



**I-388 - ESTUDO COMPARATIVO DE VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO E PERDA DE CARGA TOTAL EM FLOCULDORES HIDRÁULICOS DE FLUXO ASCENDENTE DOTADO DE MEIOS FLOCULANTES FIXOS DE MANTA, SOB ESFERAS DE POLIESTIRENO E OUTRO DE SEIXOS ROLADOS**

**Milma Roza de Lima<sup>(1)</sup>**

Bacharel em Química pela Universidade São Francisco - USF. Mestranda em Saneamento e Ambiente pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Atualmente trabalha na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP.

**Ruben Bresaola Junior**

Professor Doutor do Departamento de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Foi Diretor de Educação do CREA-SP, membro do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, membro do Conselho Estadual de Saneamento do Estado de São Paulo, membro do CTID/PCJ-SP, assessor FAPESP, CNPq e FINEP; membro de Conselhos Editoriais de revistas científicas nacionais, de periódicos e de congressos internacionais.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Voluntário Antenor da Silva, s/nº - Jardim Morumbi – Bragança Paulista – São Paulo – CEP: 12926-010 – Brasil - Tel: +55 (11) 4035-2024 - Fax: +55 (11) 4035-2074 - e-mail: milma\_lima@yahoo.com.br.

**RESUMO**

A floculação em meio granular fixo desperta bastante interesse por suas possibilidades de aplicação, principalmente em estações de tratamento de água de pequeno porte, (vazão igual ou inferior a 10 L/s), devido à sua eficiência, compacidade e baixo custo. No entanto, o reduzido volume de vazios proporcionado pelo meio granular quando comparado ao dos materiais sintéticos favorece o aumento excessivo da perda de carga imposta ao escoamento e conseqüentemente o inconveniente de freqüentes de descargas e necessidades de limpezas.

Diante da necessidade de atenuar ou mesmo eliminar tais inconvenientes operacionais, este trabalho propõe estudos comparativos de eficiência de floculação hidráulica em meios granulares fixos em sistemas pilotos constituídos por seixos rolados de diferentes granulometrias (R1) e outro por manta não tecida (PP) e esferas sólidas ( $\phi$  9 mm, PS) (R2). Os ensaios foram realizados com água coagulada da ETA Bragança Paulista (SABESP) à diferentes taxas de aplicação superficial de 50, 75, 100, 150, 180, 200, 250, 300 e 350 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, onde foram determinadas as porcentagens de remoção de turbidez, e cor aparente, período de floculação e a evolução da perda de carga.

Os resultados obtidos mostraram que o reator R2 apresentou-se operacionalmente mais eficiente do que o R1, devido à sua elevada porosidade que favoreceu o aumento da taxa de colisões entre as partículas coloidais, o que permitiu a geração de manta de lodo (flocos), a formação de escoamento laminar (perda de carga seguindo a equação de Darcy) e facilidade de liberação do lodo retido para recuperação da carga hidráulica disponível e quando submetido à valores máximos de taxa de aplicação superficial de 180 m<sup>3</sup>.m<sup>2</sup>/d (196 L/h) e de turbidez de água bruta de 13,0 uT operou como unidade de floculação e clarificadora de água em tratamento obtendo efluente com valores de turbidez menores que 5 uT e cor aparente menor que 15,0 uC, o que possibilitaria o tratamento da água por filtração direta, eliminando-se a etapa de decantação. Sua maior aplicação pode estar voltada às pequenas e médias comunidades (urbanas e rurais) que ainda não possuem acesso à água potável, através da possibilidade de implementação de tecnologia de tratamento de água com custos de implantação e operacionais relativamente baixos e com a manutenção simplificada quando comparados aos sistemas convencionais, contribuindo assim para com a universalização do acesso à água potável.

**PALAVRAS-CHAVE:** floculação em malhas, meio granular sintético, floculação em esferas, materiais recicláveis, floculação hidráulica.



## INTRODUÇÃO

Há um século, pelo menos, o consumo de água tem crescido a um ritmo muito mais rápido que a população – e esta tendência se mantém. Neste período de tempo, a população quadruplicou, enquanto o consumo de água cresceu sete vezes. À medida que o mundo vai se desenvolvendo, também vai se tornando mais ávido por água (PNUD/RDH, 2006). Previsão da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2007), indica que por volta do ano de 2025 a população mundial deverá ser de aproximadamente 8,9 bilhões de pessoas e deverá ser a máxima suportável, dentro das semelhantes condições de consumo atual.

No início do século 21, uma em cada cinco pessoas residentes em países em desenvolvimento, cerca de 1,1 bilhão de pessoas, não tem acesso a água potável. Cerca de 2,6 bilhões de pessoas, quase metade da população total dos países em desenvolvimento, não têm acesso ao saneamento básico. (PNUD/RDH 2006).

No Brasil, os piores índices de cobertura de água canalizada e rede geral de distribuição são observados principalmente nas regiões menos desenvolvidas (norte e nordeste) e nos menores municípios do país. Assim, os programas destinados à universalização dos serviços de saneamento devem ser voltados, prioritariamente, para estas localidades (IBGE, 2002).

As tecnologias aplicadas na produção de água para abastecimento público têm de ser determinadas em função das características físicas, químicas e microbiológicas da água bruta. Daí, ser de suma importância o conhecimento da variação de sua qualidade e da probabilidade da mesma conter despejos, de diferentes origens, ao longo de seu percurso pela bacia hidrográfica contribuinte.

Na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002), as tecnologias de tratamento de águas para abastecimento são classificadas como convencionais, que incluem todas as etapas tradicionais do processo (coagulação, floculação, decantação e filtração), e não-convencionais, incluindo a filtração direta ascendente ou descendente, a dupla filtração, e a filtração lenta (DI BERNARDO et al, 2003). Os sistemas de tratamento de água convencionais, apesar da evolução no conhecimento, operação, e conseqüentemente, no dimensionamento de unidades como decantadores e filtros, apresentam custos de implantação, operação e manutenção relativamente altos aos sistemas não convencionais anteriormente citados. Porém, são mais adequados ao tratamento de águas com elevada carga de sólidos suspensos, sejam estes de origem orgânica ou inorgânica, e às necessidades de tratamento de águas com constituintes diferenciados.

Apesar da predominância do tratamento convencional nos distritos brasileiros, os sistemas não-convencionais vêm se difundindo cada vez mais e já apresentam números relativamente significativos no País. Dependendo da qualidade da água bruta, a filtração direta pode apresentar funcionamento simplificado e custos de implantação relativamente baixos. Estudos adicionais sobre a filtração direta ascendente e descendente desenvolvidos pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB 3), e com aprimoramento da dupla filtração, colaboraram para promover essas tecnologias e difundir sua aplicação (DI BERNARDO et al, 2003).

A floculação prévia pode melhorar o desempenho de sistemas não convencionais de tratamento de água como a filtração direta descendente, pela modificação do tamanho e quantidade das partículas, que chegam ao meio filtrante, geralmente feito em unidades de filtro, com fluxo descendente de dupla camada, dado que o desenvolvimento da perda de carga no meio filtrante varia na razão inversa do tamanho das partículas retidas. Em geral, a perda de carga desenvolvida, será tanto menor quanto maior for o tamanho das partículas (BRANDÃO apud RAMOS, 2000). O custo de um sistema de floculação depende, essencialmente, de três fatores: vazão, tempo de floculação, aspecto, relacionado ao volume dos tanques, e a energia a ser transferida para a água, ligado diretamente ao gradiente de velocidade necessário para a floculação.

A eficiência da floculação durante um tempo determinado, é tanto maior quanto mais câmaras em série tiver o floculador. Os floculadores dotados de meio granular podem e devem ser considerados como um sistema que possui um número elevado de câmaras em série, e são considerados de elevada eficiência energética (SENS, 1997).

Os primeiros estudos sobre floculação em meio granular fixo, na América Latina, foram feitos no Brasil pela SANEPAR (Companhia de Saneamento do Estado do Paraná) em 1979. A floculação em meio poroso está despertando muito interesse, por suas possibilidades de aplicação, principalmente em pequenas instalações,



devido à sua elevada eficiência e baixo custo. Apresenta, entretanto, alguns problemas operacionais relacionados, principalmente, com a obstrução do meio, o que não é um sério inconveniente em instalações de pequeno porte (vazão igual ou inferior a 10 L/s (RICHTER & AZEVEDO NETTO, 1991).

Diante da necessidade de se aproveitar o desempenho favorável da floculação em meio poroso devido à ocorrência de fluxo laminar (perda de carga seguindo a equação de Darcy) gerado nos vazios entre o meio granular e à progressiva retenção de coágulos ou flocos em formação, que proporcionam melhores condições hidráulicas, oportunidades de choques entre as partículas ou substâncias em processo de floculação (compostos floculentos e aglomerados de partículas) e sejam controladas as forças de cisalhamento dos mesmos, deve se buscar meios granulares alternativos, que atenuem o aumento excessivo da perda de carga imposta ao escoamento e conseqüentemente, à inconveniência de freqüentes necessidades de limpeza em função do reduzido volume de vazios. Foram estudados e comparados características dos efluentes oriundos de sistemas de floculação hidráulico de fluxo ascendente dotados de meios granulares compostos por esferas sólidas e malha, e de sistemas de floculação mecanizada do tipo eixo vertical de paleta, em câmara de seção quadrada, seguido de decantação. Foi utilizado, em ambos os casos, água coagulada da Estação de Tratamento de Água (SABESP), no município de Bragança Paulista, no estado de São Paulo.

