

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

***COEFICIENTES DE DESCARGA PARA “MANIFOLDS” E  
PERFIS DE LÂMINA D’ÁGUA EM CANALETAS PARA FINS  
HIDROPÔNICOS***

**ANA CAROLINA FONSECA BORGES THOMAZIELLO**

**CAMPINAS  
FEVEREIRO/1999**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

***COEFICIENTES DE DESCARGA PARA “MANIFOLDS” E  
PERFIS DE LÂMINA D’ÁGUA EM CANALETAS PARA FINS  
HIDROPÔNICOS***

**ANA CAROLINA FONSECA BORGES THOMAZIELLO  
ORIENTADOR: DR. JULIO SATTO**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA EM CUMPRIMENTO PARCIAL AOS  
REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA  
AGRÍCOLA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO ÁGUA E SOLO**

**CAMPINAS  
FEVEREIRO/1999**

**DEDICO:**

***AOS MEUS PAIS E IRMÃO, MEU MARIDO E MEU FILHO,***

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço a Deus pela força e pelas bençãos;*

*À FAPESP pelo apoio financeiro;*

*À Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP;*

*Ao professor Julio Satto pela orientação, atenção e amizade;*

*Ao professor Roberto Testezlaf pela ajuda no inglês, pela amizade e por participar do comitê de orientação;*

*Ao professor Sylvio Luís Honório por participar do comitê de orientação e banca de defesa pelas sugestões que ajudaram a melhorar meu trabalho*

*Ao professor Evaldo por participar do exame de qualificação e banca de defesa de tese e pelas ótimas sugestões;*

*Aos funcionários André e Clóvis (LABIN), o pessoal da oficina do departamento de máquinas principalmente José Maria e Chicão, Aninha e Marta da secretaria da Pós Graduação, sr.*

*Robison, Suzely, d. Cida e sr. Odorico;*

*Em especial ao amigo Gelson pela grande colaboração;*

*Aos amigos: Karina, Clélia, Epaminondas, Cristina, Priscila e Ernanda;*

*A minha família: Joana, Delça, minha avó, sr. Sinval, d. Maria, d. Araci, Alexandre e Sueli;*

*Aos amigos do GEHIDRE: prof. Edson, Christiane e Fernanda que juntas formamos um trio imbatível, Délvio pela ajuda nos desenhos e amizade, Sebastião pela amizade, Túlio por encher o laboratório de alegria, Calhau, Júlio pela assistência nos computadores, Marcelus, Evandro, Miler e Maurício;*

*Aos amigos da FEAGRI: Cabelo, Jorge, Marcos Scatolini, Rogério, Carlão, Yamilia, Gisele e Brod;*

*Em especial os amigos Adriana pela força e João Carlos pelas conversas e companhia;*

*Aos meus pais Otávio e Marlene, meu irmão Fabrício, meu marido Eduardo e meu filho João Henrique.*

## LISTA DE TABELAS

1. Pesquisadores que contribuíram significativamente para o conhecimento da hidroponia .....	8
2. Principais vantagens e desvantagens do sistema hidropônico .....	9
3. Área cultivada em hectares nos principais países produtores .....	13
4. Produtividade de alimentos no cultivo em solo e na hidroponia .....	13
5. Análise de variância para as médias do número de Froude utilizando 3 declividades (1, 2 e 3%), 4 estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e diferentes vazões (0,5 a 5,0 l/min) .....	37
6. Teste de Tukey aplicado às médias do Fr para 3 declividades (1, 2 e 3%), 4 estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e diferentes vazões (0,5 a 5,0 l/min).....	37
7. Número de Fr ocorrido na canaleta na ausência de raízes, declividades de 1, 2 e 3% e vazões variando de 0,5 a 5,0 l/min.....	38
8. Análise de variância para as médias dos desníveis d'água utilizando 3 declividades (1, 2 e 3%), 4 estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e diferentes vazões (0,5 a 5,0 l/min).....	39
9. Teste de Tukey aplicado às médias dos desníveis d'água utilizando 3 declividades (1, 2 e 3%), 4 estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e diferentes vazões (0,5 a 5,0 l/min).....	39
1a. Número de Froude à montante da raiz, fase de transplântio, declividade de 1%, 2% e 3%.....	47
2a. Número de Froude à montante da raiz, fase de 2 semanas após o transplântio, declividade de 1%, 2% e 3%.....	47
3a. Número de Froude à montante da raiz, fase de 3 semanas após o transplântio, declividade de 1%, 2% e 3%.....	47
4a. Número de Froude à montante da raiz, fase de 4 semanas após o transplântio, declividade de 1%, 2% e 3%.....	48
5a. Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.....	48
6a. Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de 2 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.....	48
7a. Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de 3 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.....	49
8a. Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de 4 semanas após o transplântio,	

declividades de 1%, 2% e 3%.....	49
1b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 2 mm .....	57
2b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 2,5 mm .....	57
3b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 3 mm .....	57
4b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 3,5 mm .....	58
5b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 4 mm .....	58
6b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 4,5 mm .....	58
7b. Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 5 mm .....	59

## LISTA DE FIGURAS

1. Esquema ilustrando a classificação dos tipos de escoamento .....	15
2. Esquema da energia total em uma seção .....	19
3. Esquema da perda de carga devido à presença de raízes .....	21
4. Teorema de Bernoulli aplicado a uma partícula na superfície do reservatório (1) e outra na seção contraída do jato (2) .....	22
5. Seção de um canal circular .....	25
6. Reservatório de abastecimento .....	28
7. Canaleta de PVC de 101,6 mm (4") com espaçadores .....	29
8. Vista das raízes de alface na canaleta fixadas aos espaçadores .....	29
9. Esquema dos tripés com altura regulável utilizados como suporte às canaletas .....	29
10. Circuito hidráulico com "manifold" .....	30
11. Moto bomba e reservatório de abastecimento .....	30
12. Esquema do "manifold" .....	31
13. Inversor de frequência utilizado no experimento .....	32
14. Vista do orifício do "manifold" e tomada de pressão na parte superior .....	34
15. Detalhe do piezômetro .....	35
1a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1% fase de transplântio.....	50
2a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de transplântio.....	50
3a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de transplântio.....	51
4a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1% fase de 2 semanas após o transplântio.....	51
5a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de 2 semanas após o transplântio.....	52
6a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de 2 semanas após o transplântio.....	52
7a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1% fase de 3 semanas após o transplântio.....	53
8a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de 3 semanas após o transplântio.....	53
9a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de 3 semanas após o transplântio.....	54
10a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1%	

fase de 4 semanas após o transplântio.....	54
11a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de 4 semanas após o transplântio.....	55
12a. Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de 4 semanas após o transplântio.....	55
1b. $Rey \times Cd$ para orifício de 2 mm de diâmetro .....	60
2b. $Rey \times Cd$ para orifício de 2,5 mm de diâmetro .....	60
3b. $Rey \times Cd$ para orifício de 3 mm de diâmetro .....	60
4b. $Rey \times Cd$ para orifício de 3,5 mm de diâmetro .....	61
5b. $Rey \times Cd$ para orifício de 4 mm de diâmetro .....	61
6b. $Rey \times Cd$ para orifício de 4,5 mm de diâmetro .....	61
7b. $Rey \times Cd$ para orifício de 5 mm de diâmetro .....	62



## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
2.1. HIDROPONIA .....	7
2.2. MOVIMENTO UNIFORME NOS CANAIS .....	14
2.3. PERDA DE CARGA NOS CONDUTOS.....	16
2.4. REMANSO .....	18
2.5. ENERGIA ESPECÍFICA.....	18
2.6. NÚMERO DE FROUDE .....	20
2.7. PERDA DE CARGA LOCALIZADA NAS RAÍZES.....	21
2.8. ORIFÍCIOS .....	22
2.9. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE UMA SEÇÃO CIRCULAR.....	25
2.10. DIMENSIONAMENTO DA SEÇÃO CIRCULAR.....	26
<b>3. MATERIAL E METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
3.1. MATERIAL .....	28
3.2. METODOLOGIA .....	33
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
FASE A.....	37
FASE B.....	41
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>44</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>45</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>46</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>48</b>
<b>ANEXO II</b> .....	<b>58</b>

## RESUMO

A hidroponia é uma técnica de cultivo que permite aliar a obtenção de produtos de melhor qualidade devido à diminuição no uso de produtos químicos bem como a economia dos recursos hídricos, que estão a cada dia mais escassos. No Brasil, é uma tecnologia que vem sendo bastante difundida, principalmente na produção de alface. Apesar de vários trabalhos que vêm sendo desenvolvidos, a maioria destes objetiva principalmente o estudo de soluções nutritivas mais adequadas e outros aspectos agronômicos. O principal objetivo do presente trabalho foi analisar os principais parâmetros hidráulicos em sistemas hidropônicos.

O trabalho foi dividido em duas etapas: na primeira (Fase A), analisou-se a influência de raízes de alface em uma canaleta hidropônica utilizando-se três declividades (1%, 2% e 3%), quatro estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e vazões variando de 0,5 a 5 l/min. Calculou-se o número de Froude (Fr), os desníveis d'água em relação à montante e à jusante das raízes e a profundidade efetiva da lâmina d'água. Na segunda etapa (Fase B), utilizou-se um “manifold”, onde estudou-se as relações entre diâmetro de orifício variando de 2 a 5 mm, diferentes vazões e pressões.

Para a Fase A, concluiu-se que: o escoamento nas canaletas era subcrítico na presença de raízes; o escoamento foi classificado como turbulento já que o número de Reynolds (Rey) foi maior que 500; o Fr diminuiu de acordo com o aumento do volume das raízes e aumentou de acordo com o incremento da declividade e vazão; os desníveis d'água à montante e à jusante tendem a diminuir com o aumento do volume das raízes e que, a partir de um determinado volume, houve a tendência de ocorrência de desníveis negativo (ou seja, o nível de jusante foi maior que o nível à montante); o

volume das raízes interferiu na profundidade efetiva da lâmina d'água. Para a fase B, o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) diminuiu com o aumento do número de Reynolds (Rey) até tender a um valor constante. Obteve-se valores de  $C_d$  variando de 0,63 a 0,95 para orifícios de 2 a 5 mm de diâmetro. Não foi possível verificar a validade das equações existentes de perda de carga para “manifolds”, pois a perda de carga registrada foi insignificante, o que indica que tubos de PVC de 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ ”) podem ser utilizados para os “manifolds” e sugere-se que em sistemas hidropônicos não se utilize diâmetros maiores de orifício associados à elevadas rotações do motor, pois isto acarreta grande perda de água nas canaletas.

## **ABSTRACT**

The application of the hydroponics growing technique allows to obtain products with better qualities, helping to preserve soil and water resources. This technology begins to have a fast spreading in Brazil, mainly in lettuce production. Most of the research done in this area works with nutrients and agronomic aspects. The main objective of this research was to analyze hydraulic parameters in hydroponic open channel system. The hydraulic analysis was divided in phases. The first one (Phase A), it was evaluated the roots growing effects in hydroponics semi circular PVC open for three pipes slopes (one, two, and three percent). In this part the discharge varies form 0.5 to 5.0 l/min. In the Phase B, the relationships between orifice diameter, discharge and working pressure were determined for a 12.7 mm ( ½ inches) inside diameter manifold. Orifice diameters varied from 2 to 5 mm.

For the experimental conditions used in phase A, the flow in the open channels was subcritical and turbulent. The Froude Number was inversely proportional to the root volume and directly proportional to the channel slope and the discharge. The downstream and upstream water levels decreased with the increasing of the root volume. After a determined root volume, the difference between upstream and downstream water levels showed negative values. The root volume affected the effective water depth. In phase B, the discharge coefficient ( $C_d$ ) was inversely proportional to the Reynolds Number, reaching a constant value. Due to the low values of head loss found in the manifold, it was not possible to verify the validity of using empirical head loss equations for manifolds design. However, these values confirmed the possibility to use a 12.7 mm (½ inches) manifold for hydroponics open PVC channels systems.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido a escassez de água, os pesquisadores têm se empenhado na busca de novas tecnologias que permitam melhor aproveitamento deste recurso. Também procura-se obter aumento na produção de alimentos e redução no uso de defensivos químicos.

Como técnica de cultivo que atende estes objetivos, tem-se a hidroponia, já conhecida desde o século XVII, embora sua aplicação comercial tenha ocorrido a partir de 1930 (FAQUIN *et al*, 1996). Nos últimos anos esta técnica tem alcançado algum destaque, pois tem apresentado alta produtividade, oferecendo produtos de melhor qualidade durante o ano todo, e menor uso de produtos químicos.

No Brasil, esta tecnologia vem sendo difundida, principalmente no cultivo da alface. No Estado de São Paulo, onde as propriedades rurais estão cada vez menores e a água vem se tornando mais escassa, este método de cultivo está sendo utilizado com sucesso. Segundo BERNARDES (1996a), a produção de alface através de sistemas hidropônicos já ultrapassa 400 mil unidades por mês no Estado de São Paulo.

Inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de aprimorar essa técnica de cultivo, principalmente pesquisas visando avaliação do comportamento de cultivares, preparo da solução nutritiva e de substratos mais adequados, etc. Entretanto, são poucos os trabalhos que procuram analisar as características hidráulicas do sistema hidropônico, tais como as vazões e declividades das canaletas que visam melhorar a eficiência do sistema.

