

Nº 179368

Túnel do vento aerodinâmico do IPT: calibração de anemômetros

Gilder Nader

*Palestra apresentada ENCONTRO
TÉCNICO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO,
2024, São Paulo. 19 slides.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

PROIBIDO REPRODUÇÃO

Encontro Técnico de Medição de Vazão

Evento organizado pelo Grupo Técnico de Vazão-GTVazão
da Sociedade Brasileira de Metrologia-SBM

Túnel de Vento Aerodinâmico do IPT Calibração de Anemômetros

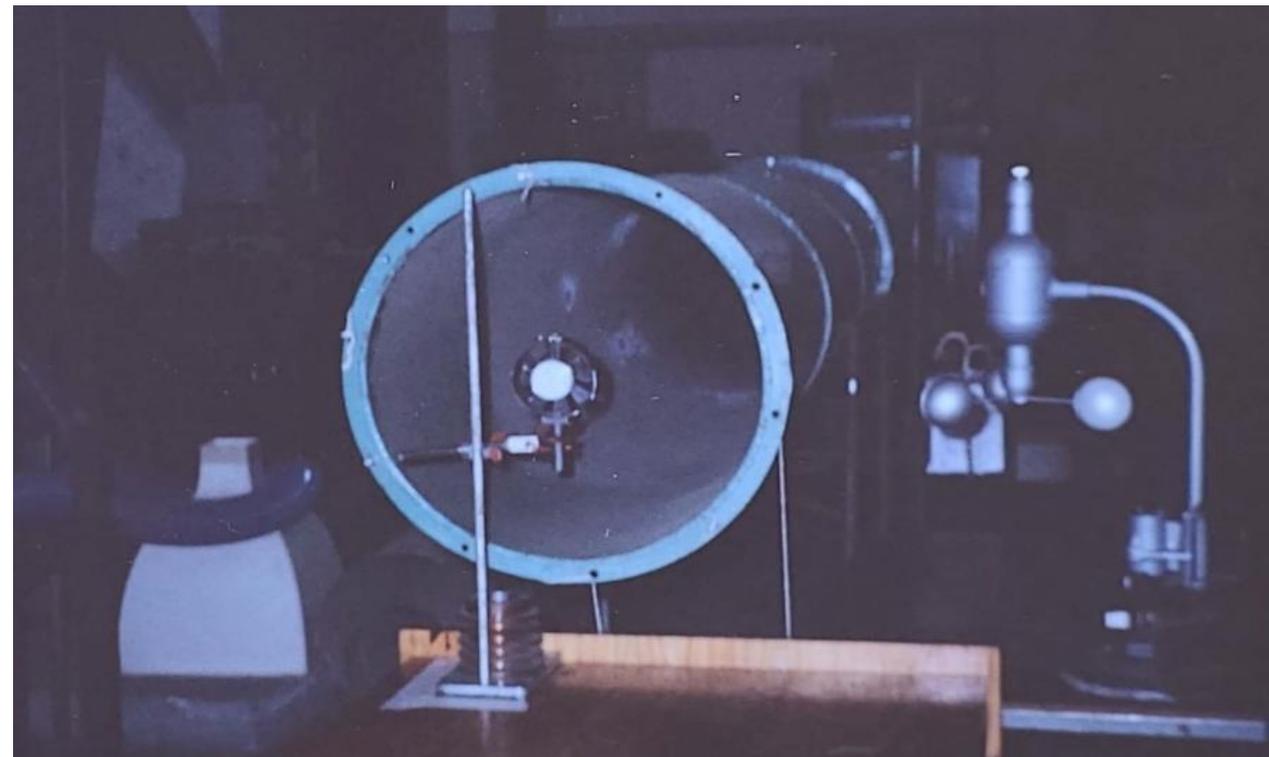
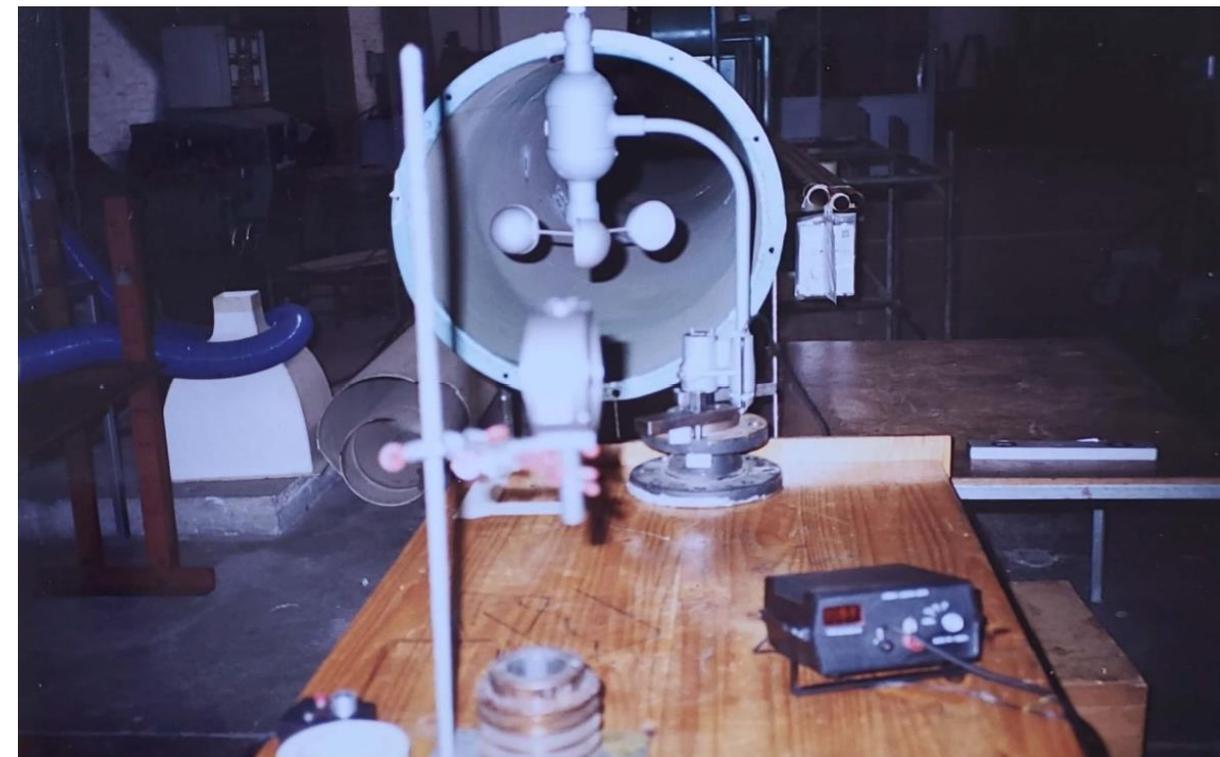
Gilder Nader
IPT
20.03.2024