Os resultados das análises das amostras obtidos neste trabalho demonstraram que a floculação hidráulica de fluxo ascendente em meio constituído de esferas sólidas e malha apresentou-se, qualitativamente mais eficiente que a promovida em floculação mecanizada do tipo eixo vertical de paleta até a valores de taxas máximas de aplicação superficial da ordem de  $180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ . Isto pode indicar que haja uma real possibilidade de contribuição para a otimização de estações de tratamento de água, eventualmente com problemas nos sistemas de floculação e/ou decantação. Também pode auxiliar na realização de projetos mais eficientes e econômicos; e com aplicação voltada às pequenas e médias comunidades (urbanas e rurais), que ainda não possuem acesso à água potável. A possibilidade de uso desta tecnologia simplificada de tratamento de água e de facilidade operacional, com baixos custos de implantação e operação, quando comparados a sistema de tratamento convencional, pode colaborar para com alcance de meta de 91,5% de população com acesso à água potável, que atualmente é de 90,0%, estabelecida pelos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio – uma série de metas socioeconômicas que os países-membros da ONU se comprometeram a atingir até 2015.

O reator dotado de meio granular composto por malha e esferas sólidas, além de operar com eficiência como unidade de floculação hidráulica, operou também no decorrer dos ensaios como unidade clarificadora da água em tratamento quando submetida à valores máximos de taxa de aplicação superficial de  $180 \text{ m}^3.\text{m}^2/\text{d}$  e de turbidez de água bruta de 13,0 uT obtendo efluente com valores de turbidez menores que 5 uT e cor aparente menores 15,0 uC, o que possibilitaria o tratamento da água por filtração direta.

O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio e a participação do Departamento de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo – SABESP; da Maccaferri do Brasil Ltda e à Petranova Mineração e Construção Ltda através da doação dos materiais para as unidades de pesquisa.

## OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo estudar e comparar a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente, em função dos valores de velocidades de sedimentação de flocos em dois reatores dotados de meios floculantes fixos. Um deles com materiais sintéticos recicláveis (malha e esferas sólidas), denominado reator R2, e outro dotado de seixos rolados, denominado reator R1.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados utilizando-se de sistemas pilotos instalados externamente ao lado do canal de distribuição de água coagulada, ao lado externo do mesmo, da Estação de Tratamento de Água de Bragança Paulista (500 L/s), localizada no bairro Jardim Morumbi, no município de Bragança Paulista, no estado de São Paulo (Figura 1).



**Figura 1** - Fotografia da vista aérea da ETA Bragança Paulista, FONTE: SABESP, 2008

Este sistema piloto era composto por uma caixa de nível constante (PVC, 100 litros) para distribuição de vazão aos designados reatores. Para o controle da vazão afluyente de água coagulada aos reatores de floculação foi utilizado um sistema de sifonamento hidráulico (Figura 2), acoplado a tubulações, com os devidos controles por registros para distribuição de água coagulada até a entrada inferior do reator de floculação hidráulica. O corpo do reator era composto por dois diferentes tipos de dutos. Parte foi composta por tubo em acrílico de cristal transparente sem costura, 206 mm de diâmetro externo e 200 mm de diâmetro interno; 6,5 mm de espessura de parede e comprimento de 1,80 m. Outro segmento utilizou duto de PVC branco de diâmetro interno de 200 mm, 2,5 mm de espessura de parede, comprimento de 1,20 m; totalizando comprimento útil total de 3,00 m. Este reator era dotado de meios floculantes fixos, de descargas de fundo para limpeza do mesmo e com derivação para a entrada de água coagulada, quando em operação (Figura 3). A saída de água floculada/clarificada foi localizada na parte superior do reator, próximo à superfície superior da lâmina de água.

Dispositivos para coleta de amostras de água floculada também foram programados e construídos, bem como, deixadas tomadas piezométricas. Para acompanhamento das perdas de cargas foi montado um quadro de piezômetros e, deste modo, ter-se-ia medição da perda de carga total em cada um dos reatores. Cada reator possuía, 4 (quatro) tomadas de pressão (piezômetros) nomeados para o R1: PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub>, PZ<sub>4</sub> e para o R2: PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub>.

O reator R1 foi preenchido com 3 camadas sobrepostas de seixos rolados com 60 cm de espessura cada uma, e com granulometria decrescente e variável entre diâmetros de 19 a 25,0; 12,0 a 19,0 e 6,0 a 12,0 mm, respectivamente para a primeira, segunda e terceira camada, de baixo para cima. O reator R2 foi preenchido com duas camadas de materiais sintéticos recicláveis compostos por uma camada de malha com espessura de 120 cm (PP) e outra de esferas sólidas (PU), diâmetro uniforme de 9,0 mm e com camada de 60 cm de espessura (Figura 3).





Mangueira plástica (sifão)  
embutida dentro do tubo de  
PVC.



**Figura 2** - Foto do sistema controle de vazão por sifonamento

Os ensaios foram realizados com água coagulada da ETA Bragança Paulista à diferentes valores taxas de aplicação superficial variando de 50, 75, 100, 150, 180, 200, 250, 300 e 350 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Nestes ensaios foram determinadas as condições operacionais, o período de floculação e a evolução da perda de carga. Os reatores R1 e R2 operaram vinte e quatro horas por dia. As coletas de amostras dos efluentes dos reatores para caracterização físico-química ocorreram com os mesmos em operação e realizadas até a carreira de nº 9, duas vezes por dia. A primeira coleta era feita aproximadamente às 12 horas e uma segunda por volta das 16 horas. Das carreiras de nº 10 a 15, as coletas ocorreram uma única vez por dia, aproximadamente às 16 horas.

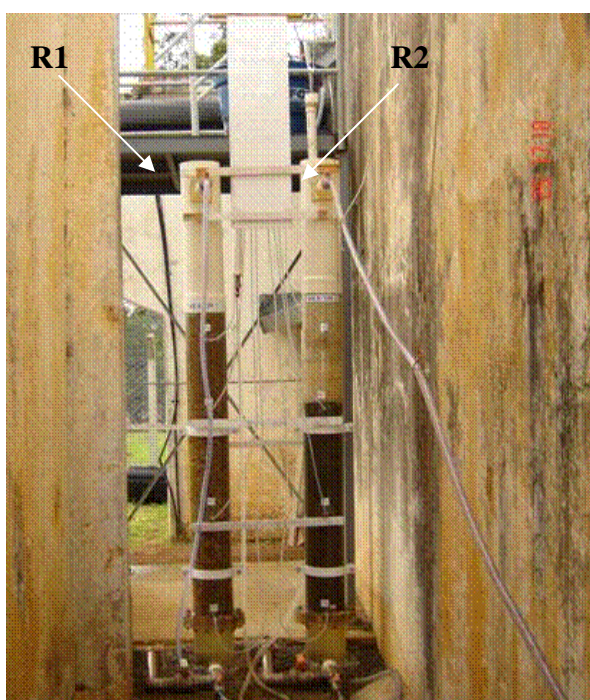
As amostras dos efluentes foram coletadas com o mesmo em funcionamento, imergindo-se na extremidade superior de cada reator, jarro acrílico de seção quadrada (do tipo usado em jarteste) com volumes aproximados de 2 (dois) litros. A determinação dos valores representativos das velocidades de sedimentação dos flocos, como função da turbidez remanescente do efluente clarificado nos reatores R1 e R2 das instalações piloto se constituiu em tarefa de execução meticulosa, considerando-se a manutenção da integridade dos flocos. Nesta pesquisa foi reproduzida, para os reatores R1 e R2, a mesma metodologia de coleta de amostras de efluente, praticada no efluente o decantador da ETA Bragança Paulista, de modo a se ter um mesmo procedimento de coleta.

As leituras dos valores da perda de carga unitária nos reatores R1 e R2 foram realizadas diariamente às 16 horas, em todas as 15 carreiras de operação, antes do início de cada coleta de amostras, e totalizadas como perda de carga total por reator. A limpeza dos meios granulares dos reatores R1 e R2 foram realizadas através de descargas de fundo, de forma que ocorresse o arraste de sólidos retidos nos mesmos.

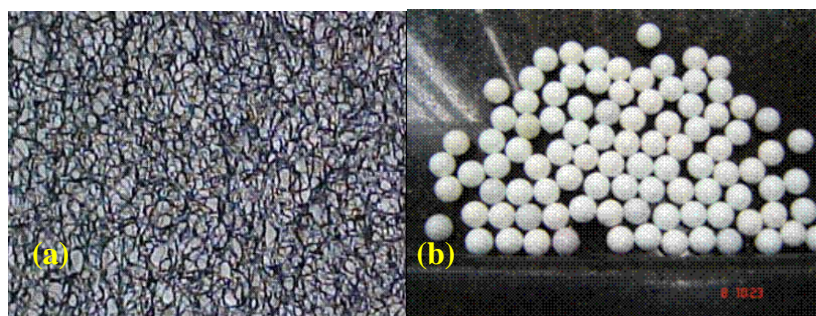
As coletas de amostras dos efluentes para análises foram realizadas nos próprios jarros através de mangueira de silicone de 6mm de diâmetro interno acoplada ao jarro e posicionada a 7 cm de distância do nível superior da lâmina e corresponderam à volumes aproximados de 200 ml. Em cada jarro foram realizadas três coletas de amostras dos efluentes nos intervalos de tempo de 1, 5 e 7 minutos, onde sofreram sedimentação. Estes valores de intervalos de tempo levaram a valores de velocidade sedimentação respectivamente iguais a 7; 1,4 e 1 cm/min. Em cada uma delas, foram realizadas análises de cor aparente (uC) e turbidez remanescente (uT), como função da velocidade estabelecida para a sedimentação dos flocos.

A caracterização das amostras coletadas dos reatores R1 e R2 foram realizadas através de análises físico-químicas de cor aparente (uC) e turbidez (uT) no laboratório (certificação ISO 9001:2000) da ETA Bragança Paulista.

Foram realizadas também análise de turbidez (uT) e cor aparente (uC) dos efluentes dos reatores R1 e R2. As análises físico-químicas de turbidez e cor aparente foram realizadas respectivamente no turbidímetro 2100P da Hach e no colorímetro digital para cor Aquacolor da Policontrol.



**Figura 3** – Foto dos reatores R1 e R2



**Figura 4** – Fotos da seção da malha (a) e das esferas sólidas (b) utilizados como meios granulares fixos do reator R2

Os dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, as características de cada um dos meios.