Se associar-se os resultados já obtidos com pesquisas que informam quais as melhores cultivares, a melhor maneira de manejar uma solução nutritiva e quais os principais valores de

parâmetros hidráulicos, certamente a hidroponia mostrar-se-á como uma ótima alternativa de produção de alimentos. Os principais objetivos do trabalho foram analisar a influência de raízes de alface em canaletas circulares (PVC) para 3 declividades (1%, 2% e 3%), quatro estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e vazões variando de 0,5 a 5 l/min no perfil da lâmina d'água ao longo do canal, determinar os coeficientes de descarga ( $C_d$ ) dos orifícios de diâmetros variando de 2 a 5 mm nos distribuidores de água para as canaletas simulando um sistema hidropônico e verificar a validade das equações de perda de carga existentes para “manifolds”.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo aborda a revisão de literatura referente ao tema do trabalho, sendo que esta se encontra dividida em partes. A primeira abordará os aspectos agrônômicos da hidroponia e as demais, constarão de características hidráulicas do sistema.

### **2.1. Hidroponia**

Em 1699, Woodward citado por BASSO (1993), testou o crescimento de menta em água de diferentes origens: de chuva, do rio e da torneira. Sua conclusão foi a seguinte: “A terra, e não a água é a matéria que constrói os vegetais”. Noventa por cento da matéria seca de quase todas as plantas é constituída de 3 elementos químicos: C, O e H. O carbono é fornecido através do ar, o oxigênio através da água e do ar, o hidrogênio da água e de outros elementos. Nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio e outros nutrientes são retirados do solo. Comprovada a função do solo como provedor de certos elementos químicos, foi natural o início de experiências colocando os elementos na água. (BASSO, 1993).

MALAVOLTA (1980) cita que os alemães Sachs e Knop foram os primeiros a cultivar plantas em meio líquido de semente a semente, usando soluções aquosas com o fornecimento de N, P, K, Ca, Mg, S, Cl e Fe, elementos tidos como indispensáveis na época.

A aplicação comercial começou a partir de 1930, pelo professor William F. Gericke, da Universidade da Califórnia. Na 2ª Guerra Mundial, o exército norte-americano instalou com sucesso unidades de hidroponia em suas bases militares em ilhas do Pacífico, único meio para produção de alimentos frescos aos seus soldados, sob condições totalmente adversas ao cultivo tradicional.

(BASSO, 1993).

Uma retrospectiva do cultivo hidropônico foi listada por STEINER (1985), apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Pesquisadores que contribuíram significativamente para o conhecimento da hidroponia.

Nome autor	Método	Ano
Roberto Boyle	Cultivo em água	1665
John Woodward	Cultivo em água	1699
Henri Lomis Duhamel Dumoncean	Cultivo em água	1758
Nicolas Théodore de Saussure	Cultivo em água	1804
A. F. Wiegmann	Cultivo em água	1842
L. Polstorff	Cultivo em areia	1842
Furstzu Salm-Horstmar	Diferentes substratos	1849
Wilhelm Knop	Cultivo em água	1859
Julius Sachs	Cultivo em água	1859
Jean Baptiste Boussingault	Cultivo em areia	1860

Fonte: STEINER, 1985.

Devido à grande competitividade no mercado, é necessário o desenvolvimento de técnicas que resultem em produtos de melhor qualidade e com menor custo de produção. A hidroponia é uma tecnologia que apresenta estas e várias outras vantagens bem como desvantagens. (Tabela 2).

Além das vantagens apresentadas na Tabela 2, cita-se também a possibilidade de cultivo em locais com solos pobres ou escassos, zonas áridas, regiões tropicais, climas desfavoráveis, regiões com água que apresenta alto conteúdo de sais, regiões de solos erodíveis, pedregosos, etc. CASTILLO & REBOLLEDO (1986) ressalta ainda a importância dos sistemas hidropônicos para o cultivo de hortaliças, flores e plantas ornamentais, plantas medicinais, forragem, produção de sementes certificadas e também de algas em locais não propícios ao cultivo. Devido à facilidade no manejo, com a diminuição da área e simplicidade de operação, apresenta-se como fonte de trabalho para pessoas com alguma deficiência física. Pode também contribuir na conservação de recursos naturais e controle ambiental. Estima-se que as fontes de fosfato tenham duração de



aproximadamente 150 anos e as de potássio, 200 anos. Dado este fato, há necessidade de procurar fontes alternativas de tecnologia de produção de alimentos, já que os métodos tradicionais de produção empregam maior uso de fertilizantes (BERNARDES, 1996b).

**Tabela 2-** Principais vantagens e desvantagens do sistema hidropônico.

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
⇒ Produção em pequenas áreas próximas aos centros consumidores	⇒ Exige assistência ou conhecimento técnico sobre o sistema
⇒ Utilização de baixos volumes de água e com controle de qualidade da mesma	⇒ Risco de perdas por falta de energia elétrica em sistemas automatizados
⇒ Uso de pequenas quantidades de fertilizantes	
⇒ Redução do uso de defensivos agrícolas	⇒ Sistema é prejudicado se a água for contaminada por patógenos
⇒ Redução do número de operações durante o ciclo da cultura	⇒ Falta de conhecimento das técnicas de hidroponia exigindo mão-de-obra especializada
⇒ Antecipação da colheita, devido ao encurtamento do ciclo da planta	⇒ Requer acompanhamento permanente do funcionamento de todo o sistema e controle da solução nutritiva
⇒ Melhor qualidade e melhores preços dos produtos obtidos	
⇒ Produção fora de época, com comercialização mais fácil e melhores preços	⇒ Resistência dos produtores à adoção de novas técnicas.
⇒ Redução dos riscos advindos de adversidades climáticas tais como geada e granizo	
⇒ Dispensa rotação de culturas	
⇒ Rápido retorno econômico	
⇒ Maior produtividade	
⇒ Fixação de mão-de-obra de tradição agrícola	

Fonte: BLISKA JÚNIOR & HONÓRIO (1996); FAQUIN et al. (1996)

Além da hidroponia, existem diferentes maneiras de se cultivar vegetais na ausência do solo, cada um com suas vantagens e desvantagens. Cabe ao produtor a escolha do melhor método de cultivo após analisar fatores como o tempo, investimento financeiro, materiais disponíveis no mercado, clima e outros fatores importantes. De acordo com o substrato utilizado, TEIXEIRA (1996) classifica as técnicas de cultivo em:

- A. Cultivo em água ou nutricultura, na qual as raízes das plantas são contínua ou descontinuamente submersas em solução nutritiva como ocorre na hidroponia;
- B. Cultivo em areia, onde o cultivo se dá em partículas de diâmetro inferior a 3 mm (areia, perlita,

plástico, etc.);

- C. Cultivo em cascalho, na qual o cultivo se dá em partículas de diâmetro superior a 3 mm (cascalho, basalto, plástico, etc.);
- D. Cultivo em vermiculita, sendo que o sistema radicular desenvolve-se em vermiculita pura ou mistura de outros materiais inorgânicos;
- E. Cultivo em lâ-de-rocha, no qual o sistema radicular desenvolve-se em lâ-de-rocha ou fibra de vidro;
- F. Aeroponics: a solução nutritiva é aplicada ao sistema radicular sob pressão, formando um aerossol.

Com relação aos métodos de cultivo hidropônico doméstico e comercial, pode-se classificar alguns:

I. Cultivo em vasos. Pode-se trabalhar de 2 maneiras diferentes:

a). vasos auto-alimentáveis: consta de um vaso com drenagem inferior e um prato, que se coloca sob o vaso. Coloca-se pavio de lâ-de-vidro no orifício de drenagem e no prato, e a solução nutritiva ascenderá por capilaridade pelo pavio.

b). vasos irrigados por gotejamento intermitente: os vasos são preenchidos com materiais leves (turfa, vermiculita, casca de arroz, areia, cascalho) e a solução nutritiva é aplicada via gotejamento individual a cada planta.

II. Técnica do filme nutriente (NFT).

Este sistema foi descoberto pelo inglês Alan Cooper nos anos setenta (TEIXEIRA, 1996) , e define-se como um método de produção no qual a planta desenvolve seu sistema radicular, parcialmente submerso em um fluxo de água reciclada onde estão dissolvidos todos os elementos necessários às plantas. O fluxo de água corrente que circula através do sistema radicular não deve inundá-la por completo.

Aproximadamente 2/3 das raízes devem estar submersas para absorver a água e os nutrientes e 1/3 no ar, absorvendo oxigênio.

É importante manter uma provisão constante de oxigênio à planta, pois caso contrário, cria-se um condição anaeróbia no sistema radicular. Pode causar uma clorose generalizada nas plantas, devido à morte das raízes, e posteriormente o ataque de fungos ao sistema radicular trazendo danos ao cultivo.

O sistema estudado neste trabalho é um modelo NFT, destacando-se o fato de se utilizar água sem a presença de nutrientes.

O sistema NFT funciona da seguinte maneira: a solução nutritiva, é armazenada num reservatório de onde é recalçada para a parte superior do leito de cultivo, passando pelos canais e recolhida na parte inferior do leito, retornando ao tanque. Então, além dos detalhes do leito hidropônico (material, vazão, declividade), a escolha do reservatório, de solução nutritiva e da bomba de recalque são aspectos importantes (TEIXEIRA, 1996). Abaixo, estão listados os principais componentes de um sistema NFT:

- a). Tanque: de fibra de vidro, plástico, cimento, asbesto cimento, ferro ou outro metal.
- b). Bomba: varia em capacidade, dependendo do tipo de cultivo, da área e do sistema de irrigação.
- c). Canal: de polietileno, PVC rígido ou polipropileno.
- d). Suporte do canal: lâminas de ferro galvanizado, terra ou areia.
- e). Sistema de irrigação: composto de uma tubagem principal de polietileno ou PVC rígido e uma tubagem secundária ligada à principal.
- f). Sistema de drenagem: deve estar localizado na parte inferior dos canais.

### III. NFT modificado

Pode-se modificar o sistema NFT colocando-se nas canaletas de cultivo materiais sólidos inertes como areia, vermiculita, cascalho, pedra britada, perlita, lã-de-rocha, etc.

As irrigações podem ser mais espaçadas, variando com a cultura. Sugere-se (RESH, 1992), irrigações de 15 minutos a cada 2 horas. Com irrigações mais espaçadas, usa-se menos eletricidade, proporcionando menor custo de produção.

### IV. Aeroponia

Consiste num método no qual se cultiva as plantas suspensas no ar. As raízes, protegidas da luminosidade, recebem a solução nutritiva de forma intermitente ou gota a gota, de acordo com esquema previamente organizado. Tem a vantagem de ser método simples e que, principalmente, permite melhor aproveitamento de áreas.

a). Aeroponia horizontal: o cultivo se dá em tubos de plástico (PVC) de 12 a 15 cm de diâmetro, em cujo interior passa a solução nutritiva. Os tubos são colocados com inclinação de 1-3%. A solução entra pela parte mais alta do tubo saindo pela outra extremidade. As mudas são

colocadas nos tubos de PVC em perfurações de 3-4 cm do diâmetro e no espaçamento indicado à cultura. Os tubos, com comprimento de 4 m são colocados em grupos, formando linhas seguidas. Os grupos são colocados um em cima dos outros, a 1 m de distância, como se fossem andaimes. O apoio é feito em estruturas metálicas ou de madeira, de preferência móveis. O sistema difere do NFT apenas na disposição. São necessários também um reservatório, uma bomba para o recalque da solução nutritiva controlada por um timer programador e um reservatório (para a solução nutritiva) (TEIXEIRA, 1996).

b). Aeroponia vertical: as plantas são cultivadas em colunas (tubos de PVC de 4") de cerca de 2 m de comprimento. Esses tubos recebem perfurações para adaptação das mudas. As colunas são dispostas paralelamente, deixando-se espaços de 1,40 m entre elas, formando grupos. Entre os grupos se deixa o espaçamento de 1,80 m. Maneja-se a formação dos grupos de modo que a luminosidade e a temperatura sejam as desejáveis para boa produtividade. A solução nutritiva entra pelo alto da coluna, passa ao longo da mesma, é recolhida na parte inferior, é filtrada e retorna ao reservatório (TEIXEIRA, 1996).

Outro fator também de relevada importância num sistema hidropônico, é o aspecto financeiro referente aos custos. Para verificar o consumo de energia de um sistema hidropônico, DRUMOND et al (1998) realizando um estudo na região do Triângulo Mineiro, utilizaram um sistema hidropônico constando de três conjuntos motobombas: o primeiro de 0,33 C.V. operando durante 24 horas atendendo o berçário; o segundo de 0,33 C.V. operando intermitentemente atendendo as bancadas de pré-crescimento e o terceiro de 1,5 C.V. operando intermitentemente atendendo as bancadas de produção. Foram utilizados 2 medidores de energia elétrica cilclométricos e 4 horímetros. Chegaram a um consumo total de energia elétrica durante os 10 meses de condução do experimento de 5.887,40 kWh, com uma média mensal de 588,74 kWh e um total de 1.829,8 m<sup>3</sup> de água, com uma média diária de 5,98 m<sup>3</sup> para a produção de 52.552 plantas. Concluíram que o consumo de energia elétrica nesse sistema hidropônico foi pouco inferior ao consumo médio mensal rural da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, que em 1996, segundo a CEMIG, foi de 593 kWh por propriedade.

Considerando-se o preço do kWh na zona rural paulista de R\$0,07977 (segundo CPFL, informação pessoal), o custo apenas com a energia elétrica encontra-se próximo a R\$470,00 para a produção de 52.552 plantas durante 10 meses de condução do sistema, enquanto que se as mesmas

52.552 plantas forem comercializadas com um preço aproximado de R\$0,60, o lucro será de aproximadamente R\$2.600,00 (considerando-se apenas os custos com energia elétrica).

