



Encontro Técnico **AESABESP**

Congresso Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente

DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO – 34ETC06363 PITOTS: INCERTEZA ADICIONAL CAUSADA PELA DISTORÇÃO DE PERFIS DE VELOCIDADES – ISO 7194

Danyllo de Lima Guedes

Marcos Tadeu Pereira

Olavo Alberto Prates Sachs

Adauto Luiz de Souza da Silva

André Luiz dos Santos

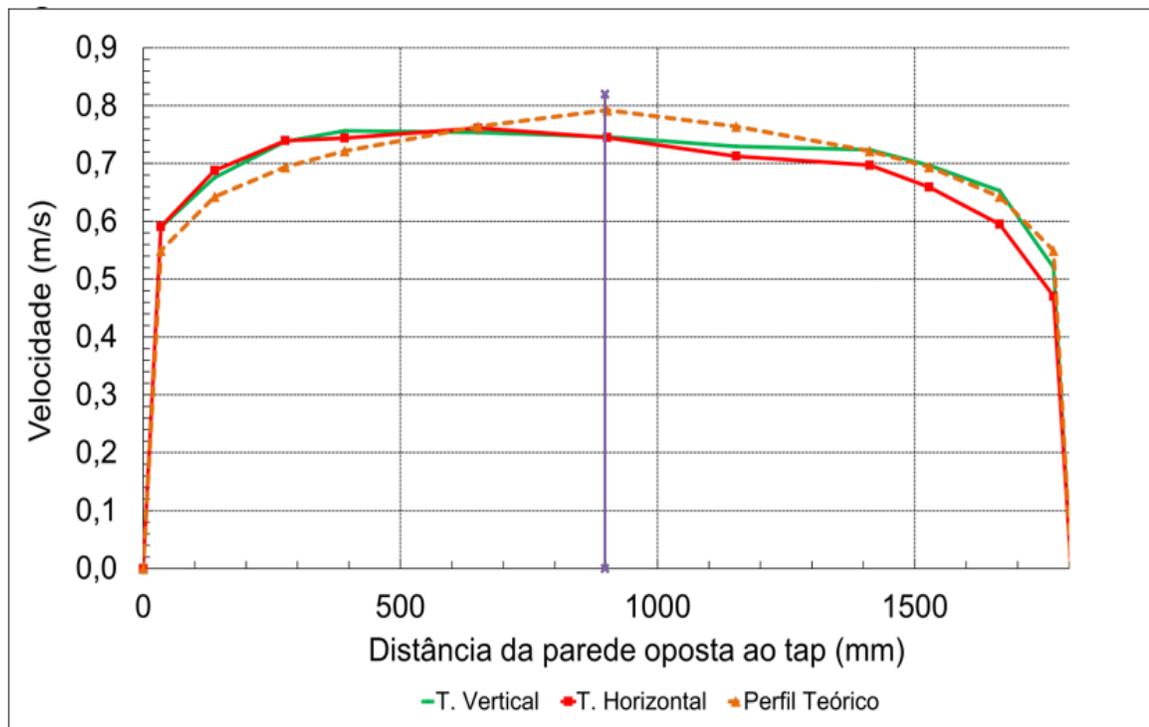
Fluido Análises – Análises, Tecnologia, Treinamento, Ltda.

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

Introdução

- Tubos de Pitot são utilizados na calibração de medidores em campo
- Nas melhores condições conseguem medir com incertezas entre 1,8% e 2%, para calibrar medidores eletromagnéticos com incertezas tão baixas quanto 0,2% ou Venturis com 1,2%.
- Mas em geral são a única opção para calibração
- Incertezas associadas: pressão diferencial (tipos A e B), ρ , Cd, gradiente de velocidade, inclinação do tubo, correção de blocagem, flutuação leve de velocidade, turbulência, **distorção do perfil de velocidade**, trena, incrustação, posicionamento do tubo de Pitot, quantidade insuficiente de pontos de medição, técnica de integração

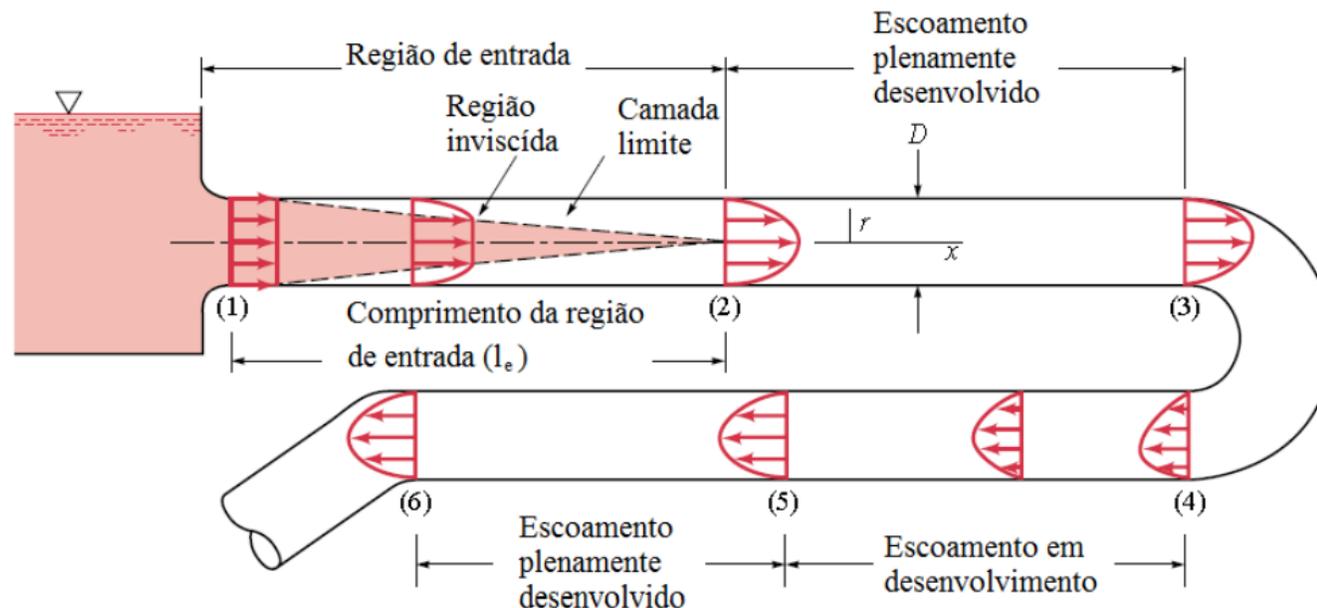
- A contribuição do perfil deformado de velocidades geralmente é grande no balanço de incertezas