**Tabela 2.1** - Características dos materiais de enchimento do reator de floculação hidráulica R.1 (pedregulho)

Camada	R.1 Seixos Rolados			
	1º	2º	3º	Total
espessura da camada (cm)	60	60	60	180
$\phi$ (mm)	19 – 25,0	12,0 – 19,0	6,0 – 12,0	-
massa (kg)	35,71	33,31	33,14	102,16 Kg
volume útil (m <sup>3</sup> )	8,83	6,56	5,31	20,70
$\epsilon_o$ (porosidade meio granular limpo)	0,18	0,14	0,11	0,43
Custo (R\$) por m <sup>3</sup>	464,40	370,00	370,00	-
Custo (R\$) utilizado	16,59	12,33	12,26	41,18

**Tabela 2** – Características dos materiais de enchimento do reator de floculação hidráulica R.2 (esferas e malha)

Camada	R.2		
	Malha	Esferas	Total
	1º	2º	
espessura da camada (cm)	120	60	180
Propriedades Físicas	PP (MacMat® L) cor: preta índice vazios > 90% espessura do filamento: 0,65 mm espessura nominal da malha: 10 mm	PS cor: branca φ 9,0 mm d = 1,06 g/cm³	-
massa (kg)	2,88	13,51	16,39
volume útil (m³)	35,57	6,63	42,20
ε <sub>o</sub> (porosidade meio granular limpo)	0,73	0,14	0,87
Custo (R\$) por m²	9,50	-	-
Custo (R\$) utilizado	60,65	166,80	227,45

**Tabela 3** – Valores teóricos de tempo de floculação total e perda de carga total nos reatores R1 e R2

Taxa (m³/m².d)	50	75	100	150	180	200	250	300	350
Velocidade (m/s)	0,0006	0,0009	0,0012	0,0017	0,0021	0,0023	0,0029	0,0035	0,0041
Tempo de floculação total (min)	R1	18,4	12,7	9,5	6,3	5,3	4,7	3,8	3,2
	R2	38,7	25,1	19,4	12,9	10,8	9,7	7,7	6,4

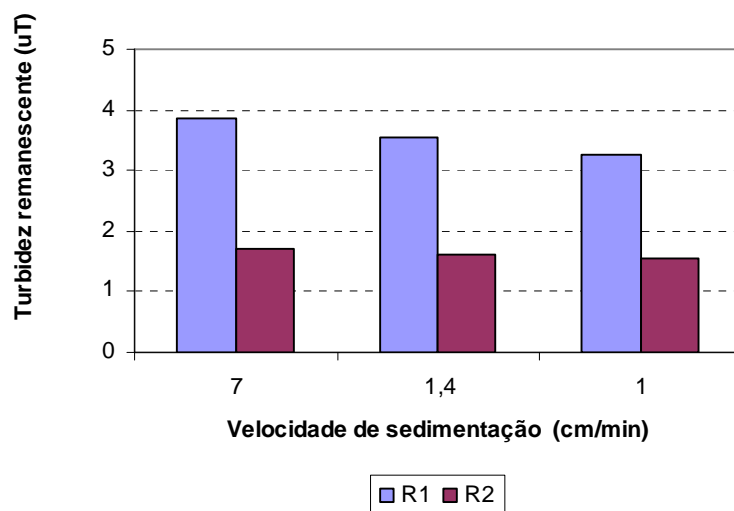
**Tabela 4** – Valores de taxas de aplicação superficial (m³/m².dia), valores médios de turbidez (uT) e cor aparente (uC) da água bruta e duração (hs) das carreiras de operação durante os ensaios nos reatores R1 e R2

Carreira	Taxa (m³/m².dia)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Operação (hs)
1	50	7,9	47,5	144
2	75	6,7	39,8	240
3	100	6,0	33,3	120
4	150	5,7	35,6	72
5	180	5,8	40,0	72
6	200	9,5	63,8	72
7	250	42,1	139,5	96
8	250	70,6	243,9	72
9	300	66,3	311,7	72
10	300	27,7	159,7	120
11	350	13,8	90,0	96
12	200	58,2	250,0	48
13	200	42,7	200,0	48
14	200	39,8	170,0	24
15	100	27,1	153,8	72
Tempo total de operação				1368

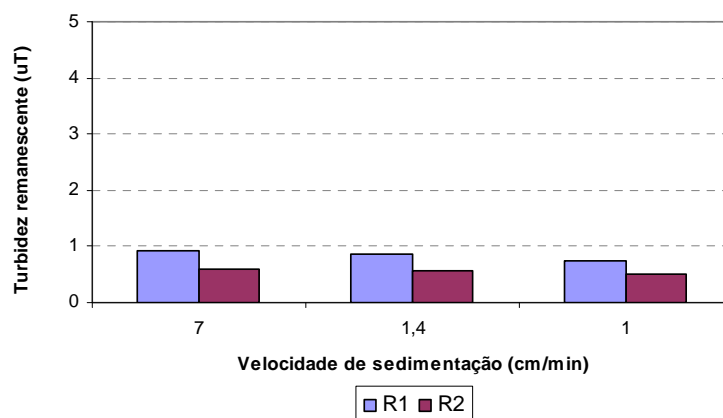
## RESULTADOS

O resultados apresentados nestes ensaios foram obtidos através da aplicação de média aritmética dos valores de turbidez remanescente (uT) e perda de carga (mm) durante cada carreira de operação.

As Figuras de 1 a 15 mostram a variação da turbidez remanescente para os diferentes valores médios de velocidade de sedimentação, respectivamente 7; 1,4 e 1 cm/min. Segundo pode ser visto nestas figuras, o reator R2 apresentou em todas as carreiras de operação menores valores médios de turbidez remanescente do que o R1. Os valores médios de turbidez remanescente (uT) para um período de sedimentação de 5 minutos ( $V_s = 1,4$  cm/min), situação esta, mais representativa do provável desempenho de uma unidade de decantação em escala real, o reator R2 apresentou, em todas as 15 carreiras de operação, melhor desempenho e sofreu menos influência dos valores das taxas de escoamento aplicadas que o reator R1. Os resultados de turbidez remanescente (uT) dos períodos de sedimentação 5 minutos ( $V_s = 1,4$  cm/min) e 7 minutos ( $V_s = 1,0$  cm/min), são muito similares, o que significa que, operacionalmente o período de sedimentação 5 minutos é mais interessante ao processo, do que o período de sedimentação 7 minutos, através da promoção de uma decantação mais rápida com praticamente a mesma eficiência do ter a mesma turbidez remanescente do período de sedimentação 7 minutos.

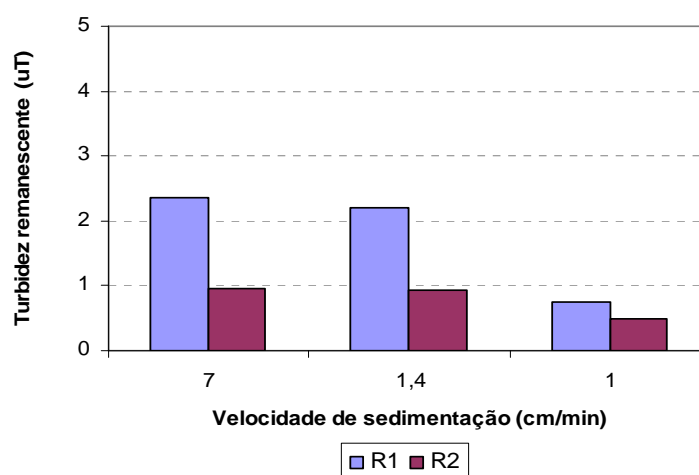


**Figura 1** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $50 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 72 horas de operação da carreira 1. Dados da água bruta= 7,9 uT, 47,5 uC e pH = 6,7.

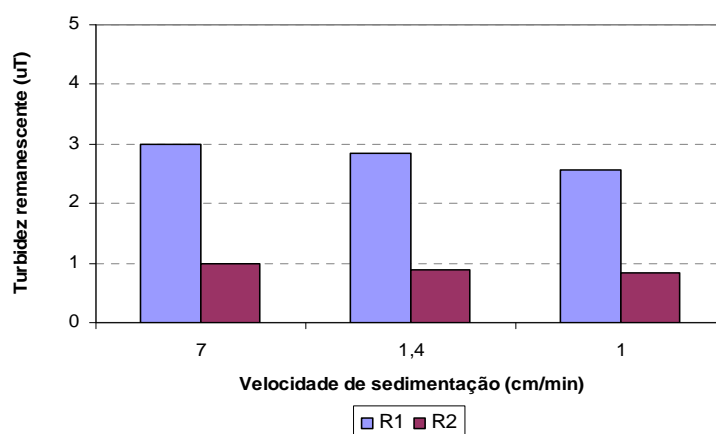


**Figura 2** – Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $75 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 240 horas de operação da carreira 2. Dados da água bruta: turbidez = 6,7 uT, cor aparente = 39,8 uC e pH = 6,8.

