

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESTOL DINÂMICO EM  
UM AEROFÓLIO NACA 0018**

**THIAGO FERNANDES OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: ANTÔNIO CÉSAR PINHO BRASIL JÚNIOR**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO: ENM.DM -159A/2011**

**BRASÍLIA/DF: 14 DE MARÇO DE 2011**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESTOL DINÂMICO EM  
UM AEROFÓLIO NACA 0018**

**THIAGO FERNANDES OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Antônio C. P. Brasil Júnior, PhD. (Orientador, ENM/UnB)**

---

**Prof. Mário Olavo Magno de Carvalho, Dr. (Examinador Interno, ENM/UnB)**

---

**Prof. Jhon Nero Vaz Goulart, Dr. (Examinador Externo, FGA/UnB)**

**BRASÍLIA/DF, 14 DE MARÇO DE 2011**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**OLIVEIRA, THIAGO FERNANDES**

Estudo Experimental do Estol Dinâmico em um Aerofólio NACA 0018. [Distrito Federal] 2011.

126p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2011).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de engenharia Mecânica.

1. Estol dinâmico

2. Coeficientes Aerodinâmicos

3. Visualização do escoamento

4. LabView

5. Túnel de água

I. ENM/FT/UnB

II. Título (Série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

OLIVEIRA, THIAGO FERNANDES (2011). Estudo Experimental do Estol Dinâmico em um Aerofólio NACA 0018. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM - 159A/2011, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Thiago Fernandes Oliveira.

TÍTULO: Estudo Experimental do Estol Dinâmico em um Aerofólio NACA 0018.

GRAU: Mestre

ANO: 2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Thiago Fernandes Oliveira

thiafofernandesoliveira@gmail.com

QSD 09 CASA 05 – TAGUATINGA SUL

72020-090 Brasília – DF – Brasil.

## **Agradecimentos**

Ao Criador.

Aos meus pais e irmãos.

Ao amor da minha vida Sandra Roberta Gonçalves de Souza.

Ao meu cunhado Rodolfo Gonçalves de Souza pelas fotos.

Ao Professor Antônio C. P. Brasil Júnior pela orientação.

Aos Professores Aldo João de Sousa, Taygoara Felamingo de Oliveira, Lúcio Salomon, Rudi Van Els e principalmente ao Professor Mário Olavo de Carvalho pelas discussões que foram de fundamental ajuda a este trabalho.

A todos do Laboratório de Energia e Ambiente (LEA), José Gustavo, Luciano Noletto, Anna Paula.

Ao engenheiro Thiago Doca.

Aos engenheiros colombianos Daniel e Ronald do Graco e o engenheiro português Nuno Dias.

Ao pessoal da equipe minibaja pelas ferramentas.

Aos técnicos de laboratório Marcão, Pereira, Fernando, Arthur, Eurípedes e Clóvis.

E a todos, e foram muitos, que passaram na frente da bancada e de alguma forma ajudaram ou tentaram ajudar.

## Resumo

Autor: Thiago Fernandes Oliveira

Orientador: Antônio C. P. Brasil Júnior

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, 23 de fevereiro de 2011

O objetivo deste trabalho é o estudo experimental de um perfil aerodinâmico NACA 0018 em movimento angular em túnel de água. Os coeficientes de sustentação, arrasto e momento de arfagem foram medidos estaticamente e dinamicamente (durante a movimentação angular do perfil) através de uma célula de carga desenvolvida especificamente para este estudo. O software *LabView* foi utilizado para a aquisição de dados e controle do experimento. Os ensaios foram realizados para os números de *Reynolds* iguais a 97.000, 124.000 e 150.000 para os casos estáticos e 124.000 e 150.000 para os casos dinâmicos com velocidades angulares do perfil iguais a 0,06, 0,13 e 0,19 rad/s. Os resultados dos ensaios estáticos foram comparados com a literatura apresentando boa concordância. Os ensaios dinâmicos foram realizados para a verificação do fenômeno de estol dinâmico. Os resultados foram comparados entre os diferentes números de *Reynolds*. A influência das diferentes velocidades angulares nos casos dinâmicos também foi evidenciada comparando-se inclusive com o caso estático. A visualização do escoamento também foi realizada para complementar a análise.

Palavras chave: estol dinâmico, NACA 0018, coeficientes aerodinâmicos, célula de carga, túnel de água, visualização do escoamento, *LabView*.

## **Abstract**

Author: Thiago Fernandes Oliveira

Advisor: Antônio C. P. Brasil Júnior

Post Graduation Program in Mechanical Sciences

Brasília, February 23, 2011

The objective of this work is the experimental study of a NACA 0018 airfoil in angular movement in a water tunnel. The lift, drag and pitching moment coefficients were measured statically and dynamically (along the airfoil's angular movement) through a load cell specifically designed for this study. The LabView software was used for the data acquisition and control of the experiment. The tests were performed for Reynolds numbers equal to 97,000, 124,000 and 150,000 for the statics cases and 124,000 and 150,000 for the dynamics cases with angular velocities of the airfoil equal to 0.06, 0.13 e 0.19 rad/s. The results of the statics tests were compared with the literature with good agreement. The dynamic tests were performed to verify the phenomenon of dynamic stall. The results were compared between the different Reynolds numbers. The influence of the angular velocities in the dynamics cases was also evidenced comparing including with the static case. The flow visualization was also performed to complement the analysis.

Keywords: dynamic stall, NACA 0018, aerodynamic coefficients, load cell, water tunnel, flow visualization, LabView.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	7
1.3	OBJETIVOS .....	8
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1	DESCRIÇÃO FÍSICA .....	10
2.2	MODELOS DE ESTOL DINÂMICO .....	14
2.3	ESTADO DA ARTE .....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	24
3.1.1	Túnel de água.....	24
3.1.2	Instrumentação.....	30
3.1.2.1	Medição de velocidade do escoamento no túnel .....	30
3.1.2.2	Medição de esforços no aerofólio - Célula de carga.....	33
3.1.2.3	Sistema de aquisição de dados .....	37
3.1.3	Visualização do escoamento .....	38
3.2	METODOLOGIA DE ENSAIOS .....	39
3.2.1	Ensaio de calibração do túnel .....	40
3.2.2	Ensaio de aquisição dos coeficientes hidrodinâmicos .....	42
3.3	TRATAMENTO DE DADOS .....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
4.1	CURVAS DE COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS PARA O CASO ESTÁTICO .....	45
4.2	IMAGENS DO ENSAIO DE VISUALIZAÇÃO PARA O CASO ESTÁTICO.....	50
4.3	CURVAS DE COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS PARA O CASO DINÂMICO .....	56
4.4	COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS ENTRE OS CASOS DINÂMICOS E O CASO ESTÁTICO.....	63
4.5	IMAGENS DO ENSAIO DE VISUALIZAÇÃO PARA O CASO DINÂMICO .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>87</b>
<b>I -</b>	<b>BANCADA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>87</b>
<b>II -</b>	<b>CALIBRAÇÃO DA BANCADA .....</b>	<b>99</b>
<b>III -</b>	<b>CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....</b>	<b>106</b>
<b>IV -</b>	<b>ANÁLISE DE INCERTEZAS E TABELAS DE DADOS.....</b>	<b>109</b>
<b>V -</b>	<b>DIAGRAMA DE BLOCOS DO LABVIEW .....</b>	<b>122</b>
<b>VI -</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DA CÉLULA DE CARGA 1.....</b>	<b>124</b>

## Lista de Figuras

Figura 1-1 - Desenho esquemático de turbina <i>Kaplan</i> - Fonte: Wikipédia.....	4
Figura 1-2 - Servo motor hidráulico de acionamento do anel distribuidor.....	5
Figura 1-3 - Sistema biela-manivela de acionamento do anel distribuidor.....	5
Figura 1-4 - Desenho do sistema de pás, biela e anel.....	6
Figura 1-5 - Esforços no pino de cisalhamento.....	6
Figura 1-6 - Desenho do sistema de pás fixas e móveis do distribuidor.....	7
Figura 1-7 - Diagrama de corpo livre em um perfil sujeito a escoamento.....	7
Figura 2-1 - Desenho esquemático de comparação entre o comportamento do coeficiente de sustentação estático(---) e dinâmico(—) (Leishman, 2000, p.385 [43]).....	11
Figura 2-2 - Topologia do estol dinâmico em um perfil NACA 0015 (Adaptado de Larsen [5]).....	12
Figura 3-1 - Desenho esquemático do túnel de água.....	24
Figura 3-2 - Foto da bancada de testes.....	26
Figura 3-3 - Seção de testes.....	27
Figura 3-4 - Vista explodida do perfil, células de carga e transmissão.....	27
Figura 3-5 - Perfil NACA 0018 em alumínio.....	29
Figura 3-6 - Sistema de transmissão.....	30
Figura 3-7 - Manômetro digital.....	31
Figura 3-8 - Sensor de rotação.....	32
Figura 3-9 - Tubo de <i>Pitot</i> .....	32
Figura 3-10 - Tubo de <i>Pitot</i> instalado.....	33
Figura 3-11 - Detalhe dos extensômetros das pontes de <i>Wheastone</i> 1, 2 e 3.....	34
Figura 3-12 - Circuito elétrico das pontes de <i>Wheastone</i> 1 e 2.....	35
Figura 3-13 - Circuito elétrico da ponte de <i>Wheastone</i> 3.....	36
Figura 3-14 - Rack NI cDAQ-9172.....	37
Figura 3-15 - Emissor de laser de diodo.....	38
Figura 3-16 - Fonte de alimentação do emissor de laser.....	38
Figura 3-17 - Esquema do sistema de visualização do escoamento.....	39
Figura 3-18 - Esquema do sistema de calibração do túnel de água.....	40
Figura 3-19 - Curva de calibração do túnel. (Comparação entre as medições do tubo de <i>Pitot</i> e efeito Venturi).....	41
Figura 3-20 - Perfil de velocidades para várias velocidades de escoamento.....	41
Figura 4-1 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso estático, $Re=97.000$ , $124.000$ e $150.000$ .....	46
Figura 4-2 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso estático, $Re=97.000$ , $124.000$ e $150.000$ .....	46
Figura 4-3 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso estático, $Re=97.000$ , $124.000$ e $150.000$ .....	47
Figura 4-4 - Polar de arrasto, caso estático, $Re=97.000$ , $124.000$ e $150.000$ .....	47
Figura 4-5 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso estático, $Re=150.000$ .....	48
Figura 4-6 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso estático, $Re=150.000$ .....	49
Figura 4-7 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso estático, $Re=150.000$ .....	49
Figura 4-8 - Polar de arrasto, caso estático, $Re=150.000$ .....	50
Figura 4-9 - Visualização do escoamento, caso estático, $Re=150.000$ e $\alpha=0^\circ$ .....	51
Figura 4-10 - Visualização do escoamento, caso estático, $Re=150.000$ e $\alpha=8,1^\circ$ .....	52
Figura 4-11 - Visualização do escoamento, caso estático, $Re=150.000$ e $\alpha=10,9^\circ$ .....	53
Figura 4-12 - Visualização do escoamento, caso estático, $Re=150.000$ e $\alpha=13,1^\circ$ .....	54
Figura 4-13 - Visualização do escoamento, caso estático, $Re=150.000$ e $\alpha=15,9^\circ$ .....	55

Figura 4-14 - Visualização do escoamento, caso estático, $Re=150.000$ e $\alpha=19,8^\circ$ .....	56
Figura 4-15 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s..	57
Figura 4-16 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s .....	57
Figura 4-17 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s .....	58
Figura 4-18 – Polar de arrasto, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s .....	58
Figura 4-19 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s..	59
Figura 4-20 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s .....	59
Figura 4-21 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s .....	60
Figura 4-22 - Polar de arrasto, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s.....	60
Figura 4-23 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s..	61
Figura 4-24 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s .....	61
Figura 4-25 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s .....	62
Figura 4-26 - Polar de arrasto, caso dinâmico, $Re=124.000$ e $150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s.....	62
Figura 4-27 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico, $Re=124.000$ , $\omega=0,06$ , $0,13$ e $0,19$ rad/s.....	63
Figura 4-28 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico, $Re=124.000$ , $\omega=0,06$ , $0,13$ e $0,19$ rad/s.....	64
Figura 4-29 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico, $Re=124.000$ , $\omega=0,06$ , $0,13$ e $0,19$ rad/s.....	64
Figura 4-30 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ , $0,13$ e $0,19$ rad/s.....	65
Figura 4-31 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ , $0,13$ e $0,19$ rad/s.....	66
Figura 4-32 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ , $0,13$ e $0,19$ rad/s.....	66
Figura 4-33 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s e $\alpha=0^\circ$ .....	68
Figura 4-34 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s e $\alpha=5^\circ$ .....	68
Figura 4-35 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s e $\alpha=10^\circ$ .....	69
Figura 4-36 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s e $\alpha=14^\circ$ .....	69
Figura 4-37 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s e $\alpha=17^\circ$ .....	70
Figura 4-38 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,06$ rad/s e $\alpha=19^\circ$ .....	71
Figura 4-39 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s e $\alpha=0^\circ$ .....	72
Figura 4-40 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s e $\alpha=3^\circ$ .....	72
Figura 4-41 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s e $\alpha=7^\circ$ .....	73
Figura 4-42 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s e $\alpha=14^\circ$ .....	73
Figura 4-43 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s e $\alpha=16^\circ$ .....	74
Figura 4-44 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,13$ rad/s e $\alpha=19^\circ$ .....	75
Figura 4-45 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s e $\alpha=0^\circ$ .....	76
Figura 4-46 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s e $\alpha=4^\circ$ .....	76
Figura 4-47 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s e $\alpha=10^\circ$ .....	77
Figura 4-48 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s e $\alpha=15^\circ$ .....	77
Figura 4-49 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s e $\alpha=17^\circ$ .....	78
Figura 4-50 - Visualização do escoamento, caso dinâmico, $Re=150.000$ , $\omega=0,19$ rad/s e $\alpha=19^\circ$ .....	79
Figura I-1 – Inversor de frequência.....	88
Figura I-2 – Quadro de acionamento.....	89

Figura I-3 - Motor principal .....	90
Figura I-4 – Bomba principal e estator.....	91
Figura I-5 - Desenho esquemático do túnel de água (Filtro de água).....	92
Figura I-6 – Filtro de água .....	93
Figura I-7 – Bomba de filtração.....	94
Figura I-8 – Bomba de vácuo.....	95
Figura I-9 - Bocal de contração.....	95
Figura I-10 - Seção de testes .....	96
Figura I-11 - Tanque superior .....	97
Figura I-12 - Motor de passo.....	98
Figura I-13 - Driver controlador do motor de passo.....	98
Figura I-14 - Vista explodida do perfil, célula de carga e mancal .....	98
Figura II-1 - Gráfico de calibração da velocidade do escoamento em função da rotação da bomba principal .....	102
Figura II-2 - Gráfico do perfil de velocidades do escoamento para várias rotações da bomba principal.....	105
Figura III-1 - Gráfico dos ensaios de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 1 .....	106
Figura III-2 - Gráfico dos ensaios de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 2.....	107
Figura III-3 - Gráfico dos ensaios de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 3.....	108
Figura V-1 - Diagrama de blocos do <i>LabView</i> para os ensaios estáticos.....	122
Figura V-2 - Diagrama de blocos do <i>LabView</i> para os ensaios dinâmicos .....	123
Figura VI-1 - Vista explodida da montagem do perfil, mancal e célula de carga.....	125
Figura VI-2 - Desenho técnico da célula de carga 1.....	126

## Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Descrição das partes principais do túnel de água .....	25
Tabela I-1 – Descrição das partes principais do sistema de filtragem .....	92
Tabela II-1 - Dados do ensaio de calibração do túnel de água .....	101
Tabela II-2 - Resultados obtidos no ensaio de calibração do túnel de .....	102
Tabela II-3 - Dados obtidos no ensaio de estimativa do perfil velocidade .....	103
Tabela II-4 - Resultados obtidos no ensaio de estimativa do perfil velocidade .....	104
Tabela IV-1 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=97.000$ .....	110
Tabela IV-2 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=124.000$ .....	111
Tabela IV-3 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=150.000$ .....	112
Tabela IV-4 - Tabela de dados e incertezas para o caso dinâmico $Re=124.000$ e $\omega=0,06$ rad/s.....	113
Tabela IV-5 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=124.000$ e $\omega=0,13$ rad/s .....	114
Tabela IV-6 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=124.000$ e $\omega=0,19$ rad/s .....	114
Tabela IV-7 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=150.000$ e $\omega=0,06$ rad/s .....	115
Tabela IV-8 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=150.000$ e $\omega=0,13$ rad/s .....	116
Tabela IV-9 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático $Re=150.000$ e $\omega=0,19$ rad/s .....	116
Tabela IV-10 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 1 .....	117
Tabela IV-11 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 1 (continuação) .....	117
Tabela IV-12 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 2.....	118
Tabela IV-13 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 2 (continuação) .....	118
Tabela IV-14 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 3.....	119
Tabela IV-15 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 3 (continuação) .....	119
Tabela IV-16 - Tabela de incertezas da calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 1 .....	120
Tabela IV-17 - Tabela de incertezas da calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 2 .....	120
Tabela IV-18 - Tabela de incertezas da calibração da ponte de <i>Wheastone</i> 3 .....	121

## Lista de Símbolos

$Re$  – Número de *Reynolds*

$U$  – Velocidade do escoamento na seção de testes ( $m/s$ )

$U_1$  – Velocidade do escoamento na entrada do bocal de contração ( $m/s$ )

$U_2$  – Velocidade do escoamento na saída do bocal de contração ( $m/s$ )

$F$  – Força hidrodinâmica ( $N$ )

$F_1$  – Força hidrodinâmica na direção perpendicular a corda do perfil ( $N$ )

$F_2$  – Força hidrodinâmica na direção paralela a corda do perfil ( $N$ )

$M'$  – Momento de arfagem não corrigido ( $N.m$ )

$M$  – Momento de arfagem ( $N.m$ )

$L$  – Força de sustentação ( $N$ )

$D$  – Força de arrasto ( $N$ )

$A_p$  – Área do perfil ( $m^2$ )

$T_1$  – Tensão de saída da ponte de *Wheastone* 1 ( $V$ )

$T_2$  – Tensão de saída da ponte de *Wheastone* 2 ( $V$ )

$T_3$  – Tensão de saída da ponte de *Wheastone* 3 ( $V$ )

$K_1$  – Constante de proporcionalidade da ponte de *Wheastone* 1 ( $N/V$ )

$K_2$  – Constante de proporcionalidade da ponte de *Wheastone* 2 ( $N/V$ )

$K_3$  – Constante de proporcionalidade da ponte de *Wheastone* 3 ( $N/V$ )

$C_L$  – Coeficiente de sustentação

$C_D$  – Coeficiente de arrasto

$C_M$  – Coeficiente de momento de arfagem

$\sigma C_L$  - Incerteza associada ao coeficiente de sustentação

$\sigma C_D$  - Incerteza associada ao coeficiente de arrasto

$\sigma C_M$  - Incerteza associada ao coeficiente de momento de arfagem

$\sigma U$  - Incerteza associada à velocidade do escoamento

$\sigma\Delta H$  - Incerteza associada à medição de pressão em metros de coluna de água

$\omega$  – Velocidade angular do perfil ( $rad/s$ )

$\alpha$  – Ângulo de ataque ( $^{\circ}$ )

$c$  – corda do perfil ( $m$ )

$e$  – envergadura do perfil ( $m$ )

$W$  - Peso do perfil ( $N$ )

$W_{ap}$  - Peso aparente do perfil ( $N$ )

$E$  – Empuxo ( $N$ )

$\rho_{H_2O}$  – Densidade da água ( $kg/m^3$ )

$t$  – tempo ( $s$ )

$f_{bomba}$  – Frequência de rotação da bomba principal ( $Hz$ )

$A_1$  – Área de saída do bocal de contração ( $m^2$ )

$A_2$  – Área de entrada no bocal de contração ( $m^2$ )

$P_t$  – Pressão total ( $N/m^2$ )

$P_0$  – Pressão estática ( $N/m^2$ )

$P_d$  – Pressão dinâmica ( $N/m^2$ )

$P_1$  – Pressão estática na saída do bocal de contração ( $N/m^2$ )

$P_2$  – Pressão estática na entrada do bocal de contração ( $N/m^2$ )

$g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$\Delta H$  – Diferença de altura de coluna d'água ( $m$ )

$d_0$  – Diâmetro externo ( $m$ )

$d_I$  – Diâmetro interno ( $m$ )

$n$  – Fator de segurança

$S_y$  – Tensão limite de escoamento ( $N/m^2$ )

$V$  – Momento fletor ( $N.m$ )

$I$  – Momento de inércia ( $m^4$ )

$J$  - Momento de inércia polar ( $m^4$ )

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O fenômeno de estol é caracterizado pela redução da sustentação em um determinado aerofólio no momento em que seu ângulo de ataque ultrapassa um certo valor crítico em determinadas condições de escoamento[42]. O estol é freqüentemente relacionado com a aviação, visto que a perda de sustentação é um fator a ser considerado no projeto de aeronaves. No momento em que o aerofólio atinge o ângulo de ataque crítico, regiões de descolamento de camada limite se tornam mais evidentes. Após este ângulo, a sustentação começa a decrescer simultaneamente a um aumento significativo do arrasto. Cabe ressaltar que este fenômeno é dependente não apenas do ângulo de ataque, mas da velocidade do escoamento e do tipo de aerofólio em questão.

Já o estol dinâmico é definido como o conjunto de fenômenos aerodinâmicos causados pelo movimento angular de um aerofólio, para ângulos superiores àqueles do estol estático convencional descrito acima [6], [8], [9]. O estudo do estol dinâmico, há algum tempo, é reconhecido como uma importante área de pesquisa devido a sua ocorrência freqüente em muitas aplicações práticas. Dentre as conseqüências deste fenômeno estão, por exemplo, o aumento dos coeficientes aerodinâmicos em comparação às medidas estáticas em uma mesma configuração, a flutuação das forças aerodinâmicas, o ganho de propulsão (efeito de *Knoller–Betz*) e o atraso no descolamento da camada limite. Este fenômeno ocorre com freqüência em helicópteros, caças, motores a jato, pás de rotores, turbinas eólicas, pás de distribuidores de turbinas hidráulicas e no movimento de alguns animais. [1], [2], [3], [4], [5], [7], [8], [10] e [11].

Os efeitos causados pelo estol dinâmico podem ser tanto desejáveis como indesejáveis. O controle e atraso no descolamento da camada limite, o efeito de *Knoller–Betz* e o aumento de sustentação estão entre os efeitos que podem ser desejáveis em determinadas aplicações. Mas as flutuações das forças aerodinâmicas, em geral, são prejudiciais, pois podem limitar a estabilidade de vôo em aeronaves e aumentar o risco de falha em estruturas sujeitas a este tipo carregamento.

Muitos estudos numéricos e experimentais referentes a este assunto já foram desenvolvidos. A maioria dos trabalhos experimentais presentes na literatura preocupou-se em medir os coeficientes aerodinâmicos em um perfil oscilando segundo uma função temporal senoidal, variando-se a frequência e a amplitude de oscilação em torno de um ângulo médio. Também é comum encontrar trabalhos experimentais contendo visualização de escoamento com técnicas de PIV (*Particle Image Velocimetry*) e LDV (*Laser Doppler Velocimetry*). [1], [2], [5], [11] e [20]

O presente trabalho difere ligeiramente da maioria dos trabalhos experimentais realizados sobre estol dinâmico. Aqui, o aerofólio não foi oscilado, e sim movimentado com uma determinada velocidade angular a partir de um ângulo de ataque inicial ( $\alpha_i$ ) até um ângulo de ataque final ( $\alpha_f$ ). A medição dos coeficientes aerodinâmicos e a visualização do escoamento foram feitos durante a movimentação do aerofólio até que o mesmo atingisse um determinado ângulo de ataque final ( $\alpha_f$ ). Ensaios experimentais foram realizados para variados números de *Reynolds* e velocidades angulares do perfil.

A motivação deste estudo experimental foi o interesse de se investigar fenômenos hidrodinâmicos encontrados no funcionamento de anéis distribuidores de turbinas hidráulicas. Através do posicionamento de suas pás em ângulos determinados, pode-se regular a vazão e, conseqüentemente, a potência gerada pela turbina. Efeitos indesejáveis causados pelo estol dinâmico, como conseqüência da movimentação angular das pás reguladoras de vazão, podem estar presentes durante a operação de máquinas hidráulicas.

A maior fonte de energia elétrica do Brasil são as hidrelétricas. E este padrão deverá manter-se a longo prazo observando ainda que a disponibilidade hídrica brasileira não está completamente explorada. Hoje, cerca de 80% de toda energia elétrica gerada no país é oriunda de hidrelétricas. Apesar de pouco a pouco haver uma redução de disponibilidade de áreas factíveis de condições ambientais para construção de usinas hidrelétricas, a energia hídrica permanecerá majoritária ainda por várias décadas. Portanto, esforços no sentido de trazer melhorias no funcionamento de todo o sistema hidrelétrico são bem vindos.

Com a economia e população crescentes, há uma previsão de crescimento de demanda por energia elétrica no Brasil numa taxa de 4,8% ao ano até 2020, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Por outro lado, espera-se que haja um aumento de eficiência do uso e geração dessa energia. E apesar da tecnologia de fabricação e operação de turbinas hidráulicas já estar bem consolidada, ainda hoje se observam problemas relacionados ao funcionamento, manutenção e otimização dessa tecnologia.

Observa-se a ocorrência de problemas relacionados à interação fluido-estrutura no funcionamento de máquinas hidráulicas já instaladas. Então, estudos no sentido de se encontrarem soluções para o problema acima descrito são de grande valia, pois o objetivo final é a redução de custos de geração de energia. O presente trabalho vem a contribuir, utilizando de metodologias experimentais, para o melhor entendimento de problemas relacionados à interação fluido-estrutura em anéis distribuidores de turbinas hidráulicas.

Vários fenômenos críticos associados à interação fluido-estrutura ocorrem em turbinas hidráulicas. Em geral, estes fenômenos geram problemas que requerem manutenção corretiva. Por exemplo, observa-se que a maioria dos problemas de vibrações em turbinas hidráulicas tem origem em esforços causados pelo escoamento. Além da redução de confiabilidade do sistema, devido às vibrações, os problemas de fluido-estrutura e seus eventuais esforços dinâmicos propiciam o acúmulo de danos em diferentes partes da máquina, bem como fadiga nos elementos mecânicos submetidos a essas solicitações cíclicas. Portanto, a redução da vida útil de equipamentos e partes mecânicas causadas pelos esforços dinâmicos deve ser considerada e analisada através de metodologias de simulação e monitoração do funcionamento de máquinas hidráulicas.

Os esforços dinâmicos em anéis distribuidores de turbinas hidráulicas ocorrem nas várias partes do anel distribuidor. Em turbinas axiais tipo Bulbo ou *Kaplan*, o anel distribuidor controla a vazão da máquina, dada uma demanda energética. Os ângulos das pás diretrizes são determinados em função da carga demandada. O ajuste fino de controle de rotação é efetuado pelo posicionamento das pás do rotor. Já em turbinas radiais tipo *Francis*, as pás do distribuidor atuam como único elemento de controle de vazão e, conseqüentemente, de potência gerada. Portanto, são projetadas a

movimentarem-se dinamicamente para manter a rotação da máquina constante. Nesse caso, o problema pode envolver um processo de auto-excitação, induzindo esforços dinâmicos no anel distribuidor. Os esforços nas pás do distribuidor nesse tipo de máquina são definidos pela hidrodinâmica do escoamento na caixa espiral e na geometria formada pelo posicionamento das pás diretrizes fixas (pré-distribuidor) e das pás variáveis (distribuidor). Nesse caso, os esforços dinâmicos são causados pelo descolamento e emissão de vórtices para alguns ângulos de abertura das pás. Os esforços de origem hidrodinâmica são transferidos para todo o conjunto mecânico do anel distribuidor, podendo causar falhas ou mau funcionamento de suas partes.

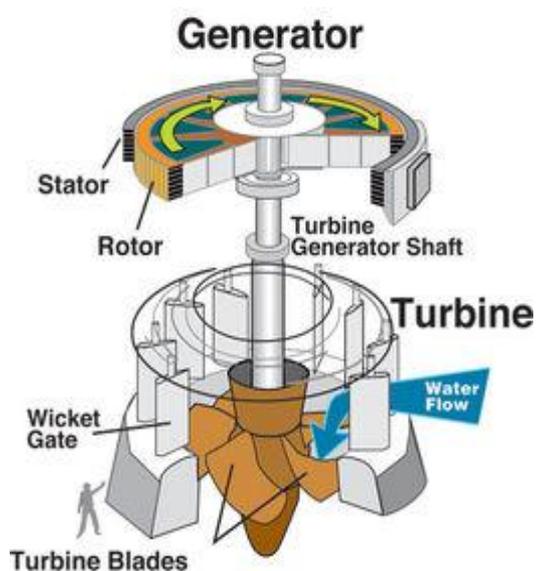


Figura 1-1 - Desenho esquemático de turbina *Kaplan* - Fonte: Wikipédia

A movimentação das pás do distribuidor geralmente é feita através de servos-motores hidráulicos e controlada pela sala de controle da usina. Ao longo do dia, algumas mudanças de posição das pás dos anéis distribuidores podem ser necessárias para regulagem de potência gerada de acordo com a mudança da demanda energética. Em máquinas que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) essa demanda é monitorada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).



**Figura 1-2 - Servo motor hidráulico de acionamento do anel distribuidor**



**Figura 1-3 - Sistema biela-manivela de acionamento do anel distribuidor**

Diversas falhas de componentes no anel distribuidor vêm sendo observadas em algumas máquinas instaladas no país. Tais falhas são associadas a desgaste excessivo de buchas e mancais no sistema anel-bielas-pás, quebra de pinos de segurança para controle de sobrecarga no distribuidor e sobre-pressão e degradação no sistema hidráulico de controle de abertura do distribuidor. A falha desses componentes envolve tempo de parada da unidade para manutenção corretiva, além de custos enormes associados à energia não gerada e à manutenção propriamente dita.

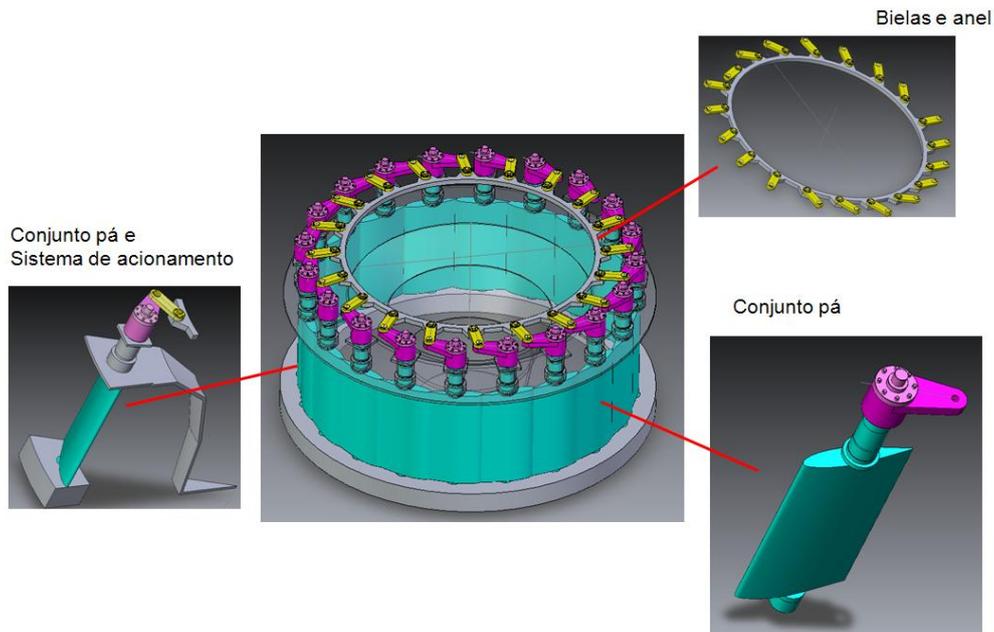


Figura 1-4 - Desenho do sistema de pás, biela e anel

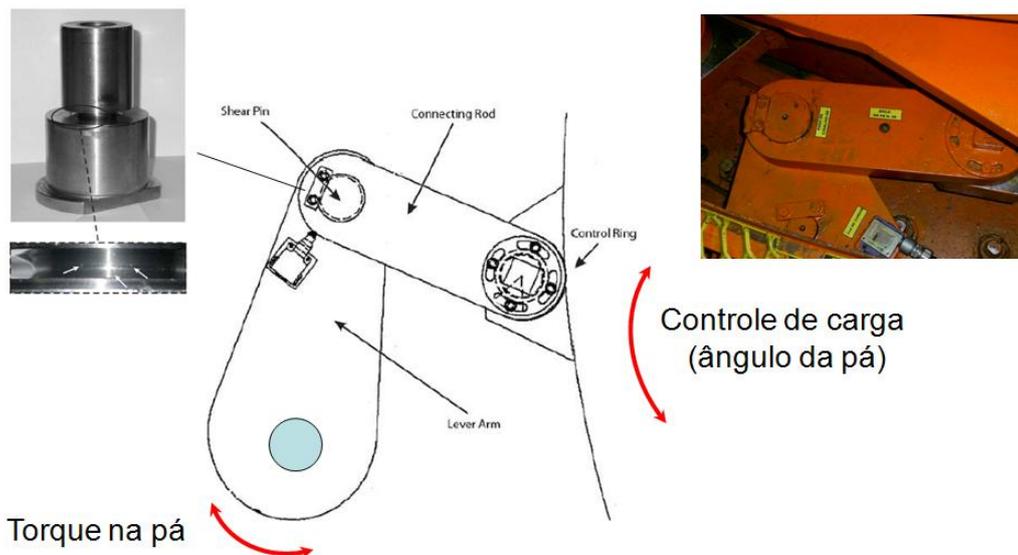


Figura 1-5 - Esforços no pino de cisalhamento

Cogita-se que estas falhas podem estar associadas a dois fenômenos hidrodinâmicos principalmente. Primeiro, durante a movimentação das pás dos anéis distribuidores surgem sobrecargas dinâmicas não previstas, ocasionando falhas. E segundo, a frequência de emissão de vórtices desprendidos das pás dos anéis distribuidores entra em ressonância com partes estruturais da máquina causando vibrações excessivas.

O fenômeno de estol dinâmico sobre as pás do distribuidor de turbinas hidráulicas encontra-se sempre presente na situação operacional descrita brevemente acima. Isto ocorre como consequência do movimento angular das pás e/ou em virtude da vibração angular que ocorre devido aos esforços dinâmicos de interação fluido-estrutura. Este é um fenômeno hidrodinâmico complexo sobre o qual o presente trabalho se insere.

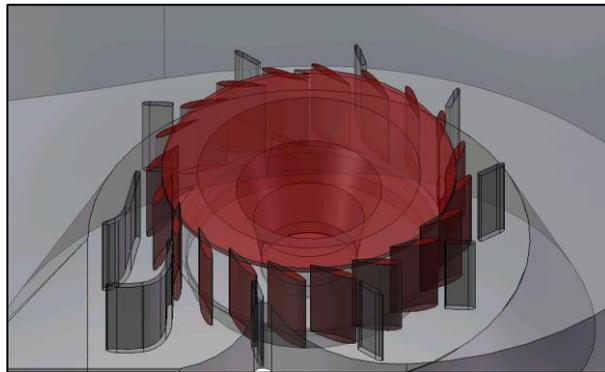


Figura 1-6 - Desenho do sistema de pás fixas e móveis do distribuidor

## 1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Todo corpo imerso em um escoamento está sujeito a forças como mostrado no diagrama de corpo livre abaixo.

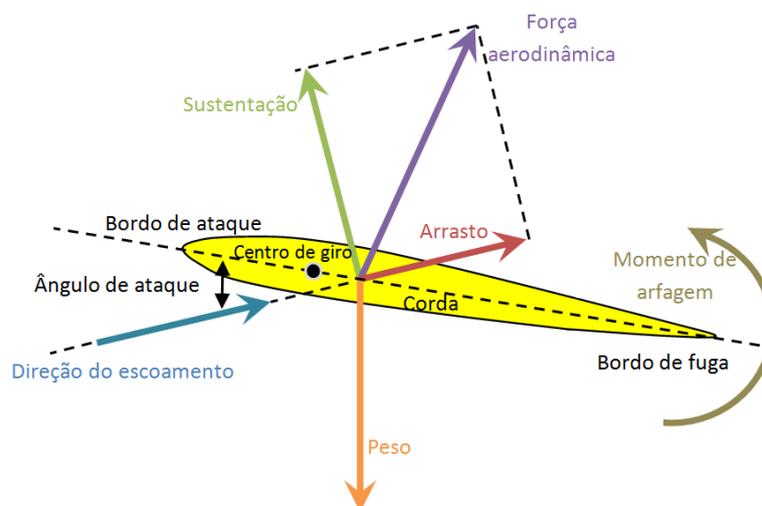


Figura 1-7 - Diagrama de corpo livre em um perfil sujeito a escoamento

A força de sustentação é a componente da força aerodinâmica na direção perpendicular à direção do vetor velocidade do escoamento. A força de arrasto é a componente da

força aerodinâmica na direção paralela à direção do vetor velocidade escoamento. E, conseqüentemente, um momento de arfagem poderá surgir devido à resultante da força aerodinâmica estar afastada do centro de giro do perfil ao longo da corda. No problema de estol dinâmico, os esforços descritos ocorrem ao longo da movimentação imposta.

Foram três os esforços quantificados neste experimento (sustentação, arrasto e momento de arfagem). A visualização do escoamento foi realizada ajudando a compreender melhor os fenômenos que surgiram durante os ensaios.

Portanto, o problema de estudo do presente trabalho se resume na determinação dos esforços hidrodinâmicos (sustentação, arrasto e momento de arfagem) durante o movimento angular do perfil  $\alpha(t) \in [\alpha_i, \alpha_f]$ , com velocidade angular  $\omega$  e uma dada velocidade fixa do escoamento  $U$ .

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolvimento de um estudo experimental para medição dos esforços dinâmicos e visualização do escoamento em um perfil aerodinâmico com movimento angular em um escoamento em túnel de água. A força de sustentação, a força de arrasto e o momento de arfagem no perfil foram os esforços medidos no experimento. A visualização do escoamento ao longo do movimento do perfil também é objetivo deste trabalho. Para tanto, têm-se como objetivos específicos, a montagem e calibração de uma bancada para os ensaios, o desenvolvimento de uma célula de carga que possibilite a medição dos esforços dinâmicos no perfil, a realização de ensaios estáticos para validação da célula de carga desenvolvida comparando os resultados obtidos com a literatura existente e o desenvolvimento e a aplicação de uma técnica de visualização adequada.

Observa-se, atualmente, uma forte tendência para a resolução de problemas no campo da dinâmica de fluidos por simulações numéricas. Com o advento de técnicas, máquinas e códigos mais robustos, muitas vezes torna-se mais vantajosa a tentativa de solucionar problemas por meio de simulações numéricas devido à rapidez, custo e confiabilidade dos resultados. Entretanto, a validação dos resultados computacionais deve ser sempre realizada por meio de trabalhos teóricos ou experimentais. É neste contexto que o

presente trabalho se insere, objetivando também a validação de simulações numéricas que estão sendo desenvolvidas pelo Laboratório de Energia e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (LEA/ENM/UnB).

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo este o primeiro. O segundo capítulo mostrará a descrição física do problema pesquisado e o estado da arte dos trabalhos sobre estol dinâmico e de alguns outros assuntos relacionados. O terceiro capítulo descreverá a metodologia desenvolvida na realização dos experimentos bem como a bancada e a instrumentação utilizada nos ensaios. Esse capítulo mostrará também como foi feito o tratamento dos dados obtidos. No quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos em forma de gráficos e imagens do escoamento. Os gráficos serão apresentados na forma de coeficientes versus ângulo de ataque e polares de arrasto, comparando os resultados estáticos com os dinâmicos e fazendo-se, também, comparações entre diferentes números de *Reynolds* e velocidades angulares do perfil. Juntamente com os gráficos e as imagens, foram feitas as discussões e as análises dos resultados obtidos. Por fim, o quinto capítulo trará as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros. Em anexo, podem-se encontrar maiores detalhes da bancada, tabelas e curvas de calibração dos instrumentos utilizados, tabelas de todos os dados obtidos, análise de incertezas dos experimentos, diagramas de blocos do *Labview* e dimensionamento da célula de carga.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura existem inúmeros trabalhos experimentais e computacionais específicos sobre determinação de esforços e campo de pressão, investigação de parâmetros para controle do descolamento da camada limite e visualização de escoamento para caracterização de esteiras formadas em escoamento sobre geometrias (cilindros e perfis aerodinâmicos) oscilantes ou em movimento de rotação. Trabalhos estes realizados para variadas faixas de número de *Reynolds* (inclusive em escoamentos transônicos), amplitudes e frequências de oscilação. Várias técnicas de visualização de escoamentos e métodos numéricos são comumente empregadas e comparações entre resultados experimentais, computacionais e teóricos são bastante frequentes. Então, o fenômeno de estol dinâmico se faz sempre presente nestes trabalhos e pode ser identificado e interpretado tanto em trabalhos experimentais quanto numéricos.

Uma segunda família de artigos se baseia na modelagem do estol dinâmico como um sistema dinâmico, com intuito de propor modelos simplificados e semi-empíricos de variação de esforços transientes em aerofólios móveis. A identificação e compreensão do fenômeno de estol dinâmico foi inicialmente desenvolvida pelo trabalho de *Krammer* (1932). Posteriormente, *Ericsson* (1967), *Carta* (1971), *Johnson & Ham* (1972), *Ericsson & Redding* (1972), *McCroskey* (1973) e *Beddoes* (1978) e *Leishman e Beddoes* (1986a) e (1986b) continuaram as pesquisas sobre estol dinâmico [43]. Estes trabalhos precursores focaram sobre a descrição e modelagem do estol dinâmico dentro do contexto da hidrodinâmica e controle em pás de helicópteros principalmente.

### 2.1 DESCRIÇÃO FÍSICA

Os maiores desafios no estudo do estol dinâmico residem na complexidade inerente do escoamento e também na interação dos efeitos do escoamento entre si. Na literatura é possível encontrar trabalhos que mostram que números de *Reynolds* e *Mach*, geometria do aerofólio, ângulo de incidência e o modo, frequência e amplitude de oscilação exercem considerável influência na caracterização do estol dinâmico.

*Ekaterinaris* (1998), *Fujisawa* (2001) e *McCroskey* (1982) investigaram o estol dinâmico variando-se o ângulo de ataque rapidamente. Essa variação pode ocorrer

devido a um aumento brusco no ângulo de ataque ou devido ao movimento de oscilação ocorrente no aerofólio [44], [45] e [46]. Neste fenômeno, tanto o arrasto quanto a sustentação aumentam significativamente quando comparados com o estol estático, seguido de um decaimento menos pronunciado da sustentação. É possível encontrar na literatura situações onde o estol dinâmico mostra o dobro do valor da sustentação em relação ao estol estático [47].

