo de casca de 41,4 milímetros, resultando numa diferença de cerca de 2 milímetros. Como os outros pontos do gráfico se encontram muito coincidentes, é possível que a diferença de resultados neste ponto tenha resultado de um erro de medição experimental.

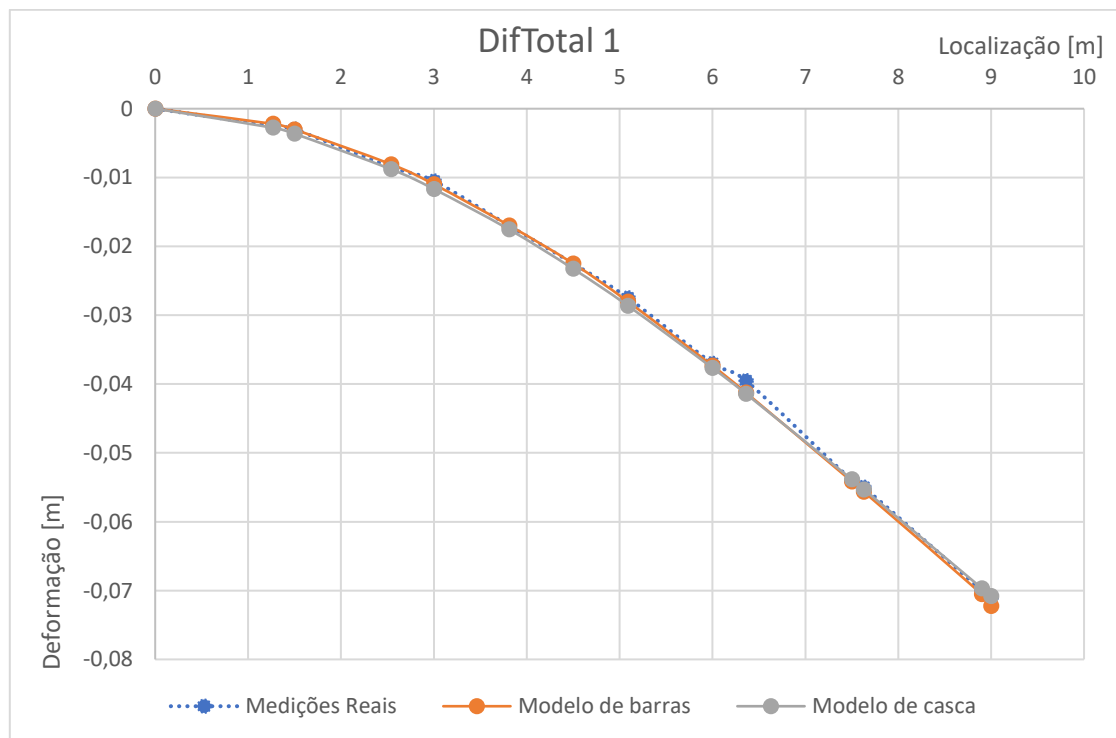


Figura 6.2 - Comparação das deformações experimentais e dos modelos numéricos para o caso DifTotal-1

Com a adição da segunda carga concentrada ao modelo e comparando a diferença de deformadas em relação à deformada inicial realizou-se um gráfico referente ao caso DifTotal-2, que se encontra representado na Figura 6.3. Neste caso, as linhas referentes aos modelos numéricos e às medições reais também se sobrepõem de uma forma consistente, com a exceção de dois pontos que contêm diferenças mais evidentes. No ponto de localização 4,5 metros, as medições reais permitiram obter um deslocamento para este caso de 48 milímetros, enquanto no modelo de casca se obteve 46,6 milímetros e no modelo de barras 45 milímetros, resultando numa diferença de 3 milímetros. No ponto com localização de 6,36 metros, que foi o ponto que obteve maiores diferenças no caso anterior, a diferença de deformação para as medições reais foi de 80

milímetros, no modelo de barras foi de 82,5 milímetros e no modelo de casca de 82,9 milímetros, resultando numa diferença de 3 milímetros como no outro ponto.

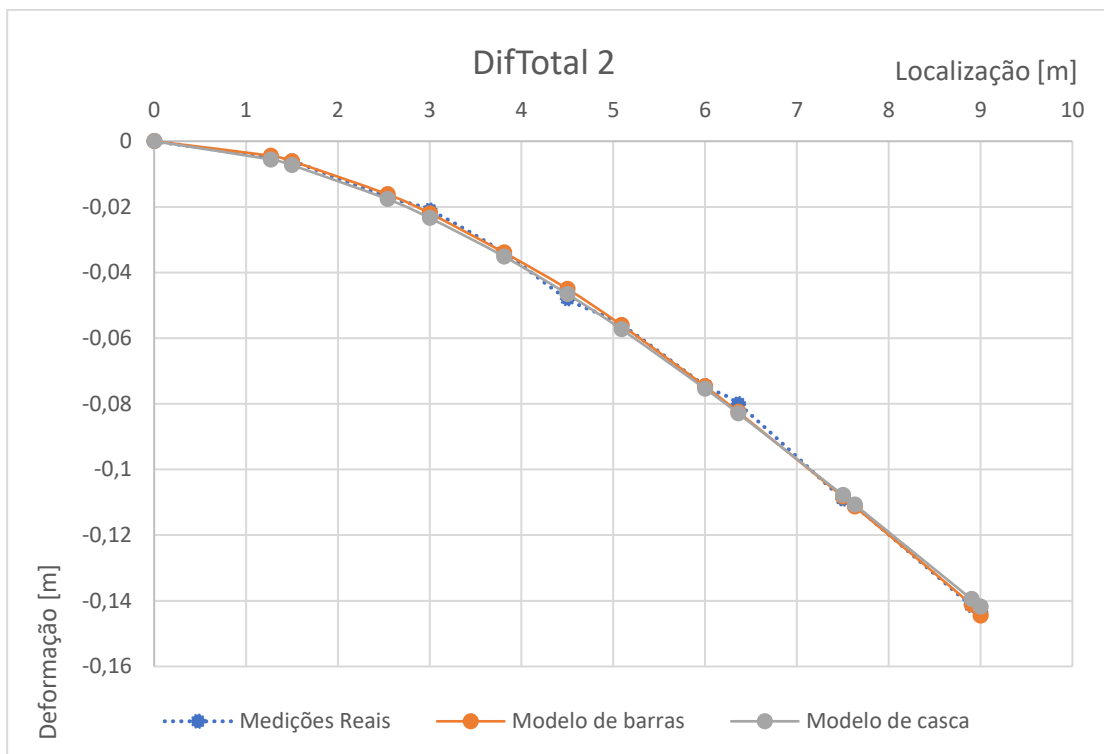


Figura 6.3 - Comparação das deformações experimentais e dos modelos numéricos para o caso DifTotal-2

No caso DifTotal-3, com as três cargas aplicadas no modelo, os valores obtidos encontram-se representados graficamente na Figura 6.4, e é possível observar que não existe nenhum ponto que pareça ter uma diferença tão representativa como nos casos anteriores. No entanto, isto não é verdade, pois como os resultados obtidos possuem uma ordem de grandeza um pouco mais alta, graficamente não é tão fácil de observar estas diferenças. A maior diferença encontra-se no ponto de localização de 9 metros, ou seja, a extremidade da barra. As medições reais permitiram obter uma diferença de 216 milímetros em relação à deformada inicial, para o modelo de barras este valor foi coincidente, ou seja, 216 milímetros, no entanto, para o modelo de casca o resultado obtido foi de 213 milímetros tendo, assim, uma diferença de 3 milímetros como no caso anterior.

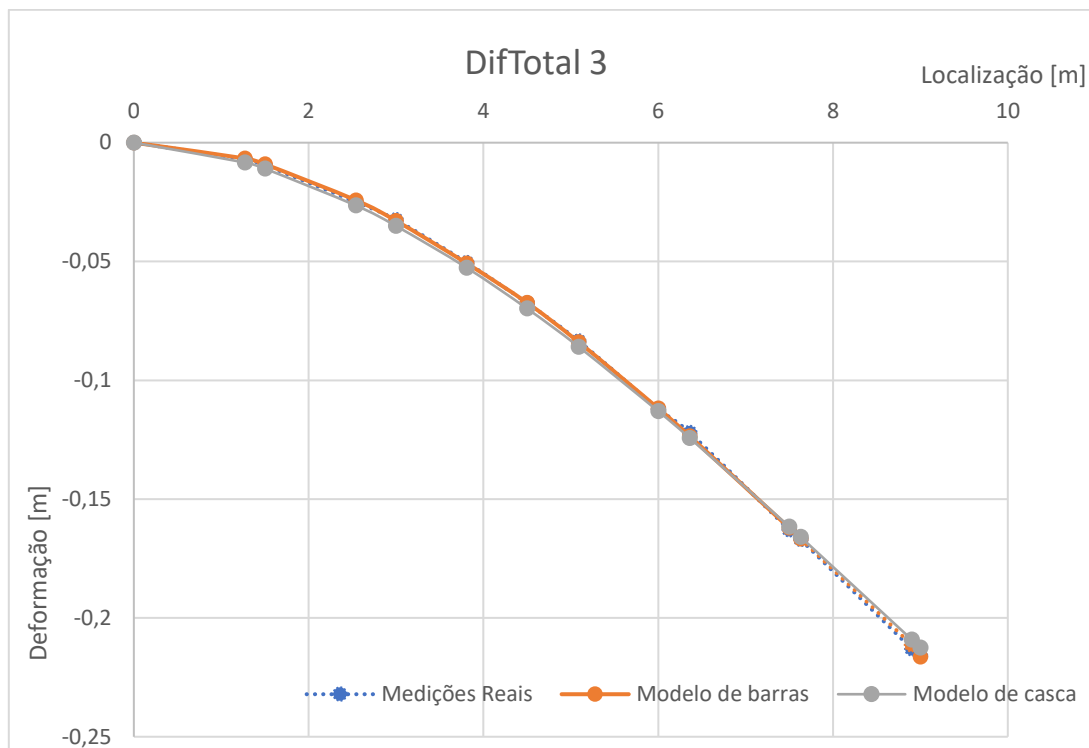


Figura 6.4 - Comparação das deformações experimentais e dos modelos numéricos para o caso DifTotal-3

Se analisarmos individualmente cada caso e o seu intervalo de deformações, é possível concluir que para cada carga adicionada, a deformação provocada por estas apresenta valores muito semelhantes. Por exemplo, na extremidade da barra, nos resultados das medições reais, o acréscimo de deformação quando foi colocada a primeira carga foi de 7,1 milímetros. Ao colocar a segunda carga o seu acréscimo foi de 7,2 milímetros e da terceira carga foi de 7,3 milímetros. Como as cargas têm valores para o seu peso muito semelhantes, faz sentido que as deformações resultantes da adição destas ao modelo físico também sejam semelhantes. No caso dos modelos numéricos estas diferenças são sempre constantes. No modelo de barras cada carga apresenta um acréscimo de 7,2 milímetros e no modelo de casca cada carga apresenta um acréscimo de 7,1 milímetros de deformação.

De seguida foi efetuada a comparação entre as medições reais e os resultados obtidos a partir do sistema de monitorização de imagem. Os dados obtidos pelo sistema de imagem resultam em medições realizadas apenas nos pontos onde se encontram os alvos deste sistema colocados no modelo, pelo que esta avaliação será feita apenas para esses pontos.

A comparação de resultados será efetuada da mesma maneira que foi feita para os dados dos modelos numéricos, ou seja, comparando as deformações resultantes das adições das três cargas concentradas em relação à deformada inicial, com todo o equipamento. Nesta análise, os três intervalos de deformações em estudo foram denominados de “DifTotal-1 SI”, “DifTotal-2 SI” e “DifTotal-3 SI”.

A informação adquirida pelo sistema de monitorização de imagem resulta em pontos variados no tempo que possuem a informação da localização do alvo em estudo nesse instante. Na Figura 6.5 está representada a informação para o alvo lateral com a localização de 8,90 metros. O sistema foi calibrado com a deformada que possui todo o equipamento do modelo físico e, portanto, as deformações resultantes estão em função desta. Na Figura 6.5 é possível observar os três patamares em que foram colocadas as três cargas concentradas no modelo físico. Para a determinação das deformações em cada um destes patamares foi calculada uma média de um intervalo de pontos em cada um, com o objetivo de obter resultados mais ajustados.

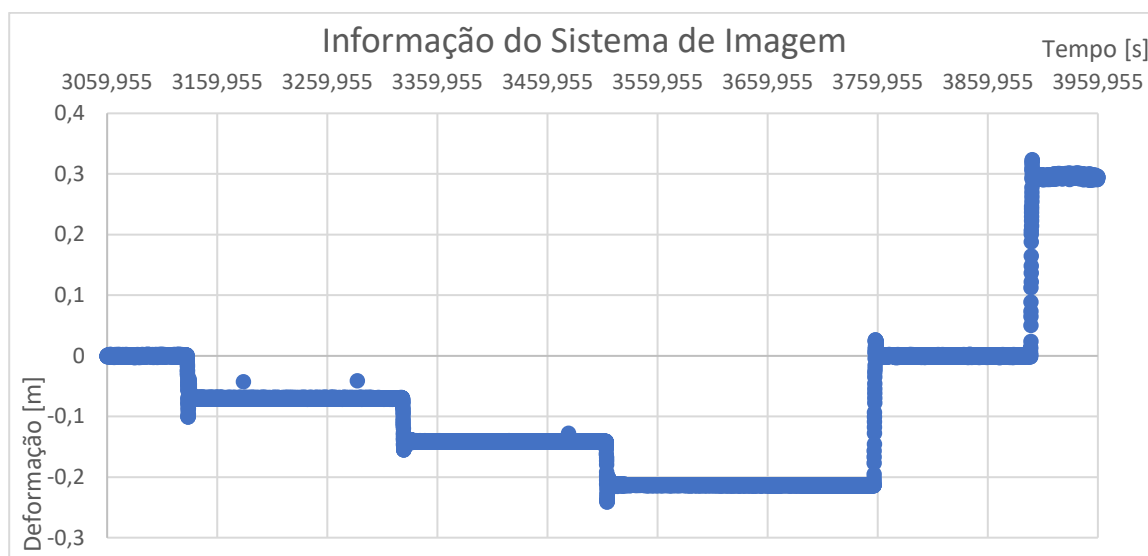


Figura 6.5 – Informação obtida pelo sistema de imagem para o ensaio estático em *flap*

No caso DifTotal-1 SI, representado na Figura 6.6, é possível observar algumas diferenças nos resultados obtidos pelo sistema de imagem e as medições reais, principalmente nos pontos iniciais da barra. As maiores diferenças estão presentes nos pontos de localização 2,54 metros e 3,81 metros, com uma diferença de 1,1 milímetros.

