

Confiabilidade metrológica na medição de vazão de água em condutos livres.

Kazuto Kawakita

*Palestra apresentada no ENCONTRO
TÉCNICO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO, 2024,
São Paulo. 25 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.

PRODIBIDO A REPRODUÇÃO

Painel B3

Confiabilidade metrológica na medição de vazão de água em condutos livres

Kazuto Kawakita

IPT

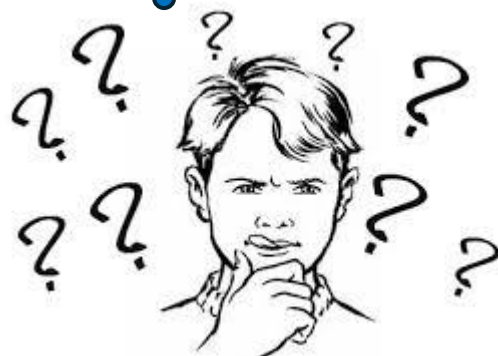
20.03.2024

Escoamentos em condutos livres



Escoamentos em condutos livres

Mas, como é que
eu vou medir
essa vazão?



Desafios - 1

- ❑ Fenômeno mais complexo de se medir do que o escoamento em condutos forçados.
- ❑ Escoamento ocorre em função da carga piezométrica disponível no local.
- ❑ Os regimes de escoamento podem ser: subcrítico, crítico e supercrítico.

Subcrítico ($Fr < 1$)



Crítico ($Fr = 1$)



Supercrítico ($Fr > 1$)



- ❑ Muitas aplicações com grandes variações na vazão ao longo do tempo.
- ❑ Dificuldades para a definição da área molhada (geometria, erosão e sedimentação).
- ❑ A área molhada da seção de escoamento nem sempre segue uma fórmula previsível.

Desafios - 2

- A sistemática aplicada para garantir a confiabilidade metrológica nas medições de vazão de fluidos em condutos forçados ainda não existe em condutos livres.
- A exatidão da medida de vazão depende do número de pontos amostrados.
- Radares medem apenas a velocidade superficial em um ponto do escoamento.
- Ultrassônicos submersos, ADCPs, *Cross Correlation* e outros varrem apenas uma amostra (trajetória ou cone transversal) do escoamento. Inferem um $V_{média}$ que pode ser diferente da efetiva em toda a seção transversal do escoamento.
- Quanto mais restrita a amostra medida, mais dependente se torna a medição de um condicionamento do escoamento (trecho reto a montante do ponto de medição).

Desafios - 3

- Medições baseadas em técnicas empíricas e algumas na medição efetiva da vazão.
- Confiabilidade das medidas depende muito da operação dos sistemas de medição.
- Dificuldades para a recalibração periódica dos medidores em laboratórios de vazão.
- Dificuldade de reproduzir em laboratório condições de testes que representem a aplicação específica.
- Baixa transferibilidade da calibração dos medidores em laboratório para o campo.
- Carência de conhecimento técnico de parte dos usuários de sistemas de medição.

Calhas e Vertedores

ABNT NBR ISO 9826:2008

Medição de vazão de líquido em canais abertos –
Calhas Parshall e SANIIRI

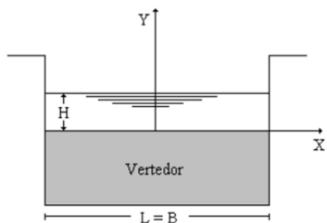
ABNT NBR ISO 3846:2011

Hidrometria – Medição de vazão em canal aberto
utilizando vertedores retangulares de soleira espessa

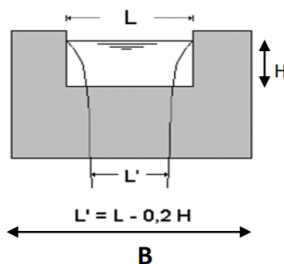
equação geral da vazão para vertedores de parede delgada

1 - Vertedor retangular de parede delgada sem contração lateral

2 - Vertedor retangular de parede delgada com contração lateral



$$Q = 1,838 \cdot L \cdot H^{\frac{3}{2}}$$



$$Q = 1,838 \cdot (L - 0,2H) \cdot H^{\frac{3}{2}}$$



FÓRMULAS E TABELAS

A função matemática para a norma ASTM D1941-21 (2021) que expressa a vazão em função da altura é:

$$Q = K \times H^n$$

Onde: K é uma constante que depende das dimensões da calha e ajuste da unidade de engenharia;

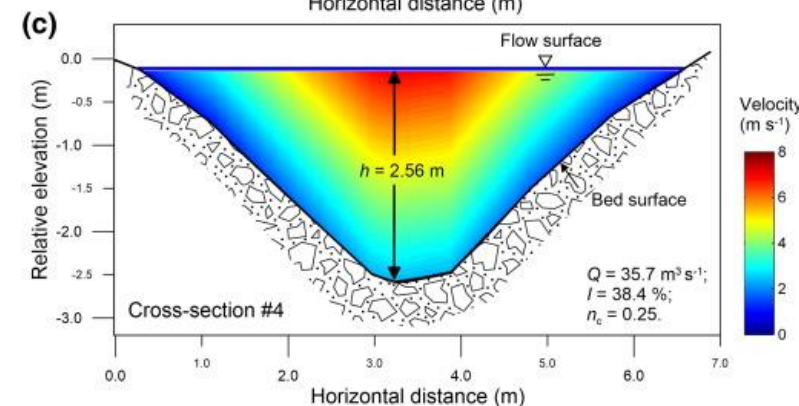
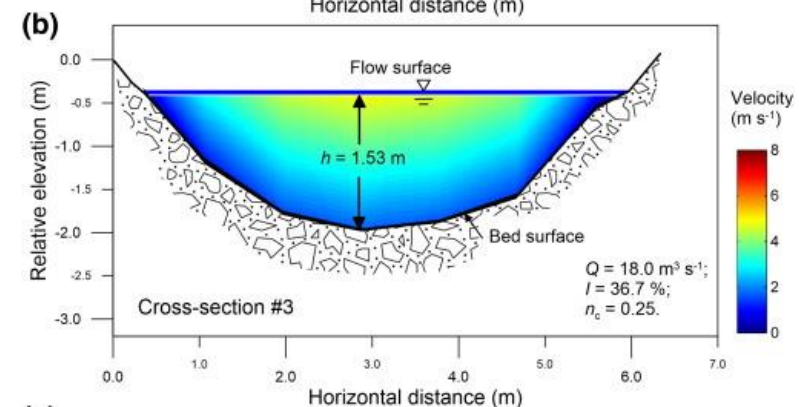
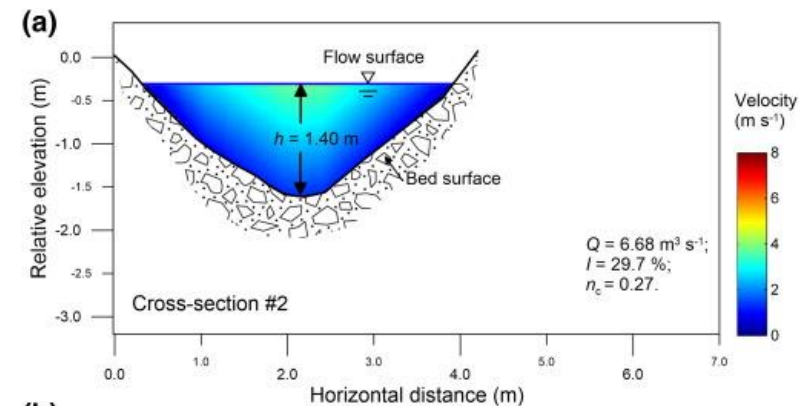
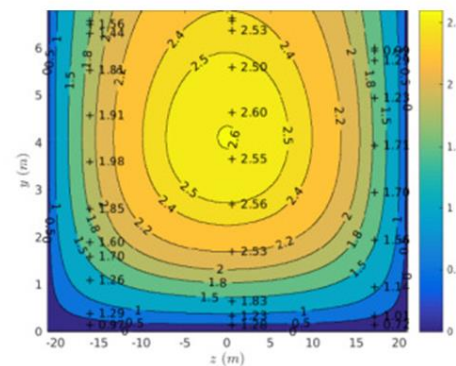
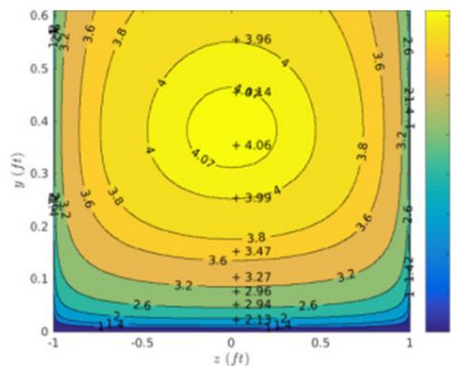
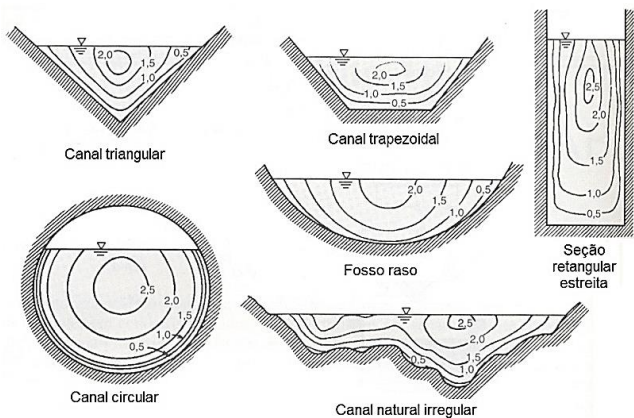
n é um valor que difere ligeiramente de 3/2 (vide a tabela abaixo para valores de K e n para diversos padrões).

Valores de n – K [para vazão em m ³ /h]			
W	n		K
	[inch]	[mm]	
1"	25,4	1,550	217,29
2"	50,8	1,550	434,58
3"	76,2	1,547	633,60
6"	152,4	1,580	1371,60
9"	228,6	1,530	1926,00
12"	304,8	1,522	2484,00
18"	457,2	1,538	3794,40
24"	609,6	1,550	5133,60
36"	914,4	1,566	7855,20
48"	1219,2	1,578	10566,00
60"	1524,0	1,587	13420,80
72"	1828,8	1,595	16254,00
84"	2133,6	1,601	19101,60
96"	2438,4	1,607	21963,60