Para melhor caracterização de perfis aerodinâmicos, são definidos coeficientes adimensionais baseados na força de sustentação, na força de arrasto e momento. Entre os coeficientes aerodinâmicos estão: coeficiente de sustentação, coeficiente de arrasto e coeficiente de momento. As equações 3.9, 3.10 e 3.11 descrevem o método de obtenção desses coeficientes.

A diferença entre o comportamento do coeficiente de sustentação em um aerofólio sujeito ao estol estático e dinâmico encontra-se na figura 2-1 abaixo.

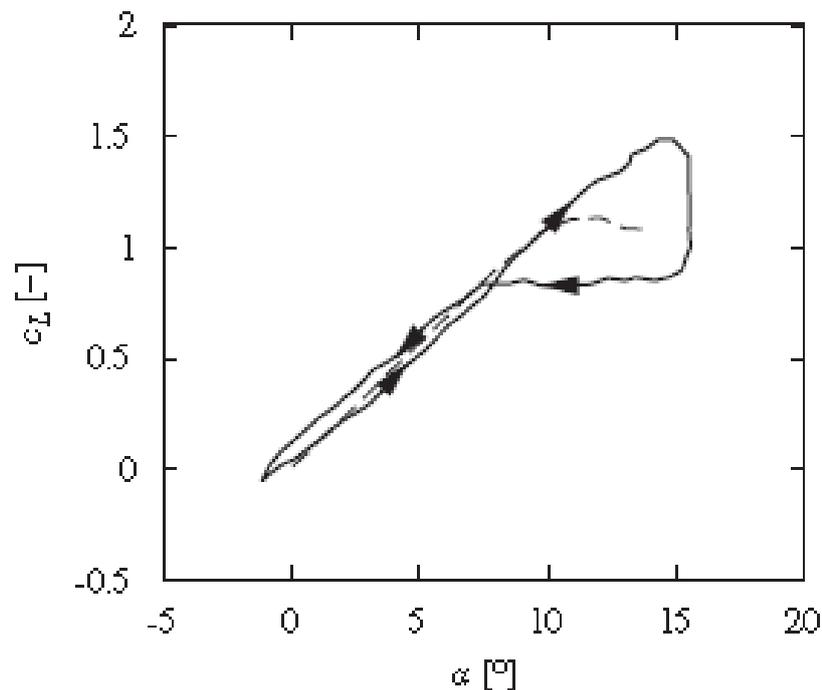


Figura 2-1 - Desenho esquemático de comparação entre o comportamento do coeficiente de sustentação estático(---) e dinâmico(—) (Leishman, 2000, p.385 [43])

Quando o aerofólio possui movimento oscilatório, observa-se que os coeficientes de sustentação, arrasto e momento mostram um comportamento histerético. Grande parte dessa ocorrência, junto com os altos valores de arrasto e sustentação, se deve às disparidades entre escalas de tempo dos fenômenos invíscido e viscoso do escoamento

em torno do aerofólio [48]. Esta diferença é fisicamente definida pelo atraso no descolamento da camada limite e pela formação e transporte de vórtices que se originam no bordo de ataque do aerofólio e se deslocam ao longo do extradorso (parte superior) do aerofólio [44] e [48].

A fenomenologia do estol dinâmico segue um desenvolvimento em etapas definidas pelo aumento do ângulo de ataque. A topologia do escoamento desde o seu desenvolvimento até a ocorrência do estol dinâmico pode ser dividida em 4 etapas [5], [49] e [50].

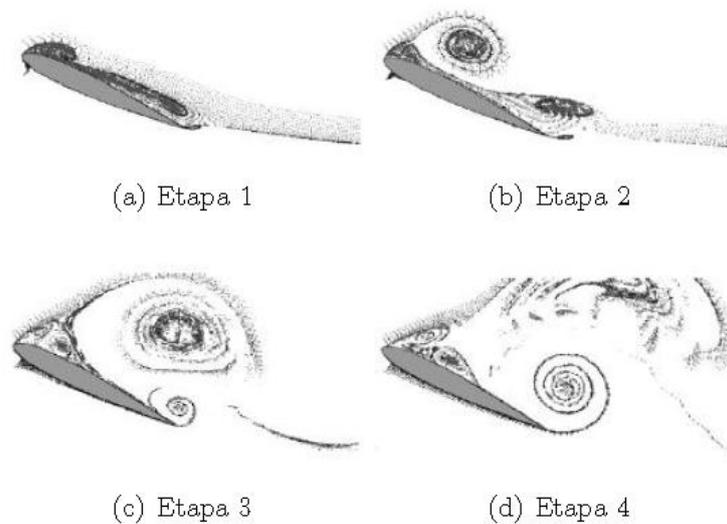


Figura 2-2 - Topologia do estol dinâmico em um perfil NACA 0015 (Adaptado de Larsen [5])

**Escoamento sem descolamento de camada limite (Figura 2.2(a)):** Nesta fase é possível haver algum descolamento no bordo de fuga, mas de modo geral, o escoamento possui topologia parecida com o escoamento em torno de um aerofólio estático pré-estol;

**Fluxo Reverso (Figura 2.2(b)):** Nesta etapa observa-se o surgimento de uma região de recirculação, formação de vórtice no bordo de ataque que se propaga no extradorso do perfil até sua subsequente separação;

**Descolamento da camada limite (Figura 2.2(c)):** O descolamento da camada limite se propaga do bordo de fuga para o bordo de ataque, aumentando a região de recirculação

observada na etapa anterior. Nesta etapa observa-se o aumento do vórtice no bordo de ataque do perfil e que o aerofólio fica mais rombudo devido à presença deste vórtice.

**Formação e advecção do vórtice (Figura 2.2(d)):** O escoamento inicia o transporte do vórtice formado na etapa anterior do bordo de ataque para o bordo de fuga. No bordo de fuga, este vórtice descola e se integra à esteira do perfil, caracterizando o ponto de estol, onde a sustentação atinge seu valor máximo para posteriormente decrescer.

Ao longo destas etapas, as forças e momentos aerodinâmicos sobre o perfil aumentam devido à formação do vórtice no bordo de ataque. Este vórtice é chamado de vórtice de bordo de ataque ou vórtice de estol dinâmico (*Leading Edge Vortex*) [49]. É possível encontrar na literatura dados experimentais e numéricos que mostram que a topologia do escoamento é alterada pela movimentação do ponto de descolamento da camada limite [53], [54]. O aumento de uma zona de sucção causada por regiões de baixa pressão que surgem durante a movimentação deste vórtice no extradorso devido às interações entre os vórtices formados nos bordos de ataque e fuga. A consequência desta movimentação é o adiamento do ponto de estol (o aerofólio tende a apresentar sustentação máxima em ângulos de ataque superiores ao estol estático). Outra consequência está no descolamento total da camada limite. Neste instante as forças aerodinâmicas variam abruptamente. No caso do ângulo de ataque variar em baixas frequências, nota-se a movimentação do ponto de descolamento da camada limite do bordo de fuga para o bordo de ataque quando o ângulo de ataque aumenta. Quando o ângulo de ataque diminui, este ponto movimenta-se na direção contrária. Para variações em frequências elevadas, observa-se que não é mais possível definir posições de descolamento, e o descolamento ocorre de forma quase instantânea no aerofólio inteiro [48]. Sumarizando, as características principais da física do estol dinâmico, que independem da frequência de vibração do aerofólio e da faixa de amplitude, são:

- Atraso do ponto de perda de sustentação em comparação ao caso onde o aerofólio possui posição fixa;
- Movimentação do ponto de descolamento da camada limite;
- Interação entre os vórtices formados nos bordos de ataque e fuga;

O fenômeno também é fortemente influenciado por efeitos de turbulência, compressibilidade, descolamento transiente da camada limite, instabilidade de camadas

cisalhantes no escoamento, interação entre ondas de choque e camada limite e a interação entre estruturas de vórtices na superfície do aerofólio, assim como a interação entre vórtices e o movimento do aerofólio [48].

## 2.2 MODELOS DE ESTOL DINÂMICO

O trabalho de *Larsen* (2007) apresentou um modelo para a previsão da força de sustentação em turbinas de vento sujeitas ao estol dinâmico. O modelo é baseado na curva de sustentação estática adicionando efeitos não-estacionários. O modelo proposto apresentou resultados semelhantes, e às vezes melhores, do que outros cinco modelos (*Beddoes–Leishman*, *Riso*, *ONERA*, *Øye* e *Boeing–Vertol*) mais complexos, evidenciando a importância da adição de efeitos não-estacionários na modelagem do estol dinâmico. Os efeitos de curvatura e espessura do perfil também foram investigados. Uma descrição deste modelo será apresentada a seguir.

Recentemente, a determinação numérica de carregamentos aerodinâmicos vem sendo obtida através da resolução numérica das equações de *Navier-Stokes*. Na literatura observam-se resultados numéricos que fornecem informações sobre as mudanças de pressão durante os ciclos do estol dinâmico [5], [53], [54], [56]. É possível também obter na literatura resultados numéricos baseados em modelos semi-empíricos. A vantagem destes modelos é a possibilidade de se obterem informações sobre as principais características do estol dinâmico. Por outro lado, estes modelos necessitam de dados para estol estático, obtidos comumente por interpolação ou ajuste de curvas. Estes modelos fornecem bons resultados para variações quase estáticas do ângulo de ataque [5].

Os modelos de estol dinâmico presentes na literatura podem ser categorizados em três grandes grupos [55], [5], [56]:

- Modelos onde as condições do escoamento são modeladas;
- Modelos onde a curva de sustentação é modelada sem recorrer a mecanismos físicos;
- Modelos que modificam o ângulo de ataque, introduzindo o conceito de ângulo de ataque dinâmico;

Inicialmente, o modelo apresentado por *Larsen* (2007) necessita de um modelo estático para a sustentação. Os modelos não lineares têm como essência a redução da sustentação devido ao descolamento. Logo, em condições de não-descolamento o coeficiente de sustentação  $C_{L0}$  é dado pela seguinte linearização para pequenos ângulos de ataque:

$$C_{L0} = \left. \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right|_{\alpha_0} (\alpha - \alpha_0) \quad (2.1)$$

Onde  $\alpha_0$  é o ângulo de ataque para sustentação nula. O coeficiente de sustentação para escoamento com descolamento é determinado através de mapeamento adequado ou através de formulação integral da teoria de aerofólios linearizados [5], [55]:

$$C_L \approx \left( \frac{1 + \sqrt{f}}{2} \right)^2 C_{L0} \quad (2.2)$$

A equação 2.2 determina o coeficiente estático de sustentação como uma redução linear da sustentação de acordo com o parâmetro de descolamento  $f$ , este parâmetro está relacionado com o grau de descolamento do escoamento sobre o aerofólio. Ou seja, se  $f = 1$ , o valor de  $C_L$  será igual a  $C_{L0}$ . À medida que o ângulo de ataque aumenta, o ponto de descolamento se move para o bordo de ataque, fazendo com que o valor de  $f$  diminua. Quando  $f = 0$  significa que o ponto de descolamento atingiu o bordo de ataque e o valor de  $C_L$  será próximo de  $1/4 C_{L0}$ . Se o ângulo de ataque continuar aumentando, o ponto de descolamento não irá alterar, mas o valor de  $C_{L0}$  dado pela equação aumentará linearmente com o ângulo de ataque [11]. Entretanto, dados experimentais mostram que  $C_L$  pode se manter constante ou mesmo diminuir com o ângulo de ataque após o descolamento. Logo uma modificação para  $C_{L0}$  se faz necessária:

$$C_{L0} = \begin{cases} \left. \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right|_{\alpha_0} (\alpha - \alpha_0), & f > 0 \\ 4C_L, & f = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

O movimento do ponto de descolamento é dado de forma idêntica aos modelos de *Beddoes-Leishman*, *Riso* e *Øye* [5], [55] e [56]:

$$dC_L = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{f}} \right) C_{L0} df \quad (2.4)$$

Em condições em que a camada limite se encontra separada, um pequeno incremento do parâmetro de descolamento ( $f$ ) resulta em um grande incremento do coeficiente de sustentação. Esta singularidade é contornada através do mapeamento do aerofólio no plano complexo. Este mapeamento visa utilizar o valor do ângulo polar  $\theta$  ao invés de  $f$ , obtendo:

$$2f = 1 + \cos(\theta) \quad (2.5)$$

Esta modificação aplicada na equação 2.2 resulta em:

$$C_L = \cos^4\left(\frac{1}{4}\theta\right) C_{L0} \quad (2.6)$$

Onde o parâmetro  $\theta$  é determinado através de dados experimentais. Cabe ressaltar que o desenvolvimento até aqui se refere a condições estáticas. Em condições dinâmicas, duas situações para o escoamento devem ser consideradas. Uma para baixos ângulos de ataque em que o escoamento é ajustado de modo a localizar o ponto de descolamento no bordo de fuga. A outra situação se refere ao escoamento já descolado, em que o movimento do ponto de descolamento é atrasado quando comparado a movimentação quase estática.

Para a situação onde o escoamento não apresenta descolamento, admite-se que uma mudança  $d\alpha$  no ângulo de ataque irá causar um pequeno descolamento antes que o ponto de descolamento se restabeleça no bordo de fuga através das zonas de recirculação nas vizinhanças do aerofólio. Esta mudança na recirculação irá causar alterações na sustentação. Entretanto, o incremento  $dC_{L0}$  da sustentação linear devido ao incremento  $d\alpha$  não é instantâneo. Este atraso da sustentação pode ser modelado através de uma função de resposta  $\phi(t)$  de modo que o incremento  $dC_{L0,d}$  no tempo  $t$  devido ao incremento  $d\alpha(\tau)$  em um tempo anterior  $\tau$  possa ser escrito:

$$dC_{L0,d} = \phi(t - \tau) dC_{L0,d\tau} \quad (2.7)$$

Na equação 2.7 o subscrito  $d$  se refere à sustentação dinâmica. A função de resposta irá atender a condição  $\phi(\infty) = 1$ . Para escoamentos incompressíveis, pode-se mostrar que, para um aerofólio delgado, metade do incremento da sustentação ocorre instantaneamente, ou seja,  $\phi(0) = 1/2$ . Logo, superpondo os efeitos de todos os incrementos, a sustentação dinâmica linear, válida para quando o escoamento não está descolado, é dada por:

$$C_{L0,d}(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t - \tau) \dot{C}_{L0}(\tau) d\tau \quad (2.8)$$

A solução analítica de  $\phi(t)$  pode ser aproximada por um filtro de primeira ordem, contendo duas escalas de tempo, para as componentes de alta e baixa frequência. Com isto, a seguinte expressão pode ser usada:

$$\phi(t) = 1 - A_1 e^{-\omega_1 t} - A_2 e^{-\omega_2 t} \quad (2.9)$$

Onde  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\omega_1$  e  $\omega_2$  são variáveis dependentes do escoamento, que descreverão o atraso.  $\omega_1$  e  $\omega_2$  representam as escalas de tempo para baixas e altas frequências respectivamente.

Considera-se agora a situação em que o escoamento está descolado. Devido ao atraso entre efeitos previamente mencionado, o ângulo de recolamento será menor quando o ângulo de ataque aumentar, e maior quando o ângulo de ataque diminuir, quando comparados com seus correspondentes estáticos. Embora a equação 2.6 seja válida para condições estáticas, esta pode fornecer a redução do coeficiente de sustentação linear dinâmico [5]:

$$C_{L,d}(t) = \cos^4\left(\frac{1}{4}\theta_d\right) C_{L0,d}(t) \quad (2.10)$$

## 2.3 ESTADO DA ARTE

*Seebass e Tijdeman* (1980) estudaram os efeitos aeroelásticos em aerofólios oscilantes em escoamentos transônicos. Esta pesquisa traz resultados como campo de velocidade, localização de onda de choque, efeito da oscilação nas forças aerodinâmicas e caracterização de fenômenos aeroelásticos em função da amplitude e frequência de oscilação dos aerofólios. Os resultados foram comparados com simulações numéricas obtendo resultados compatíveis.

*DeLaurier e Harris* (1982) desenvolveram um trabalho experimental sobre o efeito na propulsão em aerofólios oscilantes em um túnel de vento de baixa velocidade. Procurou-se obter amplitude e frequência ótimas para o melhor ganho de propulsão em um perfil NACA 0012 em uma faixa de número de *Reynolds*. Foram feitas comparações entre outros trabalhos experimentais e a previsão teórica.

*McAlister ET AL* (1984) desenvolveu um modelo semi-empírico no estudo de carregamentos transientes em um aerofólio sujeito ao estol dinâmico. Os resultados obtidos através do modelo matemático estiveram de acordo com experimentos realizados. Os coeficientes do modelo matemático foram adquiridos empiricamente oscilando o perfil em torno de um ângulo em baixas amplitudes. Outros parâmetros foram adquiridos realizando ensaios estáticos. Estes coeficientes foram considerados como função do ângulo de ataque do perfil ou da velocidade do escoamento. As equações propostas para descreverem os carregamentos aerodinâmicos são funções de transferência não-lineares onde as entradas descrevem o movimento do aerofólio. Assumiu-se que o carregamento em um aerofólio oscilando abaixo do ângulo de estol estático pode ser representado por equações de primeira ordem e oscilações após este ângulo, de segunda ordem.

No trabalho de *Riester* (1993) intitulado *A computational and experimental investigation of incompressible oscillatory airfoil flow and flutter problems* foram investigados problemas relacionados a aerofólios oscilantes em escoamentos incompressíveis. Na parte computacional do trabalho utilizou-se o método dos painéis transiente modificado, comparando-se os resultados com a teoria clássica de *Theodorsen*, com ótimos resultados. Na parte experimental do trabalho, realizado em túnel de vento, foram feitas visualizações de escoamento utilizando fumaça para identificar padrões de vórtices gerados por um aerofólio NACA 0007 executando movimentos de oscilação harmônicos. Verificou-se também o ganho de propulsão e sustentação em aerofólios oscilantes com o controle do descolamento da camada limite.

*Platzer ET AL* (1993) fez simulações computacionais utilizando o método dos painéis investigando o efeito de *Knoller-Betz*. Comparações com a teoria de placa plana e trabalhos experimentais de outros pesquisadores foram feitas com bons resultados [21].

*Srinivasan ET AL* (1995) desenvolveu um trabalho numérico utilizando um aerofólio NACA 0015 oscilante no intuito de conhecer o mecanismo de controle de descolamento da camada limite devido à oscilação. O método utilizado foi de diferenças finitas nas equações de *Navier-Stokes*. Vários modelos de turbulência testados em três condições de escoamento (sem descolamento, descolamento leve e descolamento intenso) foram utilizados para garantir a confiabilidade nos resultados. Os resultados mostram curvas

de histerese de esforços aerodinâmicos, flutuações de pressão e campos de velocidade instantâneos. Comparações com os resultados experimentais não mostram muita concordância. A principal contribuição do trabalho foi mostrar que o modelo algébrico simples utilizado oferece alguma melhoria sobre outros modelos de turbulência com o mesmo custo computacional.

Wernert ET AL (1996) pesquisou o estol dinâmico em um NACA 0012 com oscilação por duas técnicas experimentais de visualização: *Particle Image Velocimetry* (PIV) e *Laser-Sheet Visualizations* (LSV) e por um código numérico baseado nas equações de *Navier-Stokes*. As comparações entre os resultados numéricos e experimentais foram compatíveis nas quatro fases analisadas do escoamento: no escoamento laminar, no desenvolvimento do vórtice de estol dinâmico, no pós estol dinâmico e no retorno ao escoamento laminar.

Jones (1996) ET AL realizaram um trabalho numérico-experimental com o objetivo de observar a esteira produzida em aerofólios em oscilação vertical. Trabalho este intitulado *Wake structures behind plunging airfoils: A comparison of numerical and experimental results*. As comparações entre os resultados numéricos e experimentais foram feitas para várias amplitudes e frequências de oscilação em dois perfis: NACA 0012 e NACA 0015. Na parte numérica do trabalho foi utilizado o método dos painéis transiente como ferramenta de cálculo. Foram feitos gráficos animados no intuito de se conhecer os padrões de esteira classificando-as como esteiras de arrasto, esteiras neutras ou esteiras de propulsão. Este padrão de esteiras foi perfeitamente visualizado na parte experimental do trabalho realizado em túnel d'água utilizando marcadores de tinta juntamente com a técnica de *Laser Doppler Velocimetry* (LDV).

Em outro trabalho de Jones ET AL (1998) uma comparação numérico-experimental sobre o efeito de *Knoller-Betz* foi realizada. Os experimentos foram realizados em túnel de água com visualização de escoamento utilizando a técnica de LDV. O padrão de esteira produzida foi comparado entre metodologias numéricas e experimentais. O método numérico utilizado foi uma variação do método dos painéis invíscido e transiente juntamente com um modelo turbulento não-linear. As comparações qualitativas e quantitativas foram excelentes para uma vasta gama de frequências

indicando que a formação e a evolução da esteira indicadora de propulsão é, a priori, um fenômeno invíscido.

*Cafarelli* (1999) agrupou em um único trabalho metodologias numéricas e experimentais desenvolvidas no estudo de estol dinâmico e otimização de estruturas rotativas. Comparações entre os diferentes modelos numéricos e experimentos foram apresentadas.

*Sankar ET AL* (2002) realizou um estudo comparativo entre três metodologias numéricas baseadas nas equações RANS para modelar o estol dinâmico em um perfil NACA 0015 oscilando segundo uma função senoidal. Os resultados foram apresentados no caso permanente, escoamento laminar e estol moderado. Todos os métodos forneceram resultados satisfatórios nos dois primeiros casos, porém, houve problemas na modelagem no caso de estol moderado. Os resultados das simulações foram comparados ao trabalho de *Piziali* (1994) que utilizou transdutores de pressão para estimar os esforços no perfil.

*Carvalho* (2003) fez uma investigação experimental do escoamento em torno de um cilindro rotativo em túnel d'água. Verificou-se a influência do número de *Reynolds* e da velocidade angular do corpo sobre a configuração do escoamento principalmente em sua esteira. A frequência de emissão dos vórtices foi determinada a partir da técnica de anemometria de filme quente e através da técnica de contagem de fotogramas com injeção de corante líquido. Os resultados foram bastante satisfatórios quando comparados com a literatura, mostrando que a configuração da esteira é fortemente afetada pelo movimento de rotação do cilindro a tal ponto que a emissão de vórtices pode ser totalmente inibida. Os cilindros circulares em movimento de rotação possuem um grande potencial de aplicação em projetos navais e aeronáuticos como dispositivos capazes de oferecer elevados coeficientes de sustentação ou ainda no controle ativo no descolamento da camada limite.

*Svácek ET AL* (2004) investigou problemas aeroelásticos em aerofólios da série NACA com dois graus de liberdade em um escoamento de ar bidimensional, viscoso e incompressível utilizando simulações numéricas. Os aerofólios foram considerados como sólidos flexíveis, permitindo vibrações verticais e torcionais. Também foi observado o comportamento dos aerofólios antes e depois da perda de estabilidade. O

método de elementos finitos foi utilizado na simulação da interação entre o escoamento incompressível e os aerofólios com vibração. Este método é baseado na combinação de várias técnicas, tais como a formulação arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE) das equações de *Navier-Stokes* na sua forma laminar com malha móvel. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com dados experimentais e também com simulações NASTRAN. Percebeu-se que o método de elementos finitos para formulação ALE das equações de *Navier-Stokes* no domínio do tempo pode ser aplicado para escoamentos com altos números de *Reynolds*, uma vez fornecida uma apropriada estabilização do método de elementos finitos, uma malha adequada e um *solver* linear eficiente.

*Pailhas ET AL* (2005) desenvolveu um trabalho experimental em um aerofólio OA209 oscilando periodicamente em torno de alguns ângulos de ataque médios em túnel de vento. Os efeitos de frequência e amplitude de oscilação e as variações de sustentação e momento de arfagem foram analisados através de transdutores de pressão. O campo médio de velocidade foi estimado através da técnica de LDV. PIV também foi utilizado para visualização do escoamento em planos acima do perfil e na esteira para analisar o mecanismo de estol dinâmico através do campo de velocidade instantâneo. O arrasto viscoso foi estimado utilizando sensores de filme quente e *skin friction gauges* na tentativa de determinar a natureza da separação da camada limite no bordo de ataque conduzindo ao estol dinâmico. Acelerômetros foram colocados dentro do perfil nos bordos de ataque e fuga para monitorar sua deformação durante os experimentos. Termopares foram utilizados para a correção dos dados oriundos dos sensores de filme quente.

No trabalho de *Kim ET AL* (2005), ensaios em túnel de vento foram realizados no intuito de estimar os coeficientes aerodinâmicos em um modelo em forma de ponte variando-se o seu ângulo de ataque. Testes comparativos de vibração devido ao carregamento do vento também foram realizados utilizando experimentos e análise FFT mostrando resultados compatíveis. A influência da mudança na forma do modelo sobre os coeficientes estimados foi analisada. A partir dos resultados obtidos, métodos sobre redução de arrasto e de vibração foram apresentados.

*Tinar e Cetiner* (2006) investigaram vibrações auto-induzidas em um NACA 0012 utilizando a técnica de *Particle Image Velocimetry* (PIV) em conjunto com medições de

aceleração. O perfil foi engastado nas paredes do túnel por rolamentos esféricos de um lado e de outro, por uma mola que o permitiu oscilar livremente. Os experimentos foram realizados em um túnel de vento de baixa velocidade. Os dados de aceleração foram sincronizados com os dados do PIV e duplamente integrados numericamente para fornecerem a velocidade angular e posição do perfil. As imagens do PIV foram usadas como referência para validação das integrações numéricas. Os ensaios foram realizados combinando os seguintes parâmetros: três molas de diferentes constantes elásticas, três diferentes velocidades de escoamento e quatro ângulos de ataque iniciais médios. Os resultados sempre foram apresentados evidenciando a influência de cada um dos parâmetros. Mesmo com uma taxa de aquisição do PIV baixa em relação à frequência de vibração do aerofólio, imagens detalhadas foram adquiridas permitindo a visualização da formação de vórtices na esteira.

*Geissler ET AL (2006)* realizou um trabalho numérico-experimental em um perfil OA312. Na parte experimental foram feitas medições na distribuição de pressão em túnel de vento para investigar os efeitos de estol dinâmico. Na parte numérica foram feitas simulações utilizando as equações RANS-2D incluindo modelos de turbulência e transição. Os testes foram realizados para números de *Mach* iguais a 0,2 e 0,4 em escoamento em transição livre e turbulento. Efeitos de compressibilidade também foram investigados. Os resultados das estimativas da distribuição de pressão foram comparados entre as simulações numéricas e os experimentos com bons resultados.

*Bueno ET AL (2007)* realizou um estudo numérico-experimental para medição da distribuição de pressão em um perfil NACA 0012 em oscilação. Os testes experimentais foram feitos em túnel de vento, medindo-se a distribuição de pressão sobre o aerofólio oscilante. Observou-se que o comportamento do descolamento da camada limite ocorreu como previsto na teoria. As simulações computacionais tiveram a mesma finalidade dos experimentos. Utilizaram-se alguns métodos tais como: método de Fronteira Imersa com condição de não escorregamento, o método de diferenças finitas, *Runge-Kutta* de quarta ordem, o método de *Steger-Warming* de segunda ordem com limitador de fluxo *Min-Mod*. Os resultados numéricos e experimentais concordaram qualitativamente.

*Timmer* (2008) desenvolveu um trabalho experimental objetivando estimar os coeficientes aerodinâmicos de sustentação, arrasto e momento de arfagem em um NACA 0018 em túnel de vento. Os esforços apresentados foram estimados através de uma balança de seis componentes. Os resultados foram apresentados em forma de gráficos de coeficientes aerodinâmicos versus ângulo de ataque e também polar de arrasto. Os ensaios foram realizados variando-se o número de *Reynolds* de 150.000 a 1.000.000. A localização da posição da transição da camada limite sobre e sob o perfil foi também realizada com o auxílio de um estetoscópio com microfone. Através deste procedimento conclui-se que o escoamento permanece totalmente laminar até 7° de ângulo de ataque. A motivação da realização deste trabalho foi a melhoria de desempenho em turbinas eólicas de eixo vertical.

No trabalho de *Bousman* intitulado *Airfoil Dynamic Stall and Rotorcraft Maneuverability*, a sustentação, o arrasto e o momento de arfagem foram investigados em oito aerofólios em túnel de vento. Os aerofólios foram submetidos a vários testes inclusive aqueles em que se observou formação de vórtices no bordo de ataque. Conclui-se que todos os aerofólios estudados tiveram comportamentos semelhantes durante o estol dinâmico. Percebeu-se também que quanto maior o coeficiente de sustentação estático de um aerofólio melhor o desempenho deste quando sujeito ao estol dinâmico.

Outros mecanismos de controle do descolamento da camada limite já foram pesquisados. Dentre os quais estão os geradores de vórtices pesquisados por *Jirasek* (2004), que demonstraram eficácia, porém causando aumento de arrasto e momento na sua aplicação. Sopradores ou succionadores contínuos já foram estudados com bons resultados em laboratório, no entanto há dificuldades em sua implementação prática. E jatos sintéticos oscilatórios (*e.g.*, *Glezer & Amitay 2002; Rumsey et al. 2004; Wygnanski 2004*) que já são largamente aplicados na indústria melhorando a eficiência e estabilidade de equipamentos, contudo, ainda há muitos parâmetros a serem estudados nesta técnica.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

##### 3.1.1 Túnel de água

O presente estudo experimental foi realizado no Laboratório de Energia e Ambiente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Uma série de experimentos para a determinação dos esforços dinâmicos sobre aerofólios utilizaram um túnel de água marca *Armfield* modelo HAN 5, com 2750 milímetros de altura, 4900 milímetros de comprimento e 1100 milímetros de largura, alimentado com um motor da bomba principal de potência igual a 5.500 Watts.

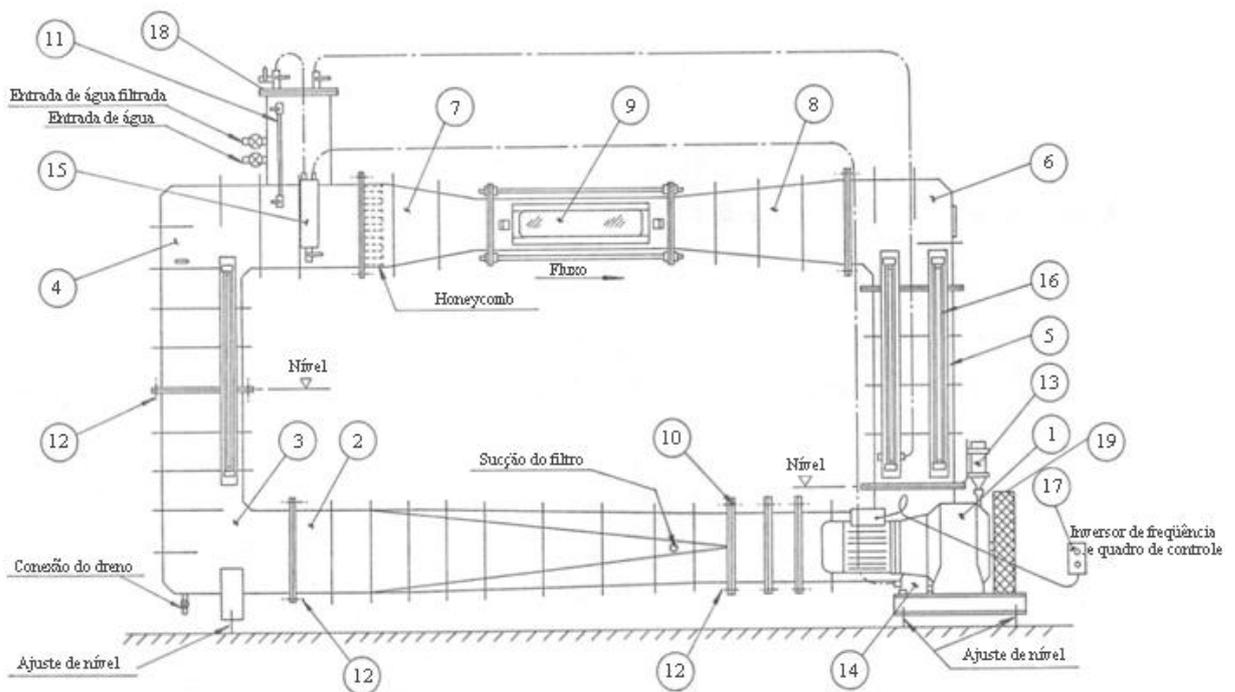


Figura 3-1 - Desenho esquemático do túnel de água

**Tabela 3-1 - Descrição das partes principais do túnel de água**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
1	Conjunto moto-bomba principal com variador de velocidade mecânico
2	Tubo base
3	Seção curva inferior-esquerda
4	Seção curva superior-direita
5	Seção vertical esquerda
6	Seção curva superior-esquerda
7	Bocal de entrada da seção de testes (bocal de contração)
8	Difusor de saída da seção de testes
9	Seção de testes
10	Junta da flange
11	Tubo de nível de água
12	Parafusos de fixação das flanges
13	Recipiente de resfriamento do mancal da bomba principal
14	Bomba de vácuo
15	Recipiente intermediário do sistema de vácuo
16	Manômetros de coluna de água de 2 metros
17	Quadro de controle
18	Tanque superior
19	Polias de transmissão



**Figura 3-2 - Foto da bancada de testes**

O acionamento e controle do motor principal do túnel foram feitos por um inversor de frequência da marca *WEG* modelo *KMR - CFW 09*, substituindo então a função do variador de velocidade mecânico existente.

A seção de testes é formada por uma seção quadrada de 200 milímetros de altura e largura e 750 milímetros de comprimento, onde o escoamento pode alcançar velocidades entre 0,65 a 4,8 metros por segundo. A intensidade turbulenta do túnel está abaixo de 0,2% segundo o manual de operação do túnel. A seção de testes possui ainda duas paredes de acrílico removíveis nas laterais e uma ao fundo, permitindo a visualização do escoamento. Nesta seção, um sistema de balança acoplado a um aerofólio é posicionado como mostra a figura 3.3.



Figura 3-3 - Seção de testes

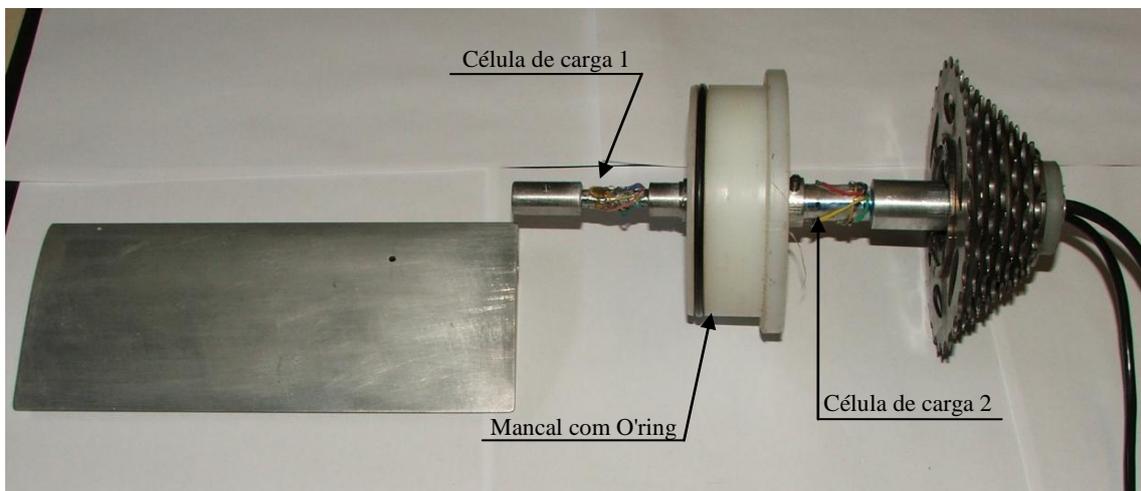


Figura 3-4 - Vista explodida do perfil, células de carga e transmissão

Um aerofólio NACA 0018 em alumínio com 89 milímetros de corda e 198 milímetros de envergadura foi utilizado para os ensaios experimentais. O aerofólio foi usinado em CNC, conferindo-o um excelente acabamento e precisão nas medidas, com classe de rugosidade N6 e dimensões com tolerância da ordem de  $10^{-1}$  milímetros. Este perfil sólido é perfurado à  $\frac{1}{4}$  da corda distante do bordo de ataque para se encaixar o eixo de giro (figura 3.4).

O perfil NACA 0018 é um perfil aerodinâmico da série NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Os aerofólios NACA são descritos através dos dígitos localizados após a palavra NACA. Os parâmetros previstos nos dígitos são inseridos em fórmulas matemáticas de modo a determinar a geometria do perfil e determinar as suas propriedades. Esta família de perfis é dividida em:

#### NACA 4 dígitos:

- O primeiro dígito representa o camber (medida da assimetria entre as curvas do intradorso e do extradorso do aerofólio) máximo como um percentual da corda do perfil;
- O segundo dígito representa a posição do camber máximo do perfil em termos de múltiplos de dez da corda do aerofólio medido a partir do bordo de ataque do perfil;
- Os dois últimos dígitos representam a espessura máxima do perfil medido em termos percentuais da corda.

#### NACA 5 dígitos:

- O primeiro dígito representa o camber máximo como um percentual da corda do perfil;
- O segundo e terceiro dígitos representam a posição do camber máximo do perfil em termos de múltiplos de cem da corda do aerofólio medido a partir do bordo de ataque do perfil multiplicados por 2;
- Os dois últimos dígitos representam a espessura máxima do perfil medido em termos percentuais da corda;

#### NACA 6 dígitos:

- O primeiro dígito representa a série do perfil;
- O segundo dígito representa a localização do coeficiente de pressão em termos de múltiplos de dez da corda do aerofólio medido a partir do bordo de ataque do perfil;
- O terceiro dígito representa o arrasto em termos de múltiplos de dez da corda do aerofólio a partir do bordo de ataque do perfil;
- O quarto dígito representa a linha de camber ideal em termos de múltiplos de dez da corda do aerofólio a partir do bordo de ataque do perfil;
- Os dois últimos dígitos representam a espessura máxima do perfil medido em termos percentuais da corda;

Para o perfil NACA 0018, significa dizer que o perfil é simétrico em relação à corda, camber nulo e com espessura máxima de 18% da corda do perfil localizada a 1/4 da corda a partir do bordo de ataque.



**Figura 3-5 - Perfil NACA 0018 em alumínio.**

Para o perfil se movimentar de forma controlada, foi utilizado um motor de passo da marca *Sanyo* com resolução de  $1,8^\circ$  por passo. O motor foi conectado a um *driver* de controle com opção de meio passo, opção esta utilizada em todos os ensaios. A posição e a velocidade angular do perfil foram definidas e controladas por algoritmo programado no software *LabView*.

A transmissão entre o motor e eixo de giro do perfil (célula de carga) foi feita através de uma redução do tipo pinhão-coroa por correntes (figura 3.6). A utilização de uma redução foi necessária para aumento de torque e também para obter melhor resolução no posicionamento do perfil. O pinhão foi acoplado diretamente ao eixo do motor de passo e possui 33 milímetros de diâmetro. A coroa foi acoplada diretamente ao eixo de giro do perfil (célula de carga) e possui diâmetro igual a 99 milímetros. Dessa forma, foi obtida uma redução na razão de 3:1. Devido à utilização da opção de meio passo pelo *driver* de controle e à redução na transmissão na razão de 3:1, pode-se alcançar uma resolução no posicionamento angular do perfil de  $0,3^\circ$ .

O mancal utilizado foi feito em nylon com *o'ring* de vedação e dois rolamentos de esfera em inox com vedação de borracha. O apoio foi feito apenas de um lado do perfil, maximizando a deformação na célula de carga.

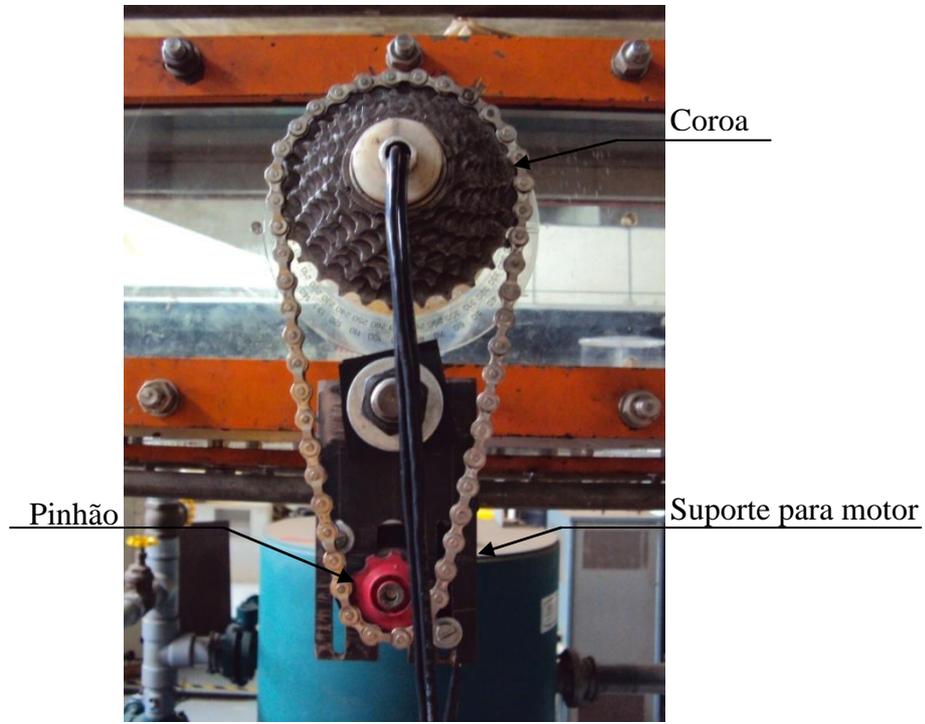


Figura 3-6 - Sistema de transmissão

### 3.1.2 Instrumentação

#### 3.1.2.1 Medição de velocidade do escoamento no túnel

Foram utilizados dois métodos para se estimar a velocidade do escoamento. O primeiro método foi através de um tubo de *Pitot* conectado a um manômetro diferencial de coluna d'água e um manômetro digital diferencial. O segundo método foi a medição da variação de pressão entre a entrada e saída do bocal da seção de testes do túnel. A medição foi realizada por outro manômetro diferencial de coluna d'água.