O custo médio por planta num sistema hidropônico tipo NFT para produção de alface é de aproximadamente R\$0,25 (HONÓRIO, S.L. informação pessoal), sendo que o produto pode ser encontrado no mercado com um preço médio de R\$0,50 a R\$0,60, e em épocas desfavoráveis ao plantio convencional, como no inverno por exemplo, o produto pode ser encontrado até a R\$1,00.

A Tabela 3 mostra os principais países onde a hidroponia tem se desenvolvido, acrescentando-se a Austrália, Rússia, Espanha, México, Nova Zelândia, África do Sul, Kuwait, Singapura, China, Japão, Malásia e Brasil.

**Tabela 3.** Área cultivada em hectares nos principais países produtores

País	Área
Holanda	4000
Inglaterra	1700
Canadá	400
Estados Unidos	240

Fonte: BERNARDES, 1996b.

No Brasil, a principal cultura produzida através de sistemas hidropônicos, é a alface, particularmente no Estado de São Paulo. A Tabela 4 compara a produção entre cultivo em solo e em hidroponia.

**Tabela 4.** Produtividade de alimentos no cultivo em solo e em hidroponia (ton/ha).

Alimento	Solo	Hidroponia
Feijão	1,23	5,19
Batata	1,98	17,28
Alface	1,00	2,35
Tomate	1,85	37,04

Fonte: BERNARDES, 1996b

Portanto, o cultivo hidropônico apresenta-se superior quando comparado ao cultivo tradicional no que concerne à produtividade. Muitos pesquisadores concordam que a hidroponia, considerada como um sistema de produção agrícola, tem grande importância dentro dos contextos ecológico, econômico e social. Consideram que essa importância baseia-se na grande flexibilidade desse sistema. (CASTILLO & REBOLLEDO, 1986).

## **2.2. Movimento uniforme nos canais.**

Neste capítulo serão abordadas características referentes a movimentos em canais, já que no sistema hidropônico estudado o cultivo ocorre em tais estruturas. O fluxo em canais varia no tempo e/ou no espaço. Tomando como critério comparativo o tempo, os escoamentos classificam-se em permanentes e não-permanentes (variáveis).

O escoamento é dito permanente sob o ponto de vista cinemático, se a velocidade local em um ponto qualquer da corrente permanecer invariável no tempo, em módulo e direção. Logo, existe a continuidade de vazão entre as diversas seções do canal. Se a velocidade em um certo ponto varia com o tempo, o escoamento é considerado não-permanente. Neste caso, não existe uma continuidade da vazão. Deve-se entretanto observar que, o fato do escoamento ser permanente ou não, depende da posição do observador em relação a corrente. Assim, o escoamento de um rio em volta de um pilar de uma ponte, é permanente para o observador postado sobre a ponte e variável para o observador em um barco impelido pela corrente (PORTO, 1987).

Considerando-se o espaço como critério comparativo, os escoamentos podem ser “uniforme” e “não uniforme” (ou variados).

O escoamento é uniforme se as velocidades locais (vetoriais) forem paralelas entre si e constantes ao longo de uma mesma trajetória, podendo diferir de uma trajetória para outra. As trajetórias são retilíneas e paralelas, a linha d’água é paralela ao fundo do canal e portanto, a altura d’água é constante. Quando as trajetórias não são paralelas entre si, o escoamento é dito “não-uniforme”, a declividade da linha d’água não é paralela à declividade do fundo e os elementos característicos do escoamento variam de uma seção a outra. O escoamento variado é por sua vez subdividido em “gradualmente variado” e “bruscamente variado”. No escoamento gradualmente variado, os elementos característicos do escoamento variam de forma lenta e gradual ao longo da corrente. Já no escoamento bruscamente variado, há uma variação brusca na altura d’água em uma distância comparativamente pequena. A classificação dos tipos de escoamento pode ser resumida na

Figura 1.

Ainda do ponto de vista classificatório, pode-se distinguir, como nos condutos forçados, dois tipos de escoamentos de acordo com a preponderância ou não das forças viscosas. São os escoamentos laminar ,turbulento e de transição (CHOW, 1959), caracterizados pelo número de Reynolds (Rey), expresso por:

$$Re y = \frac{V.R_h}{\nu} \dots\dots\dots (eq. 1)$$

sendo que:

V: Velocidade média na seção considerada

R<sub>h</sub>: dimensão característica da seção, denominada “raio hidráulico”

v: viscosidade cinemática do líquido

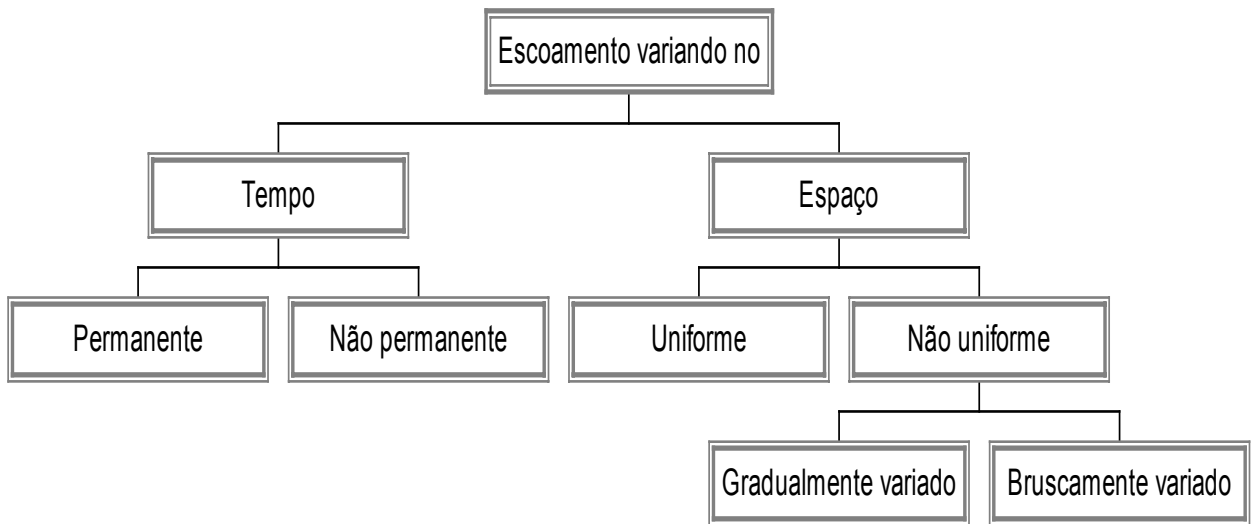


Figura 1. Esquema ilustrando a classificação dos tipos de escoamentos.

Para canais, tem-se  $Rey < 500$  para o escoamento laminar. A grande maioria das aplicações práticas ocorrem para números de Reynolds bem maiores que 500, caracterizando escoamentos turbulentos.

A observação do movimento dos líquidos conduz à classificá-los, segundo critérios das condições de contorno, em escoamento em condutos livres e escoamento em condutos forçados. Diz-se que o escoamento é livre, ou à superfície livre, quando o contorno da veia líquida está em

parte ou na sua totalidade em contato com a atmosfera; ao contrário, o escoamento é “forçado” quando todo o contorno da veia líquida está em contato com a parede sólida (PIMENTA, 1981).

Canal é um conduto longo no qual o líquido esco, estando sua superfície em contato com a atmosfera. O canal é dito aberto quando suas paredes não se juntam acima da superfície livre. Uma das características da hidráulica dos canais está relacionado à presença da superfície livre e à mobilidade desta enquanto que nos condutos forçados, devido ao fato da tubulação ser fechada e o escoamento ser à seção plena, a pressão que atua no líquido é diferente da atmosférica.

Nos condutos livres ou canais, a característica principal é a presença da pressão atmosférica atuando sobre a superfície livre do líquido (PORTO, 1987). Enquadra-se entre os escoamentos livres, o movimento das águas nas canaletas de sistemas hidropônicos.

### 2.3. Perda de carga nos condutos

Para obter-se bons resultados em projetos hidráulicos envolvendo condutos forçados é necessário calcular corretamente a perda de carga nas tubulações. Neste trabalho, procurou-se determinar a perda nos condutos com vazão variável (“manifolds”) e também o coeficiente de descarga dos orifícios distribuidores de vazão para as canaletas.

De modo geral, a perda de carga é influenciada pelos seguintes parâmetros: distância entre as seções (L), viscosidade ( $\mu$ ), massa específica ( $\rho$ ) do fluido e características geométricas do conduto. No caso de condutos circulares as características geométricas são o diâmetro e a rugosidade equivalente das paredes internas do tubo (PIMENTA, 1981).

Através da análise dimensional, é possível estabelecer-se a relação entre essas diversas grandezas, chegando-se à equação de Darcy-Weissbach para o cálculo da perda de carga ( $\Delta H$ )

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (eq.2)$$

na qual V é a velocidade média na seção (m/s), f é o coeficiente de atrito, L o comprimento do tubo (m) e D o diâmetro do tubo (m). Esta fórmula é aplicável aos condutos que apresentam fluidos em movimento permanente e uniforme. É válida para qualquer fluido incompressível, em regime laminar ou turbulento, escoamento livre ou forçado.

Para regime laminar, o coeficiente f pode ser calculado através da relação:



$$f = \frac{64}{\text{Re } y} \dots\dots\dots (\text{eq. 3})$$

Já para regime turbulento liso, o coeficiente  $f$  é calculado pela equação de Blasius:

$$f = \frac{0,3164}{\text{Re } y^{0,25}} \dots\dots\dots (\text{eq.4})$$

Na maioria dos casos de tubulação conduzindo água, o fluxo ocorre no regime de transição e de turbulência completa, utilizando-se a equação de Colebrook-White (eq. 5) para cálculo do coeficiente  $f$ .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re } y \sqrt{f}} \right] \dots\dots\dots (\text{eq. 5})$$

Para maior facilidade de uso, vários pesquisadores apresentaram esta equação na fórmula explícita, para permitir o seu uso direto nas calculadoras. COSSOLOSSO & SATTO (1996) desenvolveram um trabalho com o objetivo de apresentar equações explícitas que determinam o fator de atrito e também comparar os valores deste fator, calculado por meio das diversas equações explícitas, com os obtidos pela equação de Colebrook-White. No total, os autores analisaram 27 equações explícitas e concluíram que para as condições do trabalho, as equações que apresentaram menor desvio médio absoluto foram as de von Karmann (eq. 6) e Swamee e Jain (eq. 7), apresentadas a seguir:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{3,7 \cdot D}{\varepsilon} \right) \dots\dots\dots (\text{eq.6})$$

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} \right) + \frac{5,74}{\text{Re } y^{0,9}} \right]^2} \dots\dots\dots (\text{eq.7})$$

Segundo HOLZAPFEL (1990), a fórmula da perda de carga para tubos lisos pode ser expressa, utilizando-se o número de Reynolds, a equação da continuidade e a equação de Blasius:

$$H_f = 0,316 \cdot \left( \frac{4Q}{\pi Dv} \right)^{-0,25} \cdot \left( \frac{L^8 Q^2}{D^5 \cdot \pi \cdot 2g} \right) \dots\dots\dots (\text{eq.8})$$

onde  $Q$  é a vazão em metros cúbicos,  $g$  a constante gravitacional em metros por segundo ao

quadrado e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água em metros quadrados por segundo. Sendo a viscosidade função da temperatura, pode-se escrever a equação de outra forma:

$$H_f = K_0 \cdot L \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \dots\dots\dots (eq.9)$$

Os valores de  $K_0$  (constante em função da temperatura) são encontrados em tabelas.

## 2.4. Remanso

Segundo BANDINI (1969), remanso é a alteração no perfil da superfície livre nos cursos d'água apresentando uma perturbação do movimento uniforme devido a modificações no fundo ou nas seções transversais.

Em canaletas de sistemas hidropônicos, o remanso pode ser causado pela influência das raízes da planta cultivada, no caso específico a alface. Neste caso, pelo fato das raízes estarem muito próximas, esperou-se que houvesse a interferência do remanso de uma raiz sobre a outra, o que causaria uma diferença de nível à montante e à jusante da raiz.

## 2.5. Energia específica

Denomina-se energia específica de um líquido que escoar em um canal, a energia total por unidade de peso deste líquido em relação ao leito do canal (AZEVEDO NETTO, 1972). Em outras palavras, a energia específica é a distância vertical entre o fundo do canal e a linha de energia, o que corresponde a fazer-se  $Z=0$  na equação 9. Este conceito simples é extremamente importante para se estudar o problema de escoamento em canais (PORTO, 1987).

Muitos fenômenos que ocorrem em canais podem ser analisados utilizando-se o princípio da energia. A energia total por unidade de peso, em uma certa seção do canal, é apresentada pela equação:

$$H = Z + y + \alpha \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (eq.10)$$

na qual:

H: energia total por unidade de peso (m.c.fluido)

Z: altura do fluido do canal em relação ao plano de referência (PRH) (m)

y: distância da lâmina d'água em relação ao fundo do canal (m)

$\alpha V^2/2g$ : distância da lâmina d'água em relação à linha de energia (m).

A taquicarga deve representar a média das energias cinéticas dos diferentes filetes (por unidade de peso). É evidente que o seu cálculo, com o valor da velocidade média, leva a um valor menor que o real, pois a média dos valores de  $v^2/2g$  dos diferentes filetes será maior que o valor de  $V^2/2g$  de velocidade média. Para corrigir essa diferença, multiplica-se o valor de  $V^2/2g$  por um coeficiente de correção  $\alpha$ , maior que a unidade, denominado coeficiente de Coriolis (NEVES, 1989). O valor de  $\alpha$  depende da distribuição das velocidades dos diferentes filetes, e em geral oscila entre 1,05 e 1,15; em correntes muito irregulares, pode variar de 1,1 a 2, porém na prática é usual desprezar-se essa correção, fazendo  $\alpha = 1$ .