Conteúdo

- **História da velocidade de fluidos no IPT**
- **Características do túnel de vento aerodinâmico do IPT**
- **Perfil de velocidades e de turbulência na seção de testes**
- **Escopo acreditado na RBC**
- **Faixas de calibração**
- **Normas adotadas**
- **Alguns resultados de calibrações**
- **Comentários gerais e sugestões**

História da Velocidade de Fluidos no IPT

Duto de vento – década de 1980



História da Velocidade de Fluidos no IPT

Duto de vento – década de 1980



História da Velocidade de Fluidos no IPT

Túnel de vento – Construído em 1994

Dissertação de mestrado de

Nilson Massami Taira – POL/USP



História da Velocidade de Fluidos no IPT

Túnel de vento de Camada Limite Atmosférica – construído em 2002

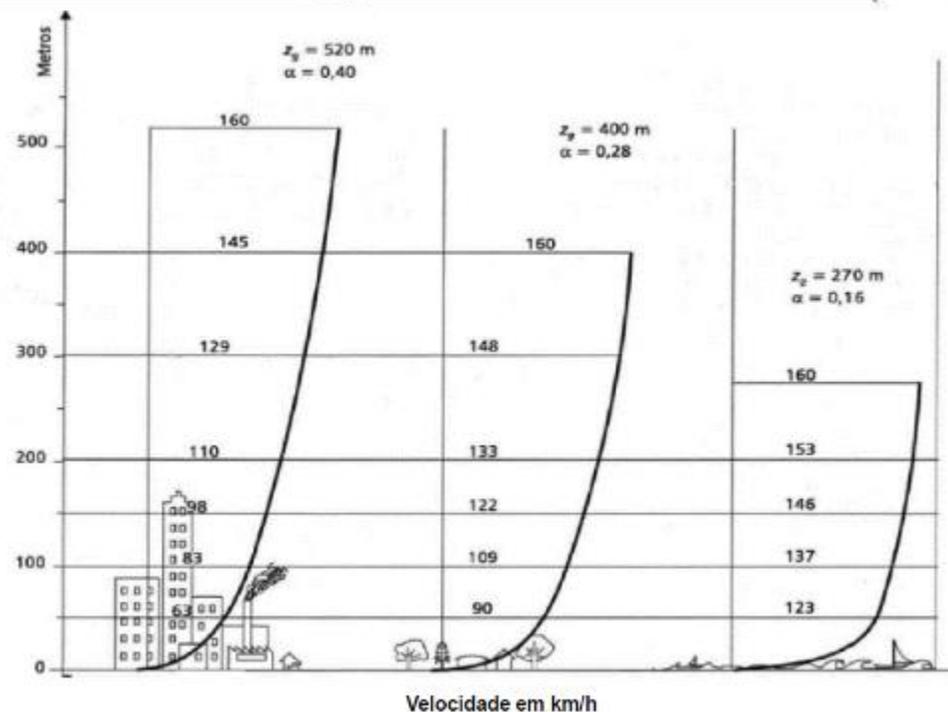
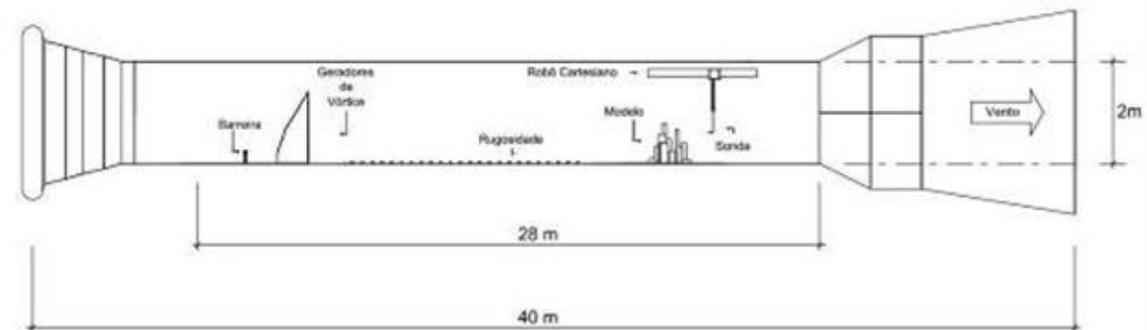
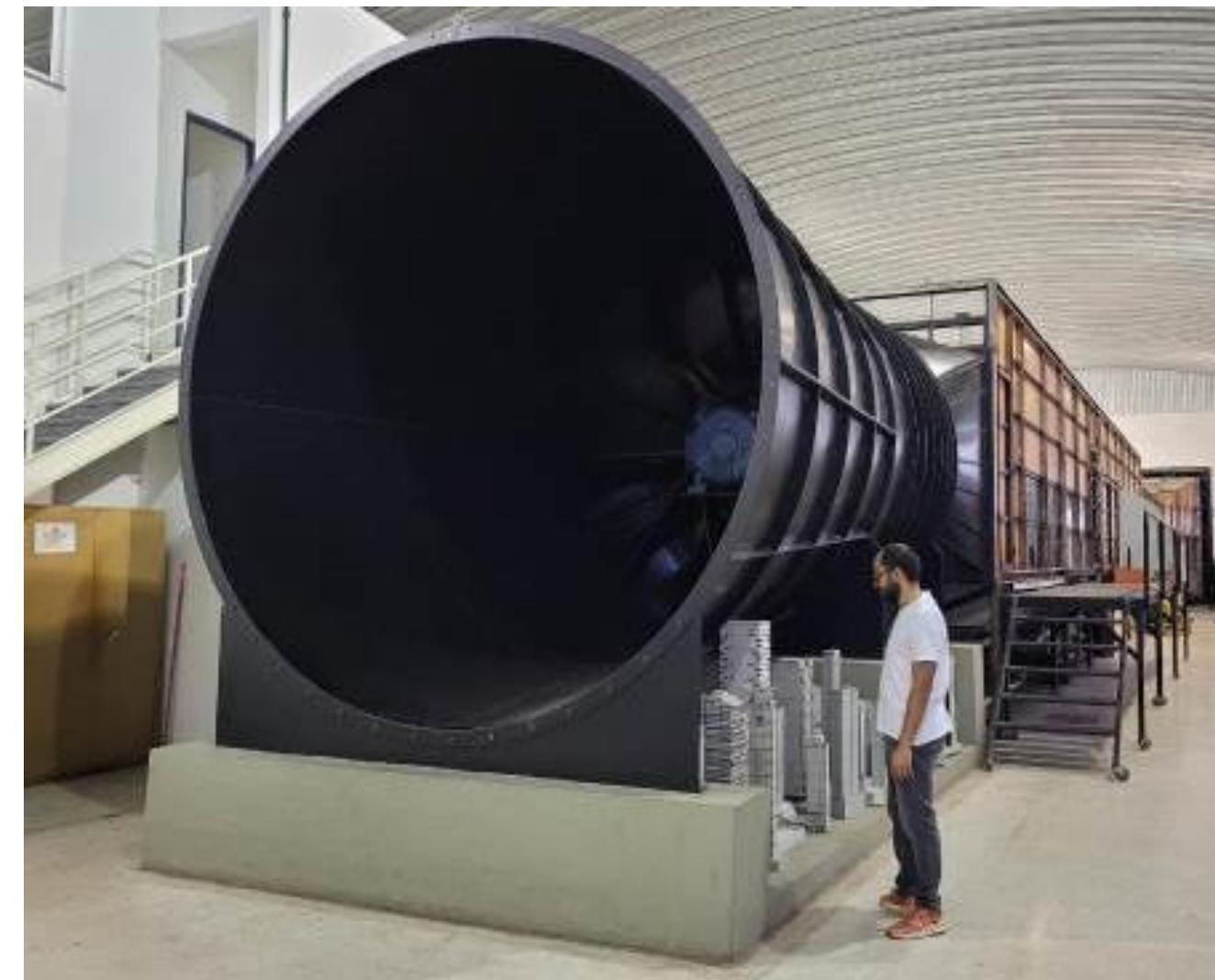
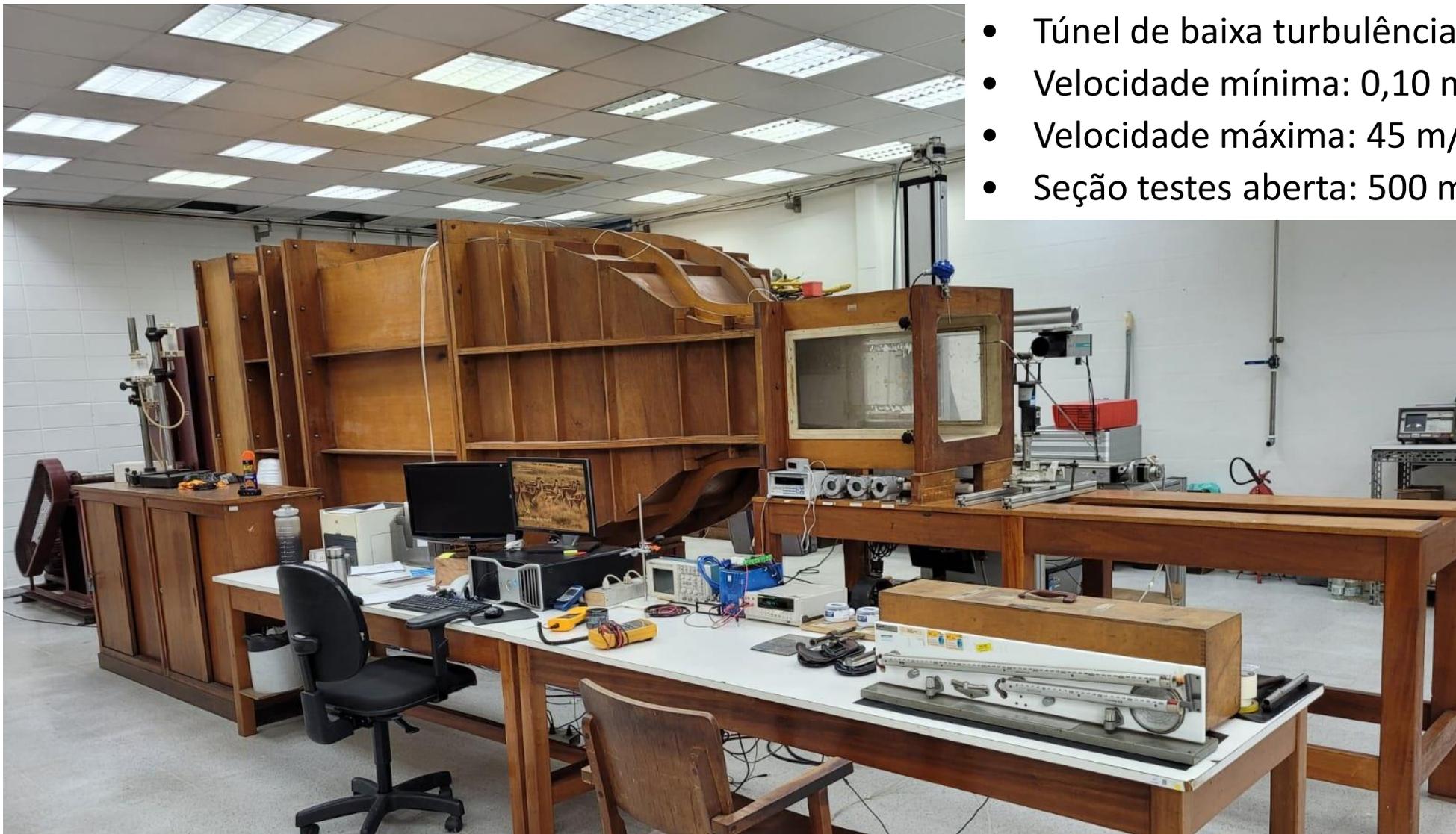


