

EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA DE UM HIDROCICLONE DE GEOMETRIA “RIETEMA” PARA PRÉ-FILTRAGEM DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

Othon C. Cruz¹, Jose R. Zanini², Antonio C. Barreto³, Antonio S. Ferraud⁴

¹Lic. Ciências Agrícolas, Prof. Dr. Efetivo, IFTM Campus Uberaba (034) 3319 6051, othon@iftm.edu.br

²Eng. Agrônomo, Prof. Dr., Depto. Eng. Rural, FCAV/UNESP - Jaboticabal - SP

³Eng. Agrícola, Prof. Dr., Depto. Irrigação e Agrometeorologia, IFTM Campus Uberaba

⁴Matemático, Prof. Dr., Depto. Ciências Exatas, FCAV/UNESP - Jaboticabal – SP

RESUMO

O hidrociclone é um equipamento amplamente utilizado pela indústria em processos envolvendo separação sólido-líquido, porém, ainda é pouco utilizado na agricultura irrigada brasileira. Neste trabalho avaliou-se a eficiência granulométrica deste equipamento como pré-filtro de partículas sólidas, oriundas dos processos erosivos e do assoreamento dos recursos hídricos. Os testes foram realizados com um hidrociclone de geometria “Rietema”, possuindo diâmetro de 19,2 cm na parte cilíndrica, operando com vazões variando entre 10 e 27 m³ h⁻¹. O material particulado usado em suspensão foi: solo franco-argiloso e areia de rio. Os resultados mostraram que os diâmetros de corte para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia foram superiores aos valores obtidos com suspensões com solo, indicando que o equipamento apresenta maior eficiência na separação de partículas “grosseiras” como a areia. Concluiu-se que o equipamento avaliado é eficiente na remoção de partículas sólidas, notadamente para água contendo suspensões de areia, podendo ser utilizado como pré-filtro em sistemas de irrigação.

Palavras-chave: Pré-filtro, Diâmetro de corte, Irrigação

GRANULOMETRIC EFFICIENCY OF A “RIETEMA” GEOMETRY HYDROCYCLONE FOR PRE-FILTERING OF WATER FOR IRRIGATION

ABSTRACT

The hydrocyclone is equipment widely used by industry in cases involving solid-liquid separation, but still little used in irrigated agriculture in Brazil. This study evaluated the granulometric efficiency of this equipment as a pre-filter of solid particles, from erosive processes and the silting of water resources. The tests were performed with a hydrocyclone of “Rietema” geometry, with a diameter of 19.2 cm at the cylindrical part operating with outflows ranging between 10 and 27 m³ h⁻¹. The materials used in particulate suspension were clay loam soil and sand from river. The results showed that the cut size to the hydrocyclone operating with aqueous suspensions of sand were higher than the values obtained with soil

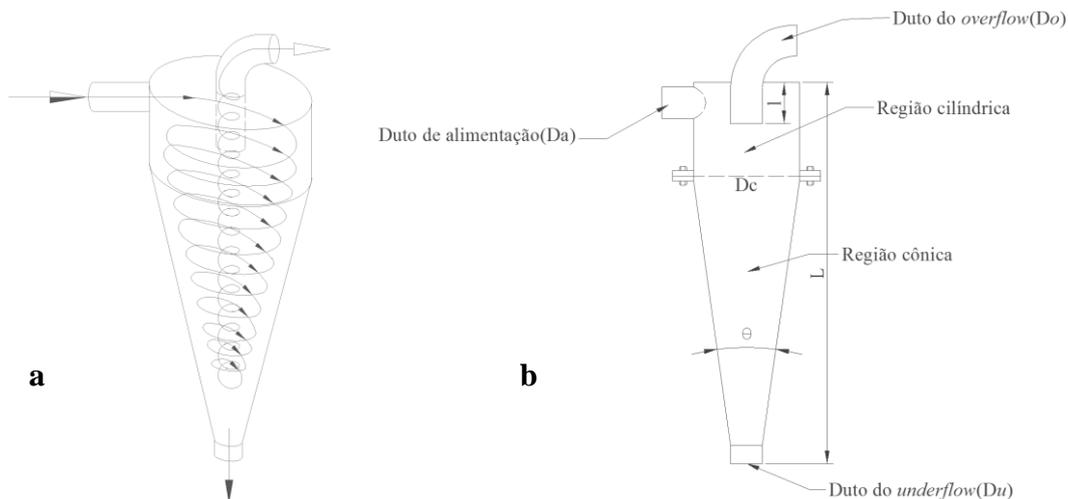
suspensions, indicating that the equipment has improved efficiencies in separate particles "coarse" as the sand. It was concluded that the equipment is efficient at removing particulate matter, especially for water containing suspensions of sand and can be used as a pre-filter in irrigation systems.