Fonte de erros	Distribuição entre fontes de incerteza
Pressão diferencial (tipo A)	0,65%
Pressão diferencial (tipo B)	0,631%
Densidade	0,03%
Coeficiente de descarga	45,32%
Gradiente de velocidade	1,42%
Inclinação do tubo de Pitot	1,42%
Correção da blocagem	0,00%
Leve Flutuação da Velocidade	0,63%
Turbulência	15,74%
Distorção do perfil de velocidade	32,10%
Trena	0,06%
Incrustação	0,58%
Posicionamento do tubo Pitot	0,16%
Qtde insuficientes de pontos medição	0,63%
Técnica de integração	0,63%

**incerteza global
2,52%**

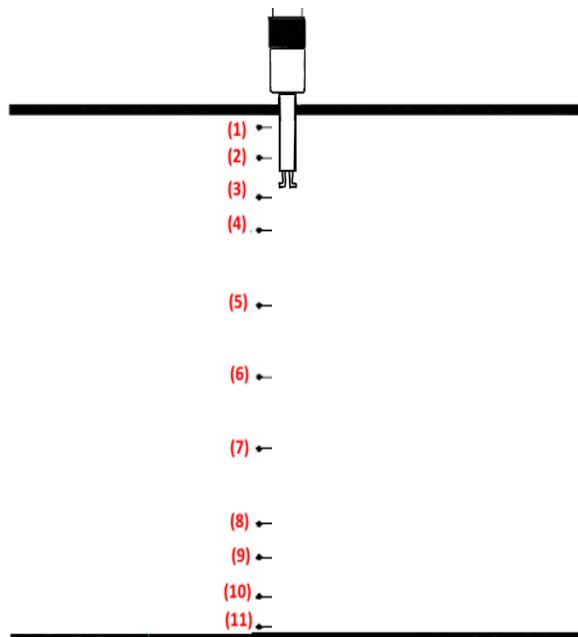
- Normas exigem trechos retos com $10D$ para diminuir distorções no perfil de velocidades- mas já foi provado que é insuficiente para tubulações com grandes diâmetros $\longrightarrow 120 D$ seria mais adequado
- Rugosidade relativa $\frac{\varepsilon}{D}$ é a razão



- Norma ISO 3966: diretrizes para condução dos ensaios, análises de ensaios, **incerteza de vazão**;
- Problemas na ISO 3966: metodologia da estimativa da incerteza da vazão é **falha e insuficiente**, com pontos omissos e dúbios.
- **Norma ISO 7194**: “Measurement of fluid flow in close conduits – Velocity-area method of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes” abrange escoamentos com distorções: orientações para condução de ensaios, correções a serem aplicadas à vazão, e tratamento de novas incertezas dentro destas condições de ensaio.

- Comparação entre ISO 3966 e ISO 7194 quanto a incerteza referente à distorção do perfil de velocidades - simulações e discussão
- Dependendo da situação: a parcela da incerteza devido à distorção possui alto impacto no valor da incerteza da vazão.
- Melhora nos resultados de medição significa maior controle sobre captação, tratamento, e consumo de água

Método convencional utilizado para estimativa de incerteza devido a distorção do perfil



- **Traverse Vertical**

$$V_{i,V} = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p_{i,V}}{\rho}} \quad \Rightarrow \quad FV_V = \frac{\sum_{i=1}^{i=5} V_{i,V} + \sum_{j=7}^{j=11} V_{j,V}}{10} = \frac{10}{V_{6,V}}$$

- **Traverse Horizontal**

$$V_{i,H} \quad \Rightarrow \quad FV_H$$

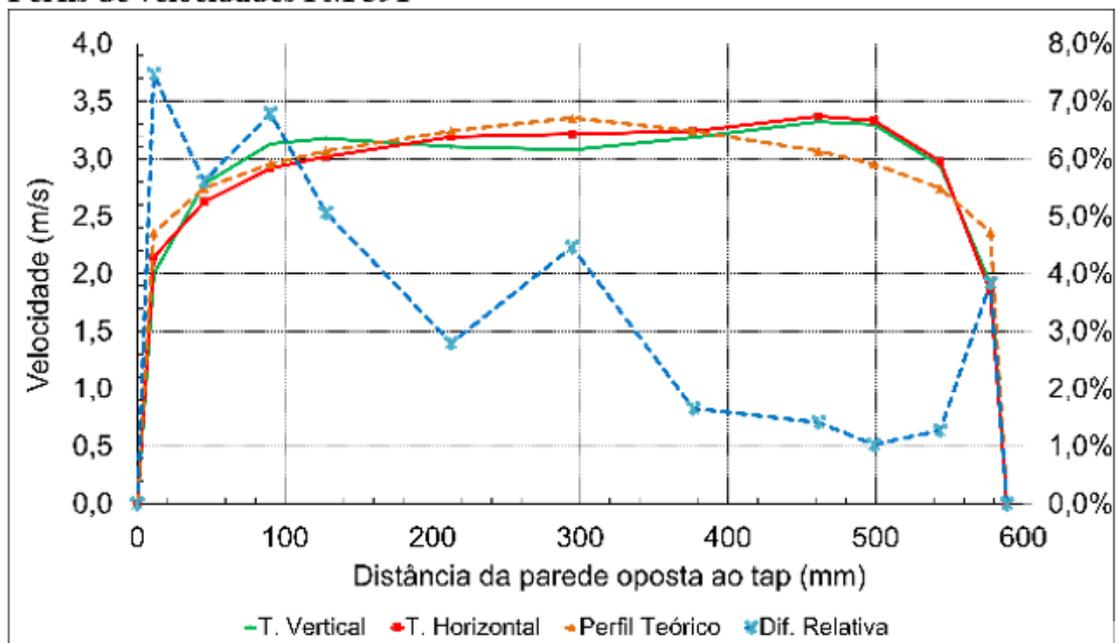
$$A_{FV} = |FV_V - FV_H| \quad \Rightarrow \quad u(\text{distorção}) = \frac{A_{FV}}{\sqrt{12}} \quad \text{Incerteza padrão}$$