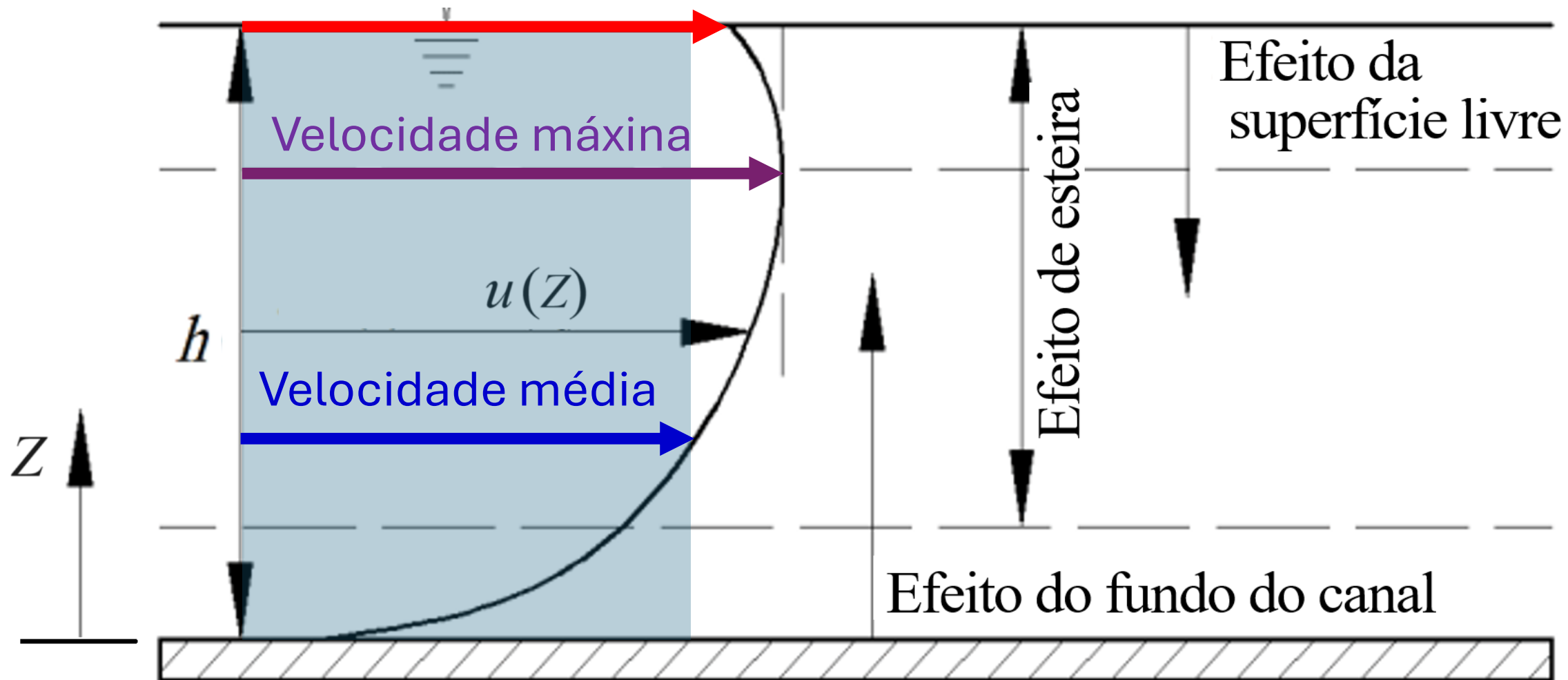
Tabela 6

Perfil de velocidades do escoamento

- ❑ Condutos livres: perfil de velocidades não é axissimétrico.
- ❑ Efeitos de diferentes fatores impactam no perfil de velocidades (geometria e dimensões do conduto, inclinação longitudinal do conduto, arrasto do fundo, das paredes laterais, da superfície livre etc.



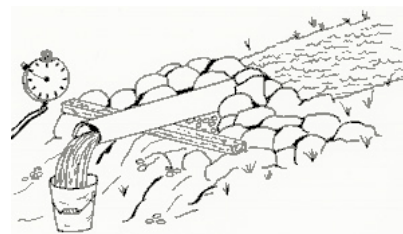
Velocidade superficial



Métodos de medição de vazão em condutos livres - 1

Exemplos de *métodos tradicionais* para medir a vazão em condutos livres:

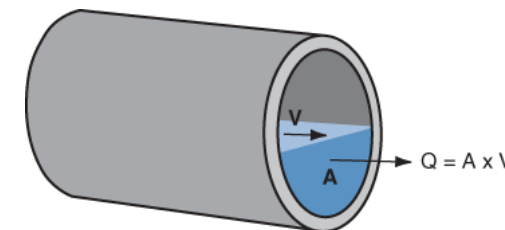
- ❑ Volumétrico / Gravimétrico Temporizado
Vulgo método do baldímetro ou do Diretor



- ❑ Diluição do traçador
Similar ao flutuador

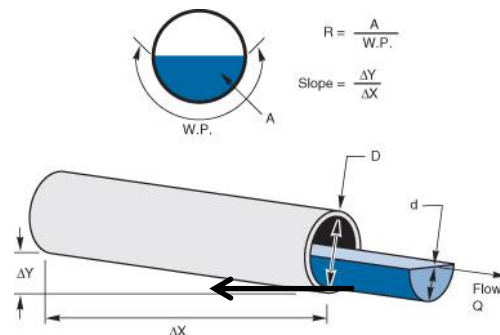


- ❑ Área-Velocidade



- ❑ Equação de Manning

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I_o^{1/2}$$



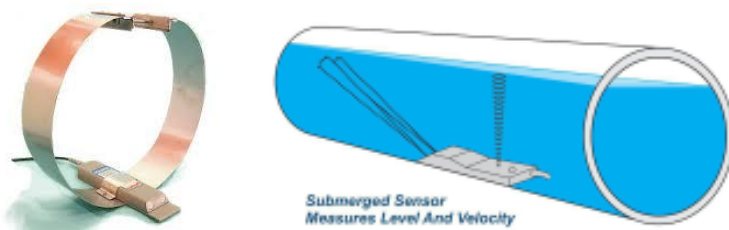
- ❑ Estruturas Hidráulicas (Calhas e vertedores)



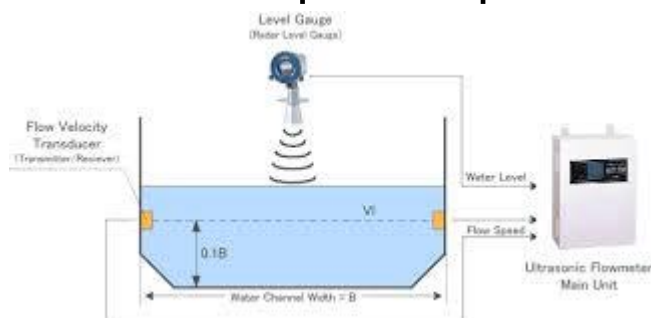
Métodos de medição de vazão em condutos livres - 2

Exemplos de *métodos modernos* medir a vazão em condutos livres:

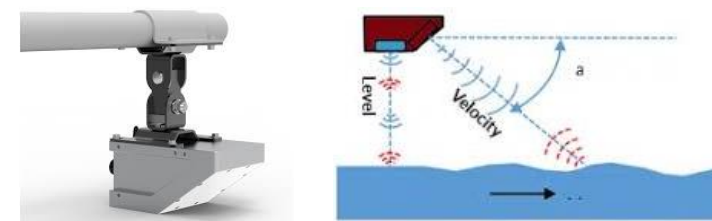
- ❑ Ultrassônico por efeito Doppler



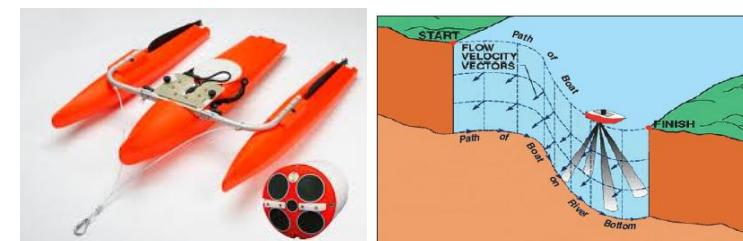
- ❑ Ultrassônico por tempo de trânsito



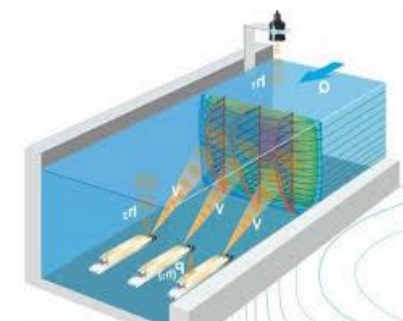
- ❑ Radar



- ❑ ADCP

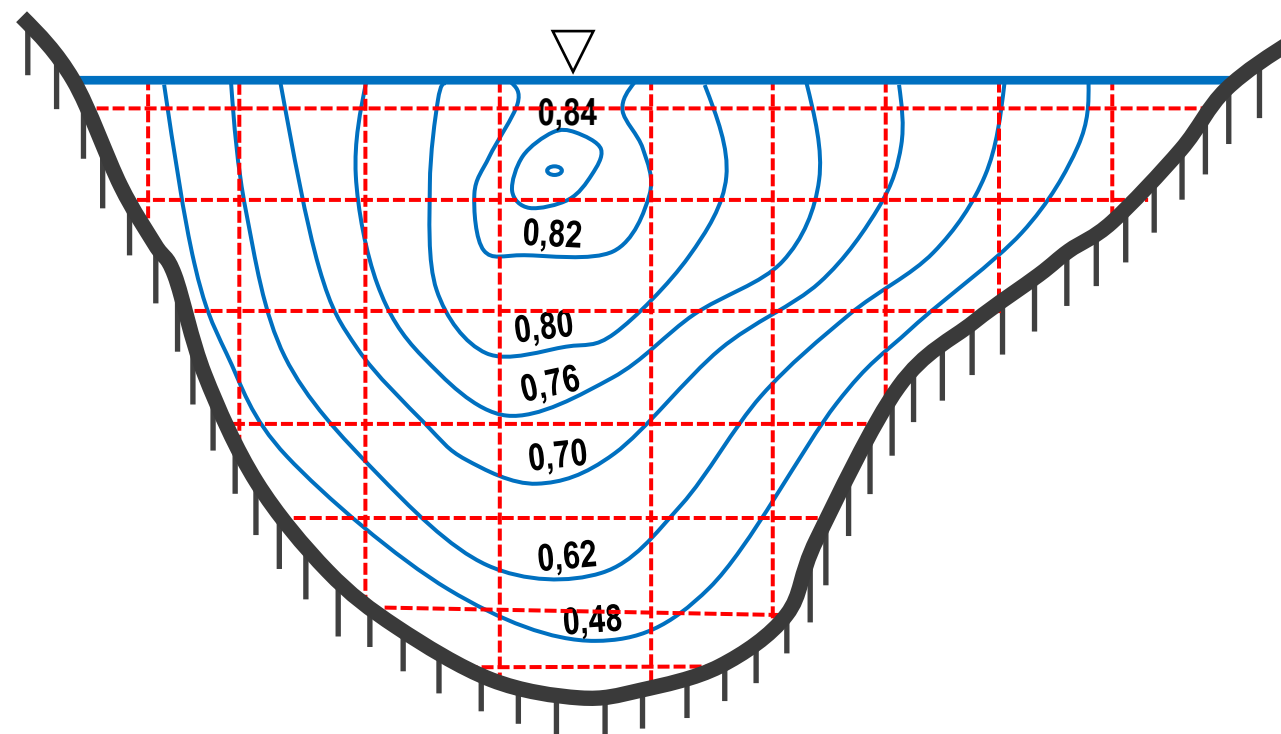


- ❑ *Cross-correlation*



Método para medição de vazão e calibração de sistemas de medição de vazão de água em condutos livres

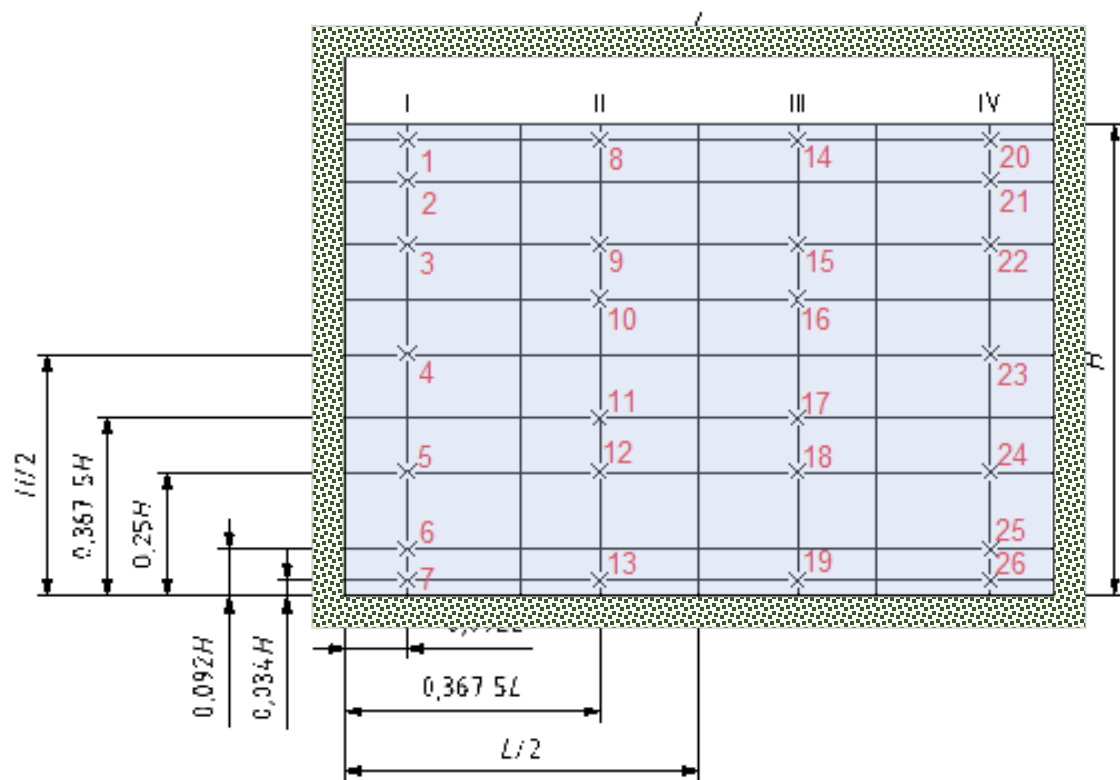
Método de medição da vazão de água em condutos livres baseado no mapeamento do perfil de velocidades do escoamento por meio de um sensor de velocidade pontual



Metodologia da ABNT NBR ISO 3966 para medição da vazão

Método aritmético

Medição de velocidades em 26 pontos na seção de medição



Localização dos pontos de medição em um conduto de seção transversal retangular para o método *log-linear* utilizando 26 pontos.