Keywords: Pre-filter, Cutting diameter, Irrigation

INTRODUÇÃO

O uso intensivo do solo para atividades agrícolas sem o devido cuidado com a conservação ambiental culmina com a degradação das microbacias. Esses impactos são caracterizados principalmente pelo efeito erosivo do solo, resultando no assoreamento e na deterioração da qualidade da água dos mananciais, reduzindo os potenciais quantitativo e qualitativo de uso para a irrigação. Segundo Ayers & Westcot (1991), a quantidade e a qualidade da água são parâmetros importantes a serem considerados na irrigação, uma vez que, dependendo das características físicas, químicas e biológicas da água, o seu uso pode se tornar limitado ou até inviabilizado. Os constituintes da água, sejam de origem natural ou antropogênica, conferem características qualitativas que podem influenciar no dimensionamento e escolha do sistema de irrigação, bem como, de filtragem (THOMPSON & KRIDER, 1983, citados por SOCCOL, 2003). Um dos principais problemas de qualidade da água para a irrigação e que está relacionado com a operação dos equipamentos, é a obstrução física de tubulações e emissores, sobretudo em sistemas de irrigação localizada, em que os orifícios de passagem são de pequenos diâmetros (NAKAYAMA & BUCKS, 1991). Contudo, diferentes tipos de filtros podem ser utilizados para minimizar o problema decorrente da presença de sólidos em suspensão na água de irrigação, sendo que os sistemas de filtragem podem

ser constituídos por filtros de areia, de tela ou de discos (BERNARDO et al., 2006). Nas situações em que a água apresenta alta quantidade de sólidos, pode ser necessária a instalação de estruturas e/ou equipamentos como bacias de sedimentação ou pré-filtros instalados na tomada de água, antes do sistema de filtragem. Dentre esses são citados os hidrociclones, que são instalados no cabeçal de controle. Souza et al. (2000), citado por Soccol (2003), relatam que o princípio de separação dos hidrociclones é o mesmo das centrífugas, proporcionado pela sedimentação centrífuga, nos quais as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca sua separação do fluido. A alimentação tangencial de uma suspensão sólido-líquido na região cilíndrica do equipamento provoca a formação de um vórtex descendente, o que faz com que as partículas de maior densidade relativa sejam projetadas contra a parede do equipamento e arrastadas até sua saída inferior (*underflow*). Já as partículas menores são arrastadas para o centro do equipamento formando um vórtex ascendente, saindo por um orifício superior (*overflow*), (Figura 1-a). O hidrociclone consiste de uma parte cônica ligada a uma parte cilíndrica, na qual existe uma entrada para sua alimentação, (SOCCOL, 2005). A parte superior do hidrociclone apresenta um tubo para saída da suspensão diluída (*overflow*) e na parte inferior há um orifício de saída da suspensão concentrada (*underflow*), (Figura 1-b).



Figuras 1-a e 1-b. Princípio de funcionamento e esquema típico de um hidrociclone.

Os hidrociclones são agrupados em famílias, possuindo como característica a proporção entre suas medidas geométricas associadas com o diâmetro da parte cilíndrica (D_c). Esta proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é extremamente importante no processo de separação, pois está diretamente

relacionada ao desempenho e à classificação desses equipamentos.

As famílias de hidrociclones mais conhecidas e de maior interesse são as de geometria “Rietema”, “Bradley” e “Krebs” (VIEIRA, 2006). As principais relações geométricas referentes a essas famílias de hidrociclones são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Proporções geométricas das “famílias” de hidrociclones.

Hidrociclone	D_a/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L/D_c	θ
Rietema	0,280	0,340	0,400	5,000	15 - 20,0°
Bradley	0,133	0,200	0,330	6,850	9,0°
Krebs	0,267	0,159	-	5,874	12,7°

Fonte: Adaptada de VIEIRA (2006)

Apesar da simplicidade de construção, operação e manutenção de um hidrociclone, a avaliação e a descrição da separação de sólido-líquido são complexas do ponto de vista matemático. Sendo assim, para a avaliação da eficiência na separação de sólido-líquido, normalmente, são utilizadas formulações empíricas. A eficiência total do hidrociclone é definida pela razão entre a massa total de sólidos coletados no concentrado (*underflow*) e a massa total de sólidos coletados na alimentação, eq. (1), (SVAROVSKY, 2000).

$$ET = \frac{W_{su}}{W_{sa}} \therefore ET = \frac{C_{wu} W_u}{C_{wa} W_a} \quad (1)$$

em que,

ET - eficiência total, adimensional;

W_{su} - vazão mássica de sólidos recuperados no *underflow*, $kg s^{-1}$;

W_{sa} - vazão mássica de sólidos na alimentação, $kg s^{-1}$;

C_{wu} - concentração mássica no “*underflow*”, adimensional;

C_{wa} - concentração mássica na alimentação, adimensional;

W_u - vazão de massa no *underflow*, $kg s^{-1}$; e

W_a - vazão de massa na alimentação, $kg s^{-1}$.