Esquemáticamente, pode-se apresentar a energia em um dado ponto através da figura:

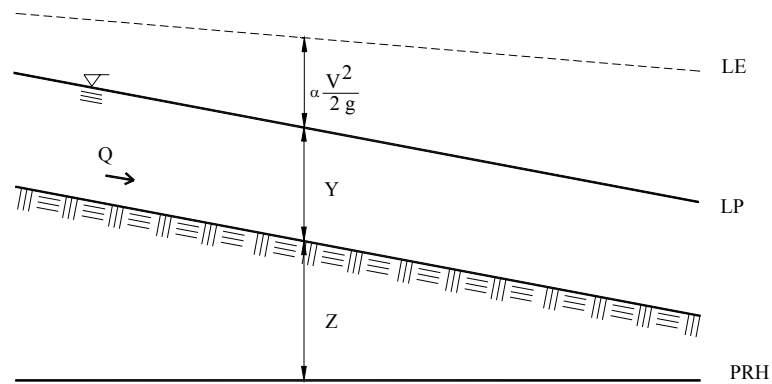


Figura 2. Esquema da energia total em uma seção.

Desta forma, a energia específica para uma determinada seção do canal, para escoamentos retilíneos, é dada por:

$$E = Y + \alpha \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (eq. 11)$$

onde: E é a energia específica (m), Y é a profundidade da lâmina d'água (m),  $\alpha$  é o coeficiente de Coriolis (adimensional), V é a velocidade média no canal (m/s) e g a constante gravitacional (m/s<sup>2</sup>).

Portanto, a energia específica é a soma da altura d'água com a carga cinética. Utilizando a equação da continuidade, a equação anterior pode ser assim escrita:

$$E = Y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \dots\dots\dots (eq.12)$$

na qual: Q é a vazão média (m<sup>3</sup>/s) e A a área do canal (m<sup>2</sup>).

Logo, para uma dada seção do canal e para uma dada vazão, a energia específica é só função da altura d'água.

O conceito da energia específica foi utilizado para o cálculo no número de Froude, que foi um dos parâmetros calculados ao longo do trabalho.

## 2.6. Número de Froude

Número de Froude é um parâmetro adimensional importante na identificação do regime de escoamento. Dependendo da magnitude das forças gravitacional e de inércia, o escoamento é classificado como subcrítico, crítico ou supercrítico (FRENCH, 1987).

Se Fr é menor que 1, o escoamento é subcrítico, ou seja, um escoamento fluvial, onde as forças gravitacionais são preponderantes. Se Fr for maior que 1, o escoamento é supercrítico, ou seja, escoamento torrencial, onde as forças de inércia são dominantes. Se Fr for igual a 1, o escoamento é crítico (PORTO, 1987), ou seja, as forças gravitacionais e de inércia estão em equilíbrio.

O escoamento crítico é definido como o estágio em que a energia específica é mínima, para uma dada vazão ou o estágio em que a vazão é máxima para uma dada energia específica. O

número de Froude é calculado pela expressão:

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gHm} \dots\dots\dots (eq.12)$$

onde Hm é a altura hidráulica (m), V é a velocidade do escoamento (m/s) e g a constante gravitacional (m/s<sup>2</sup>).

O número de Froude foi calculado na primeira fase do projeto (Fase A) para classificação do tipo de escoamento que ocorreu nas canaletas.

### **2.7. Perda de carga localizada nas raízes.**

Em condutos forçados, as perdas localizadas nos acessórios ocorrem de modo irreversível. Em condutos livres, nas singularidades, o comportamento não é o mesmo.

Supondo que haja a presença de uma única raiz na canaleta e considerando um canal de declividade fraca, com possibilidade do remanso propagar-se para a montante e jusante, haverá para montante uma elevação do nível d'água aumentando-se a energia específica até um valor que seja possível superar a singularidade (ponto B, figura 3). Neste trecho, o regime é classificado como subcrítico. Após a singularidade, o nível d'água atinge o ponto C' (seção contraída) quando então o regime torna-se crítico resultando numa segunda curva de vazão. Após esse ponto crítico, o nível d'água volta a se elevar até atingir o ponto C e então o regime volta a ser classificado como subcrítico. O nível d'água retorna ao mesmo valor da profundidade normal do canal a partir do ponto D. Esta situação pode ser mostrada pelo esquema apresentado na Figura 3, a qual mostra que os níveis d'água e de energia nos pontos A e D são iguais a da profundidade normal, com uma perda de carga entre B e C', devido à presença da raiz. Observa-se à montante do ponto B uma curva de remanso do tipo M1, que é caracterizado quando a profundidade é maior do que a normal e o canal tem uma declividade fraca, menor do que a declividade crítica.

Para o caso em estudo, devido às proximidades das raízes, as curvas de remanso se superpõem, tanto à montante quanto à jusante.

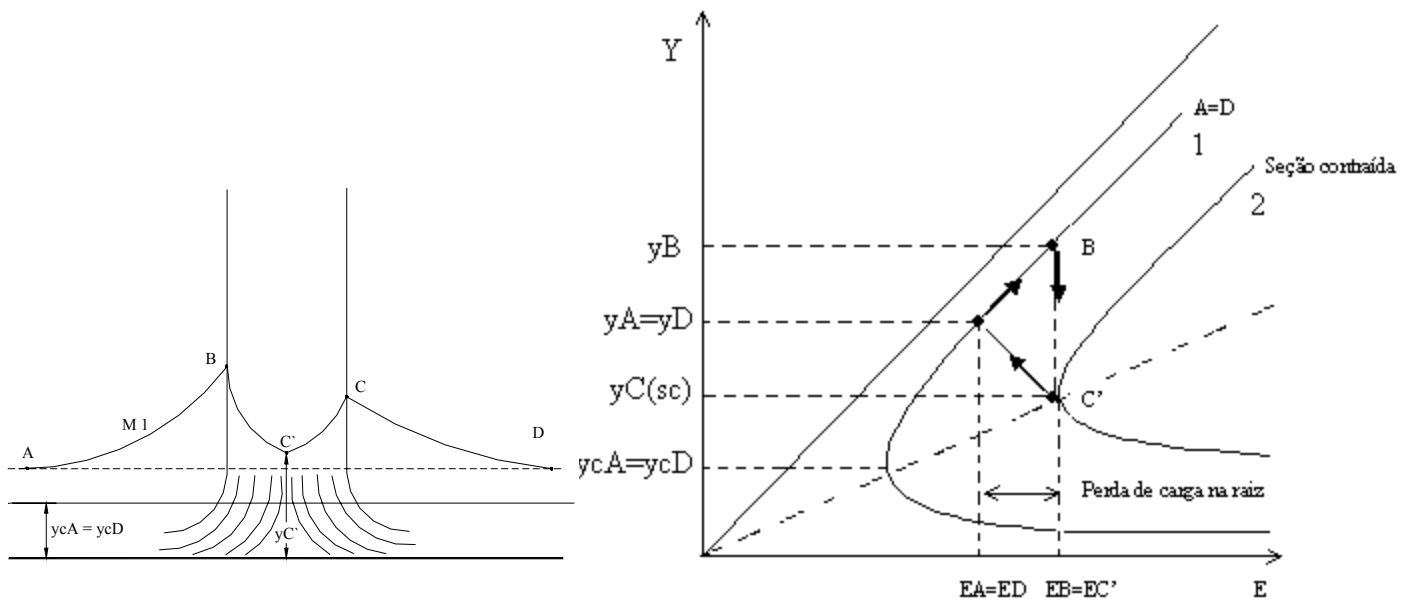


Figura 3 - Esquema da perda de carga devido à presença das raízes.

## 2.8. Orifícios

É importante neste trabalho o estudo de orifícios devido ao fato que, no circuito do “manifold”, a água é distribuída às canaletas através de orifícios.

Orifícios são aberturas de perímetro fechado nas paredes ou fundo de reservatórios, muros de barragens, etc (NEVES, 1989). Segundo PIMENTA (1981), sob o ponto de vista hidráulico, o orifício é uma abertura praticada na parede de um recipiente que contenha um líquido (ou gás) através do qual o fluido escoar sob a ação da energia potencial que possui. O movimento dos líquidos nos orifícios é caracterizado pelo fato de que, toda reserva de energia potencial que ele possui no interior do recipiente, a maior parte, é transformada em energia cinética de um jato com perdas maiores ou menores que dependem de vários fatores. O jato que sai de um orifício sofre uma contração gradual, ficando a sua seção menor que a da abertura, pois, pela inércia das partículas, não pode ser brusca a mudança de direção do seu movimento. A contração da veia diminui a seção útil do escoamento. A velocidade da água pode ser calculada aplicando-se o teorema de Bernoulli (Figura 4) a uma partícula na superfície do reservatório, e a outra na seção contraída do jato:

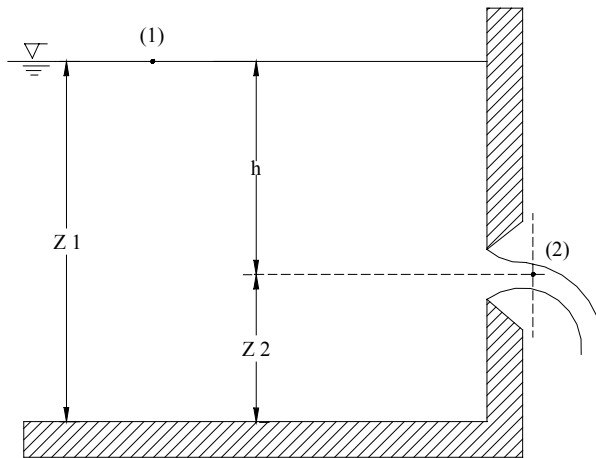


Figura 4- Teorema de Bernoulli aplicado a uma partícula na superfície do reservatório (1) e outra na seção contraída do jato (2).

$$z_1 + 0 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{V_T^2}{2g}$$

onde  $z_1$  é a distância do ponto 1 em relação ao fundo do reservatório,  $z_2$  é a distância do ponto 2 em relação ao fundo do reservatório e  $h$  a diferença de nível entre 1 e 2.

A velocidade teórica do jato será:  $V_T = [2g ( h + \frac{V_1^2}{2g} )]^{1/2}$  ..... (eq.14)

Se a velocidade de descida do nível da água  $V_1$ , no reservatório é desprezível, a velocidade do jato é dada pela fórmula de Torricelli  $V_T = (2gh)^{1/2}$  que pode ser aplicada em qualquer caso, desde que  $h$  (altura d'água sobre o centro do orifício) seja acrescida da taquicarga (energia correspondente à velocidade de aproximação).

Dado à viscosidade do líquido, a velocidade real do jato é um pouco menor que a teórica dada pela fórmula  $V_T = (2gh)^{1/2}$ , a qual deve ser multiplicada pelo coeficiente de velocidade ( $C_v$ ). Este coeficiente é menor que a unidade, valendo em média 0,97 ou 0,98 para a água e para líquidos com velocidades semelhantes.

$$V = C_v.(2gh)^{1/2}$$
 ..... (eq. 15)

Denomina-se coeficiente de contração( $C_c$ ) a relação entre a área da seção contraída do jato ( $A'$ ) e a seção do orifício ( $A$ ). Em média, o valor do coeficiente oscila entre 0,62 e 0,64.

$$C_c = A'/A \dots\dots\dots (eq. 16)$$

A descarga através do orifício pode ser calculada pelo produto da velocidade real do jato, pela área da seção contraída.

$$Q = A'V = C_c.A.C_v.(2gh)^{1/2} = C_d.A.(2gh)^{1/2} \dots\dots\dots (eq.17)$$

onde:

Q: vazão ( $m^3/s$ )

$C_d$ : coeficiente de descarga (adimensional);  $C_d = C_c.c_c$

A: área do orifício ( $m^2$ )

g: 9,81 ( $m/s^2$ )

h: carga no orifício (m.c.a)

O coeficiente  $C_d$ , que é igual ao produto dos coeficientes de velocidade e de contração é denominado coeficiente de descarga ou de vazão, e pode ser definido como a relação entre a vazão real e a vazão teórica [ $A.(2gh)^{1/2}$ ] do orifício. O coeficiente de descarga depende da forma, das condições do orifício, do número de Reynolds e da sua posição e situação em relação à superfície da água, variando de 0,57 a 0,70; para o orifício padrão que é um orifício de bordos agudos, afastado da superfície da água, das paredes e do fundo, o coeficiente de vazão vale 0,61 ou 0,62 (NEVES, 1989). O presente trabalho visou o cálculo do coeficiente de descarga para as condições específicas do experimento. De posse de valores de coeficiente de descarga, o cálculo da vazão é facilitado para o dimensionamento de sistemas hidropônicos.

Segundo PIMENTA (1981), o coeficiente de descarga é determinado experimentalmente medindo-se diretamente a vazão utilizando um recipiente aferido e um cronômetro. Então a vazão é dada pela relação:



$$Q = \text{volume medido diretamente/tempo} \dots\dots\dots (\text{eq. 18})$$

Para obter-se a vazão teórica, mede-se a área A do orifício bem como a carga h. A vazão teórica é expressa pela equação:

$$Q_t = A\sqrt{2gh} \dots\dots\dots (\text{eq. 19})$$

onde  $Q_t$  é a vazão teórica ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), A a área ( $\text{m}^2$ ), g a constante gravitacional ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) e h a carga (m.c.a).