$$C_{\text{distorção}}(V) = \frac{V_{6,V} + V_{6,H}}{2} \quad \Rightarrow \quad u_c(\text{distorção}) = C_{\text{distorção}}(V) * u(\text{distorção}) = \left(\frac{V_{6,V} + V_{6,H}}{2}\right) * \left(\frac{A_{FV}}{\sqrt{12}}\right)$$

Incerteza combinada

Problemas método convencional

Perfis de velocidades PM 391



Perfis de velocidades PM 658

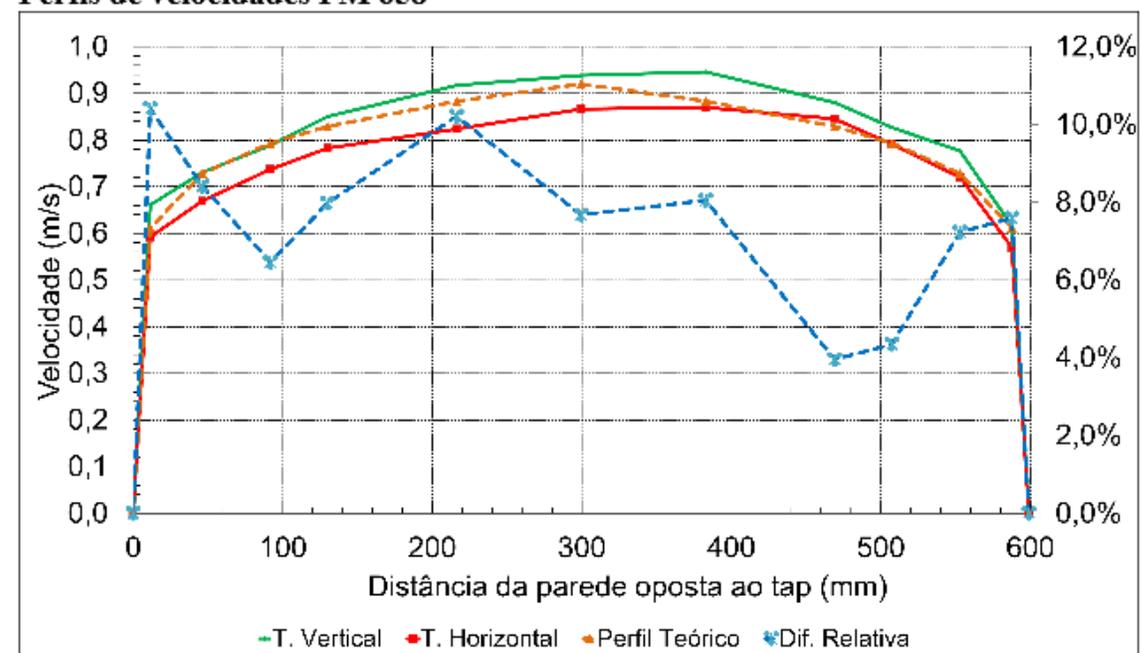


Tabela 1 – Resultados da análise PM 391 e PM 658

Ensaio	Média Dif. Relativa	Contribuição Distorção
PM 391	3,76%	76,23%
PM 658	7,48%	0,68%

Problemas!

Método ISO 7194 utilizado para estimativa de incerteza devido a distorção do perfil

- Y: Índice de Assimetria**

$$Y = \frac{\text{desvio padrão das velocidades nos raios}}{\text{Velocidade de descarga - média}}$$

