

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE DE GEOMETRIA
“RIETEMA” COMO PRÉ-FILTRO PARA SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

Othon Carlos da Cruz
Licenciado em Ciências Agrícolas

**JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2008**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE DE GEOMETRIA
“RIETEMA” COMO PRÉ-FILTRO PARA SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

Othon Carlos da Cruz

Orientador: Prof. Dr. José Renato Zanini

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Novembro de 2008

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

OTHON CARLOS DA CRUZ - nascido em 31 de julho de 1960 na cidade de Campos Gerais - MG. Concluiu o Curso Técnico em Agropecuária em 1979 pela Escola Agrotécnica Federal de Muzambinho - MG. Licenciado em Ciências Agrícolas pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 1983. Especializou-se em Engenharia da Irrigação pela Universidade Federal de Viçosa em 1988. Obteve o título de Mestre em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Federal de Lavras no ano de 1997. Doutorando em Agronomia (Produção Vegetal) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – UNESP – SP. Atua como docente efetivo da área técnica no Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba – MG (CEFET Uberaba) desde 1984 até a presente data. Foi Coordenador de Área de Produção de 1984 a 1993 no CEFET Uberaba. Atuou como Coordenador Geral de Produção e Pesquisa no CEFET Uberaba de 1998 a 2002. Participou como avaliador de Cursos Superiores de Tecnologia pelo Ministério de Educação e Cultura – Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica de 2003 a 2006. Coordenou o Curso Superior de Tecnologia em Irrigação e Drenagem no CEFET Uberaba de 2003 a 2007.

A DEUS, que guiou meus passos para a conquista de mais esta etapa

Aos meus pais, Antonio e Maria, pela dedicação, dignidade e ensinamentos

Aos meus irmãos, Dorotéia, João Carlos e Gilberto, pelo incentivo

OFEREÇO

À minha esposa Marilda

Aos meus filhos, Eddie, Carolinnie e Camillie

Pelo amor, carinho, compreensão, companheirismo e motivação na busca do conhecimento

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que colaboraram para realização deste trabalho, em especial:

À FCAV/UNESP - Jaboticabal, pela oportunidade;

Ao CEFET - Uberaba, pela disponibilidade;

Ao Professor Dr. José Renato Zanini, pela orientação, atenção, paciência e amizade;

Aos Professores da FCAV/UNESP - Jaboticabal, Dr. Luiz Carlos Pavani, Dr. João Antonio Galbiati, Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani, Dr. Newton La Scala Júnior, Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, Dra. Tereza Cristina Tarlé Pissara, Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho e Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, pela amizade, sugestões e ensinamentos proferidos;

Ao Professor Dr. Antonio Sergio Ferraudó, pelas sugestões e colaboração nas análises estatísticas;

Ao Sr. Nelson Gallo, da Empresa Gallo Irrigação e Equipamentos Agrícolas, pela concessão do hidrociclone;

Ao Laboratório de Geologia da UFRN, pelas análises granulométricas;

Aos Professores do CEFET - Uberaba, Dr. Amilton Diniz de Souza, Dr. Antonio Carlos Barreto, Dr. Márcio José de Santana e MSc. Maria Amélia da Silva Campos Souza, pelo apoio e sugestões apresentadas;

Aos alunos do Curso Superior de Tecnologia em Irrigação e Drenagem do CEFET - Uberaba, em especial Érica Inês, pela colaboração na coleta dos dados;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP - Jaboticabal, Mirian e Davi, pela atenção e apoio;

Aos colegas da pós-graduação, Bettini, Gilciléia, Ednan, Adelar, Góis, Nilo e Renatão, pela convivência e alegrias compartilhadas;

Ao Padre Valmir e ao grupo "São José", Adriana e Flávio, Marlene e João, Marlúcia e Éricson, Valéria e Márcio, Márcia e Hercules, pelas orações providenciais;

Aos amigos, Eliane e Barreto, Meire e Geraldo, Lílian e Clarício, Denise e Paulo, Maria Helena e Jéferson, Selma e Amilton, Carmelita e Adelson, Maria José e Luizão, Vandinha, Cátia, Cleide, Marlene, Néia, Coutinho, Paulo Erci, Reinaldo, pela convivência fraterna e construtiva.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e que ficaram no anonimato, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vii
SUMMARY	viii
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
Agricultura irrigada.....	3
Degradação dos mananciais	4
Água para irrigação	5
Pré-filtros em sistemas de irrigação.....	7
Hidrociclones	8
Família de hidrociclones.....	10
Princípio de separação dos hidrociclones	11
Separação sólido-líquido em hidrociclones	12
Eficiência de separação sólido-líquido.....	12
Eficiência total (ET)	12
Eficiência total reduzida (ET').....	13
Material particulado	14
Diâmetro de partículas.....	14
Granulometria das partículas.....	14
Distribuição granulométrica	14
Modelos estatísticos para ajustes de distribuição granulométrica.....	15
Ajuste de “Rosin-Rammler-Bennet” (RRB).....	15
Ajuste de “Gates-Gaudim-Shumann” (GGS).....	15
Ajuste Sigmóide.....	16
Eficiência granulométrica (G).....	16
Eficiência granulométrica reduzida (G')	17
Diâmetro de corte (d_{50})	17
Diâmetro de corte reduzido (d'_{50}).....	18

Grupos adimensionais	18
Perda de carga	20
Perda de carga em hidrociclones	21
Alguns trabalhos relevantes em avaliação de hidrociclones.....	22
III. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
Caracterização do Hidrociclone	24
Testes preliminares	25
Bancada experimental	27
Material particulado	28
Procedimento experimental	30
Obtenção das variáveis utilizadas na avaliação do hidrociclone	31
Vazão volumétrica (Q).....	31
Densidade absoluta ou massa específica (ρ).....	32
Temperatura	33
Vazão mássica (W)	33
Concentração mássica (C_w)	34
Concentração volumétrica (C_v).....	36
Desempenho do hidrociclone	36
Distribuições granulométricas.....	36
Diâmetro de corte (d_{50})	37
Diâmetro de corte reduzido (d'_{50}).....	38
Eficiência granulométrica.....	39
Perda de carga no hidrociclone	39
Grupos adimensionais relevantes	40
Teste com hidrociclone operando com Razão de Líquido a 4%.....	41
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
Testes preliminares	42
Desempenho do hidrociclone	43
Eficiência Total e Reduzida (ET e ET').....	43
Diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido (d_{50} e d'_{50})	44

Eficiência granulométrica (G e G').....	46
Grupos adimensionais	48
Perda de carga	49
Comparação do desempenho do hidrociclone operando com Razão de Líquido (RL) a 8% e 4%	50
V. CONCLUSÕES.....	52
VI. REFERÊNCIAS	53
APÊNDICES.....	60

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1. Esquema típico de um hidrociclone.	9
FIGURA 2. Trajetória do fluido no interior de um hidrociclone.	11
FIGURA 3. Hidrociclone construído pela Empresa GALLO Irrigação e Equipamentos Agrícolas.....	24
FIGURA 4. Características construtivas e dimensões internas (cm) do hidrociclone avaliado.	25
FIGURA 5. Vista geral de instalação do experimento.	27
FIGURA 6. Esquema da bancada do experimento com o hidrociclone de geometria “Rietema”.....	28
FIGURA 7. Coleta e preparo da areia recolhida em assoreamento no Rio Lanoso - Uberaba - MG.....	29
FIGURA 9. Curva de distribuição granulométrica do solo obtida pela técnica de difração de raios “laser”.	29
FIGURA 8. Curva de distribuição granulométrica da areia obtida pela técnica de difração de raios “laser”.	30
FIGURA 10. Medidores de vazão (placa de orifício) instalados nos dutos do overflow” e “underflow”.	32
FIGURA 11. Determinação das densidades absolutas das suspensões aquosas com solo e areia.....	32
FIGURA 12. Determinação da temperatura no momento de coleta das suspensões. ...	33
FIGURA 13. Momento da coleta das suspensões nas correntes de alimentação (A), “underflow” (B) e “overflow” (C).....	34
FIGURA 14. Determinação da concentração mássica pelo método gravimétrico.	35
FIGURA 15. Analisador granulométrico, marca CILAS, Modelo 1180 LD.....	37
FIGURA 16. Momento de leitura das pressões nas correntes de alimentação e “overflow” e coluna de mercúrio em “U”.....	40

- FIGURA 17. Variação da eficiência total do hidrociclone operando a $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com suspensão de areia no decorrer do tempo, com reservatório de acúmulo. 42
- FIGURA 18. Variação da perda de carga em função da vazão de alimentação no hidrociclone operando com água e com suspensões de areia e solo..... 50
- FIGURA 19. Variação da eficiência total do hidrociclone operando com RL 8% e 4% e suspensão de areia para diferentes vazões. 51

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1. Proporções geométricas de “famílias” de hidrociclones.	10
TABELA 2. Diâmetro de hidrociclones para diferentes diâmetros de partículas.	10
TABELA 3. Valores médios de eficiência total e eficiência total reduzida para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia e de solo.	44
TABELA 4. Valores de diâmetros de cortes em diferentes condições operacionais para as suspensões aquosas com areia e solo.	45
TABELA 5. Eficiência granulométrica para o hidrociclone operando com suspensão de areia para diferentes vazões e diâmetros de partículas.	46
TABELA 6. Eficiência granulométrica para o hidrociclone operando com suspensão de solo para diferentes vazões e diâmetros de partículas.	47
TABELA 7. Valores médios de números de Reynolds (Rey), Euler (Eu) e Stokes·Euler ($Stk_{50} \cdot Eu$) para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia e de solo.	48
TABELA 8. Equações da perda de carga em função da vazão de alimentação para o hidrociclone operando com água limpa, suspensões aquosas com solo e solo.	49
TABELA 9. Equações de eficiência total em função da vazão de alimentação para o hidrociclone operando razão de líquido a 8% e 4%.	51

DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE DE GEOMETRIA “RIETEMA” COMO PRÉ-FILTRO PARA SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO: Os hidrociclones são equipamentos amplamente utilizados pela indústria em processos envolvendo separação sólido-líquido, porém, ainda, pouco divulgados na agricultura irrigada brasileira. Buscou-se neste trabalho determinar a perda de carga e avaliar o desempenho de um hidrociclone de geometria “Rietema” como pré-filtro de partículas sólidas. Os testes foram realizados no Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba - MG - Brasil utilizando um hidrociclone de geometria “Rietema”. Este equipamento possui um diâmetro de 19,20 cm na parte cilíndrica e opera com vazões variando entre $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Os materiais particulados usados em suspensão foram: solo franco-argiloso e areia de rio. Os resultados mostraram que a perda de carga máxima média foi de 52 kPa e 47 kPa para as suspensões aquosas de areia e solo, respectivamente. Seu melhor desempenho ocorreu operando com suspensão aquosa de areia, apresentando eficiência total de 92,31% para a vazão de $26,97 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Dentre as conclusões pode-se inferir que o equipamento avaliado é eficiente para remoção de partículas de areia, podendo ser utilizado como pré-filtro em sistemas de irrigação.

Palavras-chave: irrigação, pré-filtro, separação sólido-líquido

PERFORMANCE OF A HYDROCYCLONE OF "RIETEMA" GEOMETRY AS PRE-FILTER FOR IRRIGATION SYSTEMS

SUMMARY: The hydrocyclones are equipments widely used by industry in cases involving solid-liquid separation, but still, little reported in brazilian irrigated agriculture. The proposal of this research was to determining the head loss and evaluate the performance of a hydrocyclone of geometry "Rietema" as a pre-filter of solid particles. The tests were performed in the Centro Federal de Educação Tenológica de Uberaba - MG - Brazil using a hydrocyclone of Rietema geometry. This equipment has a diameter of 19.20 cm at the cylindrical part and operates with flows ranging between $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ and $27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. The materials used in particulate suspension were: clay loam soil and sand from river. The results showed that the average maximum head loss was 52 kPa and 47 kPa of aqueous suspensions of sand and soil, respectively. Its best performance occurred operating with slurry of sand, presenting total efficiency of 92.31% for flow rate of $26.97 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Among the conclusions can be inferred that the equipment is judged effective at removing particles of sand and can be used as pre-filter in irrigation systems.

Keywords: irrigation, pre-filter, solid-liquid separation

I. 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 pela falta de uso de práticas conservacionistas, resultando na desagregação e transporte de partículas de solo para os mananciais causando assoreamento e deterioração da qualidade da água, reduzindo os potenciais quantitativo e qualitativo para uso na irrigação. 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.

Em situações onde as águas superficiais não oferecem quantidade e qualidade satisfatória ao uso na agricultura irrigada, opta-se pela prospecção e captação de águas subterrâneas, através da perfuração de poços. A qualidade das águas subterrâneas é dada, a princípio, pela dissolução dos minerais presentes nas rochas que constituem os aquíferos por ela percolados. Entretanto, ela pode sofrer alterações em função de outros fatores como: composição da água de recarga, contato água/meio físico, ações antropogênicas, dentre outros. Neste contexto, em determinadas situações e regiões, onde o uso das águas dos aquíferos é intenso e de forma desordenada, aliado a outros aspectos como o rompimento das camadas de arenito e insuficiência no revestimento das perfurações, tem-se verificado a subsidência dos solos (afundamentos), provocando grandes concentrações de areia nas águas bombeadas para irrigação, comprometendo a qualidade para esse fim.

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, por sólidos suspensos e por sólidos solúveis, sobretudo em sistemas de irrigação localizada, em que os orifícios de passagem são de pequenos diâmetros. Vale ressaltar ainda o efeito abrasivo causado por esses constituintes. 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. Contudo, diferentes tipos de filtros podem ser utilizados para minimizar o problema decorrente da presença de sólidos em suspensão na água de irrigação, sendo os sistemas de filtragem compostos por filtros de areia, de tela ou de discos.

Nas situações em que a água apresenta alta quantidade de sólidos, torna-se necessária a utilização de estruturas e/ou equipamentos a montante do sistema de filtragem. Dentre os equipamentos são mencionados os hidrociclones. Os hidrociclones são equipamentos que não possuem partes móveis e consistem de uma seção cônica ligada a uma parte cilíndrica a qual possui um duto de alimentação ajustado para a entrada do fluxo de forma tangencial. A parte cilíndrica é fechada e dotada de um duto de saída da corrente superior denominado “overflow”. No final da seção cônica tem-se uma abertura para a descarga da corrente inferior denominada de “underflow”. O princípio de separação do equipamento baseia-se no efeito centrífugo gerado pelo movimento tangencial da suspensão no interior do hidrociclone.

Patenteados e conhecidos desde o final do século XIX, os hidrociclones têm sua aplicabilidade pouco difundida na agricultura irrigada. São bastante empregados na extração e processamento mineral, bem como, nos setores industriais tais como: têxtil, alimentício, químico, petroquímico, metalúrgico, dentre outros.

Na agricultura irrigada brasileira, tem-se verificado pouco conhecimento dos técnicos da área de irrigação sobre o potencial do hidrociclone como separador de sólido-líquido, aliado às pouquíssimas informações científicas relevantes ao estudo de desempenho do equipamento como pré-filtro em sistemas de irrigação.

Considerando os aspectos citados, este trabalho teve como objetivos:

- determinar a perda de carga ocasionada por um hidrociclone de geometria “Rietema”;
- avaliar a eficiência do hidrociclone em separar e classificar partículas sólidas presentes na água de irrigação em diferentes condições operacionais;
- determinar os números adimensionais relevantes que descrevem o comportamento do equipamento.

II. REVISÃO DE LITERATURA

Agricultura irrigada

A agricultura, em geral, buscou grandes progressos ao longo das últimas décadas. A antiga idéia de confronto entre a agricultura de sequeiro e a agricultura irrigada, vem cedendo espaço, pouco a pouco, ao reconhecimento da existência de uma agricultura em que a irrigação se insere de forma integrada aos diversos processos de produção. A agricultura irrigada tem se tornado, nos últimos anos, uma das atividades econômicas mais importantes no Brasil. A prática de irrigar permite compensar os efeitos negativos da má distribuição espacial e temporal da precipitação. Segundo CHRISTOFIDIS (2002), essa atividade utilizada na produção de alimentos tem sido considerada como a maior consumidora de água entre os diversos usos desse recurso natural, em torno de 68,3%. No Brasil, em particular, a área irrigada corresponde a aproximadamente 6% (3,71 milhões de hectares) da área total cultivada. Entretanto, esse número é modesto, uma vez que o país dispõe de 29,63 milhões de hectares irrigáveis.