$h/H,$	l/L			
	I	II	III	IV
	0,092	0,367 5	0,632 5	0,908
0,034	2	3	3	2
0,092	2	—	—	2
0,250	5	3	3	5
0,367 5	—	6	6	—
0,500	6	—	—	6
0,632 5	—	6	6	—
0,750	5	3	3	5
0,908	2	—	—	2
0,966	2	3	3	2

Método *log-linear* em uma seção transversal retangular – Localização dos pontos de medição e dos coeficientes de ponderação.

A velocidade de descarga, V , é igual à **média ponderada** das velocidades locais medidas:

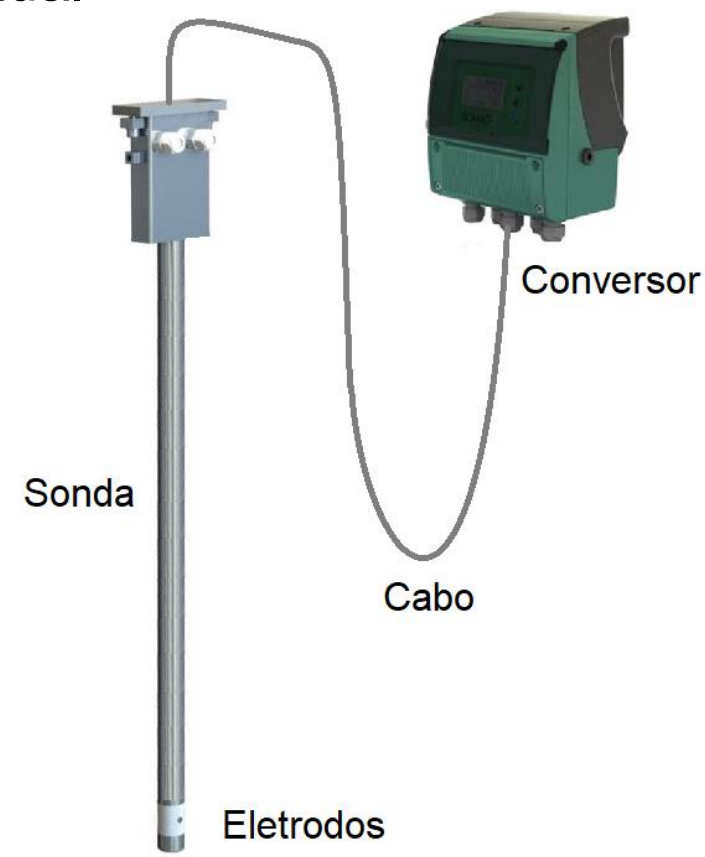
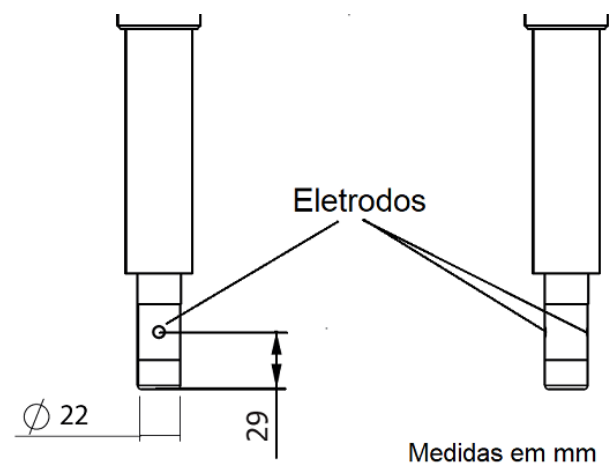
$$V = \frac{\sum K_i v_i}{\sum k_i}$$

Para o método utilizando 26 pontos de medição, $\sum k_i = 96$.

Mas, como medir a velocidade pontual?



O medidor eletromagnético do tipo inserção é uma opção por se aproximar de um medidor de velocidade pontual



Testes de avaliação do medidor eletromagnético de inserção

Tanque de provas do IPT (*Towing tank*)

Dimensões: 280 m comprimento / 6,6 m largura / 4,0 m profundidade / V_{max} : 7,0 m/s

Calibração de sensores de velocidade de medidores de vazão.



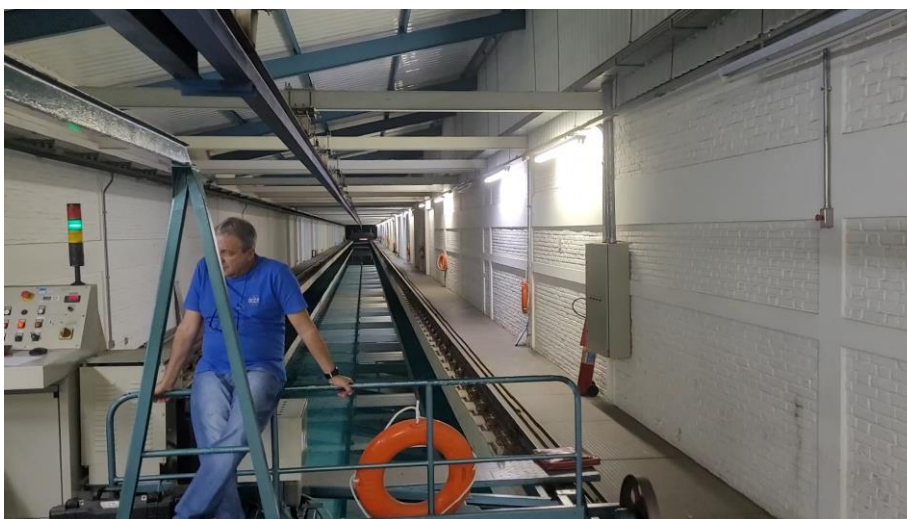
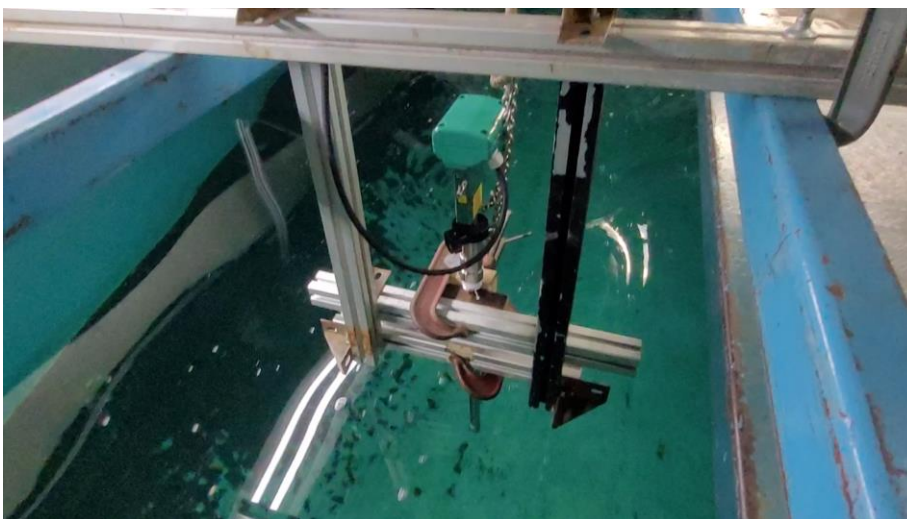
Testes de calibração do medidor eletromagnético de inserção

O conjunto sensor + cabo + conversor do medidor eletromagnético foi testado no tanque de provas do IPT sendo submetido a deslocamentos do carro reboque nas velocidades de 0,1 m/s, 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s.