As principais características do manômetro diferencial digital utilizado são:

- Modelo: 891.34.2189
- Marca: Wika

- Range: 0 ... 160 mbar
- Sinal de saída: 4 ... 20 mA
- Tensão elétrica: 10 ... 30 Volts
- Sobre pressão de segurança: 25 bar

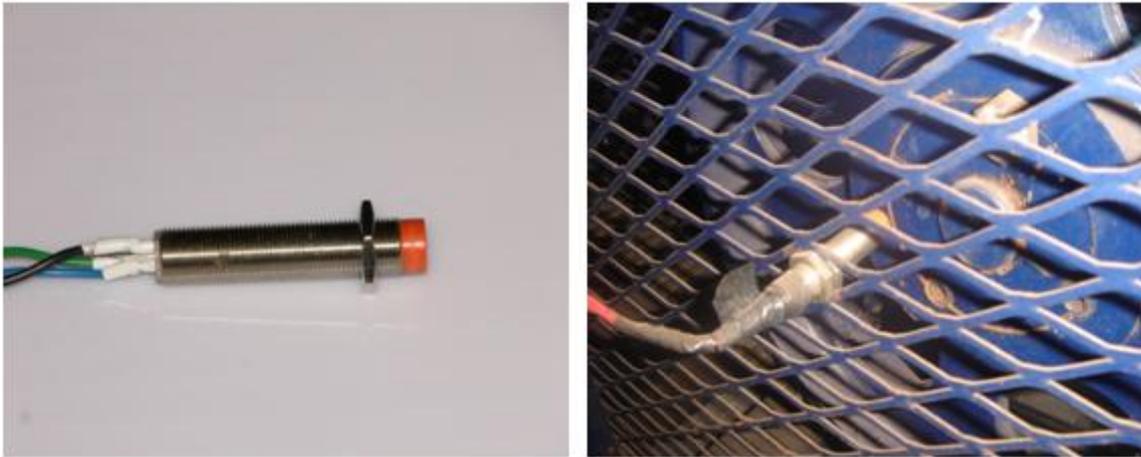


**Figura 3-7 - Manômetro digital**

### Sensor de rotação

As principais características do sensor de rotação utilizado são:

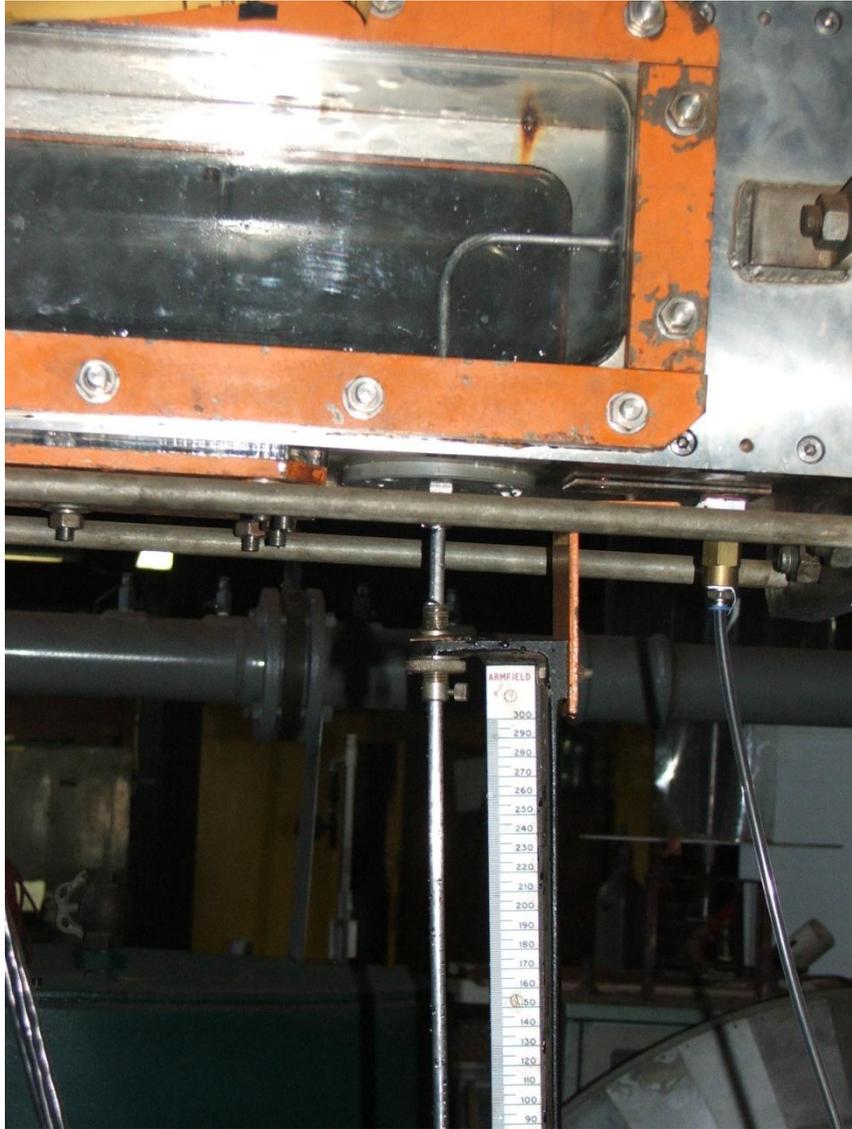
- Marca: *Ace Schmersal*
- Modelo: IFL-4-12-10 Stn
- Diâmetro: 12 mm
- Distância de acionamento: 4 mm
- Normalmente aberto
- Tensão elétrica: 10 a 30 Volts
- Corrente elétrica: 3,5 mA
- Frequência de comutação: 1000 Hz



**Figura 3-8 – Sensor de rotação**



**Figura 3-9 - Tubo de *Pitot***



**Figura 3-10 - Tubo de *Pitot* instalado**

### 3.1.2.2 Medição de esforços no aerofólio - Célula de carga

Para o levantamento dos esforços de sustentação, arrasto e momento no aerofólio, foi construído uma célula de carga integrada ao perfil, compondo assim uma balança multiaxial como mostra a figura 3.11.

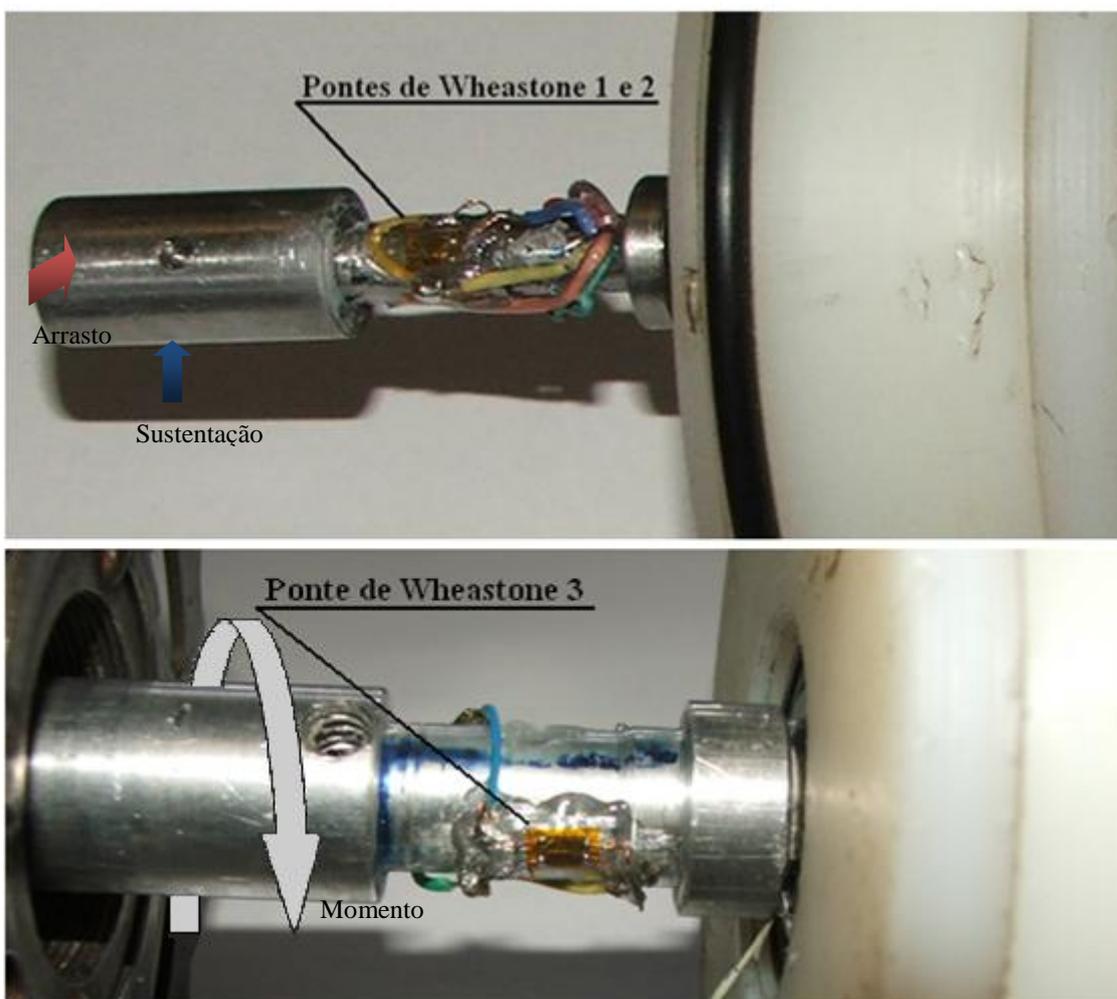


Figura 3-11 - Detalhe dos extensômetros das pontes de *Wheatstone* 1, 2 e 3

A célula de carga foi dividida em duas seções. A primeira feita em aço inox 316L, responsável por estimar as forças de sustentação e arrasto, localizada dentro do perfil. A segunda feita em alumínio, responsável por estimar os esforços de torção causados pelo momento de arfagem. A célula de carga também foi o eixo responsável por girar o perfil e foi posicionada a  $\frac{1}{4}$  do bordo de ataque deste.

Para as medições de sustentação e arrasto dois pares de extensômetros unidirecionais, formando duas meias pontes de *Wheatstone*, foram utilizados. Um par de extensômetros foi posicionado de forma a estimar os esforços na direção perpendicular à corda do perfil e denominada ponte de *Wheatstone* 1. O outro par foi posicionado de forma a estimar os esforços na direção paralela à corda do perfil e denominada ponte de *Wheatstone* 2. O esquema de ligação das pontes de *Wheatstone* 1 e 2 encontra-se abaixo.

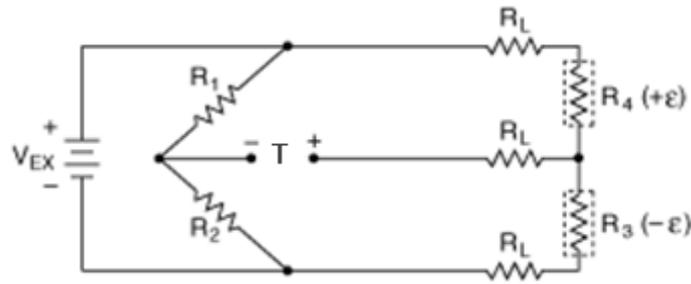


Figura 3-12 - Circuito elétrico das pontes de *Wheastone* 1 e 2

Onde:

- $R_1$  é um resistor complementar da meia ponte de *Wheastone*
- $R_2$  é um resistor complementar da meia ponte de *Wheastone*
- $R_3$  é um extensômetro ativo medindo esforços de compressão ( $-\epsilon$ )
- $R_4$  é um extensômetro ativo medindo esforços de tração ( $+\epsilon$ )
- $V_{EX}$  é a tensão de excitação da ponte de *Wheastone*
- $R_L$  é a resistência dos fios de conexão
- $T$  é a tensão de saída da ponte de *Wheastone*

Esta configuração de montagem possui as seguintes características: dois extensômetros unidirecionais ativos e com deformações iguais e opostas, sendo um posicionado na direção da deformação axial no topo da célula de carga e o outro posicionado na direção da deformação axial ao fundo da célula de carga. Esta configuração torna os extensômetros sensíveis apenas a carregamentos de flexão, rejeitando deformações axiais e com compensação de temperatura. O *gauge factor* de todos os extensômetros utilizados nas pontes de *Wheastone* 1 e 2 é igual a 2,1.

Para as medições de momento de arfagem foram utilizados quatro extensômetros formando uma ponte de *Wheastone* completa denominada ponte de *Wheastone* 3. O esquema de ligação da ponte de *Wheastone* 3 encontra-se abaixo.

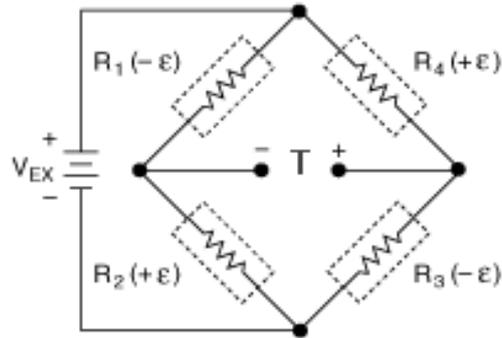


Figura 3-13 - Circuito elétrico da ponte de *Wheastone 3*

Onde:

- $R_1$  é um extensômetro ativo medindo esforço de compressão ( $-\epsilon$ ).
- $R_2$  é um extensômetro ativo medindo esforço de tração ( $+\epsilon$ ).
- $R_3$  é um extensômetro ativo medindo esforço de compressão ( $-\epsilon$ ).
- $R_4$  é um extensômetro ativo medindo esforço de tração ( $+\epsilon$ ).
- $V_{EX}$  é a tensão de excitação da ponte de *Wheastone*
- $R_L$  é a resistência dos fios de conexão
- $T$  é a tensão de saída da ponte de *Wheastone*

Esta configuração de montagem possui as seguintes características: quatro extensômetros ativos, com dois pares sujeitos a deformações iguais e opostas e posicionados a  $45^\circ$  em relação à direção axial da célula de carga, fazendo com que os extensômetros fiquem sensíveis a esforços de torção. Esta configuração permite compensação de temperatura e de resistência dos fios de conexão. O *gauge factor* de todos os extensômetros utilizados na ponte de *Wheastone 3* é igual a 2,09.

Todos os extensômetros utilizados possuem resistência de 350 *Ohms* e todas as pontes foram excitadas com uma tensão elétrica de 9,5 Volts. As balanças foram calibradas *in loco* e a metodologia e os resultados dos ensaios de calibração encontram-se em anexo.

### 3.1.2.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema utilizado para a aquisição de dados é o *rack NI cDAQ-9172*. O módulo NI 9237 foi utilizado para a aquisição dos dados de extensometria e o módulo NI 9205 foi utilizado para a aquisição dos dados de pressão e rotação. O controle do motor de passo foi feito através do *driver* de controle com comunicação serial, ligado diretamente ao computador através de um cabo USB – Serial.

O software *LabView* versão *8.2 Student Edition* foi utilizado para a aquisição e tratamento dos dados adquiridos e também para o controle da movimentação do perfil. Os diagramas de blocos desenvolvidos para a aquisição e controle dos dados encontram-se no anexo IV.



**Figura 3-14 - Rack NI cDAQ-9172**

Este sistema permitiu o registro dinâmico das seguintes variáveis:

- Velocidade do escoamento através da aquisição de dados de pressão e rotação;
- Esforços no perfil através de extensometria.

A aquisição automática de dados, junto ao controle do movimento do aerofólio, permitiu o levantamento de esforços dinâmicos durante o evento de rotação induzida do aerofólio.

### 3.1.3 Visualização do escoamento

A visualização do escoamento foi realizada no intuito de melhor compreender os fenômenos relacionados ao estol dinâmico. Os equipamentos utilizados nos ensaios de visualização foram: uma câmera fotográfica profissional da marca *Canon*, modelo 20-D com lentes objetiva 28-90 mm, uma câmera filmadora da marca *Sony* modelo DCR-HC51E, um emissor de laser de diodo marca *Eagle*, modelo 400mW@670nm e fonte de alimentação modelo EAG. 2.0



Figura 3-15 - Emissor de laser de diodo



Figura 3-16 - Fonte de alimentação do emissor de laser

O conjunto laser é responsável por criar um plano de luz não pulsante o qual é responsável por iluminar partículas de *pliolite* contidas no escoamento. Tais partículas possuem a característica de serem excelentes refletoras de luz. Numa direção perpendicular ao plano de luz criado, posiciona-se a câmera fotográfica e a filmadora para a aquisição das imagens conforme esquema abaixo:

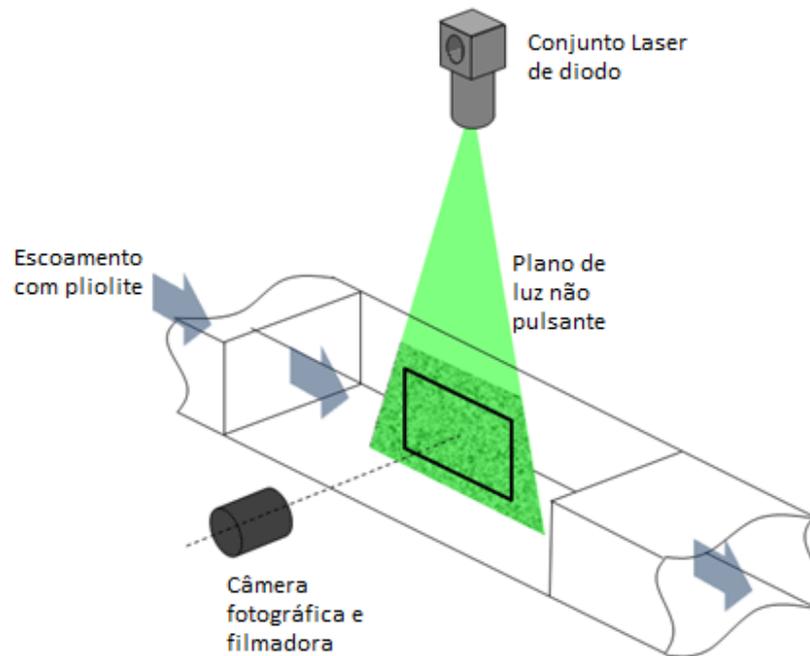


Figura 3-17 - Esquema do sistema de visualização do escoamento

Ajusta-se manualmente na câmera fotográfica: a abertura do diafragma, sensibilidade à luz, o tempo de abertura do obturador e o foco para uma melhor qualidade da imagem, de forma que as partículas de *pliolite* formem linhas nas imagens representando as linhas de emissão do escoamento. Estas configurações na câmera fotográfica podem variar em função da velocidade do escoamento, quantidade de luz ambiente e distância.

### 3.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS

Foram realizados quatro ensaios no presente trabalho:

- Ensaio de calibração do túnel de água;
- Ensaio de calibração da célula de carga;
- Ensaio de aquisição dos coeficientes hidrodinâmicos;
- Ensaio de visualização do escoamento.

### 3.2.1 Ensaio de calibração do túnel

O túnel de água foi calibrado no sentido de se encontrar a velocidade média e o perfil de velocidade do escoamento na seção de testes em função da rotação da bomba principal do túnel. Para tanto, um tubo de *Pitot* acoplado a um manômetro diferencial de coluna de água e, em paralelo, a um manômetro diferencial digital da marca *Wika*, foi utilizado para estimar a pressão dinâmica e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento na seção de testes. A velocidade do escoamento também foi estimada pela perda de carga no bocal de entrada da seção de testes (efeito *Venturi*) e os resultados entre as duas técnicas de medição de velocidade foram comparados. Para a medição da perda de carga no bocal de entrada da seção de testes, foi utilizado outro manômetro diferencial de coluna d'água. Com o tubo de *Pitot*, foram também obtidos perfis de velocidade em toda a seção transversal do túnel, no sentido de identificar possíveis distorções no campo de velocidade na entrada da seção. E, para a medição da rotação da bomba principal, foi utilizado um sensor de proximidade indutivo como sensor de rotação. Este sensor foi posicionado de forma a medir a rotação da polia do rotor da bomba principal do túnel. Desta maneira, a velocidade do escoamento na seção de testes foi monitorada em tempo real na realização do experimento. A calibração foi realizada com uma variação máxima nos valores de velocidade de  $\pm 0,05$  m/s entre os métodos utilizados.

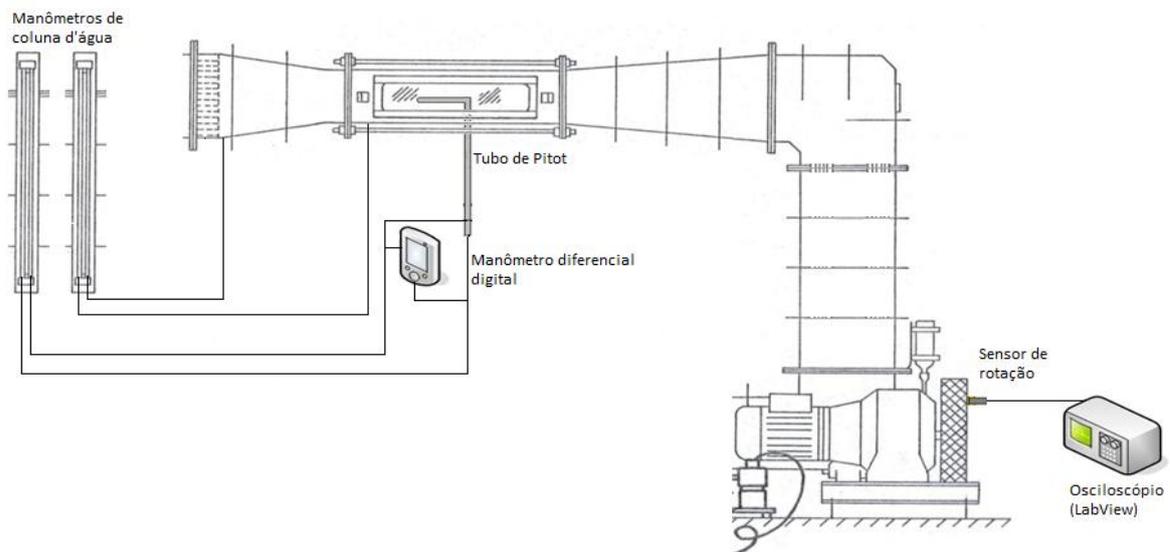


Figura 3-18 - Esquema do sistema de calibração do túnel de água

O procedimento no ensaio de calibração do túnel foi realizado da seguinte forma: fixando a rotação indicada no inversor de frequência, obteve-se os valores de pressão dinâmica indicados pelos manômetros diferenciais de coluna d'água e digital.

Aplicando-se a equação de *Bernoulli*, pode-se estimar a velocidade do escoamento e atrelar estes valores de velocidade à rotação da bomba ( $f_{bomba}$ ) indicado através da seguinte curva (figura 3.10).

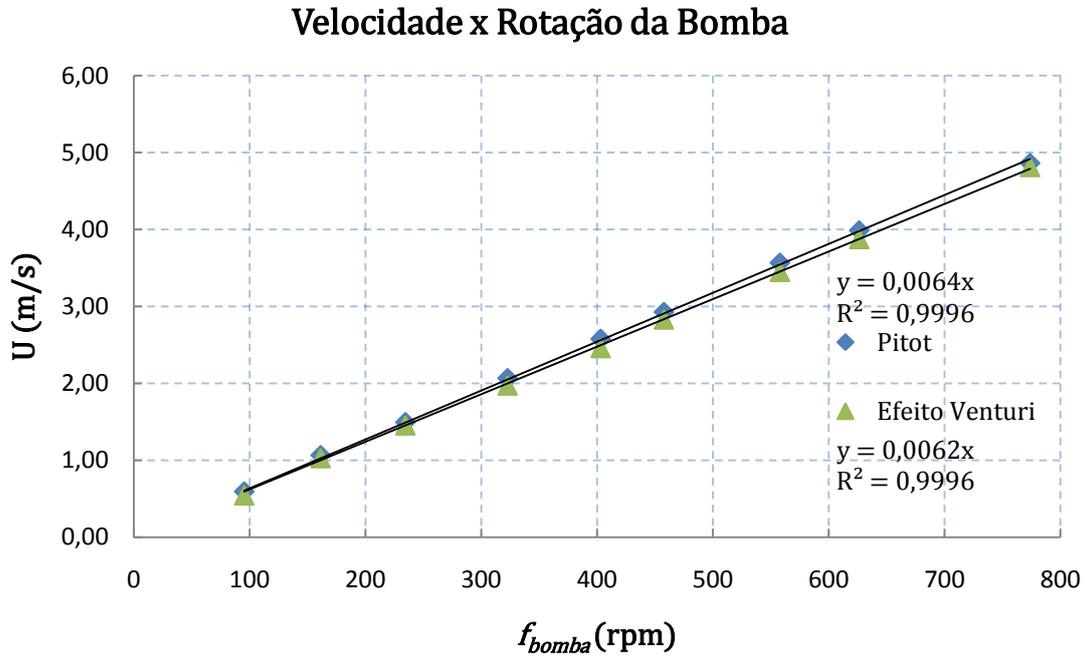


Figura 3-19 – Curva de calibração do túnel. (Comparação entre as medições do tubo de *Pitot* e efeito Venturi)

Maiores detalhes sobre a calibração do túnel encontram-se no Anexo II.

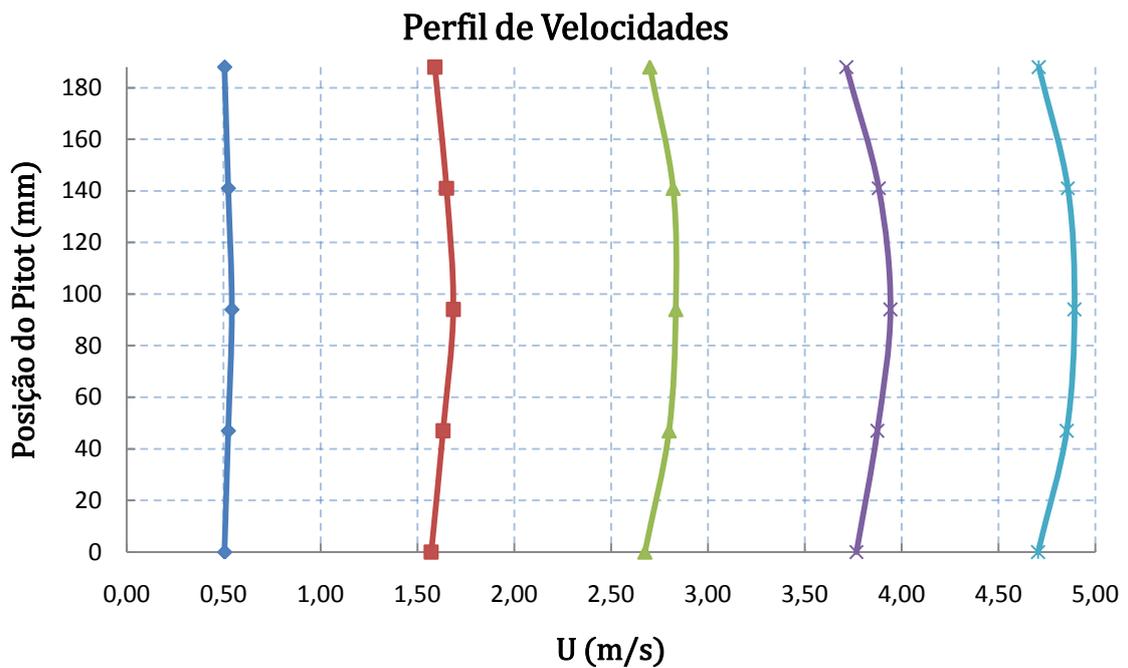


Figura 3-20 - Perfil de velocidades para várias velocidades de escoamento

### 3.2.2 Ensaio de aquisição dos coeficientes hidrodinâmicos

Um perfil simétrico NACA 0018 foi ensaiado em túnel de água. Os ensaios foram divididos em duas fases. Na primeira fase foram realizados os ensaios estáticos, estimando-se os coeficientes hidrodinâmicos com o perfil fixo, posicionado em diferentes ângulos de ataque, para três números de *Reynolds*. Os ângulos de ataque escolhidos nos ensaios estáticos foram iguais 0,0°, 0,9°, 1,9°, 3,1°, 4,0°, 5,0°, 5,9°, 6,9°, 8,1°, 9,0°, 10,0°, 10,9°, 12,1°, 13,1°, 14,0°, 15,0°, 15,9°, 17,1°, 18,1°, 19,0° e 19,9° girando-se o perfil de modo a elevar o bordo de ataque (sentido anti-horário). O objetivo desta primeira fase foi a validação da célula de carga e da metodologia desenvolvida para a estimativa dos coeficientes hidrodinâmicos comparando os resultados com outros existentes na literatura. Na segunda fase foram realizados os ensaios dinâmicos, estimando-se os coeficientes hidrodinâmicos em tempo real ao longo do movimento do perfil, para dois números de *Reynolds* e três velocidades angulares do perfil. Em todos os ensaios, em ambas as fases, o ângulo de ataque foi variado de 0° a 19,9°.

As velocidades do escoamento na primeira fase dos ensaios foram iguais a 1,1, 1,4 e 1,7 m/s, equivalentes aos seguintes números de *Reynolds* baseados na corda: 97.000, 124.000 e 150.000, respectivamente. As velocidades do escoamento na segunda fase dos ensaios foram iguais a 1,4 e 1,7 m/s, equivalentes aos seguintes números de *Reynolds* baseados na corda: 124.000 e 150.000, respectivamente. As velocidades angulares do perfil nos ensaios dinâmicos foram de 0,06, 0,13 e 0,19 rad/s.

Todos os ensaios, estáticos e dinâmicos, foram repetidos cinco vezes e os resultados mostram a sua média aritmética.

A visualização do escoamento também foi feita para os ensaios estáticos e dinâmicos, com *Reynolds* igual a 150.000 e nas mesmas velocidades angulares do perfil utilizados na segunda fase dos ensaios. Foram escolhidos ângulos característicos para análise.

### 3.3 TRATAMENTO DE DADOS

Todos os dados foram adquiridos segundo uma taxa de aquisição de 2 kHz, de forma contínua, com tamanho de *buffer* igual a 2048. Foram utilizados filtros passa-baixa do tipo *Bessel* de quarta ordem, com uma frequência de corte de 12 Hz. Uma preocupação

que deve ser ressaltada é entre o sincronismo dos dados adquiridos pela ponte e a real posição do perfil nos ensaios dinâmicos. As configurações de taxa de aquisição e tamanho de *buffer* utilizadas conferiram uma adequada taxa de aquisição e um tempo de resposta do sistema muito curto fazendo com que não haja problemas de sincronismo entre os esforços medidos e a posição do perfil nos ensaios dinâmicos.

Como a célula de carga girava juntamente com o perfil durante os ensaios, os esforços medidos por cada uma das duas meias pontes de *Wheastone* estavam sempre nas direções perpendiculares e paralelas à corda do perfil, sendo que a célula de carga estava sujeita, ainda, ao peso do perfil. Todas as pontes foram balanceadas em  $\alpha = 0^\circ$ . Então, para a aquisição das forças hidrodinâmicas a partir dos dados obtidos pela célula de carga, as seguintes equações são aplicadas:

$$\vec{F}_1 = K_1 T_1 \quad (3.1)$$

$$\vec{F}_2 = K_2 T_2 \quad (3.2)$$

$$\vec{M}' = K_3 T_3 \quad (3.3)$$

$$\vec{W}_{ap} = \vec{W} + \vec{E} \quad (3.4)$$

As curvas obtidas nos ensaios de calibração para obtenção dos coeficientes de proporcionalidade ( $K$ ) das pontes de *Wheastone* encontram-se em anexo. Pelos coeficientes angulares destas curvas de calibração tem-se que  $K_1 = 125.319$ ,  $K_2 = 102.947$  e  $K_3 = 12.227$ .

$$|L| = |F_1| \cos(\alpha) - |F_2| \text{sen}(\alpha) + |W_{ap}| \cos(\alpha) - |W_{ap}| \quad (3.5)$$

$$|D| = |F_2| \cos(\alpha) + |F_1| \text{sen}(\alpha) + |W_{ap}| \text{sen}(\alpha) \quad (3.6)$$

$$|M| = |M'| - \frac{3}{4} c |W_{ap}| \text{sen}(\alpha) \quad (3.7)$$

Convencionou-se o sentido horário o sentido positivo para o momento de arfagem.

Nos ensaios dinâmicos,  $\alpha$  foi obtido através da seguinte equação:

$$\alpha = \omega t \quad (3.8)$$

De posse das forças e momentos hidrodinâmicos as equações para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos são:

$$C_L = \frac{|L|}{0,5\rho_{H_2O}A_pU^2} \quad (3.9)$$

$$C_D = \frac{|D|}{0,5\rho_{H_2O}A_pU^2} \quad (3.10)$$

$$C_M = \frac{|M|}{0,5\rho_{H_2O}A_pU^2c} \quad (3.11)$$

Sendo que:

$$A_p = c \cdot e \quad (3.12)$$

A velocidade do escoamento foi monitorada durante os ensaios através da rotação da bomba principal conforme a seguinte equação:

$$U = 0,0064f_{bomba} \quad (3.13)$$

Os ensaios de calibração do túnel para obtenção da equação 3.13 encontram-se em anexo. (figura II.1)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As informações mais comumente encontradas nos resultados de trabalhos sobre levantamento de coeficientes aerodinâmicos e visualização de escoamento em perfis aerodinâmicos são o valor do coeficiente de sustentação máximo, o ângulo de estol, a comparação de valores de coeficientes aerodinâmicos para diferentes números de *Reynolds*, a configuração de escoamento e a região de descolamento da camada limite sobre o perfil. Os resultados adquiridos no presente trabalho mostram essas informações através de gráficos de coeficientes versus ângulo de ataque e imagens do escoamento em determinadas posições angulares do perfil. Ainda se faz presente uma comparação entre os casos estático e dinâmico, no tocante ao comportamento dos coeficientes hidrodinâmicos ao longo da variação do ângulo de ataque e na configuração do escoamento.

Todos os pontos dos gráficos deste capítulo (casos estático e dinâmico) utilizam a média aritmética dos cinco ensaios realizados para cada configuração, no intuito de se realizar a análise de incerteza dos experimentos.

### 4.1 CURVAS DE COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS PARA O CASO ESTÁTICO

Os resultados dos ensaios estáticos (com o perfil fixo) serão apresentados em forma de gráficos de coeficientes hidrodinâmicos versus ângulo de ataque e polar de arrasto. Serão mostrados gráficos comparativos evidenciando a influência do número de *Reynolds* e da posição angular do perfil.

O objetivo dos ensaios estáticos é a validação do experimento a partir da comparação dos resultados obtidos com os valores apresentados na literatura.

Os gráficos a seguir representam os resultados dos ensaios estáticos para os números de *Reynolds* iguais a 97.000, 124.000 e 150.000 e posições angulares variando de 0° a 19,9°. A variação do número de *Reynolds* foi obtida apenas variando-se a velocidade do escoamento. Os gráficos a seguir evidenciam a influência do número de *Reynolds* nos coeficientes hidrodinâmicos nos casos estáticos (figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4).

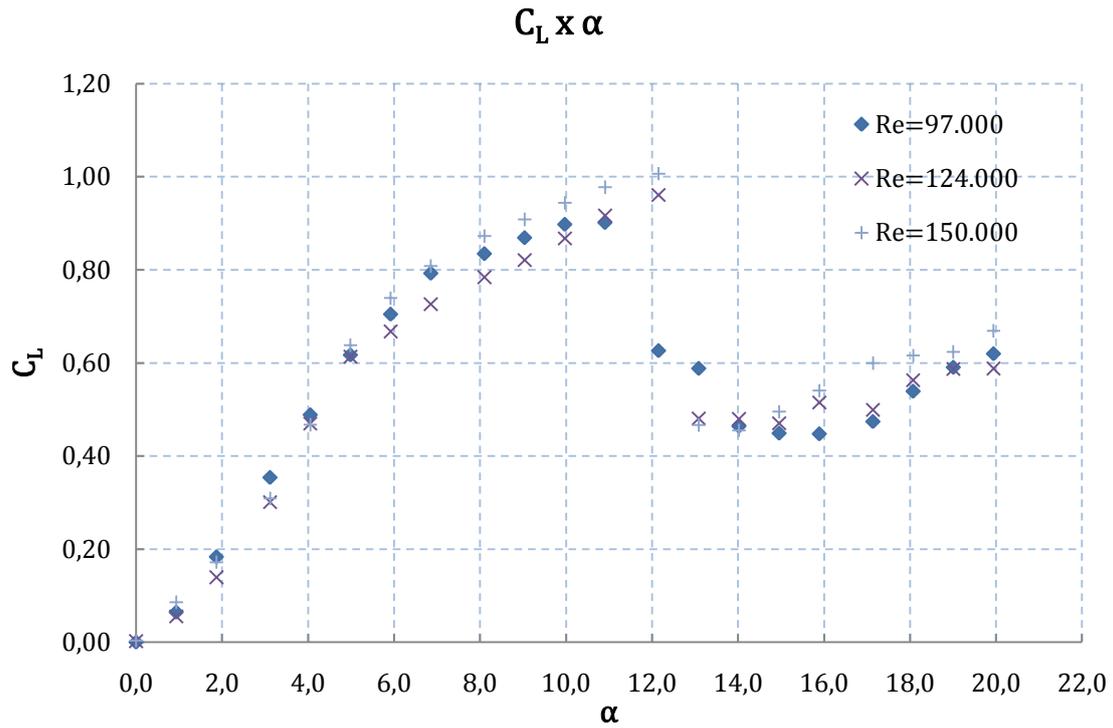


Figura 4-1 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso estático,  $Re=97.000$ ,  $124.000$  e  $150.000$

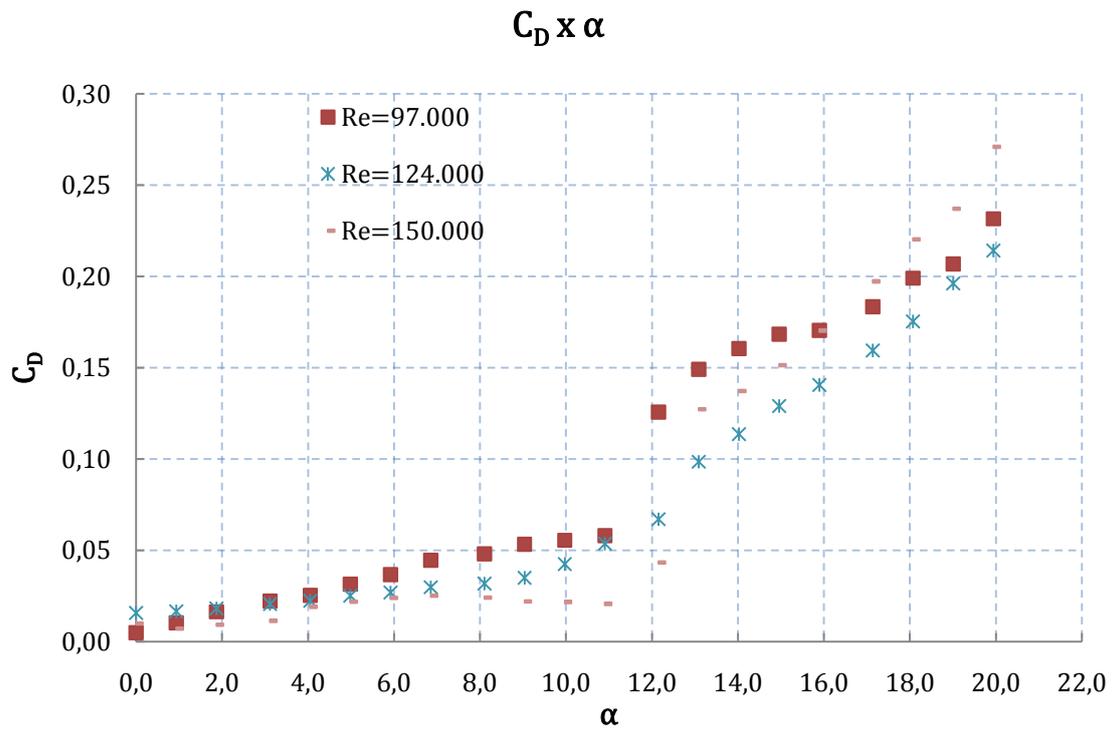


Figura 4-2 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso estático,  $Re=97.000$ ,  $124.000$  e  $150.000$

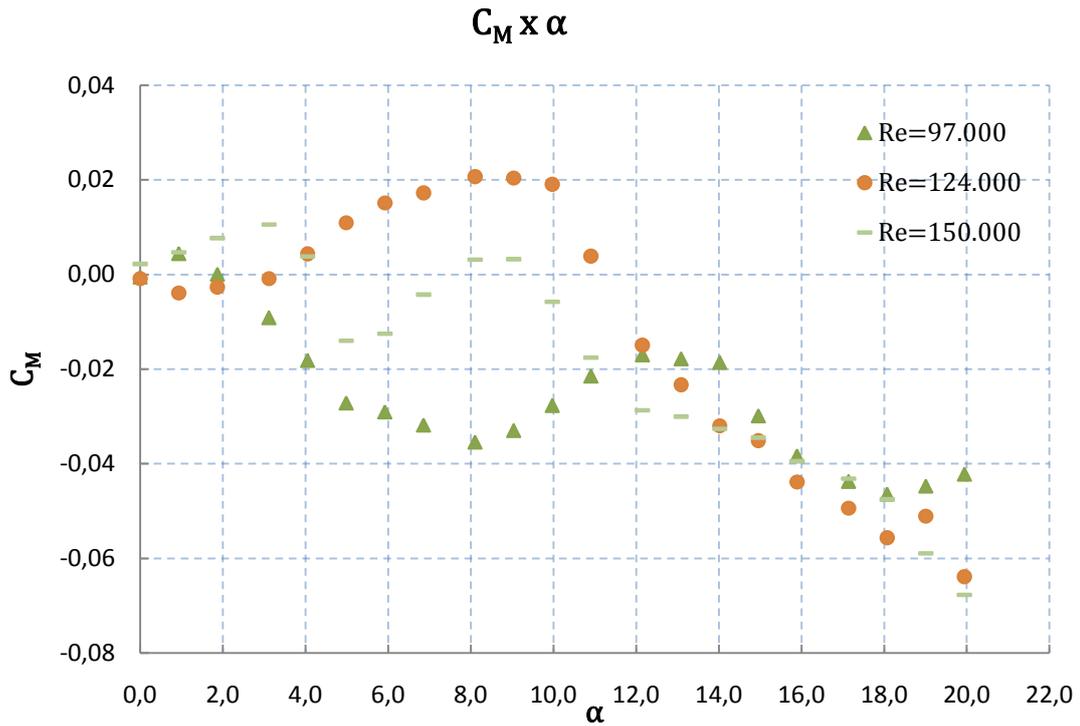


Figura 4-3 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso estático, Re=97.000, 124.000 e 150.000

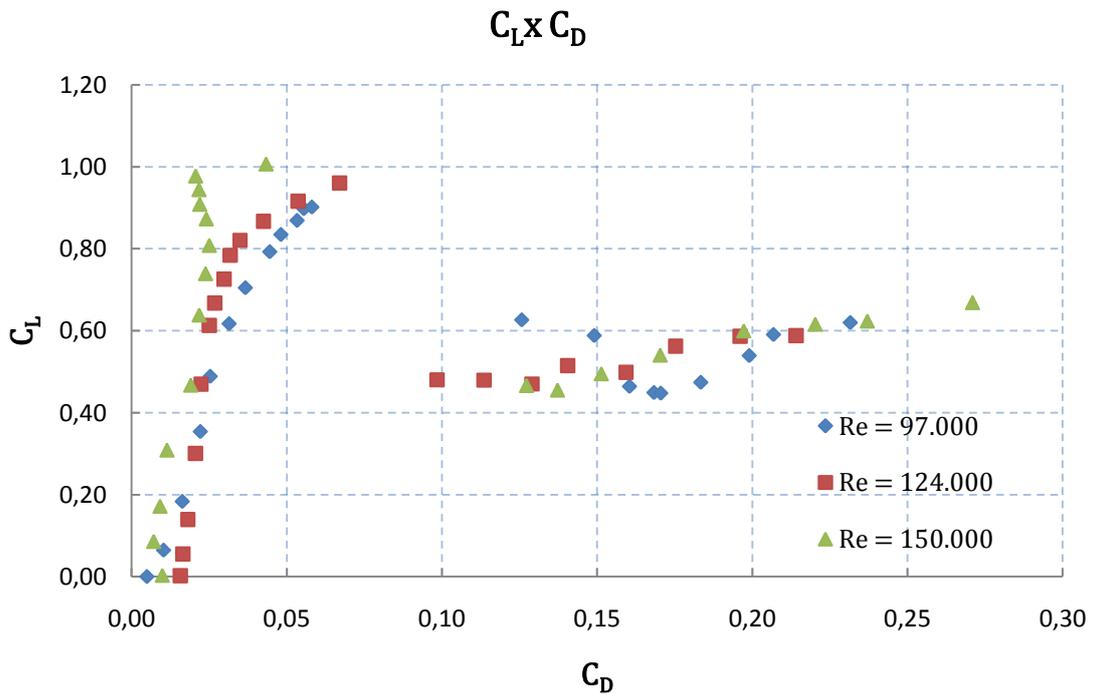


Figura 4-4 - Polar de arrasto, caso estático, Re=97.000, 124.000 e 150.000

Observa-se que o comportamento do  $C_L$  se mostra com pouca variação no que se diz respeito à influência dos números de *Reynolds* pesquisados. Resultado esse já esperado, uma vez observando que os números de *Reynolds* utilizados nos experimentos possuem

a mesma ordem de grandeza. O valor do coeficiente de sustentação máximo para *Reynolds* igual a 97.000 é de 0,90 para 10,9° de ângulo de ataque. Já para *Reynolds* igual a 124.000 e 150.000 observa-se o valor do coeficiente de sustentação máximo em torno de 1,00 para um ângulo de ataque igual a 12,1°.