Durante muitos anos, a maior preocupação da agricultura irrigada no Brasil estava ligada à disponibilidade de água para a irrigação, ou seja, com a quantidade desse recurso. Com o advento de novas tecnologias e sistemas de irrigação, em especial os de irrigação localizada, a qualidade da água passou a ser, em muitas regiões do País, o fator limitante para a implantação de novos projetos de irrigação (BERNARDO et al. 2005).

A agricultura irrigada depende tanto da quantidade como da qualidade da água, no entanto, o aspecto qualidade tem sido desprezado devido ao fato de que, no passado, em geral, as fontes de água eram abundantes, de boa qualidade e de fácil utilização. Essa situação, todavia, tem-se alterado em muitos lugares. Para evitar problemas conseqüentes, deve-se fazer um planejamento efetivo que assegure o melhor uso possível das águas, levando em conta sua qualidade (KRAUSE & RODRIGUES, 1998).

Degradação dos mananciais

Na agricultura convencional, a ação contínua do homem com práticas agrícolas intensivas, manejos inadequados dos solos, resulta na maioria das vezes, em degradação das microbacias, caracterizadas principalmente pelo assoreamento e a deterioração da qualidade da água dos mananciais, reduzindo seu potencial quantitativo e qualitativo de uso para a irrigação (TUCCI 2002). Cultivos intensivos, desconsiderando os princípios de conservação do solo e da água, pastagens degradadas aliadas à reduzida preservação das matas ciliares (ao longo dos cursos d' água), têm ocasionado sérios problemas de erosão e assoreamento. As conseqüências desse manejo "não sustentável" podem acarretar, dentre outros problemas, redução na disponibilidade e qualidade de água. Outro agravante, decorrente principalmente das áreas urbanas são as presenças de estações de tratamento de esgoto, que despejam seus efluentes nos leitos dos rios, comprometendo, além da vida aquática, a qualidade da água utilizada para a irrigação. TUCCI (2002) relata ainda que em áreas urbanas, a impermeabilização do solo (asfaltamento) provoca lavagem das superfícies aumentando a vazão (velocidade do escoamento) dos resíduos sólidos, o que pode ocasionar diminuição da qualidade física da água ao longo dos cursos d' água.

Segundo ICOLD (1989), citado por CARVALHO et al. (2000), os principais fatores que afetam a produção de sedimentos em uma área de drenagem são: a precipitação (quantidade, duração e freqüência), tipo de solo e formação geológica, cobertura do solo, uso do solo, topografia, natureza da rede de drenagem, escoamento superficial, características dos sedimentos e hidráulica dos canais.

Nas bacias hidrográficas, paralelamente ao ciclo hidrológico, ocorre o ciclo hidrossedimentológico, que é dependente desse, pois envolve os processos de deslocamento, transporte e depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia (TUCCI, 2002). O referido ciclo é um processo que ocorre naturalmente ao longo do tempo, podendo, no entanto, ser acelerado em conseqüência da ação antrópica, aumentando a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica.

Para CARVALHO et al. (2000) o aumento da concentração de sólidos e da descarga nos mananciais, pode provocar assoreamento, modificando ou deteriorando a qualidade da água, a fauna e a flora, diminuindo a disponibilidade hídrica.

O processo de assoreamento numa bacia hidrográfica encontra-se intimamente relacionado aos processos erosivos, uma vez que esses fornecem os materiais que darão origem ao primeiro. Quando não há energia suficiente para transportar o material erodido, esse material é depositado (GUERRA, 1995). O autor relata ainda que a erosão ocorra em duas fases: uma constituída pela remoção de partículas e outra pelo transporte desse material.

CARVALHO et al. (2002) ressaltam que a degradação dos solos pode ser considerada como o mais importante problema ambiental. Dentre os tipos de degradação, a erosão hídrica é considerada a que mais tem afetado a capacidade produtiva dos solos, facilitada e acelerada pelo homem com suas práticas inadequadas de manejo agrícola.

Água para irrigação

A água é um recurso natural finito ou bem econômico por ser vulnerável é essencial para a conservação da vida e do meio ambiente. Além disso, sua escassez pode impedir o desenvolvimento social e econômico, visto que alterações adversas desse recurso podem contribuir para a degradação da qualidade ambiental (FERREIRA & CUNHA, 2005). Ela encontra-se cada vez mais limitada e em alguns casos indisponível devido às ações impactantes do homem nas bacias hidrográficas, degradando a sua qualidade e prejudicando os ecossistemas. Para a irrigação, a deterioração da qualidade de água pode resultar em problemas, tais como: comprometimento ou aumento dos custos de operacionalização de sistemas de irrigação, inviabilização da adoção de culturas irrigadas em que o uso da água possa implicar em contaminação dos alimentos e risco à saúde humana e animal, além do risco de tornar o solo improdutivo.

Em circunstâncias em que as águas superficiais não oferecem volume e qualidade satisfatória devido ao uso intensivo, opta-se pela prospecção e captação de

águas subterrâneas, através da perfuração de poços. Desta forma, as águas dos aquíferos vão se esvaindo a ponto de provocar afundamentos do solo em algumas regiões (THAME, 2000). O autor afirma ainda que em determinados casos, tem-se verificado uma grande concentração de sólidos grosseiros (areia) nas águas utilizadas para fins de irrigação, o que tem comprometido a eficiência dos sistemas, principalmente, no que se refere à obstrução dos emissores.

A avaliação da qualidade da água para irrigação baseia-se na determinação da quantidade, natureza e dimensões do material sólido em suspensão e na concentração do material dissolvido (AYERS & WESTCOT, 1999). O material sólido em suspensão é constituído por componentes minerais e orgânicos, podendo atingir concentrações que restrinjam a utilização direta da água em sistemas de irrigação, sem ser submetida, preliminarmente a algum tipo de tratamento físico ou químico adequado.

A qualidade natural da água é entendida como o conjunto de características físicas, químicas e biológicas que apresenta a água em seu estado natural nos rios, lagos, mananciais, no subsolo ou no mar. Entretanto, na avaliação para fins de irrigação, os parâmetros que normalmente são analisados devem ser os físico-químicos (CONEZA, 1997).

Os sólidos presentes na água, segundo VON SPERLING (1996), podem ser classificados de acordo com o seu estado e tamanho (em suspensão ou dissolvidos), com as características químicas (voláteis e fixos) e decantabilidade (sedimentáveis e não-sedimentáveis). Em relação ao tamanho, os sólidos se dividem em: sólidos dissolvidos (sais e matéria orgânica, com diâmetro inferior a 10^{-3} μm), coloidais (argilas, vírus e algumas bactérias, com diâmetro entre 10^{-3} e 10 μm) e suspensos (areias, siltes, microorganismos e restos de pequenos animais e vegetais, com diâmetro superior a 10 μm). Os sólidos sedimentáveis correspondem à fração dos sólidos que se sedimentam após uma hora de repouso; os voláteis correspondem à fração que se volatilizam a temperaturas elevadas (550 $^{\circ}\text{C}$) e os suspensos, em altas concentrações, se constituem em um problema de qualidade de água para a irrigação, pois podem ocasionar obstrução física em sistemas de irrigação localizada. Segundo NAKAYAMA & BUCKS (1986), esse problema ainda pode ser agravado pela presença de

microrganismos que combinados com partículas em suspensão, podem ocasionar entupimento, considerado não controlável pelos sistemas de filtragem.

A quantidade de sólidos que passa pela seção transversal de um curso d'água em um intervalo de tempo é composta por: descarga sólida em suspensão (sólidos dissolvidos e/ou de pequena granulometria que são transportados em suspensão na água) e a descarga sólida do leito (partículas de maior granulometria que são transportadas por arraste ou saltitação no leito do curso d'água) (VANZELA, 2004).

Um dos principais problemas de qualidade de 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, 1986). Para os autores, se a água apresentar valores acima de 50 mg L^{-1} de sólidos suspensos e 500 mg L^{-1} de sólidos dissolvidos, já pode ocorrer danos moderados, por entupimento de emissores, em sistemas de irrigação localizada.

Pré-filtros em sistemas de irrigação

Quando a água contém uma grande concentração de sólidos suspensos, de forma a apresentar risco severo de entupimento aos emissores, deve-se optar pela instalação de um pré-filtro (CABELLO, 1996). Os pré-filtros normalmente utilizados em sistemas de irrigação são os decantadores ou bacias de sedimentação e hidrociclones. Os decantadores caracterizam-se pela separação sólido-líquido por meio de forças gravitacionais que possibilitam a remoção dos sólidos em suspensão. Os hidrociclones utilizam da sedimentação centrífuga como princípio de separação, em que as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca sua separação do fluido (SOUZA et al., 2000).

Segundo CABELLO (1996), os pré-filtros apresentam grande potencial em separar partículas mais densas que a água. O autor relata que quando a água transporta alta concentração de sólidos em suspensão, pode ser útil a instalação de pré-filtros antes do cabeçal de controle. Dentre os pré-filtros, o autor recomenda o uso de hidrociclones para este fim.

A remoção de partículas suspensas na água garante maior vida útil aos equipamentos de irrigação e melhor desempenho do sistema, constituindo-se, uma estratégia fundamental para a redução dos custos de manutenção.

Para BERNARDO et al. (2005), os emissores utilizados em irrigação localizada são passíveis de ocorrer obstrução total ou parcial dos orifícios pela ação de agentes físicos, químicos e biológicos presentes na água, devido ao pequeno diâmetro dos mesmos.

O material suspenso na água pode também promover o entupimento de tubulações e danificar, por abrasão, diversos componentes do sistema de irrigação, como rotores de bombas, bocais de aspersores, dispositivos para controle de vazão e pressão e engate de tubulações (SOCCOL, 2003). Segundo o autor, além dos danos mencionados, pode ainda ocorrer a deposição desses materiais no interior das tubulações.

Dessa forma, não só a irrigação localizada, como também os sistemas de irrigação por aspersão estão sujeitos aos riscos potenciais do uso de água de má qualidade e em situações que o aspecto físico é o inconveniente, deve-se adotar o uso de pré-filtros.

Hidrociclones

Os hidrociclones, também conhecidos pelos nomes de ciclone hidráulico, ciclone de líquido, cones de separação e separadores centrífugos, constituem uma classe importante de equipamentos destinados principalmente à separação de suspensões sólido-líquido (SILVA, 1989; CASTILHO & MEDRONHO, 2000; SOUZA et al., 2000). Todavia, eles também têm sido usados para a separação de sólido-sólido (KLIMA & KIM, 1998), líquido-líquido (SMYTH & THEW, 1996) e gás-líquido (MARTI, 1996).

SILVA (1989) destaca que o primeiro hidrociclone foi patenteado em 1891, no entanto, sua utilização industrial só teve início após a 2ª Guerra Mundial, nas indústrias de extração e processamento de minérios. Desde então, vêm sendo usados de maneira diversificada nas indústrias química, metalúrgica, têxtil, petroquímica, alimento, bioengenharia, dentre outras (SILVA, 1989; DAI et al., 1999; CHU et al., 2002).

SVAROVSKY (2000) relata que o hidrociclone compõe-se de uma parte cônica ligada a uma cilíndrica, na qual existe uma entrada tangencial para a suspensão de alimentação (Duto de alimentação). A parte superior do hidrociclone apresenta um tubo para saída da suspensão diluída (Duto do "overflow") e na parte inferior há um orifício de saída da suspensão concentrada (Duto do "underflow") (Figura 1).

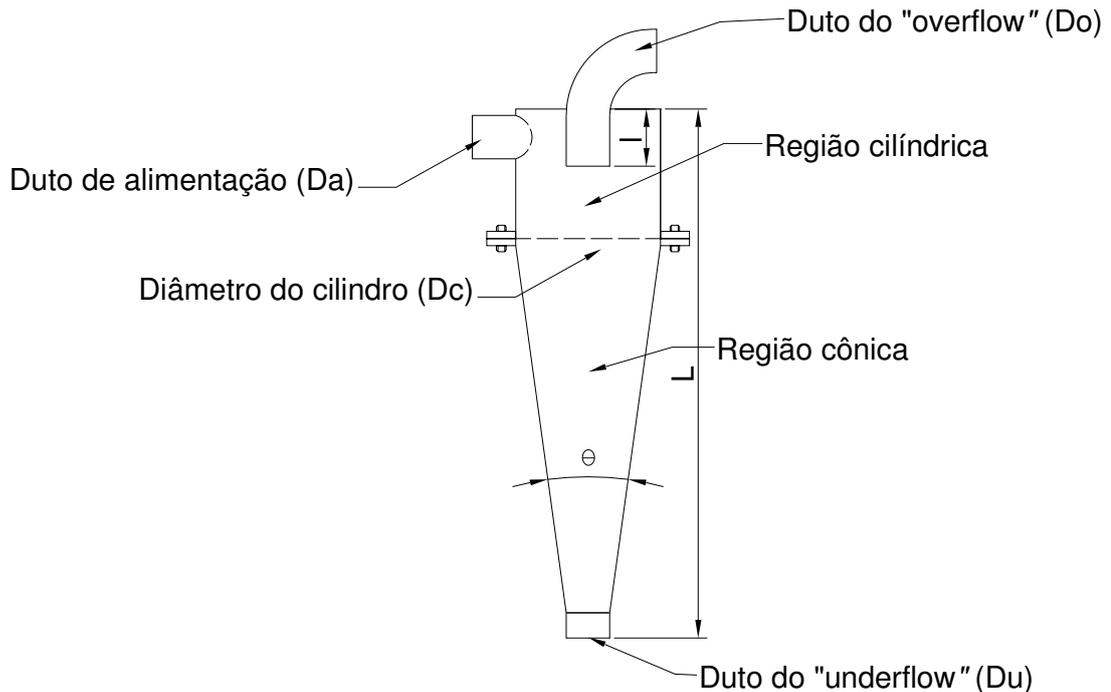


FIGURA 1. Esquema típico de um hidrociclone.

SVAROVSKY (2000) relata que os hidrociclones apresentam normalmente diâmetros da parte cilíndrica variando de 1 a 250 cm, operando com vazões de alimentação que variam de 0,1 a 7.200 m³ h⁻¹ e queda de pressão de 30 a 600 kPa.

SOCOL (2003) comenta que apesar de terem seu uso difundido em outras áreas do conhecimento, os hidrociclones não têm sido utilizados no Brasil com a mesma frequência que o são em sistemas de irrigação de países como Israel e Estados Unidos.

Família de hidrociclones

Os hidrociclones são agrupados em famílias. Uma família de hidrociclone consiste de um conjunto específico de separadores que mantêm entre si uma proporção constante e exclusiva de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da parte cilíndrica (D_c) (VIEIRA, 2006). Essa proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é importante no processo de separação, pois está diretamente relacionada com a capacidade de separação destes equipamentos. Dentre as famílias clássicas podem ser citadas: “Rietema”, “Bradley”, “Krebs”, “Demco”, “Mosley”, “Akw”, dentre outros. As principais relações geométricas referentes a essas famílias de hidrociclones são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Proporções geométricas de “famílias” de hidrociclones.

Hidrociclone	D_a/D_c	D_o/D_c	I/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°
DEMCO I	0,217	0,500	1,000	4,700	25,0°
DEMCO II	0,244	0,313	0,833	3,900	20,0°
KREBS	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
MOSLEY I	0,154	0,214	0,571	7,430	6,0°
MOSLEY II	0,160	0,250	0,571	7,710	6,0°
AKW	0,200	0,320	0,800	6,240	15,0°

D_c = Diâmetro da região cilíndrica; D_a = Diâmetro do duto de alimentação; D_o = Diâmetro do duto do “overflow”; I = Comprimento do duto do “overflow” no interior do equipamento; L = Comprimento total do hidrociclone; θ = Ângulo da região cônica.

Fonte: Adaptada de VIEIRA (2006)

Segundo LOPES (1998), o diâmetro da parte cilíndrica (D_c) de um hidrociclone é definido em função do diâmetro das partículas que se pretende separar. O autor apresenta na Tabela 2, sugestões de diâmetro de hidrociclones para diferentes diâmetros de partículas.

TABELA 2. Diâmetro de hidrociclones para diferentes diâmetros de partículas.

