MEDIDAS DE VAZÕES EM FLUXOS BIFÁSICOS UTILIZANDO UM MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO

Olívia Campos Coiado[1]
(1) Professora da Faculdade Anhanguera de Jundiaí (Anhanguera Educacional S.A). Doutoranda em Engenharia Elétrica pela Unicamp. Mestre em Engenharia Elétrica pela Unicamp. Física Médica pela USP.
Endereço[1]**:** e-mail: **oliviacoiado@hotmail.com. – (55) (19) 2121-2139**
Evaldo Miranda Coiado[2]
(2) Professor da Faculdade Anhanguera de Jundiaí (Anhanguera Educacional S.A). Professor Livre Docente em Hidráulica pela Unicamp. Doutor em Engenharia Hidráulica pela EPUSP. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Engenheiro Civil pela UFMT.
Endereço[2]**:** Rua do Retiro, 3000 – Retiro-Jundiaí – São Paulo - CEP: 13209-002 - País – Brasil Tel: +55 (11) 4521-7835 e-mail: **emcoiado@yahoo.com.br – (55) (19) 2121-2405**

RESUMO

Atualmente, as medidas de vazão utilizando medidores modernos como os eletromagnéticos (baseados na lei de Faraday) são amplamente utilizados. O medidor de vazão eletromagnético baseia-se na lei de Faraday, segundo a qual, um objeto condutor que se move em um campo magnético, gera uma força eletromotriz. No caso de movimento de um fluido em um tubo, obtém-se que a força eletromotriz induzida é proporcional à vazão. Neste trabalho, verificou-se o comportamento, dos valores de vazões medidas por um medidor eletromagnético, devido à presença de areia no fluxo bifásico (água + areia). Para isto foi montando uma bancada de ensaios que possibilitou variar as concentrações de areia e as velocidades de escoamento. Os valores das velocidades médias do fluxo ficaram entre $V_{min.}$=0,9 m/s e $V_{max.}$ = 5,7 m/s, portanto dentro da faixa de velocidades fixada pelo fabricante para o medidor eletromagnético que é de 0,3 m/s a 10 m/s. O valor médio das diferenças percentuais relativas, para os 55 ensaios realizados, é igual a 0,43%, valor inferior à precisão do medidor eletromagnético que é de 0,5% para a faixa adequada de funcionamento.

PALAVRAS-CHAVE: medidor eletromagnético, fluxos bifásicos, medidas de vazão.

INTRODUÇÃO

O transporte de sólidos em líquidos, através de dutos, é encontrado em múltiplas modalidades de aplicações. Dutos relativamente curtos são muito utilizados em transportes hidráulicos de resíduos finos na metalurgia, na dragagem de areias e cascalhos e nas operações de mineração de metais. São ainda encontradas aplicações nas áreas de irrigação, engenharia de alimentos, indústria farmacêutica, e em sistemas de tratamento de esgotos doméstico e industrial. (SATTO, 1998).

Exemplos de transporte de fluxos bifásicos de longas distâncias são inúmeros e distribuídos por todos os paises. Uma das maiores adutoras de transporte de misturas bifásicas (líquido-carvão) existentes é a de Mesa Preta no Arizona, EUA. Segundo Wasp et al. (1977), apud Satto (1998), essa adutora possui uma extensão de 273 milhas, 18 polegadas de diâmetro, e foi projetada para transportar 6 Mega toneladas de carvão anualmente.

No Brasil, encontra-se a mais longa linha de tubulações para hidrotransporte de minério de ferro do mundo com 396 km de extensão. Ela interliga a usina de mineração Samarco e a usina de trituração no terminal marítimo da costa Atlântica situada em Ponta do Ubú. Transporta por ano 8 milhões de toneladas de suspensão de minério com 68% de ferro à velocidade de 1,5 m/s, e possui máxima elevação acima do nível do mar igual a 1180 m. (SATTO, 1998).

Delmée (2003) afirma que no século XX medir a vazão de fluidos em geral tornou-se necessária devido ao crescimento da aplicação dos processos contínuos na indústria, em substituição aos processos em bateladas. Ainda segundo Delmée (2003), no referido século princípios já conhecidos foram aplicados em conjunto com novas tecnologias, resultando em instrumentos modernos e confiáveis. Com base em princípios e resultados de estudos de físicos que haviam pesquisados outros fenômenos, o medidor eletromagnético é citado como resultado dos estudos desenvolvidos por Michael Farady (1791-1867).