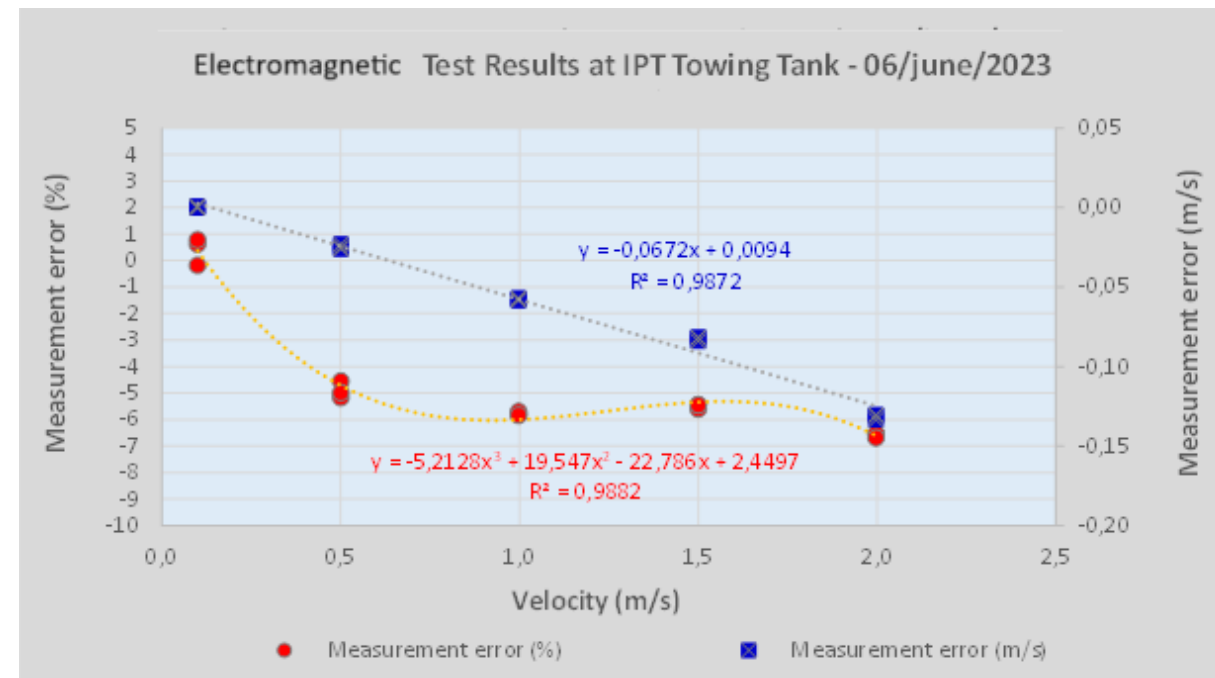
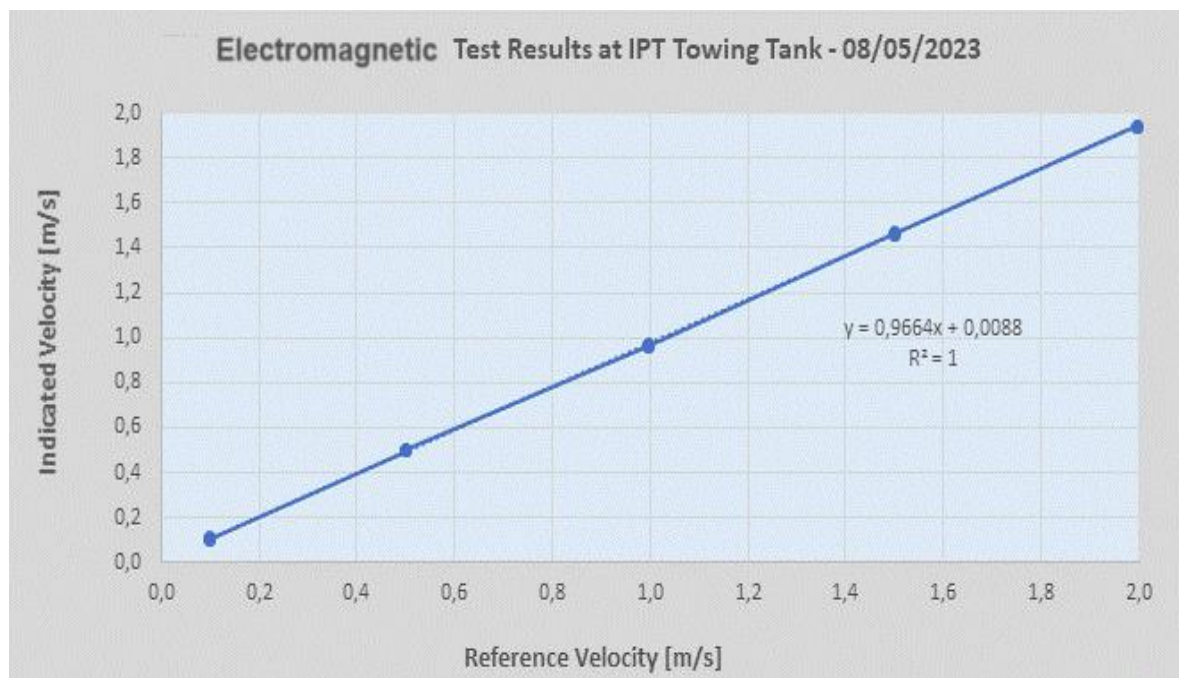
Em cada velocidade, as medições foram realizadas 3 vezes e, em cada uma dessas medições, foram registradas sequências de 24 medições realizadas pelo carro reboque e pelo medidor eletromagnético.



Testes de avaliação do medidor eletromagnético de inserção



Testes de avaliação do medidor eletromagnético de inserção



Resultados dos testes com o medidor eletromagnético de inserção.

Aplicação de metodologia em campo

Mapeamento do perfil de velocidades do escoamento em uma canal de ETA com a aplicação da metodologia desenvolvida e o sistema de medição com sensor eletromagnético de velocidade



Exemplo de resultados de medições em um canal de seção retangular

LOCAL: Canal B LARGURA: 1,953 m
DATA: 31/05/2023 ALTURA: 2,319 m

PONTO																										
MEDIDA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	0,990	0,907	0,950	0,970	0,800	0,750	0,700	1,000	1,160	1,110	0,950	1,000	0,850	1,060	1,100	1,000	0,920	0,900	0,830	0,980	0,940	0,890	0,860	0,740	0,810	0,730
2	1,050	0,916	1,000	0,910	0,780	0,750	0,700	1,070	1,080	1,080	0,970	0,950	0,760	1,040	1,120	1,030	0,920	0,850	0,700	1,050	0,860	0,910	0,830	0,780	0,810	0,680
3	0,950	0,954	1,040	0,910	0,870	0,690	0,710	0,980	1,120	1,000	0,980	0,880	0,900	1,150	1,080	0,980	0,940	0,880	0,820	0,960	0,910	0,840	0,810	0,840	0,730	0,670
4	1,040	0,909	1,050	0,940	0,820	0,700	0,670	1,070	1,080	1,030	0,940	0,940	0,810	1,070	1,050	0,980	0,890	0,900	0,770	1,050	0,860	0,870	0,880	0,780	0,680	0,670
5	0,950	0,909	1,033	0,900	0,780	0,720	0,710	0,980	1,140	1,040	0,950	0,970	0,810	1,030	1,050	1,090	0,930	0,910	0,750	0,960	0,780	0,880	0,830	0,810	0,700	0,670
MÉDIA	0,996	0,919	1,015	0,926	0,810	0,722	0,698	1,020	1,116	1,052	0,958	0,948	0,826	1,070	1,080	1,016	0,920	0,888	0,774	1,000	0,870	0,878	0,842	0,790	0,746	0,684



Canal de seção retangular

K_i	Valor de média ponderada		
2	3	3	2
2	-	-	2
5	3	3	5
-	6	6	-
6	-	-	6
-	6	6	-
5	3	3	5
2	-	-	2
2	3	3	2

V_{ic}	Veloc média corrigida do ponto		
1,060	1,085	1,138	1,064
0,978	-	-	0,926
1,079	1,186	1,148	0,934
-	1,119	1,081	-
0,985	-	-	0,896
-	1,019	0,979	-
0,861	1,009	0,945	0,840
0,766	-	-	0,792
0,740	0,878	0,822	0,725

$K_i \cdot V_{ic}$	Veloc média ponderada do ponto		
2,119	3,255	3,413	2,128
1,956	-	-	1,851
5,396	3,557	3,444	4,671
-	6,712	6,484	-
5,912	-	-	5,374
-	6,116	5,874	-
4,306	3,026	2,835	4,199
1,532	-	-	1,584
1,480	2,635	2,467	1,450

Resumo dos resultados

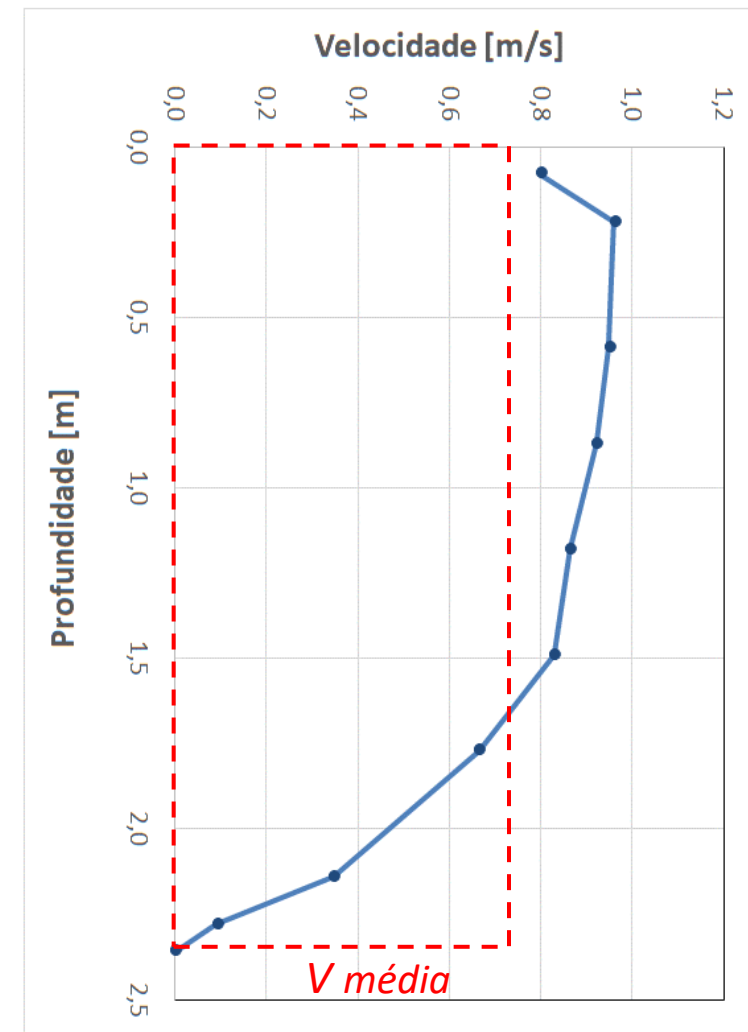
- Resultado da somatória $\sum K_i \cdot V_i$: $\sum K_i \cdot V_i = 93,780$
- Velocidade média medida: $\sum K_i \cdot V_i / 96 = 0,977$ m/s
- Área molhada: $4,689$ m²
- Vazão medida calculada: $4,581$ m³/s

Exemplo de resultados de medições em um canal de seção retangular

LOCAL:	Canal A								
DATA:	01/06/2023								
PONTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Início:	15h50	15h13	15h17	15h20	15h24	15h27	15h30	15h34	15h37
1	0,783	0,930	0,850	0,900	0,820	0,790	0,650	0,260	0,130
2	0,759	0,880	0,890	0,840	0,830	0,780	0,600	0,410	0,110
3	0,791	0,910	0,890	0,870	0,810	0,740	0,690	0,320	0,025
4	0,757	0,910	0,930	0,840	0,800	0,780	0,600	0,370	0,063
5	0,713	0,880	0,900	0,880	0,800	0,810	0,600	0,320	0,130
Fim:	15h52	15h15	15h18	15h22	15h25	15h28	15h32	15h35	15h38
MÉDIA	0,761	0,902	0,892	0,866	0,812	0,780	0,628	0,336	0,092

PONTO	Prof [m]	V [m/s]
1	0,08	0,808
2	0,22	0,960
3	0,59	0,949
4	0,87	0,921
5	1,18	0,863
6	1,49	0,829
7	1,77	0,664
8	2,14	0,347
9	2,28	0,091
10	2,36	0,000

Perfil de velocidades do escoamento medido com o medidor eletromagnético de inserção no Canal A



Comentários e Conclusões

- O medidor eletromagnético de inserção revelou-se uma opção promissora no desenvolvimento de um novo método de medição de vazão em condutos livres.
- Testes no tanque de provas do IPT: o medidor apresentou bons resultados com um alto nível de repetibilidade e linearidade das medidas.
- Aplicação em campo: o suporte de fixação da haste de medição permitiu o posicionamento correto da sonda sensora nos pontos especificados.
- As medições realizadas em campo mostraram que o medidor permite a determinação das velocidades pontuais do escoamento de água e, assim, possibilita a caracterização do perfil de velocidades do escoamento em toda a área da seção transversal do canal por meio de uma amostragem realizada em um grande número de pontos, o que propicia uma maior representatividade e confiabilidade aos resultados, além de um conhecimento mais aprofundado das características e das condições do escoamento no local da medição.

Primeiras perguntas

- Em quais aplicações a medição de vazão de água em condutos livres é necessária?
- Qual é o grau de satisfação atual dos usuários de sistemas de medição de vazão de líquidos para condutos livres com as soluções que utiliza?
- Qual é o nível de confiabilidade (incerteza) requerido para as aplicações de medição de vazão de água em condutos livres?
- Qual é o estágio atual de capacitação dos usuários de sistemas de medição de vazão de líquidos em condutos livres?



Primeiras propostas

- Instituir na área a sistemática aplicada para garantir a confiabilidade metrológica nas medições de vazão de fluidos em condutos forçados
- Criar normas técnicas ABNT específicas para medição em condutos livres
- Desenvolver estudos sobre a aplicabilidade das tecnologias de medição
- Criar procedimentos de calibração para medidores de vazão para condutos livres
- Elaborar manual para projeto, construção/instalação, operação e manutenção de sistemas de medição de vazão em condutos livres
- Oferecer cursos de capacitação em medição de vazão de água em condutos livres



Muito obrigado!