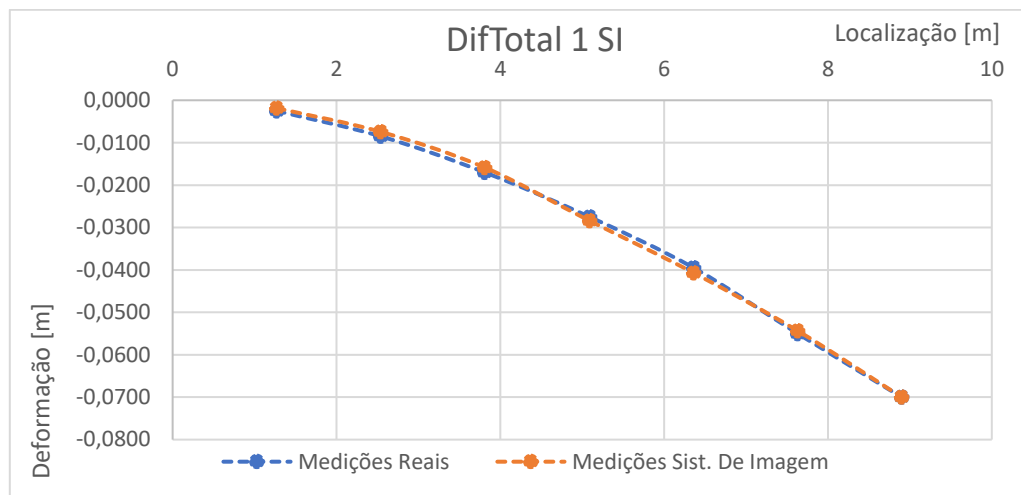


Figura 6.6 - Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso DifTotal-1 SI

Com a colocação da segunda carga concentrada, a diferença de deformações tornou-se menos evidente com os valores obtidos pelo sistema de imagem e pelas medições reais a estarem mais coincidentes, na Figura 6.7 apenas no ponto de localização 6,36 metros é evidente uma diferença de resultados maior. Neste ponto, a deformação obtida nas medições a laser foi de 80 milímetros, enquanto os resultados do sistema de monitorização de imagem obtiveram uma deformação de 82,2 milímetros, resultando numa diferença de 2,2 milímetros.

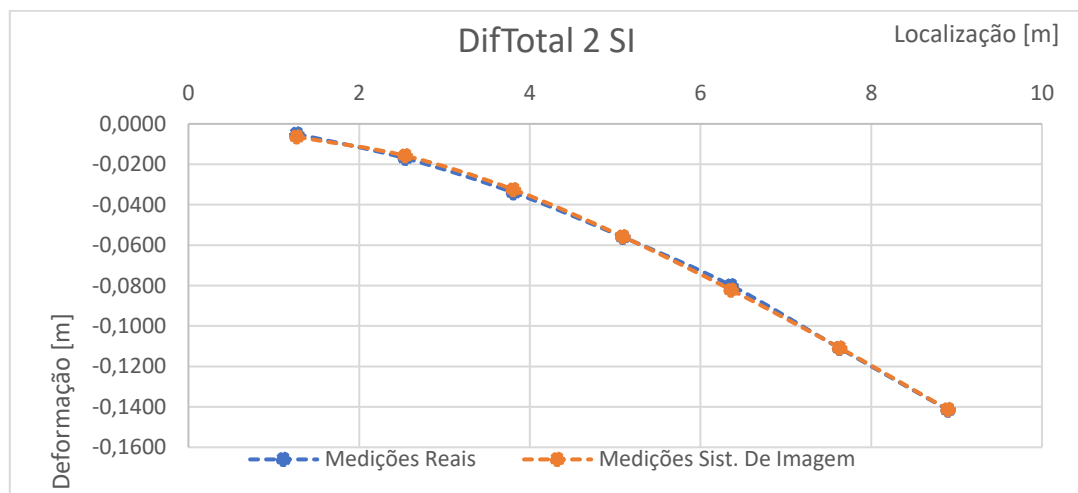


Figura 6.7 - Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso DifTotal-2 SI

Para o último intervalo de deformações os resultados obtidos por estes dois métodos apresentaram diferenças muito pequenas, tendo em conta o aumento da ordem de grandeza das deformações medidas (Figura 6.8). A maior diferença neste, continua a estar presente no ponto de localização de 6,36 metros. As

medições reais apresentam uma deformação de 122 milímetros e o sistema de imagem uma deformação de 124 milímetros, sendo uma diferença de 2 milímetros apenas.

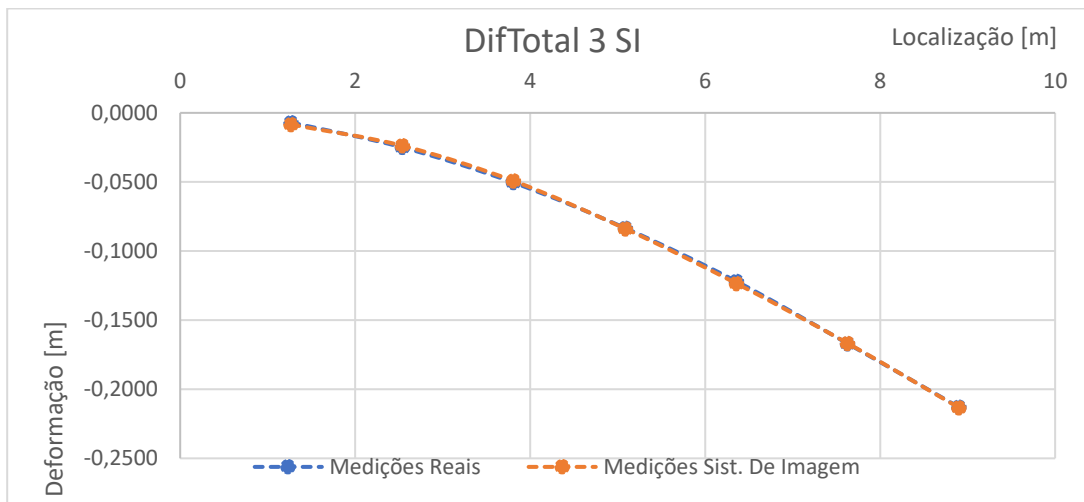


Figura 6.8 - Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso DifTotal-3 SI

Por último foram analisadas as deformações obtidas pelo sensor de monitorização ótico. As informações deste foram comparadas com as medições reais, a partir do mesmo processo realizado para os outros meios de monitorização.

O sensor ótico está instrumentado com sensores de *Bragg*, como referido anteriormente, em apenas algumas localizações ao longo da barra, sendo o ponto mais afastado da origem desta na localização de 8,70 metros. Este dado é importante, pois o algoritmo usado para calcular a deformada total do sensor apenas permite a realização de interpolações neste intervalo, pelo que os pontos que estudamos com localização após os 8,70 metros não podem ser avaliados com o sensor ótico. Sendo assim, a comparação de resultados será apenas realizada até ao ponto com localização de 7,63 metros.

A informação obtida pelo sensor ótico é gerada de maneira muito semelhante ao sistema de imagem, sendo assim, necessário recorrer ao Excel para o tratamento desta. Na Figura 6.9 estão representados os intervalos de deformações, obtidos pela aplicação das três cargas concentradas, no ponto de localização 7,63 metros.

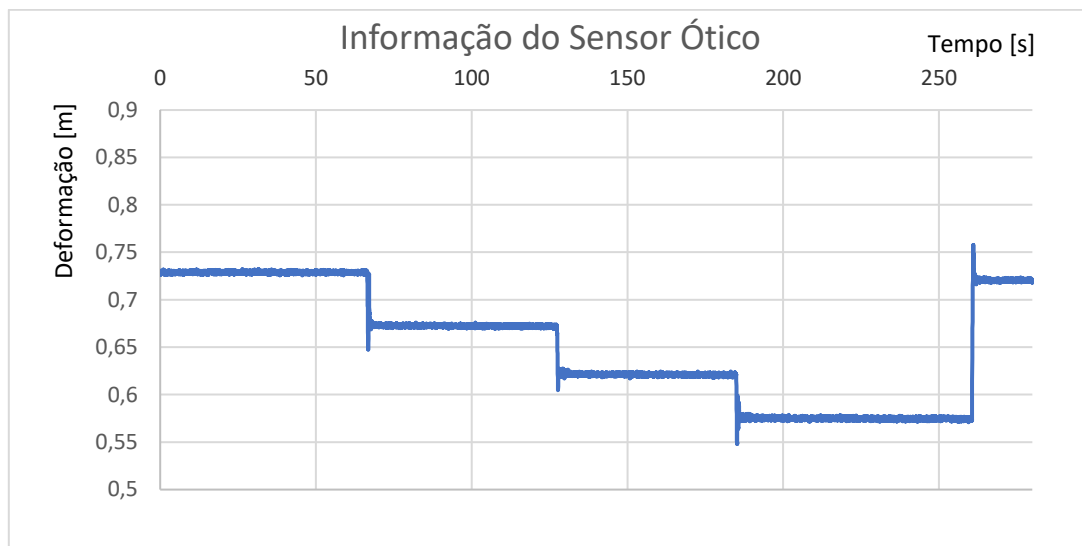


Figura 6.9 – Informação obtida pelo sensor ótico para o ensaio estático em *flap*

Os intervalos de deformações para o sensor ótico foram denominados de “DifTotal-1 Sensor”, “DifTotal-2 Sensor” e “DifTotal-3 Sensor”. É importante referir que os valores das abcissas, dependentes do tempo são diferentes no sistema de imagem e no sensor ótico, isto porque a gravação de dados de cada método não foi iniciada ao mesmo tempo e porque estes gravam informação numa taxa temporal diferente.

Para o primeiro intervalo de deformações, correspondente à aplicação da primeira carga, os resultados do sensor ótico comparativamente às medições reais são bastante coincidentes, como apresentado na Figura 6.10. As maiores diferenças de resultados estão presentes nos pontos de localização 3 metros e 6,36 metros, com uma diferença de 1,4 milímetros. Apresentando resultados melhores do que os modelos numéricos, mas um pouco piores que o sistema de imagem.

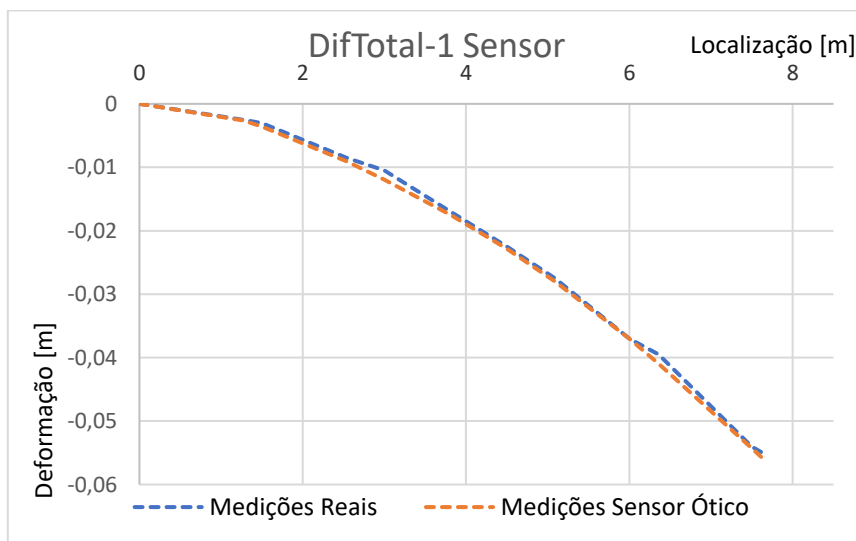


Figura 6.10 - Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso DifTotal-1 Sensor

Com a adição da segunda carga, o modo DifTotal-2 Sensor apresenta graficamente (Figura 6.11) maiores diferenças de resultados visíveis. As maiores diferenças estão presentes nos pontos de localização 3,81 metros e 4,5 metros. Para o ponto de 3,81 metros a deformação obtida nas medições reais foi de 34 milímetros e a deformação do sensor ótico foi de 31,2 milímetros, tendo uma diferença de 2,8 milímetros. No ponto que se encontra 4,5 metros da origem, a deformação obtida pelas medições reais foi de 44,8 milímetros e a do sensor ótico foi de 42,1 milímetros, resultando numa diferença de 2,7 milímetros. Mais uma vez, a diferença de resultados é melhor do que os modelos numéricos e piores do que o sistema de imagem.