O comportamento do  $C_D$  mostrou-se semelhante entre os três números de *Reynolds* pesquisados. Já o  $C_M$  apresentou um comportamento distinto entre os números de *Reynolds* pesquisados, no entanto, os valores possuem mesma ordem de grandeza. Observa-se também uma importante flutuação nos valores de  $C_M$  ao longo da variação do ângulo de ataque.

As figuras 4.5 a 4.8 comparam os resultados obtidos no presente trabalho com os resultados de *Timmer* (2008). *Timmer* realizou ensaios para medição de coeficientes aerodinâmicos para o mesmo perfil e número de *Reynolds* do presente trabalho. Esta comparação tem o intuito de validar o presente experimento e a célula de carga desenvolvida.

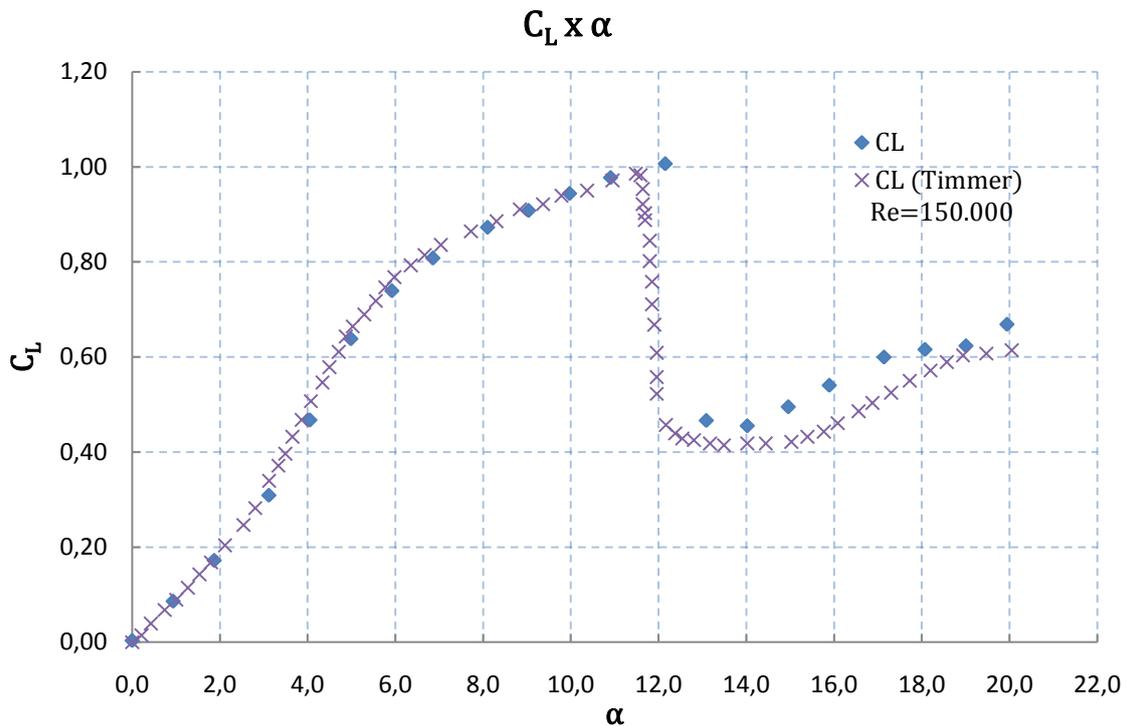


Figura 4-5 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso estático,  $Re=150.000$

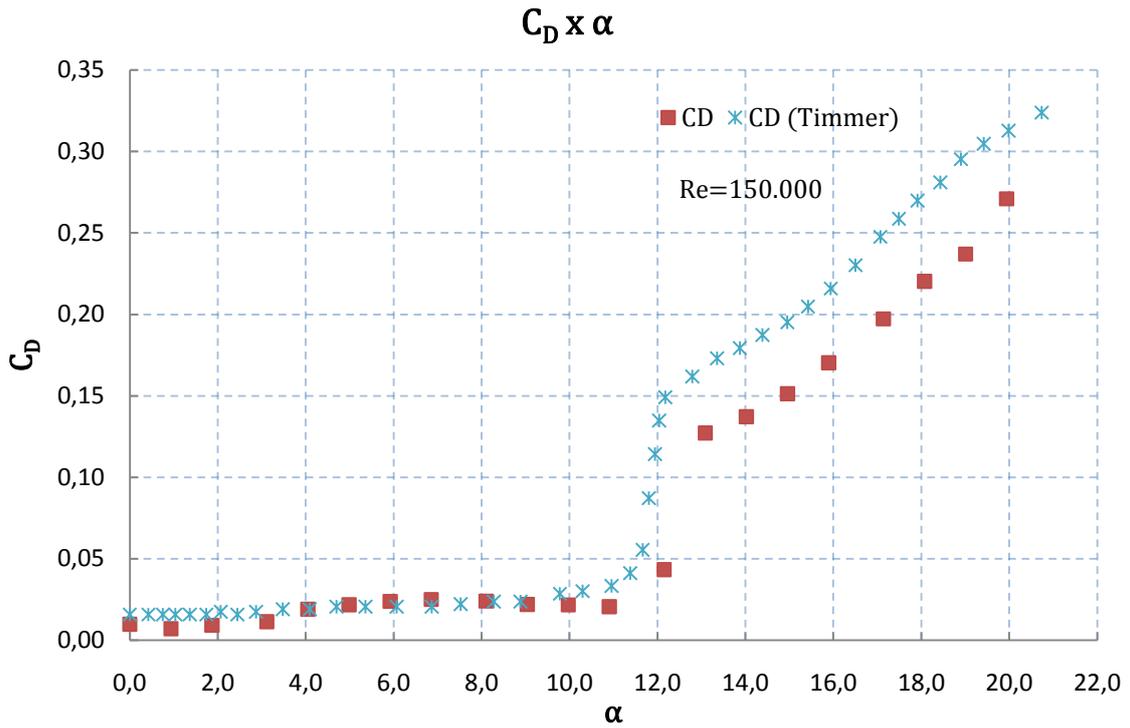


Figura 4-6 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso estático, Re=150.000

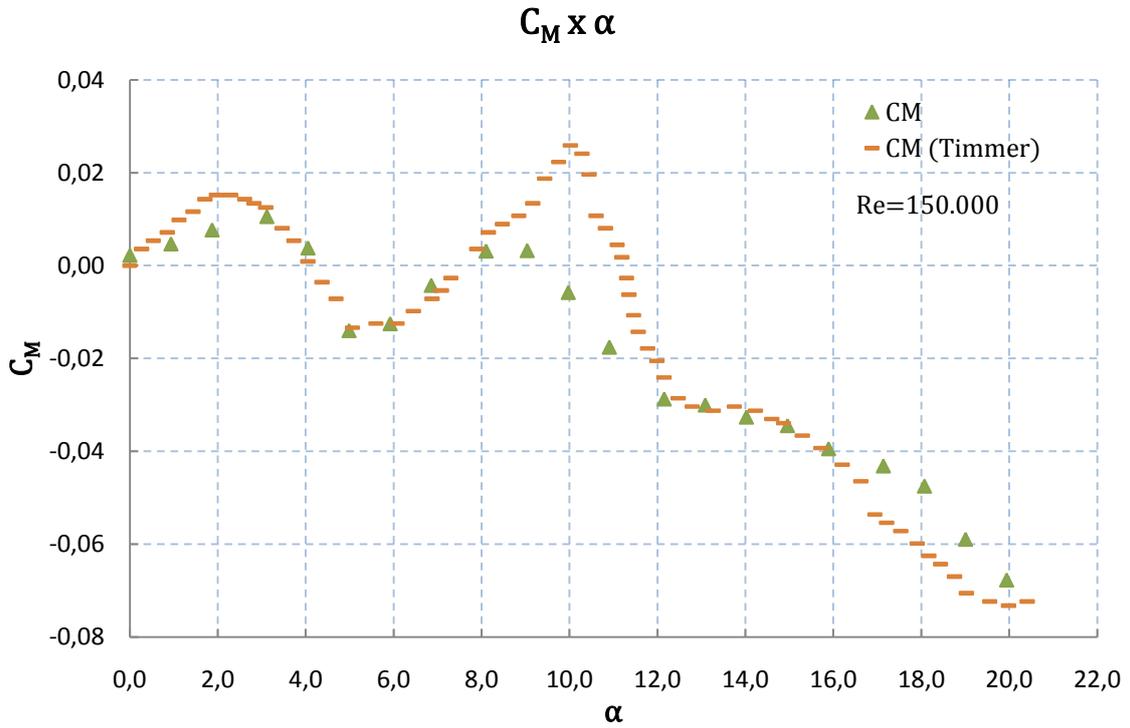


Figura 4-7 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso estático, Re=150.000

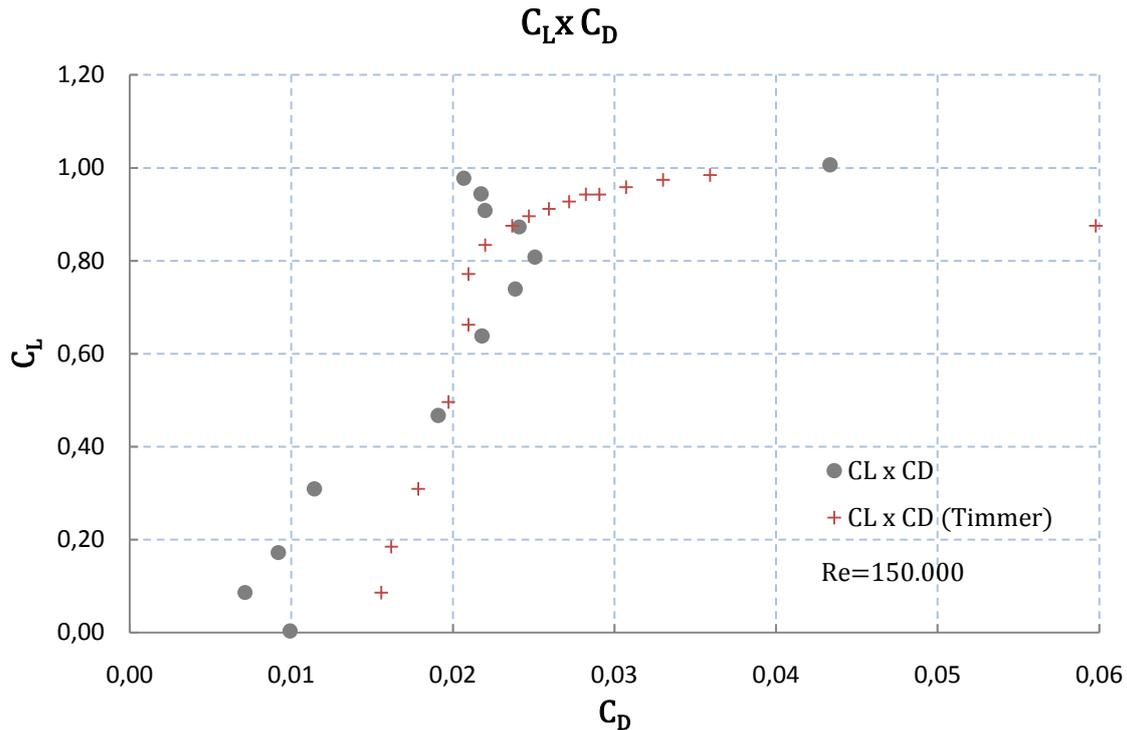
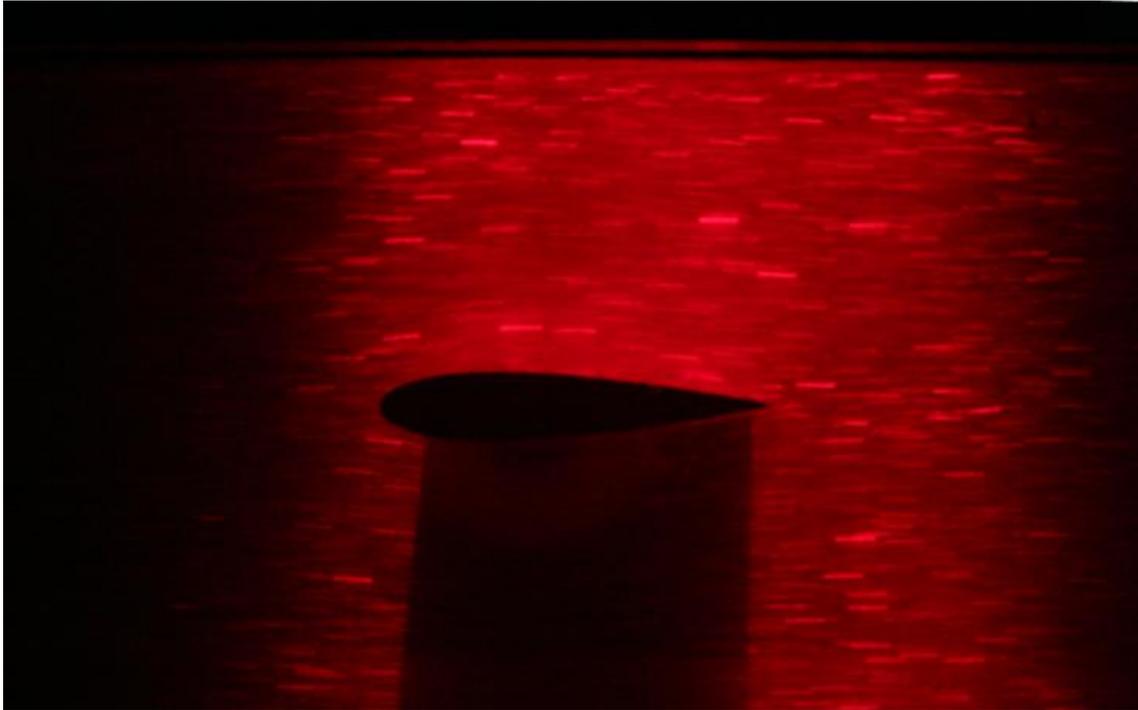


Figura 4-8 - Polar de arrasto, caso estático,  $Re=150.000$

A figura 4.5 mostra os valores de  $C_L$  em função do ângulo de ataque. Os valores apresentam boa compatibilidade entre si no que concerne a valores de coeficiente de sustentação máximo, ângulo de estol e o comportamento da curva pré e pós estol. A figura 4.6 compara os valores de  $C_D$  em função do ângulo de ataque, que mostram também boa compatibilidade principalmente na região pré estol. Existe uma pequena discrepância nos valores após o estol. A figura 4.7 compara os valores de  $C_M$  em função do ângulo de ataque, os quais também mostram boa compatibilidade. Conclui-se então, através destes resultados, o bom funcionamento da célula de carga e da metodologia utilizada para estimar os coeficientes hidrodinâmicos.

## 4.2 IMAGENS DO ENSAIO DE VISUALIZAÇÃO PARA O CASO ESTÁTICO

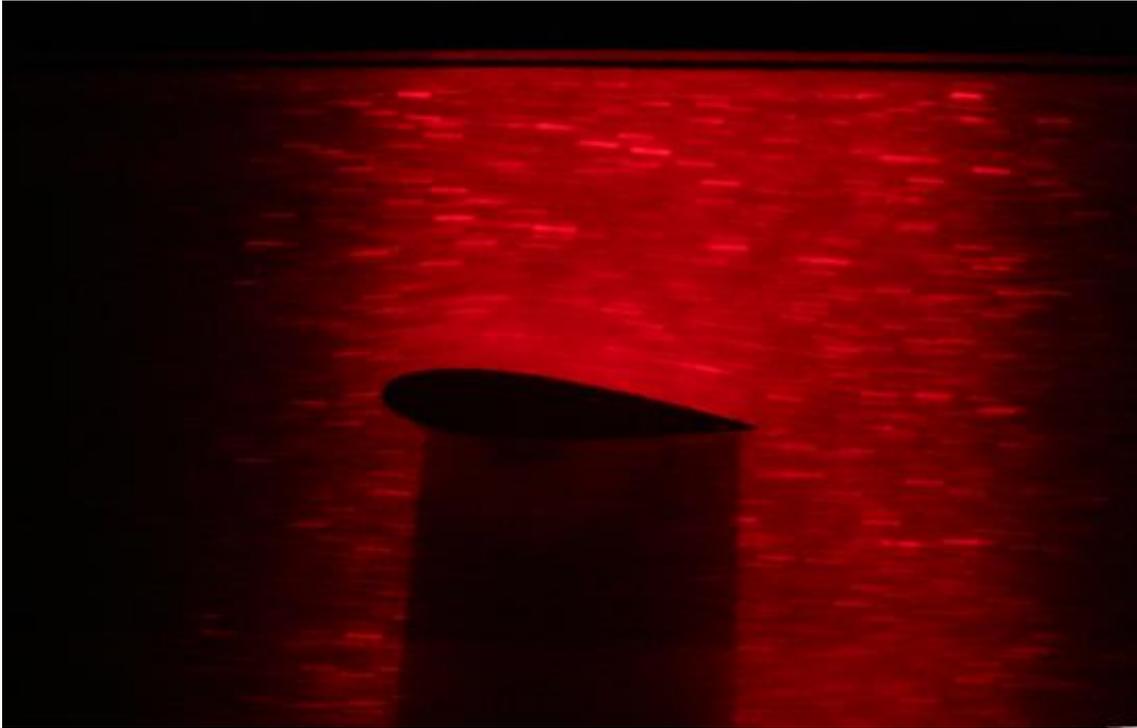
As imagens a seguir foram obtidas nos ensaios de visualização para o caso estático para *Reynolds* igual a 150.000. Os ensaios de visualização do presente trabalho têm como objetivo fazer um estudo qualitativo do escoamento sobre o perfil estudado.



**Figura 4-9 – Visualização do escoamento, caso estático,  $Re=150.000$  e  $\alpha=0^\circ$**

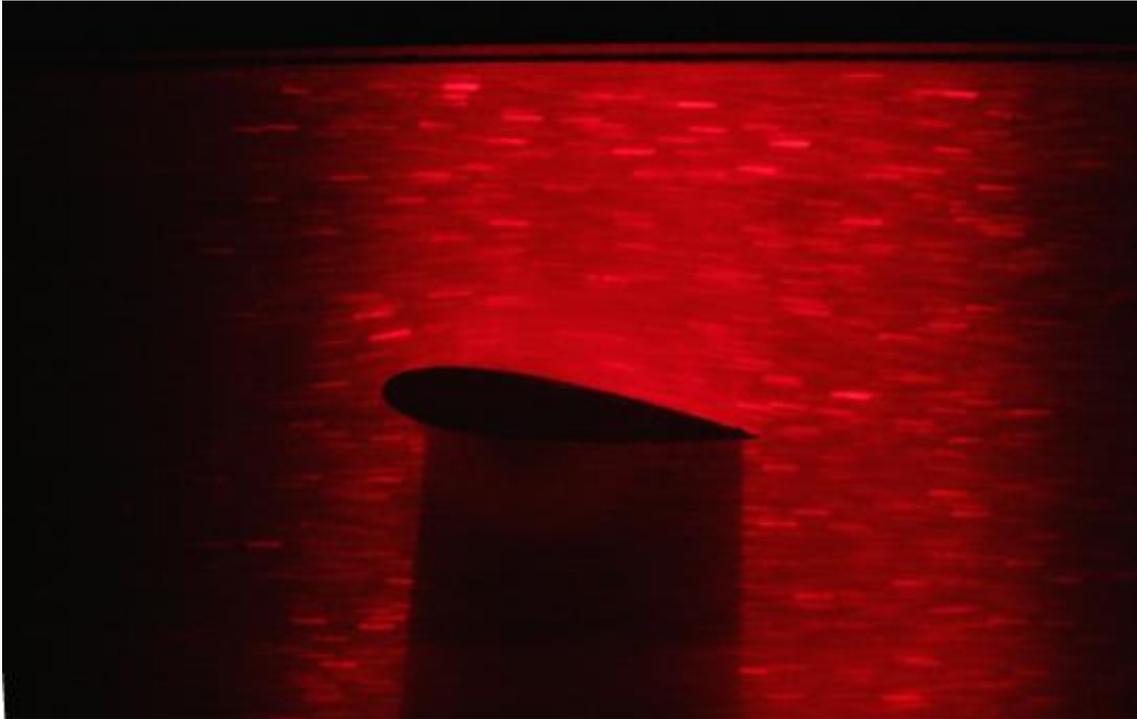
A figura 4.9 mostra o perfil na posição  $0^\circ$  de ângulo de ataque. Observa-se que o escoamento se mostra sem descolamento de camada limite nesta posição angular do perfil conforme esperado.

Nesta posição observa-se que o  $C_L$  é igual a zero conforme esperado para perfis simétricos. O  $C_D$  apresenta um valor praticamente igual a zero nesta posição. O arrasto viscoso é o termo de maior contribuição para o arrasto total nesta posição conforme prevê a literatura [26] e [42]. O  $C_M$  também possui valor praticamente igual a zero para este ângulo de ataque. Os valores dos coeficientes hidrodinâmicos para *Reynolds* igual a 150.000 em função do ângulo de ataque se encontram nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3.



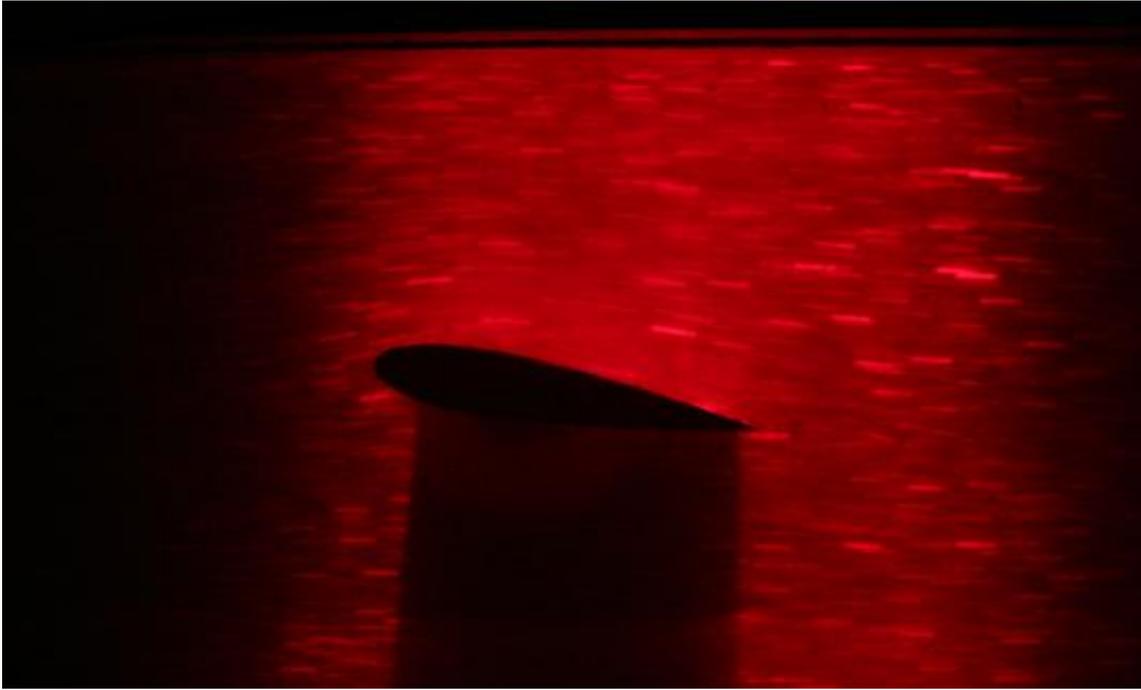
**Figura 4-10 – Visualização do escoamento, caso estático,  $Re=150.000$  e  $\alpha=8,1^\circ$**

A figura 4.10 mostra o perfil na posição  $8,1^\circ$  de ângulo de ataque. Observa-se também que o escoamento não apresenta sinal de deslocamento de camada limite. Nesta posição tem-se  $C_L$  igual a  $0,87$  e  $C_D$  apresenta um valor igual  $0,02$ . O arrasto viscoso ainda é o termo de maior contribuição para o arrasto total para esta posição. O  $C_M$  possui valor praticamente igual a zero para este ângulo de ataque, mas vale ressaltar que entre  $0^\circ$  e  $8,1^\circ$  o comportamento do  $C_M$  apresentou uma flutuação considerável conforme mostra a figura 4.3.



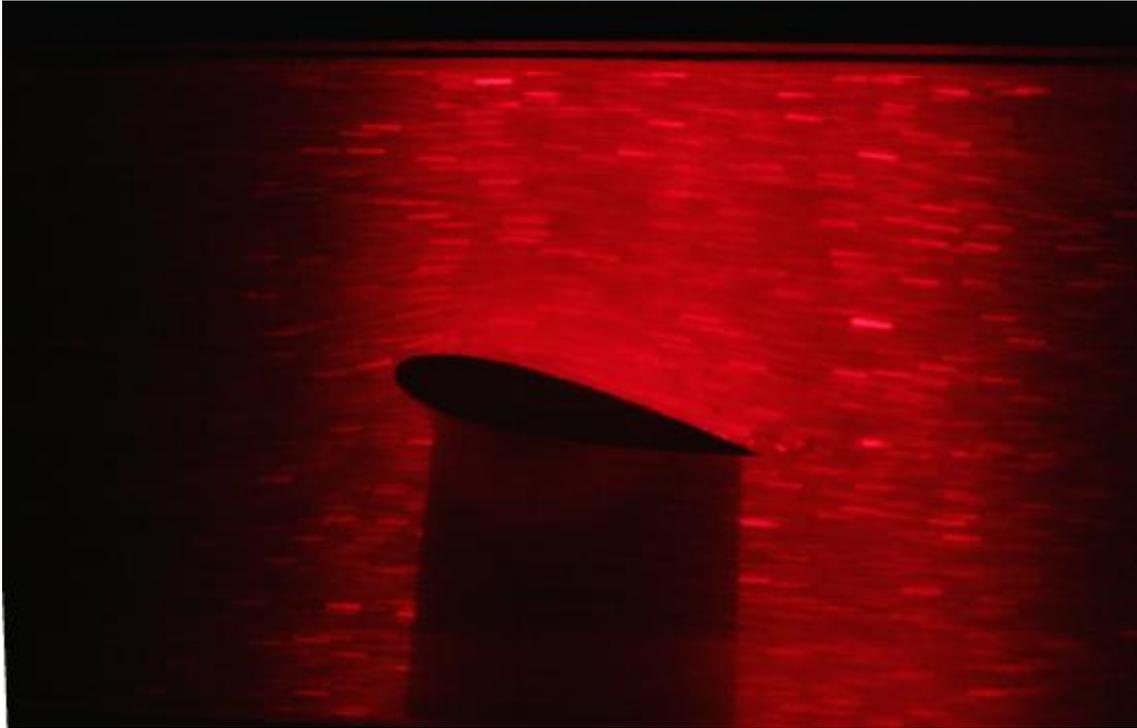
**Figura 4-11 – Visualização do escoamento, caso estático,  $Re=150.000$  e  $\alpha=10,9^\circ$**

A figura 4.11 mostra o perfil na posição  $10,9^\circ$  de ângulo de ataque. Nesta posição tem-se  $C_L$  igual a 0,98 e o  $C_D$  permanece praticamente constante com um valor igual a 0,02. O  $C_M$  possui valor aproximadamente igual a -0,02 para este ângulo de ataque. O padrão de escoamento continua sem descolamento aparente de camada limite para esta posição angular do perfil.



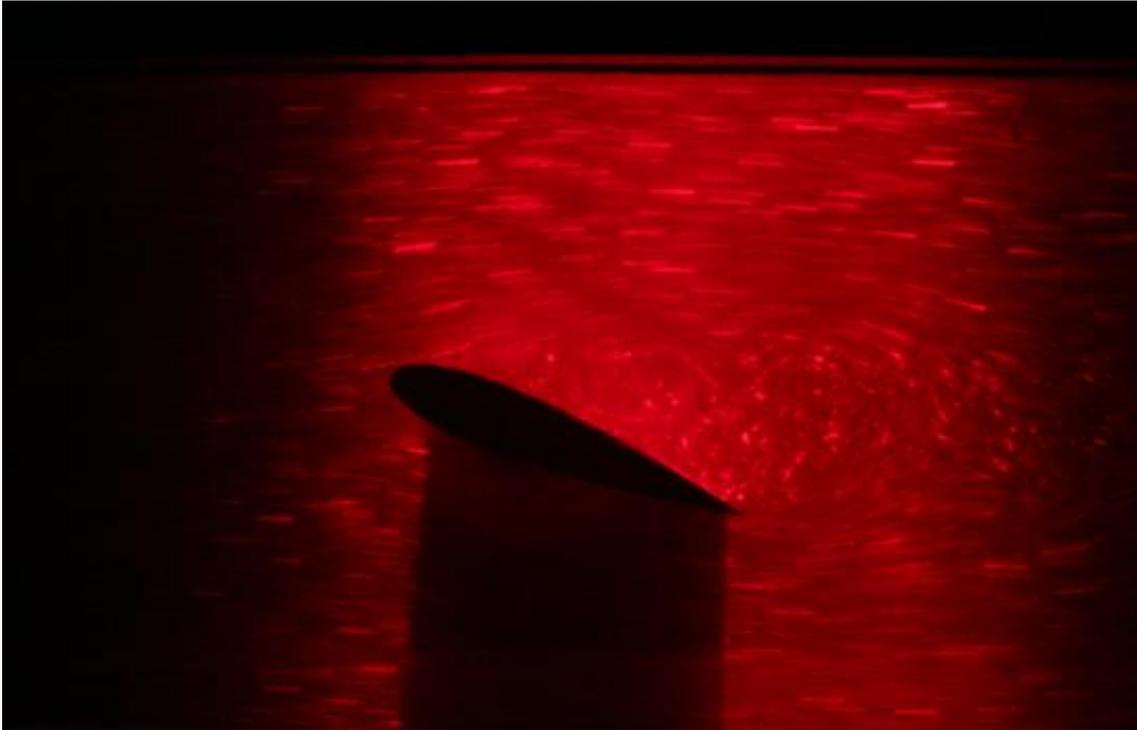
**Figura 4-12 - Visualização do escoamento, caso estático,  $Re=150.000$  e  $\alpha=13,1^\circ$**

A figura 4.13 mostra o perfil na posição  $13,1^\circ$  de ângulo de ataque. Nesta posição tem-se  $C_L$  igual a 0,46 e  $C_D$  igual a 0,13. O  $C_M$  possui valor aproximadamente igual a -0,03 para este ângulo de ataque. Observa-se o aparecimento de uma pequena região de recirculação oriunda do bordo de fuga do perfil, tendo como consequência a perda de sustentação e aumento considerável do arrasto.



**Figura 4-13 – Visualização do escoamento, caso estático,  $Re=150.000$  e  $\alpha=15,9^\circ$**

A figura 4.13 mostra o perfil na posição  $15,9^\circ$  de ângulo de ataque. Nesta posição tem-se  $C_L$  igual a 0,54 e  $C_D$  igual a 0,17. O  $C_M$  possui valor aproximadamente igual a -0,02 para este ângulo de ataque. Observa-se o aumento da região de recirculação oriunda no bordo de fuga do perfil. Neste ponto percebeu-se uma considerável variação temporal nos valores dos coeficientes hidrodinâmicos.



**Figura 4-14 - Visualização do escoamento, caso estático,  $Re=150.000$  e  $\alpha=19,8^\circ$**

A figura 4.14 mostra o perfil na posição  $19,9^\circ$  de ângulo de ataque. Nesta posição tem-se  $C_L$  igual a 0,67 e  $C_D$  igual a 0,27. O  $C_M$  possui valor aproximadamente igual a -0,07 para este ângulo de ataque. Observa-se o aparecimento de uma nítida região de recirculação oriunda, desta vez, do bordo de ataque do perfil. Nesta condição, observou-se grande variação temporal nos valores dos coeficientes hidrodinâmicos. O aumento do  $C_D$  é devido em maior parte, agora, pela grande contribuição do termo de arrasto de forma.

### **4.3 CURVAS DE COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS PARA O CASO DINÂMICO**

As figuras 4.15 a 4.18 evidenciam a influência do número de *Reynolds* nos coeficientes hidrodinâmicos nos casos dinâmicos.

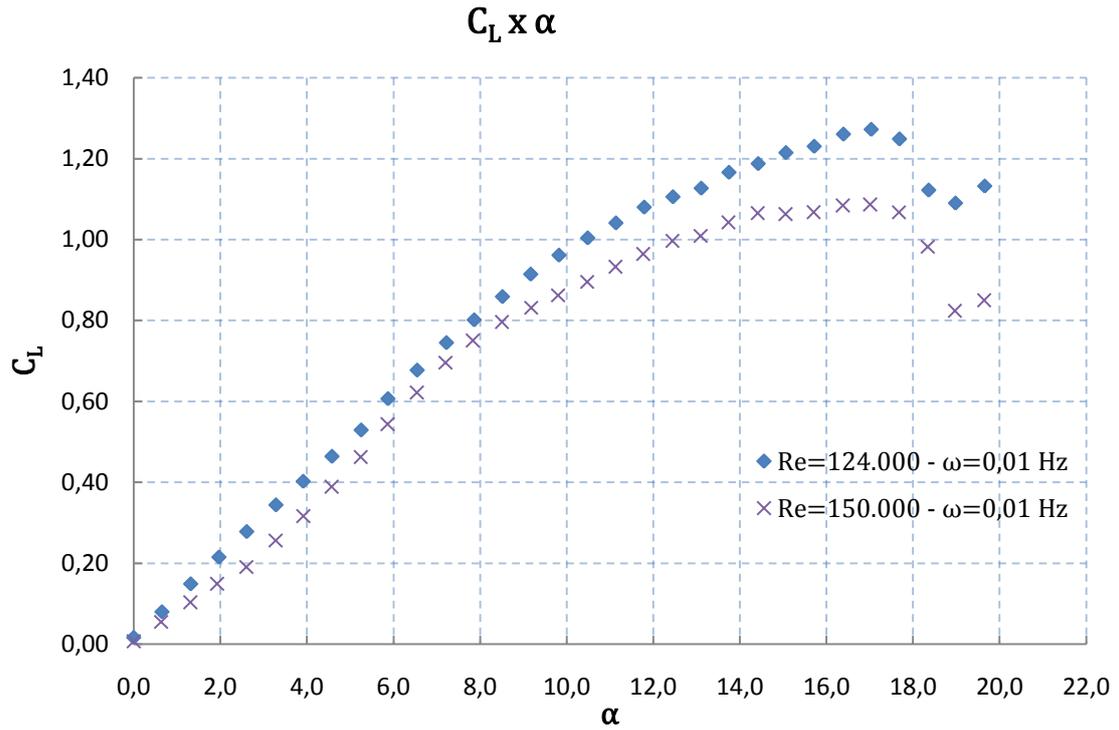


Figura 4-15 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,06$  rad/s

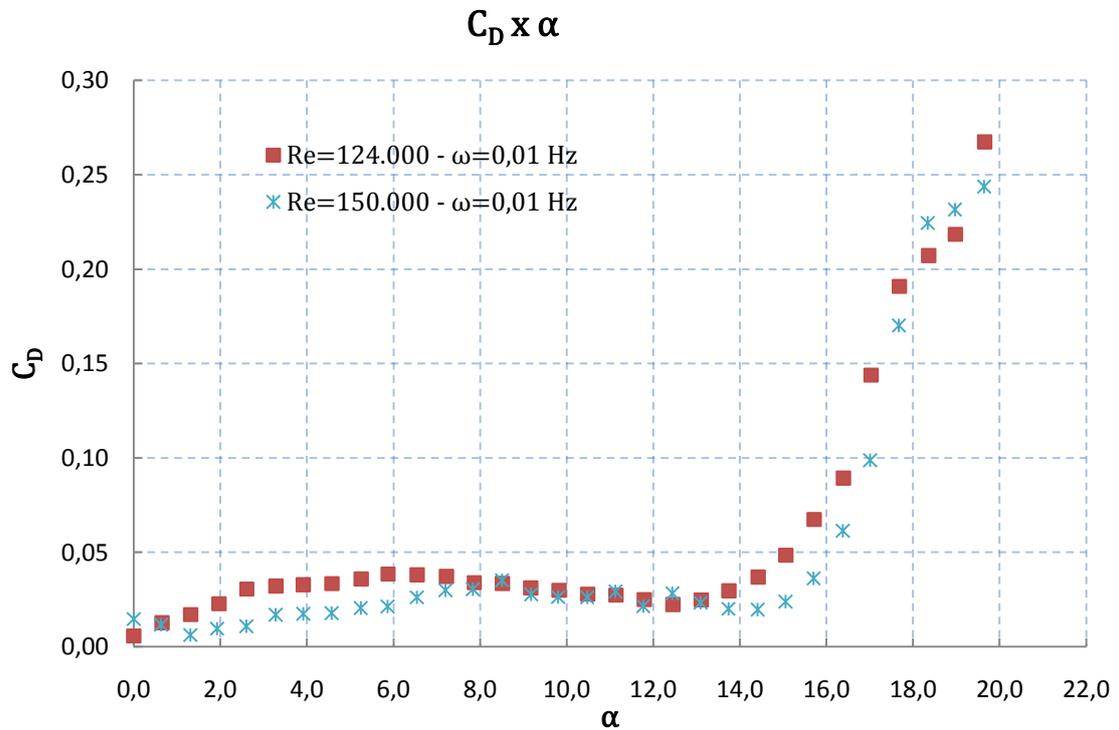


Figura 4-16 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,06$  rad/s

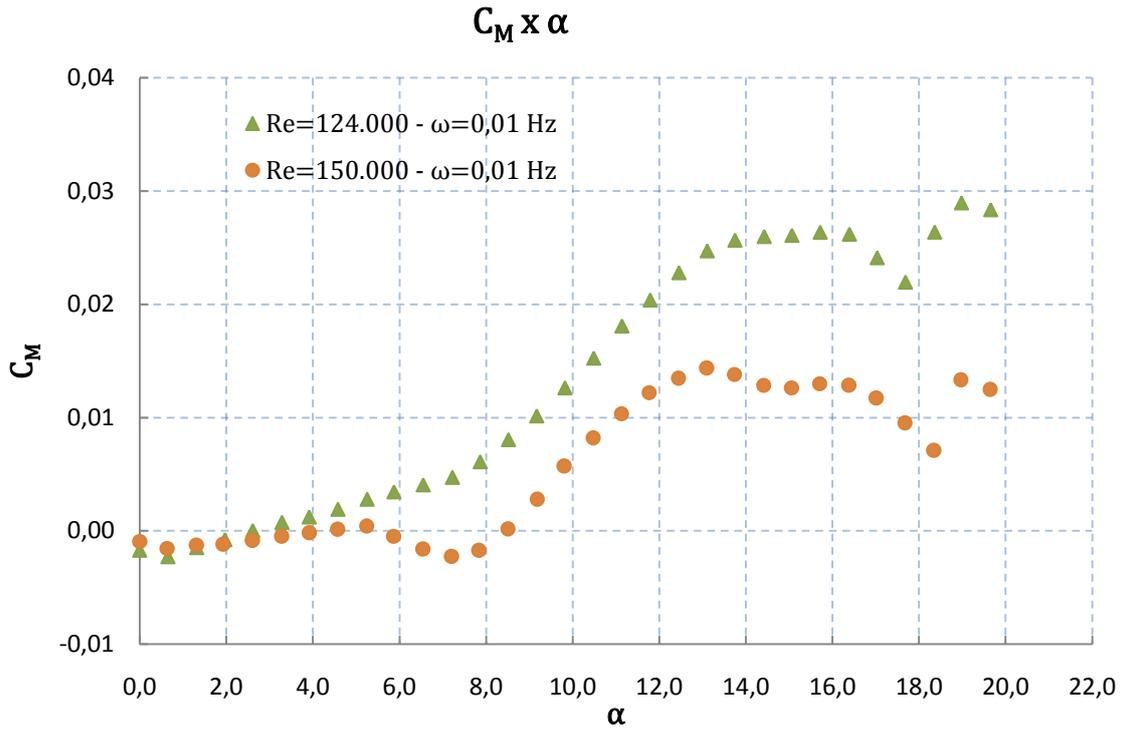


Figura 4-17 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,06$  rad/s

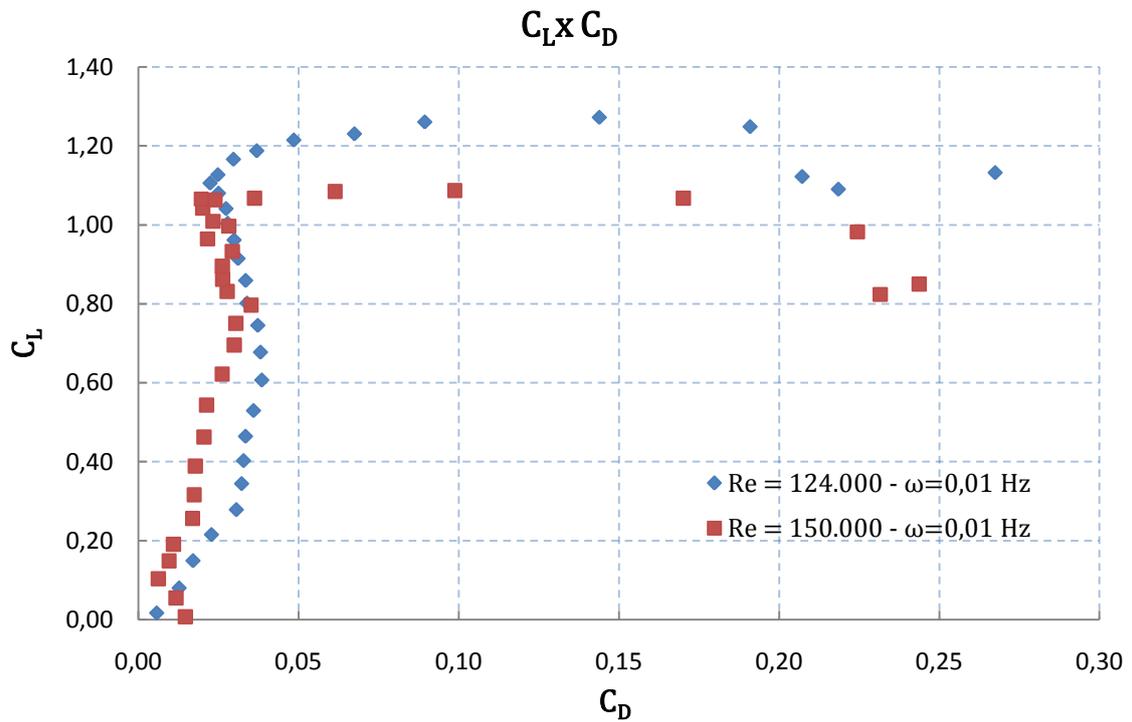


Figura 4-18 – Polar de arrasto, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,06$  rad/s