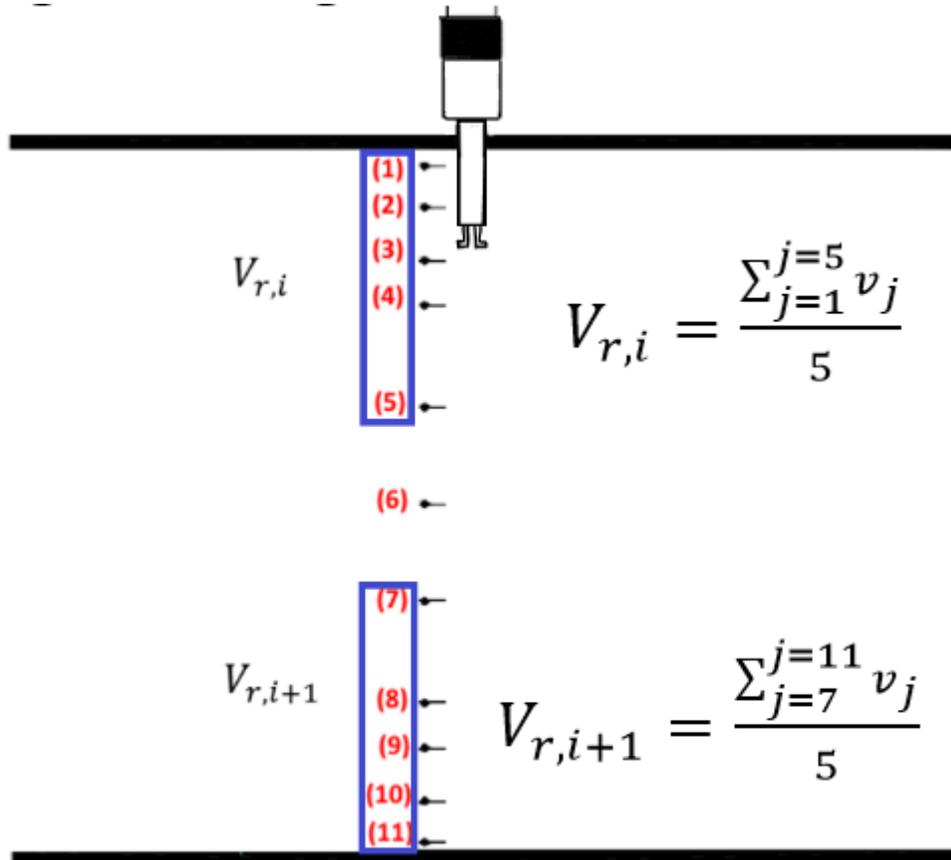
Quanto maior o Y, maior a distorção

$$Y = \frac{\sigma_{V_R}}{V_{desc}} \rightarrow \sigma_{V_R} = \frac{1}{V_{desc}} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{r,i} - V_{desc})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

$$V_{desc} = \frac{\sum v_i}{N}$$

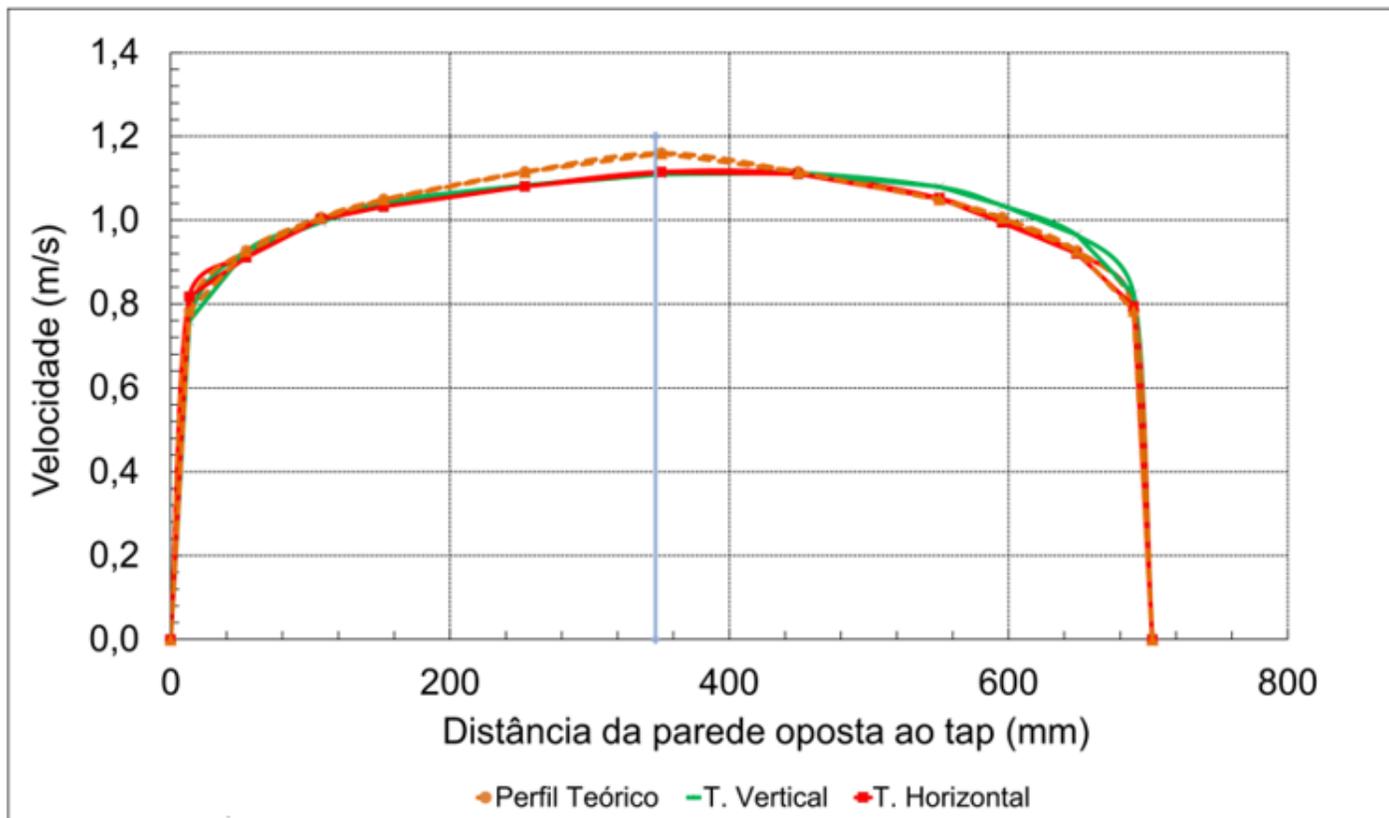
$$u(\text{distorção}) = 0,14 * Y$$

Componente da incerteza devido ao desvio, para 2 traverses



Algumas comparações entre 3966 e 7194
quanto a distorção de perfis de velocidades