O coeficiente de descarga é obtido dividindo Q por  $Q_t$ , ou seja, através da equação:

$$C_d = \frac{Q}{Q_t} \dots\dots\dots (\text{eq. 20})$$

### 2.9. Parâmetros geométricos de uma seção circular.

Sendo um dos objetivos analisar o escoamento de água em canais circulares na presença de raízes da alface, é necessário apresentar os elementos geométricos da seção ( PORTO, 1987):

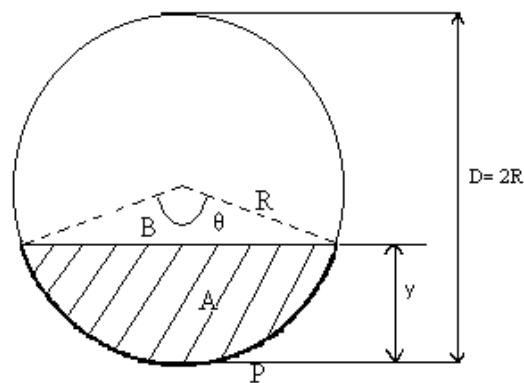


Figura 5- Seção de um canal circular

$$\text{Área molhada} \Rightarrow A = \frac{D^2}{8} (\theta - \text{sen } \theta) \dots\dots\dots (\text{eq. 21})$$

$$\text{Perímetro molhado} \Rightarrow P = \theta \cdot \frac{D}{2} \dots\dots\dots (\text{eq. 22})$$

$$\text{Raio hidráulico} \Rightarrow R_h = \frac{D}{4} \left( 1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta} \right) \dots\dots\dots (\text{eq. 23})$$

$$\text{Profundidade normal} \Rightarrow y_o = D [1 - \cos(\theta/2)]/2 \dots\dots\dots (\text{eq. 24})$$

$$\text{Ângulo central} \Rightarrow \theta = 2 \text{ arc cos } (1 - 2y_o/D) \dots\dots\dots (\text{eq. 25})$$

$$\text{Largura da lâmina d'água} \Rightarrow B = D \text{ sen}(\theta/2) \dots\dots\dots (\text{eq. 26})$$

Estas equações são utilizadas com frequência, quando pretende-se trabalhar com estes tipos de canais.

**2.10. Dimensionamento da seção circular.**

Utilizando-se a equação de Manning, PORTO (1987) usou o método de Bandini para dimensionamento de canais, utilizando-se o coeficiente de forma  $K_1$  (eq.26 )

$$K_1 = \{(\theta - \text{sen}\theta)/8 \cdot [(1 - \text{sen}\theta/\theta)/4]\}^{3/8} \dots\dots\dots (\text{eq.27})$$

e o coeficiente dinâmico M

$$M = (nQ/I_o^{1/2})^{3/8} \dots\dots\dots (\text{eq.28})$$

na qual:

n: coeficiente de rugosidade (adimensional);

Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);

I<sub>o</sub>: declividade (m/m)

Pela relação entre estes dois coeficientes, determina-se o diâmetro do canal circular pela equação

$$D = M/K_1 \dots\dots\dots (eq.29)$$

### **3. MATERIAL E METODOLOGIA**

#### **3.1. Material**

O experimento foi dividido em duas partes: na primeira (Fase A), estudou-se o efeito de quatro estágios de desenvolvimento de raízes de alface em canaletas simulando um sistema hidropônico com diferentes vazões e declividades, e na segunda (Fase B), estudou-se o escoamento d'água num “manifold” verificando as relações entre diâmetro de orifício, vazão e pressão para calcular o coeficiente de descarga de cada diâmetro de orifício para uma tubulação de PVC de 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ ”) de diâmetro.

A primeira fase do projeto (Fase A) constou de um circuito hidráulico constituído de:

- a)- moto-bomba de 0,5 C.V. marca WEG de 3.480 rpm para o bombeamento de água para a canaleta de PVC de 101,6 mm (4”) de diâmetro;
- b)- reservatório de abastecimento com 0,90 m de altura, 0,60 de largura e 1,0 m de comprimento com tranquilizador de tela e argila expandida (Figura 6);

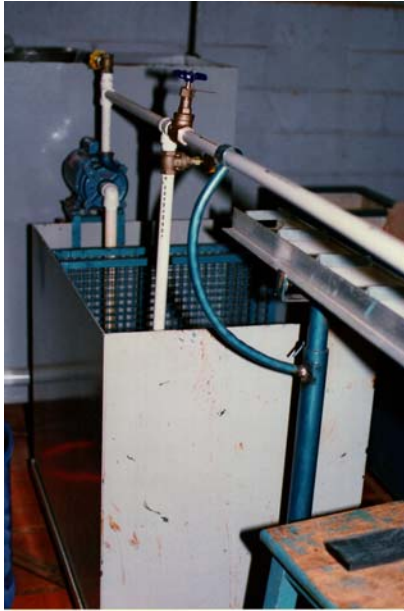


Figura 6. Reservatório de abastecimento

- c)- tubulação de PVC, de 25,4 mm (1") e 19,05 mm (3/4") para sucção e recalque respectivamente, do circuito hidráulico.
- d)- registro de globo de ponta de agulha de 19,05 mm (3/4") necessário para o controle eficiente da vazão, mantendo-a constante durante as medidas das profundidades da lâmina da água ao longo do canal entre as raízes de alface;
- e)- canaleta construída com um tubo de PVC de 101,6 mm (4"), cortado longitudinalmente e com espaçadores de 100 mm de comprimento, colocados de 10 em 10 cm para manter o diâmetro do canal constante. Estes espaçadores também foram utilizados para prender as raízes de alface (Figuras 7 e 8);
- f)- micrômetro utilizado para medir o nível d'água ao longo do canal;
- g)- 3 tripés utilizados como suporte às canaletas, com altura regulável, que possibilita variar a declividade do canal (1%, 2% e 3%) (Figura 9).



Figura 7. Canaleta de PVC de 101,6 mm (4") com espaçadores

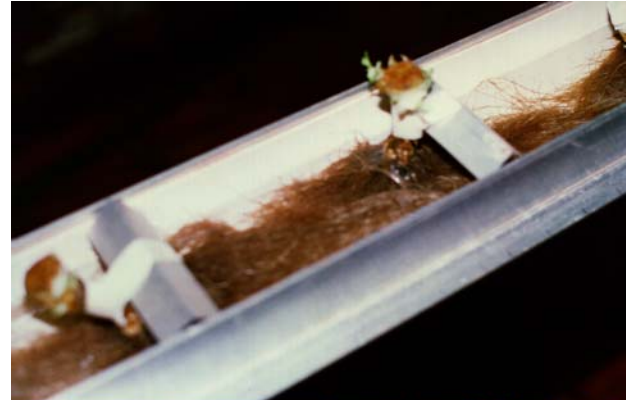


Figura 8. Vista das raízes de alface na canaleta fixadas aos espaçadores

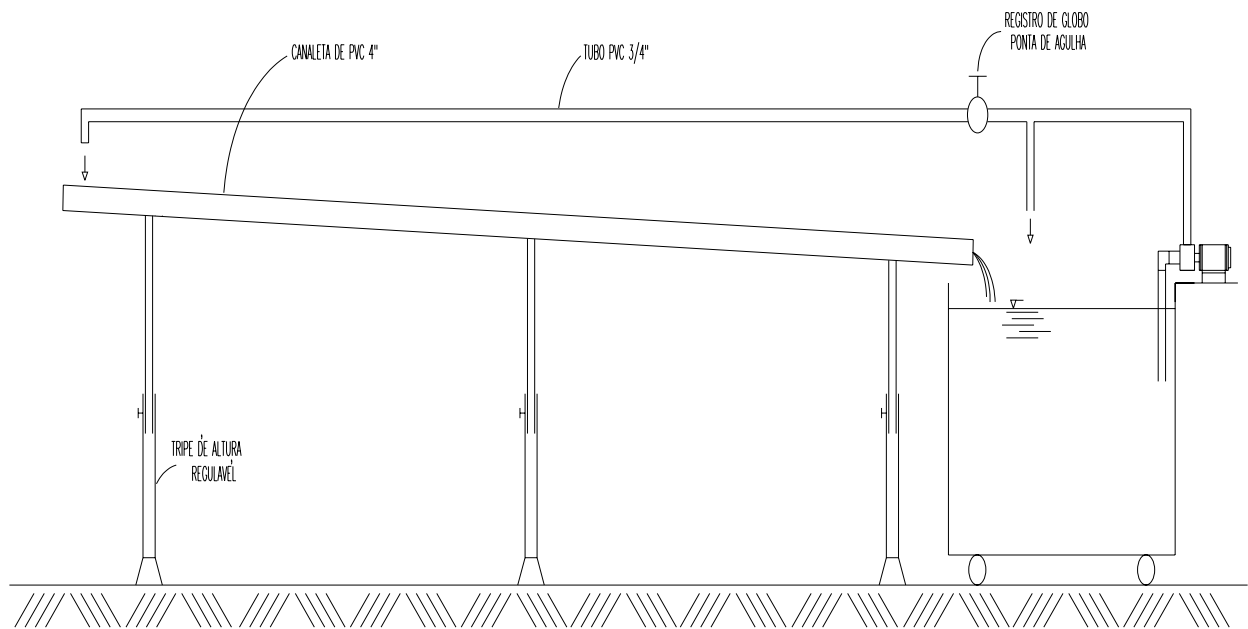


Figura 9. Esquema dos tripés com altura regulável utilizados como suporte às canaletas.

A segunda fase do projeto (Fase B), constou de um circuito hidráulico com “manifold” (Figura 10) com os seguintes componentes:



Figura 10. Circuito hidráulico com "manifold".

a)- moto-bomba utilizada na primeira fase do projeto (Figura 11);



Figura 11. Moto bomba e reservatório de abastecimento.

- b)- reservatório de abastecimento utilizado na Fase A do projeto.
- c)- tubulações de 25,4 mm (1") e 19,05 mm (3/4") também utilizadas na primeira fase do projeto.
- d)- mangueira plástica no recalque para condução da água até o "manifold"
- e)- "manifold", construído com tubo de 12,7 mm (1/2") de diâmetro e 1m de cada lado, com furos na parte inferior do tubo com espaçamento de 0,25 m (distância entre as canaletas) e diâmetro variando de 2 a 5 mm.

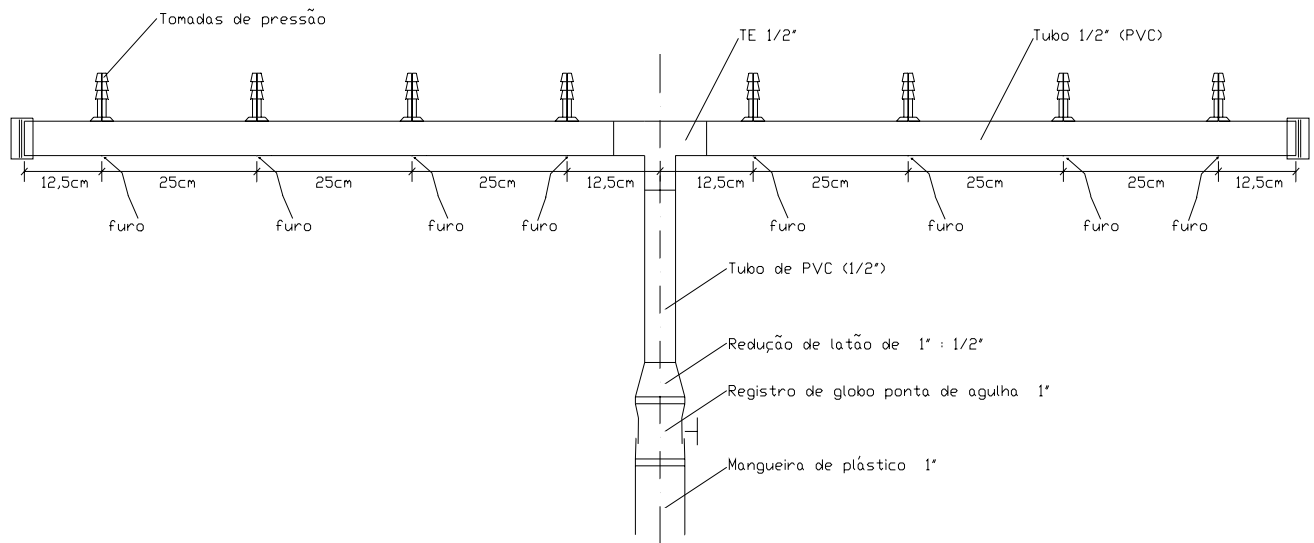


Figura 12. Esquema do "manifold".

Na parte superior do tubo, do lado oposto ao furo do "manifold" (Figura 12), foram instaladas tomadas de pressão para medir as pressões em cada furo.

- f)- Coletores de água do "manifold" construído com canaletas de tubos de PVC de 101,6 mm (4").





Figura 13. Inversor de frequência utilizado no experimento.

- g)- Inversor de frequência marca WEG modelo CFW 07 utilizado para controle da vazão (Figura 13).
- h)- Manômetros de água e ar comprimido e de diferencial de mercúrio para leitura de pressão nos orifícios do “manifold”.
- i)- Proveta plástica e cronômetro para mensuração da vazão.
- j)- Compressor de ar para uso no manômetro de água e ar comprimido.

### **3.2. Metodologia**

Na Fase A do projeto verificou-se o efeito das raízes de alface nas canaletas de PVC, utilizando-se 3 declividades diferentes: 1%, 2% e 3% e diferentes vazões, variando de 0,5 a 5,0 l/min e quatro estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio). Tais valores de declividades e vazões foram escolhidos para serem estudados devido ao fato de terem sido encontrados na maioria da literatura consultada. Na Fase B do experimento, através dos dados coletados de vazão, carga e área do orifício do “manifold”, foi calculado o coeficiente de descarga para os orifícios.