Mailapalli et al. (2007), avaliando um hidrociclone como pré-filtro em irrigação localizada, observaram que a eficiência na separação no equipamento diminuiu com o decorrer do tempo. Os autores concluíram ainda que o equipamento testado mostrou-se ineficiente para remover partículas sólidas, como argila. Em avaliação de um hidrociclone de

geometria “Rietema”, Cruz & Zanini (2010), concluíram que o equipamento foi eficiente na remoção de partículas sólidas, notadamente para água contendo areia, sendo recomendado como pré-filtro em sistemas de irrigação.

A eficiência granulométrica, também conhecida como eficiência individual ou por tamanho, é uma grandeza relacionada ao poder de separação do hidrociclone, frente ao tamanho das partículas injetadas pelo duto de alimentação (SOCCOL et al., 2005). O seu valor representa a eficiência com que partículas de um determinado diâmetro são separadas.

Considerando os tamanhos das partículas existentes na suspensão, a eficiência granulométrica pode ser relacionada com a eficiência total e com a variação dos tamanhos de partículas depois da hidrociclonagem (VIEIRA, 2006). Segundo Rodrigues (2001), as partículas sólidas são de difícil caracterização, devido, principalmente, ao seu formato irregular. Dessa forma, torna-se necessário associar à partícula alguma dimensão característica conhecida, sendo que essas dimensões podem ser os diâmetros característicos de esferas que apresentem mesmo volume, área e velocidade terminal que a partícula.

A análise granulométrica permite classificar um conjunto de partículas baseada na distribuição por tamanhos (CARNEIRO, 1981), podendo ser feita por diversas técnicas experimentais, sendo as mais simples por peneiramento e outras oriundas da evolução da técnica da Pipeta de ANDREASEN (ALLEN, 1997). Cada técnica de medida gera diâmetros distintos, tendo em vista que as propriedades consideradas são também diferentes entre si. Existem ainda técnicas como atenuação de raios gama e difrações a raios *laser*, que permitem efetuar uma análise granulométrica com melhor precisão, entretanto, apresentam maiores custos (VIEIRA, 2006).

A distribuição granulométrica pode ser caracterizada na forma cumulativa, descrita por uma função $X(dp)$, em que X é a fração mássica de partículas com diâmetros inferiores ao do dp (diâmetro característico de cada análise). A função $X(dp)$ é sempre crescente e pode ser ajustada a modelos estatísticos, que normalmente são usados para representar essa distribuição granulométrica (ALLEN, 1997). Segundo o autor, a literatura apresenta vários modelos estatísticos para ajustar os resultados provenientes de uma análise de distribuição granulométrica. Dentre eles mencionam-se os ajustes: Rosin-Rammler-Bennet (RRB), Gates-Gaudim-Shumann (GGS) e Sigmóide. O modelo RRB é caracterizado por possuir dois parâmetros ajustáveis (n , d^*); é uma função simples, que relaciona diretamente o diâmetro da partícula (dp) com a fração mássica de partículas com diâmetros menores que dp , eq. (2).

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{dp}{d^*}\right)^n} \quad (2)$$

em que,

X - fração mássica, adimensional;

dp - diâmetro da partícula, μm ;

n - parâmetro que define a forma da curva de distribuição granulométrica;

d^* - parâmetro que quantifica o diâmetro da partícula para $X = 0,632$;

e - base dos logaritmos naturais.

De forma análoga ao modelo RRB, o ajuste GGS caracteriza-se por possuir dois parâmetros de ajuste (n , d^*), eq. (3).

$$X = \left(\frac{dp}{d^*}\right)^n \quad (3)$$

em que,

d^* - parâmetro que quantifica o diâmetro da partícula para $X = 1,00$.

O ajuste Sigmóide, analogamente aos modelos RRB e GGS, apresenta também dois parâmetros de ajuste (n , d^*), eq. (4).

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{d^*}{dp}\right)^n} \quad (4)$$

em que,

d^* - parâmetro que quantifica o diâmetro da partícula para $X = 0,50$.

Conhecida a distribuição granulométrica do material no fluxo de

alimentação e *underflow*, a eficiência granulométrica pode ser obtida genericamente pela eq. (5).

$$G = \frac{W_{su}dX_u}{W_{sa}dX_a} \therefore ET \frac{dX_u}{dX_a} \quad (5)$$

em que,

G - eficiência granulométrica, adimensional;

$$\frac{dX_u}{dX_a} - \text{derivada da distribuição}$$

granulométrica na corrente do *underflow* e a distribuição granulométrica na corrente de alimentação.

O diâmetro de corte é o diâmetro da partícula que representa o poder de separação do hidrociclone. Quanto menor esse diâmetro mais bem projetado foi o hidrociclone. O diâmetro de corte representa o diâmetro de uma partícula separada com eficiência granulométrica de 50%. Logo, partículas maiores que o diâmetro de corte terão maiores possibilidades de serem separadas com eficiência superior a 50%, enquanto que as menores provavelmente serão separadas com eficiências abaixo desse patamar (RODRIGUES, 2001; VIEIRA, 2006).