Perfis de velocidades PM 20



Resultados gerais PM 20

Incerteza convencional.	1,84%
Incerteza segundo ISO 7194	1,67%
Diferença Relativa	0,17%
Diferença Relativa %	10,13%
Índice de Assimetria Y	1,67%

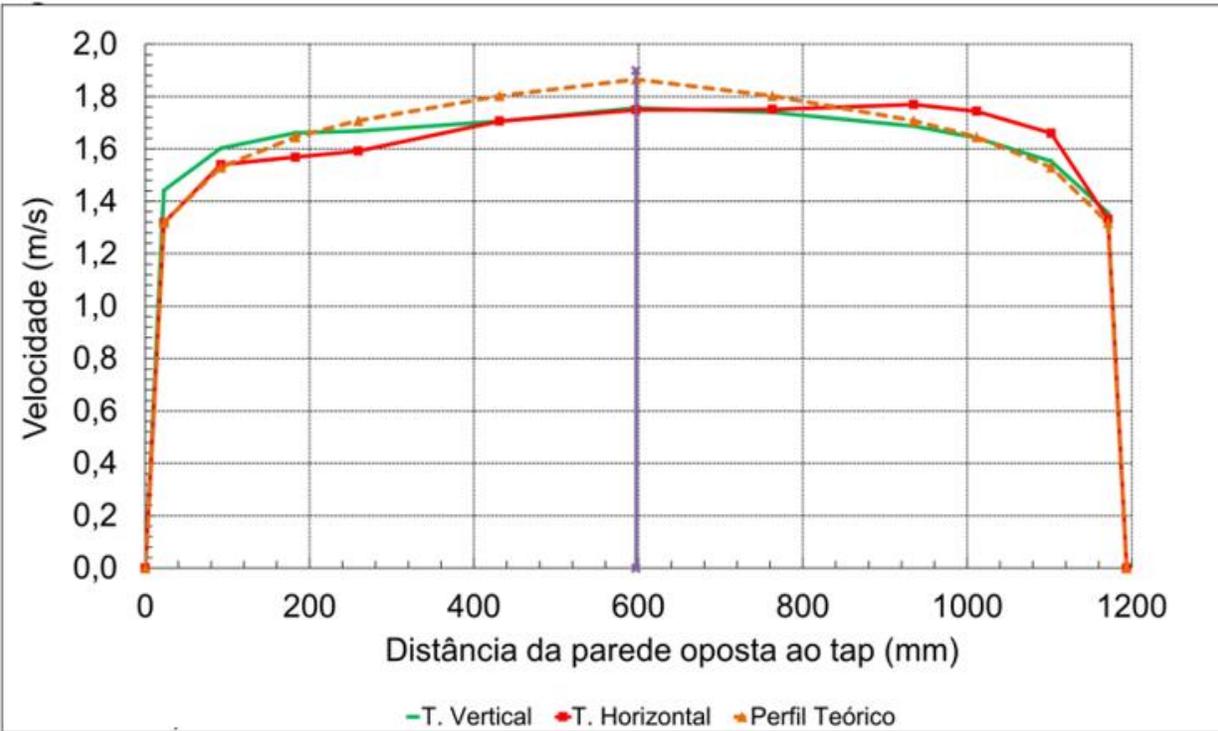
Dados descritivos PM 20

PM	20	
Diâmetro	1000	mm
Velocidade Média	0,58	m/s
Vazão	0,449	m ³ /s
Traverses	2	-

Contribuição de cada componente de incerteza PM 20

PM 020 28-07-20 MAX	Distribuição entre as fontes de Incerteza da Vazão		
	C/ Incerteza convencional	C/ Incerteza segundo ISO 7194	Diferença relativa
Pressão diferencial (tipo A)	2,10%	2,546%	-0,44%
Pressão diferencial (tipo B)	0,268%	0,32%	-0,06%
Densidade	0,06%	0,07%	-0,01%
Coefficiente de descarga	25,54%	30,89%	-5,35%
Gradiente de velocidade	2,66%	3,22%	-0,56%
Inclinação do tubo de Pitot	2,66%	3,22%	-0,56%
Correção da blocagem	0,01%	0,01%	0,00%
Leve Flutuação da Velocidade	1,18%	1,43%	-0,25%
Turbulência	29,59%	35,80%	-6,20%
Distorção do perfil de velocidade	25,01%	9,46%	15,55%
Trena	0,82%	0,98%	-0,16%
Incrustação	7,42%	8,83%	-1,41%
Posicionamento do tubo Pitot	0,30%	0,36%	-0,06%
Onde insuficientes de pontos medição	1,18%	1,43%	-0,25%
Técnica de integração	1,18%	1,43%	-0,25%

Perfis de velocidades PM 927



Dados descritivos PM 658

PM	658	
Diâmetro	600	mm
Velocidade Média	0,770	m/s
Vazão	0,216	m ³ /s
Traverses	2	-