Para as empresas de saneamento medir vazão com confiabilidade é primordial. Atualmente, no caso da água bruta ou tratada, as medidas de vazão utilizando medidores modernos como ultra-sônicos (baseados no efeito Doppler), eletromagnéticos (baseados na lei de Faraday), e medidores a laser estão disponíveis e operando com sucesso.

No caso das medições de vazão de esgoto doméstico utilizando os medidores modernos é premente a realização de pesquisas para se estudar os erros de medidas devido a presença dos sólidos, principalmente os sólidos de origem mineral, uma vez que, Prado e Campos (2008) demonstraram que a concentração de areia no esgoto sanitário afluente da ETE Jardim das Flores, cidade de Rio Claro, Estado de São Paulo, apresenta grande variabilidade com picos de até 200 mg/l e que a concentração média de areia encontra-se entre 20 mg/l a 73 mg/l.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento, dos valores de vazões medidas por um medidor eletromagnético, devido à presença de areia no fluxo bifásico (água + areia). Para isto foi montando uma bancada de ensaios que possibilitou variar as concentrações de areia e as velocidades de escoamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Bancada de ensaio

A bancada de ensaio, utilizada no desenvolvimento deste trabalho, é constituída por um reservatório principal, um sistema de medidas gravimétricas, um tanque de descarga ou de retorno, um medidor de vazão eletromagnético, por transdutores de pressão, um desviador rotacional de fluxo, por uma bomba principal por três bombas misturadoras, por uma bomba de retorno, e um sistema de canalizações que forma um circuito fechado, figura 1.

O reservatório principal é cilíndrico-cônico com capacidade para 2000 litros, mede 1,20 m de diâmetro por 2,00 m de altura e fixo sobre três pés de cantoneiras com 1,20 m de altura. No reservatório principal, onde as misturas sólido-líquidas (água e areia) foram preparadas, eram mantidas homogêneas através das bombas misturadoras.

O sistema de medidas gravimétricas é constituído por um tanque gravimétrico/volumétrico fixo sobre uma balança com capacidade para até 700 kg e precisão de 200 gramas.

O tanque gravimétrico/volumétrico é cilindro-cônico com capacidade para 200 litros, medindo 0,50 m de diâmetro por 0,90 m de altura. Sua parte inferior é cônica, permitindo perfeito esvaziamento através de um registro de gaveta de três polegadas. Possui na parede externa um medidor de nível (piezômetro ou tubo transparente) com uma escala que permite leituras com precisão de 1 mm.

O tanque de descarga ou de retorno é cilíndrico-cônico com capacidade para 300 litros, mede 0,62 m de diâmetro por 0,90 m de altura. Recebe a mistura do tanque gravimétrico/volumétrico, e tem o seu conteúdo misturado por uma das bombas misturadoras. A bomba de retorno retira a mistura da base cônica do tanque de retorno e a recalca de volta para o reservatório principal.

O medidor de vazão eletromagnético baseia-se na lei de Faraday, segundo a qual, um objeto condutor que se move em um campo magnético, gera uma força eletromotriz. No caso de movimento de um fluido em um tubo, obtém-se que a força eletromotriz induzida é proporcional à vazão. O medidor eletromagnético de vazão utilizado, figura 2, foi instalado em um tubo vertical de 4 polegadas de diâmetro. Para velocidades do fluxo entre 0,3 m/s e 10 m/s, sua precisão é de 0,5% da vazão. O instrumento, com saída para micro computador de 4 a 20 mA, mede de 0 a 30 l/s. As saídas para o micro computador foram calibradas com simulador de voltagem, de modo a atingir o range de 0 a 30 l/s, em escala linear.

As leituras de vazão realizadas pelo medidor de vazão eletromagnético eram registradas e armazenadas através do sistema de aquisição de dados composto por uma central e um computador e um software.

O desviador rotacional de fluxo permite que o fluxo seja desviado do reservatório principal para o tanque de medidas gravimétricas/volumétricas. O desvio do fluxo para o tanque gravimétrico/volumétrico tem a finalidade de determinações da vazão e da concentração da mistura.