Kazuto Kawakita

kawakita@ipt.br

Painel B3

Confiabilidade metrológica na medição de vazão de água em condutos livres

Kazuto Kawakita

IPT

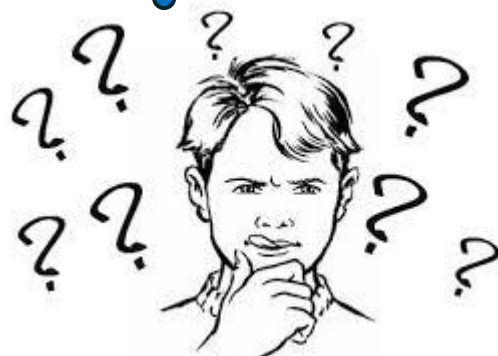
20.03.2024

Escoamentos em condutos livres



Escoamentos em condutos livres

Mas, como é que
eu vou medir
essa vazão?



Desafios - 1

- ❑ Fenômeno mais complexo de se medir do que o escoamento em condutos forçados.
- ❑ Escoamento ocorre em função da carga piezométrica disponível no local.
- ❑ Os regimes de escoamento podem ser: subcrítico, crítico e supercrítico.

Subcrítico ($Fr < 1$)



Crítico ($Fr = 1$)



Supercrítico ($Fr > 1$)



- ❑ Muitas aplicações com grandes variações na vazão ao longo do tempo.
- ❑ Dificuldades para a definição da área molhada (geometria, erosão e sedimentação).
- ❑ A área molhada da seção de escoamento nem sempre segue uma fórmula previsível.

Desafios - 2

- A sistemática aplicada para garantir a confiabilidade metrológica nas medições de vazão de fluidos em condutos forçados ainda não existe em condutos livres.
- A exatidão da medida de vazão depende do número de pontos amostrados.
- Radares medem apenas a velocidade superficial em um ponto do escoamento.
- Ultrassônicos submersos, ADCPs, *Cross Correlation* e outros varrem apenas uma amostra (trajetória ou cone transversal) do escoamento. Inferem um $V_{média}$ que pode ser diferente da efetiva em toda a seção transversal do escoamento.
- Quanto mais restrita a amostra medida, mais dependente se torna a medição de um condicionamento do escoamento (trecho reto a montante do ponto de medição).

Desafios - 3

- Medições baseadas em técnicas empíricas e algumas na medição efetiva da vazão.
- Confiabilidade das medidas depende muito da operação dos sistemas de medição.
- Dificuldades para a recalibração periódica dos medidores em laboratórios de vazão.
- Dificuldade de reproduzir em laboratório condições de testes que representem a aplicação específica.
- Baixa transferibilidade da calibração dos medidores em laboratório para o campo.
- Carência de conhecimento técnico de parte dos usuários de sistemas de medição.

Calhas e Vertedores

ABNT NBR ISO 9826:2008

Medição de vazão de líquido em canais abertos –
Calhas Parshall e SANIIRI

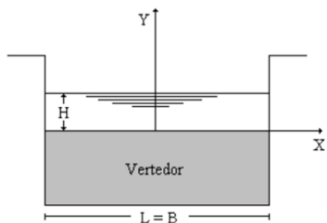
ABNT NBR ISO 3846:2011

Hidrometria – Medição de vazão em canal aberto
utilizando vertedores retangulares de soleira espessa

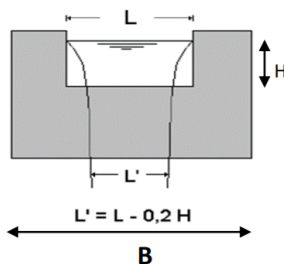
equação geral da vazão para vertedores de parede delgada

1 - Vertedor retangular de parede delgada sem contração lateral

2 - Vertedor retangular de parede delgada com contração lateral



$$Q = 1,838 \cdot L \cdot H^{\frac{3}{2}}$$



$$Q = 1,838 \cdot (L - 0,2H) \cdot H^{\frac{3}{2}}$$



FÓRMULAS E TABELAS

A função matemática para a norma ASTM D1941-21 (2021) que expressa a vazão em função da altura é:

$$Q = K \times H^n$$

Onde: K é uma constante que depende das dimensões da calha e ajuste da unidade de engenharia;

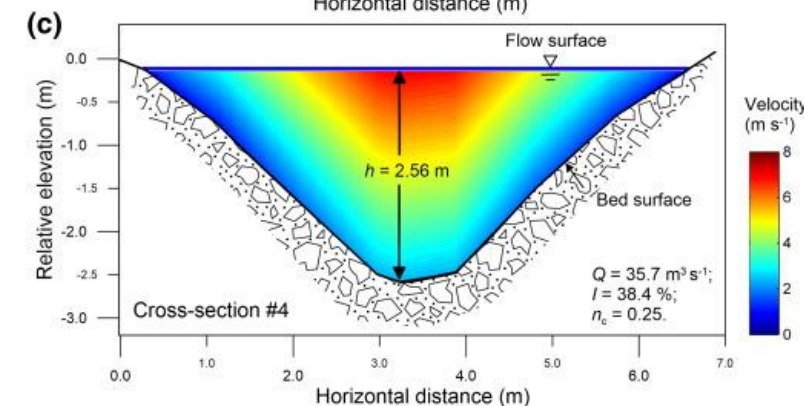
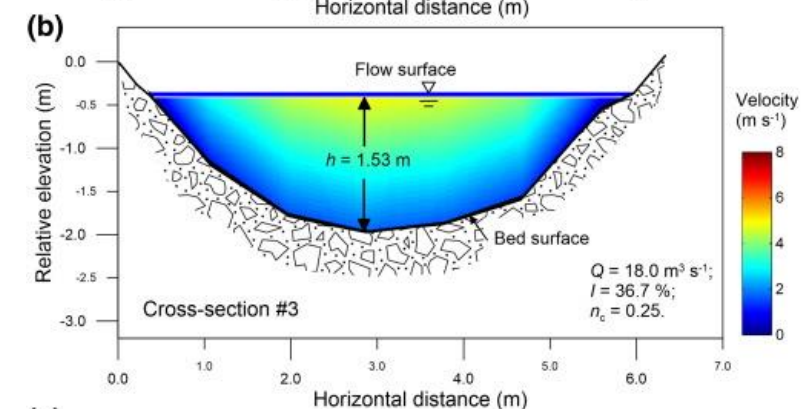
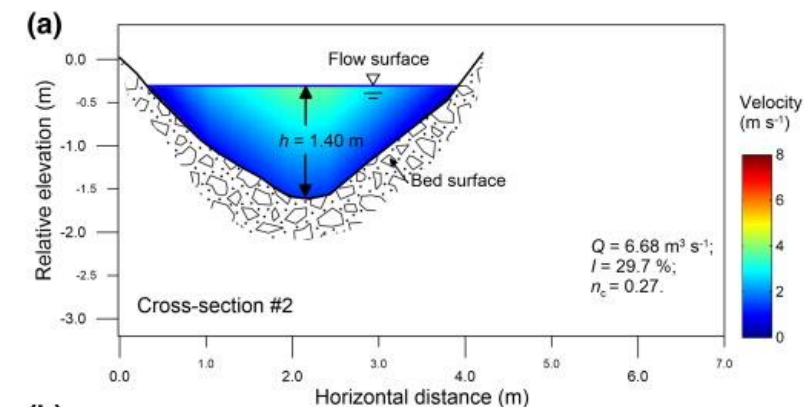
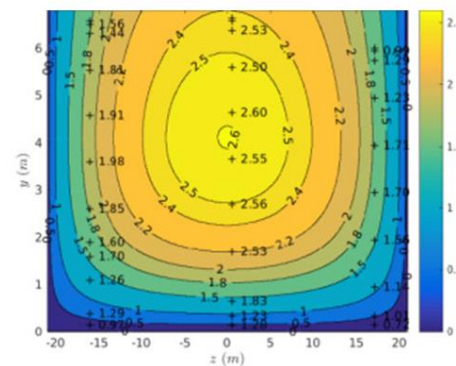
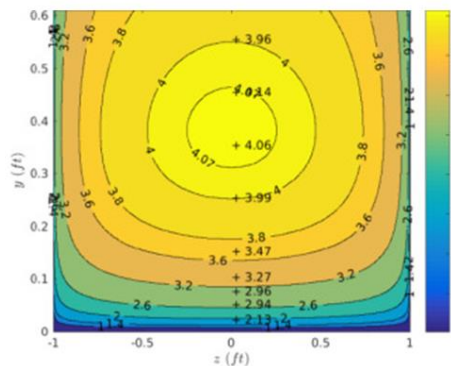
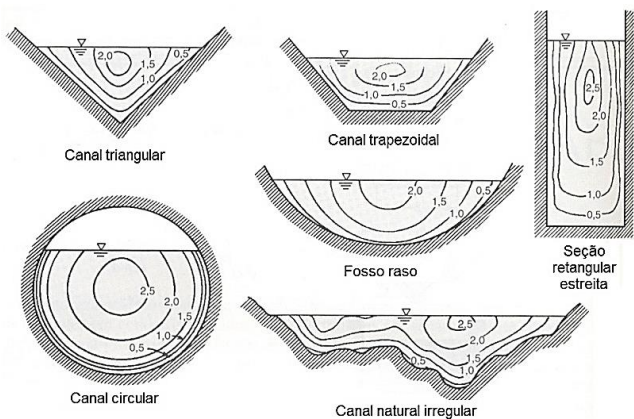
n é um valor que difere ligeiramente de 3/2 (vide a tabela abaixo para valores de K e n para diversos padrões).

Valores de n – K [para vazão em m ³ /h]			
W	n		K
	[inch]	[mm]	
1"	25,4	1,550	217,29
2"	50,8	1,550	434,58
3"	76,2	1,547	633,60
6"	152,4	1,580	1371,60
9"	228,6	1,530	1926,00
12"	304,8	1,522	2484,00
18"	457,2	1,538	3794,40
24"	609,6	1,550	5133,60
36"	914,4	1,566	7855,20
48"	1219,2	1,578	10566,00
60"	1524,0	1,587	13420,80
72"	1828,8	1,595	16254,00
84"	2133,6	1,601	19101,60
96"	2438,4	1,607	21963,60