Segundo Vieira (2006), para se estudar o desempenho de um hidrociclone, as análises granulométricas das correntes de alimentação e *underflow* devem ser efetuadas para que se obtenha o diâmetro de corte. Este parâmetro é fundamental para o estudo do processo de separação por expressar o poder classificatório do equipamento, sendo utilizado como critério de comparação na avaliação de desempenho entre hidrociclones. Com base na definição de eficiência granulométrica, sabendo-se que $d_{50} = d(G = 0,50)$, o diâmetro de corte (d_{50}) é obtido a partir da resolução numérica da eq. (6).

$$ET \frac{dX_u(d_{50})}{dX_a(d_{50})} = 0,50 \quad (6)$$

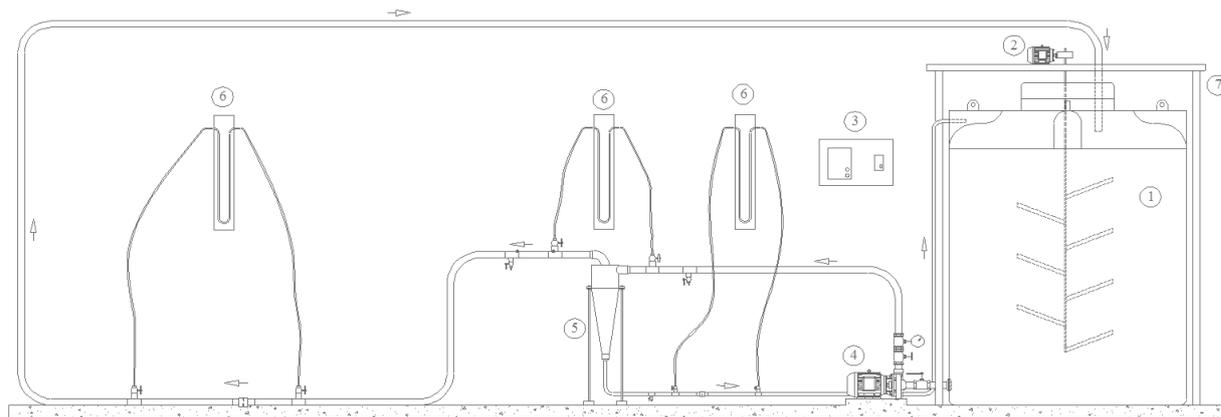
Os hidrociclones apesar de terem seu uso difundido em outras áreas do conhecimento, não têm sido utilizados no Brasil com a mesma frequência que o são em sistemas de irrigação de países como Israel e Estados Unidos. Verificam-se

várias pesquisas no campo da engenharia química, de minas e de alimento, que informam sobre o desempenho dos pré-filtros, denominados de hidrociclone. Entretanto, poucas pesquisas têm sido desenvolvidas acerca da avaliação deste equipamento como dispositivo de separação de partículas sólidas na água de irrigação.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a capacidade de um hidrociclone de geometria “Rietema” em separar partículas sólidas presentes na água de irrigação em diferentes condições operacionais, utilizando-se, como parâmetros de desempenho, a eficiência total e granulométrica e o diâmetro de corte.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Irrigação do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM) Campus Uberaba, no Estado de Minas Gerais. Para a condução dos trabalhos montou-se uma bancada de ensaio (Figura 2), onde foram instalados os seguintes equipamentos: reservatório com capacidade de 5.000 L para a suspensão de água-areia e água-solo; conjunto motobomba, potência 11,25 kW; chave de partida contactora com relê de sobrecarga; manômetro tipo Bourdon, previamente calibrado; registro de gaveta de diâmetro nominal 50 mm; tubos de policloreto de vinila (PVC), diâmetro nominal 50 mm; manômetro diferencial com coluna de mercúrio em “U”; medidores de vazão tipo placa de orifício que foram construídos e previamente calibrados; hidrociclone de geometria “Rietema” com diâmetro do cilindro (D_c) de 19,20 cm, fabricado em aço galvanizado (Figura 3); agitador submersível composto por um motoredutor elétrico com potência de 0,75 kW e um dispositivo tipo hélice interligados, que permaneceu dentro do reservatório, circulando a suspensão, para mantê-la homogeneizada durante todo tempo de avaliação.



LEGENDA			
①	RESERVA TÓRIO		TOMADA DE PRESSÃO
②	AGITADOR		PONTO DE COLETA
③	PAINEL DE COMANDO		MANÔMETRO
④	MOTOBOMBA		REGISTRO DE GAVETA
⑤	HIDROCICLONE		SENTIDO DE FLUXO
⑥	COLUNA DE MERCÚRIO		REGISTRO DE ESFERA
⑦	SUPORTE DE MADEIRA		PLACA DE ORIFÍCIO

Figura 2. Esquema da bancada de testes utilizada na avaliação do hidrociclone.