A bomba denominada de principal é centrífuga horizontal de entrada e saída de quatro e três polegadas de diâmetro, respectivamente, rotor semi-fechado com 250 mm de diâmetro. A voluta e o rotor foram revestidos de borracha para amenizar os desgastes por efeitos abrasivos da fase sólida da mistura.

A bomba principal ASH-PUMP, rotação de 1760 rpm, vazão nominal de 110 m^3/h, altura manométrica de 22 mca, foi acoplada a um motor elétrico de indução trifásico, modelo 160M0495, 1760 rpm, 60 Hz, de 20 CV.

O sistema de canalização é composto por canalizações de sucção e de recalque. A canalização de sucção é de PVC rígido com quatro polegadas de diâmetro e une o reservatório principal á bomba principal.

A canalização de recalque tem os seguintes componentes: um trecho vertical de ferro fundido com 1,5 m de comprimento e 4 polegadas de diâmetro, um registro de 3 polegadas revestido de borracha para suportar o desgaste por abrasividade da mistura. Após o registro, a canalização passa a ser de PVC e de 3 polegadas de diâmetro e por uma curva de 90^0 que muda a canalização para a direção horizontal com 15 m de comprimento, volta a ser vertical com 1,1 m de comprimento passando novamente a ser horizontal com 12,6 m de comprimento. A canalização torna a mudar de direção e de diâmetro passando a vertical com 4 polegadas onde se encontra instalado o medidor eletromagnético de vazão, retornando ao tanque principal ou ao tanque de medidas gravimétricas/volumétricas através do desviador rotacional de fluxo.

Procedimento experimental

Descrevem-se, a seguir, os procedimentos experimentais realizados na bancada de ensaios para a obtenção dos valores das vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico e para a determinação da concentração da areia do fluxo bifásico (água-areia).

Medidas da vazão e da concentração média da areia

As medidas das vazões foram realizadas pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico.

As medidas da vazão pelo método volumétrico, e da concentração média da areia presente no fluxo, foram obtidas através do desvio do fluxo, do tanque principal para o tanque de medidas gravimétricas/volumétricas. Em cada operação de desvio do fluxo realizavam as seguintes leituras: 1º) peso do tanque volumétrico, cheio e vazio; 2º) a temperatura da mistura no tanque principal; e 3º0 nível do piezômetro, indicativo do volume armazenado.

A areia utilizada e o preparo das misturas de água e areia

Foi utilizada uma areia classificada como fina, de peso específico da ordem de 26.016 N/m^3, e distribuição granulométrica dada por: d_{10} = 0,1461 mm, d_{16} = 0,1553 mm, d_{35} = 0,1810 mm, d_{50} = 0,2019 mm, d_{65} = 0,2263 mm, d_{84} = 0,2752 mm, d_{90} = 0,3067 mm.

Para cada ensaio foi preparada no reservatório principal uma mistura de concentração conhecida obtida pela adição de um determinado volume de areia a um volume conhecido de água limpa. Foram preparadas misturas de água e areia de concentrações que variaram de 0,4% a 6,9 % do volume da mistura.

As medidas foram efetuadas depois de assegurada a estabilidade dos processos de bombeamentos desenvolvidos pela bomba principal e pelas bombas misturadoras.



Figura 1: Vista da bancada de ensaio.



Figura 2: Vista do medidor eletromagnético.

RESULTADOS E ANÁLISES

Na tabela 1 são apresentados os dados referentes às medidas de valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico. Apresentam-se ainda os valores das concentrações de areia no fluxo bifásico, expressos em porcentagem do volume na mistura (%V.M.), assim como as diferenças porcentuais relativas entre os valores de vazões obtidos pelos dois métodos e a velocidade média do escoamento. Os valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético foram denominados de (Qe) e os determinados pelo método volumétrico por (Qv). Os valores das velocidades médias do fluxo ficaram entre $V_{min.}$=0,9 m/s e $V_{max.}$ = 5,7 m/s, portanto dentro da faixa de velocidades fixada pelo fabricante para o medidor eletromagnético que é de 0,3 m/s a 10 m/s. O valor médio das diferenças percentuais relativas é igual a 0,43%, valor inferior à precisão do medidor eletromagnético que é de 0,5% para a faixa adequada de funcionamento.