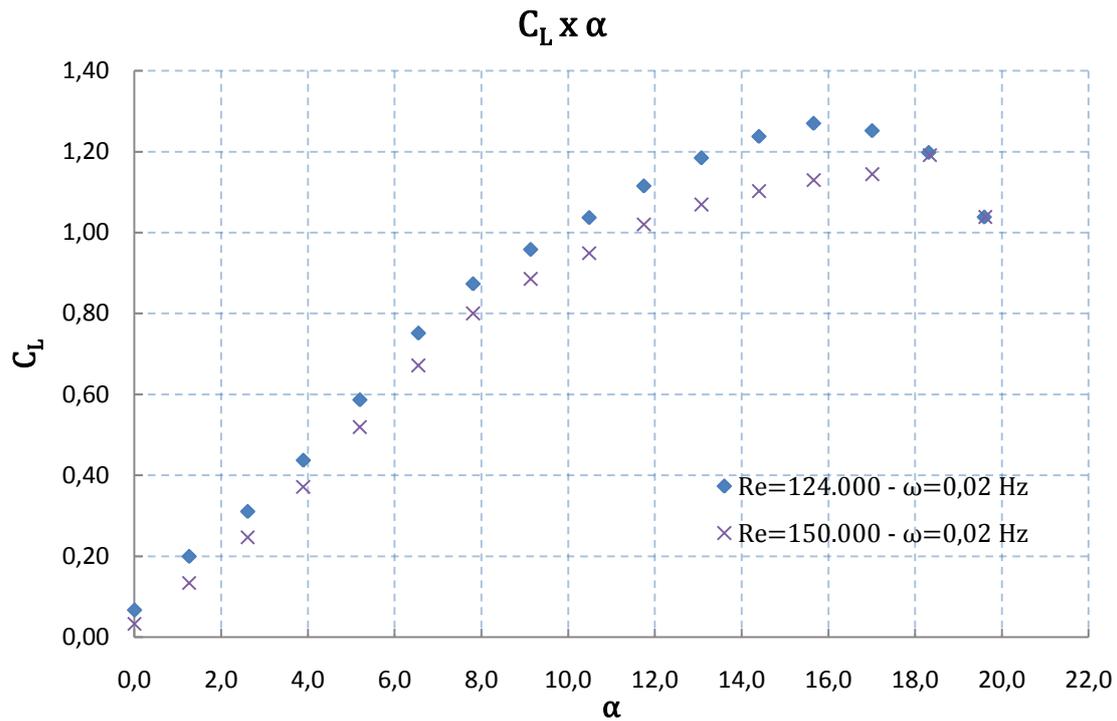


Figura 4-19 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,13$  rad/s

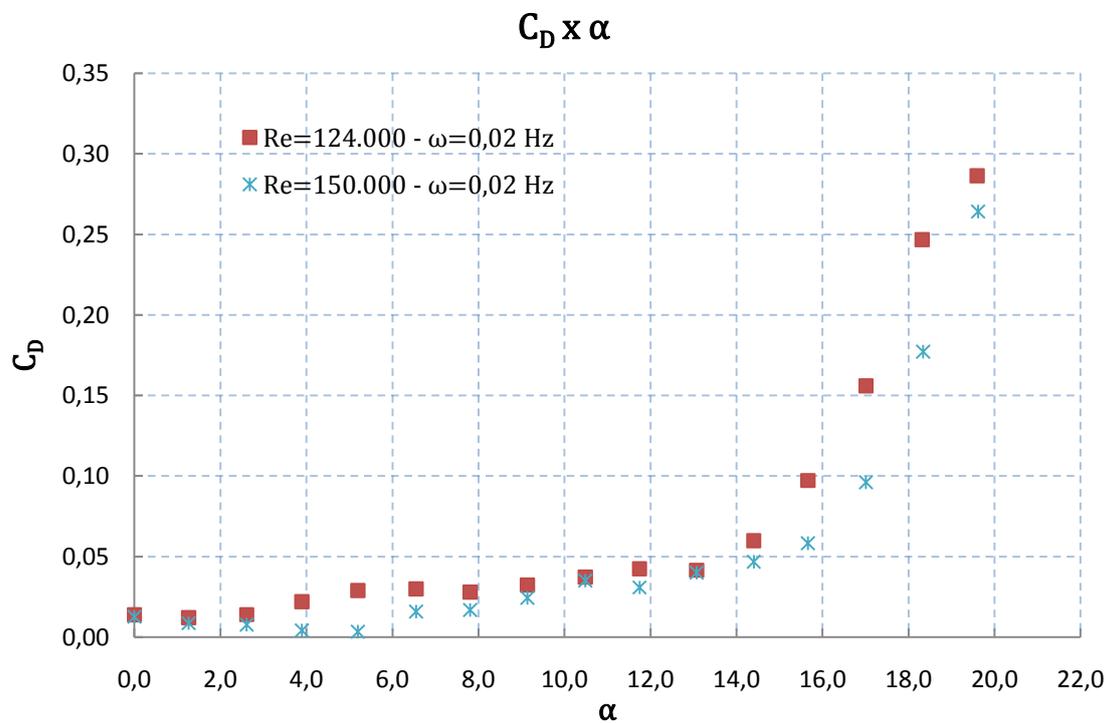


Figura 4-20 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,13$  rad/s

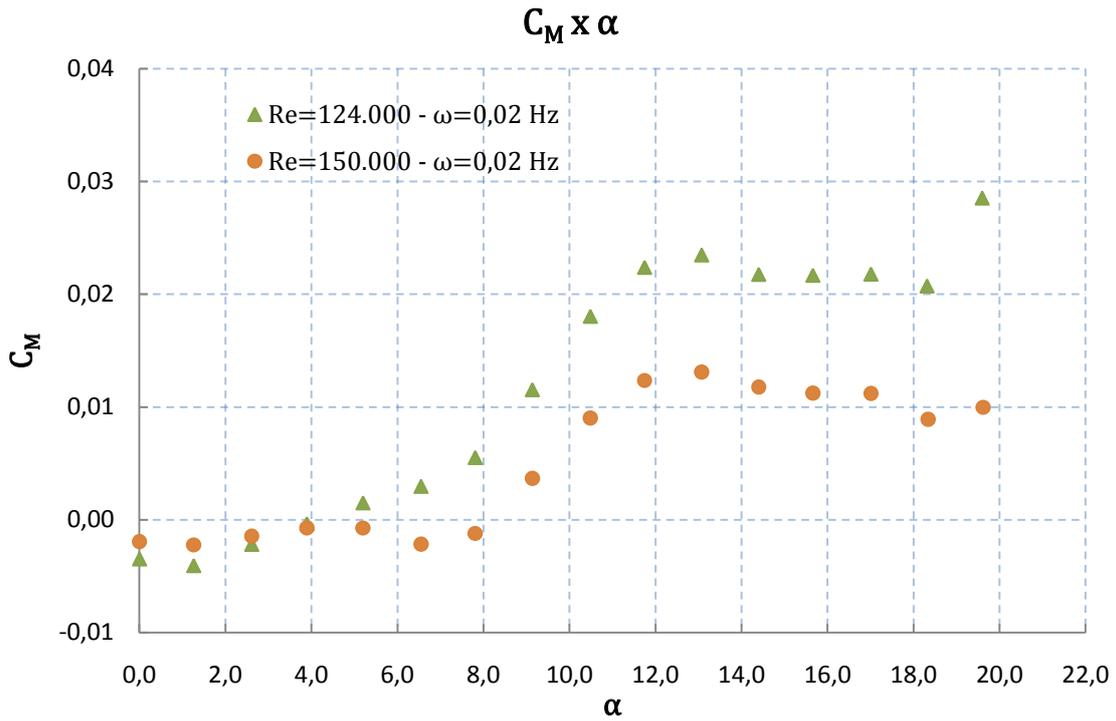


Figura 4-21 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,13$  rad/s

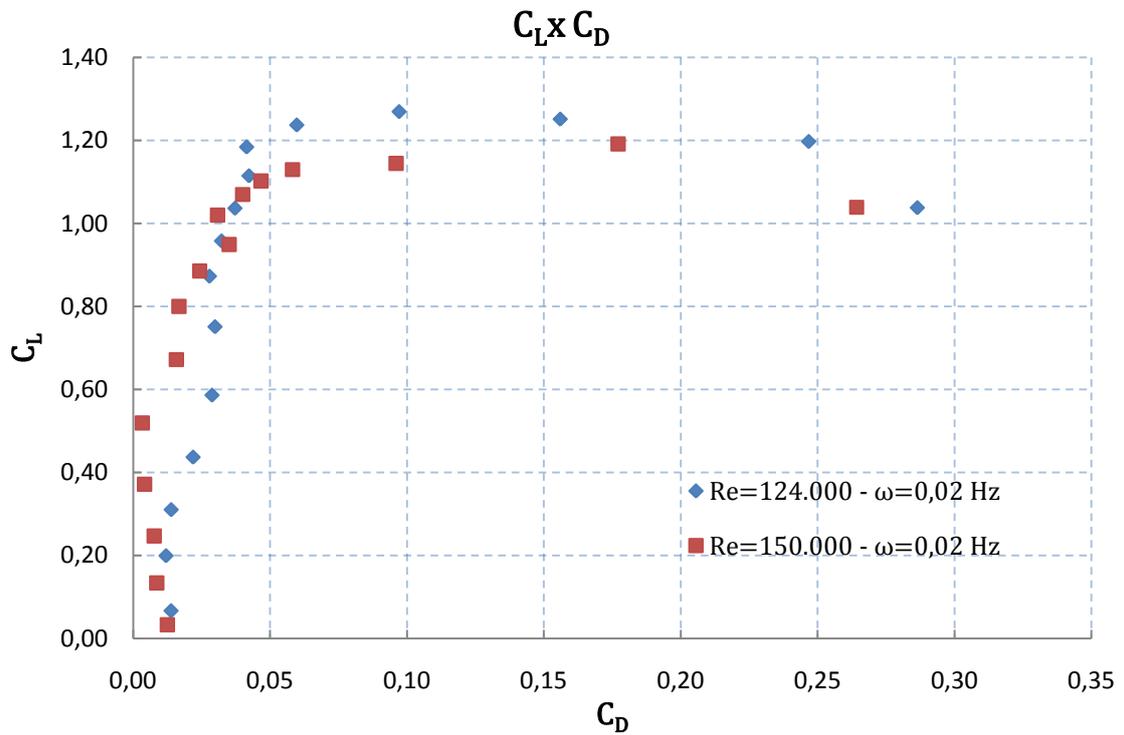


Figura 4-22 - Polar de arrasto, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,13$  rad/s

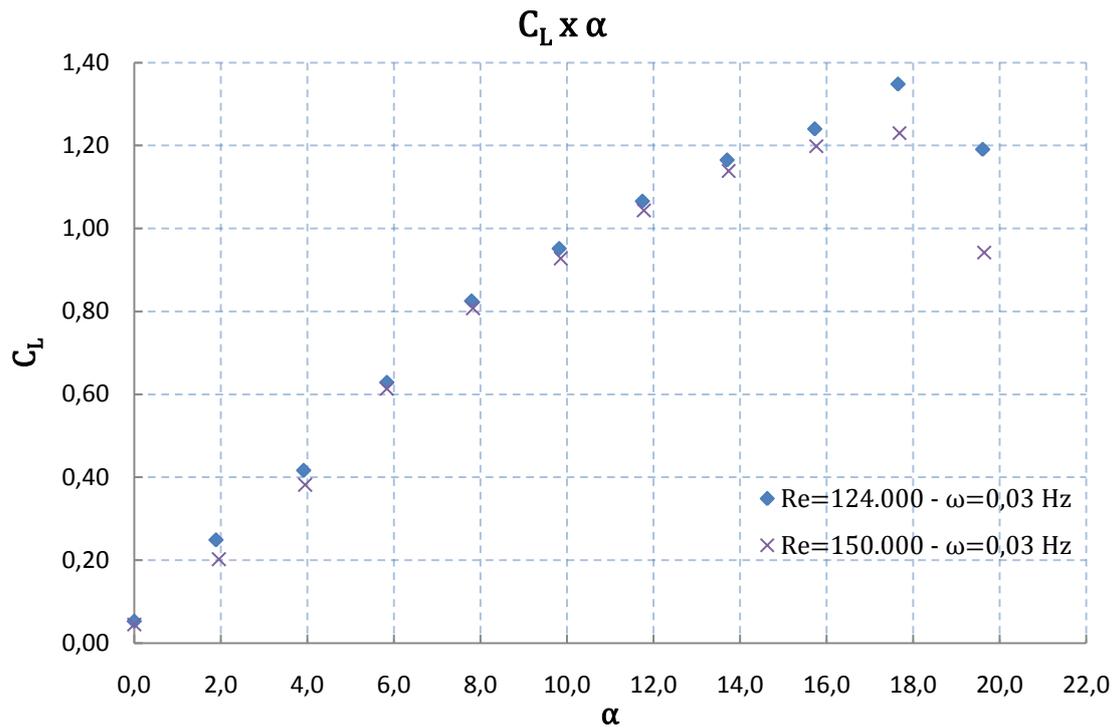


Figura 4-23 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,19$  rad/s

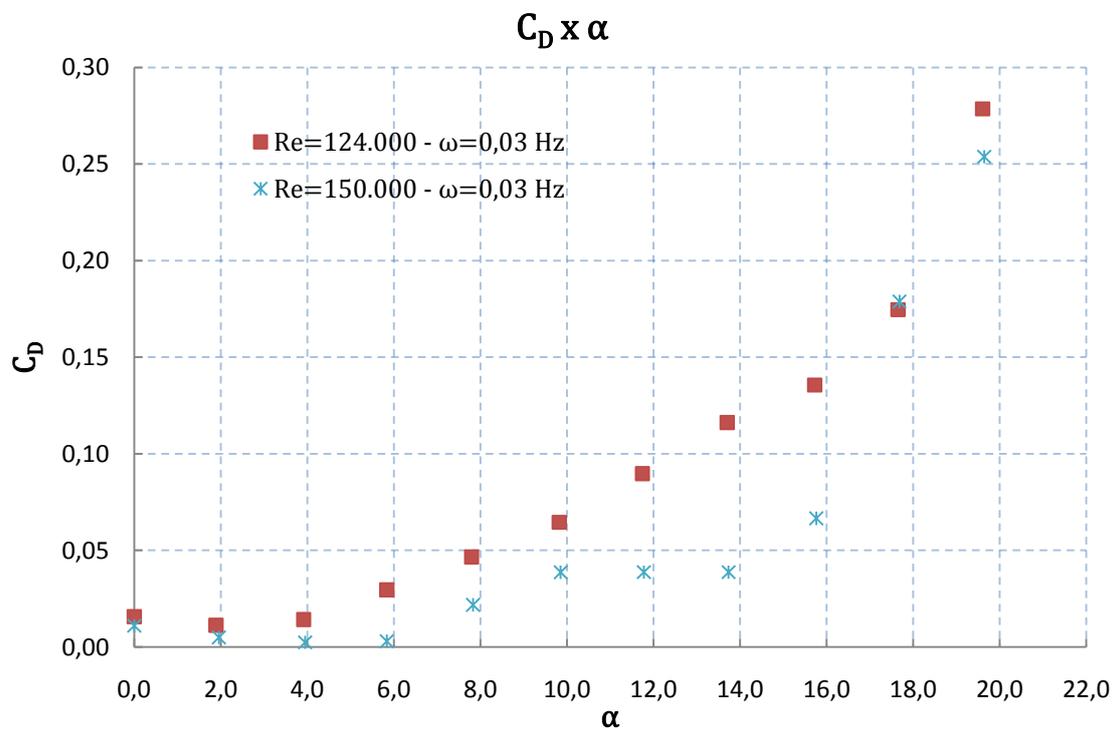


Figura 4-24 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,19$  rad/s

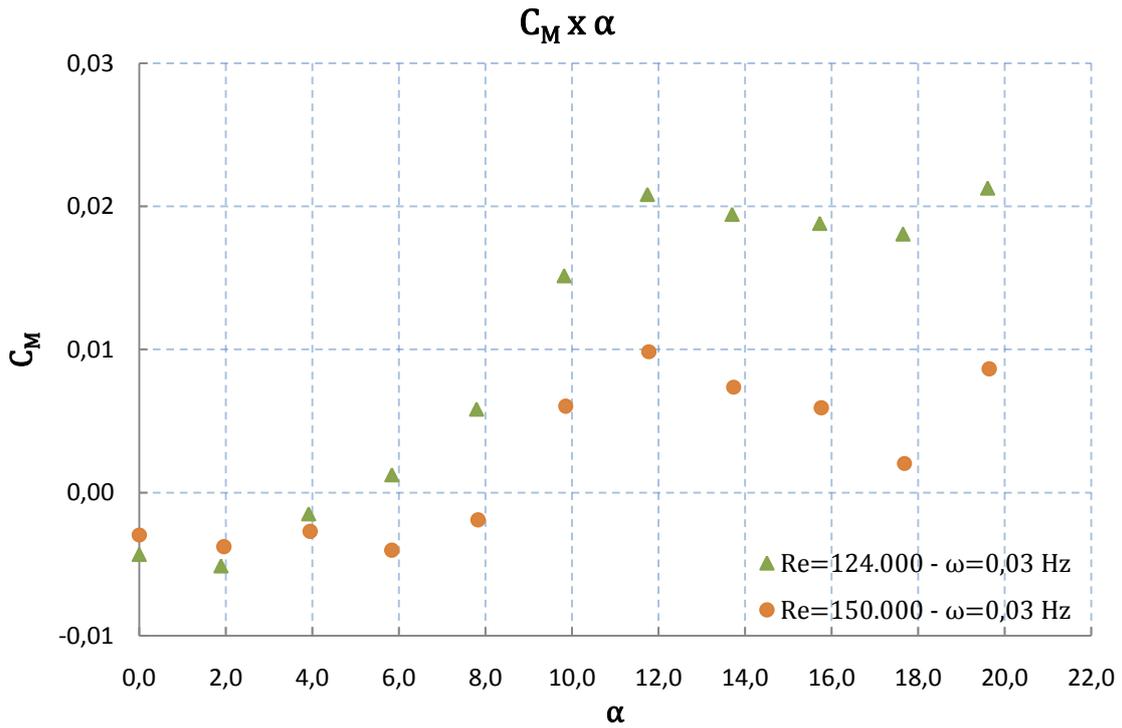


Figura 4-25 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,19$  rad/s

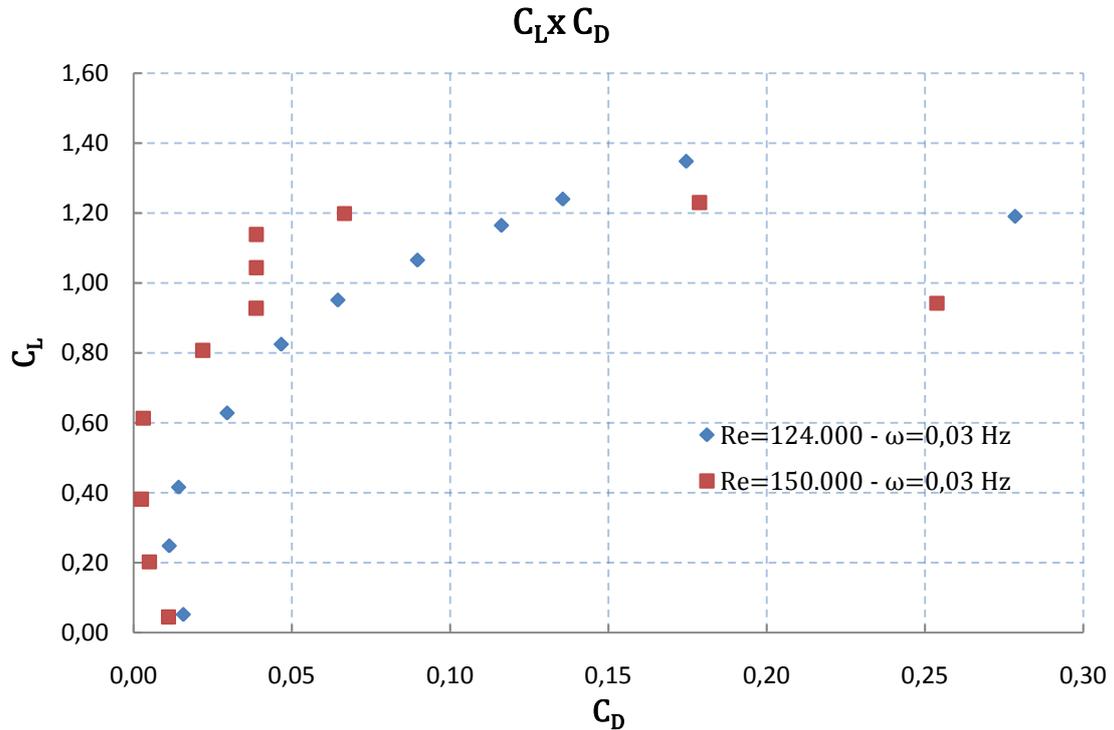


Figura 4-26 - Polar de arrasto, caso dinâmico, Re=124.000 e 150.000,  $\omega=0,19$  rad/s

As figuras 4.15, 4.19 e 4.23 mostram o  $C_L$  em função do ângulo de ataque para velocidade angular do perfil de 0,06, 0,13 e 0,19 rad/s respectivamente para dois números de *Reynolds* iguais a 124.000 e 150.000. O valor do coeficiente de sustentação

máximo no caso dinâmico é igual a 1,35 para *Reynolds* igual a 124.000 e velocidade angular do perfil igual a 0,19 rad/s para 17,6° de ângulo de ataque (figura 4.23).

O comportamento do  $C_D$  no caso dinâmico é mostrado nas figuras 4.16, 4.20 e 4.24. O  $C_M$  também apresentou um comportamento flutuante ao longo da variação do ângulo de ataque do perfil e predominantemente positivo nestes casos.

Observa-se que o comportamento dos coeficientes hidrodinâmicos nos casos dinâmicos mostrou-se tão sensível quanto ao caso estático em relação à influência da variação do número de *Reynolds*.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS ENTRE OS CASOS DINÂMICOS E O CASO ESTÁTICO

Os gráficos a seguir comparam os resultados dos ensaios estáticos com os ensaios dinâmicos e a influência da velocidade angular nos coeficientes hidrodinâmicos para um mesmo número de *Reynolds*.

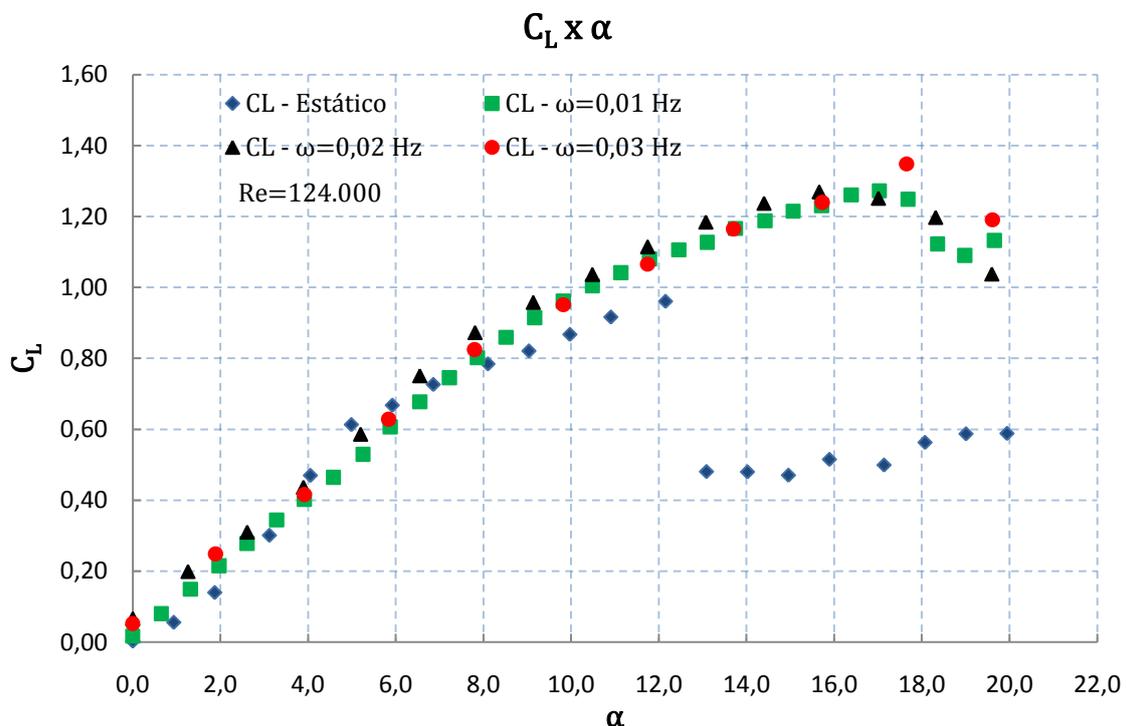


Figura 4-27 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico,  $Re=124.000$ ,  $\omega=0,06$ ,  $0,13$  e  $0,19$  rad/s

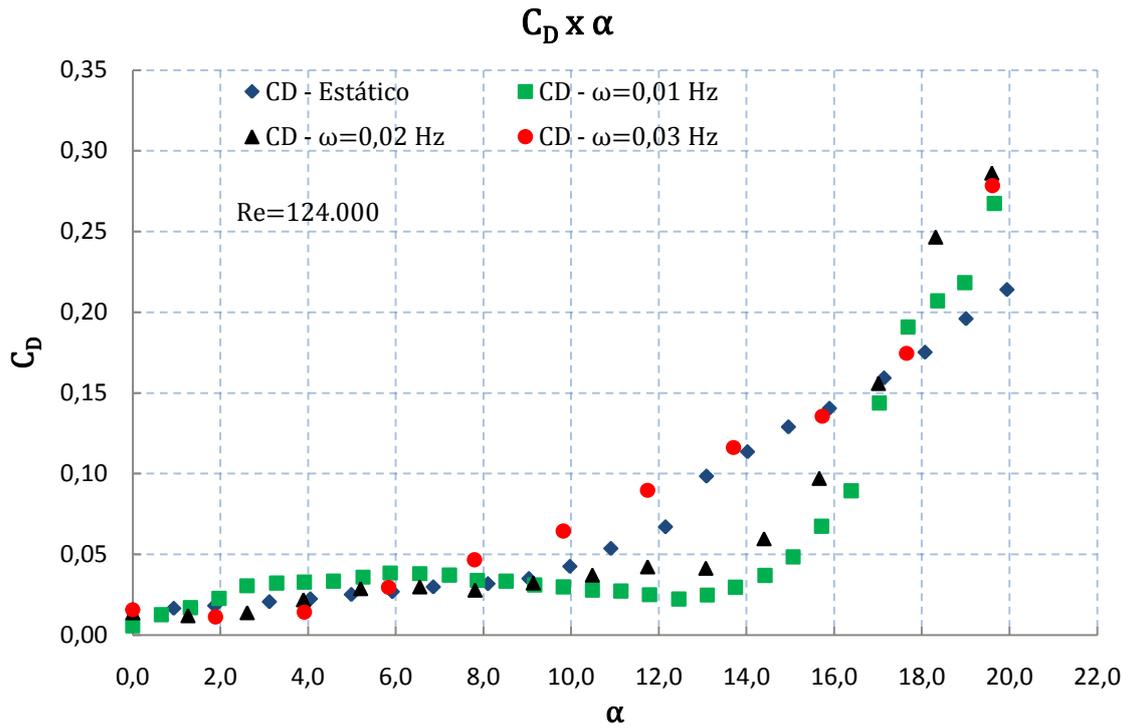


Figura 4-28 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico,  $Re=124.000$ ,  $\omega=0,06, 0,13$  e  $0,19$  rad/s

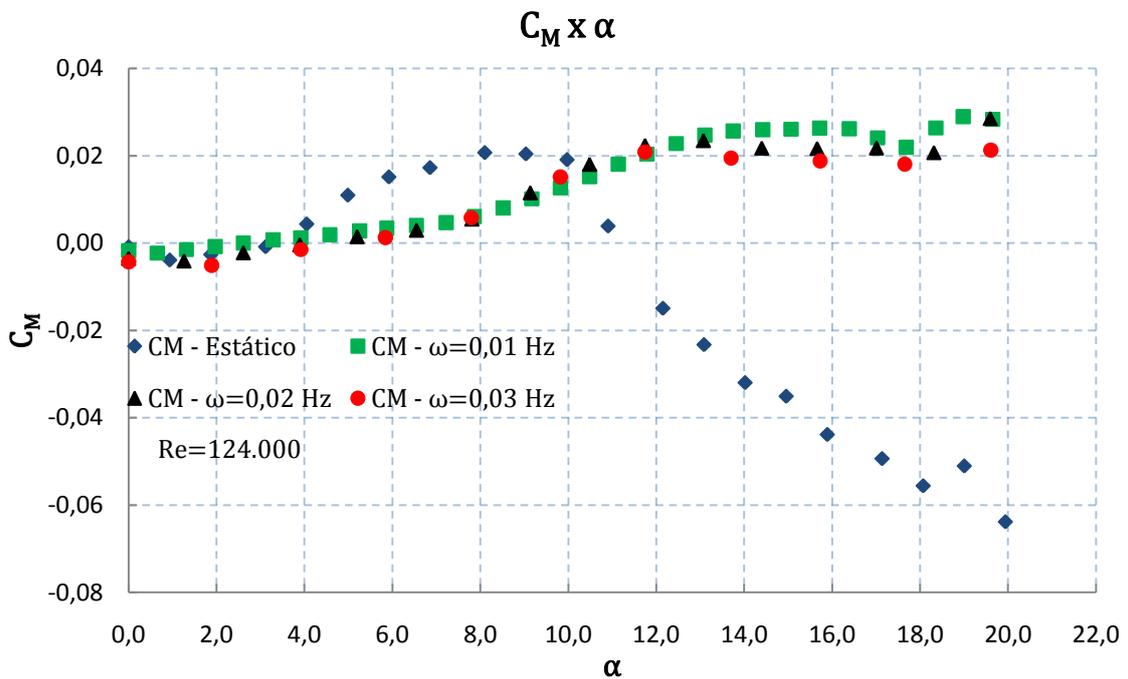


Figura 4-29 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico,  $Re=124.000$ ,  $\omega=0,06, 0,13$  e  $0,19$  rad/s

As figuras 4.27 a 4.29 mostram os coeficientes hidrodinâmicos para os casos estático e dinâmico para *Reynolds* igual a 124.000 e também evidenciam a influência da velocidade angular do perfil nos coeficientes hidrodinâmicos. Observa-se pouca

influência entre os casos dinâmicos nas velocidades angulares pesquisadas. Mas observa-se uma nítida diferença entre o caso estático e os casos dinâmicos. A figura 4.27 mostra o comportamento do  $C_L$  em função do ângulo de ataque. Fica evidente o atraso do estol nos casos dinâmicos em comparação ao estático e também o aumento do valor do coeficiente de sustentação máximo entre 25% e 35%. Percebe-se também um comportamento mais linear do  $C_L$  no pré-estol no caso dinâmico do que no caso estático.

A figura 4.28 mostra o  $C_D$  em função do ângulo de ataque e também se evidencia o atraso do estol nos casos dinâmicos em relação ao caso estático. A figura 4.29 mostra o  $C_M$  em função do ângulo de ataque e observa-se que a flutuação nos valores tem maior amplitude e frequência no caso estático em comparação aos casos dinâmicos.

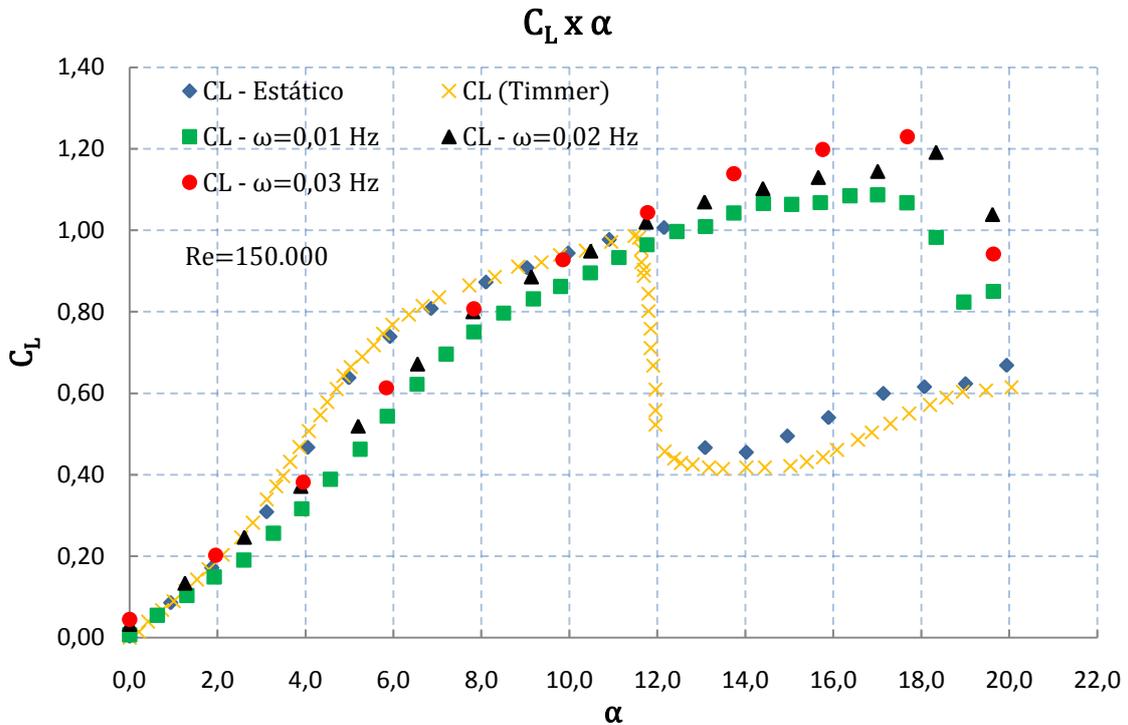


Figura 4-30 - Coeficiente de sustentação x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$ ,  $0,13$  e  $0,19$  rad/s

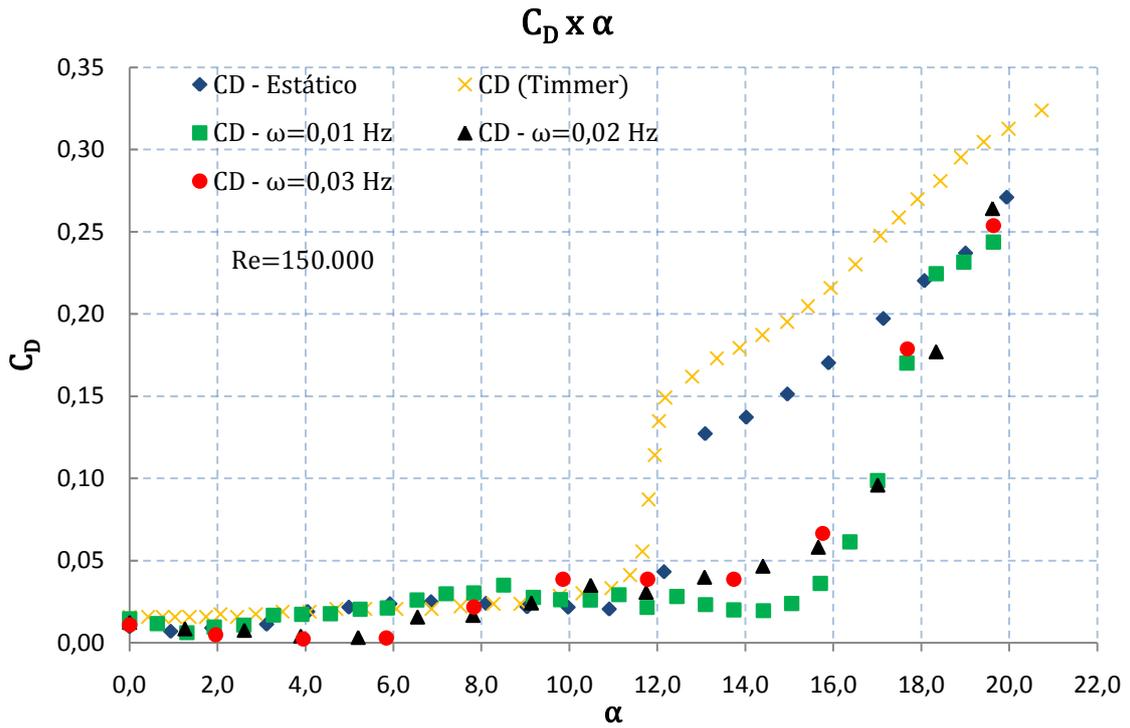


Figura 4-31 - Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06, 0,13$  e  $0,19$  rad/s

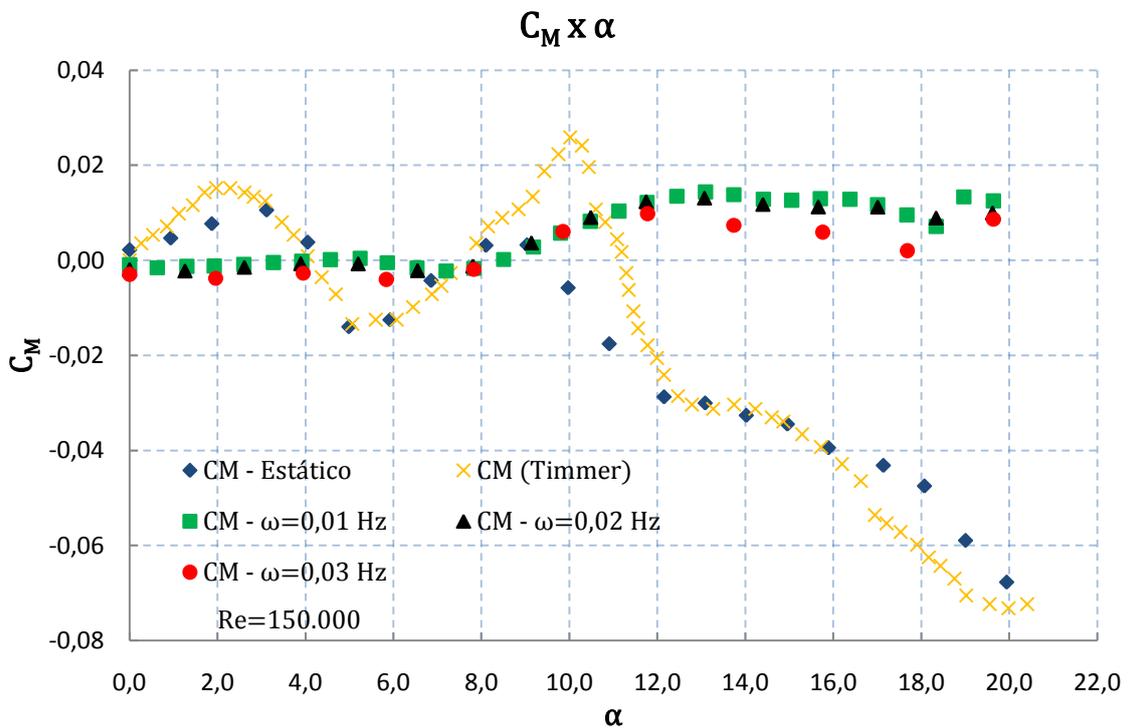


Figura 4-32 - Coeficiente de momento x ângulo de ataque, casos estático e dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06, 0,13$  e  $0,19$  rad/s

As figuras 4.30 a 4.32 mostram os coeficientes hidrodinâmicos para os casos estático e dinâmico para *Reynolds* igual a 150.000. Observa-se que a influência da velocidade angular nos casos dinâmicos para este número de *Reynolds* é ligeiramente mais nítida do que para *Reynolds* igual a 124.000. Observa-se também uma nítida diferença entre o caso estático e os casos dinâmicos. A figura 4.30 mostra o comportamento do  $C_L$  em função do ângulo de ataque. Fica evidente o atraso do estol nos casos dinâmicos em comparação ao estático e também o aumento do valor do coeficiente de sustentação máximo entre 7% e 22%.

A figura 4.31 mostra o  $C_D$  em função do ângulo de ataque e também fica evidente o atraso do estol nos casos dinâmicos em relação ao caso estático. E observa-se também a pouca influência das velocidades angulares pesquisadas na variação do  $C_D$ . A figura 4.32 mostra o  $C_M$  em função do ângulo de ataque e observa-se que a flutuação nos valores tem maior amplitude e frequência no caso estático em comparação aos casos dinâmicos. Observa-se que os valores de  $C_M$  no caso dinâmico possuem comportamento quase constante ao contrário dos valores do caso que estático que, após o ângulo de estol, apresentam valores negativos.