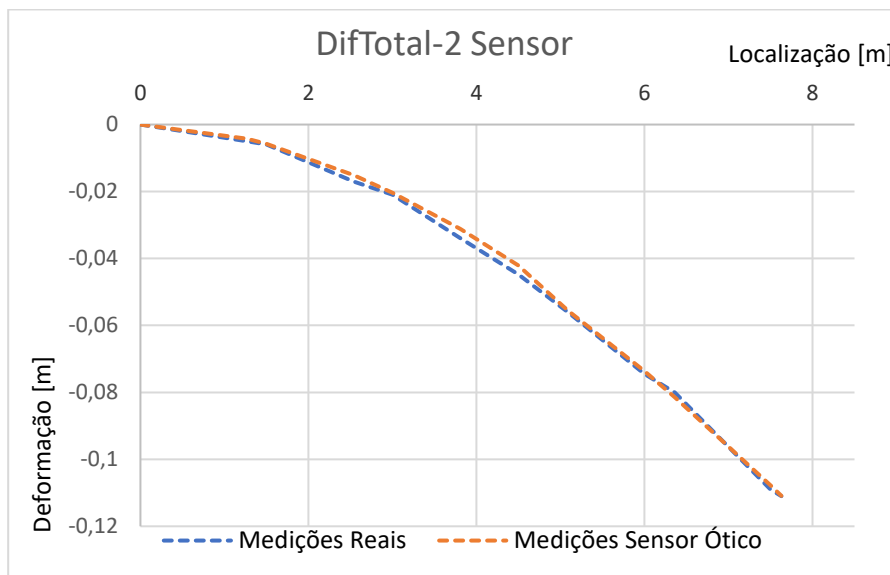


Figura 6.11 - Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso DifTotal-2 Sensor

O terceiro intervalo de deformações apresenta visualmente (Figura 6.12) as maiores diferenças de resultados do sensor ótico em relação às medições reais. A maior diferença está presente no ponto de localização de 7,63 metros, ou seja, o ponto mais afastado da origem que se estudou. Das medições reais foi possível determinar uma deformada de 167 milímetros, enquanto a deformada resultante dos dados do sensor ótico foi de 159,3 milímetros, obtendo assim uma diferença de 7,7 milímetros. Esta diferença foi a maior para qualquer dos casos estudados anteriormente e a percentagem de erro relativo deste valor é de 4,61%.

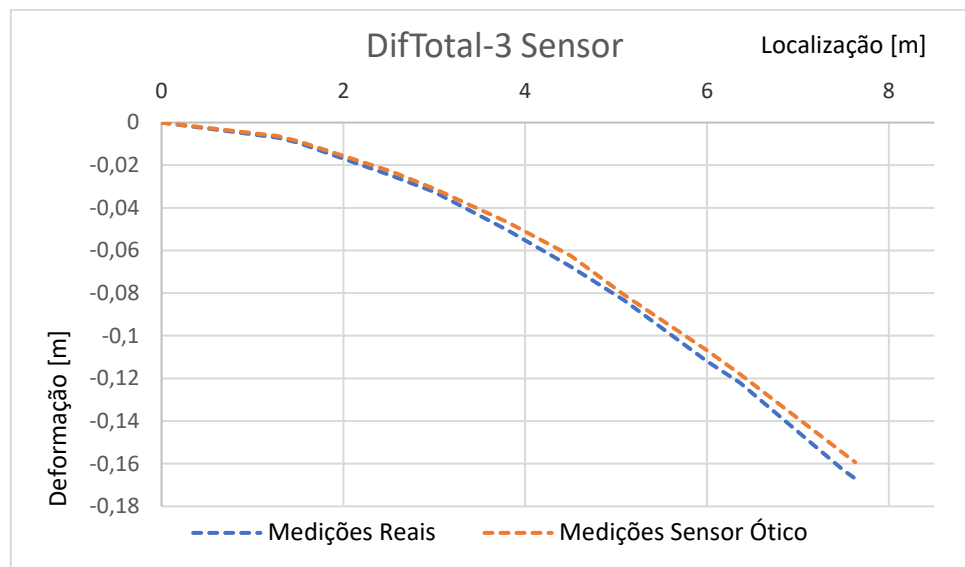


Figura 6.12 - Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso DifTotal-3 Sensor

A principal razão para os valores do sensor ótico apresentarem esta maior diferença de resultados para o último intervalo de deformações é a fixação deste ao modelo físico. O método usado para a fixação deste é um processo que ainda está a ser melhorado pela equipa da Fibersail, pelo que ainda ocorrem alguns erros de medição devido ao facto de o sensor não acompanhar a barra totalmente e para a realização destes ensaios optou-se por não colar o sensor na barra com o objetivo de não danificar esta.

O ensaio estático permitiu também realizar a captação de dados dos extensómetros óticos colados na barra. A informação destes permite perceber as deformações ocorridas na face superior e na face superior do modelo fixo, na secção onde estes foram instrumentados, e assim, comparar com os resultados obtidos no modelo de casca na mesma localização.

Os dados obtidos dos extensómetros óticos foram tratados com recurso ao Excel e encontram-se representados na Figura 6.13.

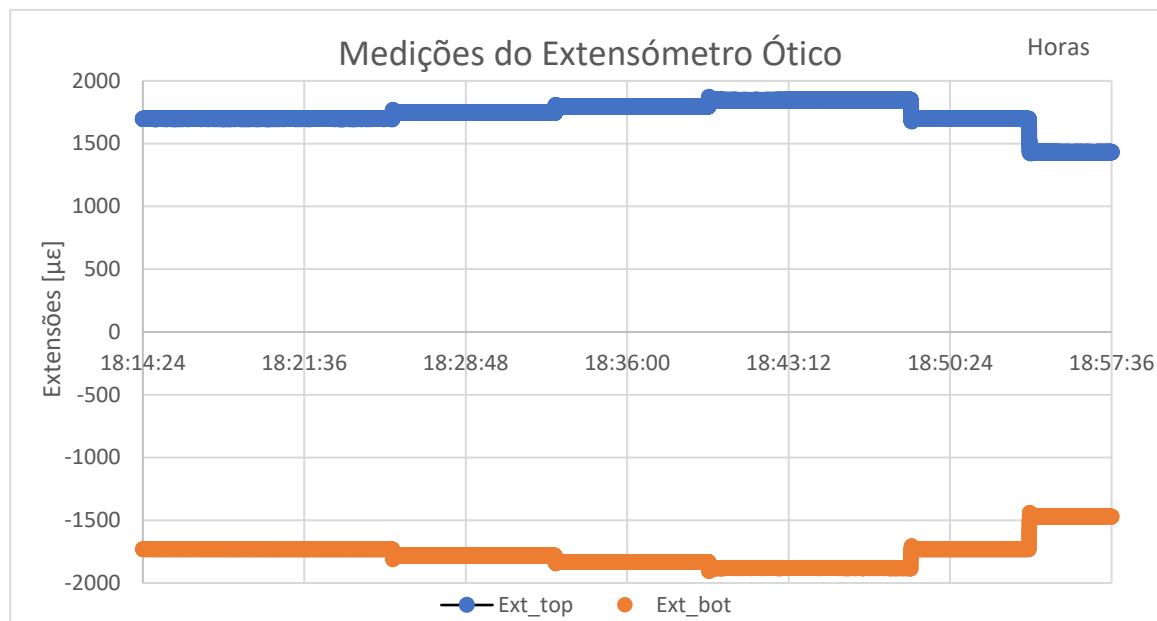


Figura 6.13 – Dados obtidos pelos extensômetros óticos no ensaio estático em flap

É possível comparar os resultados, obtidos pelo extensômetro durante a realização do ensaio estático, com os resultados obtidos numericamente pelo modelo de casca em quatro ocasiões. Antes da colocação das cargas concentradas usadas no ensaio e com a colocação de cada uma destas. Os resultados obtidos encontram-se representados pela Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados das extensões obtidos pelos extensômetros óticos e pelos modelos numéricos

Casos de carga	Extensômetro Sup. [με]	Extensômetro Inf. [με]	Face Sup. modelo [με]	Face Inf. modelo [με]
Antes do ensaio	1695,2	-1731,3	1651	-1653
Carga P1	1744,7	-1781,2	1698	-1704
Carga P1 + P2	1795,2	-1832,1	1751	-1755
Carga P1 + P2 + P3	1847,4	-1882,4	1805	-1806

Ao analisarmos os dados obtidos pelos dois métodos é possível concluir que existem uma diferença considerável entre os dois. Nos extensômetros, a diferença absoluta entre a face superior e a face inferior é constantemente cerca de $40 \mu\epsilon$, enquanto no modelo os valores são basicamente simétricos entre faces, o que faz sentido considerando que o modelo numérico deve apresentar resultados mais teóricos. No entanto, quando comparamos valores dos extensômetros com os valores do modelo para cada face é possível perceber que apesar das diferenças, estes têm uma tendência semelhante de crescimento. Quando comparamos a face superior, tanto no extensômetro ótico como no modelo, as extensões aumentam cerca de $50 \mu\epsilon$, e na face inferior acontece a mesma situação. Estes erros podem ser provenientes dos extensômetros óticos não estarem corretamente calibrados ou porque quando estes foram instrumentados pela primeira vez a barra já poderia ter extensões iniciais, isto porque o seu intervalo entre casos de carga é

constante, mas o valor inicial de medição é diferente, resultando, aparentemente, em valores incorretos quando comparado a um modelo numérico.

A Figura 6.14 representa a extensão da face superior antes da realização do ensaio, obtida através do modelo de casca.

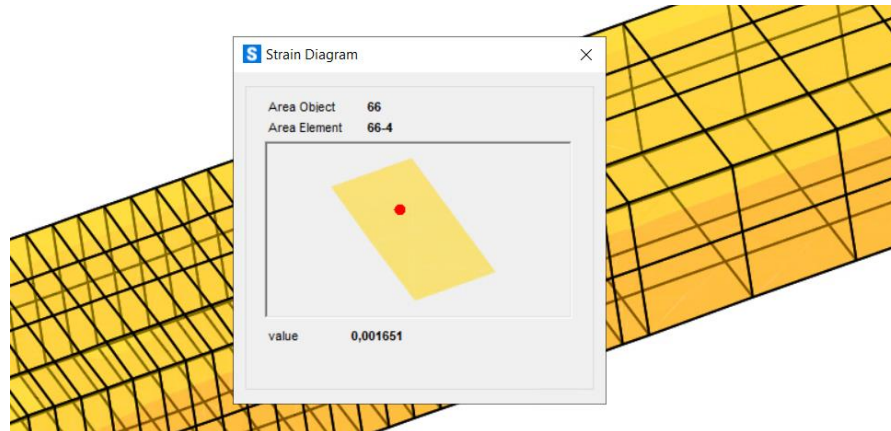


Figura 6.14 – Deformação da face superior obtida através do modelo de casca

6.2.2. DEFORMADA EM *EDGE*

Na direção em *edge*, existe a impossibilidade de realizar o ensaio estático com recurso a cargas concentradas, isto porque, para o estudo da deformação em *edge* estas teriam que ser aplicadas no sentido horizontal apenas, o que é impossível pela ação da gravidade. A alternativa resultou na aplicação de dois deslocamentos horizontais no ponto de localização de 9 metros, ou seja, basicamente na ponta da barra.

Este processo permitiu a obtenção de resultados reais medidos a laser, com um processo semelhante ao utilizado para a direção *flap*, em relação a uma parede, dados obtidos a partir do sistema de imagem e também do sensor ótico. Na avaliação de toda a informação, estes dados não serão comparados com modelos numéricos, pois como estes resultam da aplicação de um deslocamento, os modelos iriam ser modelados com estes deslocamentos e não faria sentido a sua interpretação.

Efetuuou-se assim, a comparação das medições reais com os resultados obtidos através do sistema de imagem e com os resultados do sensor ótico. O processo de comparação utilizado é o mesmo que foi usado no estudo das deformadas em *flap*. Neste caso, a barra apresenta uma geometria inicial muito simples, pelo que o estudo das deformadas foram feitos em relação a esta posição. Os dois deslocamentos aplicados foram denominados de “Conf-D1”, para o primeiro, e “Conf-D2” para o segundo deslocamento. Na Figura 6.15, estão apresentados os resultados obtidos nas medições a laser, para os dois deslocamentos impostos na estrutura. Comparativamente às deformadas de *flap*, o processo usado para efetuar as medições reais foi mais complicado, o que se torna evidente ao observar os resultados destas graficamente, pois os valores obtidos não conseguem representar deformadas tão coesas.