No gráfico, figura 3, ao aumentar a concentração da areia, os valores das vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico são comparados. Observa-se nas comparações que não há uma tendência definida. As magnitudes das vazões medidas pelo medidor eletromagnético, independente do valor da concentração, podem ser maiores ou menores que as das vazões obtidas pelo método volumétrico. Das 55 medições efetuadas, em 28 os valores das vazões medidas pelo medidor eletromagnético foram maiores que aqueles obtidos pelo método volumétrico, o que resulta uma porcentagem próxima de 50%.

Na tabela 2 são apresentados os dados referentes às medidas de valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico para a concentração de 1,8% do volume da mistura, os quais geraram o gráfico mostrado na figura 4. O valor médio das diferenças percentuais relativas é igual a 0,50%, valor igual à precisão do medidor eletromagnético que é de 0,5% para a faixa de velocidades do fluxo entre 0,3 m/s e 10 m/s. O maior valor da diferença porcentual relativa, em módulo, ocorreu para o maior valor da vazão medido pelo método volumétrico. Verifica-se que ao manter constante a concentração, em 1,8V.M., e variar a vazão, as diferenças percentuais relativas não definem uma tendência.

Tabela 1: Valores de vazão medidos pelo medidor eletromagnético (Qe) e pelo método volumétrico (Qv).

C (%V.M.)	Qe (L/s)	Qv (L/s)	$DPR = \frac{Qe - Qv}{Qv}.100$ (%)	V (m/s)
0,4	15,2	16,3	-6,6	3,4
0,6	11,7	12,8	-8,5	2,6
1	9,4	8,1	16,3	2,1
1	8,0	8,4	-4,6	1,8
1,1	8,5	8,5	-0,2	1,9
1,1	5,3	5,3	1,1	1,2
1,2	15,6	16,0	-2,5	3,5
1,3	8,8	8,3	6,1	2,0
1,4	12,1	11,0	10,0	2,7
1,4	7,1	7,3	-2,3	1,6
1,6	17,1	17,2	-0,3	3,8
1,6	16,4	15,7	4,1	3,6
1,8	18,5	20,6	-10,3	4,1
1,8	20,6	19,6	4,9	4,6
1,8	5,3	5,3	0,3	1,2
1,8	6,6	6,3	4,8	1,5
1,8	18,4	18,3	0,3	4,1
1,8	12,2	11,8	3,7	2,7
1,8	16,3	16,3	-0,2	3,6
2	25,5	25,5	0,2	5,7
2,1	13,3	12,7	4,2	3,0
2,1	4,2	5,3	-20,6	0,9
2,2	15,8	16,3	-2,4	3,5
2,3	10,5	10,2	2,2	2,3
2,6	8,1	7,5	8,1	1,8
2,8	9,6	8,5	12,7	2,1
2,8	6,2	6,3	-0,8	1,4
3,3	4,6	4,7	-2,9	1,0
3,3	5,7	5,7	0,4	1,3
3,3	8,1	7,7	5,2	8,1
3,3	6,0	6,7	-10,6	1,3
3,3	8,6	8,9	-3,5	1,9
3,3	10,3	10,9	-5,9	2,3
3,3	23,6	23,7	-0,5	5,2
3,5	15,4	15,3	0,3	3,4
3,6	9,1	8,8	3,7	2,0
3,6	16,6	18,8	-11,5	3,7
3,6	9,2	8,1	14,0	2,1
3,7	9,8	10,4	-5,8	2,2
3,8	10,2	8,2	24,4	2,3
3,9	7,0	8,7	-18,7	1,6
4,5	22,0	21,4	2,6	4,9
4,6	18,8	19,3	-2,6	4,2
4,6	15,8	15,3	3,4	3,5
5,2	7,9	8,1	-2,0	1,8
5,3	18,5	20,1	-8,0	4,1
5,3	14,7	15,4	-4,4	3,3
5,3	12,7	11,7	8,0	2,8
5,4	17,9	18,0	-0,6	4,0
5,4	19,5	18,1	7,4	4,3
5,5	6,4	6,3	1,3	1,4
5,9	11,8	13,3	-11,4	2,6
6	10,9	10,6	2,7	2,4
6,1	10,0	8,4	20,1	2,2
6,9	8,9	9,0	-0,9	2,0
		Média:	**0,430**	$\mathbf{V_{min}=0,9}$
		Desvio Padrão:	**8,0**	$\mathbf{V_{max}=5,7}$