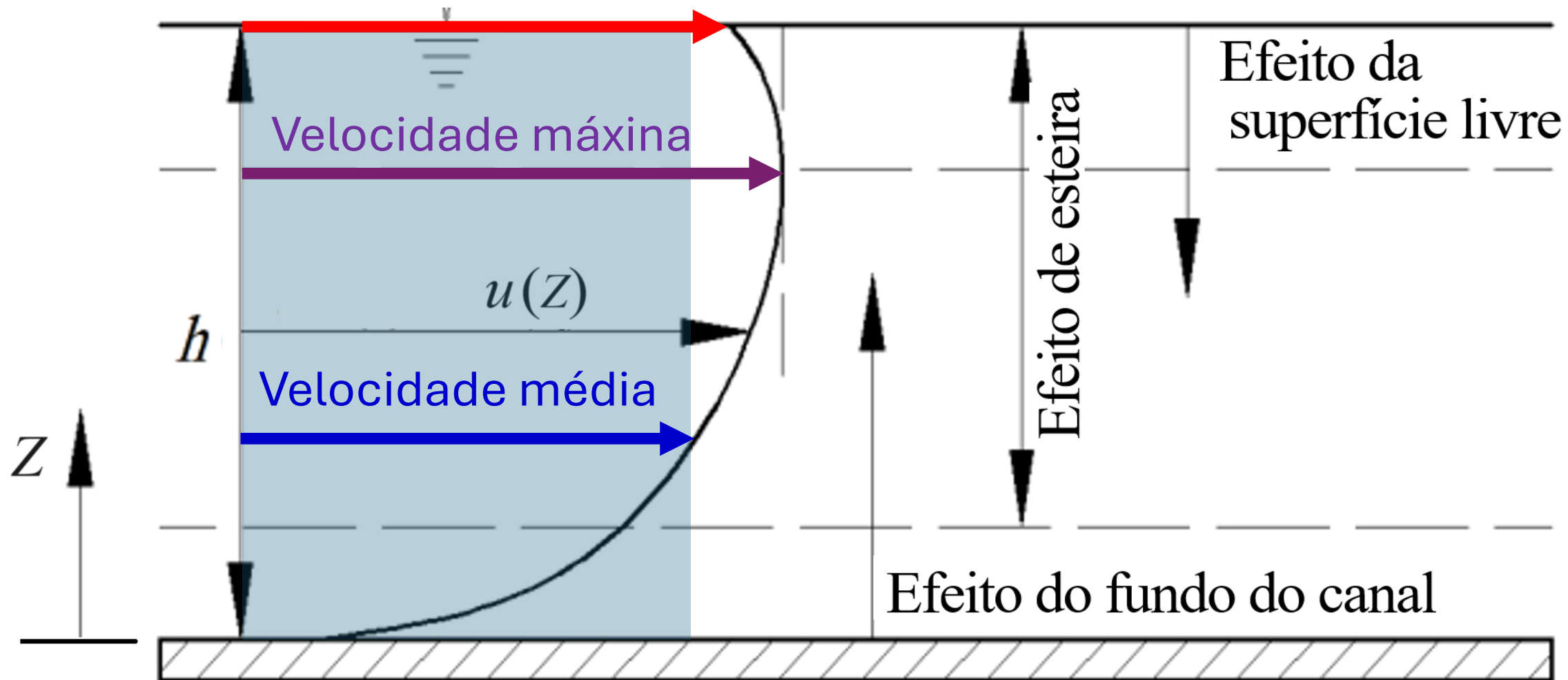
Tabela 6

Perfil de velocidades do escoamento

- ❑ Condutos livres: perfil de velocidades não é axissimétrico.
- ❑ Efeitos de diferentes fatores impactam no perfil de velocidades (geometria e dimensões do conduto, inclinação longitudinal do conduto, arrasto do fundo, das paredes laterais, da superfície livre etc.



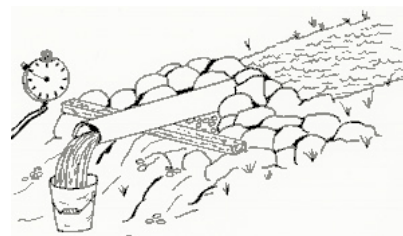
Velocidade superficial



Métodos de medição de vazão em condutos livres - 1

Exemplos de *métodos tradicionais* para medir a vazão em condutos livres:

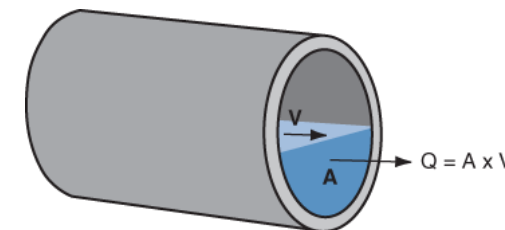
- ❑ Volumétrico / Gravimétrico Temporizado
Vulgo método do baldímetro ou do Diretor



- ❑ Diluição do traçador
Similar ao flutuador

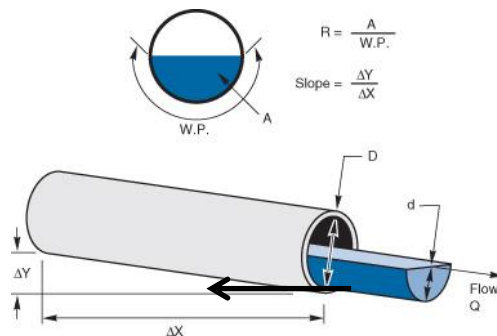


- ❑ Área-Velocidade



- ❑ Equação de Manning

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I_o^{1/2}$$



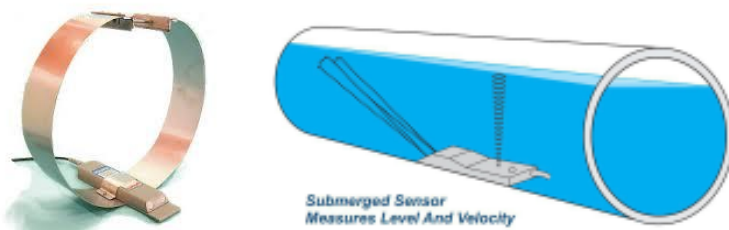
- ❑ Estruturas Hidráulicas (Calhas e vertedores)



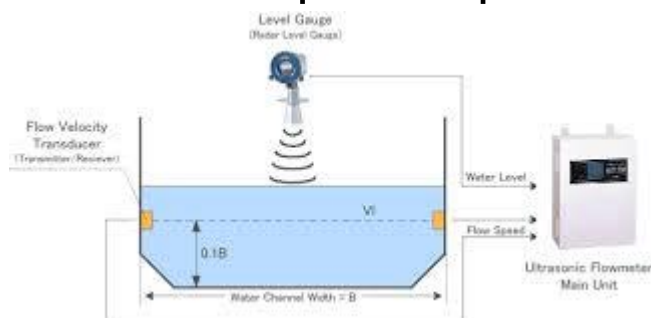
Métodos de medição de vazão em condutos livres - 2

Exemplos de *métodos modernos* medir a vazão em condutos livres:

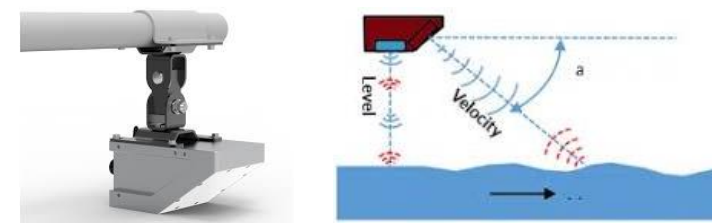
- ❑ Ultrassônico por efeito Doppler



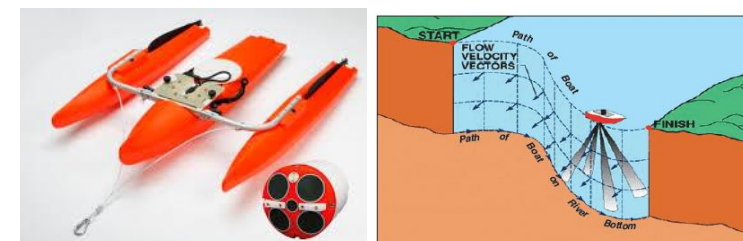
- ❑ Ultrassônico por tempo de trânsito



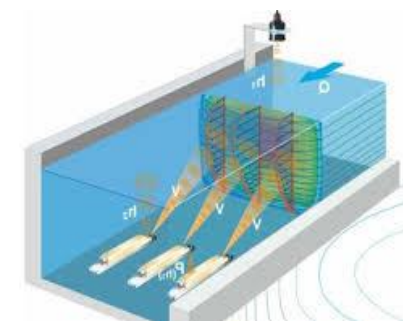
- ❑ Radar



- ❑ ADCP

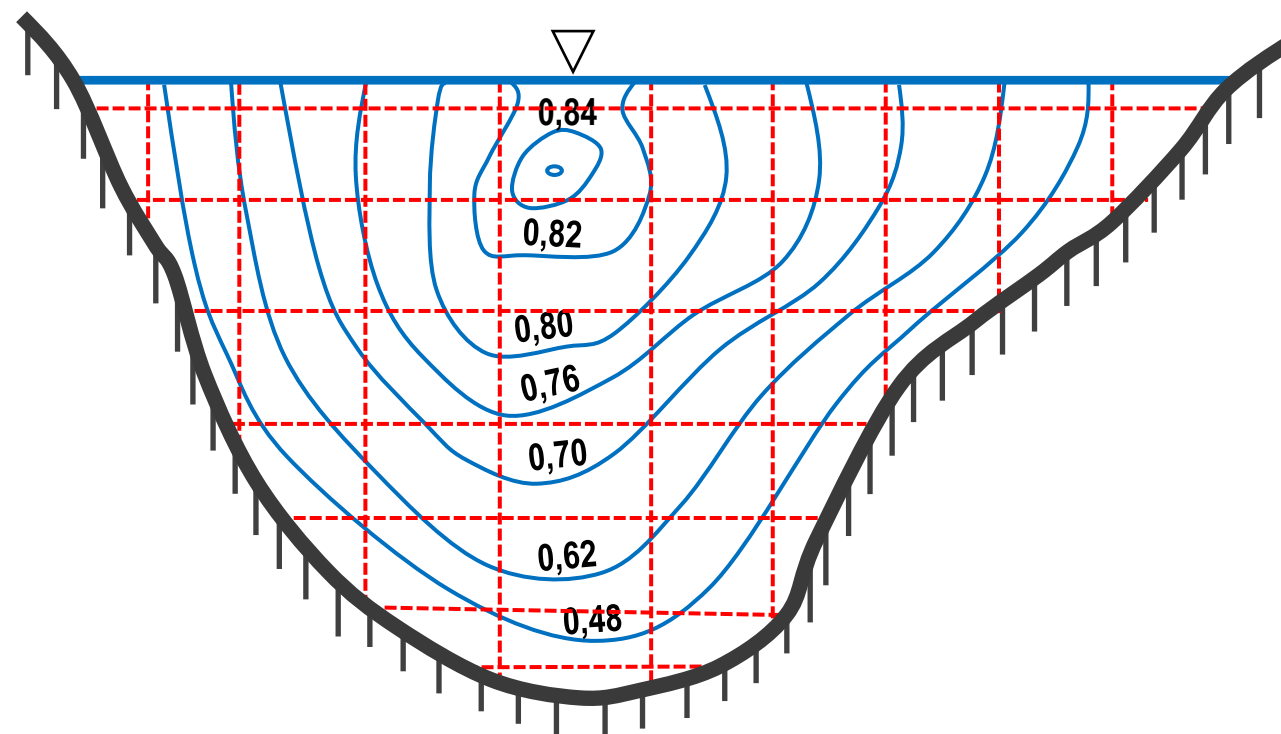


- ❑ *Cross-correlation*



Método para medição de vazão e calibração de sistemas de medição de vazão de água em condutos livres

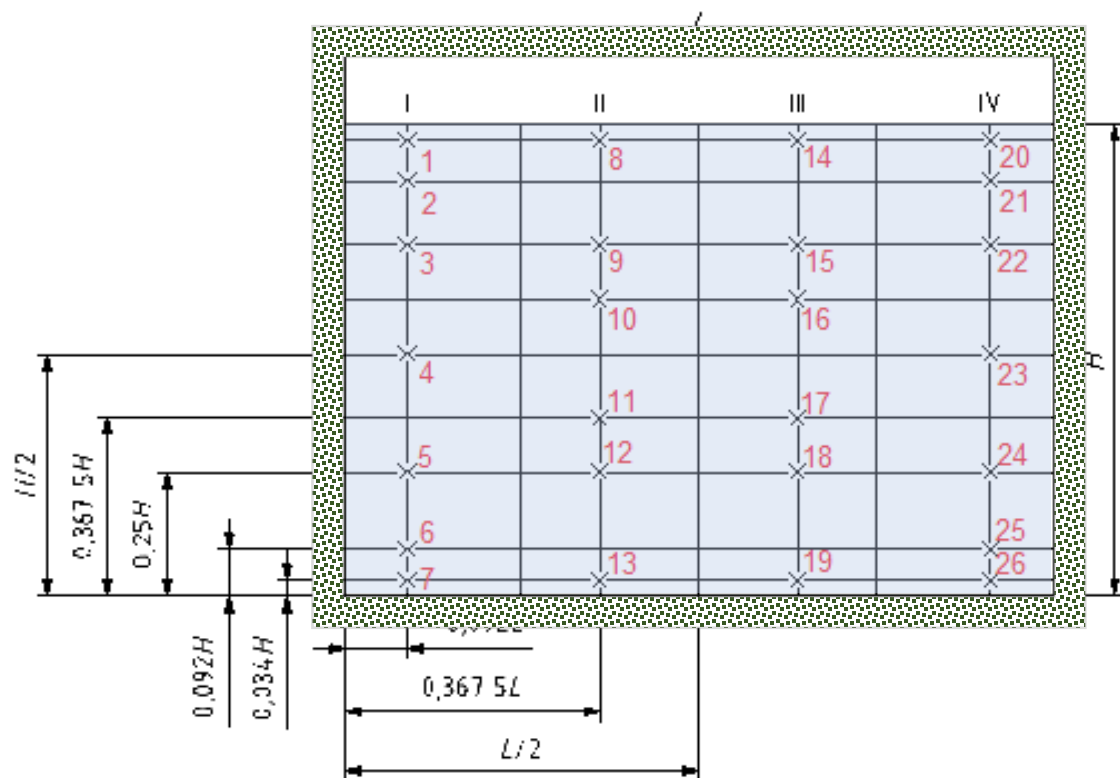
Método de medição da vazão de água em condutos livres baseado no mapeamento do perfil de velocidades do escoamento por meio de um sensor de velocidade pontual



Metodologia da ABNT NBR ISO 3966 para medição da vazão

Método aritmético

Medição de velocidades em 26 pontos na seção de medição



Localização dos pontos de medição em um conduto de seção transversal retangular para o método *log-linear* utilizando 26 pontos.