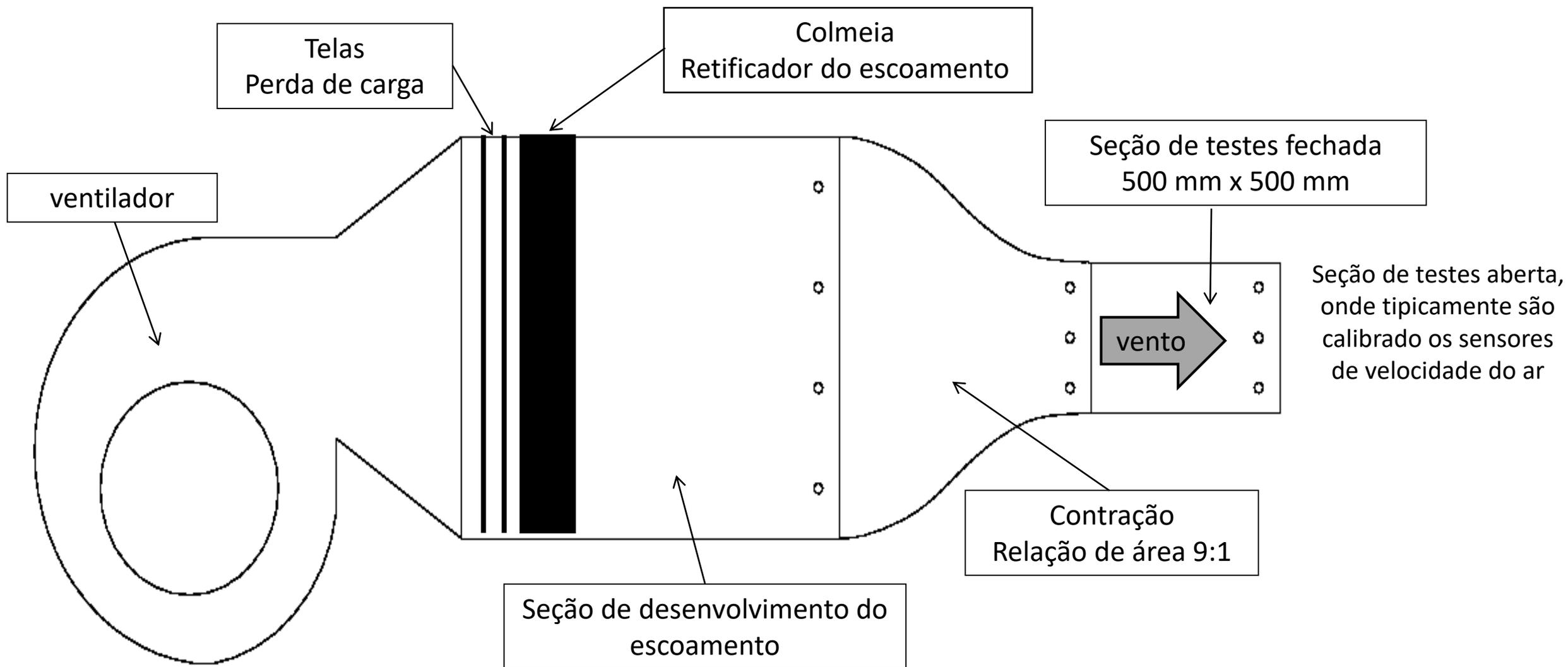
Figura extraída de Ações devidas ao vento em edificações, de João Alfredo Azzi Pitta - São Carlos : EdUFSCar, 2001.