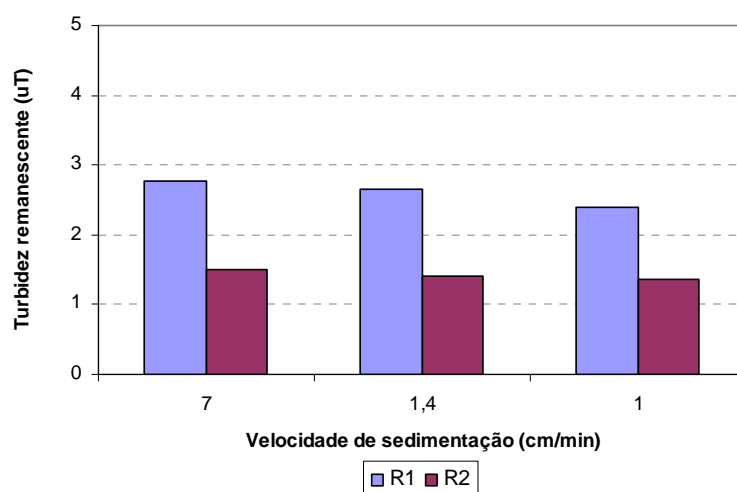




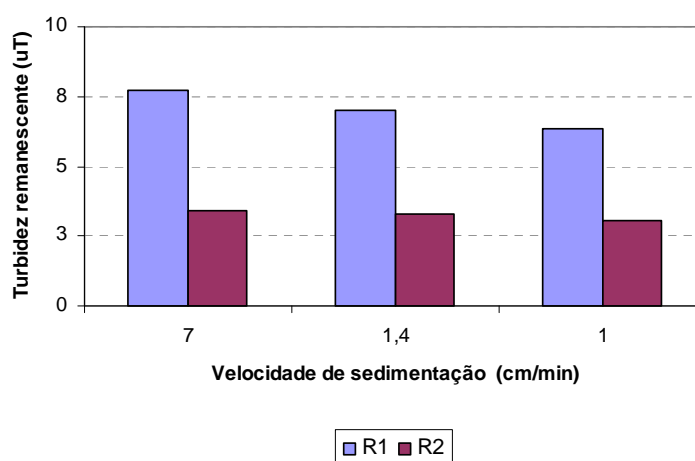
**Figura 3** - Valores médios Curvas de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 120 horas de operação carreira 3. Dados da água bruta: turbidez = 5,9 uT, cor aparente = 33,3 uC e pH = 6,8.



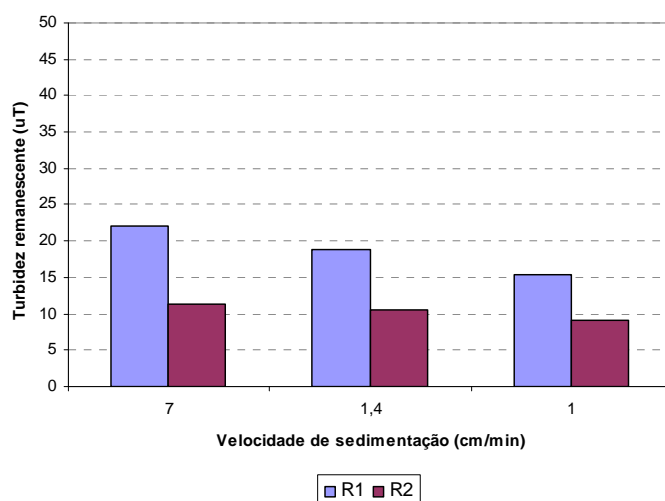
**Figura 4** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $150 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 72 horas de operação da carreira 4. Dados da água bruta: turbidez = 5,7 uT, cor aparente = 35,6 uC e pH = 6,6.



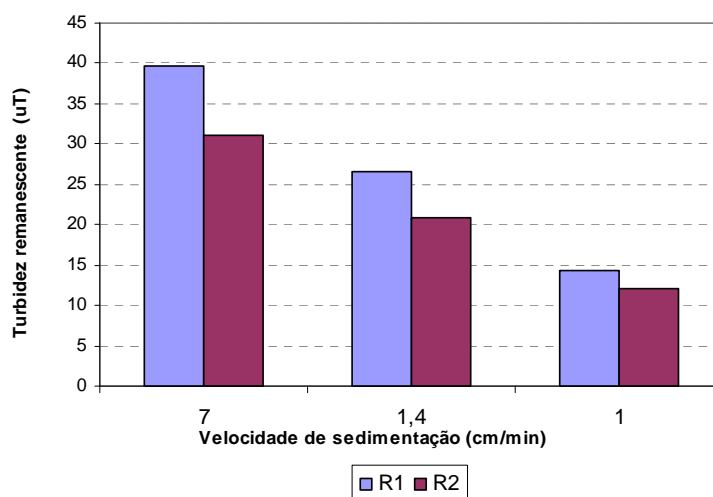
**Figura 5** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 72 horas de operação da carreira 5. Dados da água bruta: turbidez = 5,75 uT, cor aparente = 40,00 uC e pH = 6,71.



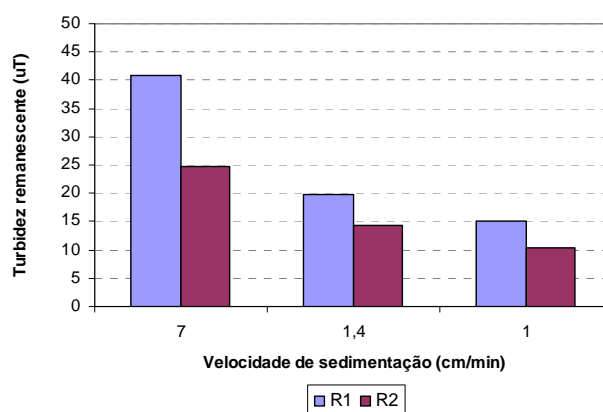
**Figura 6** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 72 horas de operação da carreira 6. Dados da água bruta; turbidez = 9,5 uT, cor aparente = 63,8 uC e pH = 6,6



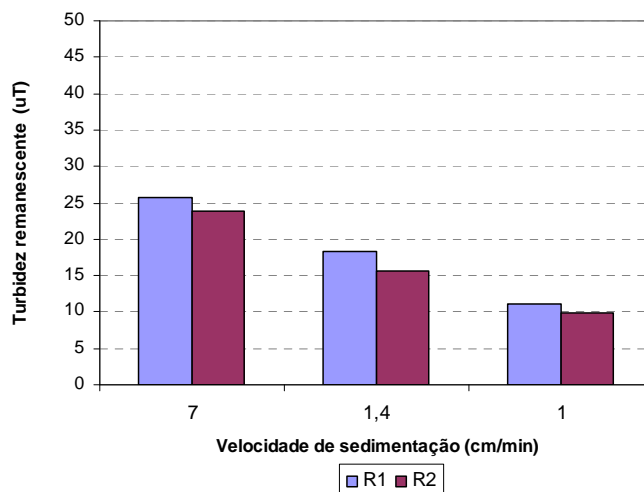
**Figura 7** - Curvas de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$  durante 96 horas de operação da carreira 7. Dados da água bruta: turbidez = 42,1 uT, cor aparente = 139,5 uC e pH = 6,5.



**Figura 8** – Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$  durante 72 horas de operação da carreira 8. Dados da água bruta: turbidez = 70,56 uT, cor aparente = 243,89 uC e pH = 6,37.

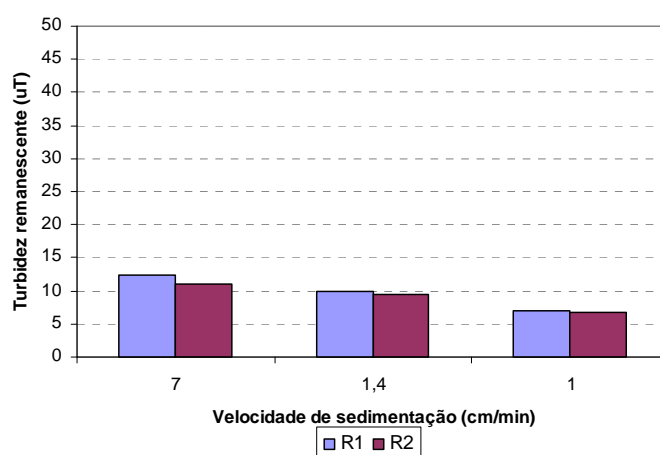


**Figura 9** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 96 horas de operação da carreira 9. Dados da água bruta: turbidez = 66,3 uT, cor aparente = 311,7 uC e pH = 6,5.

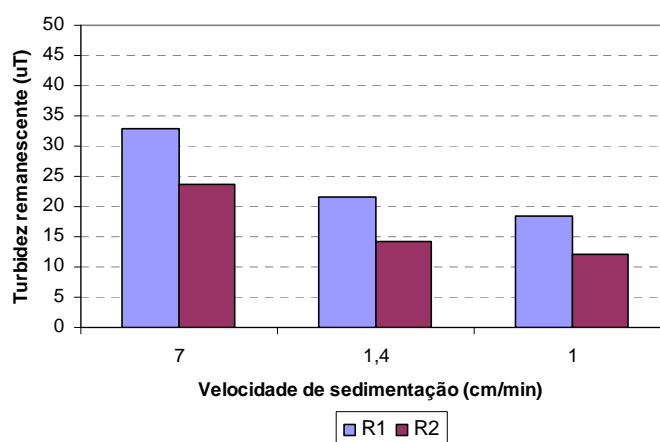


**Figura 10** - Valores médios Curvas de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 120 horas de operação da carreira 10. Dados da água bruta = 27,7 uT, cor aparente = 159,2 uC e pH = 6,6.

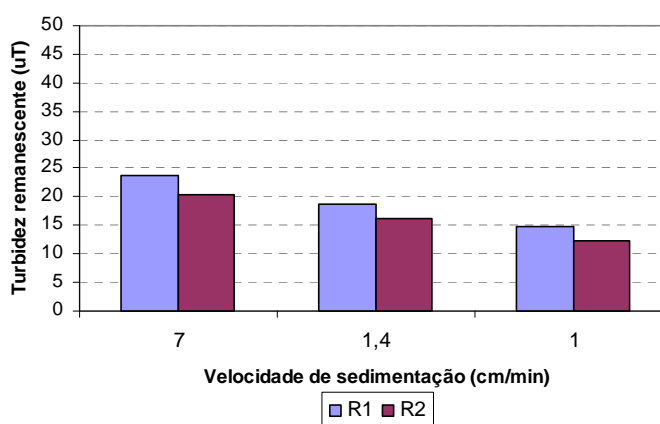




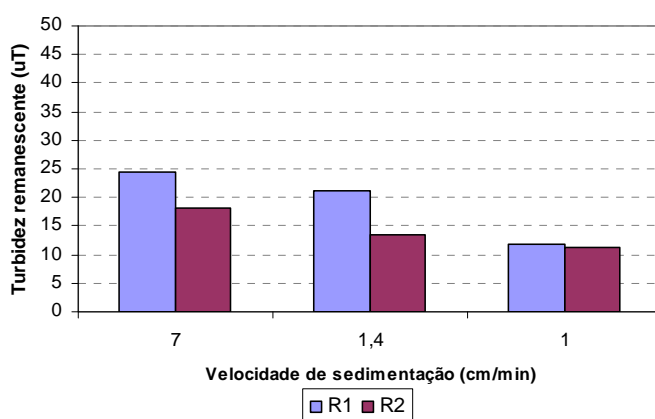
**Figura 11** – Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $350 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 96 horas de operação da carreira 11. Dados da água bruta: turbidez = 13,8 uT, cor aparente = 90,0 uC e pH = 6,6.