$h/H,$	l/L			
	I	II	III	IV
	0,092	0,367 5	0,632 5	0,908
0,034	2	3	3	2
0,092	2	—	—	2
0,250	5	3	3	5
0,367 5	—	6	6	—
0,500	6	—	—	6
0,632 5	—	6	6	—
0,750	5	3	3	5
0,908	2	—	—	2
0,966	2	3	3	2

Método *log-linear* em uma seção transversal retangular – Localização dos pontos de medição e dos coeficientes de ponderação.

A velocidade de descarga, V , é igual à **média ponderada** das velocidades locais medidas:

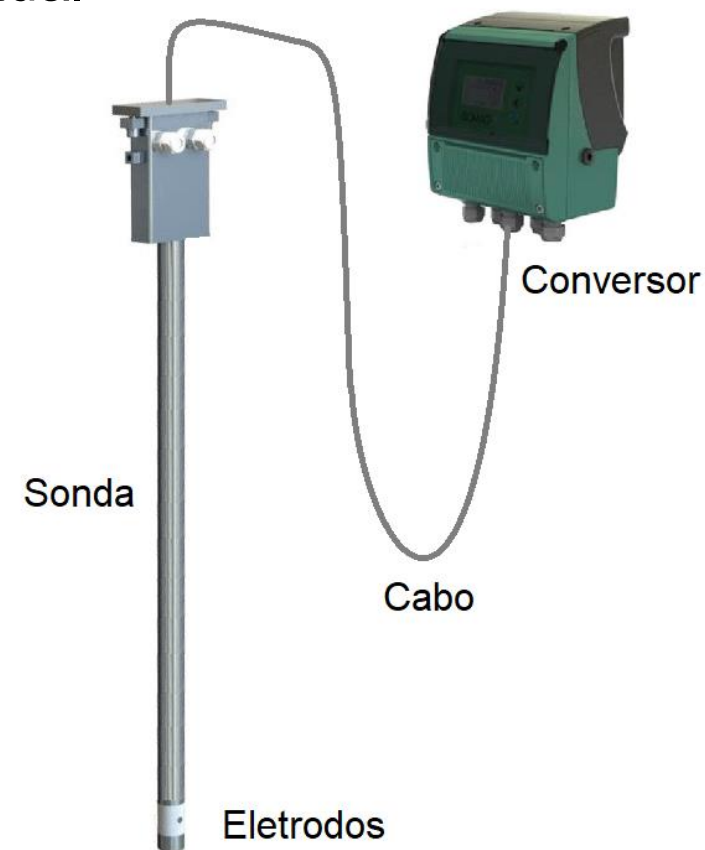
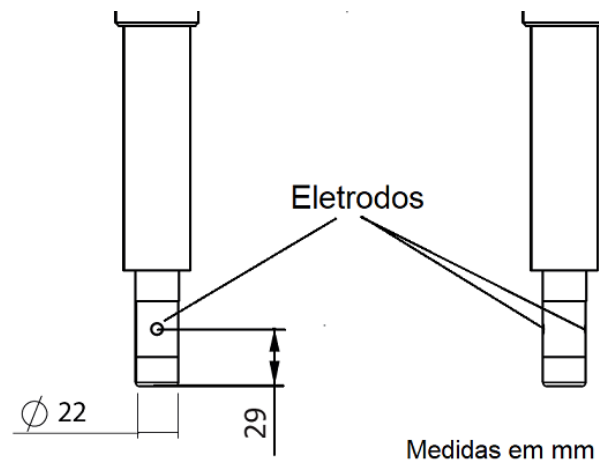
$$V = \frac{\sum K_i v_i}{\sum k_i}$$

Para o método utilizando 26 pontos de medição, $\sum k_i = 96$.

Mas, como medir a velocidade pontual?



O medidor eletromagnético do tipo inserção é uma opção por se aproximar de um medidor de velocidade pontual



Testes de avaliação do medidor eletromagnético de inserção

Tanque de provas do IPT (*Towing tank*)

Dimensões: 280 m comprimento / 6,6 m largura / 4,0 m profundidade / V_{max} : 7,0 m/s

Calibração de sensores de velocidade de medidores de vazão.



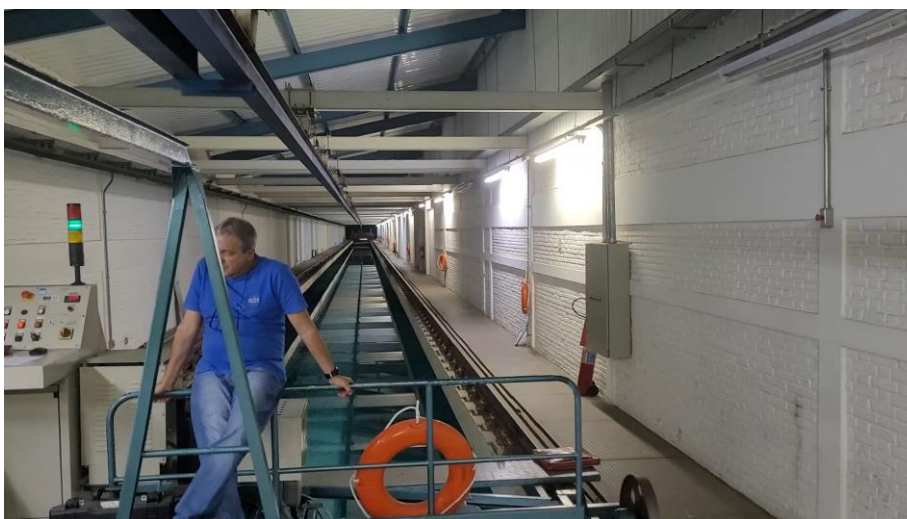
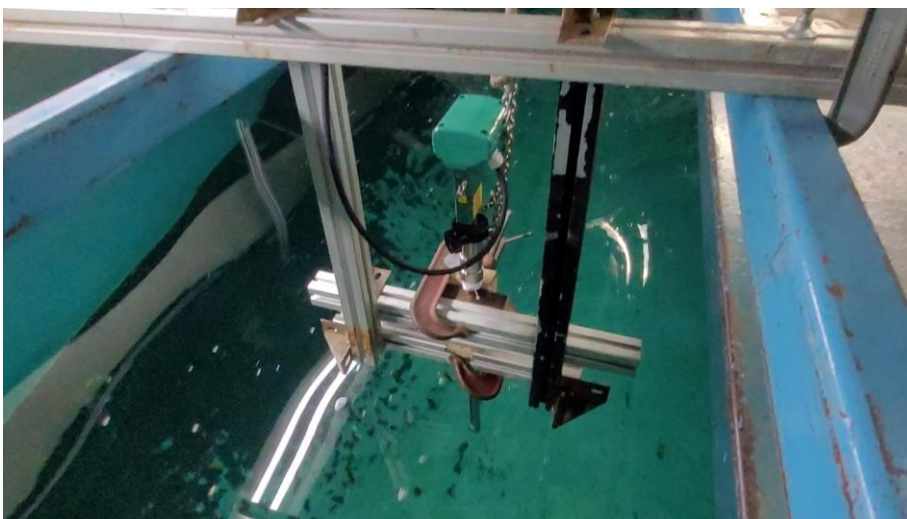
Testes de calibração do medidor eletromagnético de inserção

O conjunto sensor + cabo + conversor do medidor eletromagnético foi testado no tanque de provas do IPT sendo submetido a deslocamentos do carro reboque nas velocidades de 0,1 m/s, 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s.

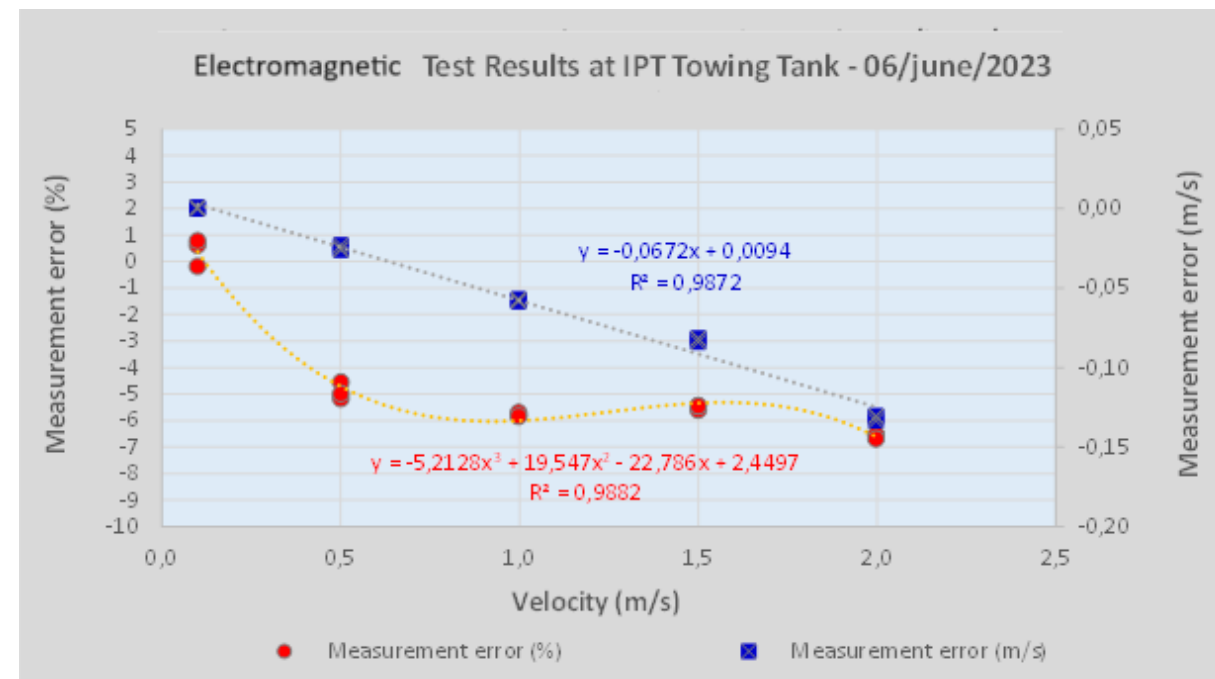
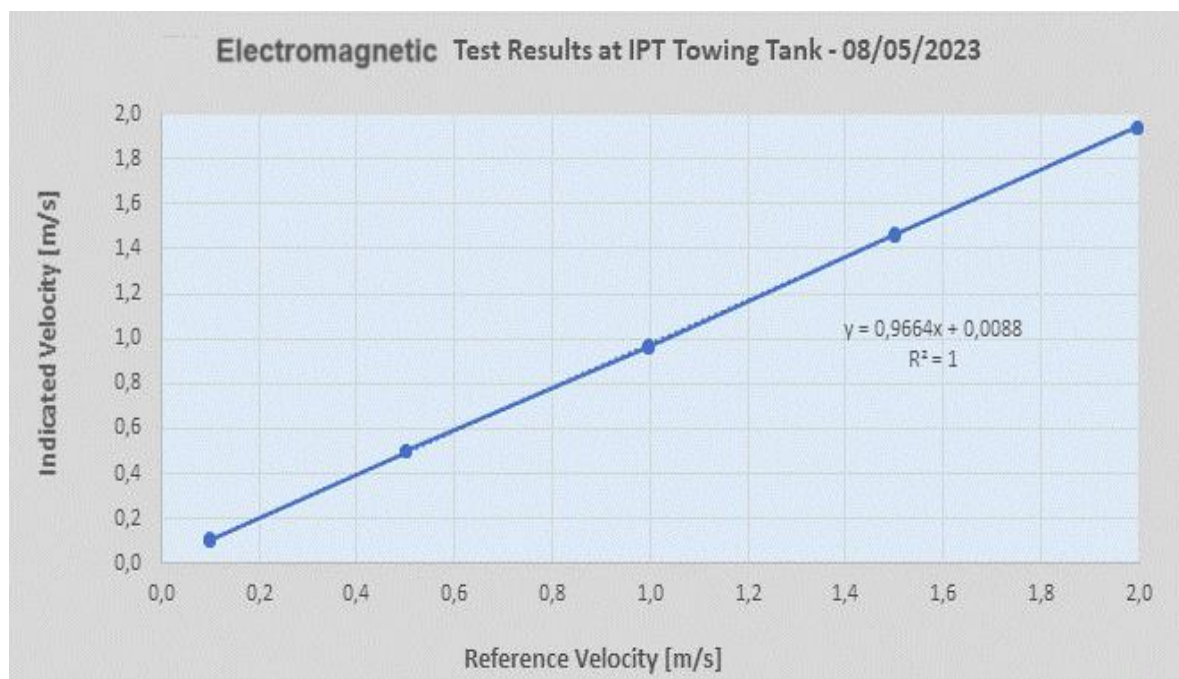
Em cada velocidade, as medições foram realizadas 3 vezes e, em cada uma dessas medições, foram registradas sequências de 24 medições realizadas pelo carro reboque e pelo medidor eletromagnético.