Túnel de vento do Laboratório de Anemometria do IPT

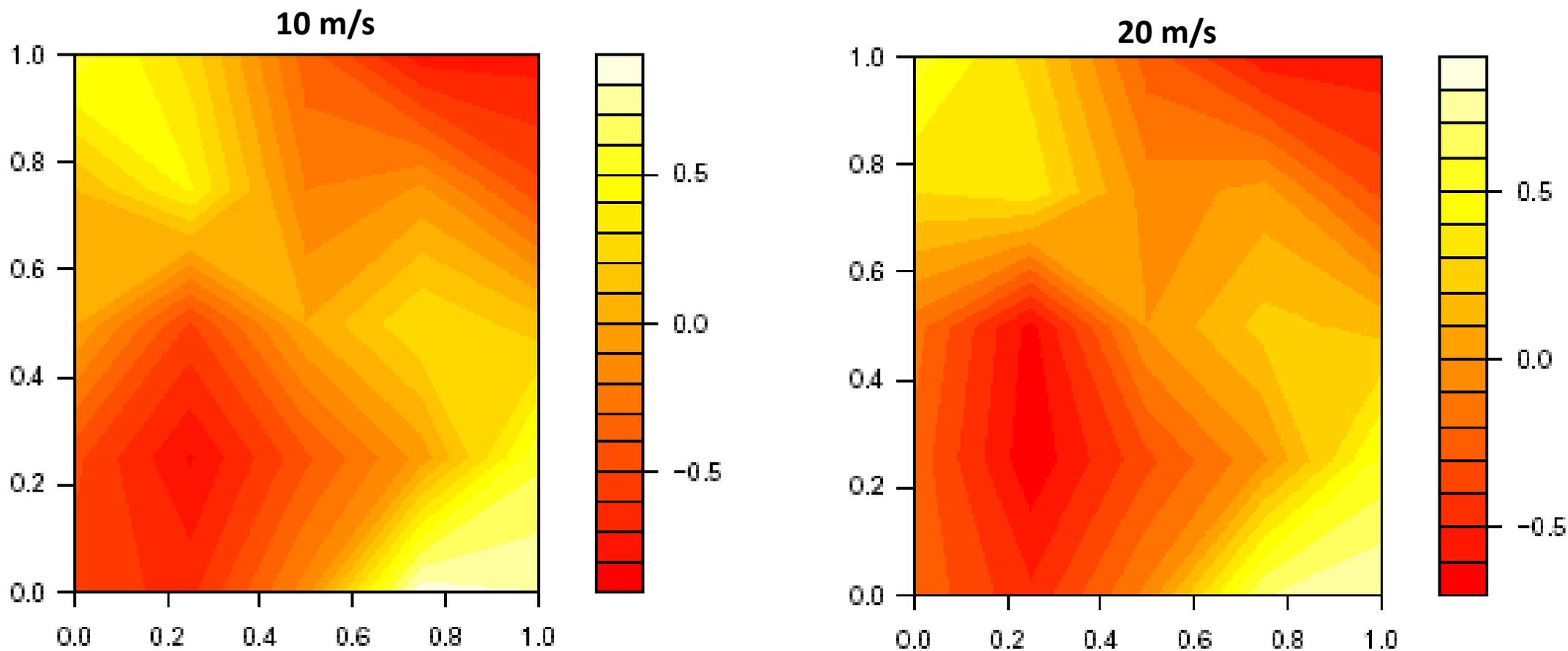


- Túnel de baixa turbulência: $I < 0,5 \%$;
- Velocidade mínima: 0,10 m/s;
- Velocidade máxima: 45 m/s
- Seção testes aberta: 500 mm x 500 mm.

Layout do Túnel de Vento Aerodinâmico – Laboratório de Anemometria do IPT

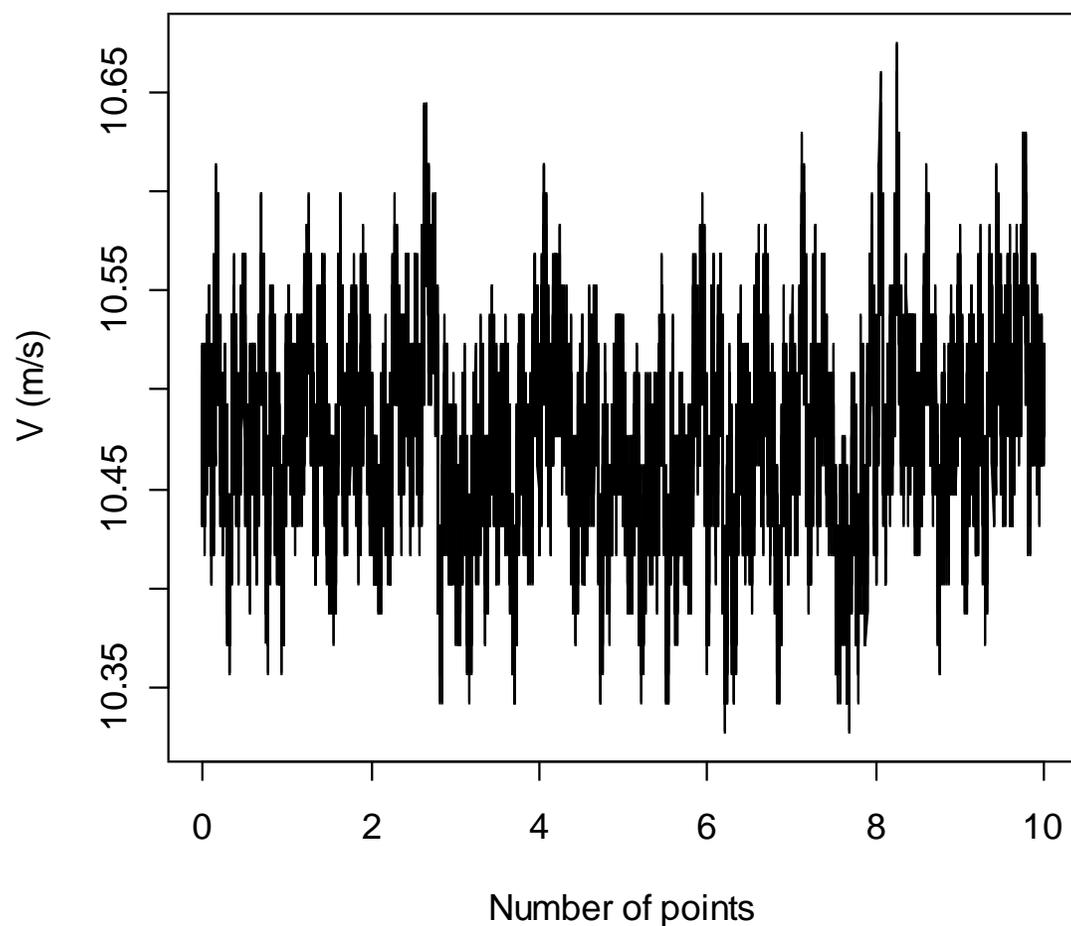


Perfil de velocidade na descarga do túnel de vento medidos a:



- O mapa de cores indicada a variação da velocidade em porcentagem
- A variação da velocidade média é de 0,2 % na linha central da seção de testes e nos casos extremos, entre as bordas da seção de testes, a variação é de 0,5 %.

Intensidade de turbulência



Velocidade (m/s)	Intensidade de turbulência (%)	Incerteza na medição da intensidade de turbulência (%)
2,5	0,32	0,02
5,0	0,38	0,02
10,0	0,35	0,03
15,0	0,44	0,03
20,0	0,45	0,03

Escopo acreditado na RBC e CMCs

INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE FLUÍDOS

Anemômetro de Copos

(0,2 a 1,99) m/s	0,05 m/s
(2,00 a 9,99) m/s	0,06 m/s
(10,00 a 45,0) m/s	0,11 m/s
(10,00 a 45,0) m/s	de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Método por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência.
Método por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por comparação em túnel de vento, com velocidade de referência determinada por medição do diferencial de pressão.

Anemômetro de Pás Rotativas

(0,2 a 1,99) m/s	de 0,05 m/s até 0,06 m/s
(2,0 a 9,99) m/s	0,06 m/s até 0,11 m/s
(10,00 até 45,00) m/s	de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Método por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência.
Por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por comparação em túnel de vento, com velocidade de referência determinada por medição do diferencial de pressão.

Medidor de Velocidade de Gases Baseado em Outros Princípios

(0,2 até 1,99) m/s	de 0,05 m/s até 0,06 m/s
(2,0 até 9,99) m/s	0,06 m/s até 0,11 m/s
(10,0 a 45,0) m/s	de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por comparação em túnel de vento, com velocidade de referência determinada por medição do diferencial de pressão.