### **a. Efeito das raízes de alface nas canaletas (Fase A).**

A água era armazenada no reservatório e bombeada pelo conjunto moto-bomba . Dali, era distribuída à canaleta, onde localizavam-se as raízes de alface distanciadas 20 cm uma da outra, que é um dos espaçamentos utilizados na produção de alface hidropônica.

Utilizou-se alface de um produtor da região de Campinas, sendo que as folhas das plantas foram retiradas e os caules com as raízes fixados nos espaçadores de alumínio entre as paredes da canaleta. Para cada estágio de desenvolvimento das raízes foi utilizado um lote diferente de plantas, ou seja, as mesmas raízes não foram utilizadas durante todo o experimento.

As raízes estudadas apresentavam quatro fases de desenvolvimento: transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio. Foram comparados os níveis d'água no canal, com e sem raízes.

Dada a desuniformidade existente entre o volume das raízes, embora estivessem no mesmo estágio de desenvolvimento, e mesmo devido à forma com que estas raízes se apresentavam, o desnível médio foi calculado pela média aritmética dos desníveis resultantes destes obstáculos.

A média foi calculada utilizando-se medidas dos níveis de água realizadas na região central da canaleta, onde são considerados desprezíveis os efeitos das extremidades de início e fim da canaleta. Assim, na região central, somente houveram alterações do perfil devido às raízes.

Para caracterizar os desníveis sob a ponto de vista hidráulico, foram calculados os números

de Froude à montante das raízes pela equação  $Fr^2 = \frac{V^2}{g \cdot y_0}$ . Sendo conhecidos os valores da vazão

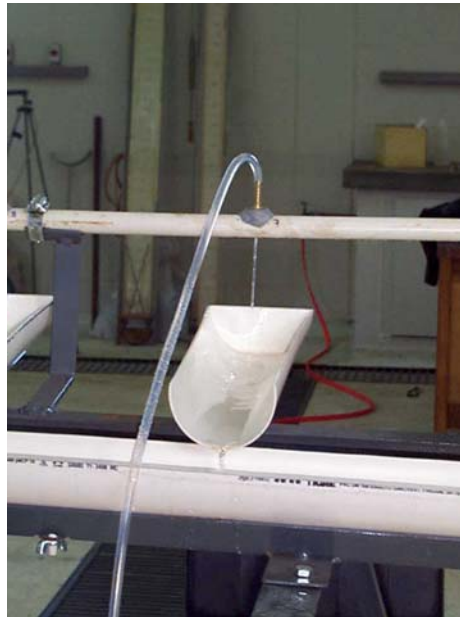
(Q), profundidade normal ( $y_0$ ), declividade do canal ( $I_0$ ), coeficiente de Manning (n) do tubo de PVC, diâmetro do canal circular (D), equação da área molhada (A) da seção circular, coeficiente de forma ( $K_1$ ), coeficiente dinâmico (M) e diâmetro do canal  $D = M/K_1$ , foi possível determinar por interação o número de Froude. Realizou-se a análise de variância para as médias do número de Froude, já que para um mesmo estágio de desenvolvimento das raízes foi possível verificar o aumento do Fr de acordo com a vazão e declividade. Mas de um estágio de desenvolvimento para outro tornou-se difícil afirmar com certeza o comportamento do Fr. Verificado que havia diferença estatística entre os tratamentos e os blocos, aplicou-se o teste de Tukey para análise do

comportamento do Fr de acordo com o estágio de desenvolvimento das raízes.

### **b. Determinação do coeficiente de descarga (Fase B).**

A água era bombeada pelo conjunto moto-bomba para o “manifold” com orifícios e conduzida através da mangueira plástica. Na parte inferior do tubo de PVC de 12,7 mm (½”) localizavam-se os orifícios com diâmetros variáveis de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0 mm. Na parte superior do tubo, do lado oposto aos furos, foram instaladas tomadas de pressão (Figura 14) para medida das cargas em cada furo através de um conjunto de piezômetros com ar comprimido. A água era coletada do “manifold” pela canaleta de PVC de 101,6 mm (4”) e retornava ao reservatório de abastecimento. Foi determinado o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) através da equação 
$$C_d = \frac{Q}{A \cdot \sqrt{2gh}}$$

Figura 14. Vista do orifício no "manifold" e tomada de pressão na parte superior.



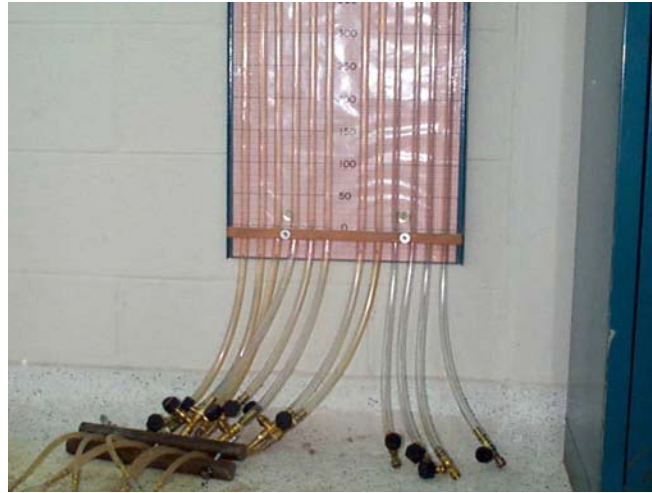


Figura 15 . Detalhe do piezômetro.

Na Figura 15 nota-se a presença de uma estrutura de metal utilizada para leitura das pressões. Devido à oscilação do nível d'água nas mangueiras durante as leituras de pressão, utilizou-se este "estrangulador" que permitiu que o nível d'água permanecesse imóvel durante as leituras. Foram realizadas três leituras de pressão utilizando um manômetro de mercúrio em "U" acoplado ao manômetro de água, permitindo leituras de pressões maiores. Utilizou-se o compressor de ar para injetar ar no manômetro de água. Esta pressão era registrada pelo manômetro de mercúrio. Calculou-se a pressão de cada orifício somando-se duas leituras: a do manômetro de água e a do manômetro de mercúrio, que era convertida para m.c.a, multiplicando-se o desnível entre as colunas de mercúrio pela densidade do mercúrio em relação à água.

Para leitura de vazão utilizou-se uma proveta plástica graduada e um cronômetro. A água era coletada de cada orifício durante um período de 20 s. Realizou-se três repetições para cada orifício operando sob uma mesma rotação do motor. Para o cálculo da vazão utilizou-se a média das três repetições. Para a construção das tabelas contidas no Anexo II, utilizou-se a média geral de vazão, pressão, velocidade média,  $Re_y$  e  $C_d$  dos 8 orifícios.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Fase A

Estudou-se o comportamento das raízes da alface nas canaletas através do cálculo do Fr, do desnível d'água à montante e à jusante das raízes e da profundidade do nível d'água na canaleta.

#### 4.1. Número de Froude

Através das tabelas 1a, 2a, 3a e 4a (Anexo I) observa-se que houve aumento do número de Froude de acordo com o aumento da vazão e da declividade. Tanto o aumento da vazão quanto o aumento da declividade, refletem o aumento da velocidade como pode ser observado pelas equações da continuidade ( $Q = V.A$ ) e de Manning  $\left( Q = \frac{1}{n} . A . R_h^{2/3} I^{1/2} \right)$ . Tal aumento da velocidade implica

diretamente no aumento do número de Froude, como mostra a equação  $Fr^2 = \frac{V^2}{g.y}$

Utilizando-se os dados das tabelas 1a, 2a, 3a e 4a (Anexo I) obteve-se a Tabela 5, que demonstra a análise de variância realizada.

**Tabela 5.** Análise de variância para as médias do número de Froude para 3 declividades (1%, 2% e 3%), 4 estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2 semanas, 3 semanas e 4 semanas após o transplântio) e diferentes vazões (0,5 a 5,0 l/min).

Causa variação	Graus liberdade	Soma quadrados	Quadrado médio	F
Tratamento	3	0,052	0,017	51,51*
Bloco	2	0,004	0,002	6,06*
Resíduo	6	0,002	0,00033	
Total	11	0,058		

Observa-se que o teste foi significativo no nível de 5%, indicando que houveram diferenças entre os tratamentos e entre os blocos. Isto equivale dizer que houve diferença entre o número de Froude de acordo com o estágio de desenvolvimento das raízes, bem como com as diferentes declividades

Aplicou-se o teste de Tukey às médias do número de Froude como mostra a Tabela 6 para verificar o comportamento do Fr de acordo com o estágio de desenvolvimento das raízes. M<sub>1</sub> é referente à média do Fr no estágio de transplântio, M<sub>2</sub> ao estágio de 2 semanas após o transplântio, M<sub>3</sub> ao estágio de 3 semanas após o transplântio e M<sub>4</sub> ao estágio de 4 semanas após o transplântio.

**Tabela 6.** Teste de Tukey aplicado às médias do Fr para 3 declividades (1%, 2% e 3%), 4 estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2 semanas, 3 semanas e 4 semanas após o transplântio) e diferentes vazões (0,5 a 5,0 l/min).

Médias	Fr
M <sub>1</sub>	0,192 a
M <sub>2</sub>	0,188 a
M <sub>3</sub>	0,060 b
M <sub>4</sub>	0,055 b

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade.

Pode-se afirmar que o Fr diminuiu de acordo com o aumento do volume das raízes.

Explica-se a diminuição do Fr com o aumento do volume das raízes, devido às próprias raízes interferirem no movimento d'água, diminuindo a velocidade de escoamento e aumentando a

altura da lâmina d'água.

Pelo teste pode-se observar que não houveram diferenças entre as médias  $M_1$  e  $M_2$  referentes aos estágios de transplântio e 2 semanas após o transplântio respectivamente. Isso indica que não houve diferença entre a interferência causada pelas raízes nesses dois estágios de desenvolvimento.

O mesmo pode ser afirmado com relação às médias  $M_3$  e  $M_4$  referentes aos estágios de 3 e 4 semanas após o transplântio respectivamente, indicando não haver diferença entre a interferência das raízes nesses dois estágios de desenvolvimento. Entretanto, houve diferença na interferência causada pelas raízes nos 2 primeiros estágios de desenvolvimento e nos 2 últimos estágios, sendo que para os estágios de transplântio e 2 semanas após o transplântio, o Fr foi maior que para os estágios de 3 e 4 semanas após o transplântio, o que demonstra menor interferência das raízes, devido o menor volume das raízes nesses estágios iniciais.

A Tabela 7 relaciona os números de Froude obtidos na canaleta na ausência de raízes.

**Tabela 7.** Valores médios do número de Froude ocorrido na canaleta, na ausência de raízes, declividades de 1%, 2% e 3% e vazões variando de 0,5 a 5,0 l/min.

Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,434	0,529	0,595
1,0	0,581	0,710	0,798
1,5	0,690	0,843	0,947
2,0	0,779	0,952	1,070
2,5	0,885	1,046	1,176
3,0	0,924	1,131	1,270
4,0	1,042	1,275	2,233
5,0	1,145	1,400	1,575

Na ausência de raízes observou-se que o Fr é bem superior quando na presença de raízes. Observa-se também o aumento do Fr de acordo com o aumento da declividade e da vazão. Em vazões superiores a 2 l/min e declividade de 3% o Fr chega a ultrapassar a unidade sendo que o regime passa para supercrítico. O regime do escoamento foi classificado como subcrítico nas canaletas para os quatro estágios de desenvolvimento das raízes estudadas.

#### 4.2. Desnível d'água

As Tabelas 5a, 6a, 7a, e 8a (Anexo I) mostram as médias dos desníveis d'água à montante e à jusante das raízes. Observou-se para os estágios de transplântio, 2 e 3 semanas após o transplântio, aumento dos desníveis de acordo com o aumento da declividade e da vazão. Já para o estágio de 4 semanas após o transplântio, observou-se a ocorrência de desníveis negativos, ou seja, o nível à jusante era maior que o nível à montante, indicando a interferência de uma raiz sobre a outra.

Realizou-se a análise de variância para comparação das médias dos quatro diferentes estágios de desenvolvimento das raízes para melhor interpretação dos resultados obtidos apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Análise de variância para as médias dos desníveis d'água utilizando-se três declividades (1%, 2% e 3%), quatro estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e vazões variando de 0,5 a 5,0 l/min.

Causa variação	Graus de liberdade	Soma quadrados	Quadrado médio	F
Tratamentos	3	10,53	3,51	13,33*
Bloco	2	4,46	2,23	8,47*
Resíduo	6	1,58	0,26	
Total	11	16,57		

O teste foi significativo no nível de 5% indicando haver diferenças entre os blocos e os tratamentos. Aplicou-se o teste de Tukey às médias dos desníveis como mostra a Tabela 9.

**Tabela 9.** Teste de Tukey aplicado às médias dos desníveis d'água utilizando-se 3 declividades (1%, 2% e 3%), quatro estágios de desenvolvimento das raízes (transplântio, 2, 3 e 4 semanas após o transplântio) e vazões variando de 0,5 a 5,0 l/min.

Médias	Desníveis
M <sub>1</sub>	2,32 a
M <sub>2</sub>	2,40 a
M <sub>3</sub>	1,10 ab
M <sub>4</sub>	0,13 b

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância.