#### **4.5 IMAGENS DO ENSAIO DE VISUALIZAÇÃO PARA O CASO DINÂMICO**

As imagens a seguir (figuras 4.33 a 4.38) foram obtidas nos ensaios de visualização para o caso dinâmico para *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,06 rad/s.



Figura 4-33 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$  rad/s e  $\alpha=0^\circ$



Figura 4-34 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$  rad/s e  $\alpha=5^\circ$



**Figura 4-35 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$  rad/s e  $\alpha=10^\circ$**



**Figura 4-36 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$  rad/s e  $\alpha=14^\circ$**

As figuras 4.33 a 4.36 mostram o perfil nas posições  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $14^\circ$  de ângulo de ataque, respectivamente. Pelas imagens, o escoamento se mostra sem descolamento aparente de camada limite. Vale ressaltar que, a  $13,1^\circ$  de ângulo de ataque no caso estático, já se observa um pequeno descolamento da camada limite enquanto que no caso dinâmico ainda não se observa descolamento a  $14^\circ$  de ângulo de ataque. Os valores

de  $C_L$  para as posições  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $14^\circ$  de ângulo de ataque valem respectivamente 0,00, 0,40, 0,87 e 1,17. O  $C_D$  continua praticamente constante entre  $0^\circ$  e  $14^\circ$  de ângulo de ataque com valores variando entre 0,00 e 0,04. O  $C_M$  possui valor praticamente constante e igual a zero entre  $0^\circ$  e  $8^\circ$ . Mas, após  $8^\circ$ , observa-se um incremento positivo com valor máximo de 0,014 a  $13^\circ$  de ângulo de ataque para *Reynolds* igual a 150.000. Os valores dos coeficientes hidrodinâmicos em função do ângulo de ataque para o caso dinâmico, *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,06 rad/s se encontram nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17.



**Figura 4-37 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$  rad/s e  $\alpha=17^\circ$**



**Figura 4-38 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,06$  rad/s e  $\alpha=19^\circ$**

As figuras 4.37 e 4.38 mostram o perfil posicionado a  $17^\circ$  e  $19^\circ$  de ângulo de ataque, respectivamente. Nestas imagens, percebe-se uma pequena região de recirculação oriunda do bordo de fuga do perfil. A figura 4.37 mostra o perfil com  $17^\circ$  de ângulo de ataque. O  $C_L$ ,  $C_D$  e  $C_M$  para esta posição angular valem respectivamente 1,08, 0,10 e 0,01. Neste ângulo, observam-se os primeiros indícios de descolamento de camada limite para *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,06 rad/s.

As figuras 4.39 a 4.44 foram obtidas nos ensaios de visualização para o caso dinâmico para *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,13 rad/s.



**Figura 4-39 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,13$  rad/s e  $\alpha=0^\circ$**



**Figura 4-40 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,13$  rad/s e  $\alpha=3^\circ$**



Figura 4-41 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,13$  rad/s e  $\alpha=7^\circ$

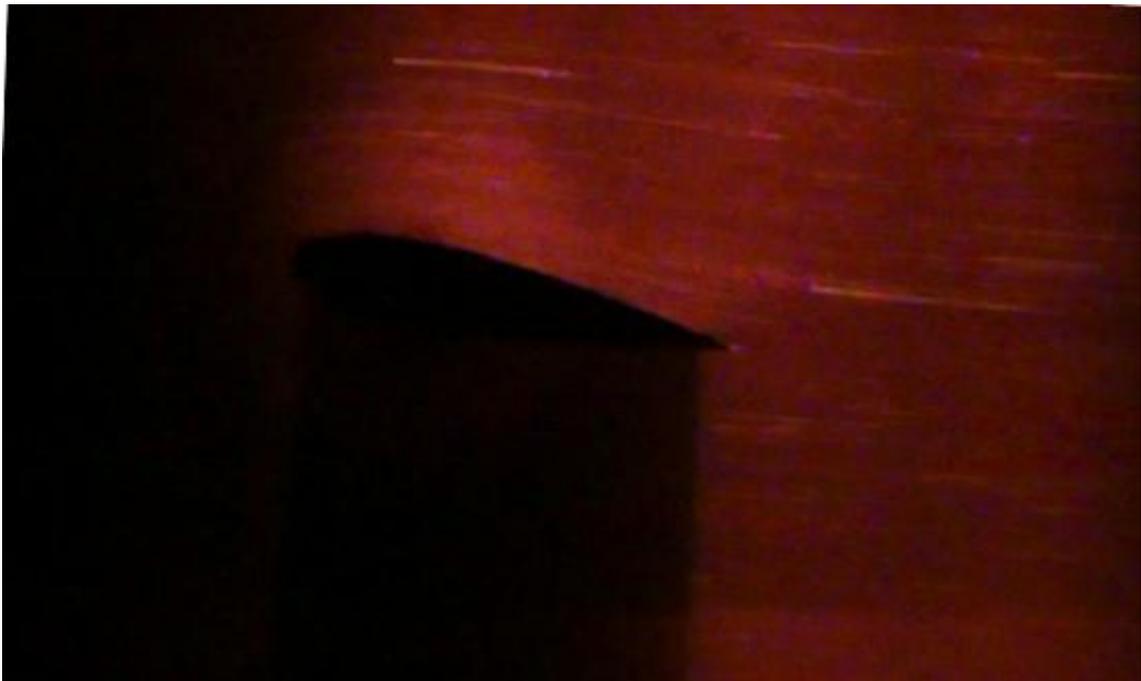


Figura 4-42 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,13$  rad/s e  $\alpha=14^\circ$



**Figura 4-43 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,13$  rad/s e  $\alpha=16^\circ$**

As figuras 4.39 a 4.43 mostram o perfil nas posições  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $14^\circ$  e  $16^\circ$  de ângulo de ataque, respectivamente, para *Reynolds* igual 150.000 e  $\omega$  igual a 0,13 rad/s. Pelas imagens, o escoamento se mostra sem descolamento aparente de camada limite. Os valores de  $C_L$  para as posições  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $14^\circ$  e  $16^\circ$  de ângulo de ataque valem respectivamente 0,00, 0,26, 0,70, 1,09 e 1,13. O  $C_D$  continua praticamente constante entre  $0^\circ$  e  $16^\circ$  de ângulo de ataque com valores variando entre 0,00 e 0,04, repetindo o comportamento para  $\omega$  igual a 0,06 rad/s. O  $C_M$  apresenta pequenas flutuações entre  $0^\circ$  e  $8^\circ$ . Mas, após  $8^\circ$ , observa-se um aumento do  $C_M$  atingindo um valor máximo de 0,013 a  $13^\circ$  de ângulo de ataque para *Reynolds* igual a 150.000, semelhante ao caso para  $\omega$  igual a 0,06 rad/s. Os valores dos coeficientes hidrodinâmicos em função do ângulo de ataque para o caso dinâmico, *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,13 rad/s, encontram-se nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21.



**Figura 4-44 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,13$  rad/s e  $\alpha=19^\circ$**

A figura 4.44 mostra o perfil posicionado a  $19^\circ$  de ângulo de ataque. Nestas imagens já se pode perceber uma pequena região de recirculação oriunda do bordo de fuga do perfil. Para esta posição angular,  $C_L$ ,  $C_D$  e  $C_M$  valem respectivamente 1,00, 0,26 e 0,01.

As figuras 4.45 a 4.50 foram obtidas nos ensaios de visualização para o caso dinâmico para *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,19 rad/s.



**Figura 4-45 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,19$  rad/s e  $\alpha=0^\circ$**



**Figura 4-46 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,19$  rad/s e  $\alpha=4^\circ$**



Figura 4-47 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,19$  rad/s e  $\alpha=10^\circ$



Figura 4-48 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,19$  rad/s e  $\alpha=15^\circ$

As figuras 4.45 a 4.48 mostram o perfil nas posições  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$  de ângulo de ataque respectivamente, para *Reynolds* igual 150.000 e  $\omega$  igual a 0,19 rad/s. Pelas imagens, o escoamento se mostra sem descolamento aparente de camada limite. Os valores de  $C_L$  para as posições  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$  de ângulo de ataque valem

respectivamente 0,00, 0,42 0,93 e 1,23. O  $C_D$  apresenta valores entre 0,00 e 0,05 entre  $0^\circ$  e  $15^\circ$  de ângulo de ataque, mas após  $16^\circ$  observa-se um aumento considerável do  $C_D$  devido ao descolamento da camada limite. O  $C_M$  apresenta variações discretas entre  $0^\circ$  e  $8^\circ$ . Mas, após  $8^\circ$ , observa-se um aumento do  $C_M$  atingindo um valor máximo de 0,010 a  $12^\circ$  de ângulo de ataque para *Reynolds* igual a 150.000. Os valores dos coeficientes hidrodinâmicos em função do ângulo de ataque para o caso dinâmico, *Reynolds* igual a 150.000 e  $\omega$  igual a 0,19 rad/s, encontram-se nas figuras 4.23, 4.24 e 4.25.



Figura 4-49 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,19$  rad/s e  $\alpha=17^\circ$



**Figura 4-50 - Visualização do escoamento, caso dinâmico,  $Re=150.000$ ,  $\omega=0,19$  rad/s e  $\alpha=19^\circ$**

As figuras 4.49 e 4.50 mostram o perfil posicionado a  $17^\circ$  e  $19^\circ$  de ângulo de ataque, respectivamente. Nessas imagens pode-se perceber uma região de recirculação oriunda do bordo de fuga do perfil.

Portanto, através dos ensaios de visualização do escoamento, conclui-se que quando o aerofólio está posicionado em ângulos superiores àqueles definidos pelo estol estático e ainda possuindo movimento angular, observa-se que a camada limite assume comportamento diferente quando comparada ao caso estático. Em geral, abaixo de  $12^\circ$  de ângulo de ataque, observa-se que a camada limite se mantém colada na superfície do aerofólio, fazendo com que o escoamento se mantenha estável, conforme observado nas visualizações. Comparado com o correspondente estático, observa-se que nas imagens do caso dinâmico o escoamento não apresenta a formação de estruturas vórtices em ângulos entre até  $15^\circ$ , indicando que a movimentação do aerofólio deslocou o ângulo de estol para um valor mais elevado. Para valores entre  $10^\circ$  e  $16^\circ$ , nota-se que por volta de  $15^\circ$  graus inicia-se a formação do vórtice no bordo de fuga. A  $17^\circ$  de ângulo de ataque no caso dinâmico, observa-se o início do crescimento dos vórtices gerados e que os mesmos começam a se destacar do aerofólio, formando uma esteira turbulenta a jusante. Nesse instante fica definido o estol dinâmico e todas as suas conseqüências como: o decréscimo abrupto dos valores de sustentação e aumento significativo dos valores de arrasto.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Ensaio para obtenção dos coeficientes de sustentação, arrasto e momento de arfagem em um perfil NACA 0018 foram realizados em túnel de água. Os coeficientes foram estimados através de uma balança desenvolvida especificamente para este estudo e os dados foram adquiridos através do software *LabView*. Foram realizados ensaios estáticos para números de *Reynolds* baseados na corda iguais a 97.000, 124.000 e 150.000. Os dados foram adquiridos de 1 em 1° aproximadamente, de 0° até 20° de ângulo de ataque. Os resultados para número de *Reynolds* igual a 150.000 foram comparados com os resultados de *Timmer* (2008) mostrando boa compatibilidade.

Ensaio dinâmico foram realizados estimando-se os esforços ao longo do movimento do perfil a uma determinada velocidade angular. A amplitude do movimento dos ensaios dinâmicos foi de 0° a 20° de ângulo de ataque. Os números de *Reynolds* utilizados nos ensaios dinâmicos foram iguais a 124.000 e 150.000 e as velocidades angulares iguais a 0,06, 0,13 e 0,19 rad/s.

Os resultados foram comparados evidenciando a influência dos números de *Reynolds* utilizados mostrando pequenas diferenças nos resultados. Deve-se observar que os números de *Reynolds* utilizados foram da mesma ordem.

O modelo semi-empírico desenvolvido por *Larsen* (2007) pode ser perfeitamente aplicável nesse trabalho como mostra os resultados presentes. Como prevê o modelo, pode-se identificar uma ou duas regiões lineares no pré-estol. O modelo objetiva mostrar uma estimativa do comportamento do coeficiente de sustentação de um perfil sujeito ao estol dinâmico.

O resultado mais importante foi a comparação entre os ensaios estáticos com os dinâmicos para um mesmo número de *Reynolds*. Percebeu-se um aumento significativo, da ordem de 20%, nos coeficientes de sustentação máximo no caso dinâmico. Observou-se também o deslocamento do ângulo de estol. Para o caso estático, o ângulo de estol foi de 12° e no caso dinâmico de 17°. Este resultado demonstra a influência dos efeitos do estol dinâmico no comportamento das forças que agem sobre o perfil e evidencia o deslocamento do ângulo de estol entre os casos estático e dinâmico. Não

houve diferenças significativas quando se comparou os resultados somente entre as diferentes velocidades angulares no caso dinâmico.

Os ensaios de visualização do escoamento tiveram um caráter qualitativo. Pode-se observar bem a relação entre o padrão do escoamento com os valores dos coeficientes hidrodinâmicos. Observou-se também a relação entre o descolamento da camada limite, com sua respectiva localização e nível de descolamento, com os efeitos do estol.

Outra contribuição importante do presente trabalho foi a disponibilização de uma versátil bancada de testes. Um túnel de água, como o utilizado neste trabalho, permite a realização de inúmeros trabalhos nos mais variados temas.

Abaixo seguem sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao presente trabalho:

- Testes em diferentes perfis;
- Testes em diferentes faixas de *Reynolds*, velocidades angulares, ângulos de ataque e tipos de movimento do perfil;
- Visualização do escoamento com técnicas mais avançadas como PIV, que permitem medição do campo de velocidade;
- Verificar o comportamento caótico dos coeficientes hidrodinâmicos ao longo do tempo com o perfil posicionado em ângulos superiores ao ângulo de estol.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tinar, E. e Cetiner, O. (2006). “Acceleration data correlated with PIV images for self-induced vibrations of an airfoil.”
- [2] Bousman, W. G., “Airfoil dynamic *stall* and rotorcraft maneuverability.” Army /NASA rotorcraft division. Aeroflightdynamics directorate (AMRDEC). US Army aviation and missile command. Ames Research Center, Moffett Field, California.
- [3] McAlister, K. W., Lambert, O. e Petott D. (1984). “Application of the onera model of dynamic *stall*.” Aeromechanics Laboratory, U.S. Army Research and Technology Laboratories, AVSCOM.
- [4] Sankar, L. N. (2002). “A comparative study of three methodologies for modeling dynamic *stall*.” School of Aerospace Engineering Georgia Tech, Atlanta.
- [5] Larsen, J.W., Nielsena, S.R.K. e S. Krenkb (2007). “Dynamic *stall* model for wind turbine airfoils.” Department of Civil Engineering, Aalborg University, DK-9000 Aalborg, Denmark.
- [6] Pailhas, G., Houdeville R. e Barricau Ph. “Experimental investigation of dynamic *stall*.” Aerodynamics and Energetics Models Department. ONERA, BP 72, 92322 Châtillon Cedex, France.
- [7] Geissler, W. e Haselmeyer H. (2006). “Investigation of dynamic *stall* onset.” German Aerospace Centre (DLR), Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen, Germany.
- [8] You D. e Moin P. (2006). “Large-eddy simulation of flow separation over an airfoil with synthetic jet control.” Center for Turbulence Research Annual Research Briefs.
- [9] Rouzaud, O. e Plop A. (1998). “2D Unsteady Navier-Stokes computations at ONERA for prediction of dynamic *stall*. 24th European Rotorcraft Forum Marseille, France.
- [10] Cafarelli, I., Petot, D., Truong, V.K. e Leconte P. “A survey of the latest developments in dynamic *stall* and optimization of rotating structures. ONERA – BP 72 – 92322 France.
- [11] Wernert, P. (1996). “Experimental and numerical investigations of dynamic *stall* on a pitching airfoil.” ISL, French-German Research Institute of Saint-Louis, F-68300 Saint-Louis, France.

- [12] Kim, Y-M, Lee H-E e Larsen A. (2005). “Wind-Induced characteristics of two-edge girders for the bending degree-of-freedom.”
- [13] Junga, Y.W. e Parkb, S.O. (2004). “Vortex-shedding characteristics in the wake of an oscillating airfoil at low Reynolds number.” Department of Aeropropulsion, Korea Aerospace Research Institute, 45 Eoeun-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-333, Republic of Korea.
- [14] Willmarth, W. W. (1971). “Unsteady force and pressure measurements.” Department of Aerospace Engineering. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan
- [15] Timmer, W.A. (2008). “Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018.” Wind Energy Section, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Kluyverweg 1, Netherlands.
- [16] Seebass, R. e Tijdeman, H. (1980). “Transonic flow past oscillating airfoils.” Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam, The Netherlands Departments of Aerospace and Mechanical Engineering, and Mathematics, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721.
- [17] Jones, K. D., Dohring, C. M. e Platzer, M. F. (1998). “Experimental and Computational Investigation of the Knoller–Betz Effect.” U.S. Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [18] Hotz, G. M. e McGraw, J. T. (1995). “The high speed water tunnel three-component force balance.”
- [19] Sheldahl, R. E. e Klimas, P. C. (1981). “Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines.” Advanced Energy Projects Division 4715 Sandia National Laboratories Albuquerque, NM 87185.
- [20] Guglielmini L. e Blondeaux P. (2003). “Propulsive efficiency of oscillating foils.” Environmental Engineering Department, University of Genova, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italy.
- [21] Platzer, M.F., Neace, K. S . E Pang, C-K. (1993). “Aerodynamic analysis of flapping wing propulsion.” Naval Postgraduate School - Monterey, California.
- [22] Dubcova, L., Feistauer, M., Horacek, J. e Svacek P. (2007). “Numerical simulation of airfoil vibrations induced by turbulent flow.” Faculty of Mathematics and Physics, Charles University Prague, Sokolovská 83, 186 75 Praha 8, Czech Republic

- [23] Sarkar, S. e Bijl H. (2008). “Nonlinear aeroelastic behavior of an oscillating airfoil during *stall*-induced vibration.” Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036, India.
- [24] Riestler, P.J. (1993). “A Computational and experimental investigation of incompressible oscillatory airfoil flow and flutter problems.”
- [25] Nakano, T., Fujisawa, N., Oguma, Y., Takagi, Y. e Lee, S. (2006). “Experimental study on flow and noise characteristics of NACA0018 airfoil.” Department of Mechanical Engineering, Niigata University, 8050 Ikarashi-2, Niigata 950-2181, Japan.
- [26] Abbot I.H. “Theory of wing sections.”
- [27] Srinivasan, G. R., Ekaterinaris, J. A. e McCroskey, W. J. (1995). “Evaluation of turbulence models for unsteady flows of an oscillating airfoil.” NASA Ames Research Center, Mail Stop 258-1, Moffett Field, CA 94035-1000, U.S.A.
- [28] Carvalho G. B. (2003). “Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação.”
- [29] Latypov, F. (2006). “Dynamic method of determining aerodynamic characteristics of models from on experimental results obtained in short-duration wind tunnels.”
- [30] Cigada, A., Falco, M. e Zasso, A. (2001). “Development of new systems to measure the aerodynamic forces on section models in wind tunnel testing.” Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, P.za Leonardo da Vinci, 2320133 Milano, Italy.
- [31] Svacek, P., Feistauer, M. e Horacek, J. (2006). “Numerical simulation of flow induced airfoil vibrations with large amplitudes.” Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University Prague, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2, Czech Republic.
- [32] Jones, K.D., Dohring, C.M. e Platzler, M.F. (1996). “Wake structures behind plunging airfoils: A comparison of numerical and experimental results.” Naval Postgraduate School Monterey, CA. AIAA 96-0078.
- [33] Govinda, S. P. R. e Simha, K. R. Y. (2002). “Timoshenko-Wagner-Kappus torsion bending theory and wind tunnel balance design.”
- [34] DeLaurier, J. D. e Harris, J. M. (1982). “Experimental study of oscillating-wing propulsion.” University of Toronto, Toronto, Canada and Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio.

- [35] Bueno, A. P. F., Doricio, J. L., Marques, A. C. H., Paula, I. B., Catalano, F. M. e Greco, P. C. (2007). "Pressure measurements in oscillatory NACA 0012 airfoil – Experimental and computational results." Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - São Carlos - São Paulo - Brasil.
- [36] Theodorsen, T. "General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter."
- [37] Lee, C. S., Wong, N. L., Srigrarom, S. e Nguyen, N. T. (2005). "Development of 3-component force-moment balance for low speed water tunnel. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore.
- [38] Erm, L.P. (2006). "Development of a two-component strain-gauge-balance load-measurement system for the DSTO water tunnel." Air Vehicles Division Defence Science and Technology Organisation.
- [39] Andolfato, R. P., Camacho, J. S. e Brito G. A. (2004). "Extensometria básica." Ilha Solteira – São Paulo - Brasil.
- [40] Grupo de Análise e Projeto Mecânico (2004). "Apostila de Extensometria." Florianópolis - Santa Catarina - Brasil.
- [41] Vaughan, J. (1975). "Application of B&K Equipment to Strain Measurements."
- [42] Anderson, J. D (1991). "Fundamentals of Aerodynamics".
- [43] Leishman J. G. (2000). "Principles of Helicopter Aerodynamics." Cambridge University Press.
- [44] Ekaterinaris, J. e Platzer, M. Computational prediction of airfoil dynamic *stall*. Progress in Aerospace Sciences, 33(11-12):759-846, 1998.
- [45] Fujisawa, N. e Shibuya, S. "Observations of dynamic *stall* on turbine blades. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(2):201-214, 2001.
- [46] McCroskey, W. Unsteady airfoils. Annual Review of Fluid Mechanics, 14:285-311, 1982.
- [47] Shipley, D. E., Miller, M. S., e Robinson, M. C. Dynamic *stall* occurrence on a horizontal axis wind turbine blade. Volume 16, pages 167-173, 1995.
- [48] Divagalli, S. K. Dynamic *Stall* of a NACA 0012 Airfoil in Laminar Flow. Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [49] Lee, T. e Gerontakos, P. Investigation of flow over an oscillating airfoil. Journal of fluid Mechanics, 512:313-341, 2004.

- [50] Sarkar, S. e Venkatraman, K. Influence of pitching angle of incidence on the dynamic *stall* behavior of a symmetric airfoil. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 27(3):219-238, 2008.
- [51] Leishman, J.G., Beddoes, T.S., 1986a. A semi-empirical model for dynamic *stall*. *Journal of the American Helicopter Society* 34, 3–17.
- [52] Leishman, J.G., Beddoes, T.S., 1986b. A generalised model for airfoil unsteady aerodynamic behaviour and dynamic *stall* using the indicial method. In: *Proceedings of the 42nd Annual Forum of the American Helicopter Society*.
- [53] Sahin, M., Sankar, L. N., Chandrasekhara, M. S., e Tung, C. Dynamic stall alleviation using a deformable leading edge concept - a numerical study. *Journal of Aircraft*, 40(1):77-85, 2003.
- [54] Visbal, M., Gordnier, R., e Galbraith, M. High-fidelity simulations of moving and flexible airfoils at low Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 46(5):903-922, 2009.
- [55] Leishman, J. Validation of approximate indicial aerodynamic functions for two-dimensional subsonic flow. *Journal of Aircraft*, 25(10):914-922, 1988.
- [56] Tran, C. e Petot, D. Semi-empirical model for the dynamic stall of airfoils in view of the application to the calculation of responses of a helicopter blade in forward flight. *Vertica*, 5(1):35-53, 1981.
- [57] Ol, M. V., Bernal, L., Kang, C. K., e Shyy, W. Shallow and deep dynamic stall for flapping low Reynolds number airfoils. *Experiments in Fluids*, 46(5):883-901, 2009.
- [58] Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition. Budynas–Nisbett

## **APÊNDICES**

### **I - BANCADA EXPERIMENTAL**

#### **Túnel de água**

O túnel de água utilizado para a realização do experimento foi idealizado originalmente para o estudo do fenômeno de cavitação e, portanto, foram necessárias adaptações para que a realização deste trabalho fosse possível. A estrutura principal do túnel de água é constituída de aço doce. Seu formato é do tipo circuito fechado no plano vertical, e suas paredes externas são reforçadas para suportar a pressão diferencial negativa que pode ser alcançada. Cada uma das seções que formam o túnel é flangeada e, entre elas, existem juntas de borracha para vedação. Em todas as bases há apoios para regulagem de nível e para fixação no solo. As principais características do túnel são:

- Alimentação elétrica do motor principal: 380-440 Volts/Trifásico/50 Hz/4 fios
- Potência do motor da bomba principal: 5.500 W
- Altura: 2750 mm
- Comprimento: 4900 mm
- Largura: 1100 mm
- Modelo: HAN 5
- Largura da seção de testes: 200 mm
- Altura da seção de testes: 200 mm
- Comprimento da seção de testes: 750 mm
- Velocidade máxima da seção de testes: 4,8 m/s
- Velocidade mínima da seção de testes: 0,65 m/s
- Razão de contração do bocal: 3,7:1

## Inversor de frequência

Originalmente, a velocidade do escoamento era controlada por um variador de velocidades mecânico, o qual, embora ainda permanecesse acoplado ao motor, não fora utilizado. O acionamento e controle da rotação do motor principal e, conseqüentemente, da velocidade do escoamento foi feito por meio de um inversor de frequência da marca WEG modelo KMR - CFW 09.



Figura I-1 – Inversor de frequência

## Quadro de acionamento

Este quadro era originalmente responsável por todo o acionamento, controle e monitoramento da bomba principal, da bomba de vácuo e da bomba de filtração do túnel de água. Adaptações foram feitas e o mesmo foi utilizado apenas para o acionamento das bombas de vácuo e de filtração.



Figura I-2 – Quadro de acionamento

### Motor principal

O motor principal que aciona a bomba principal do túnel possui as seguintes características:

- Marca: Hawker Siddeley – Brook Crompton Parkinson Motor
- Modelo: D132MDB
- Número de série: B459023
- Potência: 5.500 W
- Rotação: 3400 RPM
- Tensão elétrica: 380/480 Volts Trifásico
- Corrente elétrica: 12,0/10,0 A
- Frequência: 50 Hz
- Fases: 3
- Classe de proteção: B

Acoplado diretamente ao motor está o variador de velocidades mecânico que possui uma polia dentada de diâmetro igual a 80 mm que aciona a bomba principal através de uma correia dentada número 750H.



**Figura I-3 - Motor principal**

### **Bomba principal**

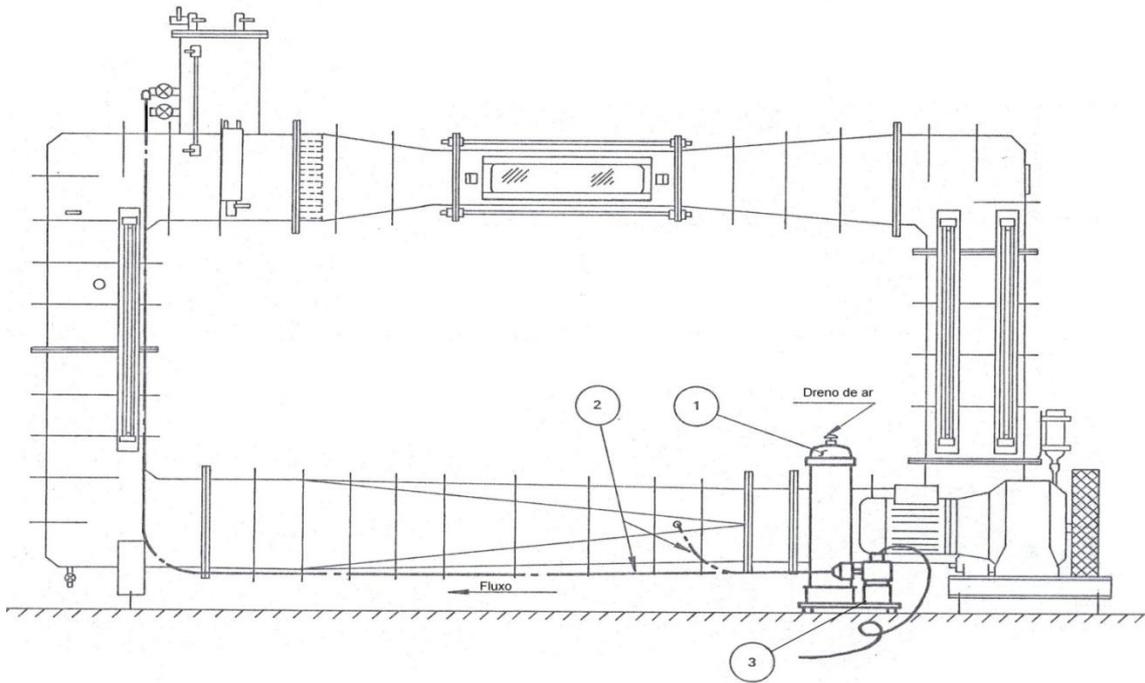
O rotor da bomba principal possui quatro pás em aço inox e diâmetro igual a 300 milímetros. Os mancais do rotor são de rolamentos com vedação de borracha de dupla carreira com sistema de refrigeração. A dupla selagem previne efetivamente a entrada e saída de ar mesmo com o túnel funcionando com pressões diferenciais negativas ou positivas. Logo após o rotor, existe um estator de oito pás fixas para redirecionamento do escoamento. A polia dentada que aciona a bomba possui diâmetro igual a 320 milímetros, onde o sensor de rotação foi posicionado para fins de calibração e monitoramento da velocidade do escoamento.



Figura I-4 – Bomba principal e estator

### Filtro de água

O filtro de água da marca *Stella – Meta Filters* modelo C8/5/20 foi utilizado para aumentar o nível de transparência da água. O filtro, construído em aço inoxidável, possui dez elementos filtrantes, conectores para entrada e saída de água, mangueira flexível, dreno, plug de ventilação, uma bomba monobloco. É recomendado pelo manual do túnel oito horas de filtragem em média ou até se atingir a transparência desejada antes da utilização do túnel.



**Figura I-5 - Desenho esquemático do túnel de água (Filtro de água)**

**Tabela I-1 – Descrição das partes principais do sistema de filtragem**

	<b>Descrição</b>
1	Equipamento de filtragem
2	Tubo flexível
3	Bomba de filtragem



**Figura I-6 – Filtro de água**

### **Bomba de filtragem**

A bomba de filtragem possui as seguintes características:

- Marca: James Beresford & Son LTD.
- Tipo: PV52
- Monobloco
- Potência: 187 W
- Tensão elétrica: 230/250 Volts
- Corrente elétrica: 2,0 A
- Frequência: 50 Hz
- Número de série: K1661
- Rotação: 5000 RPM
- Fases: 1

A bomba é responsável pela sucção da água logo após o estator da bomba principal e devolver água filtrada ao túnel pelo tanque superior.



**Figura I-7 – Bomba de filtragem**

### **Bomba de vácuo**

A bomba de vácuo possui as seguintes características:

- Marca: Hawker Siddeley – Brook Crompton Parkinson Motor
- Número de série: VSE372BXHHB100
- Monobloco
- Potência: 90/120 W
- Rotação: 2800/3450 RPM
- Tensão elétrica: 220/240 Volts
- Corrente elétrica: 1,7/1,5 A
- Fases: 1
- Freqüência: 50/60 Hz
- Classe de proteção: E

A bomba é responsável por retirar bolhas dissolvidas na água e criar pressão abaixo da pressão atmosférica dentro do túnel.



Figura I-8 – Bomba de vácuo

### Seção de contração

A seção de contração é responsável por diminuir a pressão do escoamento aumentando, assim, a velocidade na seção de testes. Possui uma razão de contração de 3,7:1 e um perfil projetado para manter o fluxo laminar. Um *honeycomb* está localizado imediatamente antes da contração para estabilizar o fluxo na seção de testes.



Figura I-9 - Bocal de contração

## Seção de testes

A seção de testes é quadrada e possui duas janelas laterais em acrílico transparentes e uma terceira janela de acrílico abaixo, de modo que facilite a visualização do escoamento. Possui conexões para tomadas de pressão e de posicionamento do tubo de *Pitot*. A seção de testes possui 200 mm de largura, 200 mm de altura e 750 mm de comprimento, onde se pode alcançar uma velocidade mínima de 0,65 m/s e máxima de 4,8 m/s.



Figura I-10 - Seção de testes

## Tanque superior

No tanque superior encontra-se o visor de nível de água do túnel, as conexões para a sucção da bomba de vácuo, duas entradas de água – uma proveniente do filtro e outra para enchimento do tanque – e o equalizador de pressão, o qual permite igualar a pressão interna do túnel com a pressão atmosférica. O tanque superior possui, ainda, uma tampa removível, que possibilita manutenção interna.

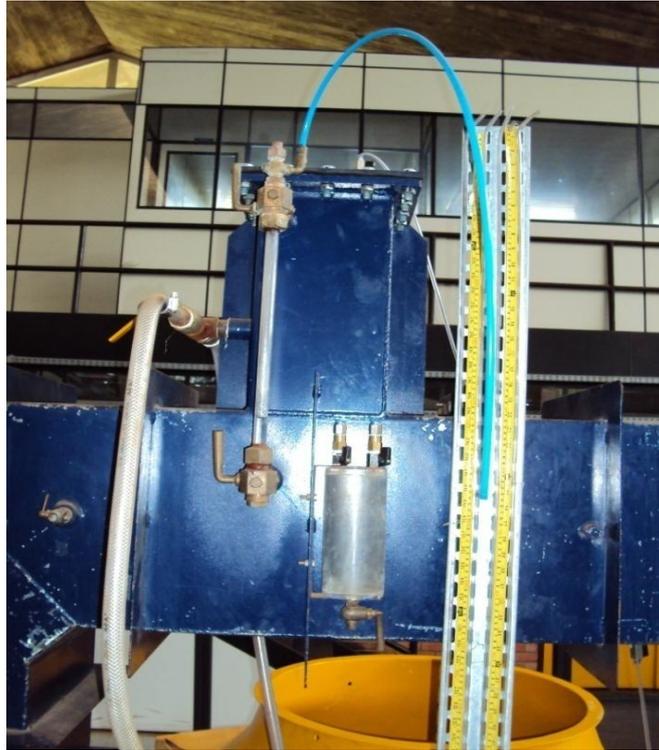


Figura I-11 - Tanque superior

## Sistema de posicionamento

### Motor de passo

As principais características do motor de passo utilizado são:

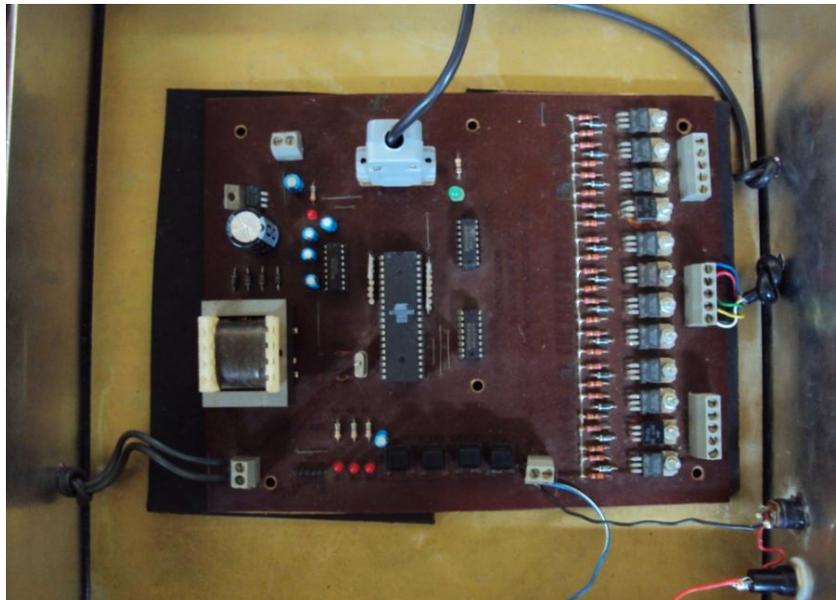
- Marca: Sanyo
- Tipo: 103G770-25
- 1,8 graus por passo
- Tensão elétrica: 4,1 V
- Corrente elétrica: 1,1 A
- Diâmetro: 47 mm



**Figura I-12 - Motor de passo**

### Driver

O driver utilizado foi desenvolvido pela Universidade de Brasília, o qual pode controlar até três motores. Possui comunicação via serial e opção de controle remoto ou manual através de botões na própria placa.



**Figura I-13 - Driver controlador do motor de passo**

**Figura I-14 - Vista explodida do perfil, célula de carga e mancal**

## II - CALIBRAÇÃO DA BANCADA

O túnel foi calibrado no intuito de se conhecer a velocidade média e o perfil de velocidades do escoamento na seção de testes em função da:

- Pressão entre a entrada e a saída do bocal de contração (efeito Venturi)
- Pressão dinâmica na seção de testes (tubo de *Pitot*)
- Rotação da bomba

Para efeito de confirmação, a velocidade na seção de testes foi estimada utilizando dois métodos durante a calibração do túnel de água: pelo tubo de *Pitot* e pelo efeito Venturi no bocal de contração. Ao tubo de *Pitot* foi conectado um manômetro de coluna d'água diferencial e, em paralelo, um manômetro digital diferencial, para estimar a pressão total e estática do escoamento na seção de testes. O outro manômetro de coluna d'água diferencial foi utilizado para estimar a pressão na entrada e na saída do bocal de contração. A medição da rotação da bomba foi feita utilizando o sensor de rotação já descrito.

O perfil de velocidades na seção de testes foi estimado com o tubo de *Pitot*, posicionando-o em cinco pontos ao longo da altura da seção de testes: nas extremidades superior e inferior, no centro e nos pontos médios às extremidades e ao centro da seção.

O equacionamento para a medição de velocidade na seção de testes do túnel de água será descrito a seguir.

### **Tubo de *Pitot***

Da equação de *Bernoulli*

$$P_0 + \frac{\rho_{H_2O} \cdot \vec{U}_1^2}{2} = P_t \quad (II.1)$$

$$\vec{U}_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_t - P_0)}{\rho_{H_2O}}}$$

A pressão dinâmica ( $P_d$ ) será assim definida:

$$P_d = P_t - P_0 = \rho_{H_2O} \cdot \vec{g} \cdot \Delta H \quad (II.2)$$

Então

$$\vec{U}_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \vec{g} \cdot \Delta H}{\rho_{H_2O}}}$$

$$\vec{U}_1 = \sqrt{2 \cdot \vec{g} \cdot \Delta H} \quad (II.3)$$

### Efeito Venturi no bocal

Razão de contração:  $\frac{A_2}{A_1} = 3,7$

Área da seção de testes:

$$A_1 = 0,04 \text{ m}^2$$

Sistema de equações

$$\begin{cases} \vec{U}_1 \cdot A_1 = \vec{U}_2 \cdot A_2 & (II.4) \\ P_1 + \frac{\rho_{H_2O} \cdot \vec{U}_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_{H_2O} \cdot \vec{U}_2^2}{2} & (II.5) \end{cases}$$

Substituindo *II.4* em *II.5*

$$P_2 - P_1 = \frac{\rho_{H_2O} \cdot \vec{U}_1^2}{2} \cdot \frac{(A_2^2 - A_1^2)}{A_2^2}$$

$$\vec{U}_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_2 - P_1)}{\rho_{H_2O}} \cdot \frac{A_2^2}{A_2^2 - A_1^2}} \quad (II.6)$$

Onde

$$P_2 - P_1 = \rho_{H_2O} \cdot \vec{g} \cdot \Delta H \quad (II.7)$$

Então

$$\vec{U}_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta H)}{\rho_{H_2O}} \cdot \frac{A_2^2}{A_2^2 - A_1^2}}$$

$$\vec{U}_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H \cdot \frac{A_2^2}{A_2^2 - A_1^2}} \quad (II.8)$$

### Ensaio de calibração do túnel

Tabela II-1 - Dados do ensaio de calibração do túnel de água

Pitot			Bocal		$f_{bomba}$ (Hz)
$P_0$ (mm de H <sub>2</sub> O)	$P_t$ (mm de H <sub>2</sub> O)	$P_d$ Manômetro Digital (mbar)	$P_2$ (mm de H <sub>2</sub> O)	$P_1$ (mm de H <sub>2</sub> O)	
350	332	1,7	3846	3832	1,52
391	333	4,9	3841	3791	2,89
447	333	9,8	3834	3734	4,01
554	336	18,9	3811	3627	5,48
682	343	29,7	3788	3502	6,72
787	350	39,8	3779	3400	7,63
1003	354	59,9	3733	3170	9,30
1167	356	75,8	3712	3001	10,34
1560	354	115,7	3697	2601	12,50

Tabela II-2 - Resultados obtidos no ensaio de calibração do túnel de água

$P_d$ (mm de $H_2O$ )	$P_d$ Manômetro Digital (mm de $H_2O$ )	$(P_2 - P_1)$ (mm de $H_2O$ )	$U_{Pitot}$ (m/s)	$U_{Manômetro Digital}$ (m/s)	$U_{Bocal}$ (m/s)	$f_{bomba}$ (RPM)
18	17	14	0,59	0,58	0,54	91
58	50	50	1,07	0,99	1,03	173
114	100	100	1,49	1,40	1,45	241
218	193	184	2,07	1,94	1,97	329
339	303	286	2,58	2,44	2,46	403
437	406	379	2,93	2,82	2,83	458
649	611	563	3,57	3,46	3,45	558
811	773	711	3,99	3,89	3,88	620
1206	1180	1096	4,86	4,81	4,81	750

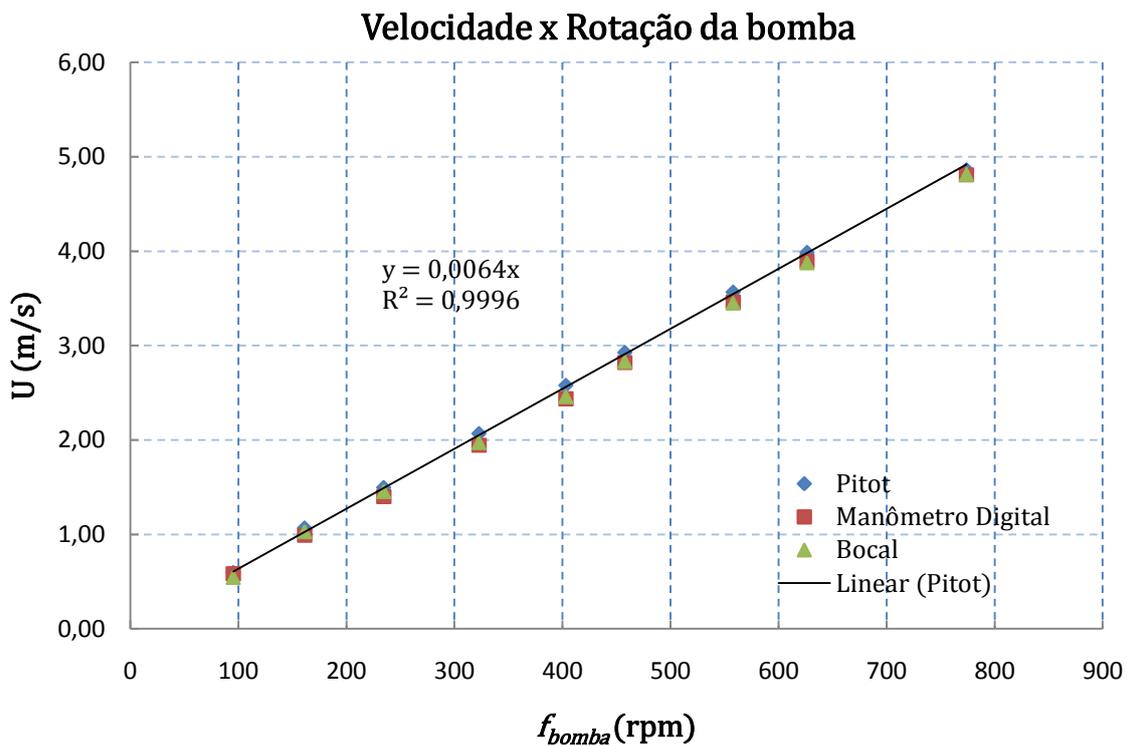


Figura II-1 - Gráfico de calibração da velocidade do escoamento em função da rotação da bomba principal

Observa-se um comportamento linear entre a velocidade obtida na seção de testes com a rotação da bomba principal. Há coerência entre os dois métodos e os dois instrumentos utilizados na estimativa da pressão dinâmica e velocidade do escoamento na seção de testes.