Diâmetro do hidrociclone (D_c) (cm)	Diâmetro de partículas (μm)
0,63 - 1,27	2 - 10
1,27 - 10,16	10 - 20
10,16 - 30,48	20 - 60
40,64 - 76,20	60 - 70

Fonte: LOPES (1998)

Princípio de separação dos hidrociclones

Os hidrociclones utilizam a sedimentação centrífuga como princípio de separação, em que as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca sua separação do fluido. A suspensão no duto de alimentação, dotada de energia de pressão, é injetada tangencialmente no topo da parte cilíndrica do hidrociclone, induzindo a suspensão a realizar ao longo da trajetória um movimento rotacional. Esse movimento em seu percurso gera acelerações centrífugas diretamente atuantes nas partículas presentes no meio, forçando-as a moverem-se em direção à parede do equipamento. Na medida em que o líquido adentra a parte cônica do hidrociclone, maiores são as velocidades da suspensão. A seção disponível vai se reduzindo em direção ao orifício do “underflow”, que é relativamente pequeno, o que permite apenas parte da suspensão inicialmente alimentada no hidrociclone seja descarregada. Sendo assim, a parcela que não é descarregada no “underflow” migra para o centro do eixo do equipamento, formando um vórtice interno ascendente com movimento rotacional inverso àquele criado pelo primeiro vórtice, como pode ser observado na Figura 2 (RIETEMA, 1961; SILVA, 1989). A maior parte da suspensão de alimentação deixa o hidrociclone através do tubo de diluído (“overflow”).

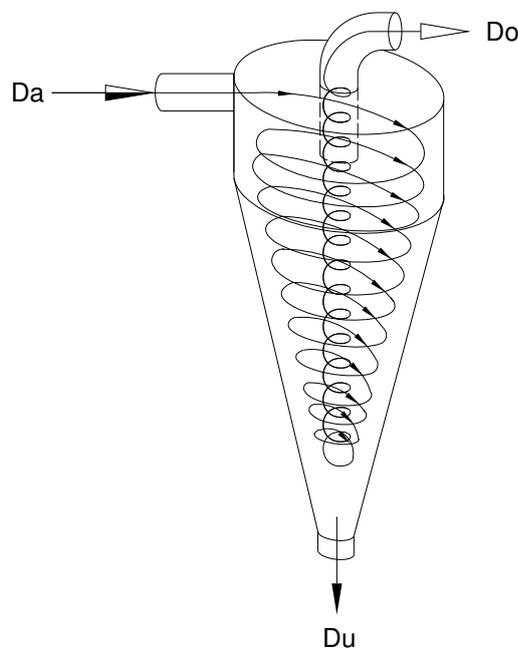


FIGURA 2. Trajetória do fluido no interior de um hidrociclone.

Separação sólido-líquido em hidrociclones

VIEIRA (2006) afirma que 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. Já para descrição do equipamento ressalta-se a relevância que os grupos adimensionais desempenham no processo de separação.

Eficiência de separação sólido-líquido

A eficiência de separação de partículas em um hidrociclone depende da geometria do mesmo, das propriedades físicas do sólido e do fluido e das condições de operação (SILVA & MEDRONHO 1988). Segundo os autores, as principais variáveis associadas ao estudo do desempenho dos hidrociclones são: a eficiência total (ET) e a eficiência total reduzida (ET').

Eficiência total (ET)

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, sendo calculada pela Equação 1 (SVAROVSKY, 2000).

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

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} .

Segundo SILVA (1989), no hidrociclone, parte da massa sólida não é separada devido à ação centrífuga, pois o equipamento também age como um divisor do escoamento, tal como uma conexão “T” em tubulações, ou seja, a corrente inicialmente alimentada dá origem às outras correntes: do “underflow” e do “overflow”. A esse fenômeno dá-se a denominação de “efeito T”, correlacionando-o diretamente com a razão de líquido (RL). A razão de líquido relaciona a vazão volumétrica do fluido que sai na corrente do “underflow” e a que entra na corrente de alimentação, conforme mostra a Equação 2.

$$RL = \frac{Q_u(1 - C_{vu})}{Q_a(1 - C_{va})} \quad (2)$$

em que,

RL - razão de líquido, adimensional;

Q_u - vazão volumétrica no “underflow”, $L s^{-1}$;

Q_a - vazão volumétrica na alimentação, $L s^{-1}$;

C_{vu} - concentração volumétrica no “underflow”, adimensional; e

C_{va} - concentração volumétrica na alimentação, adimensional.

Eficiência total reduzida (ET')

Enquanto a eficiência total considera todas as partículas coletadas no “underflow”, independentemente do que os levou a serem separadas, a eficiência total reduzida admite apenas aquelas coletadas no “underflow” pelo efeito do campo centrífugo. Desta forma, a influência da divisão de fluxo (efeito T) deve ser desconsiderada e subtraída da eficiência total (ET). Para quantificação deste parâmetro utiliza-se a Equação 3 (SVAROVSKY, 2000).

$$ET' = \frac{ET - RL}{1 - RL} \quad (3)$$

em que,

ET' - eficiência total reduzida, adimensional;

ET - eficiência total; e

RL - razão de líquido.

Material particulado

Diâmetro de partículas

RODRIGUES (2001) diz que 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 mesmos volumes, área e velocidade terminal que a partícula. Assim, partículas de diferentes formatos podem ser expressas em termos de uma única dimensão.

Granulometria das partículas

A análise granulométrica permite classificar um conjunto de partículas baseada na distribuição por tamanhos (CARNEIRO, 1981). As análises granulométricas podem ser feitas por diversas técnicas experimentais sendo as mais simples por peneiramento e outras oriundas da evolução da técnica da Pipeta de ANDREASEN (ALLEN, 1997), as quais se baseiam na sedimentação gravitacional, como é o caso dos ensaios em proveta LADEQ (SILVA & MEDRONHO, 1986). 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).

Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica pode ser caracterizada na forma cumulativa, descrita por uma função $X(d_p)$, em que X é a fração mássica de partículas com diâmetros inferiores ao do d_p (diâmetro característico de cada análise). A função $X(d_p)$ é sempre

crescente e pode ser ajustada a modelos estatísticos, que normalmente são usados para representar essa distribuição granulométrica (ALLEN, 1997).

Modelos estatísticos para ajustes de distribuição granulométrica

Segundo ALLEN (1997), a literatura apresenta vários modelos estatísticos para ajustar os resultados provenientes de uma análise de distribuição granulométrica. Dentre eles o autor menciona os ajustes: Rosin-Rammler-Bennet (RRB), Gates-Gaudim-Shumann (GGS) e Sigmóide.

Ajuste de “Rosin-Rammler-Bennet” (RRB)

O modelo RRB é caracterizado por possuir dois parâmetros ajustáveis (n , d^*). É uma função simples que relaciona diretamente o diâmetro da partícula (d_p) com a fração mássica de partículas com diâmetros menores que d_p , conforme mostra a Equação 4.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{d_p}{d^*}\right)^n} \quad (4)$$

em que,

X - fração mássica, adimensional;

d_p - 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.

Ajuste de “Gates-Gaudim-Shumann” (GGS)

De forma análoga ao modelo RRB, o ajuste GGS caracteriza-se por possuir dois parâmetros de ajuste (n , d^*), conforme mostra a Equação 5.

$$X = \left(\frac{dp}{d^*} \right)^n \quad (5)$$

em que,

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

Ajuste Sigmóide

Analogamente aos modelos RRB e GGS, este apresenta também dois parâmetros de ajuste (n , d^*), como mostra a Equação 6.

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{d^*}{dp} \right)^n} \quad (6)$$

em que,

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

Eficiência granulométrica (G)

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. O seu valor representa a eficiência com que partículas de um determinado diâmetro são separadas. Considerando os diferentes tamanhos das partículas existentes na suspensão, a eficiência granulométrica pode ser relacionada com a eficiência total e com a variação dos tamanhos de partículas após a hidrociclonagem (VIEIRA, 2006).

Conhecida a distribuição granulométrica do material particulado no fluxo de alimentação e “underflow”, a eficiência granulométrica pode ser obtida genericamente pela Equação 7.

$$G = \frac{W_{su} dX_u}{W_{sa} dX_a} \rightarrow ET \frac{dX_u}{dX_a} \quad (7)$$

em que,

G - eficiência granulométrica, adimensional;

$\frac{dX_u}{dX_a}$ - razão da derivada da distribuição granulométrica na corrente do “underflow” e a distribuição granulométrica na corrente de alimentação.

Eficiência granulométrica reduzida (G')

Analogamente, a eficiência granulométrica reduzida distingue-se da eficiência granulométrica justamente pelos mesmos critérios já explanados em eficiência total. Sendo assim, considera-se como eficiência granulométrica reduzida àquela resultante apenas da atuação do campo centrífugo aplicado na separação das partículas por tamanho. Portanto, o efeito da razão de líquido deve também ser negligenciado e sintetizado de forma análoga àquela utilizada para determinação da eficiência total reduzida, conforme expõe a Equação 8.

$$G' = \frac{G - RL}{1 - RL} \quad (8)$$

em que,

G' - eficiência granulométrica reduzida, adimensional;

G - eficiência granulométrica, adimensional; e

RL - razão de líquido, adimensional.

Diâmetro de corte (d₅₀)

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 Equação 9.

$$ET \frac{dX_u(d_{50})}{dX_a(d_{50})} = 0,50 \quad (9)$$

Diâmetro de corte reduzido (d'_{50})

O diâmetro da partícula para o qual a eficiência granulométrica reduzida (G') é de 50% é conhecido como diâmetro de corte reduzido e pode ser obtido a partir da resolução numérica da Equação 10.

$$\frac{ET' \frac{dX_u(d'_{50})}{dX_a(d'_{50})} - RL}{1 - RL} = 0,50 \quad (10)$$

Grupos adimensionais

A descrição matemática da operação de escoamento em um hidrociclone é bastante complexa, uma vez que ocorre escoamento eminentemente tridimensional (radial, axial e tangencial). Esse fenômeno seria teoricamente bem descrito pelas equações da continuidade e do movimento. Desta forma, do ponto de vista matemático, a resolução dessas equações seria complexa e ainda desconhecida. Sendo assim, grande parte dos estudos com hidrociclone tem-se fundamentado nos grupos

adimensionais relevantes desse fenômeno para o caso de suspensões, cujo líquido é um fluido newtoniano (SVAROVSKY, 2000). Os grupos adimensionais mais importantes no estudo com hidrociclones são os números de STOKES (Stk_{50}), EULER (Eu) e REYNOLDS (Rey), que estão respectivamente relacionados com o poder de classificação, com os custos energéticos e com o tipo de escoamento, cujas expressões são descritas pelas Equações 11,12 e 13.

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho) Vc (d'_{50})^2}{Dc 18 \mu} \quad (11)$$

$$Eu = \frac{\Delta P 2}{\rho Vc^2} \quad (12)$$

$$Rey = \frac{\rho Dc Vc}{\mu} \quad (13)$$

em que,

Stk_{50} - número de Stokes, adimensional;

Eu - número de Euler, adimensional;

Rey - número de Reynolds, adimensional;

ρ_s - densidade do sólido, $kg\ m^{-3}$;

ρ - densidade da suspensão, $kg\ m^{-3}$;

Vc - velocidade da suspensão, baseada na seção cilíndrica do hidrociclone, $m\ s^{-1}$;

d'_{50} - diâmetro de corte reduzido, m;

μ - viscosidade dinâmica do líquido, $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$;

Dc - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, m;

ΔP - diferencial de pressão entre as correntes de alimentação e do "overflow", Pa.

As equações 11, 12 e 13 usam a velocidade da suspensão no corpo do cilindro do hidrociclone como a velocidade baseada no diâmetro da parte cilíndrica, sendo calculada pela Equação 14.

$$V_c = \frac{4 Q_a}{\pi(D_c)^2} \quad (14)$$

em que,

V_c - velocidade da suspensão, baseada na seção cilíndrica do hidrociclone, $m s^{-1}$;

Q_a - vazão de alimentação, $m^3 s^{-1}$; e

D_c - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, m;

Perda de carga

O líquido ao escoar através de um duto ou acessório sofre certa resistência ao seu movimento, em razão do efeito combinado da viscosidade e inércia. Essa resistência é vencida pelo líquido em movimento, mediante uma dissipação de parte de sua energia disponível ao que, comumente, se chama de perda de energia, especificamente “perda de carga”. Embora essa “perda” de energia seja comumente designada como “perda por fricção” ou “por atrito”, não se deve supor que ela ocorra pelo efeito simples do atrito do fluido com as paredes dos dutos e acessórios. Junto às paredes desses componentes pode haver movimento do fluido e a velocidade se eleva de zero até o seu valor máximo, junto ao eixo dos mesmos. Pode-se assim imaginar uma série de camadas em movimento, com velocidades diferentes e responsáveis pela dissipação dessa energia (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

DANIEL BERNOULLI, citado por PORTO (2004), estabeleceu em 1738 que, a soma das energias piezométricas, cinéticas e geométricas que ocorrem ao longo de qualquer linha de corrente é constante. O teorema de “BERNOULLI” traduz em termos analíticos o princípio de conservação de energia. Quando aplicado à condução de um líquido real, o balanço dessas energias pode ser representado pela Equação 15, denominada equação de “BERNOULLI”, aplicada a duas seções quaisquer de um líquido real em movimento.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_f \quad (15)$$

em que,

$\frac{P_1}{\gamma}$ e $\frac{P_2}{\gamma}$ - cargas piezométricas, m;

$\frac{V_1^2}{2g}$ e $\frac{V_2^2}{2g}$ - cargas cinéticas, m;

Z_1 e Z_2 - cargas geométricas, m; e

H_f - perda de carga, m.

Perda de carga em hidrociclones

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998) qualquer causa perturbadora que venha estabelecer ou elevar a turbulência em um meio líquido é responsável por uma perda de carga. Este fenômeno decorre da conversão e dissipação de parte da energia mecânica em calor, provocada pela inércia e turbilhonamento, sendo denominadas de perdas localizadas. Apesar dessas perdas ocorrerem em locais isolados ao longo do sistema, as mesmas podem se estender à jusante e a montante desses locais.

O conhecimento da perda de carga em hidrociclones é importante, sendo necessário para estabelecer o consumo de energia do equipamento em operação. A queda de pressão diminui quando a suspensão passa pelo equipamento. Essa queda de pressão consiste das perdas atribuídas na entrada, saída e dentro do hidrociclone, devido à dissipação da energia em função do fluxo rotacional turbulento (LACERDA, 2007).

Segundo CABELLO (1996), as perdas de carga nos hidrociclones são da ordem de 30 a 70 kPa, dependem da vazão, porém, são constantes no tempo, diferentemente de sistemas de filtragem em que as perdas de carga aumentam à medida que se acumulam sedimentos. Entretanto, MAILAPALLI et al. (2007) avaliando um hidrociclone como pré-filtro em irrigação localizada, observaram que a perda de carga no hidrociclone aumentou com o decorrer do tempo e que as maiores quedas de pressão ocorreram com maiores concentrações na suspensão.

Alguns trabalhos relevantes em avaliação de hidrociclones

PEÇANHA & MASSARANI (1980) comentam que hidrociclones bem projetados operam com eficiência total de remoção na faixa de 80% a 90%.

Para GILBERT & FORD (1986), CABELLO (1996) e LOPES (1998) os hidrociclones são dispositivos capazes de separar partículas com peso específico superior ao da água e diâmetros maiores que 75 μm .

CASTILHO & MEDRONHO (2000) estudaram experimentalmente o desempenho de hidrociclones de geometrias "Bradley" e "Rietema" e comprovaram que nas mesmas condições operacionais, os hidrociclones "Bradley" apresentam maiores eficiências que os de geometria "Rietema".

Em experimentos realizados por VIEIRA et al. (2001), foram observadas eficiências totais de 55% a 78%. Eles testaram um hidrociclone "Rietema" como pré-filtro de suspensão aquosa com minério denominado "pirocloro", o qual apresenta diâmetro de partículas de 10 μm a 50 μm e massa específica de 4030 kg m^{-3} . Verificaram ainda decréscimo na eficiência total de separação com a diminuição do diferencial de pressão.

Avaliando a separação de emulsões óleo-água em hidrociclone, GOMES (2002) concluiu que o hidrociclone de geometria "Bradley" comparado com o hidrociclone de geometria "Akw", apresentou maiores eficiências totais. Entretanto, possui baixa capacidade de operação, ou seja, seriam necessárias várias unidades operando em paralelo, além de apresentarem maior razão de líquido, o que resulta em maior quantidade de água que precisa ser reprocessada.