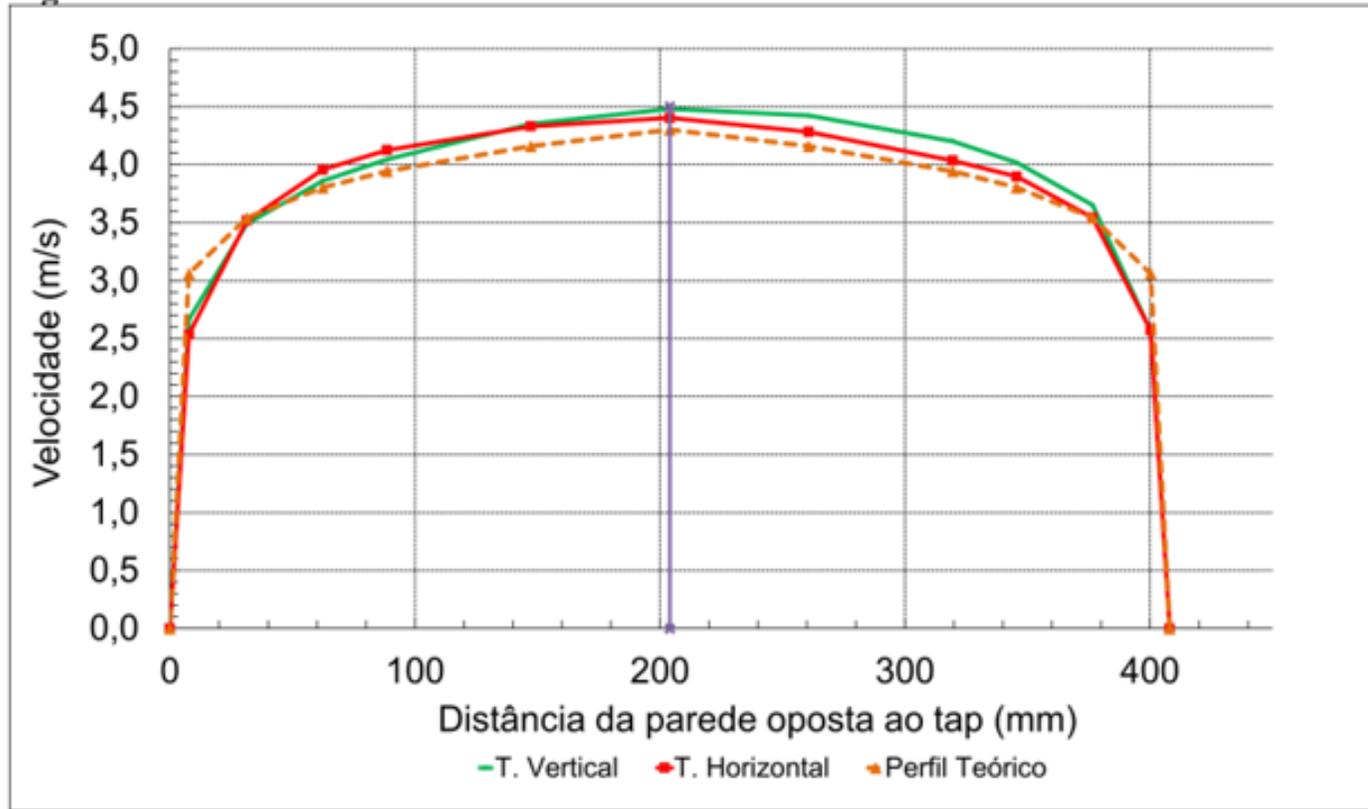
Contribuição de cada componente de incerteza PM 658

PM 658 29 09 20 MED	Distribuição entre as fontes de Incerteza da Vazão		
	C/ Incerteza Distorção convencional	C/ Incerteza Distorção ISO 7194	Diferença relativa
Pressão diferencial (tipo A)	1,55%	1,033%	0,51%
Pressão diferencial (tipo B)	0,68%	0,45%	0,22%
Densidade	0,05%	0,03%	0,02%
Coefficiente de descarga	52,39%	34,98%	17,42%
Gradiente de velocidade	2,38%	1,59%	0,79%
Inclinação do tubo de Pitot	2,38%	1,59%	0,79%
Correção da blocagem	0,01%	0,01%	0,00%
Leve Flutuação da Velocidade	1,06%	0,71%	0,35%
Turbulência	26,41%	17,63%	8,78%
Distorção do perfil de velocidade	0,68%	33,83%	-33,14%
Trena	1,00%	0,66%	0,35%
Incrustação	9,04%	5,92%	3,12%
Posicionamento do tubo Pitot	0,26%	0,18%	0,09%
Qtde insuficientes de pontos medição	1,06%	0,71%	0,35%
Técnica de integração	1,06%	0,71%	0,35%

Resultados gerais PM 658

Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. convencional	1,95%
Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. ISO 7194	2,38%
Diferença Relativa	-0,44%
Diferença Relativa %	-18,30%
Índice de Assimetria Y	4,95%

Perfis de velocidades PM 232



Resultados gerais PM 232

Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. convencional	2,15%
Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. ISO 7194	2,15%
Diferença Relativa	-0,01%
Diferença Relativa %	-0,25%
Índice de Assimetria Y	1,26%