Medidor de Velocidade de Gases com Sensor Térmico

(0,2 até 1,99) m/s	de 0,05 m/s até 0,06 m/s
(2,0 até 9,99) m/s	0,06 m/s até 0,11 m/s
(10,0 a 45,0) m/s	de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Método de por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência.
Método por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por comparação em túnel de vento, com velocidade de referência determinada por medição do diferencial de pressão.

Escopo acreditado na RBC e CMCs

Medidor de Velocidade de Gases
com Tubo de Pitot

(2,0 até 9,99) m/s
(10,00 até 45,00) m/s

de 0,06 m/s até 0,11 m/s
de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por
comparação em túnel de vento, com velocidade de
referência determinada por medição do diferencial de pressão.

Medidor de Velocidade de Gases
por Princípio Ultrassônico

(0,2 até 1,99) m/s
(2,0 até 9,99) m/s
(10,00 até 45,00) m/s

de 0,05 m/s até 0,06 m/s
0,06 m/s até 0,11 m/s
de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Método por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência.

Método por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por
comparação em túnel de vento, com velocidade de referência determinada
por medição do diferencial de pressão.

Medidor de Velocidade de
Líquidos com Tubo de Pitot

(2,0 até 9,99) m/s
(10,00 até 45,00) m/s

de 0,06 m/s até 0,11 m/s
de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Por comparação, em túnel de vento, com anemômetro de referência e por
comparação em túnel de vento, com velocidade de referência
determinada por medição do diferencial de pressão.

Faixa de calibração

(0,2 a 1,99) m/s

(2,0 a 9,99) m/s

(10,00 até 45,00) m/s

CMC

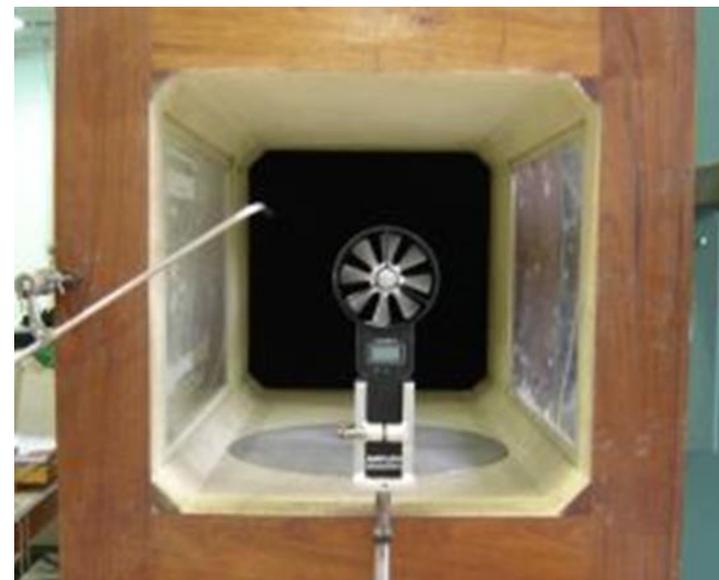
de 0,05 m/s até 0,06 m/s

0,06 m/s até 0,11 m/s

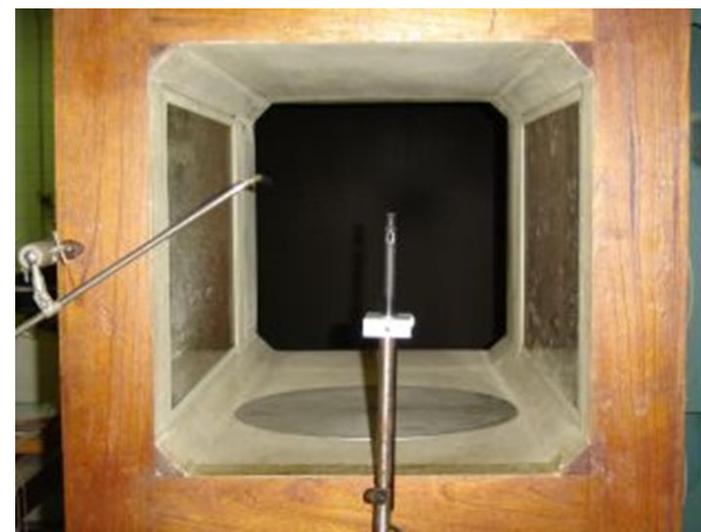
de 0,11 m/s até 0,46 m/s

Normas adotadas e Sensores Calibrados

- ABNT NBR IEC 61400-12-1 – 2012 – *Aerogeradores - Part 12-1: Medições de desempenho de potência de aerogeradores*, Primeira Edição 2012/ Anexo F – *Procedimento para calibração de anemômetro de copos*.
- MEASNET, Cup Anemometer Calibration Procedure, 2009
- ISO 3966 – 2020 – Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes.
- ASTM D3796-90 – Standard Practice for Calibration of Type S Pitot Tubes, 2009.
- Bryer, D.W. and Pankhurst, R.C., Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction.
- ANSI/ASHRAE 41.2 – 1987 (RA 92) – Standard methods for laboratory airflow measurements. ASTM D7396 - Standard Practice for Calibration of Type S Pitot Tubes, 1979 (reapproved in 1985)
- ANSI/ASHRAE 41.2 – 2022 – Standard methods for air velocity and airflow measurements.
- ANSI/ASHRAE 41.6 – 2014 – Method for measurement of moist air properties.
- GIACOMO, P. – 1982 – Equation for the determination of the density of moist air (1981). *Metrologia*, 18, pag. 33-40.
- Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, GUM 2021, Avaliação de Dados de Medição – 1ª Edição Brasileira da 1ª Edição do BIPM 2008: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.