ARRUDA (2003) em trabalho de análise e avaliação do desempenho de hidrociclones de geometria "Demco" comparou os resultados do equipamento avaliado, com outros hidrociclones de geometria "Bradley", "Rietema" e "Krebs" previamente estudados por SOUZA (1999), VIEIRA (2001) e BARBOSA et al. (2001), respectivamente. Essas comparações permitiram inferir que o hidrociclone de geometria "Rietema" apresentou melhor desempenho, com baixo número de Euler e diâmetros de corte relativamente baixos.

SOCCOL (2003), avaliando um hidrociclone para fins de pré-filtragem de água para irrigação, concluiu que o poder de separação dos hidrociclones para suspensão de areia foi superior quando comparado com a suspensão de solo, com eficiência média de 82% e 37% para as suspensões de areia e solo, respectivamente. O autor afirmou que esse equipamento é de fácil construção e de baixo custo, demonstrando potencial para o uso na pré-filtragem da água utilizada na irrigação.

Em avaliação de um hidrociclone de geometria “Rietema” para remoção de areia da água de irrigação, SOCCOL et al. (2005) concluíram que o equipamento apresenta elevada capacidade de separação das partículas de areia em suspensão na água, para os diferenciais de pressão de 10 kPa e 20 kPa, cuja eficiência total média foi de 96,09%. Os autores observaram, ainda, um decréscimo da eficiência total com o aumento da queda de pressão, isto é, com o aumento da vazão de alimentação.

Avaliando 25 hidrociclones filtrantes, VIEIRA (2006) observou que a eficiência de separação respondeu diretamente proporcional ao aumento da queda de pressão, indicando ser uma grandeza que deve ser sempre utilizada no domínio experimental.

ALVES (2006), avaliando o desempenho de hidrociclones em separar leveduras alcoólicas observou que houve incremento na eficiência total com o aumento da queda de pressão. O aumento da queda de pressão contribuiu de forma positiva na redução do diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido. O autor comenta que os hidrociclones avaliados (Akw, Bradley e Krebs) apresentam potencial para separação de leveduras com eficiência total de 40% a 50%, ressaltando que o desempenho melhora com o uso desses equipamentos quando instalados em série.

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 e que as maiores eficiências ocorreram quando se injetava suspensões com maiores concentrações. Os autores concluíram ainda que o equipamento testado mostrou-se ineficiente para remover partículas sólidas pequenas, como argila.

III. MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do Hidrociclone

O hidrociclone avaliado no experimento foi construído e cedido pela Empresa GALLO Irrigação e Equipamentos Agrícolas, sugerido pelo Professor Dr. José Renato Zanini, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Campus de Jaboticabal – São Paulo. O equipamento foi fabricado em aço galvanizado com diâmetro da parte cilíndrica de 19,20 cm, correlacionando-o às proporções geométricas previstas para os hidrociclones da “família Rietema”, conforme a Figura 3.



FIGURA 3. Hidrociclone construído pela Empresa GALLO Irrigação e Equipamentos Agrícolas.

Os aspectos construtivos e as dimensões proporcionais correspondentes ao hidrociclone de geometria “Rietema” avaliado neste trabalho são apresentados na Figura 4.

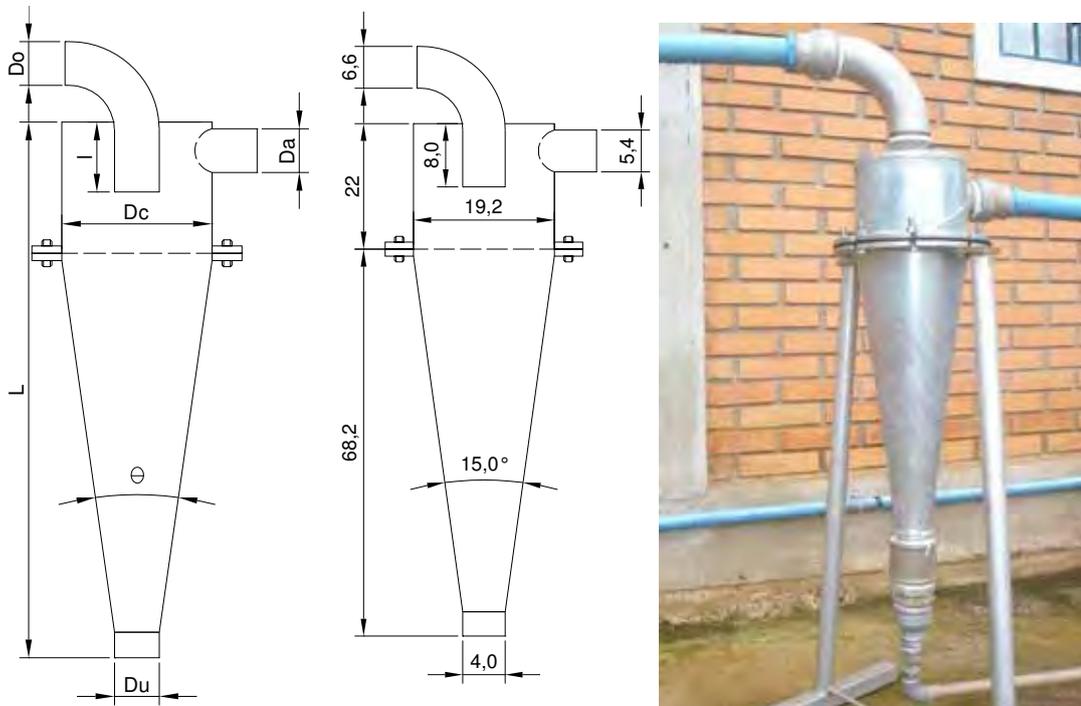


FIGURA 4. Características construtivas e dimensões internas (cm) do hidrociclone avaliado.

Testes preliminares

Foram realizados testes no hidrociclone com “reservatório de acúmulo” acoplado à corrente do “underflow”, conforme características apresentadas na Figura 3. Utilizou-se como material particulado areia oriunda do assoreamento do rio Lanoso, afluente do Rio Uberaba - MG. Esses testes foram efetuados mantendo-se uma vazão de alimentação em torno de $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Os testes tiveram duração de 8 horas, coletando-se amostras a cada 15 minutos nos pontos de coleta das correntes a montante (alimentação) e à jusante (“overflow”) do hidrociclone. As concentrações mássicas nas referidas correntes foram determinadas pelo método gravimétrico. A vazão volumétrica de alimentação foi determinada utilizando-se uma placa de orifício (previamente calibrada) instalada no tubo da corrente a montante do hidrociclone, conforme

recomendação de DELMÉE (2003). A massa específica da suspensão na corrente de alimentação foi determinada utilizando-se um balão volumétrico e uma balança analítica. Com a vazão volumétrica e a massa específica da suspensão determinou-se a vazão mássica. De posse das concentrações mássicas e da vazão de massa nas correntes de alimentação e “overflow” com a Equação 16, determinou-se a eficiência de separação do equipamento, utilizando-se de uma rotina de cálculos implementada no “software Microsoft Office EXCELL[®]”, demonstrando graficamente o comportamento da eficiência de separação do equipamento no decorrer do tempo.

$$ET = \frac{W_{so}}{W_{sa}} \rightarrow ET = \frac{C_{wo}}{C_{wa}} \frac{W_o}{W_a} \quad (16)$$

em que,

ET- eficiência total, adimensional;

W_{so} - vazão mássica de sólidos coletadas no “overflow”, kg s^{-1} ;

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

C_{wo} - concentração mássica no “overflow”, adimensional;

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

W_o - vazão de massa no “overflow”, kg s^{-1} ; e

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

Entretanto, verificou-se uma inconsistência física, porém, não real nos resultados. Isto ocorreu devido à turbulência gerada no acoplamento do reservatório com o duto do “underflow”. Isso implica afirmar que em determinados momentos parte do material separado no hidrociclone pelo efeito centrífugo não permanecia no reservatório, tomando o caminho do vórtice interno ascendente, chegando ao duto do “overflow”. Por esse motivo, foi feita uma proposta de avaliação do hidrociclone, retirando o reservatório de acúmulo, adaptando-se ao duto do “underflow” um tubo com um registro de gaveta, possibilitando inclusive o controle da razão de líquido e a coleta de massa de sólidos da referida corrente (Figura 4). Sendo assim, prosseguiu-se com as avaliações considerando-se a metodologia proposta nos itens subseqüentes.

Bancada experimental

O experimento foi conduzido nas dependências do laboratório de hidráulica do Departamento de Irrigação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba (CEFET Uberaba) (Figura 5). Para a condução dos trabalhos montou-se uma bancada de ensaio, conforme Figura 6, onde foram instalados os seguintes equipamentos: reservatório com capacidade de 5.000 litros; conjunto motobomba, potência 11 kW; chave de partida contactora com relê de sobrecarga; manômetro tipo Bourdon (previamente calibrado); registro de gaveta DN (diâmetro nominal) de 2"; tubos de PVC DN de 2"; manômetro diferencial com coluna de mercúrio em "U"; medidores de vazão tipo placa de orifício que foram construídos e previamente calibrados; agitador submersível composto por um motoredutor elétrico, com potência de 1,1 kW acoplado a um dispositivo tipo hélice.



FIGURA 5. Vista geral de instalação do experimento.

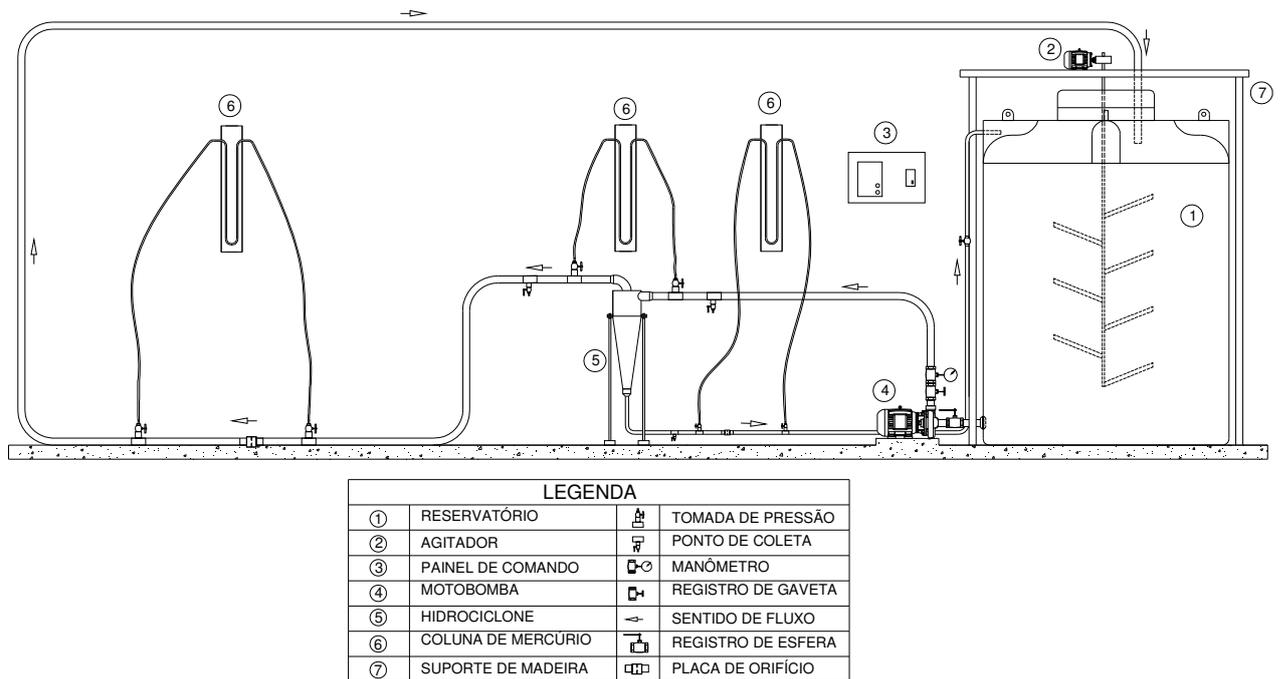


FIGURA 6. Esquema da bancada do experimento com o hidrociclone de geometria “Rietema”.

Material particulado

Os materiais particulados usados como elementos da suspensão aquosa foram: solo e areia. O solo de classe textural franco argilo-arenosa foi coletado no Campus I do CEFET Uberaba e a areia proveniente do assoreamento no Rio Lanoso (Figura 7), afluente do Rio Uberaba-MG. As análises texturais do solo (60% de areia, 14% de silte e 26% de argila) e da areia (98% de areia e 2% de argila), densidades absolutas da areia (2.700 kg m^{-3}) e do solo (2.670 kg m^{-3}), foram determinadas no laboratório de solos da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais) sendo os materiais secos à sombra e peneirados para remoção de materiais grosseiros. As distribuições granulométricas dos materiais particulados estão apresentadas nas Figuras 8 e 9, cuja determinação procedeu-se pelo analisador de partículas por difração a “laser” no laboratório de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O modelo estatístico que melhor representou os resultados da distribuição granulométrica dos materiais particulados foi o RRB, descrito nas Equações 17 e 18 para solo e areia, respectivamente.



FIGURA 7. Coleta e preparo da areia recolhida em assoreamento no Rio Lanoso - Uberaba - MG.

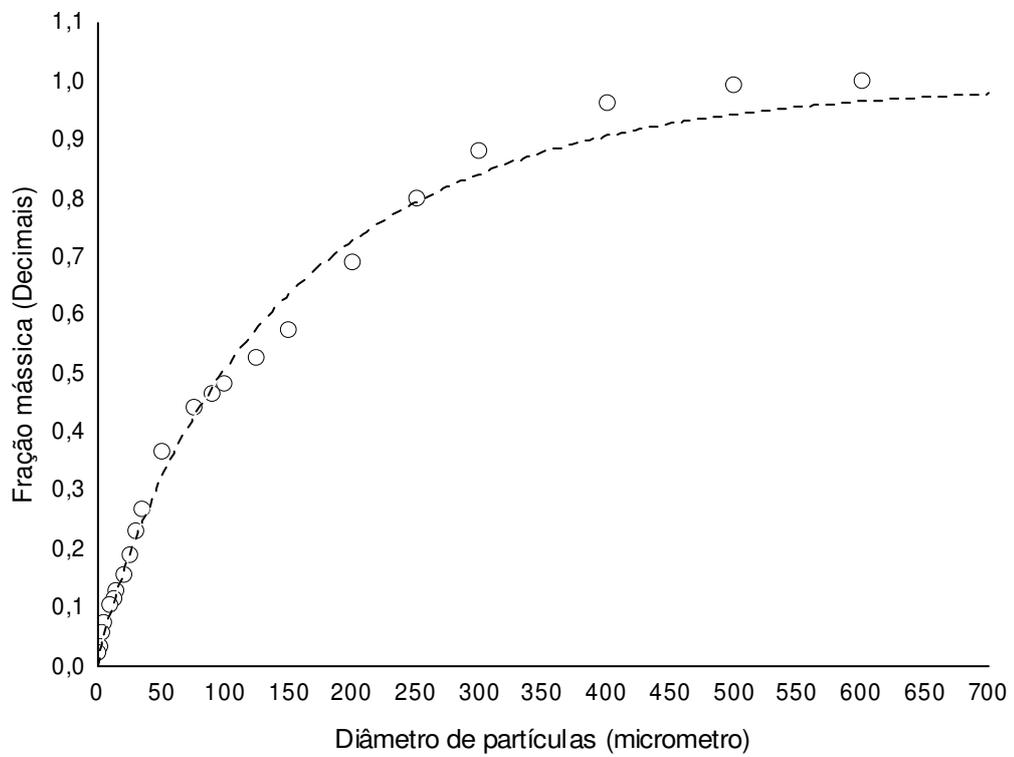


FIGURA 8. Curva de distribuição granulométrica do solo obtida pela técnica de difração de raios "laser".