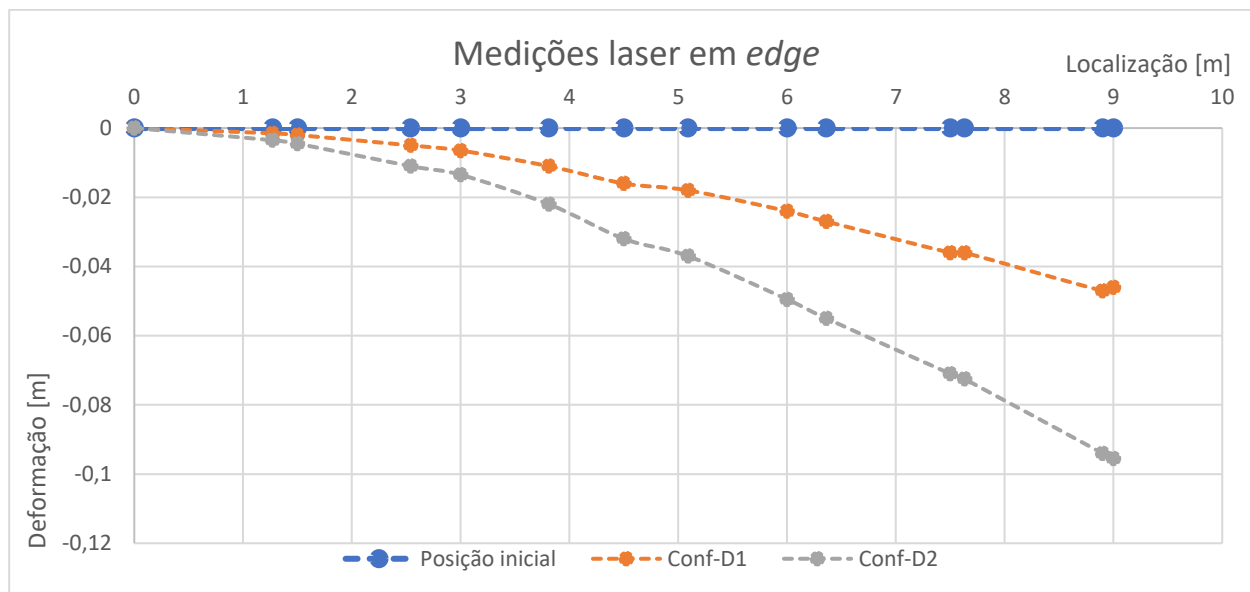


Figura 6.15 – Resultados das medições a laser para os deslocamentos em *edge*

Inicialmente, foi feita a comparação com o sistema de monitorização de imagem. A partir da informação não tratada deste é possível concluir que para a direção em *edge*, este tem mais dificuldades em captar a barra a partir dos alvos, isto porque, a informação possui muitos *outliers*, ou seja, erros, comparativamente à direção em *flap*. Na Figura 6.16 estão representados os dados do sistema de imagem para o ponto de localização 8,9 metros.

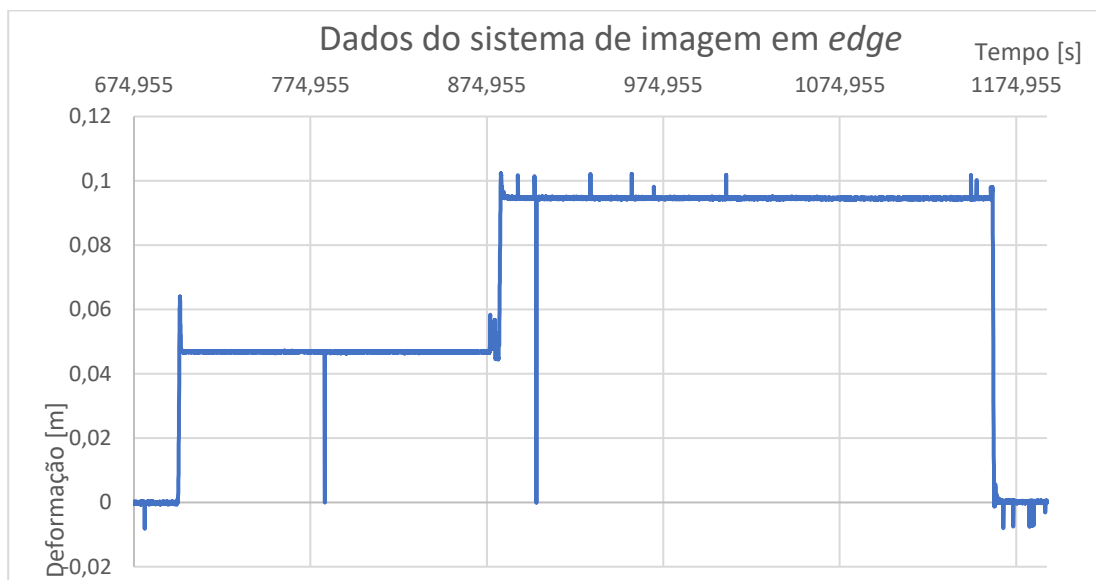


Figura 6.16 – Dados obtidos pelo sistema de imagem no ensaio estático em *edge*

Depois de tratar a informação do sistema de imagem, retirando os *outliers*, comparou-se os resultados obtidos para o primeiro deslocamento aplicado ao modelo físico. Tal como na deformada em *flap*, a comparação foi realizada apenas nos pontos que possuem alvos de imagem. Para esta configuração, a maior diferença de resultados está presente no ponto de localização 2,54 metros (Figura 6.17), sendo esta de 1,6 milímetros.

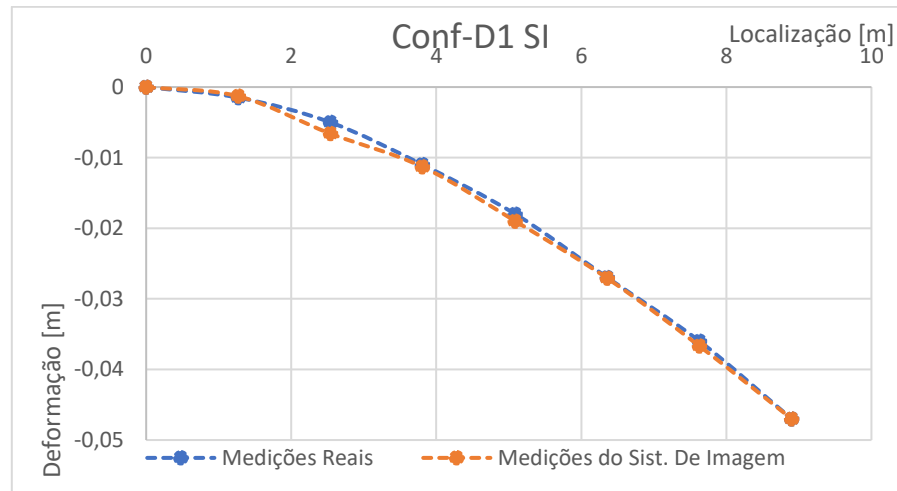


Figura 6.17 – Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso Conf-D1 SI

Ao aplicar o segundo deslocamento, as diferenças de resultados apresentadas na Figura 6.18, deixam evidente que a maior diferença entre os dois métodos se verificou no ponto de localização de 7,63 metros, com um intervalo de 2,5 milímetros entre estes.

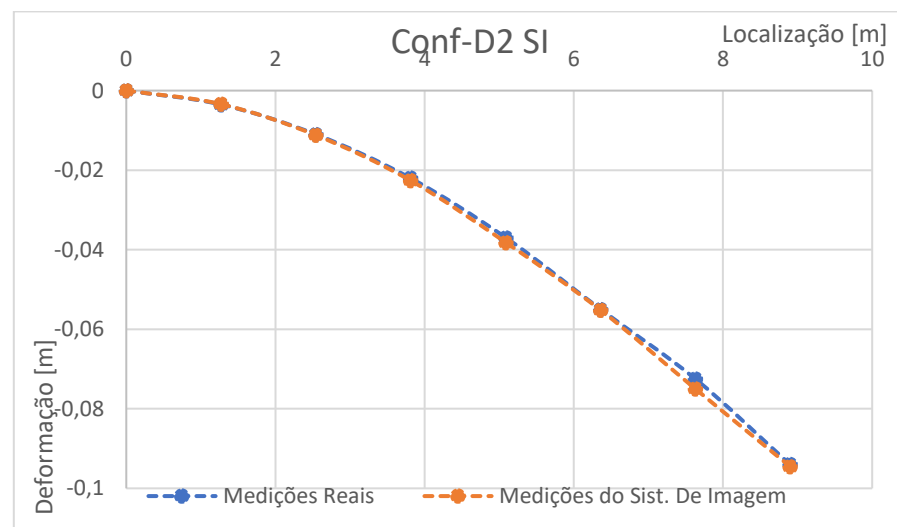


Figura 6.18 – Comparação das deformações experimentais e do sistema de imagem para o caso Conf-D2 SI

Na Figura 6.19 estão representados os valores das deformadas obtidas pelo sensor ótico no ponto de localização 8,7 metros. A avaliação da informação do sensor para esta deformada será realizada até este ponto, visto que é a secção mais afastada da origem que se encontra instrumentada com sensores de Bragg.

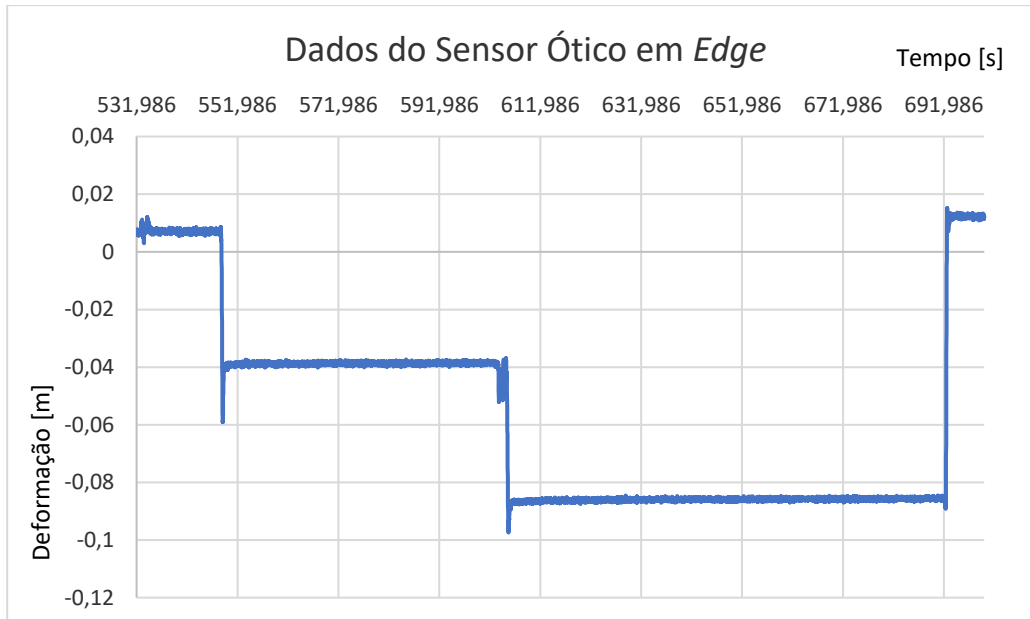


Figura 6.19 – Dados obtidos pelo sensor ótico no ensaio estático em edge

Na aplicação do primeiro deslocamento horizontal, a maior diferença entre os resultados do sensor ótico para com as medições reais, está presente no ponto de 4,5 metros (Figura 6.20). Neste ponto, a diferença é de 1,6 milímetros, que é exatamente o mesmo valor obtido para a maior diferença entre o sistema de imagem e as medições reais, no entanto, esta foi noutra ponto da barra.

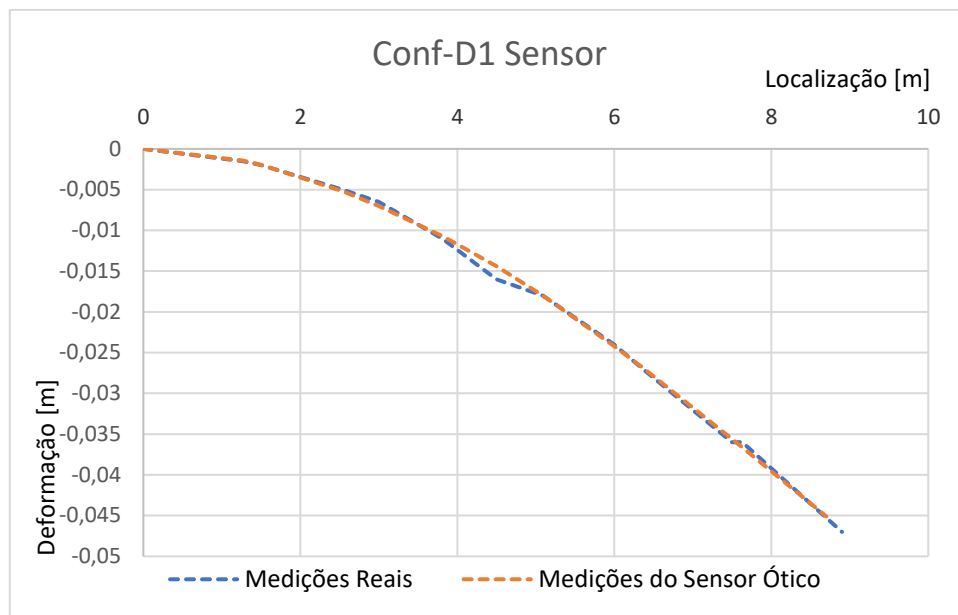


Figura 6.20 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso Conf-D1 Sensor

Os resultados obtidos pelo sensor para a segunda configuração de deslocamentos, apresenta a maior diferença em relação aos valores reais no mesmo ponto onde foi verificada a maior diferença em relação ao primeiro deslocamento, ou seja, no ponto de 4,5 metros, sendo esta de 2,8 milímetros. No ponto de localização de 7,63 metros, a diferença obtida pelo sensor ótico é a mesma que se obteve em relação ao sistema de imagem, uma diferença de 2,5 milímetros (Figura 6.21).