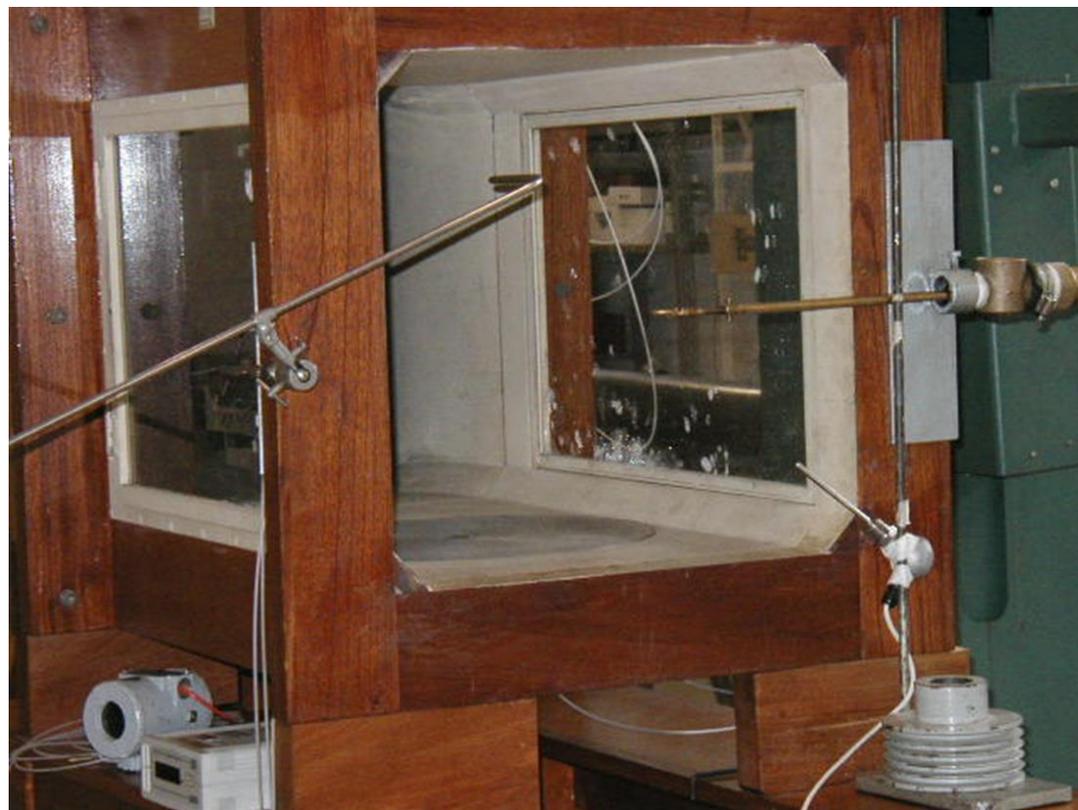


Anemômetro
de pás



Anemômetro
fio-quente

Sensores Calibrados



Tubos de
Pitot Cole, S, Estático etc.