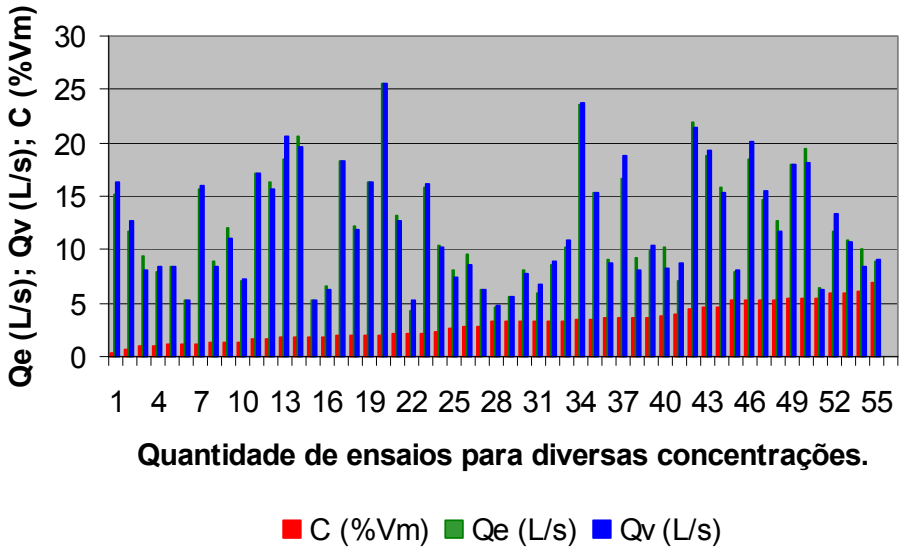


Figura 3: Comparação entre os valores de vazões obtidos pelos dois métodos de medicas e as respectivas concentrações da areia em ordem crescente.

Tabela 2: Variação da diferença percentual relativa com as vazões mantendo-se constante a concentração em 1,8 %V.M.

C (%V.M.)	Qe (L/s)	Qv (L/s)	$DPR = \frac{Qe - Qv}{Qv}.100$ (%)
1,8	5,3	5,3	0,3
1,8	6,6	6,3	4,8
1,8	12,2	11,8	3,7
1,8	16,3	16,3	-0,2
1,8	18,4	18,3	0,3
1,8	20,6	19,6	4,9
1,8	18,5	20,6	-10,3
		Média:	**0,5**
		Desvio padrão:	**5,3**

Tabela 3: Variação da diferença percentual relativa com as vazões mantendo-se constante a concentração em 3,3 %V.M.

C (%V.M.)	Qe (L/s)	Qv (L/s)	$DPR = \frac{Qe - Qv}{Qv}.100$ (%)
3,3	5,7	5,7	0,0
3,3	6,0	6,7	-10,4
3,3	8,1	7,7	5,2
3,3	8,6	8,9	-3,4
3,3	10,3	10,9	-5,5
3,3	23,6	23,7	-0,4
		Média:	**-2,4**
		Desvio padrão:	**5,3**

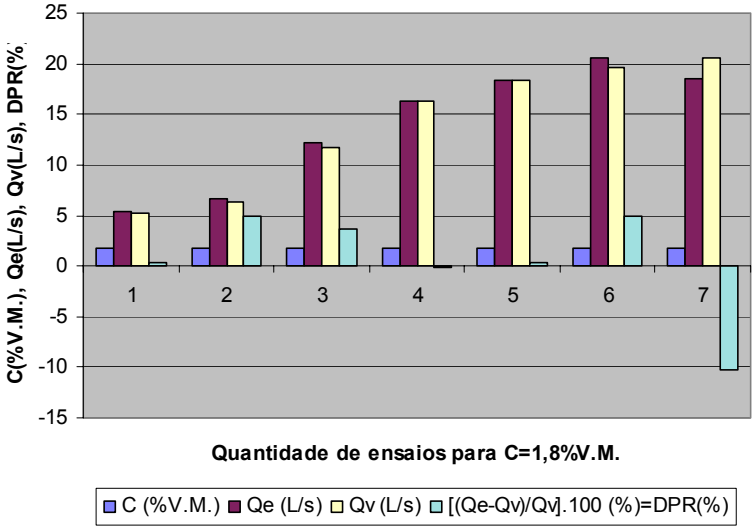


Figura 4: Valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico para a concentração de 1,8%V.M.