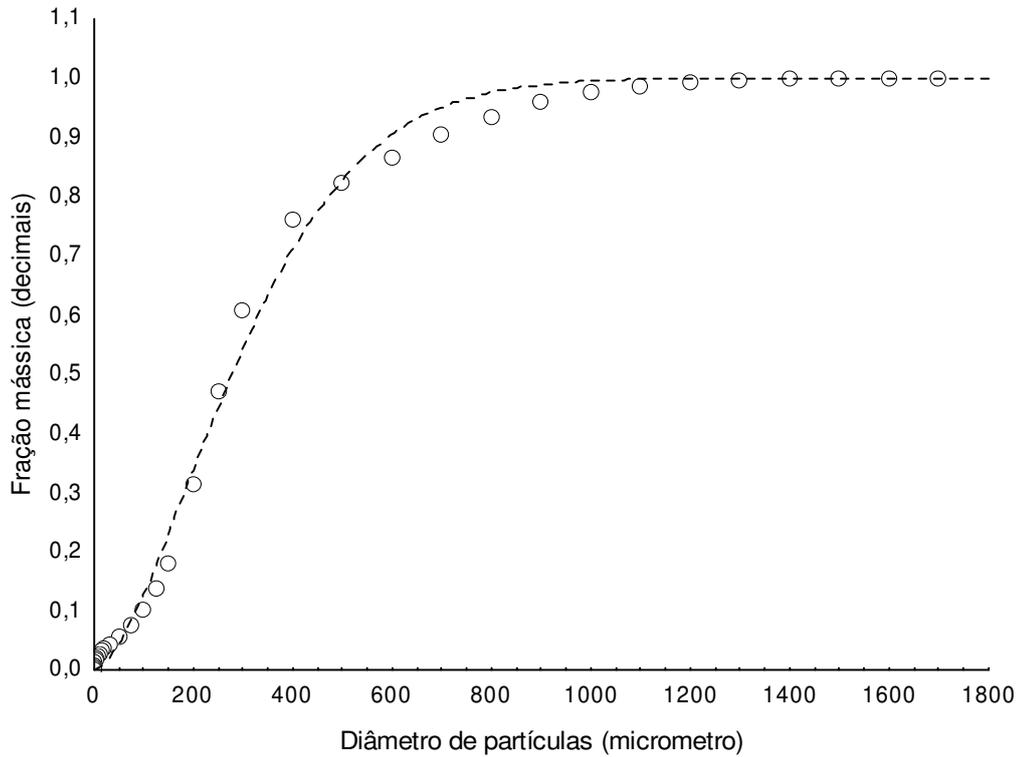


FIGURA 9. Curva de distribuição granulométrica da areia obtida pela técnica de difração de raios “laser”.

$$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{148,064}\right)^{0,871}\right]} \quad R^2 = 0,995 \quad (17)$$

$$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{349,774}\right)^{1,587}\right]} \quad R^2 = 0,995 \quad (18)$$

Procedimento experimental

A bancada de ensaios foi colocada em operação por meio do acionamento do conjunto motobomba aproximadamente 30 minutos após acionado o agitador submersível, que funcionava concomitantemente com o objetivo de manter a suspensão homogênea. 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 era limpo e o reservatório reabastecido com água e material em avaliação (solo ou areia). A massa de material particulado (areia ou solo) colocado no reservatório foi de 30 kg, caracterizando uma concentração de $6,0 \text{ g L}^{-1}$. O sistema operou em circuito fechado. Desta maneira, as descargas do hidrociclone nos dutos das correntes do “underflow” e do “overflow” retornavam ao reservatório de modo a manter a concentração no reservatório constante.

Obtenção das variáveis utilizadas na avaliação do hidrociclone

Vazão volumétrica (Q)

As vazões volumétricas nas correntes do “overflow” (Q_o) e do “underflow” (Q_u) foram determinadas por meio de placas de orifício (Figura 10) previamente calibradas para as suspensões com areia e solo. As leituras (H_o e H_u) tomadas à jusante e a montante das placas inseridas a 8 e 2 D (diâmetro interno do duto), conforme DELMÉE (2003), respectivamente, nos dutos do “overflow” e “underflow”, foram indexadas às equações referentes a cada medidor. As Equações (19 e 20) ajustadas experimentalmente utilizando os valores médios observados com as suspensões de areia e solo para os medidores instalados nos dutos do “overflow” e “underflow” foram, respectivamente:

$$Q_o = 1,1577 H_o^{0,497} \quad R^2 = 0,997 \quad (19)$$

$$Q_u = 0,0175 H_u^{0,543} \quad R^2 = 0,996 \quad (20)$$

em que,

Q_o - vazão volumétrica na corrente do “overflow”, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$;

Q_u - vazão volumétrica na corrente do “underflow”, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$;

H_o - diferencial de pressão na placa da corrente do “overflow”, mm de coluna de Hg;

H_u - diferencial de pressão na placa da corrente do “underflow”, mm de coluna de H_2O .



FIGURA 10. Medidores de vazão (placa de orifício) instalados nos dutos do “overflow” e “underflow”.

A vazão volumétrica na corrente de alimentação (Q_a) foi resultado da soma das vazões volumétricas nas correntes do “overflow” (Q_o) e do “underflow” (Q_u), conforme Equação 21.

$$Q_a = Q_o + Q_u \quad (21)$$

Os ensaios foram conduzidos para vazões variando de $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com razão de líquido (RL) ajustada para aproximadamente 8%, mediante controle de um registro de gaveta instalado no duto do “underflow”.

Densidade absoluta ou massa específica (ρ)

As densidades absolutas do fluido (ρ) e das suspensões nas correntes de alimentação (ρ_a), “overflow” (ρ_o) e “underflow” (ρ_u) foram determinadas pelo método do balão volumétrico, utilizando-se balões volumétricos (1.000 mL e 500 mL), balança de precisão ($\pm 0,0001 \text{ g}$) e termômetro digital ($\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$) (Figura 11).



FIGURA 11. Determinação das densidades absolutas das suspensões aquosas com solo e areia.

Temperatura

As temperaturas das suspensões nas correntes de alimentação, “overflow” e “underflow” foram determinadas logo após a coleta nas devidas correntes, utilizando-se um termômetro digital ($\pm 0,01$ °C), conforme Figura 12.



FIGURA 12. Determinação da temperatura no momento de coleta das suspensões.

Vazão mássica (W)

As vazões mássicas nas correntes do “overflow” (W_o) e “underflow” (W_u) foram determinadas utilizando as Equações 22 e 23.

$$W_o = Q_o \rho_o \quad (22)$$

$$W_u = Q_u \rho_u \quad (23)$$

em que,

W_o - vazão mássica na corrente do “overflow”, kg s^{-1} ;

W_u - vazão mássica na corrente do “underflow”, kg s^{-1} ;

Q_o - vazão volumétrica na corrente do “overflow”, L s^{-1} ;

Q_u - vazão volumétrica na corrente do “underflow”, L s^{-1} ;

ρ_u - densidade da suspensão na corrente do “underflow”, kg L^{-1} ; e

ρ_o - densidade da suspensão na corrente do “overflow”, kg L^{-1} .

A vazão de massa na corrente de alimentação (W_a) foi resultado da soma das vazões mássicas nas correntes do “overflow” e do “underflow”, conforme Equação 24.

$$W_a = W_o + W_u \quad (24)$$

Concentração mássica (C_w)

As concentrações mássicas das amostras das correntes de alimentação (C_{wa}), “overflow” (C_{wo}) e “underflow” (C_{wu}) foram determinadas utilizando-se o processo gravimétrico. Para isso, com o auxílio de recipientes plásticos coletavam-se amostras em três pontos: correntes de alimentação, “overflow” e “underflow” (Figura 13) para cada ensaio, sendo feitas duas repetições. Após a coleta, os recipientes eram lacrados e enviados para análises. No laboratório, determinou-se o volume e a massa de cada amostra. As suspensões eram colocadas em béqueres e com o auxílio de uma mesa aquecedora, evaporava-se parte d’ água das amostras. O restante das suspensões era colocado em béquer e levado para estufa a 105 °C, até que se observasse peso constante (Figura 14).

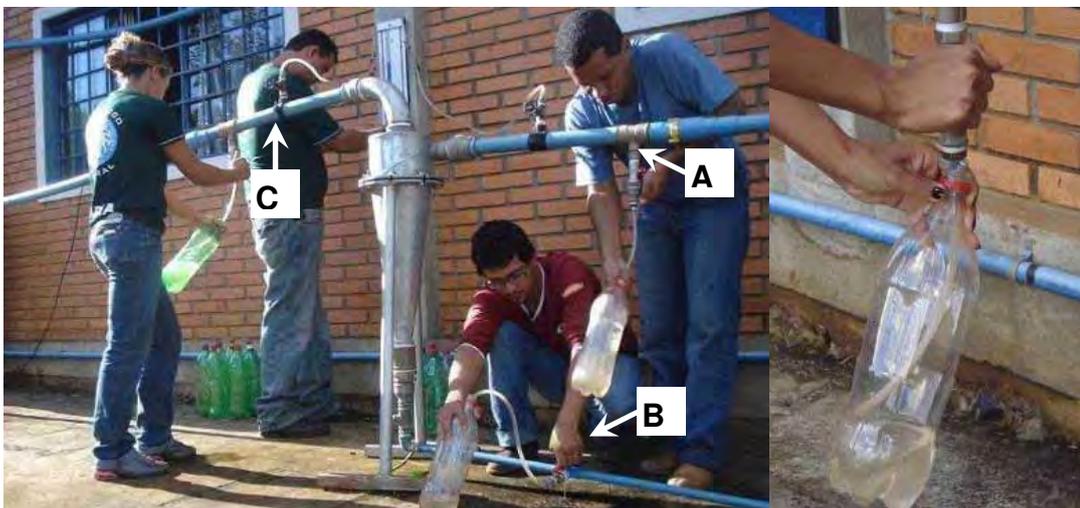


FIGURA 13. Momento da coleta das suspensões nas correntes de alimentação (A), “underflow” (B) e “overflow” (C).



FIGURA 14. Determinação da concentração mássica pelo método gravimétrico.

Conhecendo-se então a massa de sólidos e a massa de suspensão das amostras determinou-se a concentração mássica de sólidos na suspensão, utilizando-se das Equações 25, 26 e 27.

$$C_{wa} = \frac{M_{sa}}{M_{spa}} \quad (25)$$

$$C_{wo} = \frac{M_{so}}{M_{spo}} \quad (26)$$

$$C_{wu} = \frac{M_{su}}{M_{spu}} \quad (27)$$

em que,

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

C_{wo} - concentração mássica na corrente do “overflow”, adimensional;

C_{wu} - concentração mássica na corrente do “underflow”, adimensional;

M_{sa} - massa de sólidos na corrente de alimentação, g;

M_{so} - massa de sólidos na corrente do “overflow”, g;

M_{su} - massa de sólidos na corrente do “underflow”, g;

M_{spa} - massa de suspensão na corrente de alimentação, g;

M_{spo} - massa de suspensão na corrente do “overflow”, g; e

M_{spu} - massa de suspensão na corrente do “underflow”, g.

Concentração volumétrica (C_v)

Com os resultados das concentrações mássicas nas correntes de alimentação (C_{wa}) e “underflow” (C_{wu}) foi possível determinar as concentrações volumétricas a partir das Equações 28 e 29.

$$C_{va} = \frac{C_{wa}}{\rho_s \left(\frac{1 - C_{wa}}{\rho} + \frac{C_{wa}}{\rho_s} \right)} \quad (28)$$

$$C_{vu} = \frac{C_{wu}}{\rho_s \left(\frac{1 - C_{wu}}{\rho} + \frac{C_{wu}}{\rho_s} \right)} \quad (29)$$

em que,

C_{va} - concentração volumétrica na corrente de alimentação, adimensional;

C_{vu} - concentração volumétrica na corrente do “underflow”, adimensional

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

C_{wu} - concentração mássica na corrente do “underflow”, adimensional;

ρ_s - densidade do sólido, kg L^{-1} ; e

ρ - densidade do fluido, kg L^{-1} .

Desempenho do hidrociclone

Conhecendo-se as vazões mássicas e volumétricas, concentrações mássicas e volumétricas das suspensões aquosas com areia e solo nas correntes de alimentação e “underflow” e utilizando-se das Equações 1, 2 e 3, determinaram-se a eficiência total (ET) e a eficiência total reduzida (ET') em uma rotina desenvolvida no “software” MATHCAD[®], apresentada no APÊNDICE D, para as diferentes condições operacionais.

Distribuições granulométricas

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, da marca CILAS, modelo 1180 LD (Figura 15), possui faixa analítica de 0,04 μm a 2.500 μm , abrangendo, portanto, todas as frações argila, silte e areia.



FIGURA 15. Analisador granulométrico, marca CILAS, Modelo 1180 LD.

A partir dos dados de distribuição granulométrica (APÊNDICES A e B) do material particulado (solo e areia) e das suspensões nas correntes de alimentação e do “underflow” ajustavam-se as curvas aos modelos estatísticos clássicos de distribuição granulométrica. O modelo que melhor representou os dados experimentais foi o “Rosin-Rammler-Benner” (RRB-Equação 9). Para esse ajuste, utilizou-se o “software STATISTICA[®]”, determinando assim os parâmetros (n e d^*) de ajuste da equação citada. As equações geradas pelo modelo RRB para as suspensões nas correntes de alimentação e “underflow” estão apresentadas no APÊNDICE C.

Diâmetro de corte (d_{50})

De posse das equações das distribuições granulométricas das correntes de alimentação e “underflow”, representadas pelo modelo RRB, foi possível determinar o diâmetro de corte (d_{50}). Os parâmetros “ n e d^* ” da equação RRB foram substituídos por “ n_a ” e “ d_a^* ”, “ n_u ” e “ d_u^* ”, respectivamente, para os fluxos nas correntes de alimentação e “underflow”. Desta forma, as equações foram representadas pelas Equações 30 e 31.

$$X_a = 1 - e \left(- \left(\frac{dp}{da^*} \right)^{na} \right) \quad (30)$$

$$X_u = 1 - e \left(- \left(\frac{dp}{du^*} \right)^{nu} \right) \quad (31)$$

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 Equação 9, que relaciona a distribuição granulométrica com a eficiência total, resultando na Equação 32, usada para determinar o diâmetro de corte.

$$ET \left\{ \frac{\left(\frac{dp}{du^*} \right)^{nu} nu e \left[- \left(\frac{dp}{du^*} \right)^{nu} \right]}{\left(\frac{dp}{da^*} \right)^{na} na e \left[- \left(\frac{dp}{da^*} \right)^{na} \right]} \right\} = 0,50 \quad (32)$$

Diâmetro de corte reduzido (d'_{50})

Analogamente, o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) foi determinado considerando os parâmetros anteriormente mencionados. Sendo assim, considera-se como eficiência granulométrica reduzida (G') apenas a atuação do campo centrífugo aplicado na separação das partículas por tamanho. Portanto, o efeito da razão de líquido (RL) deve ser negligenciado e o diâmetro de corte reduzido foi determinado pela Equação 33.

$$ET \left\{ \frac{\left(\frac{dp}{du^*} \right)^{nu} nu e^{\left[- \left(\frac{dp}{du^*} \right)^{nu} \right]} + \left(\frac{dp}{da^*} \right)^{na} na e^{\left[- \left(\frac{dp}{da^*} \right)^{na} \right]}}{1 - RL} \right\} - RL = 0,50 \quad (33)$$

As Equações 32 e 33 são expressões não-lineares, cuja solução analítica na variável diâmetro de partícula (dp) são muito complexas. Para resolvê-las de forma numérica, foi necessária a aplicação de uma rotina desenvolvida no “software MATHCAD®”, conforme apresentada no APÊNDICE E, determinando assim o diâmetro de corte (d_{50}) e o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}).

Eficiência granulométrica

Conhecendo-se a distribuição granulométrica das correntes do “underflow” e da alimentação no hidrociclone e utilizando-se das Equações 7 e 8, determinaram-se a eficiência granulométrica (G) e a eficiência granulométrica reduzida (G') em uma rotina desenvolvida no “software MATHCAD®” para as diferentes condições operacionais (APÊNDICE F).

Perda de carga no hidrociclone

A perda de carga do equipamento para cada vazão ensaiada foi determinada utilizando-se um manômetro diferencial de coluna de mercúrio em “U” (Figura 16). As tomadas de pressão foram instaladas a uma distância mínima de dez vezes o diâmetro da tubulação a montante e à jusante do hidrociclone, procedimento recomendado para evitar transientes hidráulicos que possam interferir nas determinações de pressão (AZEVEDO NETTO et al., 1998). Com base nos dados observados (coluna de mercúrio em U) em cada tomada de pressão, nos valores das cotas das tomadas de pressão, peso específico e velocidade do fluxo no ponto de tomada das suspensões nas correntes do duto de alimentação e “overflow” e utilizando da Equação 15, caracterizou-se a perda de carga provocada pelo hidrociclone. Os dados observados foram

transcritos para o “software Microsoft Office EXCELL[®]”, utilizado para calcular a perda de carga com base no princípio de conservação de energia (Teorema de *Bernoulli*) e demonstrar a correlação entre a perda de carga provocada pelo equipamento em função das diferentes vazões.