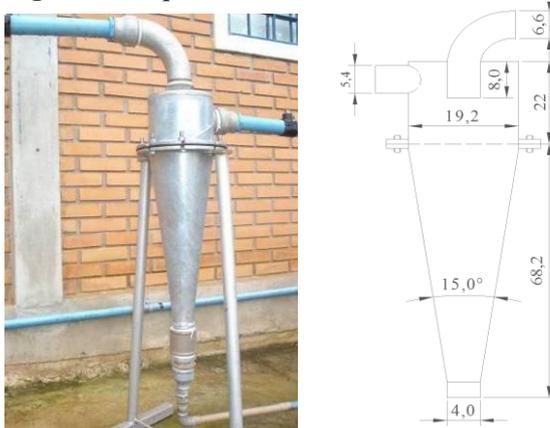


Figura 3. Hidrociclone de geometria “Rietema” com dimensões em centímetros.

A bancada de ensaios foi colocada em operação por meio do acionamento do conjunto motobomba, aproximadamente 30 minutos após acionado o agitador submersível. Por intermédio do comando de um registro de gaveta instalado no recalque da bomba, foi fixada a vazão desejada no hidrociclone, pelo conhecimento prévio das curvas ajustadas (pressão *versus* vazão) nas placas de orifício instaladas nos dutos do *overflow* e *underflow*. A vazão volumétrica de alimentação consistiu na soma das vazões observadas nas placas de orifícios instaladas nos dutos do *overflow* e *underflow*.

Os ensaios foram conduzidos para vazões variando de 10 a 27 m³ h⁻¹,

conforme recomendações do fabricante, e a razão de líquido ajustada para aproximadamente 8%, por meio do comando de um registro de gaveta instalado no duto do *underflow*. Durante o tempo de coleta dos dados de vazão e queda de pressão, tomavam-se amostras da suspensão nos três pontos de coleta (alimentação, *overflow* e *underflow*). Este procedimento foi repetido mais duas vezes, obtendo-se a média de três repetições para cada vazão. A concentração mássica das amostras foi determinada utilizando-se o processo gravimétrico. Conhecendo-se a massa de sólidos e a massa da suspensão nas amostras foi possível determinar a concentração mássica de sólidos nas correntes de alimentação e *underflow*.

A massa específica das suspensões nas devidas correntes foi determinada por meio de um balão volumétrico. A vazão mássica consistiu do produto da vazão volumétrica pela massa específica da suspensão caracterizada nas correntes de alimentação e *underflow*. O experimento ocorreu em duas etapas: na primeira, utilizou-se solo como material particulado e na segunda, areia. Ao final de cada etapa, todo o sistema foi limpo e o reservatório recomposto com água e material em avaliação (solo ou areia). A quantidade de material particulado colocado no reservatório foi de 30 kg, caracterizando uma concentração de 6.000 mg L⁻¹. O solo, de classe textural franco argilo-arenosa (60% de areia, 14% de silte e 26% de argila) foi coletado no IFTM Campus Uberaba e a areia (98% de areia e 2% de argila) proveniente do assoreamento no Rio Lanoso, afluente do Rio Uberaba. As

análises texturais e massas específicas do solo (2.700 kg m⁻³) e da areia (2.670 kg m⁻³) foram determinadas no laboratório da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG).

Para a determinação das distribuições granulométricas do material sólido resultante das determinações das concentrações mássicas nas correntes de alimentação e *underflow* e do material particulado (areia e solo), as amostras foram embaladas e enviadas para o Laboratório de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), onde foram realizadas as referidas análises utilizando-se a técnica de difração a *laser*. O equipamento utilizado possui faixa analítica de 0,04 a 2.500 µm, abrangendo, portanto, todas as frações argila, silte e areia. As distribuições granulométricas dos materiais particulados estão apresentadas na Figura 4.

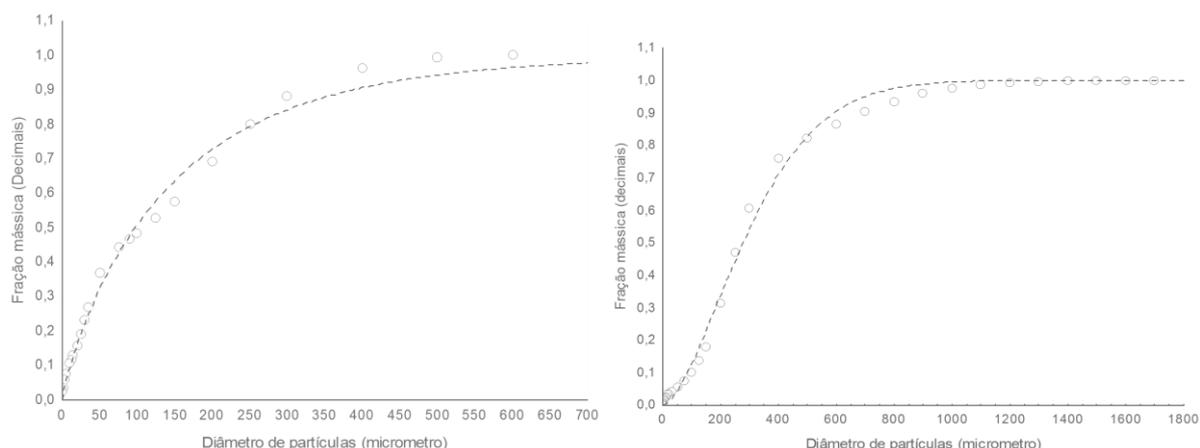


Figura 4. Curvas de distribuição granulométrica do solo e areia, respectivamente, obtidas pela técnica de difração de raios *laser*.