Testes de avaliação do medidor eletromagnético de inserção



Testes de avaliação do medidor eletromagnético de inserção



Resultados dos testes com o medidor eletromagnético de inserção.

Aplicação de metodologia em campo

Mapeamento do perfil de velocidades do escoamento em uma canal de ETA com a aplicação da metodologia desenvolvida e o sistema de medição com sensor eletromagnético de velocidade



Exemplo de resultados de medições em um canal de seção retangular

LOCAL: Canal B LARGURA: 1,953 m
DATA: 31/05/2023 ALTURA: 2,319 m

PONTO																										
MEDIDA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	0,990	0,907	0,950	0,970	0,800	0,750	0,700	1,000	1,160	1,110	0,950	1,000	0,850	1,060	1,100	1,000	0,920	0,900	0,830	0,980	0,940	0,890	0,860	0,740	0,810	0,730
2	1,050	0,916	1,000	0,910	0,780	0,750	0,700	1,070	1,080	1,080	0,970	0,950	0,760	1,040	1,120	1,030	0,920	0,850	0,700	1,050	0,860	0,910	0,830	0,780	0,810	0,680
3	0,950	0,954	1,040	0,910	0,870	0,690	0,710	0,980	1,120	1,000	0,980	0,880	0,900	1,150	1,080	0,980	0,940	0,880	0,820	0,960	0,910	0,840	0,810	0,840	0,730	0,670
4	1,040	0,909	1,050	0,940	0,820	0,700	0,670	1,070	1,080	1,030	0,940	0,940	0,810	1,070	1,050	0,980	0,890	0,900	0,770	1,050	0,860	0,870	0,880	0,780	0,680	0,670
5	0,950	0,909	1,033	0,900	0,780	0,720	0,710	0,980	1,140	1,040	0,950	0,970	0,810	1,030	1,050	1,090	0,930	0,910	0,750	0,960	0,780	0,880	0,830	0,810	0,700	0,670
MÉDIA	0,996	0,919	1,015	0,926	0,810	0,722	0,698	1,020	1,116	1,052	0,958	0,948	0,826	1,070	1,080	1,016	0,920	0,888	0,774	1,000	0,870	0,878	0,842	0,790	0,746	0,684



Canal de seção retangular

K_i	Valor de média ponderada		
2	3	3	2
2	-	-	2
5	3	3	5
-	6	6	-
6	-	-	6
-	6	6	-
5	3	3	5
2	-	-	2
2	3	3	2

V_{ic}	Veloc média corrigida do ponto		
1,060	1,085	1,138	1,064
0,978	-	-	0,926
1,079	1,186	1,148	0,934
-	1,119	1,081	-
0,985	-	-	0,896
-	1,019	0,979	-
0,861	1,009	0,945	0,840
0,766	-	-	0,792
0,740	0,878	0,822	0,725

$K_i \cdot V_{ic}$	Veloc média ponderada do ponto		
2,119	3,255	3,413	2,128
1,956	-	-	1,851
5,396	3,557	3,444	4,671
-	6,712	6,484	-
5,912	-	-	5,374
-	6,116	5,874	-
4,306	3,026	2,835	4,199
1,532	-	-	1,584
1,480	2,635	2,467	1,450

Resumo dos resultados

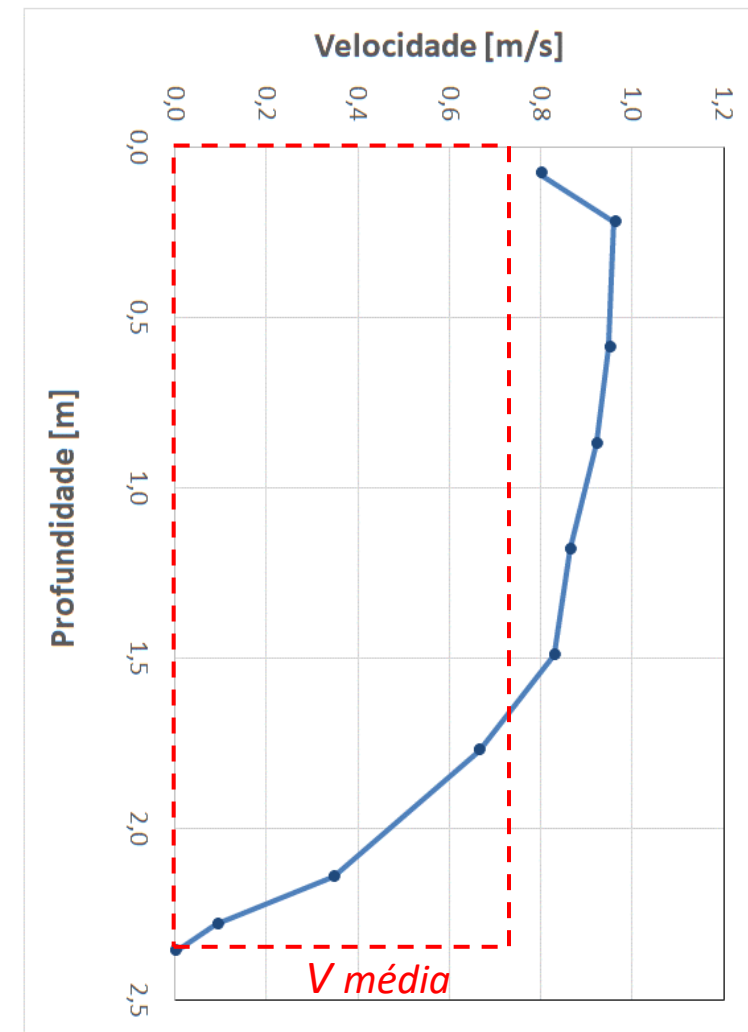
- Resultado da somatória $\sum K_i \cdot V_i$: $\sum K_i \cdot V_i = 93,780$
- Velocidade média medida: $\sum K_i \cdot V_i / 96 = 0,977$ m/s
- Área molhada: $4,689$ m²
- Vazão medida calculada: $4,581$ m³/s

Exemplo de resultados de medições em um canal de seção retangular

LOCAL:	Canal A								
DATA:	01/06/2023								
PONTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Início:	15h50	15h13	15h17	15h20	15h24	15h27	15h30	15h34	15h37
1	0,783	0,930	0,850	0,900	0,820	0,790	0,650	0,260	0,130
2	0,759	0,880	0,890	0,840	0,830	0,780	0,600	0,410	0,110
3	0,791	0,910	0,890	0,870	0,810	0,740	0,690	0,320	0,025
4	0,757	0,910	0,930	0,840	0,800	0,780	0,600	0,370	0,063
5	0,713	0,880	0,900	0,880	0,800	0,810	0,600	0,320	0,130
Fim:	15h52	15h15	15h18	15h22	15h25	15h28	15h32	15h35	15h38
MÉDIA	0,761	0,902	0,892	0,866	0,812	0,780	0,628	0,336	0,092

PONTO	Prof [m]	V [m/s]
1	0,08	0,808
2	0,22	0,960
3	0,59	0,949
4	0,87	0,921
5	1,18	0,863
6	1,49	0,829
7	1,77	0,664
8	2,14	0,347
9	2,28	0,091
10	2,36	0,000

Perfil de velocidades do escoamento medido com o medidor eletromagnético de inserção no Canal A



Comentários e Conclusões

- O medidor eletromagnético de inserção revelou-se uma opção promissora no desenvolvimento de um novo método de medição de vazão em condutos livres.
- Testes no tanque de provas do IPT: o medidor apresentou bons resultados com um alto nível de repetibilidade e linearidade das medidas.
- Aplicação em campo: o suporte de fixação da haste de medição permitiu o posicionamento correto da sonda sensora nos pontos especificados.
- As medições realizadas em campo mostraram que o medidor permite a determinação das velocidades pontuais do escoamento de água e, assim, possibilita a caracterização do perfil de velocidades do escoamento em toda a área da seção transversal do canal por meio de uma amostragem realizada em um grande número de pontos, o que propicia uma maior representatividade e confiabilidade aos resultados, além de um conhecimento mais aprofundado das características e das condições do escoamento no local da medição.

Primeiras perguntas

- Em quais aplicações a medição de vazão de água em condutos livres é necessária?
- Qual é o grau de satisfação atual dos usuários de sistemas de medição de vazão de líquidos para condutos livres com as soluções que utiliza?
- Qual é o nível de confiabilidade (incerteza) requerido para as aplicações de medição de vazão de água em condutos livres?
- Qual é o estágio atual de capacitação dos usuários de sistemas de medição de vazão de líquidos em condutos livres?



Primeiras propostas

- Instituir na área a sistemática aplicada para garantir a confiabilidade metrológica nas medições de vazão de fluidos em condutos forçados
- Criar normas técnicas ABNT específicas para medição em condutos livres
- Desenvolver estudos sobre a aplicabilidade das tecnologias de medição
- Criar procedimentos de calibração para medidores de vazão para condutos livres
- Elaborar manual para projeto, construção/instalação, operação e manutenção de sistemas de medição de vazão em condutos livres
- Oferecer cursos de capacitação em medição de vazão de água em condutos livres



Muito obrigado!

Kazuto Kawakita

kawakita@ipt.br