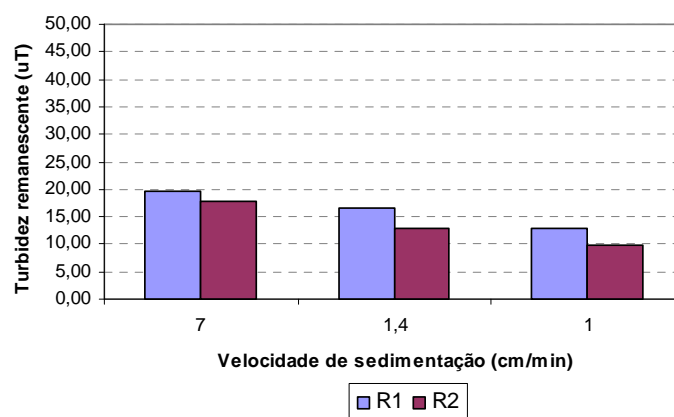
**Figura 12** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 48 horas de operação da carreira 12. Dados da água bruta: turbidez = 58,2 uT, cor aparente = 250,0 uC e pH = 6,5.



**Figura 13** – Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 48 horas de operação da carreira 13. Dados da água bruta: turbidez = 42,7 uT, cor aparente = 210,0 uC e pH = 6,5.

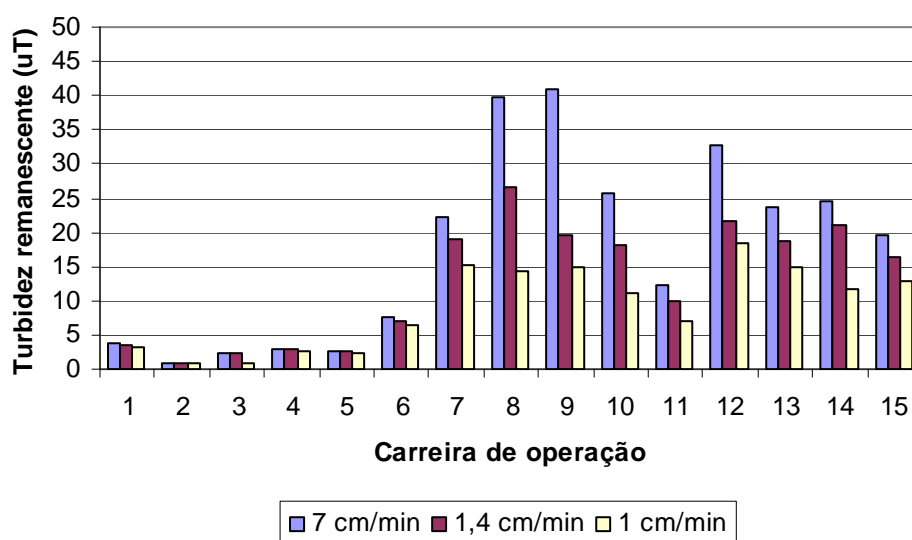


**Figura 14** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 24 horas de operação da carreira 14. Dados da água bruta: turbidez = 39,8 uT, cor aparente = 170,0 uC e pH = 6,7.

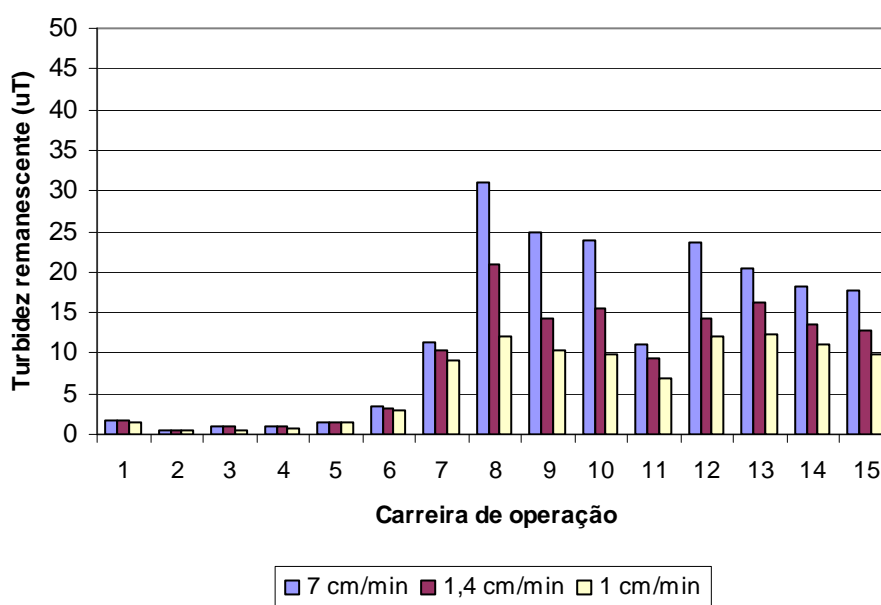


**Figura 15** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação para taxa de  $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  durante 72 horas de operação da carreira 15. Dados da água bruta: turbidez = 27,1 uT, cor aparente = 153,8 uC e pH = 6,7.

As Figuras 16 e 17 mostram os valores médios de turbidez remanescente (uT) em função dos valores de velocidades de sedimentação 7; 1,4 e 1 cm/min nos reatores R1 e R2 durante as carreiras de operação. Pode ser observados nestas figuras que a amplitude da eficiência dos reatores R1 e R2 se mostra bem mais significativa até taxa de escoamento  $\leq 250 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  e o período de sedimentação de 7 minutos apresentou os maiores valores médios de turbidez remanescente.

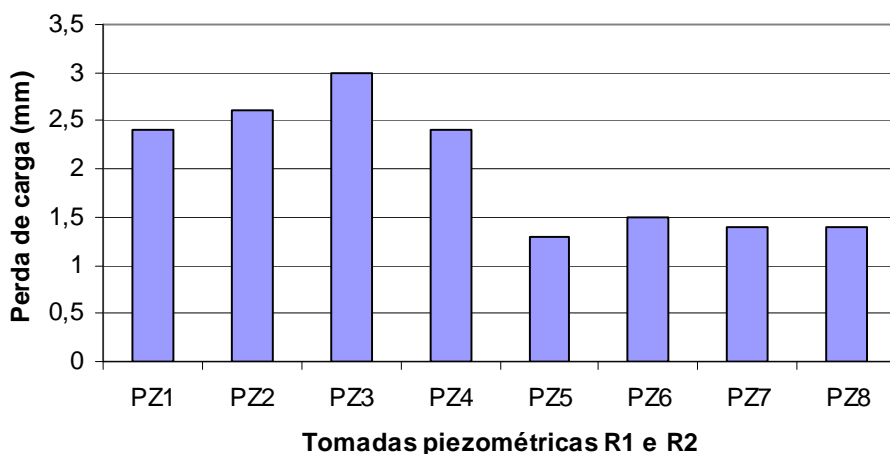


**Figura 16** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação de 1; 1,4 e 7 cm/min no reator R1 durante as carreiras de operação.

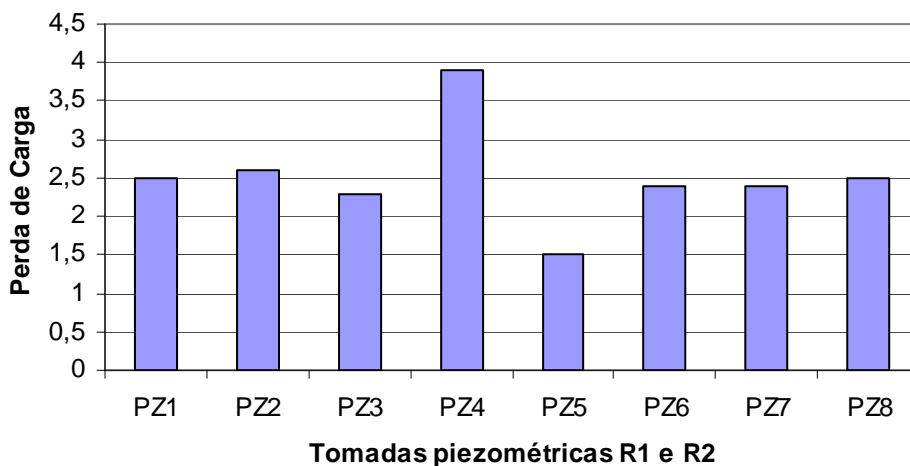


**Figura 17** - Valores médios de turbidez remanescente (uT) em função das velocidades de sedimentação de 1; 1,4 e 7 cm/min no reator R2 durante as carreiras de operação.