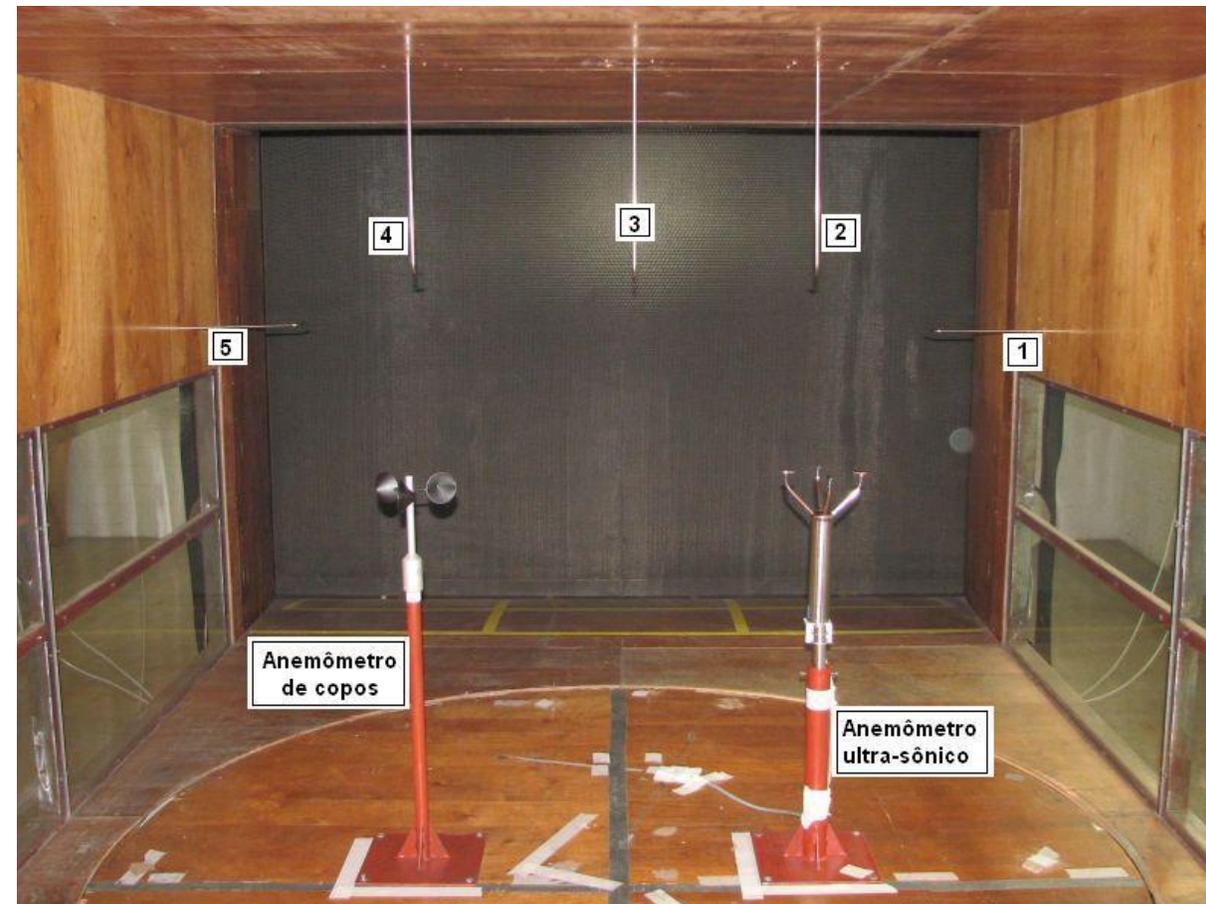


Anemômetro
ultrassônico



Anemômetro
de copos

Sensores Calibrados



Resultados de Calibrações

Exemplo com resultados da calibração de tubo de Pitot Cole em ar

Lado A						Lado B					
Re/L (m ⁻¹)	V _{água} (m/s)	V _r (m/s)	U _v (m/s)	C (-)	U _C (-)	Re/L (m ⁻¹)	V _{água} (m/s)	V _r (m/s)	U _v (m/s)	C (-)	U _C (-)
0,35x 10 ⁶	0,35	6,04	0,08	0,883	0,011	0,35x 10 ⁶	0,35	6,05	0,08	0,885	0,011
0,59x 10 ⁶	0,59	10,09	0,11	0,880	0,009	0,59x 10 ⁶	0,59	10,11	0,11	0,888	0,009
0,89x 10 ⁶	0,89	15,21	0,16	0,876	0,008	0,88x 10 ⁶	0,89	15,23	0,16	0,885	0,008
1,19x 10 ⁶	1,19	20,36	0,21	0,871	0,008	1,18x 10 ⁶	1,19	20,38	0,21	0,882	0,008
1,37x 10 ⁶	1,37	23,43	0,24	0,872	0,008	1,36x 10 ⁶	1,36	23,45	0,24	0,878	0,008
1,48x 10 ⁶	1,49	25,41	0,26	0,869	0,008	1,47x 10 ⁶	1,48	25,45	0,26	0,878	0,008
1,59x 10 ⁶	1,60	27,39	0,28	0,871	0,008	1,59x 10 ⁶	1,60	27,44	0,28	0,877	0,008
1,76x 10 ⁶	1,77	30,27	0,31	0,869	0,008	1,76x 10 ⁶	1,76	30,35	0,31	0,875	0,008
1,87x 10 ⁶	1,87	32,10	0,32	0,868	0,008	1,86x 10 ⁶	1,87	32,15	0,32	0,874	0,008
2,04x 10 ⁶	2,04	35,07	0,35	0,867	0,008	2,03x 10 ⁶	2,04	35,14	0,35	0,873	0,008

Resultados de Calibrações

Exemplo de resultados da calibração de anemômetro de copos

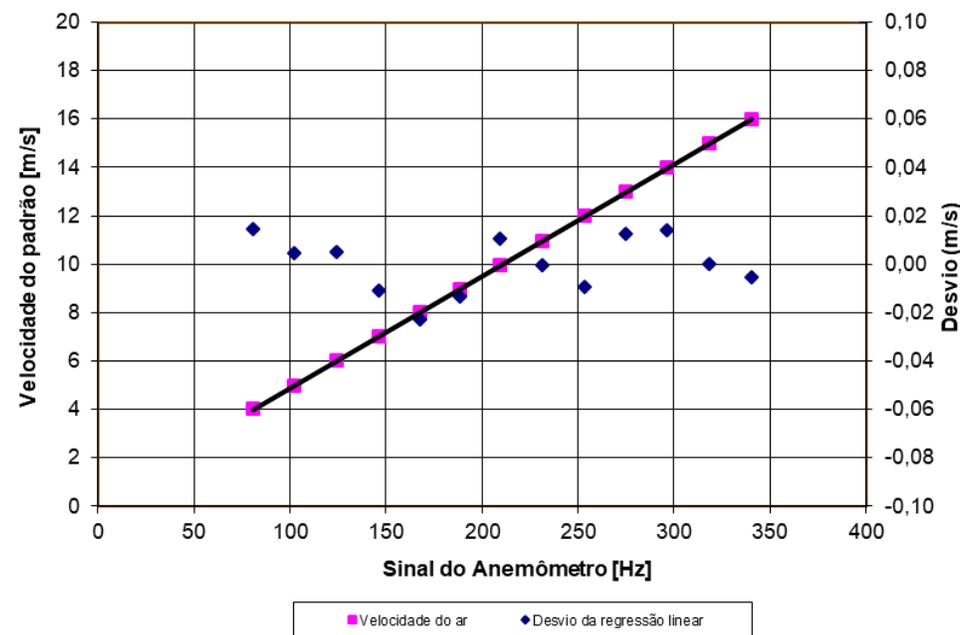
Valor indicado pelo anemômetro		Velocidade de referência	Incerteza expandida
[Hz]	(m/s)	(m/s)	(m/s)
80,71	4,00	4,01	0,06
102,11	4,99	4,99	0,06
123,93	6,00	6,00	0,06
146,07	7,02	7,01	0,08
167,75	8,03	8,01	0,09
188,30	8,98	8,97	0,10
209,45	9,96	9,97	0,11
231,17	10,96	10,96	0,12
253,50	12,00	11,99	0,13
275,01	12,99	13,01	0,14
296,19	13,97	13,99	0,15
318,27	15,00	15,00	0,16
340,18	16,01	16,00	0,17

Coeficiente angular 0,04629
 Coeficiente linear 0,262 m/s
 Coeficiente de correlação 0,99999

Temperatura do ar 21,0 °C
 Pressão atmosférica 93,314 kPa
 Umidade relativa 73,0 %
 Massa específica do ar 1,097 kg/m³

Exemplo com resultados da calibração de anemômetro a fio-quente

Valor indicado pelo anemômetro		Velocidade de referência	Incerteza expandida
(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
0,22	0,20	0,05	
0,53	0,50	0,05	
0,77	0,75	0,05	
1,02	0,99	0,05	
1,50	1,49	0,06	
2,01	2,00	0,06	



Comentários Gerais e Sugestões

- Embora haja diversos documentos internacionais, incluindo normas, que descrevem procedimentos de calibração de sensores de velocidade do ar, será interessante haver um documento regulatório brasileiro;
- Os laboratórios de anemometria do Brasil têm participado de programas de intercomparação laboratorial com intervalos aproximados de 2 anos;
- Quando há intercomparação laboratorial utilizando como artefato um anemômetro a fio-quente, que indicam velocidades nas condições *standard* ou *actual*, percebe-se uma dificuldade de alguns laboratórios em realizar as calibrações da forma correta;
- O INMETRO deveria ser provedor de ensaios de intercomparação laboratorial em velocidade de fluidos, pois é uma das áreas mais complexas dentro do tema escoamento.

Muito obrigado

Gilder Nader
gnader@ipt.br