O teste indicou que não houve diferença significativa entre os desníveis referentes ao estágio de transplântio e 2 semanas após o transplântio, talvez devido ao fato das raízes apresentarem volumes semelhantes. O estágio de 3 semanas após o transplântio também não apresentou diferença com relação aos estágios de transplântio e 2 semanas após o transplântio, bem como com relação ao estágio de 4 semanas após o transplântio. Já o estágio de 4 semanas após o transplântio apresentou diferença quanto aos demais estágios devido ao fato das raízes apresentarem volume maior resultando até em desníveis negativos, na qual houve o efeito do remanso de uma raiz para a raiz anterior. Isto explica-se pelo fato das raízes apresentarem volume maior interferindo no movimento da água. A água entrava em contato à montante da raiz e como dificultava o movimento, o líquido era represado entre duas raízes consecutivas acarretando desníveis negativos.

#### 4.3. Profundidade efetiva do nível d'água

Através das figuras 1a até 12a (Anexo I) observa-se que para todos os estágios houve aumento na profundidade efetiva do nível d'água de acordo com o aumento da vazão. Para o estágio de transplântio e 2 semanas após o transplântio, nota-se que de uma raiz à outra ocorreu aumento gradativo da profundidade efetiva do nível d'água até que se atinja a raiz, a partir da qual ocorre decréscimo desta profundidade e novamente aumento gradativo até atingir a próxima raiz.

Para a fase de 3 semanas após o transplântio o comportamento é quase o mesmo, só que as diferenças de nível à montante e à jusante das raízes são bem inferiores com relação aos estágios anteriores. Isto deve-se à interferência das raízes umas às outras, pois a raiz posterior interfere no movimento d'água causando um remanso que se propaga até a jusante da raiz anterior, fazendo com que haja pequenas variações no nível d'água.

Para a fase de 4 semanas após o transplântio observa-se a ocorrência de níveis à jusante superiores aos níveis à montante, ocasionando desníveis negativos, devendo-se ao fato das raízes apresentarem maior volume interferindo no movimento d'água e fazendo com que as raízes proporcionem um remanso que se propaga até a raiz anterior.

#### **Fase B**

Através das Tabelas 1b, 2b, 3b, 4b ,5b ,6b e 7b (Anexo II), observou-se o aumento da vazão, velocidade e número de Reynolds à medida que se aumentava a rotação do motor, e houve um

decréscimo do coeficiente de descarga ( $C_d$ ) até que este atinja um valor constante.

Os gráficos obtidos plotando-se  $Rey \times C_d$  concordam com aquele mostrado por GILES (1967), que mostra a tendência do  $C_d$  diminuir com o aumento do  $Rey$  até que se atinja um valor constante.

Segundo PIMENTA (1981), o  $C_d$  inicialmente tende a aumentar passando por um valor máximo que corresponde a  $Rey$  aproximado de 350 e posteriormente diminuir tendendo assintoticamente para um valor constante na região dos  $Rey > 10^5$ . As figuras 1b, 2b, 3b, 4b, 5b, 6b, e 7b (Anexo II) ilustram o comportamento do  $C_d$  em relação ao  $Rey$ .

Observa-se uma tendência a diminuição do  $C_d$  de acordo com o aumento do diâmetro. As tabelas em anexo (1b a 7b) também indicam uma diminuição do  $Rey$ , da velocidade, da pressão e da vazão de acordo com o aumento do diâmetro dos orifícios.

Para o diâmetro de 2,5 mm, observou-se um comportamento um pouco discrepante com relação à curva  $Rey \times C_d$  comparando-se com os outros diâmetros de orifício. No gráfico referente a esta curva, observou-se uma tendência de crescimento do  $C_d$  à medida em que aumentava o  $Rey$  diferentemente das outras curvas referentes aos outros diâmetros. Mas os valores de  $C_d$  são muito próximos, e talvez seria mais correto afirmar que a curva tendeu a ter um comportamento linear do que uma curva indicando crescimento do  $C_d$  de acordo com o aumento do  $Rey$ . Se se dispusesse de dados referentes à pressões menores, talvez pudesse obter uma curva semelhante às outras.

Durante a condução do experimento, observou-se que à medida que aumentava a rotação do motor, havia um aumento da velocidade do jato de água, o que causou maior impacto do jato com as paredes dos coletores. Para diâmetros inferiores a 3,5 mm até a rotação de aproximadamente 1600 rpm, esse efeito não era muito significativo, mas para diâmetros superiores a 4 mm a rotações superiores a 1500 rpm aumentava-se a intensidade dos impactos. Esta situação dificultou a coleta de água nos orifícios para medição das vazões e devido a este fato, não utilizou-se rotações superiores a 1800 rpm, mesmo sendo o motor de 3600 rpm.

Quanto à pressão, observou-se um aumento à medida em que se aumentou a rotação do motor para um determinado diâmetro de orifício, mas não observou-se variações consideráveis de um orifício para outro, podendo considerar-se a pressão idêntica para os 8 orifícios. Esperava-se um comportamento diferente, ou seja, pressões maiores nos orifícios próximos à entrada de água (orifícios 4 e 5) e um decréscimo de pressão à medida em que se caminhava para as extremidades (do orifício 4 para o orifício 1 e o orifício 5 para o orifício 8). Mas não observou-se diferenças

nas pressões, indicando que não houve perda de carga significativa, talvez devido à pequena extensão do “manifold”. Devido a este fator, não foi possível verificar a validade das equações existentes de perda de carga para “manifolds”, que era um dos objetivos do trabalho.

Quanto à variação de pressão, observou-se que as diferenças entre os oito orifícios foram mais visíveis nos diâmetros maiores do que nos diâmetros menores, mas esses valores continuavam apresentando pequenas variações na ordem de milímetros.

Para o “manifold” estudado, pode-se considerar que não houve perda de carga significativa e que a pressão foi praticamente a mesma para os oito orifícios, podendo-se utilizar tubos de PVC de 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ ”) para “manifolds” em instalações hidropônicas.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1). Influência das raízes de alface na canaleta

- o Fr decresce e é inversamente proporcional ao volume das raízes, mesmo não havendo diferenças entre os estágios de transplântio e 2 semanas e entre os estágios de 3 e 4 semanas após o transplântio, devido à semelhança de volume das raízes nesses estágios;
- o movimento nas canaletas na presença de raízes foi classificado como subcrítico;
- em relação à preponderância ou não de forças viscosas, o escoamento é classificado como turbulento, já que os valores de Rey encontrados foram maiores que 500;
- os desníveis d'água à montante e à jusante decrescem de acordo com o aumento do volume das raízes;
- a partir de um determinado volume das raízes ocorrem desníveis negativos entre montante e jusante, ou seja, os níveis à jusante foram maiores que os à montante;
- para os 3 primeiros estágios de desenvolvimento das raízes, observou-se aumento da profundidade efetiva do nível d'água até atingir a raiz. A partir daí, houve decréscimo da profundidade e logo após aumento gradativo até atingir a outra raiz. Para o estágio de 4 semanas após o transplântio, como ocorrem desníveis negativos, observou-se a ocorrência de níveis à jusante superiores aos níveis à montante da raiz.

### 5.2). cálculo do coeficiente de descarga para os orifícios

- foi possível realizar o cálculo do coeficiente de descarga obtendo-se  $0,63 \leq C_d \leq 0,95$  para

diâmetros dos orifícios  $5 \text{ mm} \leq d \leq 2\text{mm}$ . Com esses valores, é possível para determinados valores de pressão e diâmetro de orifício calcular a vazão mais adequada;

- não foi possível verificar a validade das equações existentes de perda de carga para “manifolds” pois a perda de carga registrada foi insignificante, o que indica que tubos de PVC de 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ ”) podem ser utilizados para os “manifolds”;
- sugere-se que em sistemas hidropônicos não se utilize diâmetros maiores de orifício associados à elevadas rotações de motor, pois isto acarretaria grande perda de água nas canaletas.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudo da energia específica em função do formato, posição e volume das raízes na canaleta;
- Acompanhamento do comportamento das raízes na canaleta de acordo com o desenvolvimento destas, desde a fase de transplante até a época da colheita utilizando também solução nutritiva;
- Estudo do coeficiente de descarga utilizando “manifold” com diâmetros de tubos diferentes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPI, A & TOGNONI. **Cultivo en invernadero**. Ediciones Mundi-Prensa. Madri, 1984.
- AZEVEDO NETTO, J.M. de. **Manual de Hidráulica**. v.2. 5 ed. São Paulo. Editora Edgard & Blücher Ltda, 1972. 825 p.
- BANDINI,A. **Hidráulica**. v.1. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1969. 481 p.
- BASSO, E.N. **Hidroponia: técnicas e implantação comercial do cultivo da alface**. Estação experimental de hidroponia. Charqueada, 1993.
- BERNARDES, L.J.L. **Hidropomanias & Cia**. Ano I, março/96, n.1. Charqueada, 1996a.
- BERNARDES, L.J.L. **Hidropomanias & Cia**. Ano I, abril/96, n2. Charqueada, 1996b.
- BLISKA JÚNIOR, A. & HONÓRIO, S.L. **Cartilha tecnológica: hidroponia**. Campinas, 1996.
- CASTILLO, F.S. Del & REBOLLEDO, E.R.E. **Hidroponia: principios y metodos de cultivo**. Universidad Autonoma Chapingo. México, 1986.
- CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**. New York, McGraw-Hill, 1959, 680 p.
- COSSOLOSSO, M.A. & SATTO, J. **Equações explícitas de Colebrook-White**. II Congresso Latino Americano de Engenharia Agrícola/ XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 22 a 26 de julho de 1996. P. 207. Trabalho completo em CD-ROOM, Bauru, 1996.
- DRUMOND, L.C.D.; FERNANDES, A.L.T; SILVA, W.J.; COUTINHO, A.C.; PRATA, H.; CORSINO, R.J.; SOUZA, M.P. **Uso potencial da hidroponia para produção de alface (*Lactuca sativa* L) em condições comerciais**. In: XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...** vol. 1. Poços de Caldas, 1998.
- FAQUIN, V.; FURTINI NETO,A & VILELA, L.A. **Produção de alface em hidroponia**. Lavras, 1996.

- FRENCH, R. H. **Open channel hydraulics**. McGraw-Hill. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo, 1987.
- GILES, R.V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. Ed. Bisordi Ltda. São Paulo, 1967.
- HOLZAPFEL, E.; MARINO, M.A.; VALENZUELA, A. **Drip irrigation nonlinear optimization model**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. v.116, n.4. Chile, 1990. p.479-496.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, 1980. 251 p.
- NEVES, E.T. **Curso de hidráulica**. 2 ed. Porto Alegre. Editora Globo, 1989. 577 p.
- PIMENTA, C.F. **Curso de hidráulica geral**. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara . 4 ed. 1981. 482 p.
- PORTO, R. de M. **Escoamento em superfície livre: regime permanente**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1987. Apostila.
- RESH, H.M. **Cultivos hidroponicos: nuevas técnicas de producción**. Ediciones Mundi-Prensa, 3<sup>a</sup> ed. Madrid, 1992.
- STEINER, A.A. **The history of mineral plant nutrition till about 1860 as source of the origin of soilless culture methods**. Journal Soilless culture, v.1 n.1. 1985.
- TEIXEIRA, N.T. **Hidroponia: uma alternativa para pequenas áreas**. Editora Agropecuária. Guaíba, 1996.

## **ANEXO I**



**Tabela 1a.** Número de Froude à montante da raiz, fase de transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,108	0,112	0,141
1,0	0,118	0,141	0,163
1,5	0,138	0,164	0,212
2,0	0,158	0,189	0,208
2,5	0,171	0,207	0,238
3,0	0,184	0,222	0,245
4,0	0,203	0,239	0,270
5,0	0,223	0,261	0,293

**Tabela 2a.** Número de Froude à montante da raiz, fase 2 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,093	0,138	0,160
1,0	0,107	0,102	0,187
1,5	0,124	0,158	0,215
2,0	0,137	0,179	0,228
2,5	0,155	0,187	0,231
3,0	0,161	0,198	0,250
4,0	0,178	0,222	0,257
5,0	0,201	0,318	0,313

**Tabela 3a.** Número de Froude à montante da raiz, fase 3 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,026	0,044	0,052
1,0	0,030	0,052	0,065
1,5	0,040	0,058	0,066
2,0	0,048	0,060	0,074
3,0	0,058	0,074	0,087
5,0	0,067	0,083	0,102

**Tabela 4a.** Número de Froude à montante da raiz, fase 4 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,027	0,035	0,039
1,0	0,036	0,049	0,050
1,5	0,043	0,048	0,054
2,0	0,050	0,058	0,061
3,0	0,055	0,071	0,074
5,0	0,065	0,081	0,087

**Tabela 5a.** Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,84	2,30	2,81
1,0	1,02	2,26	3,19
1,5	0,95	2,39	3,28
2,0	0,97	2,27	3,33
2,5	0,91	2,34	3,49
3,0	1,06	2,47	3,88
4,0	1,04	2,59	4,18
5,0	1,05	2,69	4,30

**Tabela 6a.** Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de 2 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