FIGURA 16. Momento de leitura das pressões nas correntes de alimentação e “overflow” e coluna de mercúrio em “U”.

Grupos adimensionais relevantes

Calculando os diâmetros de corte reduzido, as densidades absolutas do fluido e dos materiais particulados, a diferença de pressão entre as correntes de alimentação e diluído (“overflow”), a vazão de alimentação, a velocidade da suspensão baseada na seção cilíndrica do hidrociclone e utilizando as Equações 11, 12 e 13 com o uso do “software Microsoft Office EXCELL[®]”, determinaram-se os números de STOKES (Stk_{50}), EULER (Eu), REYNOLDS (Rey) e STOKES·EULER ($Stk_{50}·Eu$). O produto $Stk_{50}·Eu$ foi obtido por meio da Equação 34.

$$Stk_{50} \cdot Eu = \frac{(\rho_s - \rho) V_c (d'_{50})^2}{D_c 18 \mu} \cdot \frac{\Delta P 2}{\rho V_c^2} \quad (34)$$

Teste com hidrociclone operando com Razão de Líquido a 4%

Com o objetivo de avaliar o desempenho do hidrociclone operando com razão de líquido a 4%, procederam-se os testes considerando a mesma metodologia apresentada para o hidrociclone operando com 8%. Sendo assim, com o controle de um registro de gaveta instalado no recalque da bomba, foi fixada uma determinada vazão no hidrociclone, com o conhecimento prévio da curva de ajuste (pressão versus vazão) das placas de orifício instaladas nos dutos do “overflow” e “underflow”. Com a soma das vazões observadas nos medidores (placas de orifícios) instalados nos dutos do “overflow” (Q_o) e “underflow” (Q_u) determinou-se a vazão de alimentação (Q_a). A razão de líquido (RL 4%) foi pré-estabelecida ajustando-se as vazões observadas nas correntes de alimentação (Q_a) e “underflow” (Q_u) por meio do comando dos registros instalados nas referidas correntes. Os ensaios foram conduzidos para vazões volumétricas, variando de $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. As vazões mássicas foram determinadas pelo produto da vazão volumétrica e a massa específica nas referidas correntes. As concentrações mássicas foram determinadas pelo processo gravimétrico. Conhecendo-se as vazões mássicas e volumétricas, concentrações mássicas e volumétricas das suspensões aquosas com areia nas correntes de alimentação e “underflow” e utilizando-se das Equações 1, 2 e 3, determinaram-se a eficiência total (ET) e a eficiência total reduzida (ET') em uma rotina desenvolvida no “software MATHCAD[®]”, apresentada no APÊNDICE D, para as diferentes condições operacionais. O material particulado usado para esse teste foi a areia de rio.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes preliminares

A Figura 17 representa a variação da eficiência de separação de sólidos no hidrociclone operando com suspensão de areia no decorrer do tempo, com o reservatório de acúmulo. Verifica-se uma inconsistência física, porém, não real nos resultados com relação à eficiência ao longo do tempo, inclusive apresentando valores acima de 100%, ou seja, maiores quantidades de massa sólida coletadas no “overflow”. Fato este atribuído à turbulência gerada no acoplamento do reservatório com a saída do “underflow”, implicando afirmar que em determinados momentos, parte das partículas sólidas separadas no hidrociclone pelo efeito centrífugo e que já estavam depositadas no reservatório eram dali retiradas, sendo suspensas e arrastadas tomando o caminho do vórtice interno ascendente chegando ao duto do “overflow”.

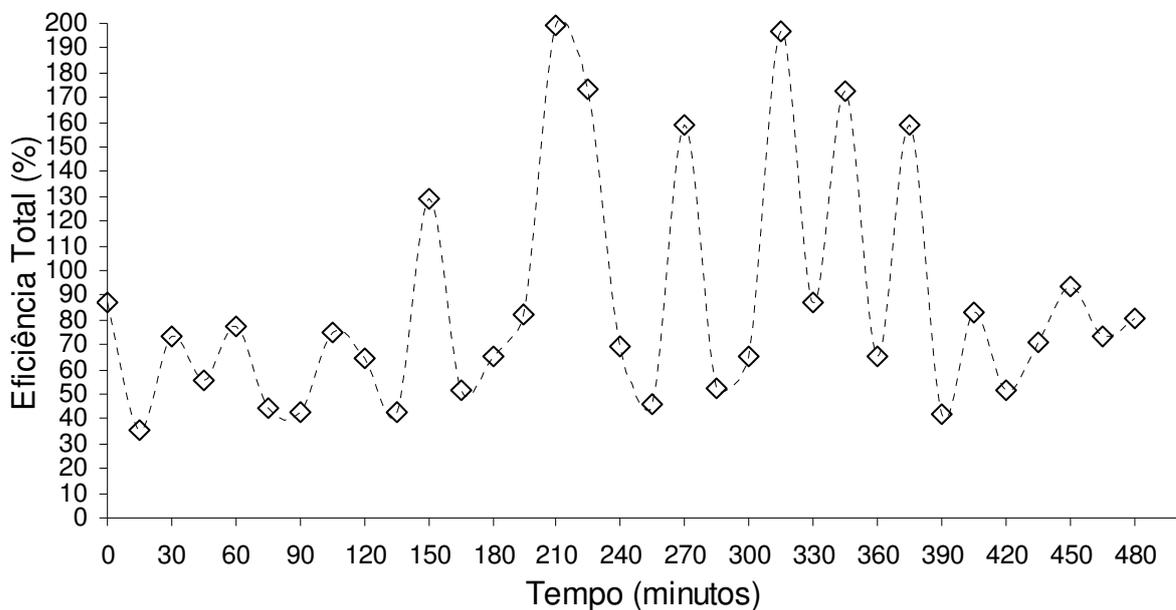


FIGURA 17. Variação da eficiência total do hidrociclone operando a $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com suspensão de areia no decorrer do tempo, com reservatório de acúmulo.

Conforme já mencionado no item testes preliminares (Material e Métodos) e considerando os resultados apresentados na Figura 17, o experimento procedeu-se e os resultados apresentados a seguir referem-se à avaliação do hidrociclone sem o reservatório de acúmulo.

Desempenho do hidrociclone

Eficiência Total e Reduzida (ET e ET')

Na Tabela 3, estão apresentados os valores obtidos com o desempenho do hidrociclone, operando com RL aproximada de 8%, sem reservatório de acúmulo, para as seis vazões ensaiadas. Verifica-se que a eficiência total de separação do hidrociclone apresentou valores que variaram entre 30,06% e 92,31%, para as vazões entre $12,43 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $26,97 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente, para o hidrociclone operando com suspensão aquosa de areia. Quando foi utilizada suspensão aquosa com solo, verificou-se que a eficiência variou de 54,29% para 19,59% para as vazões $26,21 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $10,07 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Essas diferenças da eficiência total ocorreram devido às diferenças granulométricas 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 no interior do equipamento, isto é, com a diminuição da vazão, conseqüentemente, da velocidade de fluxo, ocorre menor taxa de descarregamento de sólidos no orifício do “underflow”, concordando com SOUZA (1999), CASTILHO & MEDRONHO (2000), BARBOSA et al. (2001), VIEIRA et al. (2001), ARRUDA (2003), ALVES (2006), VIEIRA (2006).

A baixa eficiência do equipamento em separar partículas sólidas de pequenos diâmetros, como o solo usado da classe textural franco argilo-arenosa, também foi observada por MAILAPALLI et al. (2007).

Também pela Tabela 3, verifica-se que a concentração mássica de sólidos na alimentação e no “underflow” apresentaram decréscimo com a diminuição da vazão, concordando com os resultados obtidos por ALVES (2006), que avaliou a separação de leveduras de fermentação alcoólica em hidrociclones.

Nota-se pela Tabela 3, que a razão de líquido manteve-se próxima ao valor proposto na metodologia para avaliação do hidrociclone, para as suspensões com areia e solo, ou seja, em torno de 8%.

TABELA 3. Valores médios de eficiência total e eficiência total reduzida para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia e de solo.

Qa (m ³ h ⁻¹)	Qu (m ³ h ⁻¹)	Dp (kPa)	Cwa (%)	Cwu (%)	Wsa (kg h ⁻¹)	Wsu (kg h ⁻¹)	RL (%)	ET (%)	ET' (%)
Suspensão com areia									
26,97	2,28	52,75	0,038	0,42	10,31	9,52	8,45	92,31	91,60
22,78	1,90	37,33	0,024	0,21	5,43	4,05	8,34	74,60	72,29
20,54	1,70	30,31	0,022	0,15	4,51	2,56	8,29	56,75	52,84
18,21	1,46	23,15	0,020	0,12	3,72	1,68	8,01	45,14	40,36
15,88	1,28	17,51	0,021	0,09	3,35	1,23	8,04	36,78	31,25
12,43	0,98	10,44	0,019	0,07	2,43	0,73	7,89	30,06	24,07
Suspensão com solo									
26,21	2,27	48,04	0,094	0,586	24,64	13,38	8,66	54,29	49,96
23,08	2,00	37,06	0,067	0,347	15,40	6,95	8,66	45,12	39,91
19,56	1,67	26,40	0,065	0,254	12,75	4,23	8,52	33,18	26,96
16,67	1,40	18,80	0,061	0,174	10,26	2,44	8,40	23,78	16,80
13,01	1,12	10,84	0,055	0,143	7,12	1,60	8,63	22,48	15,16
10,07	0,88	6,18	0,043	0,096	4,34	0,85	8,74	19,59	11,86

Qa = Vazão volumétrica na alimentação; Qu = Vazão volumétrica no “underflow”; Dp = Diferencial de pressão; Cwa = Concentração mássica na alimentação; Cwu = Concentração mássica no “underflow”; Wsa = Vazão mássica de sólidos na alimentação; Wsu = Vazão mássica de sólidos no “underflow”; RL = Razão de líquido; ET = Eficiência total; ET' = Eficiência total reduzida.

Vale ressaltar que o equipamento recuperou na corrente do “underflow” 9,52 kg h⁻¹ e 13,38 kg h⁻¹ dos 10,31 kg h⁻¹ e 24,64 kg h⁻¹ (Tabela 3) de massa sólida alimentada no hidrociclone para as suspensões com areia e solo, respectivamente. Isso significa hipoteticamente, o que seria lançado em um sistema de irrigação sem o uso do hidrociclone, demandando maior controle e manejo, bem como, sistemas de filtragens com maiores sofisticções tecnológicas.

Diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido (d₅₀ e d'₅₀)

Pela Tabela 4, verifica-se que o diâmetro de corte aumentou com a diminuição da vazão, conseqüentemente, com a queda de pressão, concordando com ALVES (2006) e 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 esta situação todos os diâmetros das partículas apresentam eficiência granulométrica maior que 50%, com base na definição de diâmetro de corte.

TABELA 4. Valores de diâmetros de cortes em diferentes condições operacionais para as suspensões aquosas com areia e solo.

Qa (m³ h⁻¹)	Dp (kPa)	ET (%)	ET' (%)	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)
Suspensão com areia					
26,97	52,75	92,31	91,60	54,81	67,17
22,78	37,33	74,60	72,29	65,04	75,89
20,54	30,31	56,75	52,84	104,62	117,99
18,21	23,15	45,14	40,36	116,65	126,64
15,88	17,51	36,78	31,25	120,68	128,26
12,43	10,44	30,06	24,07	133,29	138,95
Suspensão com solo					
26,21	48,04	54,29	49,96	25,77	27,41
23,08	37,06	45,12	39,91	26,96	28,85
19,56	26,40	33,18	26,96	33,22	35,82
16,67	18,80	23,78	16,80	40,09	46,25
13,01	10,84	22,48	15,16	55,97	65,13
10,07	6,18	19,59	11,86	-	-

Qa = Vazão volumétrica na alimentação; Dp = Diferencial de pressão; ET = Eficiência total; ET' = Eficiência total reduzida; d₅₀ = Diâmetro de corte; d'₅₀ = Diâmetro de corte reduzido.

Os diâmetros de corte do hidrociclone (54,81 μm e 25,77 μm) 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 $26,97 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 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.

Eficiência granulométrica (G e G')

Nas Tabelas 5 e 6, são apresentadas as eficiências granulométricas para vários diâmetros de partículas e vazões testadas para o hidrociclone, operando com suspensões de areia e solo. Nota-se que a areia (suspensão de granulometria “mais grossa”) propicia maiores eficiências granulométricas quando comparada com o solo na suspensão aquosa.

TABELA 5. 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'										
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
10	26,91	20,15	19,71	12,42	10,66	2,58	5,71	-	2,45	-	0,53	-
20	34,25	28,17	27,53	20,95	16,59	9,06	10,07	2,24	5,33	-	1,62	-
30	39,70	34,12	33,66	27,64	21,64	14,55	14,28	6,81	8,60	0,61	3,23	-
40	44,24	39,08	38,93	33,38	26,19	19,52	18,43	11,33	12,22	4,54	5,36	-
50	48,23	43,44	43,64	38,52	30,42	24,13	22,58	15,84	16,14	8,80	8,00	0,13
60	51,83	47,37	47,95	43,22	34,39	28,46	26,73	20,35	20,33	13,37	11,20	3,59
70	55,16	50,99	51,94	47,57	38,17	32,58	30,87	24,85	24,77	18,19	14,92	7,63
80	58,24	54,38	55,67	51,64	41,77	36,50	35,00	29,35	29,43	23,26	19,17	12,25
90	61,15	57,56	59,18	55,47	45,21	40,26	39,13	33,84	32,28	28,53	23,94	17,43
100	63,92	60,58	62,51	59,10	48,52	43,86	43,24	38,29	39,28	33,97	29,22	23,15
110	66,55	63,45	65,67	62,55	51,71	47,33	47,31	42,73	44,41	39,55	34,97	29,40
120	69,06	66,20	68,68	65,83	54,75	50,66	51,35	47,11	49,64	45,24	41,16	36,12
130	71,48	68,84	71,55	68,96	57,69	53,87	55,34	51,45	54,95	51,01	47,75	43,27
140	73,81	71,38	74,29	71,96	60,53	56,97	59,28	55,73	60,31	56,84	54,68	50,80
150	76,05	73,84	76,92	74,82	63,26	59,94	63,15	59,95	65,68	62,68	61,92	58,66
160	78,23	76,21	79,44	77,57	65,88	62,80	66,96	64,09	71,06	68,53	69,39	66,76
170	80,33	78,51	81,85	80,20	68,42	65,56	70,70	68,15	76,40	74,34	77,02	75,05
180	82,37	80,75	84,17	82,73	70,85	68,21	74,35	72,12	81,69	80,09	84,75	83,44
190	84,36	82,91	86,39	85,15	73,19	70,77	77,92	75,99	86,91	85,76	92,50	91,86
200	86,29	85,02	88,52	87,48	75,44	73,22	81,39	79,77	92,03	91,33	100,00	100,00
210	88,17	87,07	90,56	89,71	77,60	75,57	84,77	83,44	97,03	96,77	-	-
220	90,00	89,07	92,53	91,85	79,67	77,84	88,04	87,00	100,00	100,00	-	-
230	91,78	91,02	94,41	93,90	81,66	80,00	91,21	90,45	-	-	-	-
240	93,52	92,92	96,22	95,88	83,56	82,08	94,27	93,77	-	-	-	-
250	95,22	94,78	97,96	97,77	85,38	84,06	97,21	96,97	-	-	-	-
260	96,88	95,60	99,62	99,58	87,12	85,96	100,00	100,00	-	-	-	-
270	98,50	98,36	100,00	100,00	88,78	87,77	-	-	-	-	-	-
280	100,00	100,00	-	-	90,36	89,49	-	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	91,87	91,13	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	93,29	92,68	-	-	-	-	-	-
310	-	-	-	-	94,65	94,16	-	-	-	-	-	-
320	-	-	-	-	95,93	95,56	-	-	-	-	-	-
330	-	-	-	-	97,13	96,87	-	-	-	-	-	-
340	-	-	-	-	98,27	98,12	-	-	-	-	-	-
350	-	-	-	-	99,33	99,28	-	-	-	-	-	-
360	-	-	-	-	100,00	100,00	-	-	-	-	-	-

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

Para a eficiência granulométrica de 50%, com o hidrociclone operando com suspensão de areia, os diâmetros aproximados das partículas variaram de 50 μm a 60

μm para as vazões de $23 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Observa-se ainda que todas as partículas com diâmetro acima de $270 \mu\text{m}$ são separadas com eficiência granulométrica de 100% para as vazões mencionadas. Para as menores vazões ($15,88 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $12,43 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), os diâmetros de partículas classificadas pelo equipamento foram em torno de $120 \mu\text{m}$ 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 areia.