A partir dos dados de distribuição granulométrica do material particulado (solo e areia) e das suspensões nas correntes de alimentação e do *underflow* ajustaram-se as curvas aos modelos estatísticos clássicos de distribuição granulométrica. O modelo que melhor representou os dados experimentais foi o “Rosin-Rammler-Benner” (RRB - eq. (2)). Para esse ajuste, utilizou-se o *software* STATISTICA®, determinando assim os parâmetros (n e d*) de ajuste da equação

citada, contidos nas eq. 7 e 8 para solo e areia, respectivamente.

$$x = 1 - e \left[- \left(\frac{dp}{148,064} \right)^{0,871} \right] \quad R^2 = 0,995 \quad (7)$$

$$X = 1 - e \left[- \left(\frac{dp}{349,774} \right)^{1,587} \right] \quad R^2 = 0,995 \quad (8)$$

De posse das equações das distribuições granulométricas das correntes de alimentação e *underflow*, representadas pelo modelo RRB, foi possível determinar o diâmetro de corte (d₅₀). Os parâmetros “n e d*” da equação RRB foram substituídos por “na” e “da*”, “nu” e “du*”,

respectivamente, para os fluxos nas correntes de alimentação e *underflow*. Desta forma, as equações foram representadas pelas eq. (9) e (10).

$$X_a = 1 - e^{\left[-\left(\frac{dp}{da^*}\right)^{na}\right]} \quad (9)$$

$$X_u = 1 - e^{\left[-\left(\frac{dp}{da^*}\right)^{nu}\right]} \quad (10)$$

em que,

X_a - fração mássica na corrente de alimentação;

X_u - fração mássica na corrente do *underflow*; e

e - base dos logaritmos naturais.

As equações anteriores ajustadas às situações foram derivadas e substituídas na eq. 6, que relaciona a distribuição granulométrica com a eficiência total, resultando na eq. 11, usada para determinar o diâmetro de corte.

$$ET \left[\frac{\left(\frac{dp}{du^*}\right)^{nu} nu e^{\left[-\left(\frac{dp}{du^*}\right)^{nu}\right]}}{\left(\frac{dp}{da^*}\right)^{na} na e^{\left[-\left(\frac{dp}{da^*}\right)^{na}\right]}} \right] = 0,50 \quad (11)$$

A eq. (11) é uma expressão não-linear, cuja solução analítica na variável diâmetro de partícula (dp) é muito complexa. Para resolvê-la de forma numérica, foi necessária a aplicação de uma rotina desenvolvida no *software* MATHCAD®, determinando assim o diâmetro de corte (d_{50}). Conhecendo-se a distribuição granulométrica das correntes do *underflow* e da alimentação no

hidrociclone e utilizando-se da eq. (5), determinou-se a eficiência granulométrica (G) em uma rotina desenvolvida no “*software* MATHCAD®” para as condições operacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela Tabela 2, verifica-se que a eficiência total de remoção do hidrociclone apresentou valores que variaram entre 92,31 a 30,06%, respectivamente, para a variação de vazões entre 26,97 a 12,43 m³ h⁻¹, utilizando suspensão aquosa com areia. Quando foi utilizada suspensão aquosa com solo, verificou-se um decréscimo na eficiência que variou de 54,29 para 19,59%, respectivamente, para as vazões 26,21 a 10,07 m³ h⁻¹. Esta diminuição da eficiência total, quando se compara os ensaios, ocorreu devido a diferenças texturais do material particulado usado. Já o decréscimo da eficiência com a diminuição da vazão é explicado pelo menor efeito centrífugo em função da menor velocidade terminal das partículas sólidas, ou pela ocorrência de menor turbulência no interior do equipamento. Essa baixa eficiência do equipamento em separar partículas sólidas de pequenos diâmetros, como o solo usado da classe textural franco argilo-arenosa, foi observada por Mailapalli et al. (2007).

Tabela 2. Valores de diâmetros de cortes em diferentes condições operacionais para as suspensões aquosas com areia e solo.