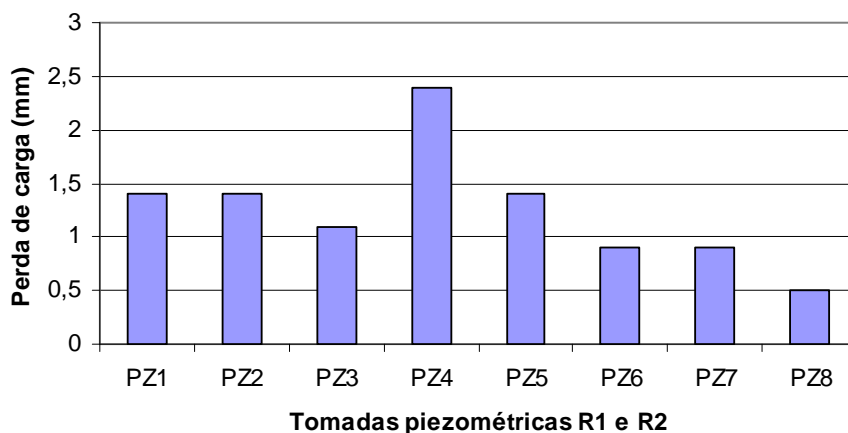
As Figuras de 18 a 32 mostram os valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, durante as carreiras de operação. Pode ser observados nestas figuras que o reator R2 apresentou em médias os menores valores de perda de carga durante todas as carreiras de operação.



**Figura 18:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 72 horas de operação da carreira 1. Dados da água bruta= 7,9 uT, 47,5 uC e pH = 6,7.

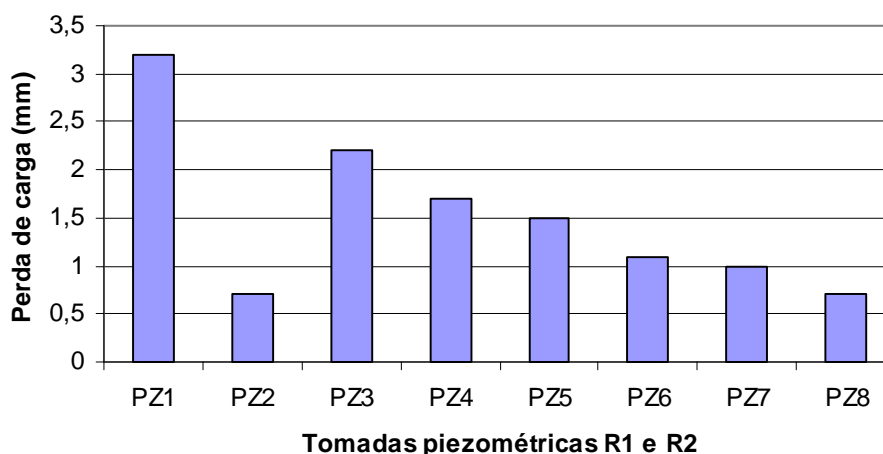


**Figura 19:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 75 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 240 horas de operação da carreira 2. Dados da água bruta: turbidez = 6,7 uT, cor aparente = 39,8 uC e pH = 6,8.

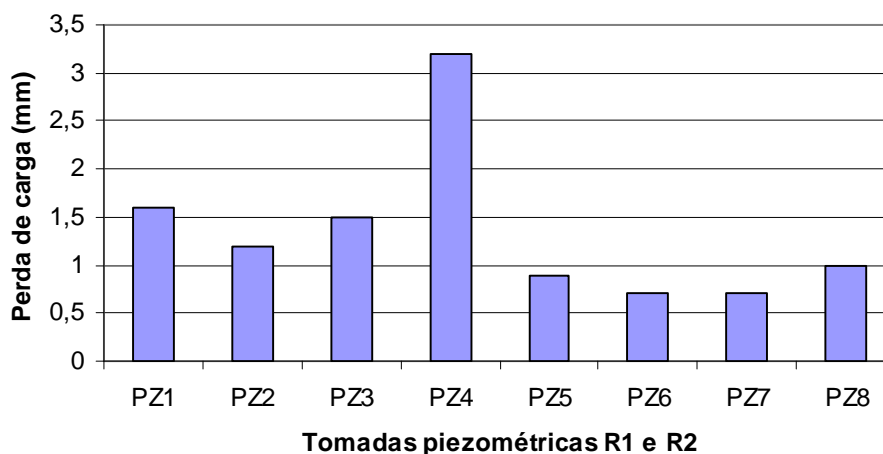


**Figura 20:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 120 horas de operação carreira 3. Dados da água bruta: turbidez = 5,9 uT, cor aparente = 33,3 uC e pH = 6,8.

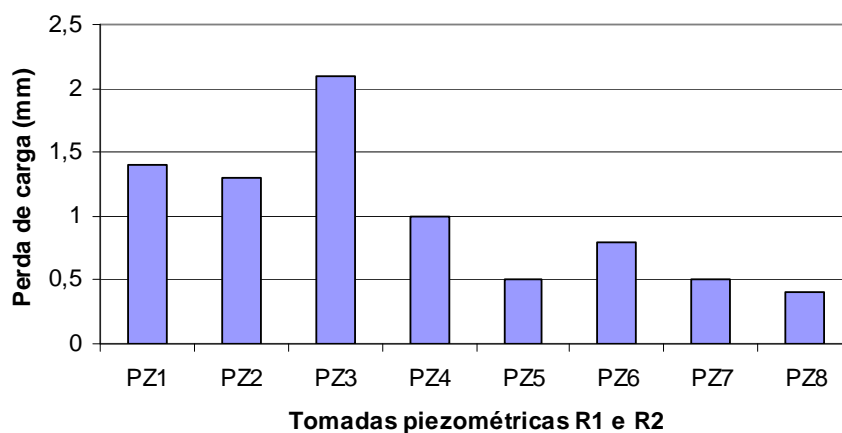




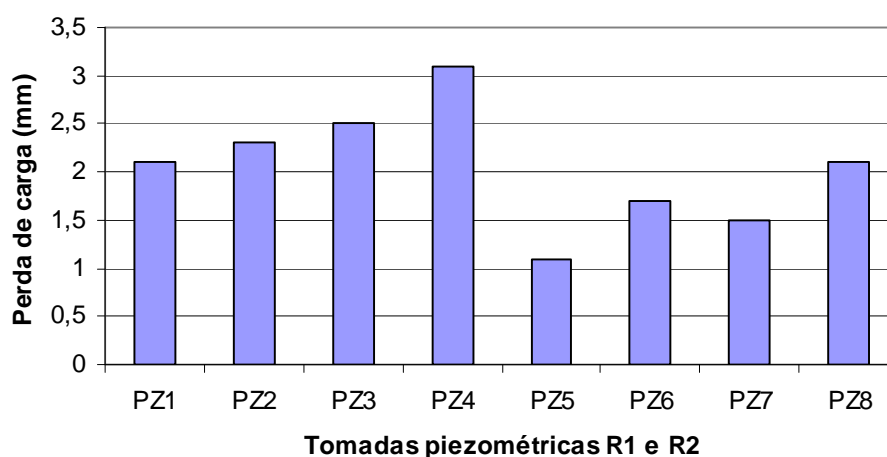
**Figura 21:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 150 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 72 horas de operação da carreira 4. Dados da água bruta: turbidez = 5,7 uT, cor aparente = 35,6 uC e pH = 6,6.



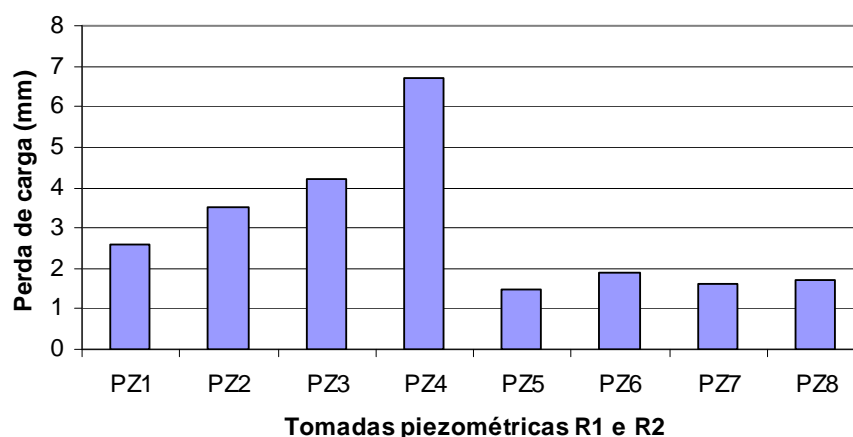
**Figura 22:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 180 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 72 horas de operação da carreira 5. Dados da água bruta: turbidez = 5,75 uT, cor aparente = 40,00 uC e pH = 6,71.



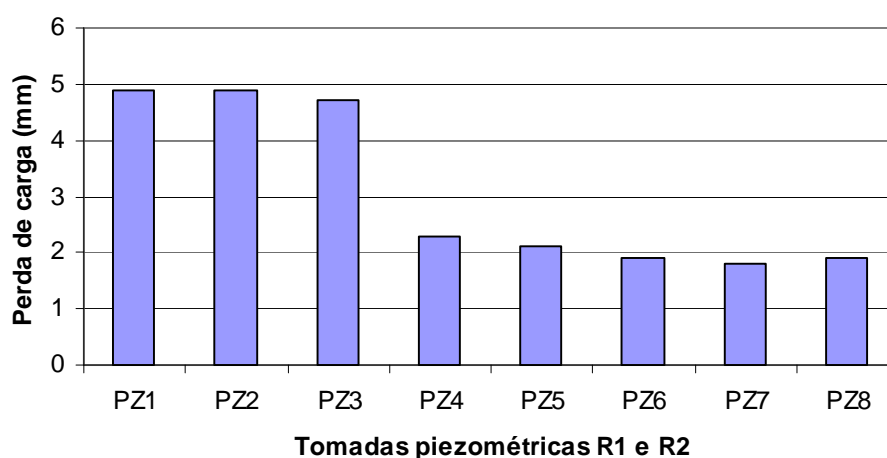
**Figura 23:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 72 horas de operação da carreira 6. Dados da água bruta: turbidez = 9,5 uT, cor aparente = 63,8 uC e pH = 6,6



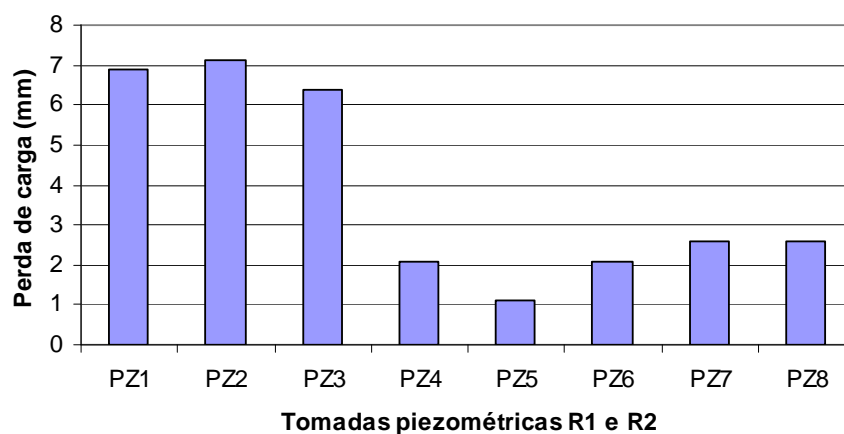
**Figura 24:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 250 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 96 horas de operação da carreira 7. Dados da água bruta: turbidez = 42,1 uT, cor aparente = 139,5 uC e pH = 6,5.