Portanto, conclui-se que se pode estimar a velocidade na seção de testes com alto grau de precisão.

### Ensaio de estimativa do perfil de velocidade na seção de testes

Tabela II-3 - Dados obtidos no ensaio de estimativa do perfil velocidade

Posição do Pitot (mm)	Pitot			$f_{bomba}$ (Hz)
	$P_0$ (mm de H <sub>2</sub> O)	$P_t$ (mm de H <sub>2</sub> O)	Manômetro Digital (mbar)	
0	338	325	1,3	1,52
47	339	325	1,4	1,52
94	340	325	1,5	1,52
141	339	325	1,4	1,52
188	338	325	1,3	1,52
0	471	345	11,6	4,02
47	470	334	11,9	4,02
94	471	326	12,1	4,02
141	471	332	11,8	4,02
188	471	342	11,7	4,02
0	740	375	33,2	6,78
47	740	340	36,1	6,78
94	742	332	37,3	6,78
141	740	334	37,0	6,78
188	737	365	35,1	6,78
0	1120	396	68,4	9,23
47	1110	344	73,2	9,23
94	1120	327	74,8	9,23
141	1111	342	73,0	9,23
188	1092	388	68,0	9,23
0	1588	459	107,4	12,60
47	1586	385	111,6	12,60
94	1586	365	117,7	12,60
141	1586	382	112,0	12,60
188	1586	455	109,3	12,60

Tabela II-4 - Resultados obtidos no ensaio de estimativa do perfil velocidade

Posição do Pitot (mm)	$P_d$ Pitot (mm de H <sub>2</sub> O)	$P_d$ Manômetro Digital (mm de H <sub>2</sub> O)	$U_{Pitot}$ (m/s)	$U_{Manômetro\ Digital}$ (m/s)	$f_{bomba}$ (RPM)
0	13	13	0,50	0,51	91
47	14	14	0,52	0,53	91
94	15	15	0,54	0,55	91
141	14	14	0,52	0,53	91
188	13	13	0,50	0,51	91
0	126	118	1,57	1,52	241
47	136	121	1,63	1,54	241
94	145	123	1,69	1,56	241
141	139	120	1,65	1,54	241
188	129	119	1,59	1,53	241
0	365	339	2,67	2,58	407
47	400	368	2,80	2,69	407
94	410	388	2,83	2,76	407
141	406	377	2,82	2,72	407
188	372	358	2,70	2,65	407
0	724	697	3,77	3,70	554
47	766	746	3,87	3,82	554
94	793	763	3,94	3,87	554
141	769	744	3,88	3,82	554
188	704	693	3,71	3,69	554
0	1129	1095	4,70	4,63	756
47	1201	1138	4,85	4,72	756
94	1221	1200	4,89	4,85	756
141	1204	1142	4,86	4,73	756
188	1131	1115	4,71	4,67	756

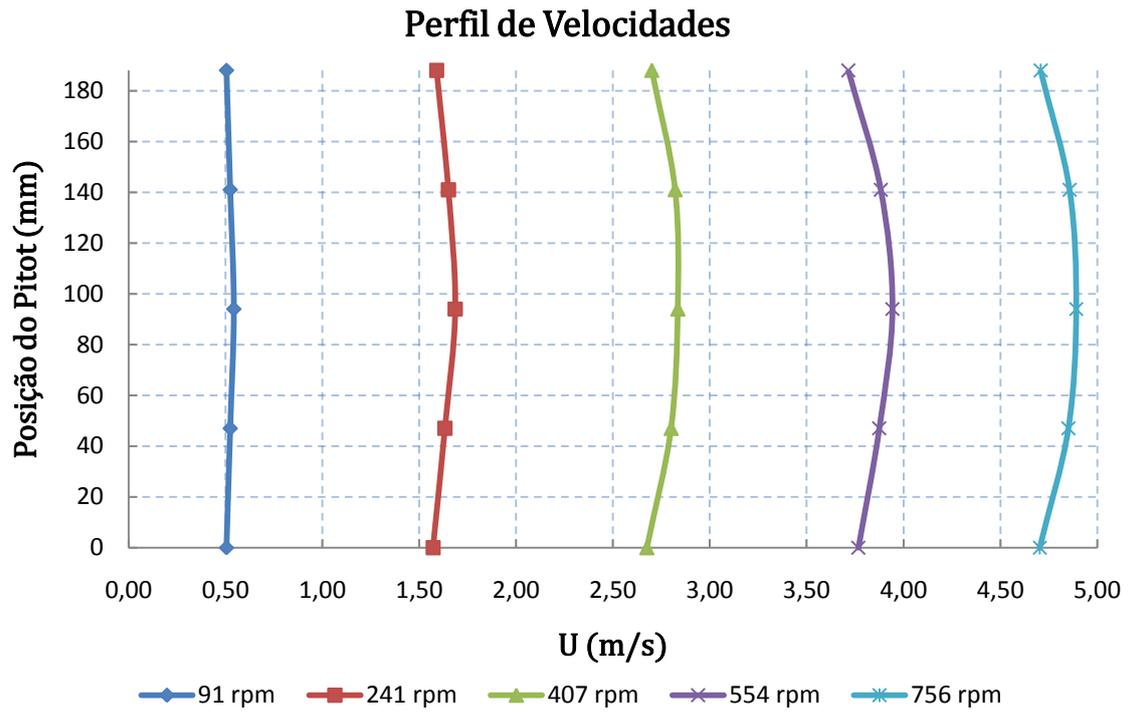


Figura II-2 - Gráfico do perfil de velocidades do escoamento para várias rotações da bomba principal

### III - CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

A calibração da célula de carga foi realizada *in loco*. Com o perfil a zero grau de ângulo de ataque, foram colocados pesos padrão conhecidos, posicionando-os no meio da envergadura e a um quarto do bordo de ataque. Para cada peso padrão utilizado, anotou-se a tensão elétrica de saída das pontes de *Wheastone*. Este procedimento foi utilizado para a calibração da ponte de *Wheastone* 1. O mesmo procedimento foi feito, mas posicionando-se o perfil a noventa graus de ângulo de ataque, para a calibração da ponte de *Wheastone* 2. Foram realizados dez ensaios de calibração com aumento e diminuição de carga (subida e descida). Os gráficos mostram a média dos resultados desses ensaios.

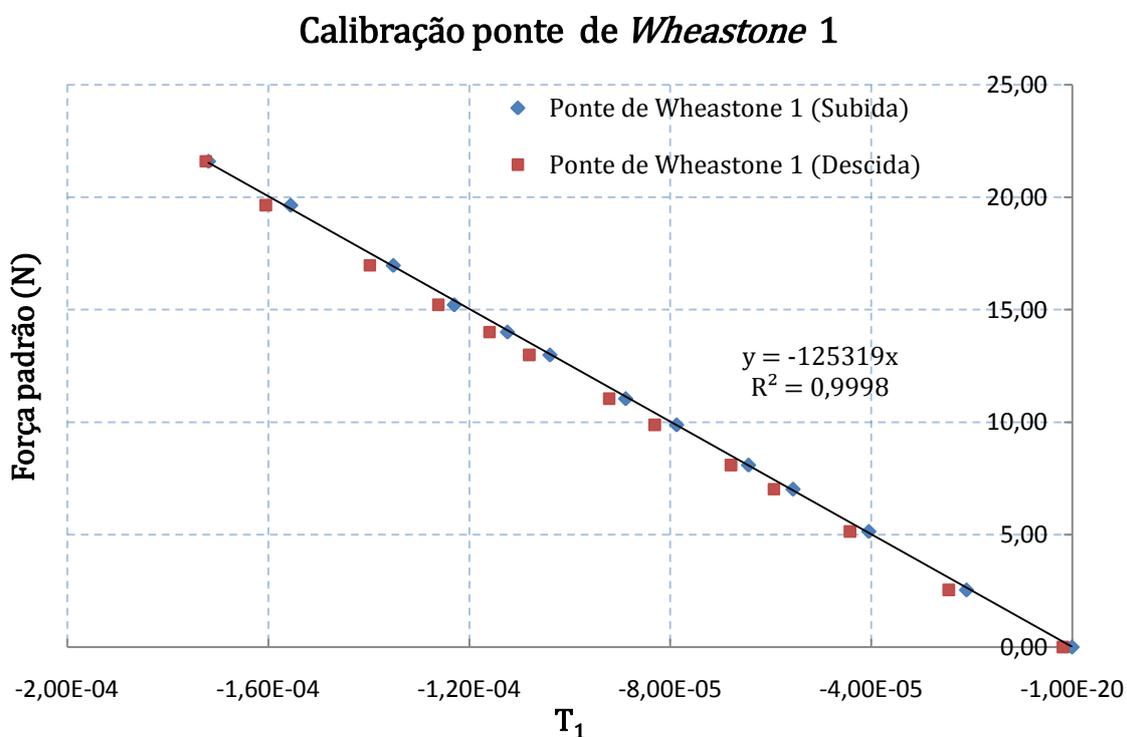


Figura III-1 - Gráfico dos ensaios de calibração da ponte de *Wheastone* 1

### Calibração ponte de *Wheastone* 2

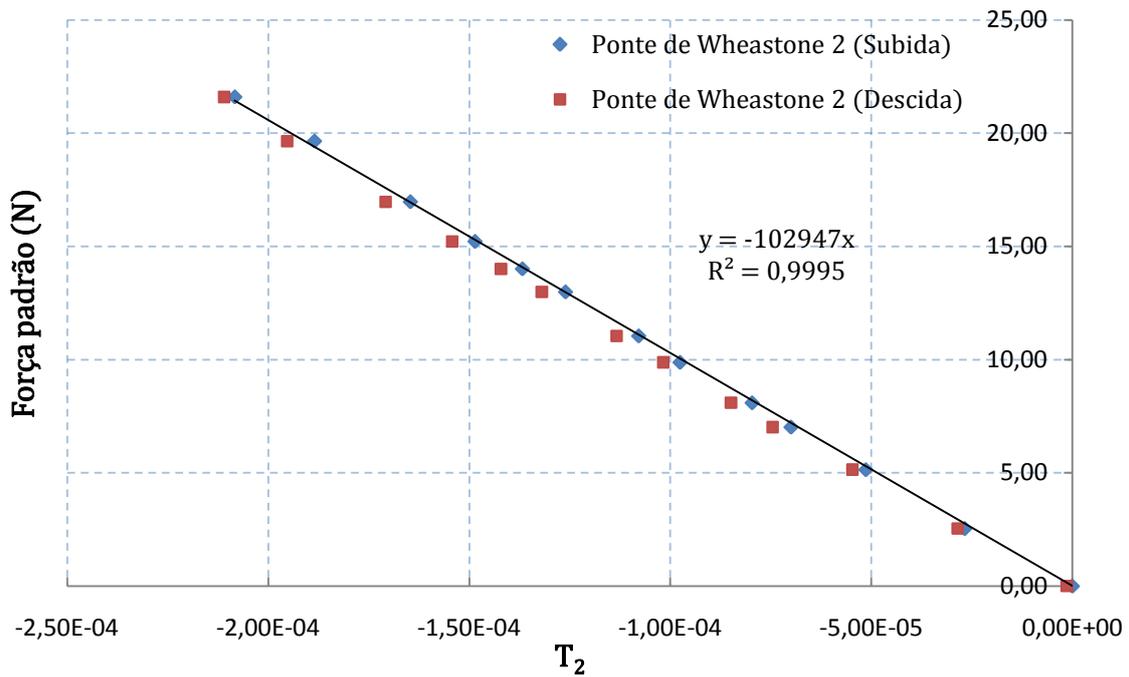
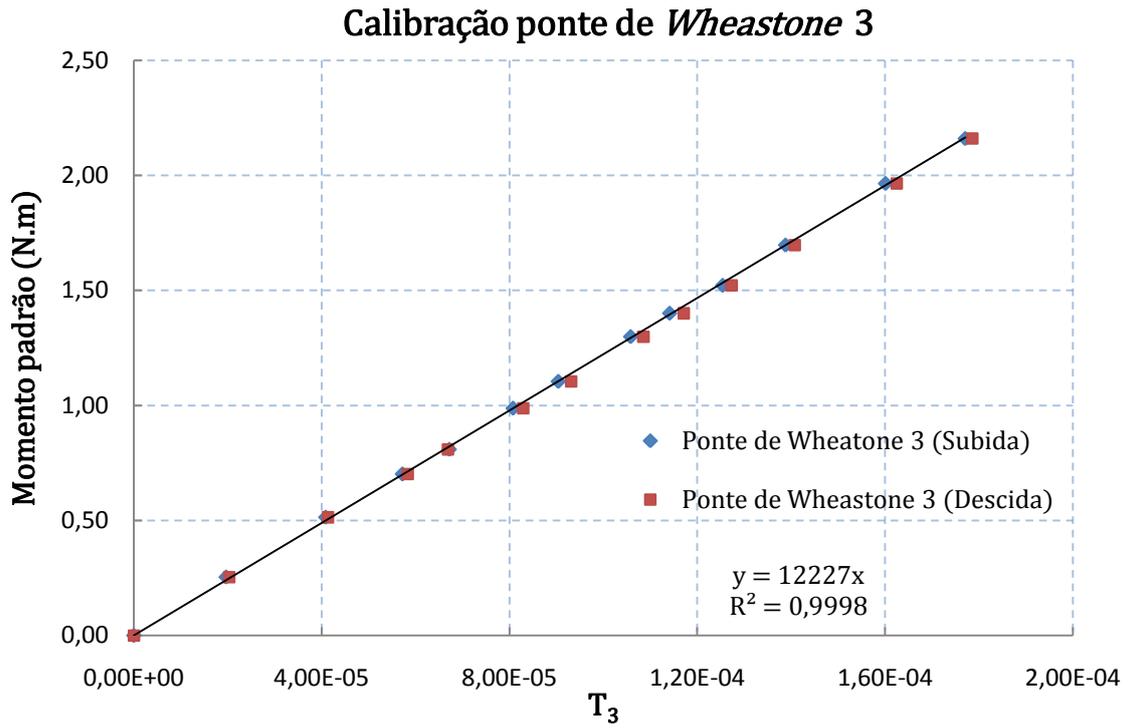


Figura III-2 - Gráfico dos ensaios de calibração da ponte de *Wheastone* 2

A calibração da célula de carga para medição do momento de arfagem também foi realizada *in loco*. Aplicou-se um momento conhecido na célula de carga, posicionando pesos padrão em um braço de 0,1 metros de comprimento. Foram realizados dez ensaios de calibração com aumento e diminuição de carga (subida e descida). Os gráficos mostram a média dos resultados desses ensaios.

Foram considerados apenas os valores dos ensaios de subida de carga para efeito de cálculo dos coeficientes de proporcionalidade ( $K$ ).



**Figura III-3 - Gráfico dos ensaios de calibração da ponte de *Wheastone* 3**

Os resultados mostram boa linearidade e a diferença entre a subida e descida de carga pode ser atribuída ao atrito seco entre as estruturas móveis.

## IV - ANÁLISE DE INCERTEZAS E TABELAS DE DADOS

A incerteza associada às medições realizadas nos ensaios para aquisição dos coeficientes hidrodinâmicos foi obtida da seguinte forma:

$$\sigma C_L = \sqrt{\left(\frac{\partial C_L}{\partial L} \cdot \sigma L\right)^2 + \left(\frac{\partial C_L}{\partial U} \cdot \sigma U\right)^2} \quad IV.1$$

$$\sigma C_D = \sqrt{\left(\frac{\partial C_D}{\partial D} \cdot \sigma D\right)^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial U} \cdot \sigma U\right)^2} \quad IV.2$$

$$\sigma C_M = \sqrt{\left(\frac{\partial C_M}{\partial M} \cdot \sigma M\right)^2 + \left(\frac{\partial C_M}{\partial U} \cdot \sigma U\right)^2} \quad IV.3$$

onde

$$U = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad IV.4$$

e

$$\sigma U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial \Delta H} \cdot \sigma \Delta H\right)^2} \quad IV.5$$

Os valores de  $\sigma L$ ,  $\sigma D$  e  $\sigma M$  foram obtidos a partir da amplitude observada nos ensaios realizados, onde amplitude é definido como a diferença entre o maior e menor valor encontrado nas cinco repetições dos ensaios realizados. Já  $\sigma \Delta H$  foi definido como o erro instrumental da régua milimétrica utilizada nos manômetros diferenciais de coluna d'água, ou seja:

$$\sigma \Delta H = 0,0005 \text{ m} \quad IV.6$$

A incerteza percentual de cada coeficiente hidrodinâmico foi obtida da seguinte forma:

$$\sigma C_L(\%) = \frac{\sigma C_L}{C_{L,\text{médio}}} \times 100 \quad IV.7$$

$$\sigma C_D(\%) = \frac{\sigma C_D}{C_{D,\text{médio}}} \times 100 \quad IV.8$$

$$\sigma C_M(\%) = \frac{\sigma C_M}{C_{M,m\u00e9dio}} \times 100 \quad IV.9$$

As demais grandezas associadas à medição dos coeficientes hidrodinâmicos e à velocidade do escoamento tais quais:  $g$ ,  $\rho_{H_2O}$ ,  $c$  e  $A_p$  foram consideradas constantes.

Seguem as tabelas contendo os dados utilizados para a confecção dos gráficos dos resultados no capítulo 4 e a incerteza associada a cada medição. Também os dados obtidos nos ensaios de calibração das pontes de *Wheastone* 1, 2 e 3.

### Ensaio Estáticos

Seguem a média aritmética e a incerteza estimadas nos valores dos coeficientes hidrodinâmicos nas cinco repetições realizadas no caso estático para números de *Reynolds* iguais a 97.000, 124.000 e 150.000.

Tabela IV-1 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático Re=97.000

$\alpha$ (°)	$C_{L,m\u00e9dio}$	$\sigma C_L(\%)$	$C_{D,m\u00e9dio}$	$\sigma C_D(\%)$	$C_{M,m\u00e9dio}$	$\sigma C_M(\%)$
0,00	0,000	-----	0,005	-----	-0,001	-----
0,93	0,065	4,72%	0,010	5,82%	0,004	4,74%
1,87	0,183	3,90%	0,016	4,41%	0,000	-----
3,12	0,354	7,98%	0,022	7,02%	-0,009	7,60%
4,05	0,489	4,84%	0,025	4,80%	-0,018	8,25%
4,99	0,617	3,53%	0,031	4,29%	-0,027	6,83%
5,92	0,705	5,93%	0,037	6,49%	-0,029	4,81%
6,86	0,793	4,11%	0,044	5,48%	-0,032	5,61%
8,10	0,834	6,61%	0,048	5,54%	-0,035	4,80%
9,04	0,869	5,29%	0,053	4,30%	-0,033	2,61%
9,97	0,898	7,03%	0,055	5,62%	-0,028	3,44%
10,91	0,901	3,43%	0,058	7,31%	-0,021	4,66%
12,15	0,626	7,93%	0,126	6,27%	-0,017	5,82%
13,09	0,588	6,04%	0,149	7,31%	-0,018	6,24%
14,02	0,464	8,49%	0,160	6,61%	-0,019	6,38%
14,96	0,449	7,75%	0,168	5,74%	-0,03	4,63%
15,89	0,448	6,57%	0,170	7,38%	-0,038	5,98%
17,14	0,474	6,48%	0,183	6,64%	-0,044	5,86%
18,07	0,539	6,74%	0,199	5,25%	-0,046	5,53%
19,01	0,591	7,60%	0,207	4,31%	-0,045	5,44%
19,94	0,620	10,35%	0,232	13,45%	-0,042	8,60%

Tabela IV-2 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático Re=124.000

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L(\%)$	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D(\%)$	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M(\%)$
0,00	0,003	-----	0,016	-----	-0,001	-----
0,93	0,056	4,72%	0,017	4,62%	-0,004	4,57%
1,87	0,140	8,50%	0,018	3,80%	-0,003	3,76%
3,12	0,301	7,52%	0,021	9,91%	-0,001	6,89%
4,05	0,47	8,05%	0,022	4,74%	0,004	4,69%
4,99	0,613	4,70%	0,025	6,41%	0,011	5,38%
5,92	0,668	4,59%	0,027	5,81%	0,015	5,76%
6,86	0,726	5,33%	0,03	4,01%	0,017	3,97%
8,10	0,784	9,43%	0,032	6,55%	0,021	6,52%
9,04	0,821	4,68%	0,035	5,18%	0,020	5,13%
9,97	0,867	6,66%	0,042	8,95%	0,019	4,94%
10,91	0,916	8,01%	0,054	3,33%	0,004	3,29%
12,15	0,961	5,69%	0,067	7,87%	-0,015	7,84%
13,09	0,481	8,99%	0,098	5,93%	-0,023	5,87%
14,02	0,480	7,58%	0,114	8,35%	-0,032	8,28%
14,96	0,470	6,81%	0,129	7,63%	-0,035	7,55%
15,89	0,515	7,68%	0,141	6,45%	-0,044	6,39%
17,14	0,499	5,47%	0,159	5,57%	-0,049	6,30%
18,07	0,563	8,42%	0,175	6,62%	-0,056	10,55%
19,01	0,587	10,02%	0,196	7,48%	-0,051	7,41%
19,94	0,588	8,65%	0,214	8,27%	-0,064	9,21%

Tabela IV-3 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático Re=150.000

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L(\%)$	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D(\%)$	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M(\%)$
0,00	0,003	-----	0,010	-----	0,002	-----
0,93	0,086	4,34%	0,007	4,38%	0,005	4,41%
1,87	0,172	4,57%	0,009	7,60%	0,008	7,62%
3,12	0,309	5,75%	0,011	7,77%	0,011	7,79%
4,05	0,467	4,45%	0,019	4,50%	0,004	4,52%
4,99	0,638	6,21%	0,022	8,24%	-0,014	3,28%
5,92	0,739	5,48%	0,024	5,53%	-0,013	5,56%
6,86	0,808	8,76%	0,025	3,81%	-0,004	4,82%
8,10	0,873	4,39%	0,024	9,42%	0,003	3,44%
9,04	0,908	9,88%	0,022	4,93%	0,003	4,96%
9,97	0,944	5,79%	0,022	10,81%	-0,006	4,83%
10,91	0,978	3,12%	0,021	6,14%	-0,018	6,16%
12,15	1,007	8,70%	0,043	4,73%	-0,029	7,74%
13,09	0,466	5,59%	0,127	5,64%	-0,030	5,68%
14,02	0,455	7,88%	0,137	7,96%	-0,033	8,01%
14,96	0,495	7,19%	0,151	7,26%	-0,034	7,31%
15,89	0,540	6,08%	0,170	6,14%	-0,039	6,18%
17,14	0,600	11,00%	0,197	6,06%	-0,043	6,09%
18,07	0,616	6,24%	0,220	6,30%	-0,047	6,34%
19,01	0,624	7,05%	0,237	7,12%	-0,059	11,16%
19,94	0,669	12,96%	0,271	5,01%	-0,068	5,04%

## Ensaio Dinâmicos

Seguem a média aritmética e a incerteza estimadas nos valores dos coeficientes hidrodinâmicos nas cinco repetições realizadas no caso dinâmico para número de *Reynolds* igual a 124.000 e velocidades angulares iguais a 0,06, 0,13 e 0,19 rad/s.

Tabela IV-4 - Tabela de dados e incertezas para o caso dinâmico  $Re=124.000$  e  $\omega=0,06$  rad/s

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L$ (%)	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D$ (%)	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M$ (%)
0,00	0,017	-----	0,006	-----	-0,002	----
0,65	0,080	4,47%	0,013	4,43%	-0,002	4,31%
1,32	0,149	8,66%	0,017	3,64%	-0,001	3,55%
1,97	0,215	4,84%	0,023	6,80%	-0,001	4,73%
2,61	0,278	4,59%	0,031	4,54%	0,000	-----
3,29	0,344	3,33%	0,032	3,29%	0,001	3,20%
3,92	0,403	5,63%	0,033	5,57%	0,001	5,42%
4,58	0,464	3,88%	0,033	3,84%	0,002	8,72%
5,25	0,529	6,47%	0,036	8,43%	0,003	5,37%
5,87	0,607	5,02%	0,038	4,98%	0,003	4,84%
6,55	0,677	3,88%	0,038	7,84%	0,004	3,77%
7,22	0,745	3,22%	0,037	3,19%	0,005	3,10%
7,86	0,802	2,80%	0,034	2,78%	0,006	7,68%
8,52	0,859	5,74%	0,033	4,69%	0,008	5,53%
9,17	0,915	8,09%	0,031	4,02%	0,010	4,80%
9,82	0,962	7,39%	0,030	4,32%	0,013	6,11%
10,49	1,004	6,25%	0,028	6,18%	0,015	6,01%
11,14	1,041	6,16%	0,027	5,10%	0,018	4,94%
11,79	1,080	6,41%	0,025	5,83%	0,020	5,78%
12,45	1,106	7,24%	0,022	4,31%	0,023	4,27%
13,11	1,127	5,10%	0,025	3,55%	0,025	3,52%
13,75	1,166	6,06%	0,030	12,71%	0,026	12,69%
14,42	1,188	4,47%	0,037	4,42%	0,026	4,38%
15,06	1,215	3,68%	0,048	3,20%	0,026	3,17%
15,72	1,231	11,82%	0,067	5,42%	0,026	5,37%
16,39	1,261	4,59%	0,089	7,73%	0,026	13,68%
17,03	1,273	8,31%	0,144	12,36%	0,024	9,34%
17,69	1,249	5,63%	0,191	4,84%	0,022	4,79%
18,36	1,122	3,88%	0,207	5,76%	0,026	7,74%
18,98	1,090	12,46%	0,218	7,08%	0,029	6,16%
19,65	1,132	9,01%	0,267	9,67%	0,028	9,64%

Tabela IV-5 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático  $Re=124.000$  e  $\omega=0,13$  rad/s

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L$ (%)	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D$ (%)	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M$ (%)
0,00	0,067	-----	0,014	-----	-0,003	----
1,26	0,199	4,61%	0,012	4,47%	-0,004	5,42%
2,61	0,310	6,63%	0,014	3,68%	-0,002	3,64%
3,89	0,437	3,93%	0,022	2,85%	0,000	-----
5,20	0,586	4,42%	0,029	4,58%	0,001	4,94%
6,55	0,751	3,69%	0,030	3,32%	0,003	8,96%
7,81	0,873	5,45%	0,028	5,62%	0,006	5,57%
9,14	0,958	3,85%	0,032	3,88%	0,012	3,94%
10,49	1,037	8,76%	0,037	9,45%	0,018	2,96%
11,75	1,115	4,84%	0,042	5,01%	0,022	4,97%
13,07	1,184	6,76%	0,041	9,85%	0,023	9,83%
14,40	1,237	8,08%	0,060	9,19%	0,022	8,17%
15,66	1,270	12,67%	0,097	8,77%	0,022	10,74%
17,01	1,252	5,53%	0,156	5,74%	0,022	12,67%
18,32	1,198	7,79%	0,247	11,08%	0,021	8,01%
19,60	1,038	7,11%	0,286	7,38%	0,029	7,31%

Tabela IV-6 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático  $Re=124.000$  e  $\omega=0,19$  rad/s

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L$ (%)	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D$ (%)	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M$ (%)
0,00	0,052	----	0,016	----	-0,004	----
1,89	0,249	4,77%	0,011	4,83%	-0,005	4,87%
3,92	0,416	3,93%	0,014	3,97%	-0,001	4,01%
5,84	0,628	9,01%	0,030	3,07%	0,001	3,10%
7,80	0,825	4,89%	0,047	4,95%	0,006	5,00%
9,82	0,951	7,53%	0,065	3,59%	0,015	3,61%
11,75	1,066	6,01%	0,090	6,07%	0,021	6,13%
13,7	1,165	4,14%	0,116	4,19%	0,019	4,23%
15,73	1,240	12,62%	0,136	2,69%	0,019	8,68%
17,65	1,348	5,35%	0,175	5,41%	0,018	11,46%
19,61	1,191	13,05%	0,279	8,09%	0,021	9,11%

Seguem a média aritmética e a incerteza estimadas nos valores dos coeficientes hidrodinâmicos nas cinco repetições realizadas no caso dinâmico para número de *Reynolds* igual a 150.000 e velocidades angulares iguais a 0,06, 0,13 e 0,19 rad/s.

**Tabela IV-7 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático  $Re=150.000$  e  $\omega=0,06$  rad/s**

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L$ (%)	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D$ (%)	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M$ (%)
0,00	0,007	----	0,015	----	-0,001	----
0,63	0,055	4,24%	0,012	7,33%	-0,002	4,85%
1,31	0,104	3,49%	0,006	8,74%	-0,001	3,98%
1,92	0,149	7,68%	0,010	9,11%	-0,001	3,08%
2,60	0,191	4,35%	0,011	8,42%	-0,001	4,97%
3,27	0,256	3,15%	0,017	2,48%	0,000	----
3,92	0,316	5,35%	0,017	4,21%	0,000	----
4,57	0,389	3,68%	0,018	2,90%	0,000	----
5,24	0,463	8,34%	0,020	1,86%	0,000	----
5,86	0,544	4,77%	0,021	3,76%	0,000	----
6,54	0,622	6,72%	0,026	2,16%	-0,002	3,12%
7,20	0,696	3,05%	0,030	2,40%	-0,002	3,48%
7,83	0,750	7,64%	0,030	2,10%	-0,002	3,03%
8,51	0,797	5,46%	0,035	4,29%	0,000	----
9,18	0,832	7,69%	0,028	6,05%	0,003	8,80%
9,80	0,862	7,02%	0,026	5,52%	0,006	8,03%
10,47	0,895	5,94%	0,026	4,67%	0,008	6,79%
11,13	0,933	5,86%	0,029	4,61%	0,010	6,70%
11,77	0,965	6,09%	0,022	4,79%	0,012	6,97%
12,44	0,997	6,88%	0,028	5,42%	0,013	7,87%
13,10	1,009	4,85%	0,023	3,82%	0,014	5,54%
13,74	1,043	5,76%	0,020	4,53%	0,014	6,58%
14,41	1,066	4,24%	0,020	3,34%	0,013	4,85%
15,05	1,063	3,49%	0,024	12,73%	0,013	13,97%
15,71	1,068	12,67%	0,036	9,11%	0,013	3,08%
16,38	1,085	4,35%	0,061	9,42%	0,013	4,97%
17,01	1,087	3,15%	0,099	11,47%	0,012	3,60%
17,67	1,068	5,35%	0,170	4,21%	0,010	6,11%
18,34	0,982	9,67%	0,224	9,89%	0,007	4,20%
18,97	0,824	12,33%	0,232	11,83%	0,013	12,66%
19,64	0,850	8,77%	0,244	7,75%	0,012	9,45%

Tabela IV-8 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático Re=150.000 e  $\omega=0,13$  rad/s

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L$ (%)	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D$ (%)	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M$ (%)
0,00	0,033	----	0,013	----	-0,002	----
1,26	0,134	4,25%	0,009	4,37%	-0,002	4,43%
2,61	0,247	3,50%	0,008	3,60%	-0,001	3,65%
3,89	0,371	2,70%	0,004	2,78%	-0,001	2,82%
5,20	0,519	4,36%	0,003	4,49%	-0,001	4,55%
6,55	0,672	3,15%	0,016	3,25%	-0,002	3,98%
7,81	0,800	5,36%	0,017	5,52%	-0,001	5,59%
9,14	0,886	3,69%	0,024	4,79%	0,004	3,84%
10,49	0,949	5,34%	0,035	2,42%	0,009	2,95%
11,75	1,020	4,77%	0,031	4,92%	0,012	4,98%
13,07	1,070	5,72%	0,040	2,82%	0,013	2,85%
14,40	1,102	10,04%	0,047	9,13%	0,012	7,18%
15,66	1,130	8,64%	0,058	2,73%	0,011	8,76%
17,01	1,145	5,47%	0,096	5,63%	0,011	5,71%
18,34	1,191	10,71%	0,177	7,94%	0,009	8,04%
19,62	1,039	7,03%	0,264	10,24%	0,010	11,34%

Tabela IV-9 - Tabela de dados e incertezas para o caso estático Re=150.000 e  $\omega=0,19$  rad/s

$\alpha$ (°)	$C_{L,médio}$	$\sigma C_L$ (%)	$C_{D,médio}$	$\sigma C_D$ (%)	$C_{M,médio}$	$\sigma C_M$ (%)
0,00	0,045	----	0,011	----	-0,003	----
1,96	0,202	4,31%	0,005	4,23%	-0,004	4,72%
3,95	0,382	3,55%	0,002	3,49%	-0,003	5,24%
5,84	0,613	6,73%	0,003	2,69%	-0,004	6,72%
7,83	0,807	4,42%	0,022	4,34%	-0,002	5,79%
9,86	0,928	3,20%	0,039	3,14%	0,006	4,02%
11,78	1,044	5,44%	0,039	5,34%	0,010	5,43%
13,74	1,139	6,74%	0,039	5,67%	0,007	6,36%
15,76	1,198	8,38%	0,067	9,33%	0,006	11,50%
17,69	1,230	7,85%	0,179	8,76%	0,002	13,05%
19,64	0,942	12,76%	0,254	10,72%	0,009	11,74%

## Dados obtidos no ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 1*

Tabela IV-10 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 1*

Peso padrão (N)	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
	Subida	Descida								
	T <sub>1</sub>									
0,00	-6,35x10 <sup>-08</sup>	-2,17x10 <sup>-06</sup>	-6,47x10 <sup>-08</sup>	-1,83x10 <sup>-06</sup>	-6,12x10 <sup>-08</sup>	-1,83x10 <sup>-06</sup>	-6,12x10 <sup>-08</sup>	-1,83x10 <sup>-06</sup>	-6,29x10 <sup>-08</sup>	-1,83x10 <sup>-06</sup>
2,54	-2,01x10 <sup>-05</sup>	-1,85x10 <sup>-05</sup>	-2,18x10 <sup>-05</sup>	-1,96x10 <sup>-05</sup>	-2,06x10 <sup>-05</sup>	-1,96x10 <sup>-05</sup>	-2,06x10 <sup>-05</sup>	-1,86x10 <sup>-05</sup>	-2,12x10 <sup>-05</sup>	-1,96x10 <sup>-05</sup>
5,14	-3,97x10 <sup>-05</sup>	-3,39x10 <sup>-05</sup>	-4,19x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>	-3,96x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>	-3,96x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>	-4,07x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>
7,02	-5,56x10 <sup>-05</sup>	-4,95x10 <sup>-05</sup>	-5,59x10 <sup>-05</sup>	-6,00x10 <sup>-05</sup>	-5,59x10 <sup>-05</sup>	-6,52x10 <sup>-05</sup>	-5,58x10 <sup>-05</sup>	-5,22x10 <sup>-05</sup>	-5,56x10 <sup>-05</sup>	-6,22x10 <sup>-05</sup>
8,09	-6,50x10 <sup>-05</sup>	-5,31x10 <sup>-05</sup>	-6,64x10 <sup>-05</sup>	-6,22x10 <sup>-05</sup>	-6,28x10 <sup>-05</sup>	-7,40x10 <sup>-05</sup>	-6,28x10 <sup>-05</sup>	-7,00x10 <sup>-05</sup>	-6,46x10 <sup>-05</sup>	-6,89x10 <sup>-05</sup>
9,88	-7,66x10 <sup>-05</sup>	-6,99x10 <sup>-05</sup>	-8,04x10 <sup>-05</sup>	-6,99x10 <sup>-05</sup>	-7,89x10 <sup>-05</sup>	-8,59x10 <sup>-05</sup>	-7,99x10 <sup>-05</sup>	-7,99x10 <sup>-05</sup>	-7,81x10 <sup>-05</sup>	-7,20x10 <sup>-05</sup>
11,05	-9,04x10 <sup>-05</sup>	-9,04x10 <sup>-05</sup>	-9,32x10 <sup>-05</sup>	-7,46x10 <sup>-05</sup>	-9,23x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>	-8,53x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>	-8,88x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>
12,99	-1,04x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-1,03x10 <sup>-04</sup>	-9,87x10 <sup>-05</sup>	-1,05x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-1,00x10 <sup>-04</sup>	-1,03x10 <sup>-04</sup>	-1,04x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>
14,01	-1,13x10 <sup>-04</sup>	-1,12x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,02x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,20x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,19x10 <sup>-04</sup>	-1,14x10 <sup>-04</sup>	-1,19x10 <sup>-04</sup>
15,22	-1,27x10 <sup>-04</sup>	-1,22x10 <sup>-04</sup>	-1,23x10 <sup>-04</sup>	-1,24x10 <sup>-04</sup>	-1,22x10 <sup>-04</sup>	-1,24x10 <sup>-04</sup>	-1,20x10 <sup>-04</sup>	-1,22x10 <sup>-04</sup>	-1,25x10 <sup>-04</sup>	-1,24x10 <sup>-04</sup>
16,97	-1,30x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,34x10 <sup>-04</sup>	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,33x10 <sup>-04</sup>	-1,33x10 <sup>-04</sup>	-1,33x10 <sup>-04</sup>	-1,43x10 <sup>-04</sup>	-1,30x10 <sup>-04</sup>	-1,43x10 <sup>-04</sup>
19,65	-1,58x10 <sup>-04</sup>	-1,55x10 <sup>-04</sup>	-1,55x10 <sup>-04</sup>	-1,66x10 <sup>-04</sup>	-1,54x10 <sup>-04</sup>	-1,66x10 <sup>-04</sup>	-1,57x10 <sup>-04</sup>	-1,56x10 <sup>-04</sup>	-1,56x10 <sup>-04</sup>	-1,56x10 <sup>-04</sup>
21,60	-1,76x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,73x10 <sup>-04</sup>	-1,72x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>

Tabela IV-11 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 1* (continuação)

Peso padrão (N)	Ensaio 6		Ensaio 7		Ensaio 8		Ensaio 9		Ensaio 10	
	Subida	Descida								
	T <sub>1</sub>									
0,00	-6,29x10 <sup>-08</sup>	-1,83x10 <sup>-06</sup>								
2,54	-2,12x10 <sup>-05</sup>	-1,96x10 <sup>-05</sup>	-2,12x10 <sup>-05</sup>	-1,76x10 <sup>-05</sup>	-2,12x10 <sup>-05</sup>	-3,40x10 <sup>-05</sup>	-2,12x10 <sup>-05</sup>	-3,96x10 <sup>-05</sup>	-2,12x10 <sup>-05</sup>	-3,96x10 <sup>-05</sup>
5,14	-4,07x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>	-4,07x10 <sup>-05</sup>	-4,55x10 <sup>-05</sup>	-4,07x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>	-4,07x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>	-4,07x10 <sup>-05</sup>	-4,54x10 <sup>-05</sup>
7,02	-5,55x10 <sup>-05</sup>	-6,42x10 <sup>-05</sup>	-5,55x10 <sup>-05</sup>	-6,48x10 <sup>-05</sup>	-5,55x10 <sup>-05</sup>	-5,62x10 <sup>-05</sup>	-5,55x10 <sup>-05</sup>	-5,52x10 <sup>-05</sup>	-5,55x10 <sup>-05</sup>	-6,22x10 <sup>-05</sup>
8,09	-6,46x10 <sup>-05</sup>	-7,00x10 <sup>-05</sup>	-6,46x10 <sup>-05</sup>	-7,01x10 <sup>-05</sup>	-6,46x10 <sup>-05</sup>	-7,00x10 <sup>-05</sup>	-6,46x10 <sup>-05</sup>	-7,00x10 <sup>-05</sup>	-6,46x10 <sup>-05</sup>	-7,00x10 <sup>-05</sup>
9,88	-7,81x10 <sup>-05</sup>	-8,99x10 <sup>-05</sup>	-7,91x10 <sup>-05</sup>	-8,70x10 <sup>-05</sup>	-7,91x10 <sup>-05</sup>	-8,99x10 <sup>-05</sup>	-7,91x10 <sup>-05</sup>	-8,99x10 <sup>-05</sup>	-7,81x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>
11,05	-8,58x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>	-8,88x10 <sup>-05</sup>	-9,47x10 <sup>-05</sup>	-8,88x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>	-8,88x10 <sup>-05</sup>	-9,46x10 <sup>-05</sup>	-8,68x10 <sup>-05</sup>	-9,99x10 <sup>-05</sup>
12,99	-1,01x10 <sup>-04</sup>	-1,19x10 <sup>-04</sup>	-1,07x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-1,06x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-1,03x10 <sup>-04</sup>	-1,09x10 <sup>-04</sup>	-1,05x10 <sup>-04</sup>	-1,03x10 <sup>-04</sup>
14,01	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,20x10 <sup>-04</sup>	-1,14x10 <sup>-04</sup>	-1,13x10 <sup>-04</sup>	-1,14x10 <sup>-04</sup>	-1,19x10 <sup>-04</sup>	-1,14x10 <sup>-04</sup>	-1,19x10 <sup>-04</sup>	-1,14x10 <sup>-04</sup>	-1,19x10 <sup>-04</sup>
15,22	-1,21x10 <sup>-04</sup>	-1,26x10 <sup>-04</sup>	-1,26x10 <sup>-04</sup>	-1,33x10 <sup>-04</sup>	-1,21x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,23x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,21x10 <sup>-04</sup>	-1,28x10 <sup>-04</sup>
16,97	-1,38x10 <sup>-04</sup>	-1,43x10 <sup>-04</sup>	-1,37x10 <sup>-04</sup>	-1,40x10 <sup>-04</sup>	-1,39x10 <sup>-04</sup>	-1,43x10 <sup>-04</sup>	-1,38x10 <sup>-04</sup>	-1,46x10 <sup>-04</sup>	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,45x10 <sup>-04</sup>
19,65	-1,55x10 <sup>-04</sup>	-1,60x10 <sup>-04</sup>	-1,56x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,54x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,55x10 <sup>-04</sup>	-1,61x10 <sup>-04</sup>	-1,57x10 <sup>-04</sup>	-1,68x10 <sup>-04</sup>
21,60	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,73x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,76x10 <sup>-04</sup>	-1,75x10 <sup>-04</sup>	-1,74x10 <sup>-04</sup>	-1,72x10 <sup>-04</sup>	-1,74x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>