Qa (m ³ h ⁻¹)	Dp (kPa)	ET (%)	d ₅₀ (µm)
Suspensão com areia			
26,97	52,75	92,31	54,81
22,78	37,33	74,60	65,04
20,54	30,31	56,75	104,62
18,21	23,15	45,14	116,65
15,88	17,51	36,78	120,68
12,43	10,44	30,06	133,29
Suspensão com solo			
26,21	48,04	54,29	25,77
23,08	37,06	45,12	26,96
19,56	26,40	33,18	33,22
16,67	18,80	23,78	40,09
13,01	10,84	22,48	55,97
10,07	6,18	19,59	-

Qa = Vazão volumétrica na alimentação; Dp = Diferencial de pressão; ET = Eficiência total; d₅₀ = Diâmetro de corte.

Pode-se verificar que o diâmetro de corte aumentou com a diminuição da vazão, conseqüentemente, com a queda de pressão, concordando Vieira (2006). Isso indica que o equipamento apresenta melhores desempenhos como separador e classificador de partículas para maiores quedas de pressão devido às maiores velocidades terminais das partículas provocadas pela sedimentação no campo centrífugo.

Observa-se ainda que não foi possível determinar com segurança o valor do diâmetro de corte quando o hidrociclone operava com suspensão com solo para a vazão $10,07 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, levando a entender que para essa situação todos os diâmetros das partículas apresentam eficiência

granulométrica maior que 50%, com base na definição de diâmetro de corte.

Os diâmetros de corte do hidrociclone ($54,81$ e $25,77 \mu\text{m}$) para as suspensões com areia e solo, indicam que todas as partículas acima dessas granulometrias são separadas da suspensão com eficiência granulométrica de 50% e eficiência total de separação de 92,31 e 54,29% para as vazões de $26,97$ e $26,21 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Os diâmetros de corte para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia foram sempre superiores aos obtidos com suspensões com solo, indicando que o equipamento apresenta melhores eficiências em separar partículas “grosseiras” como a areia.

Tabela 3. Eficiência granulométrica para o hidrociclone operando com suspensão de areia para diferentes vazões e diâmetros de partículas.

dp (μm)	Qa $26,97 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	Qa $22,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	Qa $20,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	Qa $18,21 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	Qa $15,88 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	Qa $12,43 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
	G(%)	G(%)	G(%)	G(%)	G(%)	G(%)
10	26,91	19,71	10,66	5,71	2,45	0,53
20	34,25	27,53	16,59	10,07	5,33	1,62
30	39,70	33,66	21,64	14,28	8,60	3,23
40	44,24	38,93	26,19	18,43	12,22	5,36
50	48,23	43,64	30,42	22,58	16,14	8,00
60	51,83	47,95	34,39	26,73	20,33	11,20
70	55,16	51,94	38,17	30,87	24,77	14,92
80	58,24	55,67	41,77	35,00	29,43	19,17
90	61,15	59,18	45,21	39,13	32,28	23,94
100	63,92	62,51	48,52	43,24	39,28	29,22
110	66,55	65,67	51,71	47,31	44,41	34,97
120	69,06	68,68	54,75	51,35	49,64	41,16
130	71,48	71,55	57,69	55,34	54,95	47,75
140	73,81	74,29	60,53	59,28	60,31	54,68
150	76,05	76,92	63,26	63,15	65,68	61,92
160	78,23	79,44	65,88	66,96	71,06	69,39
170	80,33	81,85	68,42	70,70	76,40	77,02
180	82,37	84,17	70,85	74,35	81,69	84,75
190	84,36	86,39	73,19	77,92	86,91	92,50
200	86,29	88,52	75,44	81,39	92,03	100,00
210	88,17	90,56	77,60	84,77	97,03	-
220	90,00	92,53	79,67	88,04	100,00	-
230	91,78	94,41	81,66	91,21	-	-
240	93,52	96,22	83,56	94,27	-	-
250	95,22	97,96	85,38	97,21	-	-
260	96,88	99,62	87,12	100,00	-	-
270	98,50	100,00	88,78	-	-	-
280	100,00	-	90,36	-	-	-
290	-	-	91,87	-	-	-
300	-	-	93,29	-	-	-
310	-	-	94,65	-	-	-
320	-	-	95,93	-	-	-
330	-	-	97,13	-	-	-
340	-	-	98,27	-	-	-
350	-	-	99,33	-	-	-
360	-	-	100,00	-	-	-

dp = Diâmetro de partículas; Qa = Vazão volumétrica de alimentação; G = Eficiência granulométrica.

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentadas as eficiências granulométricas para vários diâmetros de partículas e vazões avaliadas para o hidrociclone, operando com suspensões de areia e solo. Nota-se que a

areia (partículas de maior diâmetro) propicia maiores eficiências granulométricas quando comparada com o solo na suspensão aquosa.