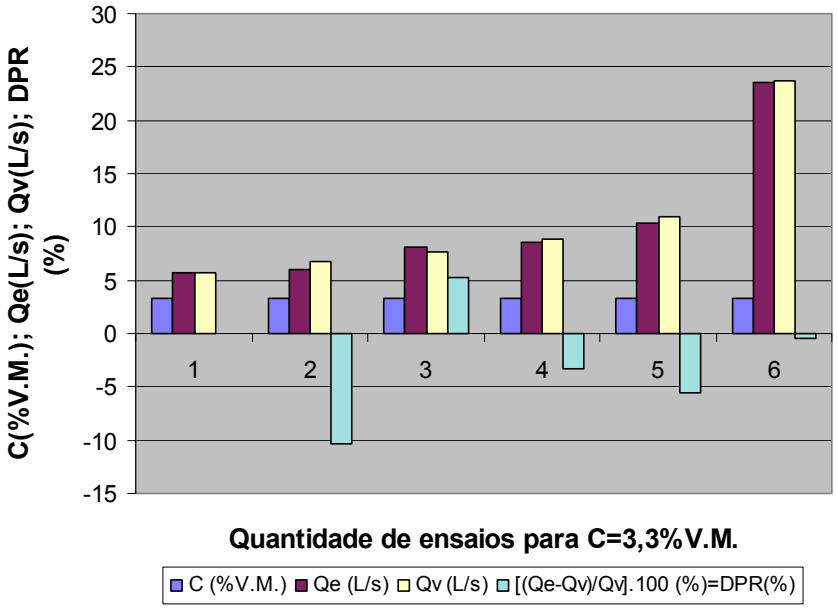


Figura 5: Valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico para a concentração de 3,3%V.M.

Na tabela 3 são apresentados os dados referentes às medidas de valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico para a concentração de 3,3% do volume da mistura, os quais geraram o gráfico mostrado na figura 5. O valor médio das diferenças percentuais relativas é igual a 2,4%, em módulo, valor levemente superior à precisão do medidor eletromagnético que é de 0,5% para a faixa de velocidades do fluxo entre 0,3 m/s e 10 m/s. O maior valor da diferença porcentual relativa, em módulo, ocorreu para o valor da vazão medido pelo método volumétrico igual a 6,7 l/s. Verifica-se que ao manter constante a concentração, em 3,3V.M., e variar a vazão, as diferenças percentuais relativas não definem uma tendência.

Na tabela 4 são apresentados os dados referentes às medidas de valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico para a concentração de 5,3% do volume da mistura, os quais geraram o gráfico mostrado na figura 6. O valor médio das diferenças percentuais relativas é igual a 0,60%,

valor levemente superior à precisão do medidor eletromagnético que é de 0,5% para a faixa de velocidades do fluxo entre 0,3 m/s e 10 m/s. Verifica-se que ao manter constante a concentração, em 5,3V.M., e variar a vazão, as diferenças percentuais relativas não definem uma tendência.

Nas tabelas 5 e 6 são apresentadas as variações da diferença porcentual relativa ao modificar os valores das concentrações, mantendo-se constante os valores das vazões medidos pelo método volumétrico. Na tabela 5 foi mantida a vazão em 6,3 L/s, e na tabela 6 em 16,3 L/s. Observa-se, nos dois casos, não haver definição de uma tendência em relação às diferenças percentuais relativas.

Tabela 4: Variação da diferença percentual relativa com as vazões mantendo-se constante a concentração em 5,3 %V.M.