## Dados obtidos no ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 2*

Tabela IV-12 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 2*

Peso padrão (N)	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
	Subida	Descida								
	T <sub>2</sub>									
0,00	-4,31x10 <sup>-08</sup>	-1,36x10 <sup>-06</sup>	-4,39x10 <sup>-08</sup>	-1,35x10 <sup>-06</sup>	-4,54x10 <sup>-08</sup>	-1,38x10 <sup>-06</sup>	-4,57x10 <sup>-08</sup>	-1,39x10 <sup>-06</sup>	-4,57x10 <sup>-08</sup>	-1,38x10 <sup>-06</sup>
2,54	-2,62x10 <sup>-05</sup>	-2,82x10 <sup>-05</sup>	-2,72x10 <sup>-05</sup>	-2,81x10 <sup>-05</sup>	-2,70x10 <sup>-05</sup>	-2,86x10 <sup>-05</sup>	-2,69x10 <sup>-05</sup>	-2,89x10 <sup>-05</sup>	-2,68x10 <sup>-05</sup>	-2,86x10 <sup>-05</sup>
5,14	-4,97x10 <sup>-05</sup>	-5,74x10 <sup>-05</sup>	-5,02x10 <sup>-05</sup>	-5,71x10 <sup>-05</sup>	-5,08x10 <sup>-05</sup>	-5,11x10 <sup>-05</sup>	-5,13x10 <sup>-05</sup>	-5,88x10 <sup>-05</sup>	-5,22x10 <sup>-05</sup>	-5,23x10 <sup>-05</sup>
7,02	-6,84x10 <sup>-05</sup>	-7,37x10 <sup>-05</sup>	-7,29x10 <sup>-05</sup>	-7,33x10 <sup>-05</sup>	-7,25x10 <sup>-05</sup>	-7,46x10 <sup>-05</sup>	-6,93x10 <sup>-05</sup>	-7,54x10 <sup>-05</sup>	-6,96x10 <sup>-05</sup>	-7,48x10 <sup>-05</sup>
8,09	-7,92x10 <sup>-05</sup>	-8,31x10 <sup>-05</sup>	-8,20x10 <sup>-05</sup>	-8,26x10 <sup>-05</sup>	-8,24x10 <sup>-05</sup>	-8,40x10 <sup>-05</sup>	-7,79x10 <sup>-05</sup>	-8,50x10 <sup>-05</sup>	-7,96x10 <sup>-05</sup>	-8,42x10 <sup>-05</sup>
9,88	-9,57x10 <sup>-05</sup>	-9,87x10 <sup>-05</sup>	-1,01x10 <sup>-04</sup>	-9,82x10 <sup>-05</sup>	-1,01x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-9,80x10 <sup>-05</sup>	-1,01x10 <sup>-04</sup>	-9,75x10 <sup>-05</sup>	-1,00x10 <sup>-04</sup>
11,05	-1,07x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-1,10x10 <sup>-04</sup>	-1,09x10 <sup>-04</sup>	-1,08x10 <sup>-04</sup>	-1,34x10 <sup>-04</sup>	-1,08x10 <sup>-04</sup>	-1,12x10 <sup>-04</sup>	-1,09x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>
12,99	-1,26x10 <sup>-04</sup>	-1,32x10 <sup>-04</sup>	-1,26x10 <sup>-04</sup>	-1,33x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,40x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,31x10 <sup>-04</sup>	-1,25x10 <sup>-04</sup>	-1,33x10 <sup>-04</sup>
14,01	-1,39x10 <sup>-04</sup>	-1,40x10 <sup>-04</sup>	-1,37x10 <sup>-04</sup>	-1,39x10 <sup>-04</sup>	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,51x10 <sup>-04</sup>	-1,37x10 <sup>-04</sup>	-1,43x10 <sup>-04</sup>	-1,41x10 <sup>-04</sup>	-1,42x10 <sup>-04</sup>
15,22	-1,47x10 <sup>-04</sup>	-1,50x10 <sup>-04</sup>	-1,51x10 <sup>-04</sup>	-1,59x10 <sup>-04</sup>	-1,50x10 <sup>-04</sup>	-1,60x10 <sup>-04</sup>	-1,51x10 <sup>-04</sup>	-1,59x10 <sup>-04</sup>	-1,49x10 <sup>-04</sup>	-1,55x10 <sup>-04</sup>
16,97	-1,63x10 <sup>-04</sup>	-1,66x10 <sup>-04</sup>	-1,65x10 <sup>-04</sup>	-1,65x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,68x10 <sup>-04</sup>	-1,65x10 <sup>-04</sup>	-1,70x10 <sup>-04</sup>	-1,66x10 <sup>-04</sup>	-1,68x10 <sup>-04</sup>
19,65	-1,84x10 <sup>-04</sup>	-1,90x10 <sup>-04</sup>	-1,90x10 <sup>-04</sup>	-1,89x10 <sup>-04</sup>	-1,90x10 <sup>-04</sup>	-1,93x10 <sup>-04</sup>	-1,84x10 <sup>-04</sup>	-1,95x10 <sup>-04</sup>	-1,83x10 <sup>-04</sup>	-1,93x10 <sup>-04</sup>
21,60	-2,08x10 <sup>-04</sup>	-2,12x10 <sup>-04</sup>	-2,08x10 <sup>-04</sup>	-2,16x10 <sup>-04</sup>	-2,10x10 <sup>-04</sup>	-2,09x10 <sup>-04</sup>	-2,07x10 <sup>-04</sup>	-2,11x10 <sup>-04</sup>	-2,09x10 <sup>-04</sup>	-2,10x10 <sup>-04</sup>

Tabela IV-13 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 2* (continuação)

Peso padrão (N)	Ensaio 6		Ensaio 7		Ensaio 8		Ensaio 9		Ensaio 10	
	Subida	Descida								
	T <sub>2</sub>									
0,00	-4,33x10 <sup>-08</sup>	-1,37x10 <sup>-06</sup>	-4,34x10 <sup>-08</sup>	-1,38x10 <sup>-06</sup>	-4,44x10 <sup>-08</sup>	-1,40x10 <sup>-06</sup>	-4,43x10 <sup>-08</sup>	-1,38x10 <sup>-06</sup>	-4,42x10 <sup>-08</sup>	-1,37x10 <sup>-06</sup>
2,54	-2,70x10 <sup>-05</sup>	-2,85x10 <sup>-05</sup>	-2,66x10 <sup>-05</sup>	-2,86x10 <sup>-05</sup>	-2,66x10 <sup>-05</sup>	-2,90x10 <sup>-05</sup>	-2,68x10 <sup>-05</sup>	-2,86x10 <sup>-05</sup>	-2,69x10 <sup>-05</sup>	-2,86x10 <sup>-05</sup>
5,14	-5,26x10 <sup>-05</sup>	-5,19x10 <sup>-05</sup>	-5,17x10 <sup>-05</sup>	-5,81x10 <sup>-05</sup>	-5,27x10 <sup>-05</sup>	-5,01x10 <sup>-05</sup>	-5,16x10 <sup>-05</sup>	-5,81x10 <sup>-05</sup>	-5,12x10 <sup>-05</sup>	-5,21x10 <sup>-05</sup>
7,02	-6,87x10 <sup>-05</sup>	-7,44x10 <sup>-05</sup>	-6,88x10 <sup>-05</sup>	-7,46x10 <sup>-05</sup>	-6,88x10 <sup>-05</sup>	-7,58x10 <sup>-05</sup>	-7,17x10 <sup>-05</sup>	-7,46x10 <sup>-05</sup>	-6,95x10 <sup>-05</sup>	-7,46x10 <sup>-05</sup>
8,09	-7,86x10 <sup>-05</sup>	-8,88x10 <sup>-05</sup>	-7,96x10 <sup>-05</sup>	-8,40x10 <sup>-05</sup>	-7,87x10 <sup>-05</sup>	-8,54x10 <sup>-05</sup>	-7,95x10 <sup>-05</sup>	-8,80x10 <sup>-05</sup>	-7,94x10 <sup>-05</sup>	-8,40x10 <sup>-05</sup>
9,88	-9,60x10 <sup>-05</sup>	-9,96x10 <sup>-05</sup>	-9,61x10 <sup>-05</sup>	-1,09x10 <sup>-04</sup>	-9,62x10 <sup>-05</sup>	-1,02x10 <sup>-04</sup>	-9,60x10 <sup>-05</sup>	-9,99x10 <sup>-05</sup>	-9,88x10 <sup>-05</sup>	-9,99x10 <sup>-05</sup>
11,05	-1,07x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,07x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,07x10 <sup>-04</sup>	-1,13x10 <sup>-04</sup>	-1,07x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>	-1,09x10 <sup>-04</sup>	-1,11x10 <sup>-04</sup>
12,99	-1,25x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,26x10 <sup>-04</sup>	-1,30x10 <sup>-04</sup>	-1,23x10 <sup>-04</sup>	-1,32x10 <sup>-04</sup>	-1,22x10 <sup>-04</sup>	-1,30x10 <sup>-04</sup>	-1,29x10 <sup>-04</sup>	-1,30x10 <sup>-04</sup>
14,01	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,41x10 <sup>-04</sup>	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,41x10 <sup>-04</sup>	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,43x10 <sup>-04</sup>	-1,36x10 <sup>-04</sup>	-1,41x10 <sup>-04</sup>	-1,34x10 <sup>-04</sup>	-1,41x10 <sup>-04</sup>
15,22	-1,48x10 <sup>-04</sup>	-1,51x10 <sup>-04</sup>	-1,48x10 <sup>-04</sup>	-1,52x10 <sup>-04</sup>	-1,48x10 <sup>-04</sup>	-1,54x10 <sup>-04</sup>	-1,48x10 <sup>-04</sup>	-1,52x10 <sup>-04</sup>	-1,46x10 <sup>-04</sup>	-1,52x10 <sup>-04</sup>
16,97	-1,64x10 <sup>-04</sup>	-1,77x10 <sup>-04</sup>	-1,63x10 <sup>-04</sup>	-1,78x10 <sup>-04</sup>	-1,66x10 <sup>-04</sup>	-1,71x10 <sup>-04</sup>	-1,64x10 <sup>-04</sup>	-1,68x10 <sup>-04</sup>	-1,61x10 <sup>-04</sup>	-1,78x10 <sup>-04</sup>
19,65	-1,90x10 <sup>-04</sup>	-1,98x10 <sup>-04</sup>	-1,90x10 <sup>-04</sup>	-2,00x10 <sup>-04</sup>	-1,91x10 <sup>-04</sup>	-1,96x10 <sup>-04</sup>	-1,90x10 <sup>-04</sup>	-2,00x10 <sup>-04</sup>	-1,92x10 <sup>-04</sup>	-1,99x10 <sup>-04</sup>
21,60	-2,08x10 <sup>-04</sup>	-2,12x10 <sup>-04</sup>	-2,09x10 <sup>-04</sup>	-2,10x10 <sup>-04</sup>	-2,09x10 <sup>-04</sup>	-2,11x10 <sup>-04</sup>	-2,08x10 <sup>-04</sup>	-2,10x10 <sup>-04</sup>	-2,07x10 <sup>-04</sup>	-2,10x10 <sup>-04</sup>

## Dados obtidos no ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 3*

**Tabela IV-14 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 3***

Momento padrão (N.m)	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
	Subida	Descida								
	T <sub>3</sub>									
0,00	5,84x10 <sup>-10</sup>	5,84x10 <sup>-07</sup>	5,90x10 <sup>-10</sup>	5,96x10 <sup>-10</sup>	5,84x10 <sup>-10</sup>	5,93x10 <sup>-10</sup>	5,90x10 <sup>-10</sup>	5,96x10 <sup>-10</sup>	5,48x10 <sup>-10</sup>	5,84x10 <sup>-07</sup>
0,25	2,01x10 <sup>-05</sup>	2,15x10 <sup>-05</sup>	1,98x10 <sup>-05</sup>	2,00x10 <sup>-05</sup>	1,96x10 <sup>-05</sup>	2,05x10 <sup>-05</sup>	1,98x10 <sup>-05</sup>	2,00x10 <sup>-05</sup>	1,96x10 <sup>-05</sup>	2,15x10 <sup>-05</sup>
0,51	4,07x10 <sup>-05</sup>	3,88x10 <sup>-05</sup>	4,02x10 <sup>-05</sup>	4,36x10 <sup>-05</sup>	4,18x10 <sup>-05</sup>	4,25x10 <sup>-05</sup>	3,98x10 <sup>-05</sup>	4,36x10 <sup>-05</sup>	4,14x10 <sup>-05</sup>	3,77x10 <sup>-05</sup>
0,70	5,62x10 <sup>-05</sup>	5,62x10 <sup>-05</sup>	5,73x10 <sup>-05</sup>	5,87x10 <sup>-05</sup>	5,64x10 <sup>-05</sup>	6,08x10 <sup>-05</sup>	5,71x10 <sup>-05</sup>	5,87x10 <sup>-05</sup>	5,78x10 <sup>-05</sup>	5,84x10 <sup>-05</sup>
0,81	6,70x10 <sup>-05</sup>	6,54x10 <sup>-05</sup>	6,68x10 <sup>-05</sup>	6,36x10 <sup>-05</sup>	6,71x10 <sup>-05</sup>	6,71x10 <sup>-05</sup>	6,77x10 <sup>-05</sup>	7,36x10 <sup>-05</sup>	6,70x10 <sup>-05</sup>	6,81x10 <sup>-05</sup>
0,99	7,96x10 <sup>-05</sup>	8,36x10 <sup>-05</sup>	8,46x10 <sup>-05</sup>	8,53x10 <sup>-05</sup>	8,06x10 <sup>-05</sup>	8,48x10 <sup>-05</sup>	8,13x10 <sup>-05</sup>	8,53x10 <sup>-05</sup>	8,06x10 <sup>-05</sup>	8,48x10 <sup>-05</sup>
1,10	8,96x10 <sup>-05</sup>	9,01x10 <sup>-05</sup>	9,10x10 <sup>-05</sup>	9,64x10 <sup>-05</sup>	9,06x10 <sup>-05</sup>	9,61x10 <sup>-05</sup>	9,09x10 <sup>-05</sup>	9,64x10 <sup>-05</sup>	9,01x10 <sup>-05</sup>	9,01x10 <sup>-05</sup>
1,30	1,07x10 <sup>-04</sup>	1,11x10 <sup>-04</sup>	1,06x10 <sup>-04</sup>	1,13x10 <sup>-04</sup>	1,05x10 <sup>-04</sup>	1,06x10 <sup>-04</sup>	1,05x10 <sup>-04</sup>	1,06x10 <sup>-04</sup>	1,07x10 <sup>-04</sup>	1,11x10 <sup>-04</sup>
1,40	1,15x10 <sup>-04</sup>	1,20x10 <sup>-04</sup>	1,16x10 <sup>-04</sup>	1,18x10 <sup>-04</sup>	1,13x10 <sup>-04</sup>	1,19x10 <sup>-04</sup>	1,13x10 <sup>-04</sup>	1,18x10 <sup>-04</sup>	1,13x10 <sup>-04</sup>	1,17x10 <sup>-04</sup>
1,52	1,25x10 <sup>-04</sup>	1,32x10 <sup>-04</sup>	1,25x10 <sup>-04</sup>	1,26x10 <sup>-04</sup>	1,26x10 <sup>-04</sup>	1,27x10 <sup>-04</sup>	1,28x10 <sup>-04</sup>	1,23x10 <sup>-04</sup>	1,25x10 <sup>-04</sup>	1,30x10 <sup>-04</sup>
1,70	1,38x10 <sup>-04</sup>	1,41x10 <sup>-04</sup>	1,40x10 <sup>-04</sup>	1,40x10 <sup>-04</sup>	1,40x10 <sup>-04</sup>	1,42x10 <sup>-04</sup>	1,41x10 <sup>-04</sup>	1,43x10 <sup>-04</sup>	1,39x10 <sup>-04</sup>	1,40x10 <sup>-04</sup>
1,97	1,59x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,61x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,60x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,61x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,60x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>
2,16	1,75x10 <sup>-04</sup>	1,77x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,80x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,76x10 <sup>-04</sup>	1,75x10 <sup>-04</sup>	1,80x10 <sup>-04</sup>

**Tabela IV-15 - Tabela de dados do ensaio de calibração da ponte de *Wheastone 3* (continuação)**

Momento padrão (N.m)	Ensaio 6		Ensaio 7		Ensaio 8		Ensaio 9		Ensaio 10	
	Subida	Descida								
	T <sub>3</sub>									
0,00	5,87x10 <sup>-10</sup>	5,84x10 <sup>-10</sup>	5,82x10 <sup>-10</sup>	5,82x10 <sup>-10</sup>	5,87x10 <sup>-10</sup>	5,73x10 <sup>-10</sup>	5,82x10 <sup>-10</sup>	5,82x10 <sup>-10</sup>	5,86x10 <sup>-10</sup>	5,84x10 <sup>-07</sup>
0,25	1,97x10 <sup>-05</sup>	1,96x10 <sup>-05</sup>	1,95x10 <sup>-05</sup>	1,95x10 <sup>-05</sup>	1,97x10 <sup>-05</sup>	1,93x10 <sup>-05</sup>	1,95x10 <sup>-05</sup>	1,95x10 <sup>-05</sup>	1,92x10 <sup>-05</sup>	2,19x10 <sup>-05</sup>
0,51	4,11x10 <sup>-05</sup>	4,36x10 <sup>-05</sup>	4,09x10 <sup>-05</sup>	4,09x10 <sup>-05</sup>	4,10x10 <sup>-05</sup>	4,28x10 <sup>-05</sup>	4,16x10 <sup>-05</sup>	4,17x10 <sup>-05</sup>	4,05x10 <sup>-05</sup>	3,84x10 <sup>-05</sup>
0,70	5,71x10 <sup>-05</sup>	5,75x10 <sup>-05</sup>	5,85x10 <sup>-05</sup>	5,97x10 <sup>-05</sup>	5,77x10 <sup>-05</sup>	5,64x10 <sup>-05</sup>	5,71x10 <sup>-05</sup>	5,97x10 <sup>-05</sup>	5,70x10 <sup>-05</sup>	5,73x10 <sup>-05</sup>
0,81	6,71x10 <sup>-05</sup>	7,22x10 <sup>-05</sup>	6,75x10 <sup>-05</sup>	6,58x10 <sup>-05</sup>	6,71x10 <sup>-05</sup>	6,08x10 <sup>-05</sup>	6,74x10 <sup>-05</sup>	6,58x10 <sup>-05</sup>	6,72x10 <sup>-05</sup>	6,67x10 <sup>-05</sup>
0,99	8,21x10 <sup>-05</sup>	8,51x10 <sup>-05</sup>	7,92x10 <sup>-05</sup>	8,08x10 <sup>-05</sup>	8,23x10 <sup>-05</sup>	7,96x10 <sup>-05</sup>	7,92x10 <sup>-05</sup>	8,08x10 <sup>-05</sup>	8,23x10 <sup>-05</sup>	7,96x10 <sup>-05</sup>
1,10	9,08x10 <sup>-05</sup>	9,45x10 <sup>-05</sup>	9,04x10 <sup>-05</sup>	9,43x10 <sup>-05</sup>	9,09x10 <sup>-05</sup>	9,26x10 <sup>-05</sup>	9,02x10 <sup>-05</sup>	9,43x10 <sup>-05</sup>	9,06x10 <sup>-05</sup>	8,66x10 <sup>-05</sup>
1,30	1,07x10 <sup>-04</sup>	1,07x10 <sup>-04</sup>	1,06x10 <sup>-04</sup>	1,05x10 <sup>-04</sup>	1,07x10 <sup>-04</sup>	1,11x10 <sup>-04</sup>	1,03x10 <sup>-04</sup>	1,08x10 <sup>-04</sup>	1,05x10 <sup>-04</sup>	1,07x10 <sup>-04</sup>
1,40	1,16x10 <sup>-04</sup>	1,17x10 <sup>-04</sup>	1,12x10 <sup>-04</sup>	1,17x10 <sup>-04</sup>	1,17x10 <sup>-04</sup>	1,13x10 <sup>-04</sup>	1,13x10 <sup>-04</sup>	1,17x10 <sup>-04</sup>	1,15x10 <sup>-04</sup>	1,15x10 <sup>-04</sup>
1,52	1,24x10 <sup>-04</sup>	1,27x10 <sup>-04</sup>	1,25x10 <sup>-04</sup>	1,27x10 <sup>-04</sup>	1,27x10 <sup>-04</sup>	1,23x10 <sup>-04</sup>	1,26x10 <sup>-04</sup>	1,31x10 <sup>-04</sup>	1,24x10 <sup>-04</sup>	1,26x10 <sup>-04</sup>
1,70	1,39x10 <sup>-04</sup>	1,41x10 <sup>-04</sup>	1,38x10 <sup>-04</sup>	1,41x10 <sup>-04</sup>	1,39x10 <sup>-04</sup>	1,42x10 <sup>-04</sup>	1,38x10 <sup>-04</sup>	1,41x10 <sup>-04</sup>	1,37x10 <sup>-04</sup>	1,38x10 <sup>-04</sup>
1,97	1,58x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,59x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,58x10 <sup>-04</sup>	1,63x10 <sup>-04</sup>	1,61x10 <sup>-04</sup>	1,59x10 <sup>-04</sup>
2,16	1,78x10 <sup>-04</sup>	1,78x10 <sup>-04</sup>	1,76x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,75x10 <sup>-04</sup>	1,79x10 <sup>-04</sup>	1,75x10 <sup>-04</sup>	1,77x10 <sup>-04</sup>

As tabelas abaixo mostram a amplitude, a média aritmética dos dez ensaios e o percentual desta amplitude em relação à média aritmética dos dez ensaios de calibração das pontes de *Wheastone* 1, 2 e 3.

**Tabela IV-16 - Tabela de incertezas da calibração da ponte de *Wheastone* 1**

<b>Peso padrão (N)</b>	<b>Amplitude (V)</b>	<b>Média (V)</b>	<b>Amplitude (%)</b>
0,00	$3,56 \times 10^{-09}$	$-6,28 \times 10^{-08}$	----
2,54	$1,77 \times 10^{-06}$	$-2,11 \times 10^{-05}$	8,42%
5,14	$2,31 \times 10^{-06}$	$-4,05 \times 10^{-05}$	5,69%
7,02	$7,46 \times 10^{-07}$	$-5,56 \times 10^{-05}$	1,34%
8,09	$3,66 \times 10^{-06}$	$-6,44 \times 10^{-05}$	5,67%
9,88	$3,78 \times 10^{-06}$	$-7,87 \times 10^{-05}$	4,80%
11,05	$7,90 \times 10^{-06}$	$-8,89 \times 10^{-05}$	8,88%
12,99	$6,98 \times 10^{-06}$	$-1,04 \times 10^{-04}$	6,71%
14,01	$3,17 \times 10^{-06}$	$-1,12 \times 10^{-04}$	2,82%
15,22	$6,95 \times 10^{-06}$	$-1,23 \times 10^{-04}$	5,65%
16,97	$9,00 \times 10^{-06}$	$-1,35 \times 10^{-04}$	6,66%
19,65	$4,56 \times 10^{-06}$	$-1,56 \times 10^{-04}$	2,93%
21,60	$5,29 \times 10^{-06}$	$-1,72 \times 10^{-04}$	3,08%

**Tabela IV-17 - Tabela de incertezas da calibração da ponte de *Wheastone* 2**

<b>Peso padrão (N)</b>	<b>Amplitude (V)</b>	<b>Média (V)</b>	<b>Amplitude (%)</b>
0,00	$2,55 \times 10^{-09}$	$-4,43 \times 10^{-08}$	----
2,54	$9,86 \times 10^{-07}$	$-2,68 \times 10^{-05}$	3,68%
5,14	$3,00 \times 10^{-06}$	$-5,14 \times 10^{-05}$	5,83%
7,02	$4,52 \times 10^{-06}$	$-7,00 \times 10^{-05}$	6,45%
8,09	$4,48 \times 10^{-06}$	$-7,97 \times 10^{-05}$	5,62%
9,88	$5,55 \times 10^{-06}$	$-9,76 \times 10^{-05}$	5,68%
11,05	$3,33 \times 10^{-06}$	$-1,08 \times 10^{-04}$	3,09%
12,99	$7,45 \times 10^{-06}$	$-1,26 \times 10^{-04}$	5,91%
14,01	$7,22 \times 10^{-06}$	$-1,37 \times 10^{-04}$	5,28%
15,22	$5,66 \times 10^{-06}$	$-1,49 \times 10^{-04}$	3,81%
16,97	$8,60 \times 10^{-06}$	$-1,65 \times 10^{-04}$	5,22%
19,65	$8,47 \times 10^{-06}$	$-1,89 \times 10^{-04}$	4,49%
21,60	$2,58 \times 10^{-06}$	$-2,08 \times 10^{-04}$	1,24%

Tabela IV-18 - Tabela de incertezas da calibração da ponte de *Wheastone* 3

<b>Momento (N.m)</b>	<b>Amplitude (V)</b>	<b>Média (V)</b>	<b>Amplitude (%)</b>
0,00	$4,25E^{-11}$	$5,82E^{-10}$	----
0,25	$8,94E^{-07}$	$1,97E^{-05}$	4,54%
0,51	$1,97E^{-06}$	$4,09E^{-05}$	4,83%
0,70	$2,32E^{-06}$	$5,72E^{-05}$	4,06%
0,81	$9,00E^{-07}$	$7,00E^{-05}$	1,34%
0,99	$3,16E^{-06}$	$8,08E^{-05}$	3,91%
1,10	$1,35E^{-06}$	$9,16E^{-05}$	1,50%
1,30	$3,96E^{-06}$	$1,06E^{-04}$	3,74%
1,40	$5,12E^{-06}$	$1,16E^{-04}$	4,49%
1,52	$3,80E^{-06}$	$1,26E^{-04}$	3,03%
1,70	$4,43E^{-06}$	$1,39E^{-04}$	3,19%
1,97	$5,62E^{-06}$	$1,60E^{-04}$	3,51%
2,16	$5,09E^{-06}$	$1,77E^{-04}$	2,88%

# V - DIAGRAMA DE BLOCOS DO LABVIEW

## Ensaio estáticos

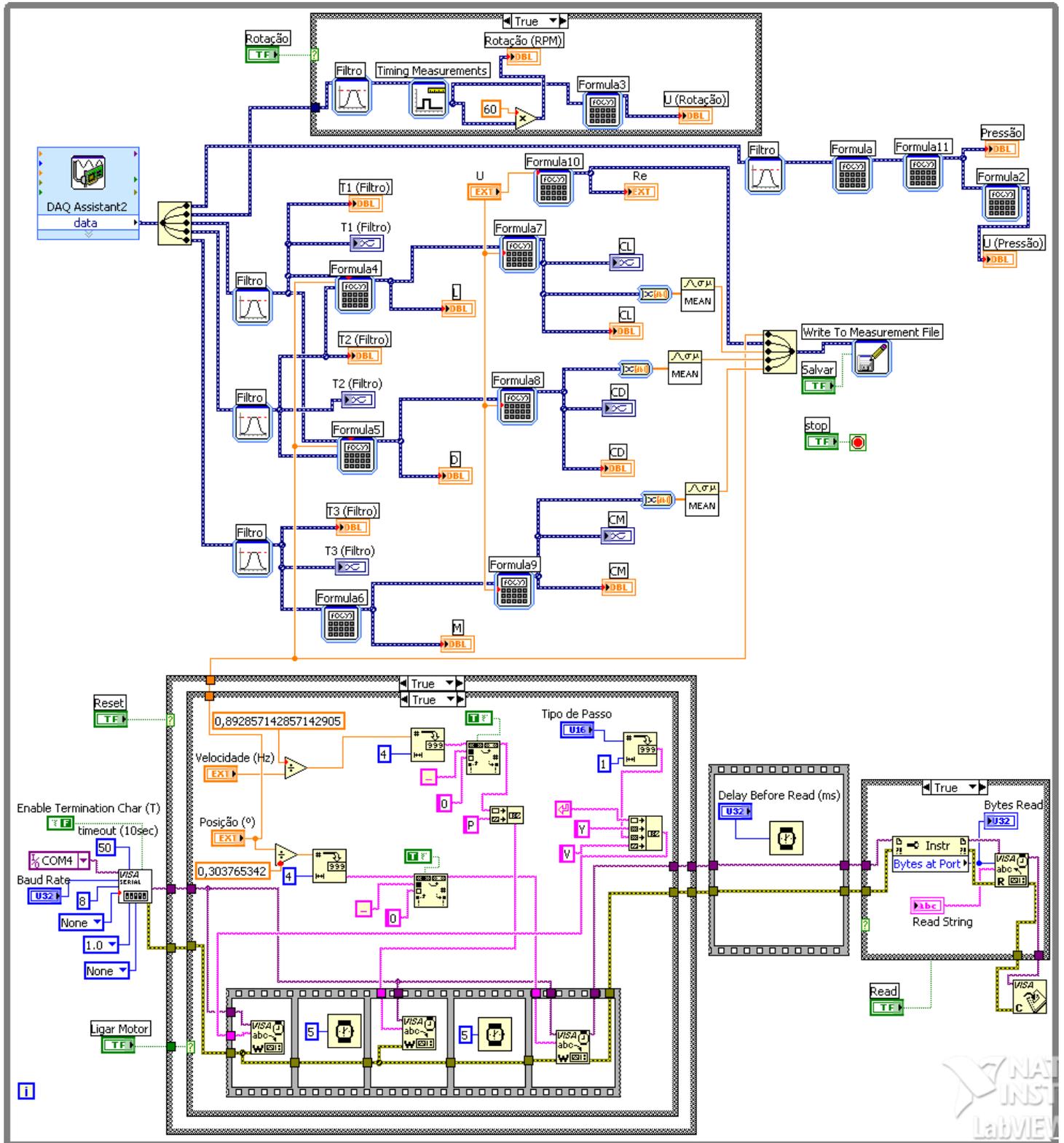


Figura V-1 - Diagrama de blocos do LabView para os ensaios estáticos

# Ensaio dinâmico

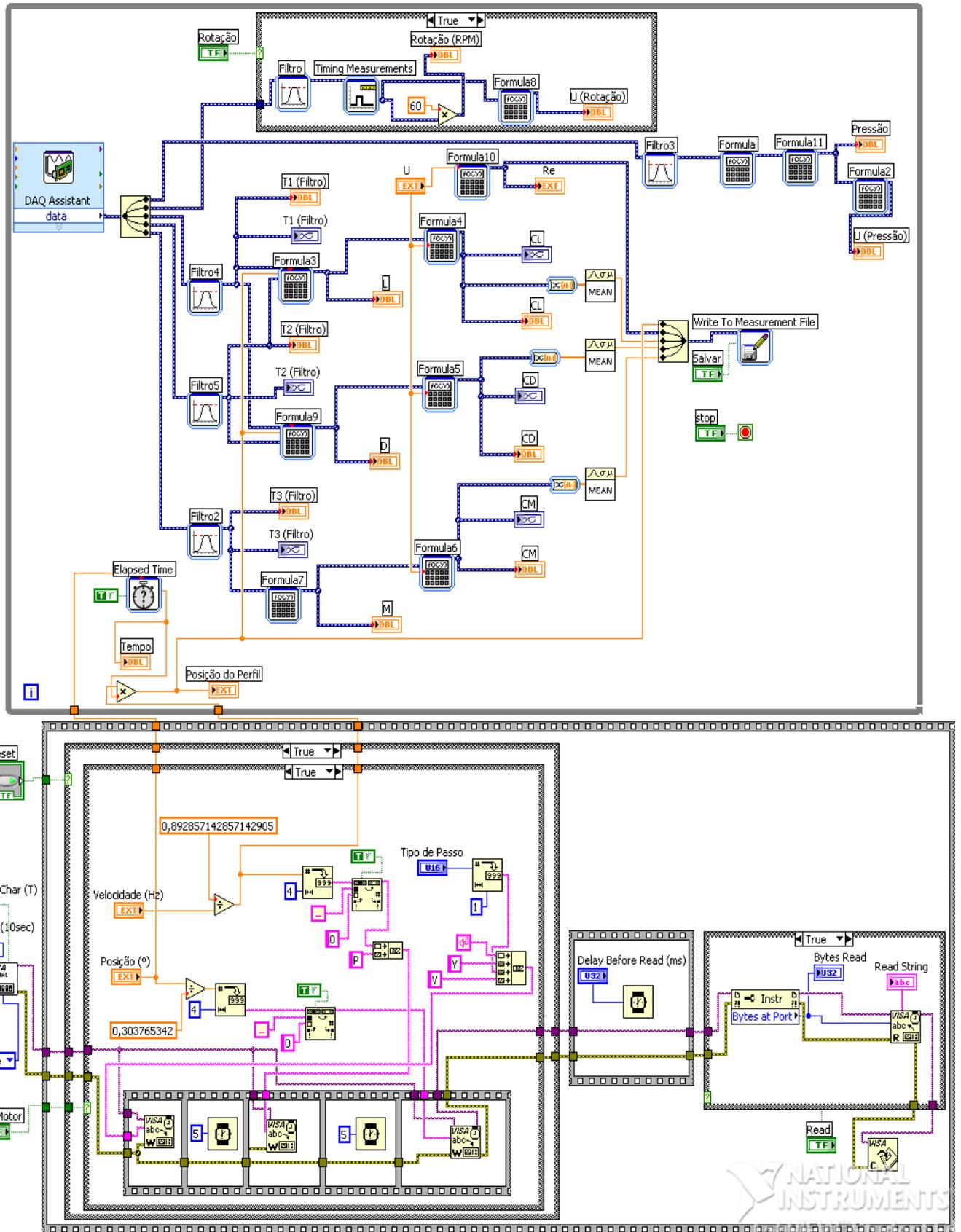


Figura V-2 - Diagrama de blocos do LabView para os ensaios dinâmicos

## VI -DIMENSIONAMENTO DA CÉLULA DE CARGA 1

O diâmetro da célula de carga foi dimensionado para garantir maior sensibilidade sem que haja risco de falha. O dimensionamento foi feito apenas para a primeira seção da célula de carga, pois é onde se encontra sua seção crítica. A força hidrodinâmica ( $F$ ), para  $C_L = 1,2$  e  $C_D = 0,6$ , que são os máximos coeficientes encontrados na literatura para o perfil utilizado na faixa de *Reynolds* estudada, e para  $U = 3 \text{ m/s}$  é dada por:

$$F = (L^2 + D^2)^{1/2} \quad (\text{VI. 1})$$

Supondo um carregamento uniforme sobre o perfil, a força aerodinâmica se localizará na metade da envergadura do perfil, assim:

$$V = F \cdot \frac{e}{2} \quad (\text{VI. 2})$$

Adotando-se  $d_0 = 0,009 \text{ m}$  e  $d_I = 0,004 \text{ m}$ , tem-se que:

$$\sigma_x = \frac{V \left( \frac{d_0}{2} \right)}{I} \quad (\text{VI. 3})$$

$$I = \frac{\pi}{64} (d_0^4 - d_I^4) \quad (\text{VI. 4})$$

Adotando-se o momento de arfagem ( $M$ ) para  $C_M = 0,2$  e  $U = 3 \text{ m/s}$  tem-se:

$$\tau_{zx} = \frac{M \left( \frac{d_0}{2} \right)}{J} \quad (\text{VI. 5})$$

$$J = \frac{\pi}{32} (d_0^4 - d_I^4) \quad (\text{VI. 6})$$

Então a seguinte equação foi adotada baseando-se no critério da teoria da energia de distorção.

$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau_{zx}^2)^{1/2} \quad (\text{VI. 7})$$

Obtendo-se:

$$\sigma' = 1,55 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

Sendo a tensão limite de escoamento do aço inox 316L  $S_y = 1,7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  tem-se conforme desejado que:

$$\sigma' \leq S_y$$

Obtendo um coeficiente de segurança igual a:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (\text{VI.8})$$

$$n = 1,09$$

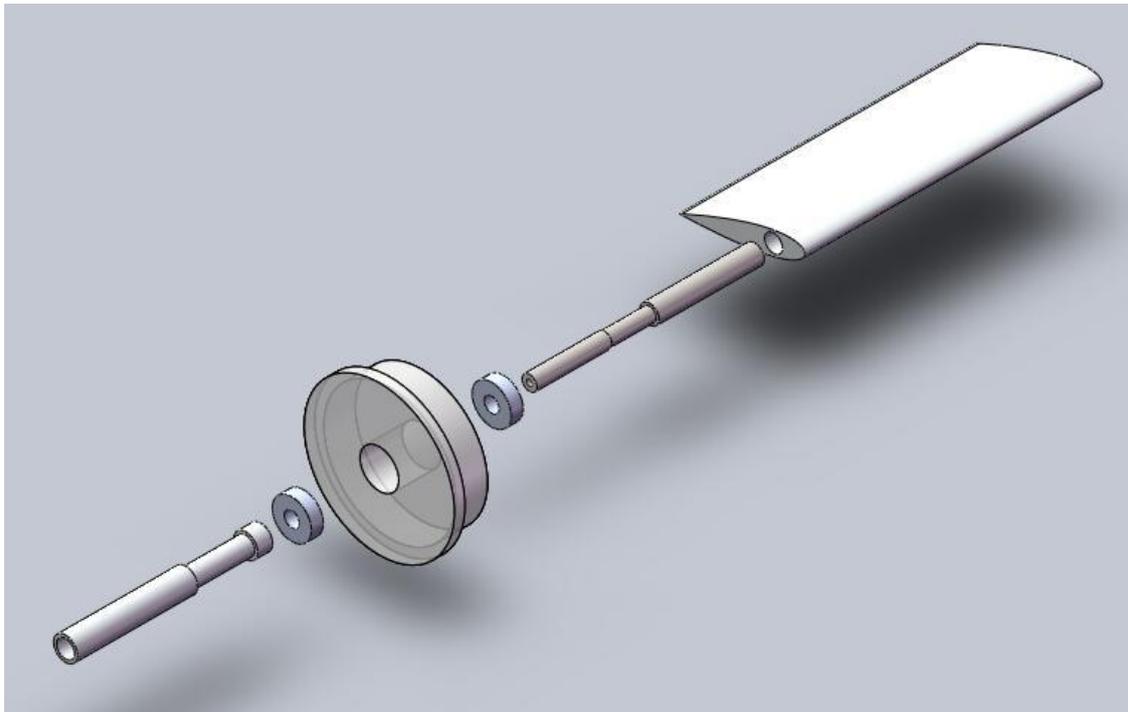


Figura VI-1 - Vista explodida da montagem do perfil, mancal e célula de carga

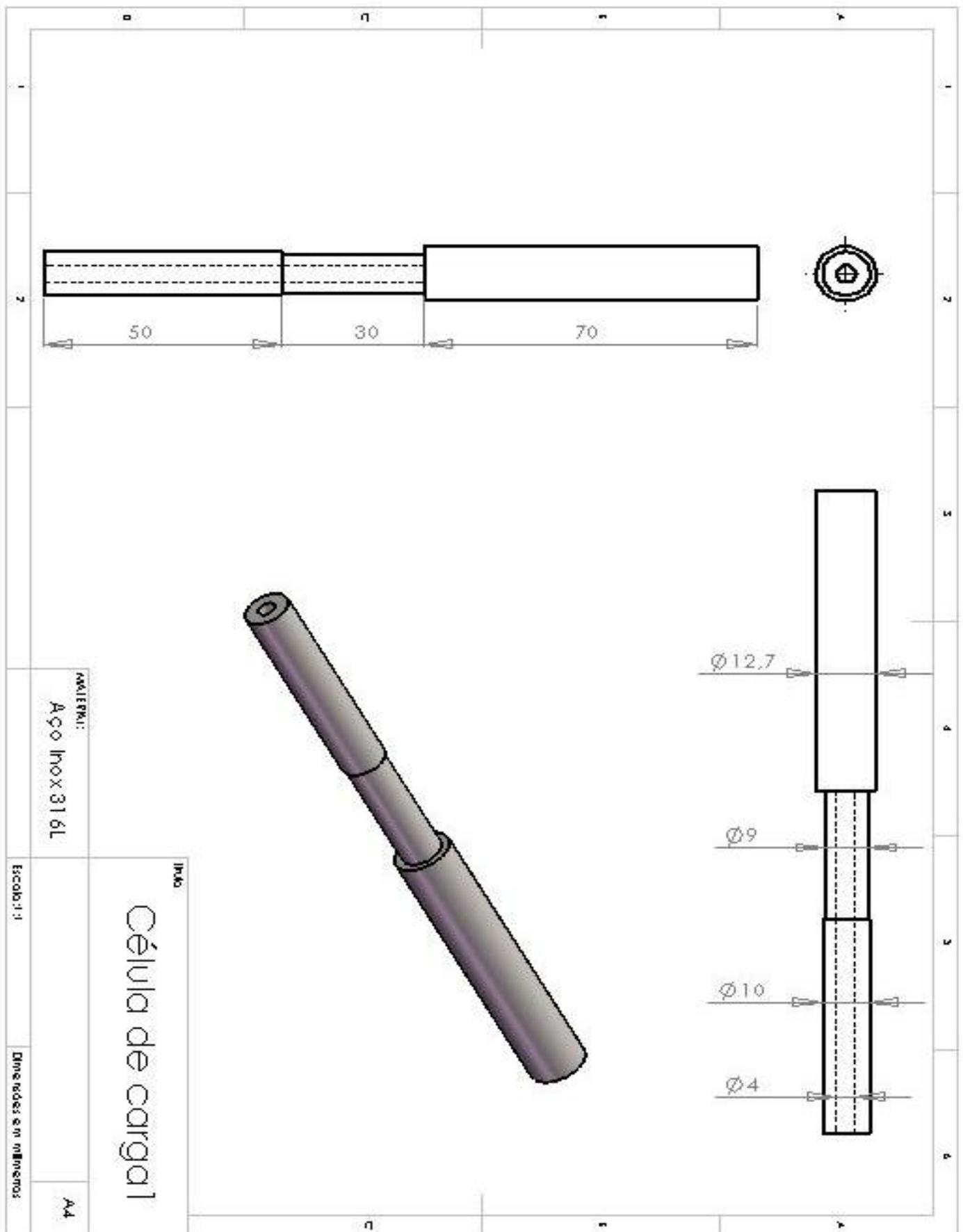


Figura VI-2 - Desenho técnico da célula de carga 1