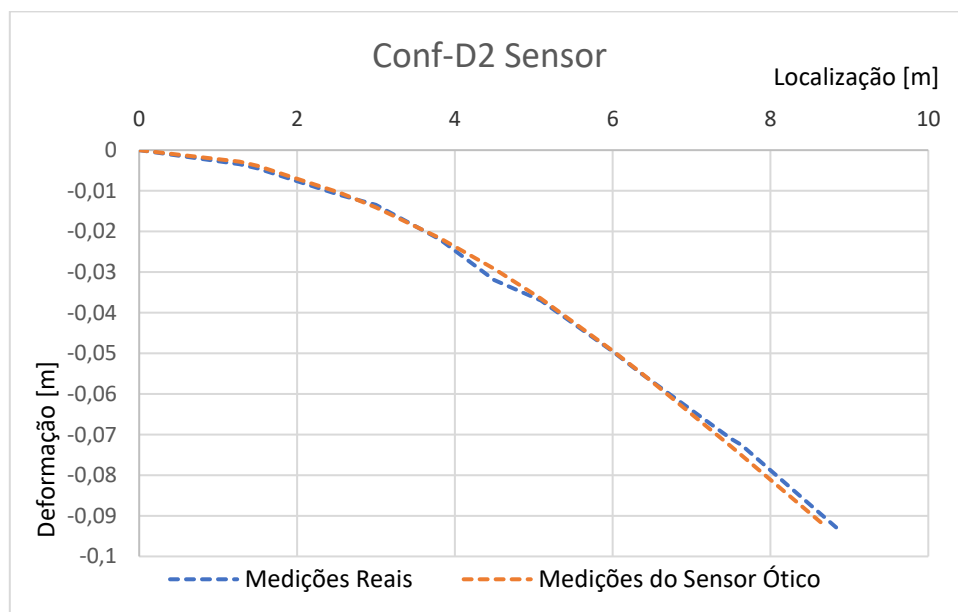


Figura 6.21 – Comparação das deformações experimentais e do sensor ótico para o caso Conf-D2 Sensor

Os resultados obtidos pelo sensor ótico para as deformadas em *edge* são mais consistentes, comparativamente às deformações em *flap*. Isto porque, as deformações que foram criadas apresentam valores menores e a fixação do sensor à barra não é um problema tão grave nas medições destes.

6.3. ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE

O ensaio de vibração livre que foi realizado, foi dividido em quatro partes. Dois casos para o estudo da direção em *flap* e outros dois para a direção em *edge*. Para cada direção, foi aplicado um deslocamento inicial à estrutura nessa mesma direção, tendo esta sido subitamente largada, criando uma vibração da estrutura. No outro caso, foi efetuado um impulso em cada direção, isto é, uma pancada na barra na direção em estudo com o objetivo de esta vibrar.

Neste ensaio, inicialmente, será realizada a comparação da amplitude pico a pico de deslocamentos para cada caso entre os dados obtidos pelo sensor ótico e pelo sistema de monitorização de imagem.

O primeiro caso avaliado foi o deslocamento inicial da direção de *flap*. Foi realizado o estudo para o mesmo ponto de localização 7,63 metros, denominado de alvo 6, para todos os casos. Os resultados obtidos a partir do sistema de imagem encontram-se representados na Figura 6.22.

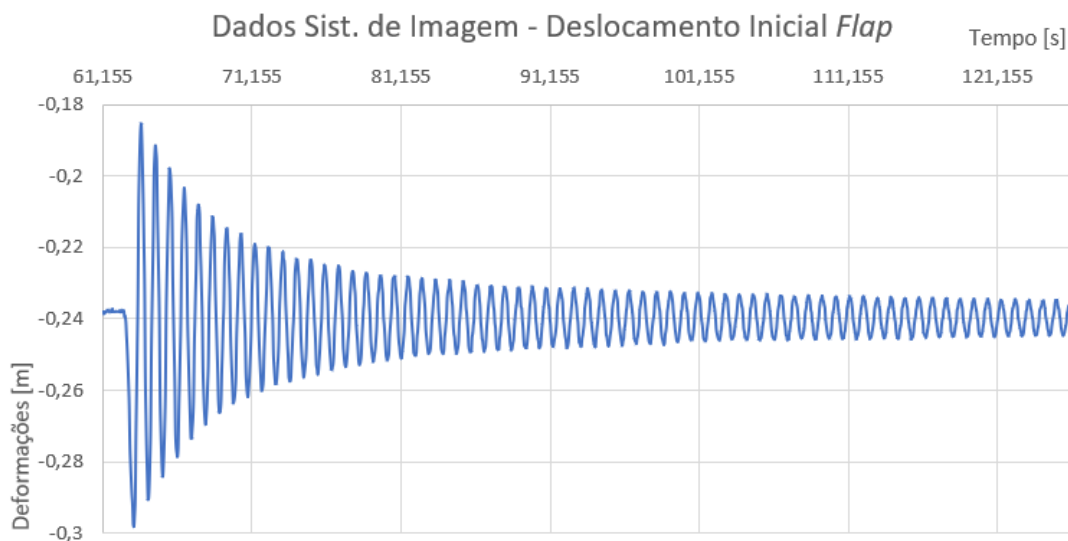


Figura 6.22 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o deslocamento inicial em flap

A maior amplitude de deslocamentos obtidos pelo sistema de imagem diz respeito ao início do ensaio deste caso de estudo, e tem o valor de 112,7 milímetros. Os dados obtidos pelo sensor ótico (Figura 6.23) apresentam uma amplitude de deslocamentos inicial de 126 milímetros, resultando numa diferença de 13 milímetros entre resultados.

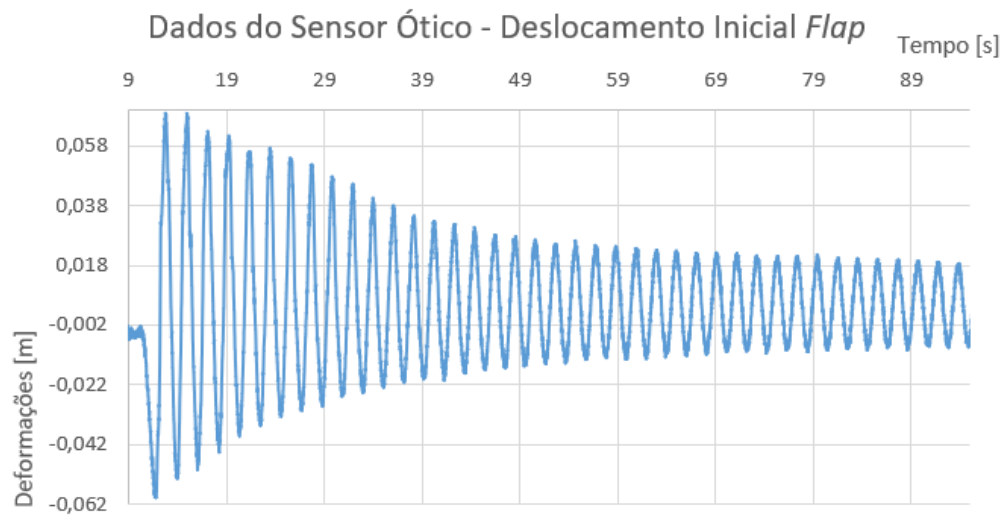


Figura 6.23 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o deslocamento inicial em *flap*

No caso do impulso aplicado em *flap*, o sistema de imagem registou uma amplitude de deslocamentos de 27,7 milímetros (Figura 6.24). Enquanto os resultados obtidos pelo sensor ótico foram de 30,2 milímetros, ou seja, uma diferença de 2,5 milímetros (Figura 6.25).

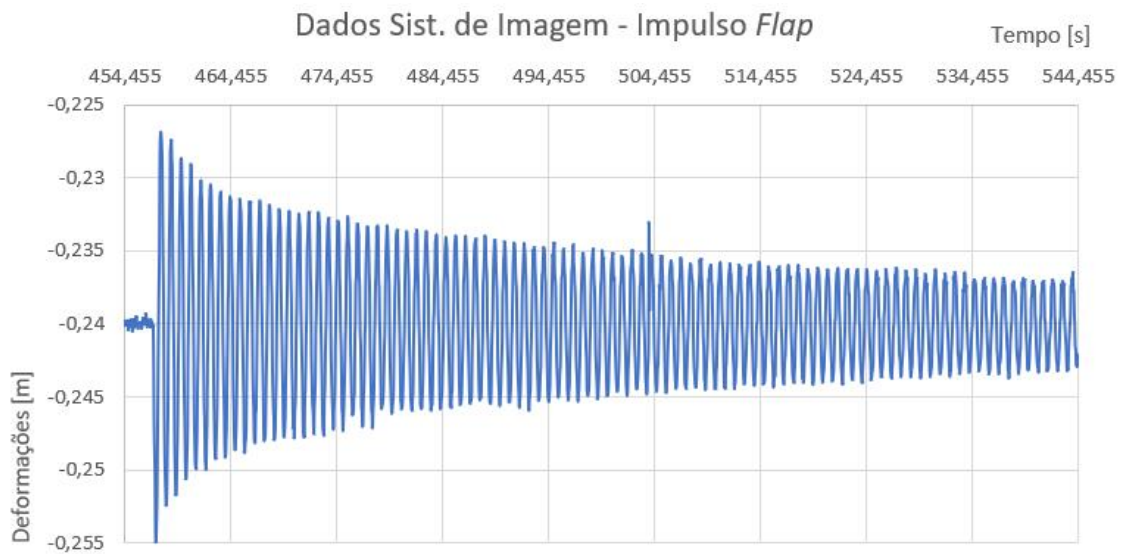


Figura 6.24 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o impulso em *flap*

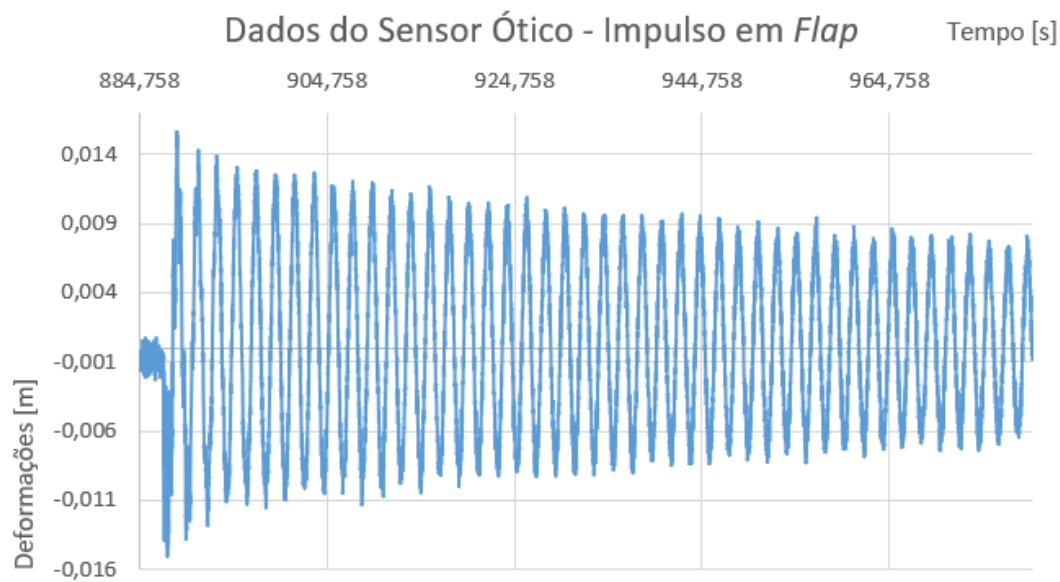


Figura 6.25 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o impulso em *flap*

Para direção em *edge*, a amplitude de deslocamentos observados pelo sistema de imagem resultou em 38 milímetros (Figura 6.26), enquanto a amplitude gerada pelos sensores óticos foi de 35 milímetros, resultando numa diferença de 3 milímetros (Figura 6.27).

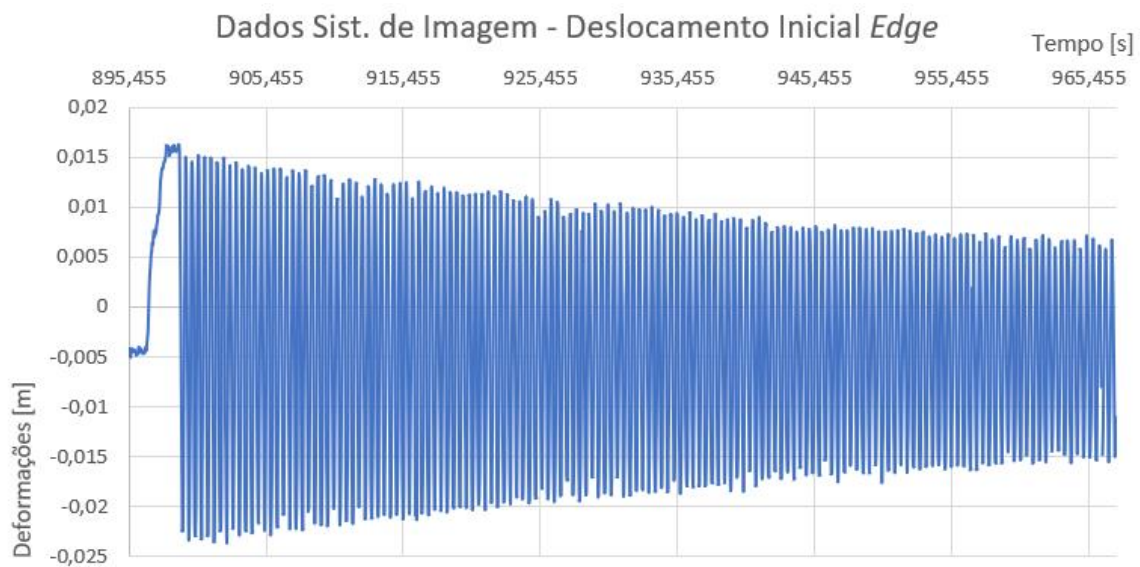


Figura 6.26 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o deslocamento inicial em *edge*