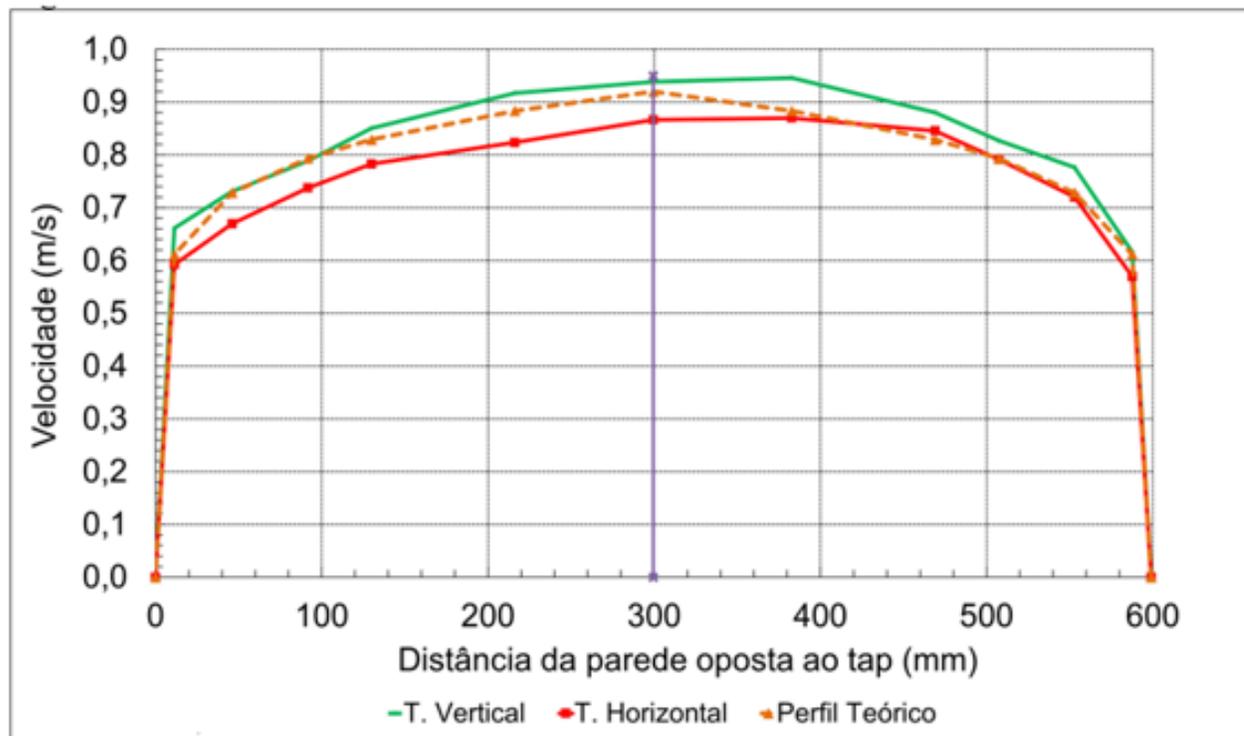
Dados descritivos PM 232

PM	232	
Diâmetro	400	mm
Velocidade Média	3,703	m/s
Vazão	0,484	m³/s
Traverses	2	-

Contribuição de cada componente de incerteza PM 232

PM 232	Distribuição entre as fontes de Incerteza da Vazão		
	C/ Incerteza Distorção convencional	C/ Incerteza Distorção ISO 7194	Diferença relativa
Pressão diferencial (tipo A)	0,47%	0,470%	0,00%
Pressão diferencial (tipo B)	0,000%	0,00%	0,00%
Densidade	0,04%	0,04%	0,00%
Coefficiente de descarga	51,46%	51,20%	0,27%
Gradiente de velocidade	1,95%	1,94%	0,01%
Inclinação do tubo de Pitot	1,95%	1,94%	0,01%
Correção da blocagem	0,02%	0,02%	0,00%
Leve Flutuação da Velocidade	0,87%	0,86%	0,00%
Turbulência	21,71%	21,60%	0,11%
Distorção do perfil de velocidade	1,66%	2,67%	-1,01%
Trena	1,79%	1,73%	0,06%
Incrustação	16,11%	15,57%	0,54%
Posicionamento do tubo Pitot	0,22%	0,22%	0,00%
Qtde insuficientes de pontos medição	0,87%	0,86%	0,00%
Técnica de integração	0,87%	0,86%	0,00%

Perfis de velocidades PM 658



Resultados gerais PM 658

Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. convencional	1,95%
Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. ISO 7194	2,38%
Diferença Relativa	-0,44%
Diferença Relativa %	-18,30%
Índice de Assimetria Y	4,95%

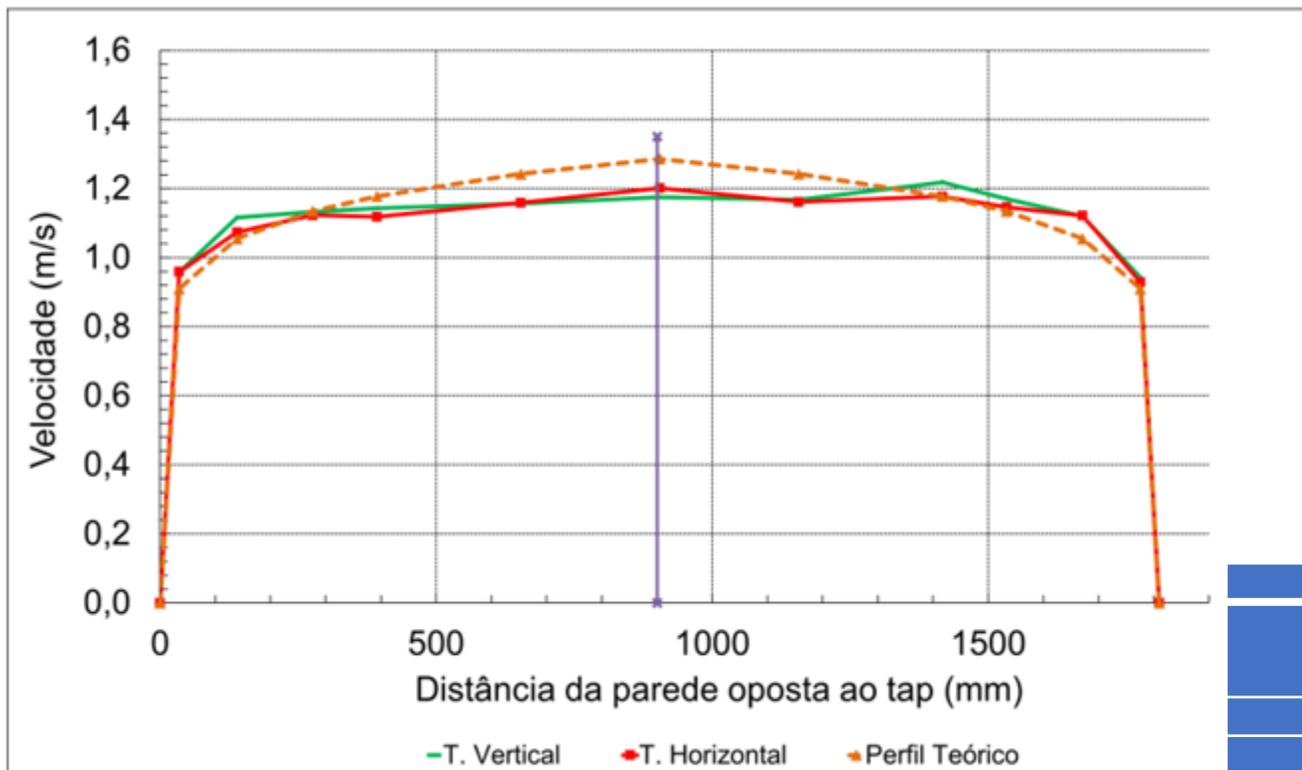
Dados descritivos PM 658

PM	658	
Diâmetro	600	mm
Velocidade Média	0,770	m/s
Vazão	0,216	m ³ /s
Traverses	2	-