TABELA 6. Eficiência granulométrica para o hidrociclone operando com suspensão de solo para diferentes vazões e diâmetros de partículas.

dp (μm)	Qa $26,21 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$		Qa $23,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$		Qa $19,56 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$		Qa $16,67 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$		Qa $13,01 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$		Qa $10,07 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	
	G (%)	G' (%)										
10	14,88	6,82	15,80	7,82	17,16	9,44	9,40	10,89	12,44	4,16	13,96	5,83
15	24,51	17,36	24,75	17,61	18,92	11,37	15,63	7,89	16,33	8,43	19,64	12,05
20	35,62	29,53	34,76	28,57	21,73	14,44	22,70	15,61	20,39	12,87	25,13	18,05
25	48,00	43,08	45,60	40,44	25,63	18,70	30,22	23,83	24,63	17,51	30,20	23,60
30	61,25	57,58	56,88	52,79	30,79	24,34	37,67	31,96	29,02	22,31	34,59	28,42
35	74,83	72,44	60,03	65,00	37,54	31,72	44,43	29,34	33,47	27,19	38,07	32,22
40	88,06	86,94	78,42	76,34	46,33	41,33	49,92	45,32	37,88	32,01	40,45	34,83
45	100,00	100,00	87,38	86,18	57,77	53,84	53,60	49,35	42,09	36,63	41,64	36,12
50	-	-	94,28	93,74	72,68	70,13	55,18	51,07	45,99	40,89	41,60	36,09
55	-	-	98,62	98,49	92,16	91,43	54,54	50,37	49,40	44,63	40,44	34,81
60	-	-	100,00	100,00	100,00	100,00	51,82	47,40	52,21	47,69	38,29	32,45
65	-	-	-	-	-	-	47,37	42,54	54,28	49,96	35,13	29,22
70	-	-	-	-	-	-	41,69	36,25	55,53	51,33	31,81	25,37
75	-	-	-	-	-	-	35,34	29,41	55,91	51,74	27,98	21,18
80	-	-	-	-	-	-	28,87	22,35	55,39	51,18	24,04	16,87
85	-	-	-	-	-	-	22,73	15,64	54,02	49,68	20,20	12,67
90	-	-	-	-	-	-	17,25	9,66	51,86	47,31	16,60	8,73
95	-	-	-	-	-	-	12,62	4,60	48,99	44,18	13,35	5,17
100	-	-	-	-	-	-	8,92	0,55	45,56	40,42	10,51	2,06
105	-	-	-	-	-	-	6,05	-	41,70	36,19	8,11	-
110	-	-	-	-	-	-	3,97	-	37,57	31,68	6,12	-
115	-	-	-	-	-	-	2,51	-	33,32	27,02	4,53	-
120	-	-	-	-	-	-	1,50	-	29,08	22,38	3,29	-

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

Para a eficiência granulométrica de 50%, com o hidrociclone operando com suspensão de solo, os diâmetros aproximados das partículas variaram de $25 \mu\text{m}$ a $30 \mu\text{m}$ para as vazões de $23 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $26 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Observa-se que todas as partículas com diâmetro acima de $60 \mu\text{m}$ são separadas com eficiência granulométrica de 100% para as vazões mencionadas. Para as menores vazões ($13,01 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $10,07 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), os diâmetros de partículas classificadas pelo equipamento foram em torno de $50 \mu\text{m}$ 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.

Grupos adimensionais

Verifica-se pela Tabela 7, que os maiores números de Reynolds foram obtidos para os diferenciais de pressão mais elevados, apresentando regime turbulento ($Rey > 4000$) em todas as situações analisadas. Com a diminuição do diferencial de pressão e do número de Reynolds, o efeito centrífugo no interior do hidrociclone tende a diminuir. Conseqüentemente, o caminho das partículas sólidas nos vórtices interno e externo se misturam interferindo nas relações entre os volumes das respectivas correntes (“overflow” e “underflow”), gerando menores eficiências de separação.

TABELA 7. Valores médios de números de Reynolds (Rey), Euler (Eu) e Stokes-Euler ($Stk_{50} \cdot Eu$) para o hidrociclone operando com suspensões aquosas de areia e de solo.

Q_a ($m^3 h^{-1}$)	D_p (kPa)	ET (%)	ET' (%)	Rey (adimensional)	Eu (adimensional)	$Stk_{50} \cdot Eu$ (adimensional)
Suspensão com areia						
26,97	52,75	92,31	91,60	57046,38	1567,98	0,67
22,78	37,33	74,60	72,29	48160,91	1556,82	0,79
20,54	30,31	56,75	52,84	43441,79	1553,52	1,84
18,21	23,15	45,14	40,36	38507,67	1510,41	1,90
15,88	17,51	36,78	31,25	33596,09	1500,61	1,83
12,43	10,44	30,06	24,07	26287,92	1461,85	1,91
Suspensão com solo						
26,21	48,04	54,29	49,96	55251,95	1517,53	0,16
23,08	37,06	45,12	39,91	48660,78	1509,43	0,17
19,56	26,40	33,18	26,96	41250,74	1495,99	0,20
16,67	18,80	23,78	16,80	35158,57	1466,51	0,28
13,01	10,84	22,48	15,16	27437,66	1388,99	0,41
10,07	6,18	19,59	11,86	21238,01	1320,67	-

Q_a = Vazão volumétrica de alimentação; D_p = Diferencial de pressão; ET = Eficiência total; ET' = Eficiência total reduzida; Rey = Número de Reynolds; Eu = Número de Euler; $Stk_{50} \cdot Eu$ = Número de Stokes-Euler.

Pela Tabela 7, observa-se que a variação do número de Euler (Eu) foi pequena com o acréscimo da vazão, concomitantemente com a eficiência, indicando que o

equipamento deve ser recomendado para operar com máxima vazão não implicando em maiores custos energéticos.

Observando a Tabela 7, verifica-se que o número de Stokes-Euler ($Stk_{50} \cdot Eu$) aumentou com a diminuição da vazão, conseqüentemente, com a queda de pressão, indicando o poder classificatório do equipamento, ou seja, com maiores pressões internas o equipamento apresentou maiores poderes em separar partículas menores, caracterizando o melhor efeito em classificar o diâmetro das partículas.

Perda de carga

Na Figura 18, são apresentadas curvas de perdas de carga ocorridas no hidrociclone em função das vazões. Nota-se que a perda de carga foi influenciada pelo aumento da velocidade tangencial do fluxo da suspensão com areia e solo. Assim, com o aumento do efeito centrífugo, criou-se maior turbulência no equipamento que eleva a perda de carga. Verifica-se que as perdas de carga variaram de 4 kPa a 52 kPa para as variações de vazão de $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ em suspensões de areia e solo.

As equações de perda de carga, obtidas em função da variação do fluxo da suspensão com areia e solo e com água limpa (Tabela 8), apresentaram elevados coeficientes de ajuste para o modelo potencial, em conformidade com SOCCOL (2003) e MAILAPALLI et al. (2007). BOTREL (1984) observou que o processo de perda de carga localizada ficou mais bem representado pelo modelo potencial, concordando com CAIXETA (1991), MELO et al. (2000), CRUZ et al. (2007), que também encontraram elevados coeficientes de ajuste ao modelo potencial para perda de carga localizada em equipamentos e acessórios.

TABELA 8. Equações da perda de carga em função da vazão de alimentação para o hidrociclone operando com água limpa, suspensões aquosas de solo e areia.

Fluxo	Equação	R ²
Água limpa	$H_f = 0,0021 Q_a^{3,031}$	0,991
Suspensão com solo	$H_f = 0,0033 Q_a^{2,954}$	0,992
Suspensão com areia	$H_f = 0,0579 Q_a^{2,064}$	0,996

H_f = Perda de carga no hidrociclone (kPa); Q_a = Vazão volumétrica na alimentação ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$).

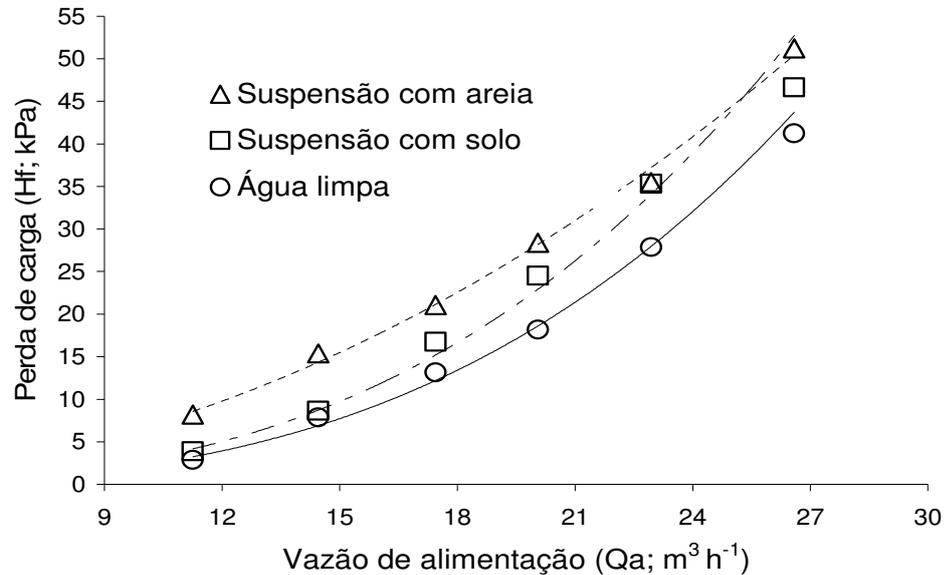


FIGURA 18. Variação da perda de carga em função da vazão de alimentação no hidrociclone operando com água e com suspensões de areia e solo.

Verifica-se que a perda de carga no hidrociclone depende do material particulado em separação, indicando que a areia (de maior granulometria) apresenta maiores valores de perda de carga. Isso pode ser explicado pelo efeito de maior atrito provocado pelas partículas de areia no interior do equipamento.

Comparação do desempenho do hidrociclone operando com Razão de Líquido (RL) a 8% e 4%

Pela Figura 19, verifica-se que a eficiência total (ET) do hidrociclone operando com razão de líquido 8% e 4% diminuiu com o decréscimo da vazão de alimentação, Isso é explicado pelo menor efeito centrífugo em função da menor velocidade terminal das partículas sólidas no interior do equipamento.

Observa-se, ainda que a RL 8% apresentou maiores eficiências totais em relação à RL 4%. Isso implica que com a diminuição da RL, diminui a vazão mássica de sólidos no “underflow”, mesmo que a suspensão se torne mais concentrada em sólidos, a eficiência total mantém-se inferior com o hidrociclone operando com RL 4%.

A eficiência total apresentou uma tendência do comportamento para o modelo linear (Tabela 9), isto é, com o aumento da vazão, conseqüentemente, aumento da queda de pressão, maiores concentrações de sólidos são descarregadas no duto do “underflow”, implicando em maiores eficiências de separação sólido-líquido.

TABELA 9. Equações de eficiência total em função da vazão de alimentação para o hidrociclone operando razão de líquido a 8% e 4%.

Razão de líquido	Equação	R ²
8%	$ET = 3,263 Qa + 0,159$	0,966
4%	$ET = 2,963 Qa + 24,331$	0,964

ET = Eficiência total (%); Qa = Vazão volumétrica de alimentação ($m^3 h^{-1}$).

Para todas as vazões de alimentação, a eficiência total reduziu, em média, 30% quando a razão de líquido diminuiu de 8% para 4%. Diante dessa redução, para a razão de líquido de 4% não foram realizadas as demais determinações apresentadas para o hidrociclone operando com razão de líquido a 8%.

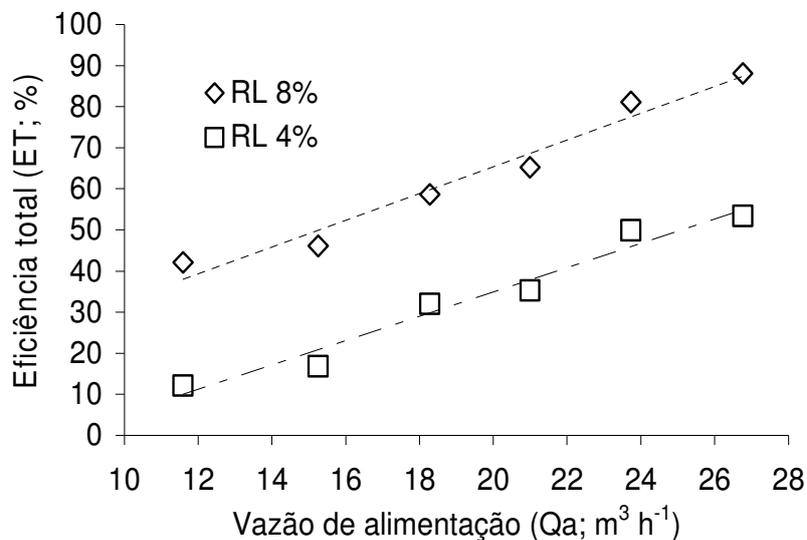


FIGURA 19. Variação da eficiência total do hidrociclone operando com RL 8% e 4% e suspensão de areia para diferentes vazões.

V. CONCLUSÕES

Com base nos dados experimentais obtidos chegou-se às seguintes conclusões:

- A perda de carga máxima no hidrociclone de geometria “Rietema” avaliado foi em média 50 kPa para vazão média máxima de $26,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, independentemente da natureza do material particulado;
- 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 “grosseiras” como a areia;
- O aumento da vazão contribuiu de forma positiva na redução do diâmetro de corte e do diâmetro de corte reduzido;
- A variação do número de Euler foi pequena com o acréscimo da vazão, concomitantemente com a eficiência, indicando que o equipamento deve ser recomendado para operar com máxima vazão não implicando em maiores custos energéticos;
- A redução da razão de líquido proporcionou redução na eficiência total de separação de sólidos suspensos “grosseiros” (areia).

VI. REFERÊNCIAS

- ALLEN, T. **Particle size measurement**. 5. ed. London: Chapman and Hall, 1997. 834p.
- ALVES, A. de F. **Separação de leveduras de fermentação alcoólica em hidrociclones**. 2006. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- ARRUDA, E.B. **Performance de hidrociclones filtrantes com geometria Demco**. 2003. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDES, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669p.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. 2. ed. Campina Grande: CCT/UFPB, 1999. 153p. (estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- BARBOSA, E.A.; KOBOLDT, C.A.A.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Estudo do comportamento de um hidrociclone filtrante de geometria Krebs. **Relatório de Iniciação Científica**. PIBIC/CNPq/UFU. Uberlândia, 2001.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 7. ed. Viçosa: UFV, 2005. 611p.
- BOTREL, T.A. **Hidráulica de microgotejadores e de linhas laterais para irrigação localizada**. 1984. 78f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba, 1984.

CABELLO, F.P. **Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación**. 3. ed. Madri: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

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

CARVALHO, N. de O.; FILIZOLA JUNIOR, N.P.; SANTOS, P.M. C. dos; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL/SIH, 2000. 132p.

CARVALHO, D.F.; MONTEBELLER, C.A.; CRUZ, E.S.; CEDDIA, M.B.; LANA, A.M.Q. Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho-Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 385-9, 2002.

CASTILHO, L.R., MEDRONHO, R.A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. **Minerals Engineering**, Amsterdam, v. 13, n. 2, p. 183-91, 2000.

CAIXETA, A.V. **Perda de carga em tubos e conexões de PVC utilizados em sistemas portáteis de irrigação por aspersão**. 1991. 115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Revista Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília: ABID, n. 54, p. 46-55, 2002.