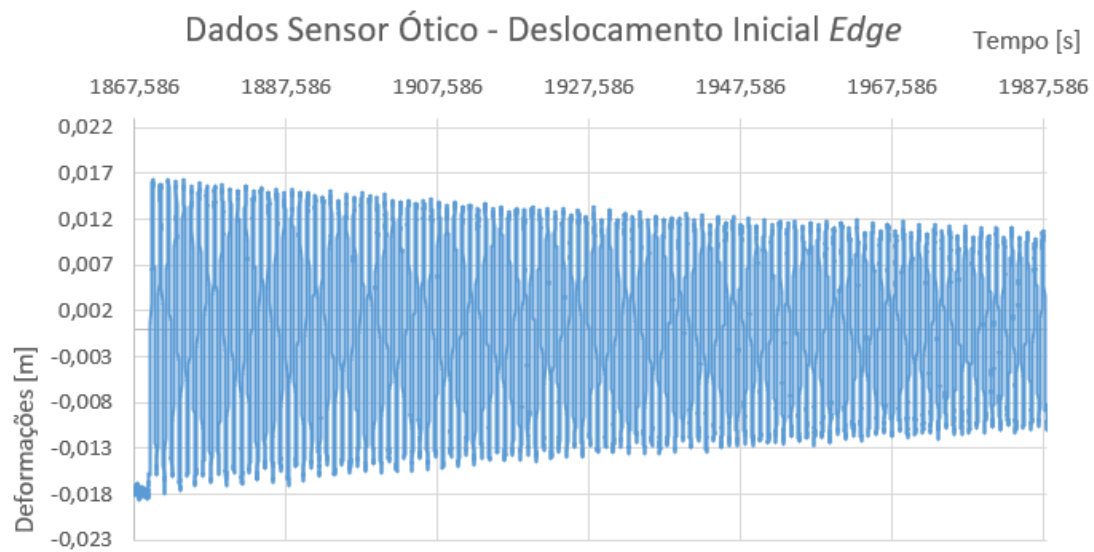


Figura 6.27 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o deslocamento inicial em *edge*

O último caso, diz respeito ao impulso na direção *edge*. A monitorização do sistema de imagem resultou numa amplitude de deslocamentos de 34 milímetros (Figura 6.28), enquanto o sensor obteve um valor mais baixo de 28 milímetros, fazendo uma diferença de resultados para este caso de 6 milímetros (Figura 6.29).

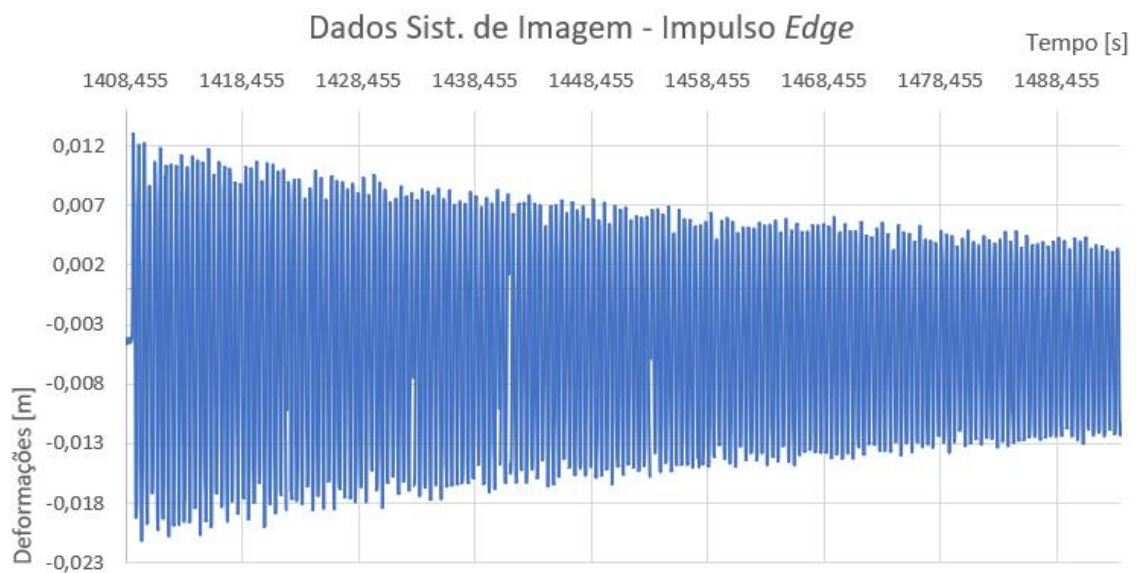


Figura 6.28 – Dados obtidos pelo sistema de imagem para o impulso em *edge*

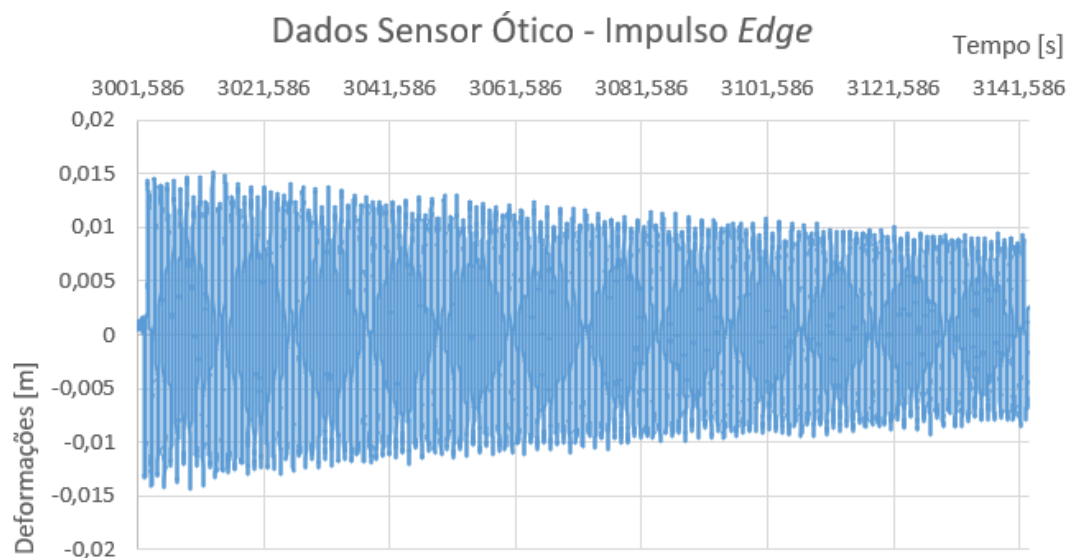


Figura 6.29 – Dados obtidos pelo sensor ótico para o impulso em *edge*

Com a informação proveniente destes ensaios, foi possível calcular de uma forma simples, o amortecimento e a frequência do primeiro modo de vibração para cada direção, no caso de aplicação de um deslocamento inicial. Estes valores encontram-se representados na Tabela 12.

Tabela 12 – Primeiro modo de vibração e amortecimento para os casos de deslocamentos iniciais

Caso de estudo	Primeiro modo de vibração [Hz]	Amortecimento [%]
Sist. De Imagem - Desl. Inicial em <i>flap</i>	0,501	1,2
Sensor ótico - Desl. Inicial em <i>flap</i>	0,502	0,82
Sist. De Imagem - Desl. Inicial em <i>edge</i>	1,09	0,13
Sensor ótico - Desl. Inicial em <i>edge</i>	1,03	0,05

Na realização do ensaio de vibração livre os extensómetros óticos também monitorizaram a estrutura. A partir destes foi possível determinar as amplitudes de extensões ao longo do ensaio. A Figura 6.30 representa como um exemplo, os dados obtidos pelo extensómetro inferior no caso do deslocamento inicial aplicado em *flap*.

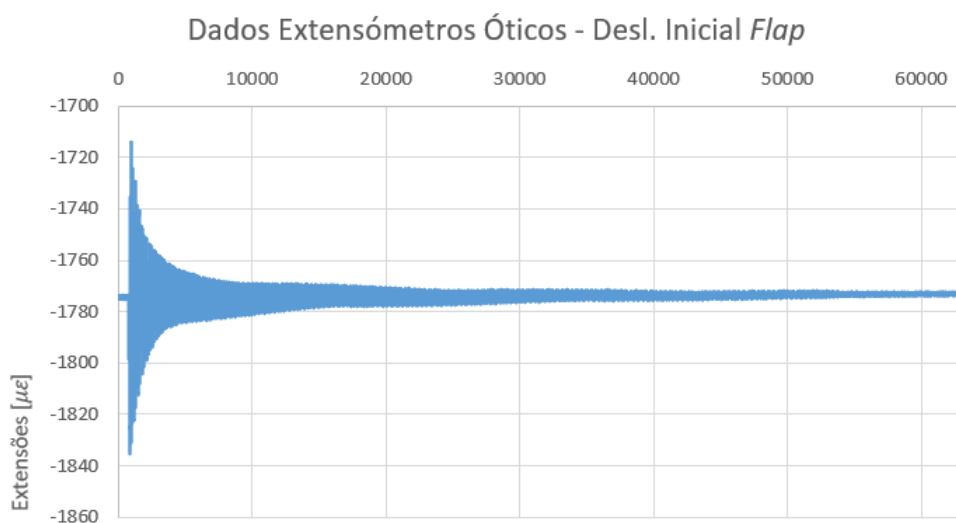


Figura 6.30 – Dados obtidos pelo extensômetro ótico para o deslocamento inicial em *flap*

No entanto, os dados obtidos pelos extensômetros permitiram a obtenção das frequências naturais da estrutura. Para a obtenção destas, foram usados os dados obtidos com o extensômetro ótico superior, e foi possível determinar a função densidade espectral de potência da extensão, permitindo verificar frequências dos primeiros seis modos de vibração da estrutura (Figura 6.31).

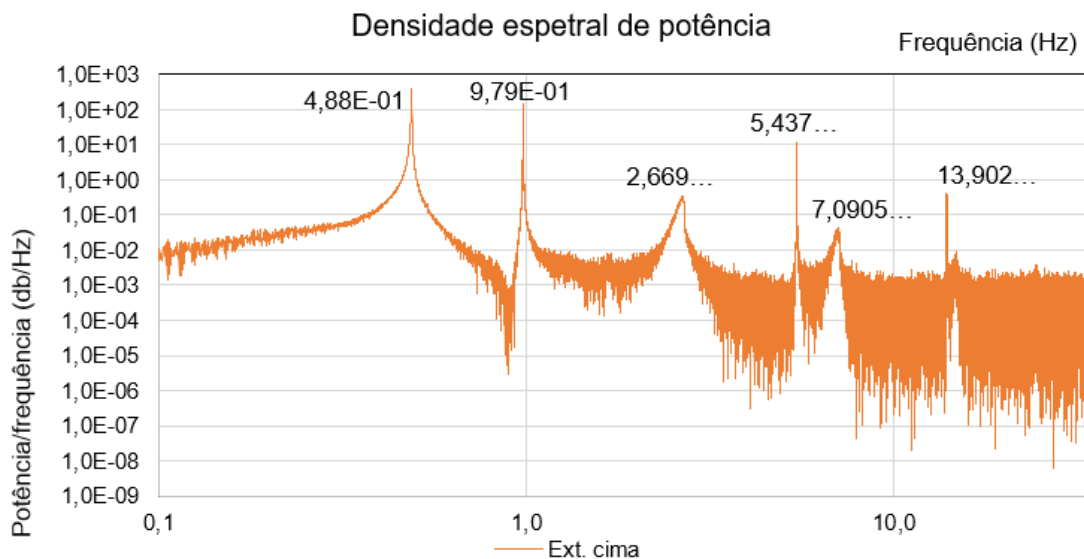


Figura 6.31 – Função densidade espectral de potência da extensão com os valores obtidos para as frequências naturais

Após a determinação dos seis primeiros modos de vibração da estrutura, é possível realizar a comparação com as frequências naturais calculadas pelos modelos numéricos. Inicialmente, utilizando o modelo de barras, verificamos as deformadas referentes a cada um destes modos de vibração, permitindo assim, saber se estas se deformavam na direção de *flap* ou na direção de *edge*, estando estas representadas desde a Figura 6.32 à Figura 6.37.