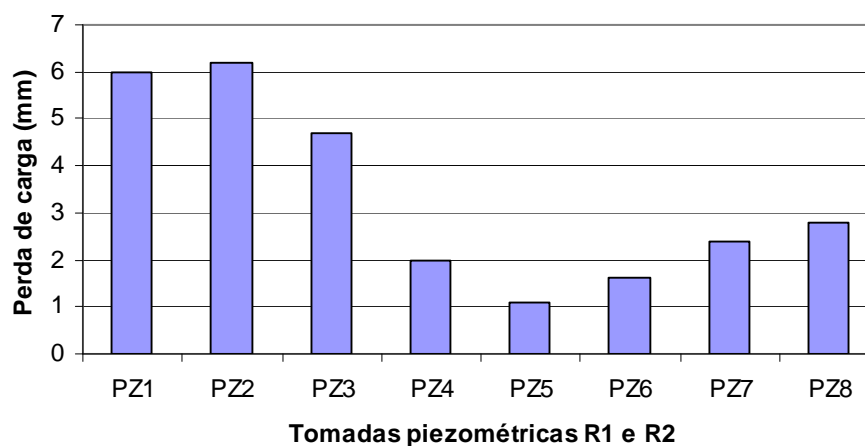
**Figura 25:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 250 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 72 horas de operação da carreira 8. Dados da água bruta: turbidez = 70,56 uT, cor aparente = 243,89 uC e pH = 6,37.



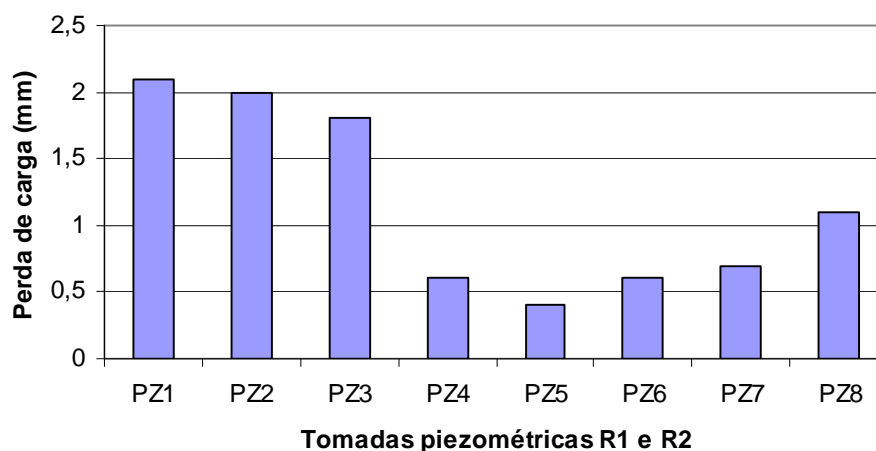
**Figura 26:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 96 horas de operação da carreira 9. Dados da água bruta: turbidez = 66,3 uT, cor aparente = 311,7 uC e pH = 6,5.



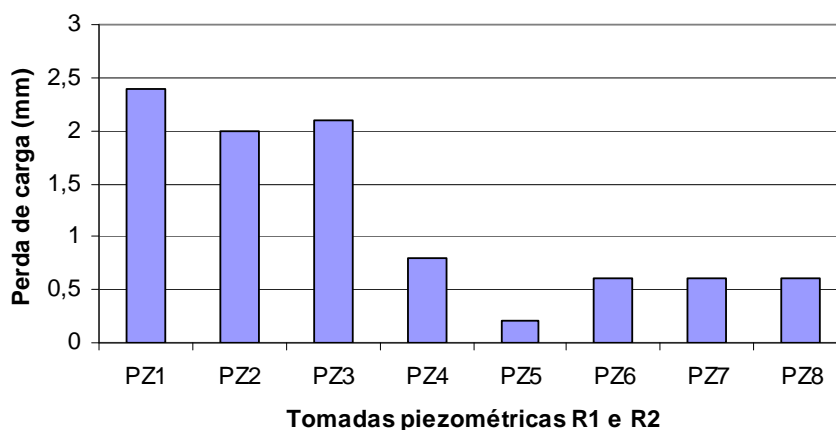
**Figura 27:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 120 horas de operação da carreira 10. Dados da água bruta = 27,7 uT, cor aparente = 159,2 uC e pH = 6,6.



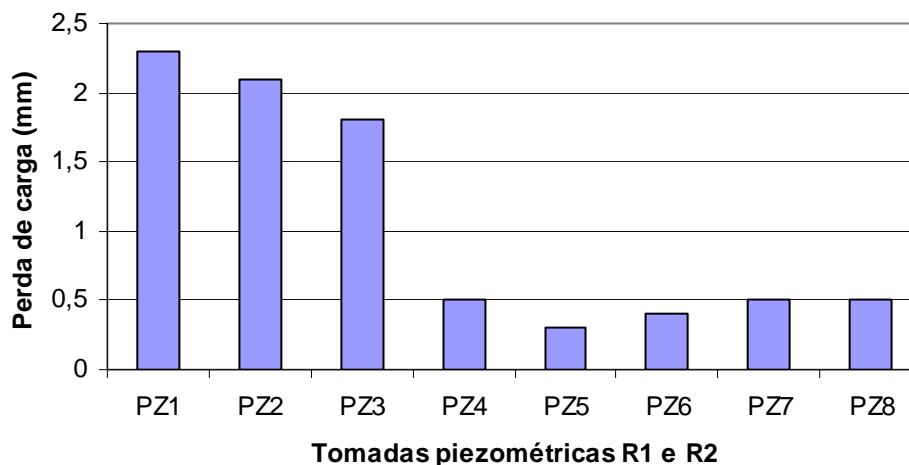
**Figura 28:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 350 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 96 horas de operação da carreira 11. Dados da água bruta: turbidez = 13,8 uT, cor aparente = 90,0 uC e pH = 6,6.



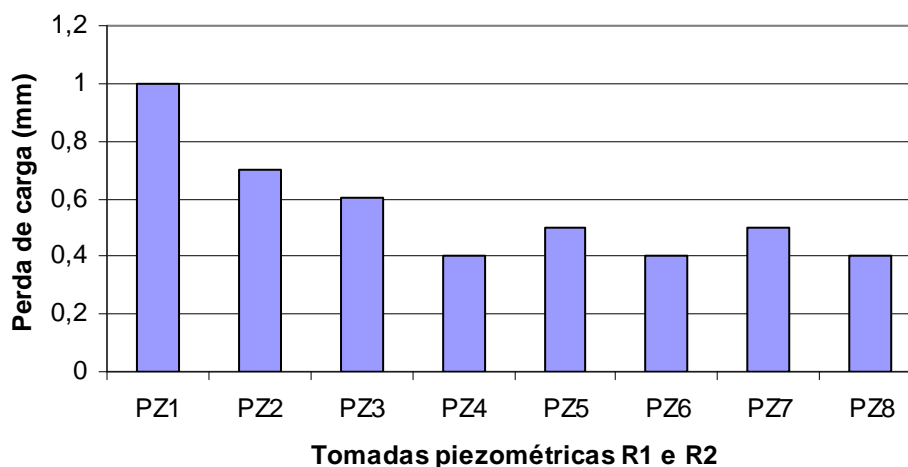
**Figura 29:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 48 horas de operação da carreira 12. Dados da água bruta: turbidez = 58,2 uT, cor aparente = 250,0 uC e pH = 6,5.



**Figura 30:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 48 horas de operação da carreira 13. Dados da água bruta: turbidez = 42,7 uT, cor aparente = 210,0 uC e pH = 6,5.



**Figura 31:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 24 horas de operação da carreira 14. Dados da água bruta: turbidez = 39,8 uT, cor aparente = 170,0 uC e pH = 6,7.