CHU, L.Y.; CHEN, W.M.; LEE, X.Z. Enhancement of hydrocyclone performance by controlling the inside turbulence structure. **Chemical Engineering Science**, London, v. 57, n. 1, p. 207-12, 2002.

CONEZA, V.F. **Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental**. Madrid, España: Mundi-Prensa, 1997. 412p.

CRUZ, O.C. da; OLIVEIRA, F.G.; RESENDE, P.R.N.; BARRETO, A.C. Perda de carga em reduções concêntricas para diferentes vazões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36.; 2007, Bonito. **Anais...** Bonito: SBEA, 2007. 1 CD-ROM.

DAI, G.Q.; LI, J.M.; CHEN, W.M. Numerical prediction of the liquid flow within a hydrocyclone. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 74, n. 3, p. 217-23, 1999.

DELMÉE, G.J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 346p.

FERREIRA, A.; CUNHA, C. Environmental sustainability of water resources in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Revista Panam Salud Publica**, Washington, v. 18, n. 2, p. 93-99, 2005.

GILBERT, R.G.; FORD, H.W. Operational principles/emitter clogging. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. cap. 3, p. 142-63.

GOMES, R.H.P. **Separação de emulsões óleo-água em hidrociclones**. 2002. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

GUERRA, A.J.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1995. 472p.

KLIMA, M.S.; KIM, B.H. Dense-medium separation of the heavy-metal particles from soil using a wide-angle hydrocyclone. **Journal of Environmental Science and Health**. London, v. 33, p. 1325-40, 1998.

KRAUSE, G.; RODRIGUES, A.F. **Recursos hídricos do Brasil**. Brasília: MMA/SRH. 1998. 33p.

LACERDA, A.F. **Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e infiltrantes**. 2007. 138f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LOPEZ, T.M. Cabezal de Riego. In: CADAHIA LOPEZ, C. (Ed.) **Fertirrigacion: Cultivos hortícolas y ornamentales**. Madrid: Mundi-Prensa, 1998. cap. 6, p. 247-263.

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.

MARTI, S. Analysis of gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones. In: CLAXTON, D.; SVAROVSKY, L.; THEW, M.T. (Eds). **Hydrocyclones**. London: London & Bury Saint Edmunds, 1996. p. 399-421.

MELO, L.J.V.; SILVA, E.L.; FARIA, M.A. de. Perda de carga em conectores utilizados em sistemas de irrigação localizada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. especial, p. 205-14, 2000.

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

PEÇANHA, R.P.; MASSARANI, G. Avaliação do desempenho de hidrociclones. **Revista Brasileira de Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 289-99, 1980.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 3. ed. São Paulo: EESC/USP, 2004. 540p.

RIETEMA, K. Performance and design of hydrocyclones: parts I to IV. **Chemical Engineering Science**, London, v. 15, p. 298-325, 1961.

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

SILVA, M.A.P. da. **Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho**. 1989. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

SILVA, M.A.P.; MEDRONHO, R.A. Um método de determinação de distribuição granulométrica. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 14., 1986, Campinas. **Anais...** Campinas: ABEQ, 1986. p. 267-75.

SILVA, M.A.P.; MEDRONHO, R.A. Modelos que prevêm o desempenho de hidrociclones: uma avaliação crítica. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 16., 1988, Petrópolis. **Anais...** Petrópolis: ABEQ, 1988. p. 351-61.

SMYTH, I.C.; THEW, M.T. A study of the effect of dissolved gas on the operation of liquid-liquid hydrocyclones. In: CLAXTON, D.; SVAROVSKY, L.; THEW, M.T. (Eds). **Hydrocyclones**. London: London e Bury Saint Edmunds, 1996. p. 357-68.

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

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.

SOUZA, F.J. **Análise da influência do meio filtrante no comportamento do hidrociclone filtrante**. 1999. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1999.

SOUZA, F.J.; VIEIRA, L.G.M.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Analysis of the influence of the filtering medium on the behavior of the filtering hydrocyclones. **Power Technology**, Lausanne, v. 107, n. 3, p. 259-67, 2000.

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

THAME, A.C.M. **Água: a iminência da escassez**. São Paulo: SRHSO/SP, p. 1-12, 2000.

TUCCI, C.E.M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

VANZELA, L.S. **Qualidade de água para irrigação na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis - SP**. 2004. 105f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha solteira, 2004.

VIEIRA, L.G.M. **Estudo da performance de hidrociclone filtrante Rietema**. 2001. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

VIEIRA, L.G.M.; BARBOSA, E.A.; FUTIWAKI, L.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Estudo de um hidrociclone filtrante segundo a geometria de Rietema. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 28., 2000, Teresópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEQ, 2001. p. 279-85.

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, 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1996. 246p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Resultado da análise de distribuição granulométrica do solo



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : SOLO Tipo de Produto : Cliente : CEFET Comentários : Calibrado Líquido : Water (eau) Agente dispersante : nenhum Operador : Gustavo Empresa : UFRN Localização : PPGEQ-Lab. Materiais Data : 26/10/2007 Hora : 08:51:41 Índice med. : 1145	Ultrassom : 60 s Concentração : 173 Diâmetro a 10% : 9.11 mu Diâmetro a 50% : 110.04 mu Diâmetro a 90% : 321.24 mu Diâmetro médio : 140.96 mu Fraunhofer Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Não / Não Nb Medida./Limp. : 1024/1024/2 SOP : Padrão ACIL
---	--

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.12	0.32	0.85	1.17	1.72	2.50	3.10	3.43	3.43
q3	0.00	0.02	0.05	0.07	0.07	0.17	0.31	0.29	0.19	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.67	4.25	4.80	5.21
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.43	0.46	0.38
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	5.53	5.77	6.11	6.77	7.59	8.32	8.62	8.90	9.17	9.42
q3	0.32	0.26	0.21	0.20	0.32	0.35	0.33	0.33	0.34	0.34
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	9.68	9.94	10.46	10.97	11.48	11.99	12.51	13.03	13.55	14.08
q3	0.38	0.40	0.43	0.47	0.52	0.56	0.62	0.66	0.71	0.77
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	14.63	15.18	15.75	16.98	19.06	21.38	24.67	27.93	29.49	30.97
q3	0.85	0.89	0.98	1.13	1.43	1.80	2.16	2.43	2.54	2.54
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	34.27	36.93	38.26	39.42	41.57	43.42	44.18	45.05	45.87	46.67
q3	2.46	2.22	2.01	1.85	1.60	1.36	1.22	1.18	1.19	1.23
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	47.48	48.29	49.30	50.33	52.69	53.64	55.62	56.65	57.70	59.86
q3	1.32	1.39	1.52	1.64	1.89	2.13	2.35	2.58	2.72	2.94
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	62.10	64.39	66.75	69.11	71.89	78.40	79.98	88.06	96.22	99.50
q3	3.25	3.52	3.84	4.04	4.19	4.32	4.27	3.89	2.49	1.29
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

APÊNDICE B

Resultado da análise de distribuição granulométrica da areia



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : AREIA2 Tipo de Produto : Cliente : CEFET Comentários : Calibrado Líquido : Water (eau) Agente dispersante : nenhum Operador : Gustavo Empresa : UFRN Localização : PPGEQ-Lab. Materiais Data : 26/03/2008 Hora : 15:01:43 Índice med. : 1180	Ultrassom : 60 s (+durante) Concentração : 170 Diâmetro a 10% : 97.73 mu Diâmetro a 50% : 260.25 mu Diâmetro a 90% : 688.76 mu Diâmetro médio : 329.61 mu Fraunhofer Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Não / Não Nb Medida./Limp. : 1024/1024/2 SOP : Padrão ACIL
---	--

Valores cumulados característicos in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.02	0.06	0.14	0.20	0.32	0.48	0.60	0.67	0.67
q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.07	0.07	0.05	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.67	0.67	0.67	0.67	0.70	0.73	0.86	1.03	1.18	1.29
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.10	0.14	0.14	0.11
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	1.36	1.42	1.50	1.70	1.92	2.11	2.19	2.26	2.34	2.40
q3	0.08	0.07	0.06	0.07	0.10	0.10	0.10	0.09	0.12	0.09
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	2.47	2.53	2.66	2.77	2.88	2.97	3.07	3.16	3.25	3.33
q3	0.11	0.10	0.12	0.11	0.13	0.11	0.13	0.13	0.14	0.13
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	3.42	3.50	3.58	3.75	3.99	4.22	4.49	4.73	4.84	4.96
q3	0.16	0.15	0.15	0.18	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.23
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	5.24	5.55	5.75	5.96	6.51	7.21	7.58	8.08	8.59	9.13
q3	0.24	0.29	0.34	0.38	0.46	0.58	0.67	0.77	0.84	0.94
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	9.68	10.26	10.99	11.76	13.60	14.39	16.13	17.09	18.11	20.32
q3	1.01	1.12	1.24	1.39	1.66	2.00	2.33	2.72	2.99	3.40
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	22.75	25.39	28.25	31.26	34.99	44.49	46.97	60.72	75.92	82.15
q3	3.98	4.59	5.25	5.83	6.36	7.13	7.57	7.49	5.25	2.77
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	86.59	90.40	93.52	95.84	97.45	98.50	99.16	99.55	99.78	99.92
q3	2.42	2.45	2.32	1.96	1.52	1.09	0.75	0.48	0.31	0.20
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

APÊNDICE C

Equações geradas a partir do modelo RRB, cujos coeficientes foram utilizados nos cálculos de diâmetro de corte para o hidrociclone operando com suspensões de areia e solo para as seis vazões testadas neste trabalho.

Suspensão com solo				
Q (m³ h⁻¹)	RRB Alimentação	R²	RRB "Underflow"	R²
26,21	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{34,457}\right)^{1,179}\right]}$	0,993	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{52,145}\right)^{2,156}\right]}$	0,994
23,08	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{30,171}\right)^{1,261}\right]}$	0,992	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{44,999}\right)^{2,099}\right]}$	0,996
19,56	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{27,309}\right)^{1,222}\right]}$	0,991	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{42,675}\right)^{1,983}\right]}$	0,992
16,67	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{26,426}\right)^{1,119}\right]}$	0,995	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{40,826}\right)^{2,072}\right]}$	0,994
13,01	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{24,751}\right)^{1,419}\right]}$	0,993	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{35,313}\right)^{1,831}\right]}$	0,992
10,07	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{24,211}\right)^{1,148}\right]}$	0,997	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{34,319}\right)^{1,754}\right]}$	0,995
Suspensão com areia				
Q (m³ h⁻¹)	RRB Alimentação	R²	RRB "Underflow"	R²
26,97	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{404,323}\right)^{0,741}\right]}$	0,993	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{652,627}\right)^{1,046}\right]}$	0,994
22,78	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{417,112}\right)^{0,689}\right]}$	0,992	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{528,125}\right)^{1,123}\right]}$	0,993
20,54	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{426,423}\right)^{0,654}\right]}$	0,994	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{501,134}\right)^{1,237}\right]}$	0,992
18,21	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{129,294}\right)^{0,623}\right]}$	0,993	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{338,474}\right)^{1,304}\right]}$	0,994
15,88	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{86,447}\right)^{0,578}\right]}$	0,995	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{312,105}\right)^{1,511}\right]}$	0,989
12,43	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{76,223}\right)^{0,612}\right]}$	0,994	$X = 1 - e^{-\left[\left(\frac{dp}{285,095}\right)^{2,021}\right]}$	0,993

APÊNDICE D

Rotina desenvolvida no “software MATHCAD®” para o cálculo da eficiência total (ET) e eficiência total reduzida (ET’). (Exemplo para o hidrociclone operando com suspensão aquosa de solo).

$$\text{rho} := 0.9978 \quad W := 26.20563 \quad c_w := 0.000939 \quad \text{rhos} := 2.70 \quad W_u := 2.2791 \quad c_{wu} := 0.005862$$

$$c_v := \frac{1}{\left[\frac{\text{rhos}}{\text{rho}} \cdot \left(\frac{1}{c_w} - 1 \right) + 1 \right]} \quad c_v = 0.0003472182$$

$$c_{vu} := \frac{1}{\left[\frac{\text{rhos}}{\text{rho}} \cdot \left(\frac{1}{c_{wu}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad c_{vu} = 0.0021743704$$

$$\text{rhoal} := \frac{\text{rho}}{\left[1 - c_w \cdot \left(1 - \frac{\text{rho}}{\text{rhos}} \right) \right]} \quad \text{rhoal} = 0.9983910348$$

$$\text{rhoalder} := \frac{\text{rho}}{\left[1 - c_{wu} \cdot \left(1 - \frac{\text{rho}}{\text{rhos}} \right) \right]} \quad \text{rhoalder} = 1.0015012133$$

$$Q := \frac{W}{\text{rhoal}} \quad Q = 26.2478618951$$

$$Q_u := \frac{W_u}{\text{rhoalder}} \quad Q_u = 2.2756837133$$

$$R_l := \frac{[Q_u \cdot (1 - c_{vu})]}{[Q \cdot (1 - c_v)]} \quad R_l = 0.0865413060$$

$$E_t := \frac{(c_{wu} \cdot W_u)}{(c_w \cdot W)} \quad E_t = 0.5429364489$$

$$E_{tred} := \frac{(E_t - R_l)}{(1 - R_l)} \quad E_{tred} = 0.4996341333$$

APÊNDICE E

Rotina desenvolvida no “software MATHCAD®” para o cálculo do diâmetro de corte (d_{50}) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50}). (Exemplo para o hidrociclone operando com suspensão aquosa de solo).

$$d_{63} := 34.457 \quad n := 1.179 \quad d_{63u} := 52.145 \quad nu := 2.156$$

$$x_a := 1 - e^{-\left[\left(\frac{d}{34.457}\right)^{1.179}\right]} \quad x_u := 1 - e^{-\left[\left(\frac{d}{52.145}\right)^{2.156}\right]}$$

$$1 - e^{-\left[\left(\frac{d}{34.457}\right)^{1.179}\right]}$$

$$0.0342165597701 \cdot e^{-(d \cdot 0.029021679194)^{1.179}} \cdot (0.02902167919 \cdot d)^{0.179}$$

$$1 - e^{-\left[\left(\frac{d}{52.145}\right)^{2.156}\right]}$$

$$0.04134624604 \cdot e^{-(d \cdot 0.0191772940838)^{2.156}} \cdot (0.01917729408 \cdot d)^{1.156}$$

$$d_c := 30 \quad \text{Given}$$

$$\frac{0.5429 \cdot \left[0.04134624604 \cdot e^{-(d_c \cdot 0.0191772940838)^{2.156}} \cdot (0.01917729408 \cdot d_c)^{1.156}\right]}{0.0342165597701 \cdot e^{-(d_c \cdot 0.029021679194)^{1.179}} \cdot (0.02902167919 \cdot d_c)^{0.179}} = 0.5$$

$$\text{Find}(d_c) = 25.7698089395$$

$$d_{cr} := 50 \quad \text{Given}$$

$$\frac{\left[0.5429 \cdot \left[0.04134624604 \cdot e^{-(d_{cr} \cdot 0.0191772940838)^{2.156}} \cdot (0.01917729408 \cdot d_{cr})^{1.156}\right]\right] - 0.0865}{0.0342165597701 \cdot e^{-(d_{cr} \cdot 0.029021679194)^{1.179}} \cdot (0.02902167919 \cdot d_{cr})^{0.179}} = 0.5$$

$$1 - 0.0865$$

$$\text{Find}(d_{cr}) = 27.4147709493$$

APÊNDICE F

Rotina desenvolvida no “software MATHCAD®” para o cálculo da eficiência granulométrica (G) e eficiência granulométrica reduzida (G'). (Exemplo para o hidrociclone operando com suspensão aquosa de solo).

$$d := 35$$

$$dx := 0.0342165597701 \cdot e^{-(d \cdot 0.029021679194)^{1.179}} \cdot (0.02902167919 \cdot d)^{0.179}$$

$$dxu := 0.04134624604 \cdot e^{-(d \cdot 0.0191772940839)^{2.156}} \cdot (0.01917729408 \cdot d)^{1.156}$$

$$dx = 0.0123901632$$

$$dxu = 0.0170774123$$

$$G = 0.5429 \cdot \frac{dxu}{dx}$$

$$G = 0.7482812752$$

$$Gred := \frac{(G - 0.0865)}{(1 - 0.0865)}$$

$$Gred = 0.7244458403$$