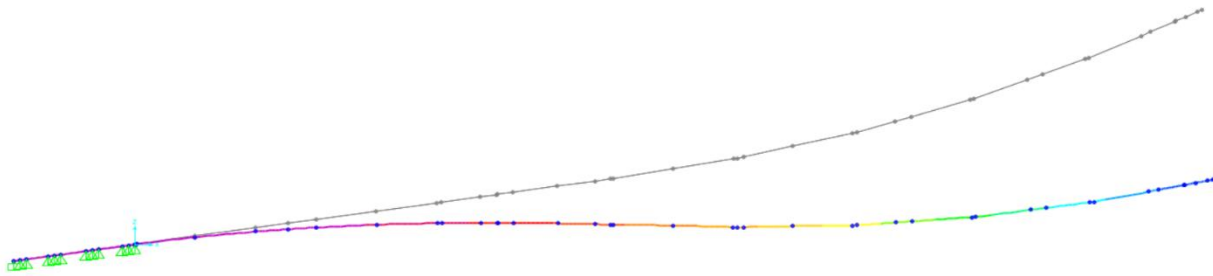


Figura 6.32 – Primeiro modo de vibração cuja direção é em *flap* ($f = 0,46396$ Hz)

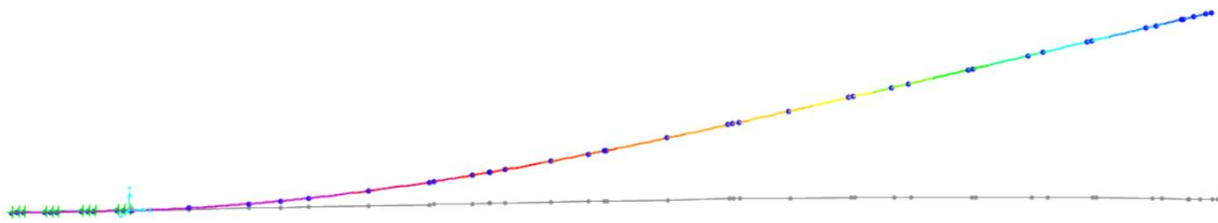


Figura 6.33 – Segundo modo de vibração cuja direção é em *edge* ($f = 0,97173$ Hz)

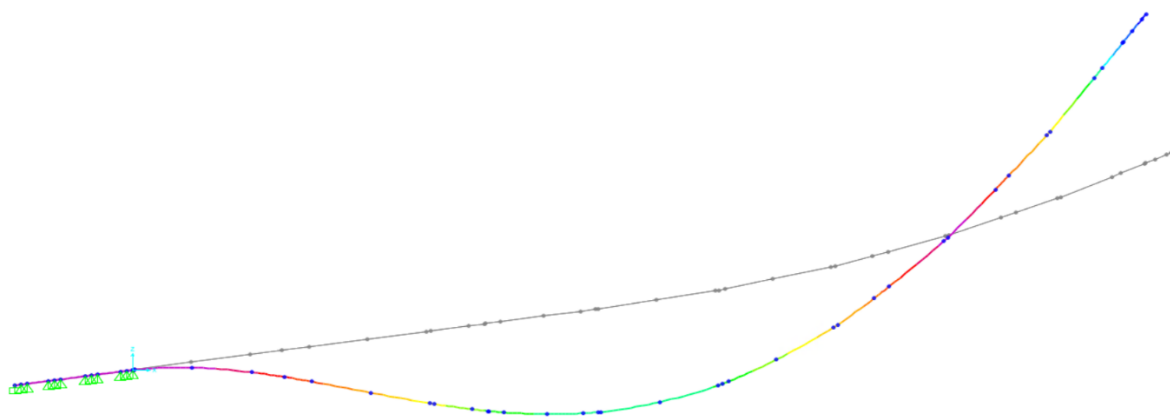


Figura 6.34 – Terceiro modo de vibração cuja direção é em *flap* ($f = 2,61426$ Hz)

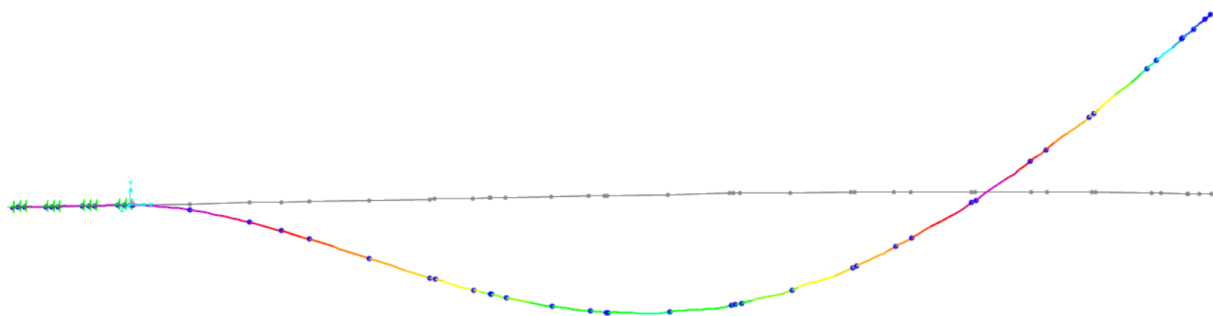


Figura 6.35 – Quarto modo de vibração cuja direção é em *edge* ($f = 5,35925$ Hz)

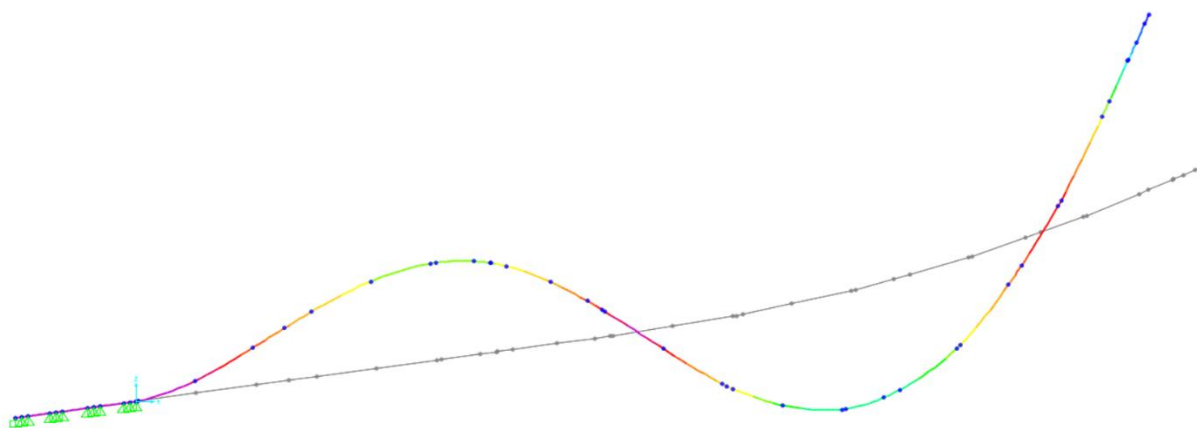


Figura 6.36 – Quinto modo de vibração cuja direção é em *flap* ($f = 7,10407$ Hz)

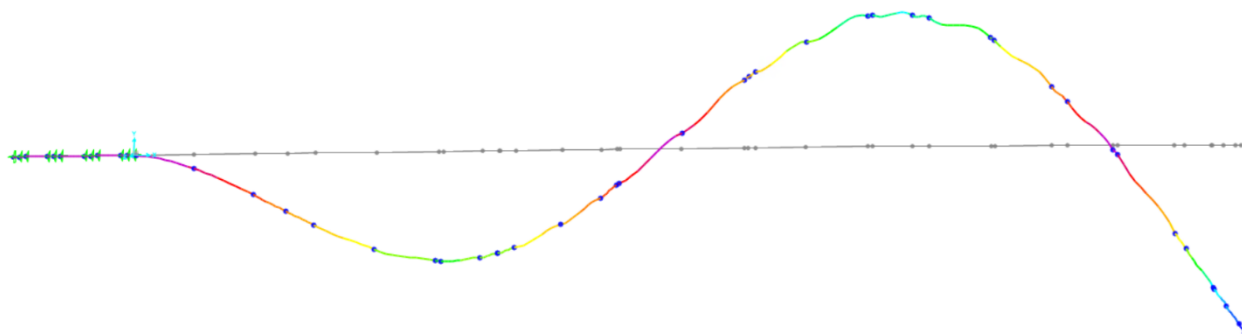


Figura 6.37 – Sexto modo de vibração cuja direção é em *edge* ($f = 13,98311$ Hz)

Após a verificação das frequências naturais obtidas nos modelos numéricos, toda a informação foi compilada na Tabela 17, verificando-se que os valores das frequências naturais dos primeiros seis modos de vibração obtidos numericamente são semelhantes aos valores que foram calculados através da informação proveniente dos extensômetros óticos, principalmente os valores do modelo de barras.

Tabela 13 – Resultados das frequências naturais obtidas experimentalmente e a partir dos modelos numéricos

Modo de vibração	Frequência Exp.	Freq.modelo de barras	Freq.modelo de casca	Descrição
1	0,4877	0,46396	0,46658	Deformada na direção de flap
2	0,9793	0,97173	1,00637	Deformada na direção de edge
3	2,669	2,61426	2,61044	Deformada na direção de flap
4	5,437	5,35925	5,5841	Deformada na direção de edge
5	7,0905	7,10407	7,14843	Deformada na direção de flap
6	13,902	13,98311	14,3071	Deformada na direção de edge

6.4. ENSAIO DE VIBRAÇÃO FORÇADA

A realização do ensaio de vibração forçada consistiu na instrumentação do modelo físico com um excitador dinâmico que provoca na estrutura uma carga cíclica rotativa. Este aparelho possui uma faixa de velocidade dos seus ciclos de rotação compreendida entre 0 e 25 Volts, ou seja, ao aumentarmos a voltagem aplicada ao aparelho maior será a velocidade de cada ciclo rotativo deste, o que significa aplicar à estrutura uma força sinusoidal de frequência variável.

O objetivo de provocar uma excitação na estrutura com este aparelho, é de possivelmente encontrar um nível de voltagem que esteja muito perto de uma frequência natural desta. No entanto, é necessária precaução, para que caso esta situação aconteça, não deixar a estrutura atingir amplitude de vibração muito elevada.

Neste ensaio, foi possível ajustar este aparelho de excitação nas duas direções de deformação com o objetivo de fazer o estudo individual destas. Para a análise de resultados, serão analisados os dados obtidos através do sensor ótico e dos extensômetros óticos. Os dados do sensor ótico serão obtidos para o ponto com 8,70 metros de localização, enquanto os dados do extensômetro ótico estão presentes na *root*, a 0,25 metros da origem.

Para a direção de *flap*, a partir dos dados obtidos pelo sensor ótico que estão representados na Figura 6.38 é possível verificar visualmente que foi possível aproximar a frequência aplicada à estrutura a uma frequência natural desta. Sendo a direção de *flap*, esta terá sido o primeiro modo de vibração de estrutura, com uma frequência natural experimental de 0,4877 Hz. A voltagem aplicada ao aparelho que permitiu tal aproximação foi de 9,27 Volts.

Os dados obtidos pelo extensômetro superior, representados na Figura 6.39, confirmam os resultados obtidos pelo sensor ótico e mostram também uma elevada variação de extensões, quando sujeitas à excitação do aparelho quando a sua voltagem é de 9,27 Volts.

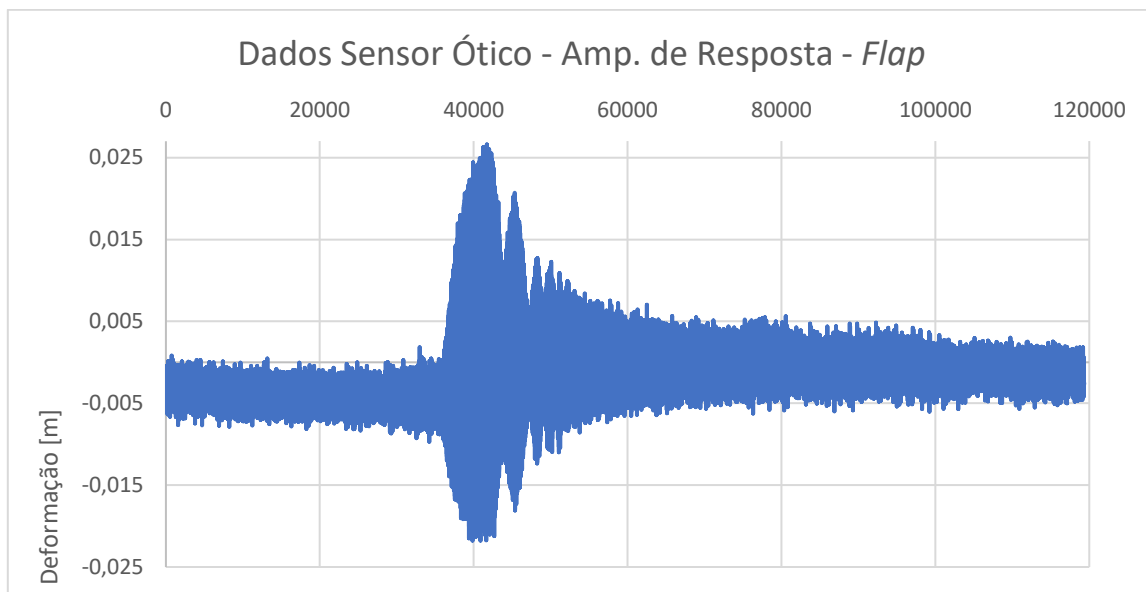


Figura 6.38 – Dados obtidos pelo sensor ótico para a amplitude de resposta em *flap*

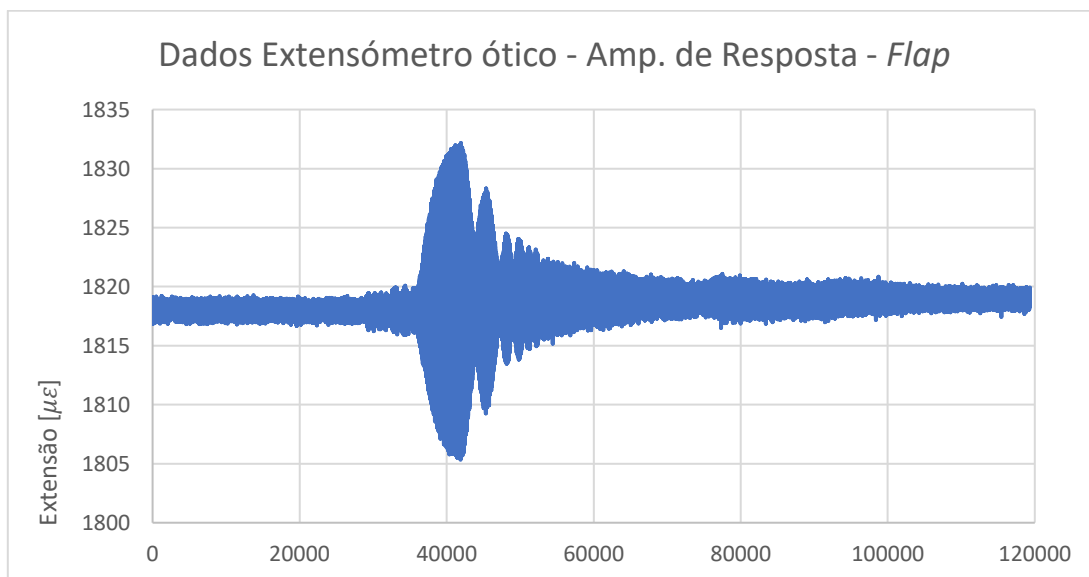


Figura 6.39 – Dados obtidos pelo extensômetro para a amplitude de resposta em *flap*

Na direção *edge*, também foi possível aproximar a estrutura do primeiro modo de vibração nesta direção, ou seja, o segundo modo de vibração global da estrutura, com valor experimental de 0,9793, atingindo uma amplitude máxima de deslocamentos de aproximadamente 110 milímetros (Figura 6.40). A voltagem aplicada ao aparelho quando se registou este fenómeno foi de 17,5 Volts. Visualmente é possível verificar um aumento ligeiro da amplitude de deslocamentos onde se registou o primeiro modo de vibração em *flap*,

isto porque, a geometria da estrutura e os sucessivos deslocamentos resultantes da excitação, fazem com que uma pequena parcela da carga cíclica seja aplicada na direção de *flap*, registando assim um pequeno aumento na zona de aproximação da frequência do primeiro modo de vibração desta direção.