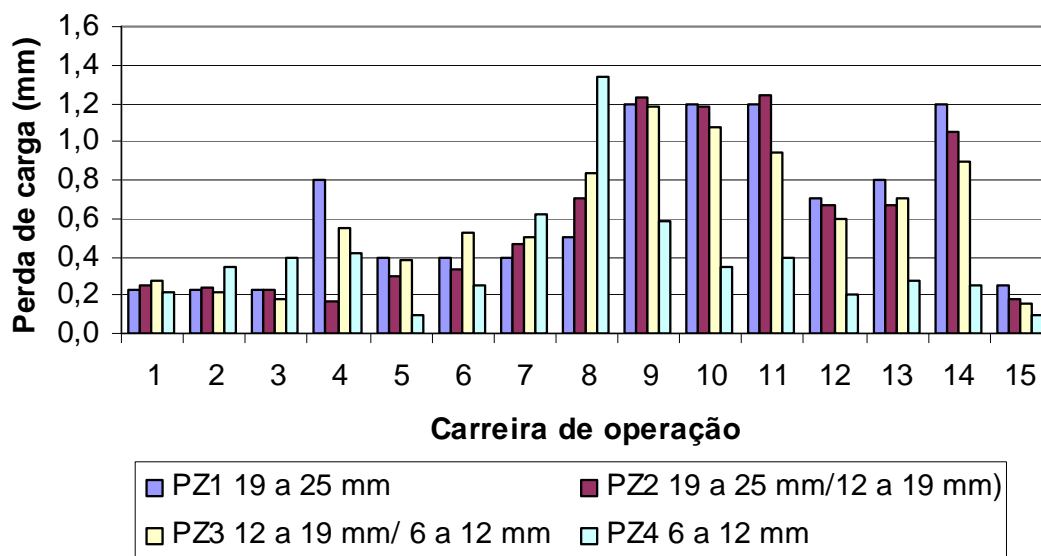


**Figura 32:** Valores médios de perda de carga (mm) total nas tomadas piezométricas PZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>, PZ<sub>3</sub> e PZ<sub>4</sub> no reator R1; e PZ<sub>5</sub>, PZ<sub>6</sub>, PZ<sub>7</sub> e PZ<sub>8</sub> no reator R2, à taxa de 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia durante 72 horas de operação da carreira 15. Dados da água bruta: turbidez = 27,1 uT, cor aparente = 153,8 uC e pH = 6,7.

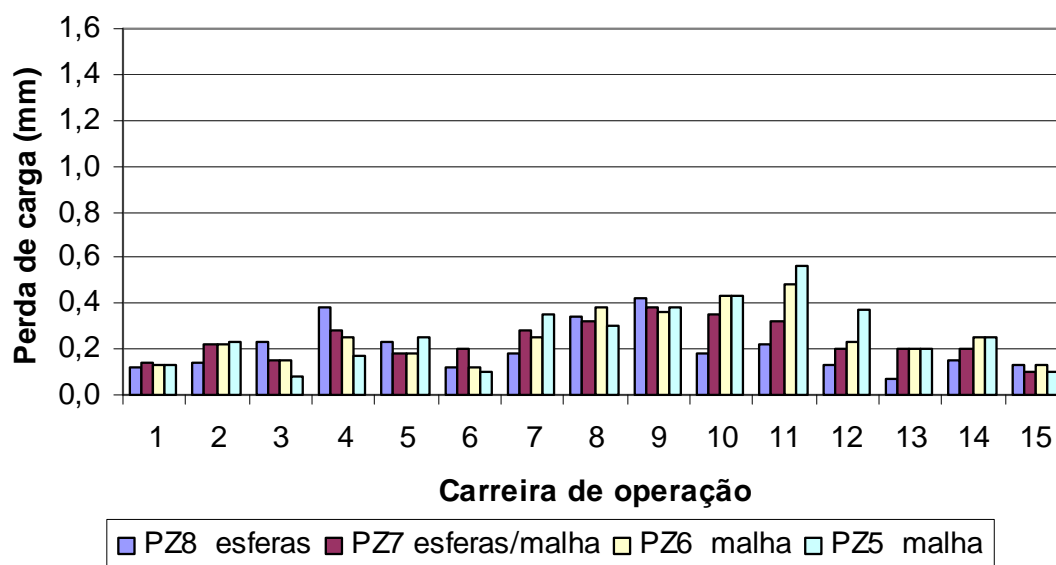




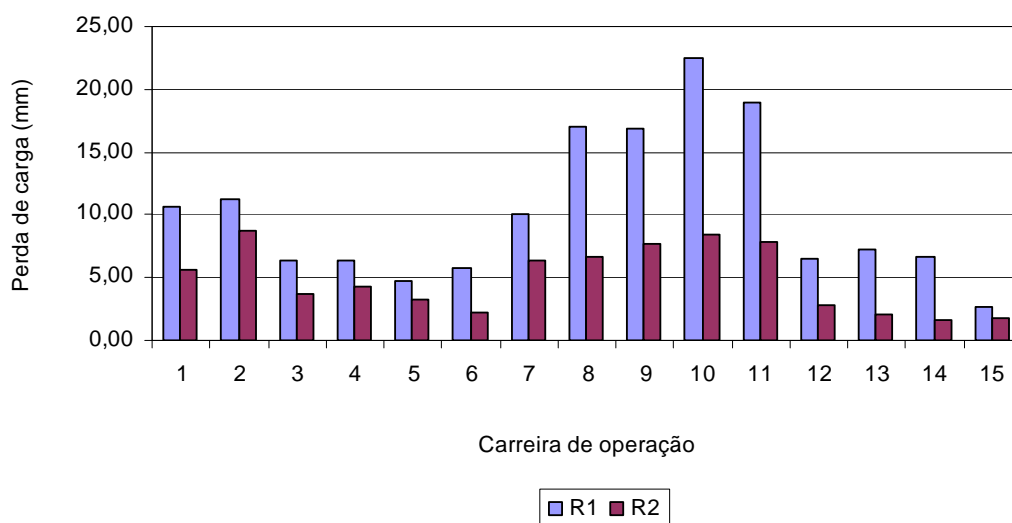
As Figuras 33, 34 e 35, mostram os valores médios de perdas de carga (mm) por tomadas piezométricas  $PZ_1$ ,  $PZ_2$ ,  $PZ_3$  e  $PZ_4$  no reator R1 e  $PZ_5$ ,  $PZ_6$ ,  $PZ_7$  e  $PZ_8$  no reator R2; e por reatores R1 e R2, em função das taxas de aplicação ( $m^3/m^2.dia$ ) e turbidez (uT) da água bruta durante as carreiras de operação.



**Figura 33:** Valores médios de perda de carga (mm) das tomadas piezométricas  $PZ_1$ ,  $PZ_2$ ,  $PZ_3$  e  $PZ_4$  no reator R1 durante as carreiras de operação.



**Figura 34:** Valores médios de perda de carga (mm) das tomadas piezométricas  $PZ_5$ ,  $PZ_6$ ,  $PZ_7$  e  $PZ_8$  no reator R2 durante as carreiras de operação.



**Figura 35:** Valores médios de perda de carga (mm) total nos reatores R1 e R2 em função das taxas de aplicação ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ) e da turbidez (uT) da água bruta durante as carreiras de operação.

## CONCLUSÕES

Com base nos trabalhos realizados pode ser concluído que:

O reator R2 apresentou em todas às taxas de aplicação superficial ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ) a que foi submetido, menores valores médios de turbidez remanescente e perda de carga, devido à maior eficiência na formação de flocos em função da elevada porosidade do meio floculante aplicado (malha e esferas) que lhe proporcionou o dobro do volume útil, favoreceu o aumento da taxa de colisões entre as partículas coloidais e lhe conferiu os maiores tempos médios de floculação ( $T$ ). Comprovando que quanto maior o valor de  $T$ , maior o volume útil do floculador; e quanto maior for o número de cavidades, mais se aproxima da teoria de um grande número de reatores em série;

A menor evolução de perda de carga (mm) verificada no reator R2 demonstrou que mesmo que haja retenção de flocos ou formação de manta de lodo, este não proporciona aumento de resistência ao escoamento, tendo em vista a grande disponibilidade de vazios no reator R2. O desempenho do reator R2 não dependeu da formação de manta de lodo para facilitar a ocorrência de choque entre as partículas floculentas deste com as afluentes em formação e sim das linhas de fluxo promovida pelas cavidades da malha. Por outro lado, o comportamento do reator R1 sob este aspecto, já evidencia uma maior ocorrência de retenção de sólidos e maiores perdas de carga;

À taxas de aplicação superficial  $\leq 180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  e turbidez da água bruta menor que 13,0 uT, apresentou efluente com turbidez menor 5,0 uT e cor aparente menor 15,0 operando como unidade de clarificação, função operacional esta não observada no reator R1;

Os estudos demonstraram que a aplicação de materiais sintéticos e recicláveis como meio granular fixo em floculadores hidráulicos superou a eficiência dos meios granulares fixos constituídos por seixos rolados, proporcionando além unidade de tratamento compactas e de baixo custo, redução de consumo de energia, maior tempo de operação em função da baixa velocidade de colmatção e perda de carga total, facilidade na limpeza, redução de descargas e lavagens, diminuição no peso total da unidade de tratamento e unidades transportáveis, o que viabiliza econômica e operacionalmente a sua aplicação em pequenas comunidades sem acesso a água potável pela possibilidade de implementação de tecnologia de tratamento de água de operação simplificada e custos de manutenção e operacionais relativamente baixos quando comparados aos dos sistemas convencionais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DALSASSO, L.. R. Estudo de diferentes materiais para floculação em meio granular, precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, SC: [s.n.], 2005.
2. DI BERNARDO, L. (coordenador). Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003, 498 p.:il. Projeto PROSAB.
3. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. São Carlos: RIMA, v.1, 2005. 792 p.
4. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. São Carlos: RIMA, v.2, 2005. 792 p.
5. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. *Relatório do Desenvolvimento Humano 2006*. Disponível em <<http://www.pnud.org.br>> Acessado em 15/12/2007.
6. RAMOS, O. R. Desempenho de reatores hidráulicos de floculação em regime de escoamento laminar no trecho de transição. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP: [s.n.], 2000.
7. RICHTER, C. A. e AZEVEDO NETTO, J. M. Tratamento de Água - Tecnologia atualizada. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 4ª reimpressão 2002, 1991, 332p.
8. RICHTER, C. A.; MOREIRA, R.B. Floculadores de pedra: experiências em filtro piloto. Engenharia, São Paulo, n. 435, 1982.
9. RICHTER, C. A. Uso de telas em estações de tratamento. Revista DAE, v. 45, n. 143, Dezembro de 1985.
10. RICHTER, C. A. Sistemas de floculação acelerada. Revista DAE, v. 46, n. 145, Junho de 1986.
11. SENS, M.L. Floculação em meio granular fixo e expandido. Florianópolis: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. 67 p. Concurso do magistério superior.