Tabela 4. Eficiência granulométrica para o hidrociclone operando com suspensão de solo para diferentes vazões e diâmetros de partículas.

dp (µm)	Qa 26,21 m ³ h ⁻¹		Qa 23,08 m ³ h ⁻¹		Qa 19,56 m ³ h ⁻¹		Qa 16,67 m ³ h ⁻¹		Qa 13,01 m ³ h ⁻¹		Qa 10,07 m ³ h ⁻¹	
	G(%)		G(%)		G(%)		G(%)		G(%)		G(%)	
10	14,88	15,80	17,16	9,40	12,44	13,96						
15	24,51	24,75	18,92	15,63	16,33	19,64						
20	35,62	34,76	21,73	22,70	20,39	25,13						
25	48,00	45,60	25,63	30,22	24,63	30,20						
30	61,25	56,88	30,79	37,67	29,02	34,59						
35	74,83	60,03	37,54	44,43	33,47	38,07						
40	88,06	78,42	46,33	49,92	37,88	40,45						
45	100,00	87,38	57,77	53,60	42,09	41,64						
50	-	94,28	72,68	55,18	45,99	41,60						
55	-	98,62	92,16	54,54	49,40	40,44						
60	-	100,00	100,00	51,82	52,21	38,29						
65	-	-	-	47,37	54,28	35,13						
70	-	-	-	41,69	55,53	31,81						
75	-	-	-	35,34	55,91	27,98						
80	-	-	-	28,87	55,39	24,04						
85	-	-	-	22,73	54,02	20,20						
90	-	-	-	17,25	51,86	16,60						
95	-	-	-	12,62	48,99	13,35						
100	-	-	-	8,92	45,56	10,51						
105	-	-	-	6,05	41,70	8,11						
110	-	-	-	3,97	37,57	6,12						
115	-	-	-	2,51	33,32	4,53						
120	-	-	-	1,50	29,08	3,29						

dp = Diâmetro de partículas; Qa = Vazão volumétrica de alimentação; G = Eficiência granulométrica.

Para a eficiência granulométrica de 50%, com o hidrociclone operando com suspensão de areia, os diâmetros aproximados das partículas variaram de 50 a 60 µm para as vazões de 23 a 27 m³ h⁻¹. Observa-se ainda que todas as partículas com diâmetro acima de 270 µm são separadas com eficiência granulométrica de 100% para as vazões mencionadas. Para as menores vazões (15,88 e 12,43 m³ h⁻¹), os diâmetros de partículas classificadas pelo equipamento foram em torno de 120 µm para eficiência granulométrica de 50%, indicando que o hidrociclone operando com maiores vazões, sob maiores quedas de pressão apresentou melhor desempenho em separar partículas de menores diâmetros presentes na suspensão aquosa de areia. Já para a eficiência granulométrica de 50%,

com o hidrociclone operando com suspensão de solo, os diâmetros aproximados das partículas variaram de 25 a 30 µm para as vazões de 23 a 26 m³ h⁻¹. Observa-se que todas as partículas com diâmetro acima de 60 µm são separadas com eficiência granulométrica de 100% para as vazões mencionadas. Para as menores vazões (13,01 e 10,07 m³ h⁻¹), os diâmetros de partículas classificadas pelo equipamento foram em torno de 50 µm para uma eficiência granulométrica de 50%, indicando que o hidrociclone operando com maiores vazões, sob maiores quedas de pressão apresentou melhor desempenho em separar partículas de menores diâmetros presentes na suspensão aquosa de solo.

CONCLUSÕES

Com base nos dados experimentais obtidos conclui-se que:

O desempenho do hidrociclone melhorou com o aumento da vazão no hidrociclone operando com suspensões de areia e solo;

O hidrociclone é eficiente na remoção de partículas sólidas, notadamente para água contendo suspensões de areia, podendo ser utilizado como pré-filtro em sistemas de irrigação.

Os diâmetros de corte para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia foram sempre superiores aos valores obtidos com suspensões com solo, indicando que o equipamento apresenta melhores eficiências em separar partículas de maiores diâmetros, como a areia;

O aumento da vazão contribuiu de forma positiva na redução do diâmetro de corte e do diâmetro de corte reduzido;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, T. **Particle size measurement**. 5. ed. London: Chapman and Hall, 1997. 834p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. 1991. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. 2. ed. Campina Grande: CCT/UFPB, 1999. 218p. (estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

CARNEIRO, A. L. M. **Caracterização de partículas sólidas**. 1981. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CRUZ, O. C. da; ZANINI, J. R. Eficiência de um hidrociclone de geometria “Rietema” para pré-filtragem de água para

irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 637-45, 2010.

MAILAPALLI, D. R.; MARQUES, P.A.A.; THOMAS, K. J. Performance evaluation of hydrocyclone filter for microirrigation. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 373-82, 2007.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**. St Joseph: ASAE, 1986. 383p.

RODRIGUES, M. V. **Análise do desempenho de um ciclone com mangas: efeito da permeabilidade do meio filtrante**. 2001. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOCCOL, O. J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**. 2003. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba.

SOCCOL, O. J.; BOTREL, T. A.; GERVÁSIO, E. S.; ULLMANN, M. N. Avaliação de um hidrociclone de Rietema para remoção de areia da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 464-8, 2005.

SVAROVSKY, L. **Solid-liquid separation**. 2. ed. London: Butterworths, 2000. 568 p.

VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. 2006. 298f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.