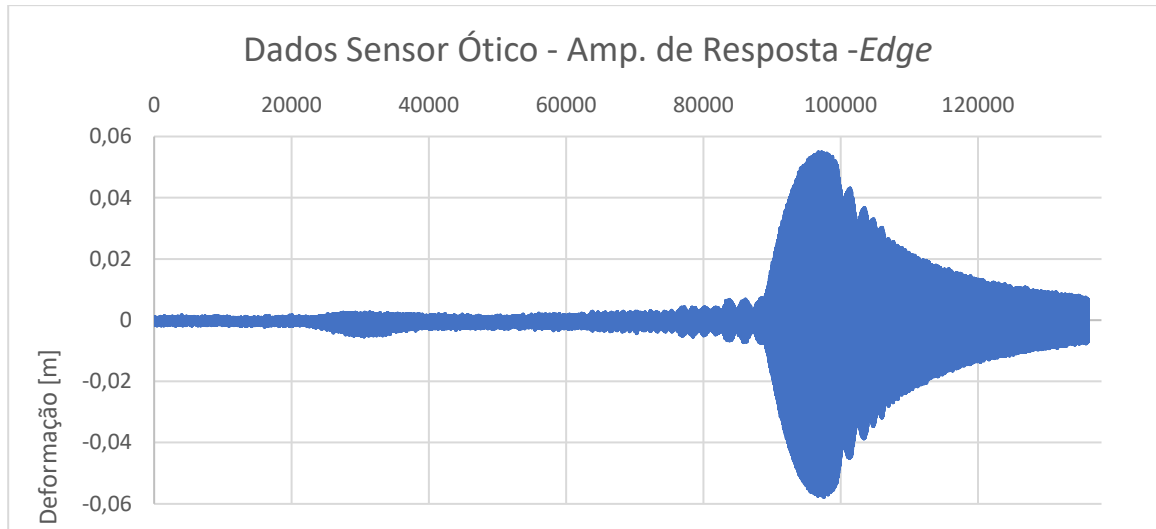


Figura 6.40 – Dados obtidos pelo sensor ótico para a amplitude de resposta em *edge*

Mais uma vez, os dados obtidos através do extensómetro superior ótico, permitiram verificar as conclusões tiradas a partir dos dados do sensor ótico (Figura 6.41). Sendo ainda mais evidente a aproximação da frequência natural do primeiro modo de vibração na direção *flap*, pelas razões já referidas anteriormente.

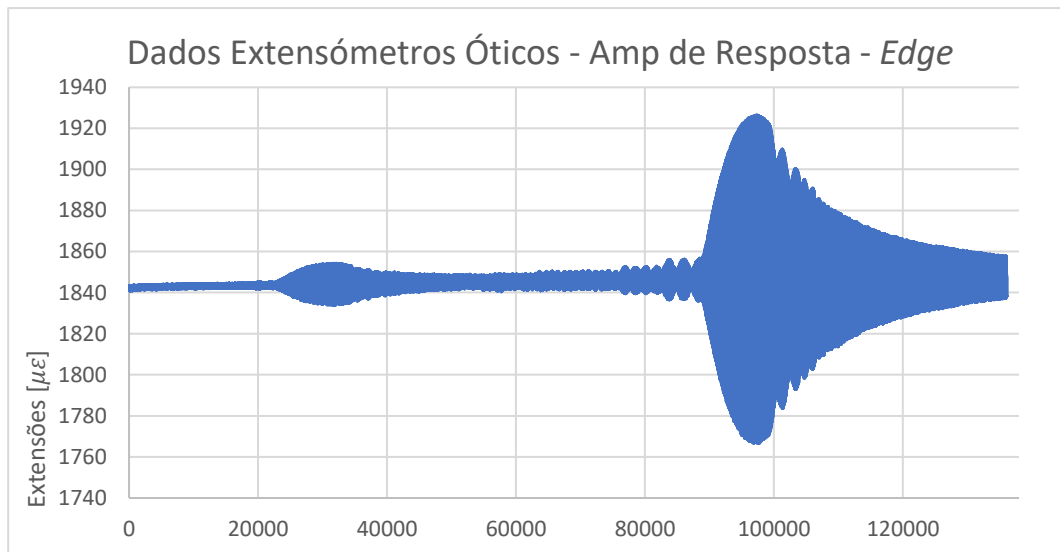


Figura 6.41– Dados obtidos pelo extensómetro ótico para a amplitude de resposta em *edge*

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho era a validação da implementação de um sensor de fibra ótica baseado em sensores de *Bragg*, na monitorização de pás de turbinas eólicas. O modelo físico em estudo permitiu a instrumentação deste com o objetivo de simular um cenário de monitorização de uma estrutura, que por sua vez possui características de deformabilidade muito grandes semelhantes a pás de turbinas eólicas.

No desenvolvimento desta tese foi possível adquirir diversos conhecimentos gerais sobre a energia eólica e, principalmente, sobre os equipamentos usados atualmente na sua exploração, as turbinas eólicas. Pessoalmente, foi possível também adquirir conhecimentos sobre a modelação de estruturas usando métodos de elementos finitos e consequentemente sobre o estudo experimental de uma estrutura, principalmente do ponto de vista dinâmico.

No capítulo 2 foi realizada uma pequena introdução geral sobre a energia eólica e o seu uso atual na sociedade. Com mais detalhe, foram apresentadas as características dos principais elementos das turbinas eólicas e as suas funções. Do ponto de vista estrutural, foi feita referência às principais cargas e esforços a ter conta no seu dimensionamento, tendo como objetivo também perceber o porquê destas estruturas serem tão especiais e da sua monitorização ser indispensável.

No capítulo seguinte foi feita a descrição física do modelo físico usado na instrumentação do sensor e nos ensaios previstos para a obtenção de informação sobre este. Este capítulo foi fundamental para o estudo do comportamento da estrutura e para perceber o quanto incomum esta é.

O capítulo 4, que diz respeito à parte da modelação, mostra o processo efetuado para chegar aos modelos numéricos finais, no entanto, esta etapa foi das mais difíceis devido à falta de experiência pessoal numa modelação tão pormenorizada e pela necessidade de realizar um modelo de elementos finitos. O processo de calibração dos modelos mostrado no capítulo 5, é um exemplo das dificuldades que necessitaram de ser ultrapassadas durante este processo. Este foi também o primeiro capítulo onde foi possível obter os primeiros resultados de deformações, comprovando a elevada deformabilidade do modelo físico e onde foi realizada a verificação de segurança que permitiu a exploração do Eurocódigo 9.

O capítulo final, da demonstração de resultados permitiu finalmente efetuar a verificação do sensor ótico em estudo. Nos resultados iniciais do ensaio estático foram surpreendentes os resultados obtidos pelo sistema de monitorização de imagem, visto que antes da realização dos ensaios este não demonstrava muita confiança, sendo necessária a sua calibração. Em relação ao sensor ótico, os resultados obtidos por este foram muito positivos, visto que apesar de possuir a maior diferença obtida, o erro relativo desta foi de apenas 4,61%. Visto que a fixação do sensor à barra é essencial e esta não foi totalmente feita com a sua colagem para permitir a sua remoção do modelo físico, torna ainda este resultado mais impressionante.

Os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos foram positivos, permitindo a identificação das frequências naturais da estrutura experimentalmente, obtendo-se valores muito próximos aos resultados dos modelos numéricos. No entanto, fica uma possibilidade enorme por ser explorada neste trabalho em relação a ensaios de fadiga que permitiriam estudar a vida útil do sensor ótico e o seu comportamento durante grandes períodos de funcionamento.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste projeto existiram testes e ensaios que, infelizmente, não puderam ser realizados. Na sequência do ensaio de amplitude de resposta seria efetuado um ensaio de fadiga. Este ensaio, tem a mesma configuração que o ensaio de amplitude de resposta, utilizando o excitador dinâmico para aplicar cargas cíclicas à estrutura. O ensaio de fadiga tem como objetivo a aplicação desta carga durante longos períodos, deixando a carga cíclica ser aplicada durante milhões de ciclos rotativos. O objetivo deste ensaio seria a determinação da vida útil da estrutura, no entanto, seria também possível perceber se existia alguma degradação relativa ao sensor ótico, e o comportamento deste em casos de estudo longos, simulando a aplicação deste a uma estrutura que esteja em exploração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hiester, T. R., Pennell, W. T. The Sitting Handbook for Large Wind Energy Systems. WindBooks, Nova Iorque, 1981
- [2] <https://serc.carleton.edu/details/images/10044.html> (28/02/2022)
- [3] <https://www.allaboutportugal.pt/pt/artigos/pelos-moinhos-de-portugal> (28/02/2022)
- [4] <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php> (02/03/2022)
- [5] https://pure.au.dk/ws/files/12741/Windmill_paper1 (02/03/2022)
- [6] Protocolo de Quioto, 1997
- [7] <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/press-room/20181106IPR18315/pe-aprova-metas-para-renovaveis-e-eficiencia-energetica-ate-2030> (04/03/2022)
- [8] <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> (04/03/2022)
- [9] <https://www.archiexpo.com/pt/prod/windside/product-88530-959470.html> (08/03/2022)
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Darrieus-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg (08/03/2022)
- [11] Guidelines for Design of Wind Turbines 2nd Edition Det Norske Veritas, Copenhagen, 2002
- [12] Manwell J., McGowan J., Rogers A. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, 2nd Edition. Wiley, 2010.
- [13] <http://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/> (12/03/2022)
- [14] <https://www.energy.gov/eere/inside-wind-turbine> (12/03/2022)
- [15] <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/25447/3/EstudoProjetoTurbina.pdf> (12/03/2022)
- [16] https://wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm (12/03/2022)
- [17] <https://www.semanticscholar.org/paper/Power-Curve-of-a-Wind-Generator-Suitable-for-a-Low-Yoon-Lee/f926a1ae43b99782cebeb9767806f6e488b06f20> (13/03/2022)
- [18] <https://www.eleconomista.es/aragon/noticias/11220642/05/21/Endesa-comienza-la-construccion-de-un-parque-eolico-de-megavattios-en-Villar-de-los-Navarros.html> (15/03/2022)
- [19] <https://civilizacaoengenharia.wordpress.com/2019/04/17/fundacoes-de-torres-eolicas/> (15/03/2022)
- [20] Manuel Duarte da Silva. *Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- [21] <https://civilizacaoengenharia.wordpress.com/2019/04/17/fundacoes-de-torres-eolicas/> (16/03/2022)
- [22] <https://noctula.pt/projeto-windfloat-atlantic-primeiro-parque-eolico-maritimo-em-portugal/> (16/03/2022)
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Perfil-vertical-da-velocidade-do-vento-O-comprimento-da-rugosidade-Z-0-e-a_fig1_316178684 (20/03/2022)

- [24] https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Crescimento-dos-aerogeradores-diametro-do-rotor-altura-de-torre-e-potencia_fig1_294718664 (20/03/2022)
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine#/media/File:WKA_spannglieder.jpg (20/03/2022)
- [26] <https://www.directindustry.com/pt/prod/enercon/product-20877-560040.html> (20/03/2022)
- [27] <https://www.brametal.com.br/produtos/energia-eolica/> (20/03/2022)
- [28] <https://www.bornay.com/es/cms/instalacion-eolico-solar-francia> (20/03/2022)
- [29] Schube P.J., Crossley R.J. *Wind Turbine Blade Design Review*. United Kingdom, 2012.
- [30] http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_teorias_turbinas_eolicas.pdf (22/03/2022)
- [31] Wind turbine blades handbook, Bladena, 2019
- [32] Mishnaevsky L., Branner K., Petersen H., Beauson J., McGugan M., Sørensen B. *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. Denmark, 2017.
- [33] https://www.researchgate.net/figure/Blade-edgewise-and-flapwise-moments_fig2_337214837 (22/03/2022)
- [34] Rodrigues C. *Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2011.
- [35] <https://hittech.com/nl/portfolio-posts/noria-the-fiber-bragg-grating-manufacturing-solution/> (10/06/2022)
- [36] Ferreira P., Caetano E., Ramos L., Pinto P. *Shape Sensing Monitoring System Based on Fiber-Optic Strain Measurements: Laboratory Tests*. Elsevier, 2017.
- [37] Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1 : General structural rules, junho, 2009.
- [38] CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, California, 2016.