Contribuição de cada componente de incerteza PM 658

PM 658 29 09 20 MED	Distribuição entre as fontes de Incerteza da Vazão		
	C/ Incerteza Distorção convencional	C/ Incerteza Distorção ISO 7194	Diferença relativa
Pressão diferencial (tipo A)	1,55%	1,033%	0,51%
Pressão diferencial (tipo B)	0,68%	0,45%	0,22%
Densidade	0,05%	0,03%	0,02%
Coefficiente de descarga	52,39%	34,98%	17,42%
Gradiente de velocidade	2,38%	1,59%	0,79%
Inclinação do tubo de Pitot	2,38%	1,59%	0,79%
Correção da blocagem	0,01%	0,01%	0,00%
Leve Flutuação da Velocidade	1,06%	0,71%	0,35%
Turbulência	26,41%	17,63%	8,78%
Distorção do perfil de velocidade	0,68%	33,83%	-33,14%
Trena	1,00%	0,66%	0,35%
Incrustação	9,04%	5,92%	3,12%
Posicionamento do tubo Pitot	0,26%	0,18%	0,09%
Otde insuficientes de pontos medição	1,06%	0,71%	0,35%
Técnica de integração	1,06%	0,71%	0,35%

Perfis de velocidades PM P



Dados descritivos PM P

PM	P	
Diâmetro	1800	mm
Velocidade Média	1,104	m/s
Vazão	2,835	m ³ /s
Traverses	2	-

Resultados gerais PM P

Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. convencional	2,90%
Incerteza Vazão C/ Incert. Dist. ISO 7194	2,04%
Diferença Relativa	0,86%
Diferença Relativa %	42,12%
Índice de Assimetria Y	1,39%

PM P	Distribuição entre as fontes de Incerteza da Vazão		
Fonte de erros	C/ Incerteza Distorção convencional	C/ Incerteza Distorção ISO 7194	Diferença relativa
Pressão diferencial (tipo A)	1,49%	3,013%	-1,52%
Pressão diferencial (tipo B)	0,090%	0,18%	-0,0922%
Densidade	0,02%	0,04%	-0,02%
Coefficiente de descarga	30,06%	60,68%	-30,62%
Gradiente de velocidade	1,07%	2,16%	-1,09%
Inclinação do tubo de Pitot	1,07%	2,16%	-1,09%
Correção da blocagem	0,00%	0,00%	0,00%
Leve Flutuação da Velocidade	0,48%	0,96%	-0,48%
Turbulência	11,89%	24,00%	-12,11%
Distorção do perfil de velocidade	52,27%	3,66%	48,61%
Trena	0,05%	0,10%	-0,05%
Incrustação	0,44%	0,88%	-0,44%
Posicionamento do tubo Pitot	0,12%	0,24%	-0,12%
Qtde insuficientes de pontos medição	0,48%	0,96%	-0,48%
Técnica de integração	0,48%	0,96%	-0,48%

Conclusões

Os resultados de incerteza de vazão quando utilizada a formulação convencional de incerteza devido a distorção de perfil, mostraram deficiências em diversos casos:

- perfis visivelmente distorcidos podem apresentar baixa incerteza de vazão ou baixa contribuição da incerteza de distorção, dependendo da posição da distorção
- alguns perfis pouco distorcidos podem apresentar alta incerteza de vazão e alta contribuição da incerteza de distorção, novamente dependendo da posição da distorção;

A aplicação da **formulação convencional** para o cálculo de incerteza mostrou, portanto, comportamento instável, pois o modelo matemático está incorreto: até consegue alguns resultados corretos, mas fundamentalmente nunca se sabe se o resultado está correto.

Os resultados de incerteza de vazão quando utilizada a **formulação de incerteza de distorção ISO 7194** mostraram-se coerentes em expressar a distorção do perfil. Deverão ser continuados testes da ISO 7194 aplicada em outras situações de campo para validar a utilização desta abordagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

F. ATTIVISSIMO, Systematic errors and measurement uncertainty: An experimental approach, 2001.

HUGH W. COLEMAN, Engineering Application of Experimental Uncertainty Analysis, AIAA JOURNAL Vol. 33, No. 10, October 1995.

ISO GUM, *Guide for the Expression of Uncertainty, 2008.*

ISO 5168, *Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties, 2005.*

ISO 3966. *Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area Methods using Pitot static tubes, 2008.*

ISO 7194. *Measurement of fluid flow in close conduits – Velocity-area methods of flow measurement in swirling or assymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes.*

M. GRABE, Estimation of measurement uncertainties – an alternative to the ISO guide, (2001)

M. GRABE, Measurement Uncertainties in Science and Technology, Springer, 2005.

PEREIRA, M. T., NERING, D. M., GUEDES D.L., SACHS, O. A. P., SILVA, A. L. S., SANTOS, A. L. Tubo de Pitot e estimativa de vazão: crítica da norma ISO 3966. 32º Encontro Técnico AESabesp / Fenasan 2021, São Paulo.