C (%V.M.)	Qe (L/s)	Qv (L/s)	$DPR = \frac{Qe - Qv}{Qv}.100$ (%)
5,3	6,4	6,3	1,3
5,3	12,7	11,7	8,0
5,3	14,7	15,4	-4,4
5,3	17,9	18,0	-0,6
5,3	19,5	18,1	7,4
5,3	18,5	20,1	-8,0
		Média:	**0,6**
		Desvio padrão:	**6,4**

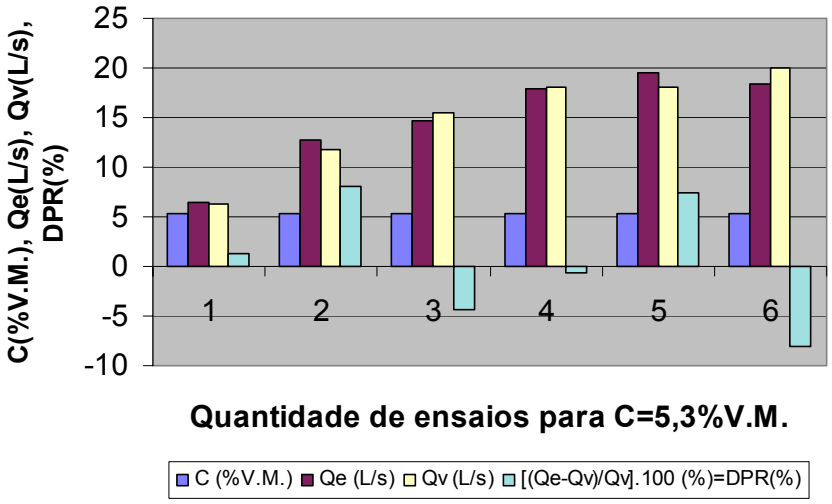


Figura 6: Valores de vazões medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico para a concentração de 5,3%V.M.

Tabela 5: Variação da diferença percentual relativa com a concentração, mantendo-se constante o valor da vazão medido pelo método volumétrico em 6,3 L/s.

C (%Vm)	Qe (L/s)	Qv (L/s)	$DPR = \frac{Qe - Qv}{Qv}.100$ (%)
1,8	6,6	6,3	4,8
2,8	6,2	6,3	-0,8
5,5	6,4	6,3	1,3

Tabela 6: Variação da diferença percentual relativa com a concentração, mantendo-se constante o valor da vazão medido pelo método volumétrico em 16,3 L/s.

C (%Vm)	Qe (L/s)	Qv (L/s)	$DPR = \frac{Qe - Qv}{Qv}.100$ **(%)**
0,4	15,2	16,3	-6,6
1,9	16,3	16,3	-0,2
2,2	15,8	16,3	-2,4

CONCLUSÕES

As magnitudes das vazões medidas pelo medidor eletromagnético, independente do valor da concentração da areia utilizada na composição da mistura bifásica, podem ser maiores ou menores que as das vazões obtidas pelo método volumétrico.

Independentemente do valor da concentração, da areia, mantida constante, as diferenças percentuais relativas, entre os valores de vazões medidas pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico, não definem uma tendência.

Mantendo-se os valores das vazões medidos pelo método volumétrico constantes, ao variar a concentração da areia que compõem a mistura não há a definição de uma tendência em relação às diferenças percentuais relativas entre os valores de vazões medidas pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico.

O valor médio das diferenças percentuais relativas, para os 55 ensaios realizados, durantes os quais os valores da vazão e da concentração da areia foram variados, é igual a 0,43%, valor inferior à precisão do medidor eletromagnético que é de 0,5% para a sua faixa adequada de funcionamento.

Em alguns ensaios a diferença porcentual relativa entre os valores da vazão medidos pelo medidor eletromagnético e pelo método volumétrico foi superior à 40 vezes à precisão do medidor eletromagnético. Portanto, a precisão do aparelho está condicionada ao número de leituras realizadas não devendo confiar numa única medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DELMÉE, Gérard Jean. Manual de medição de vazão. 3ª ed. – São Paulo: Editora Blucher, 2003.
2. PRADO, Gustavo Silva; CAMPOS, José Roberto. Determinação da quantidade de areia no esgoto sanitário: metodologia e estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. V. 13 nº 3, Rio de Janeiro, july/sept. 2008.
3. SATTO, Maria Yaeco Uejima. **Influência de polímero redutor de arraste no escoamento bifásico (sólido-líquido) em condutos forçados**. 1998. 382 f. V1 (Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Área de Concentração em Recursos Hídricos). Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.