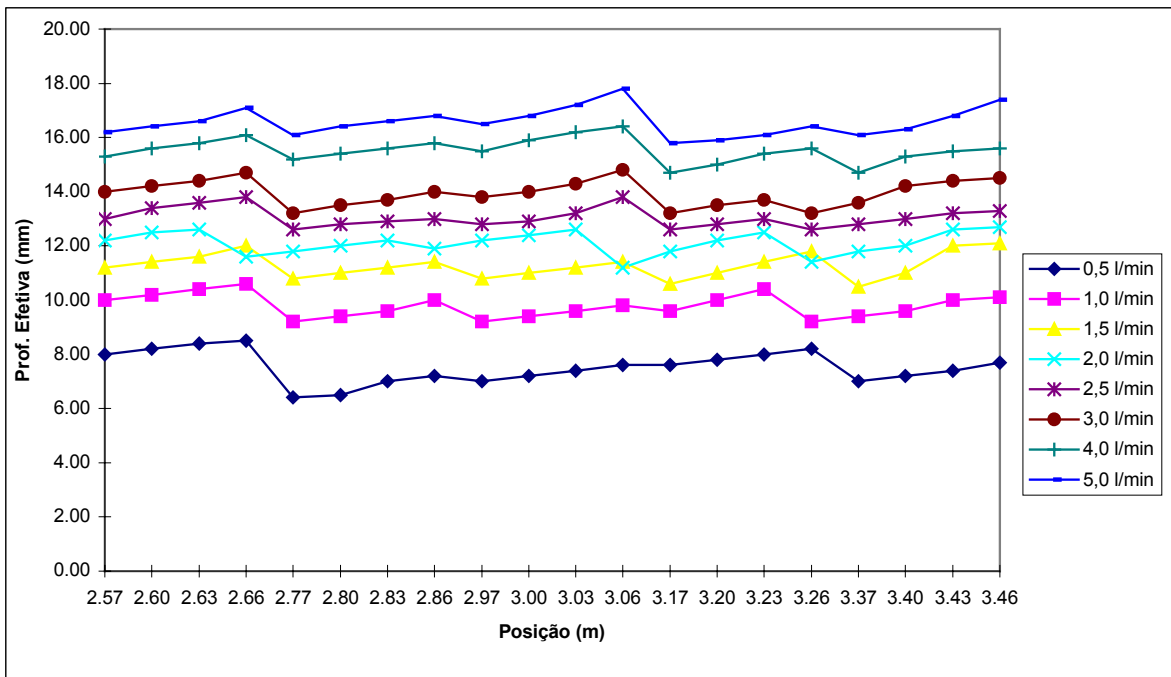
Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	1,14	1,67	2,29
1,0	1,30	2,36	2,75
1,5	1,36	2,50	2,88
2,0	1,32	2,40	3,17
2,5	1,37	2,72	3,65
3,0	1,44	2,73	3,78
4,0	1,42	2,78	4,04
5,0	1,13	3,11	4,21

**Tabela 7a.** Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de 3 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

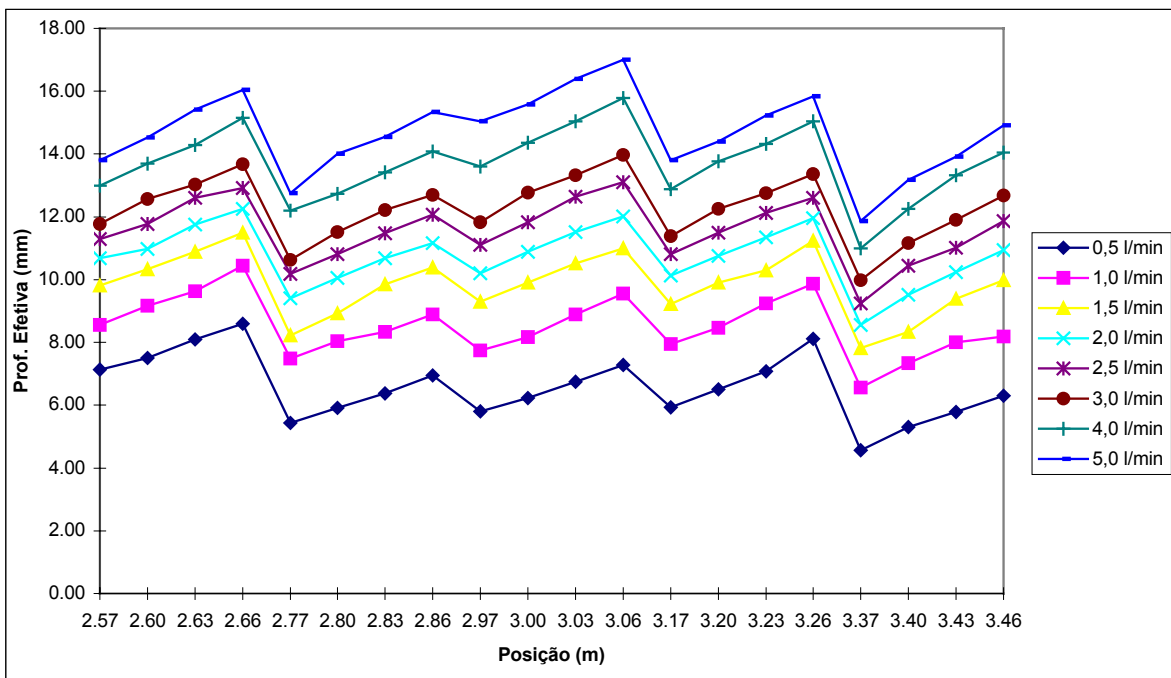
Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	0,45	0,96	1,24
1,0	0,59	0,23	0,56
1,5	0,76	1,00	1,88
2,0	0,77	1,26	1,77
3,0	0,63	1,26	2,28
5,0	0,55	1,39	2,10

**Tabela 8a.** Média dos desníveis d'água (cm) entre montante e jusante das raízes, fase de 4 semanas após o transplântio, declividades de 1%, 2% e 3%.

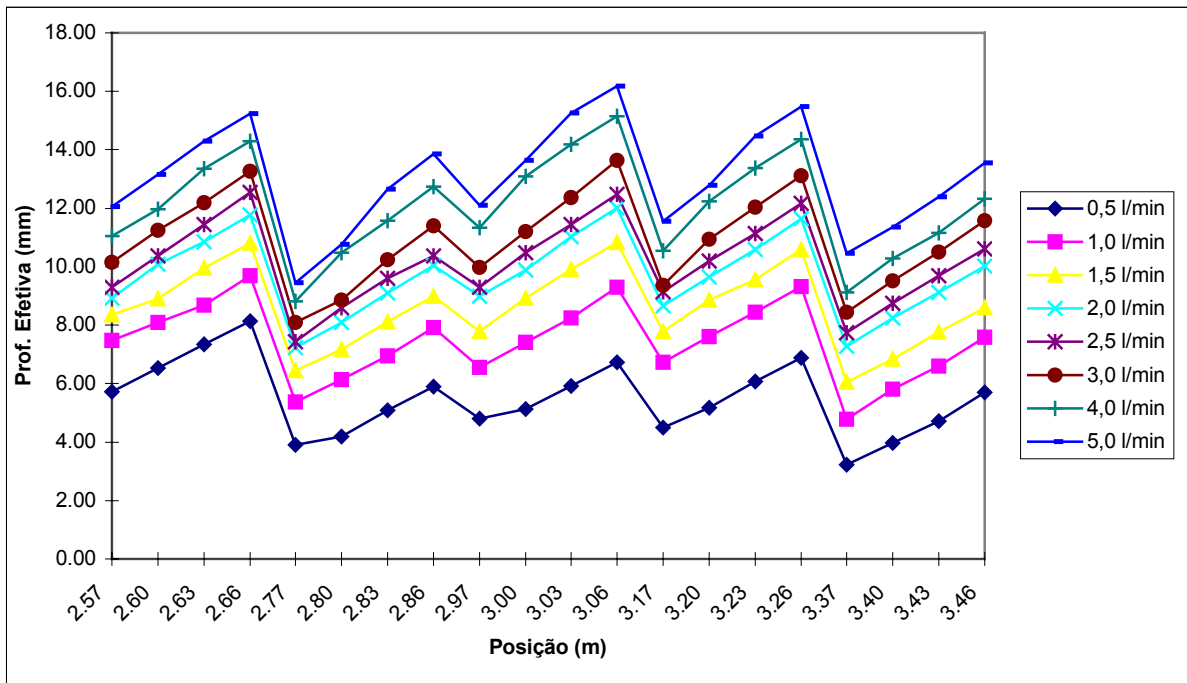
Vazão (l/min)	Declividade		
	1%	2%	3%
0,5	-0,42	-0,51	-0,92
1,0	-0,28	-0,58	-0,90
1,5	0,22	0,29	0,74
2,0	0,54	0,48	0,76
3,0	0,19	0,34	1,16
5,0	-0,25	0,30	1,17



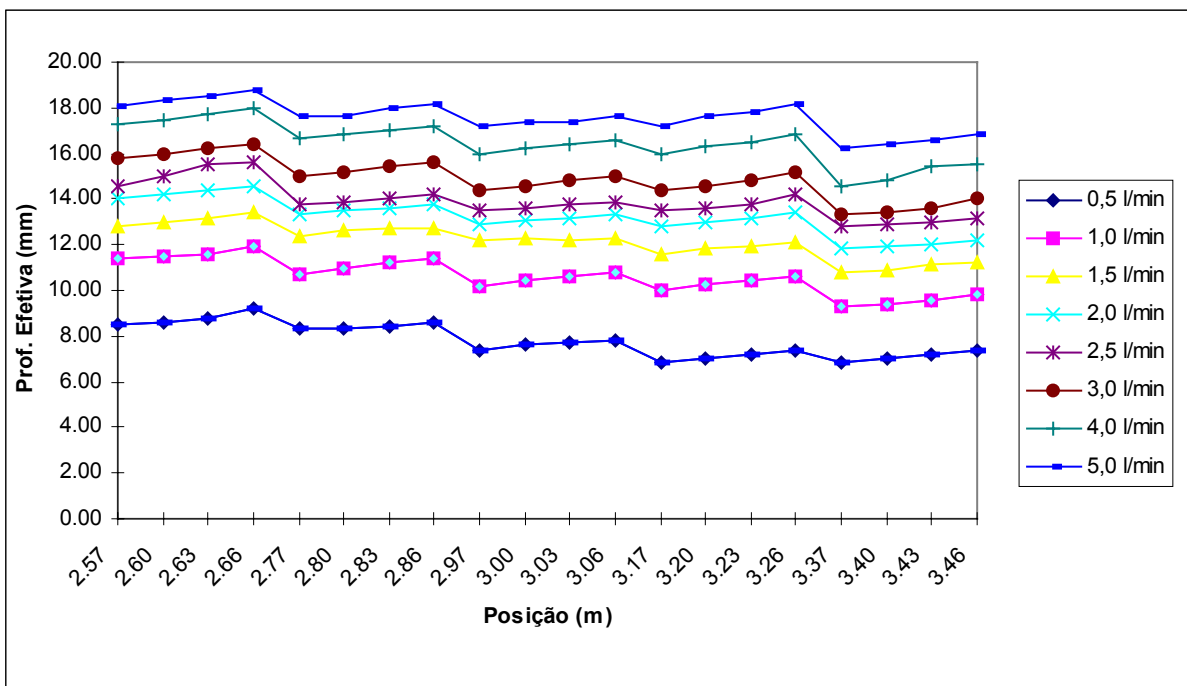
**Figura 1a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1% fase de transplântio.



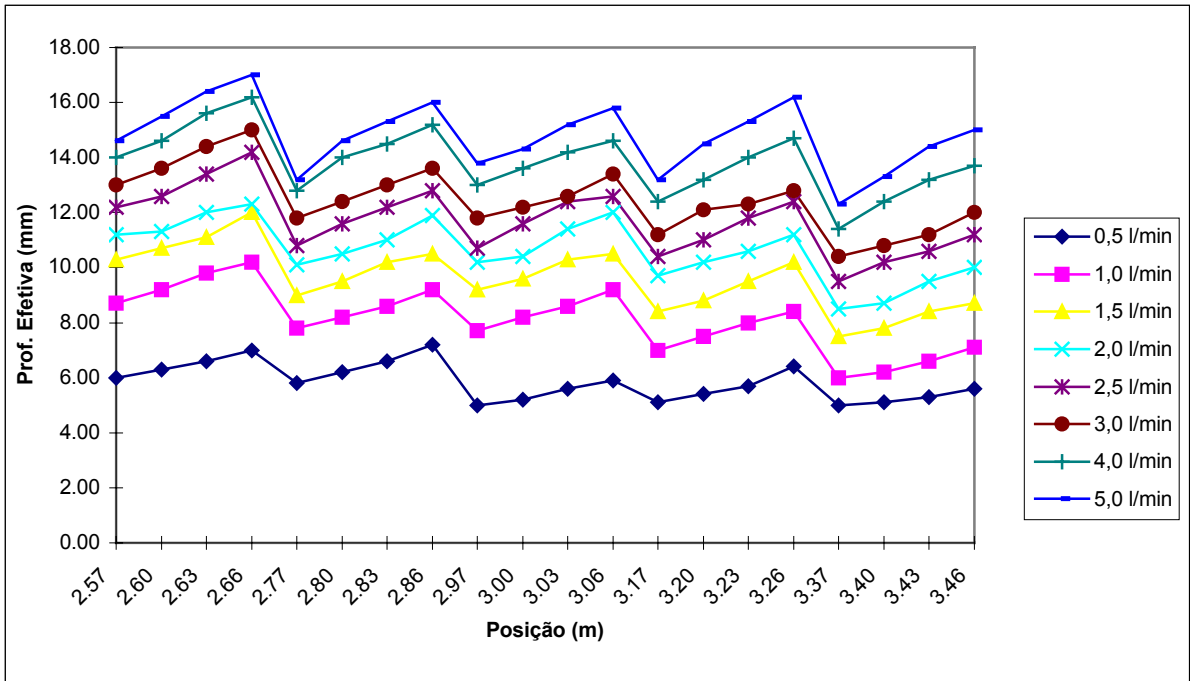
**Figura 2a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de transplântio.



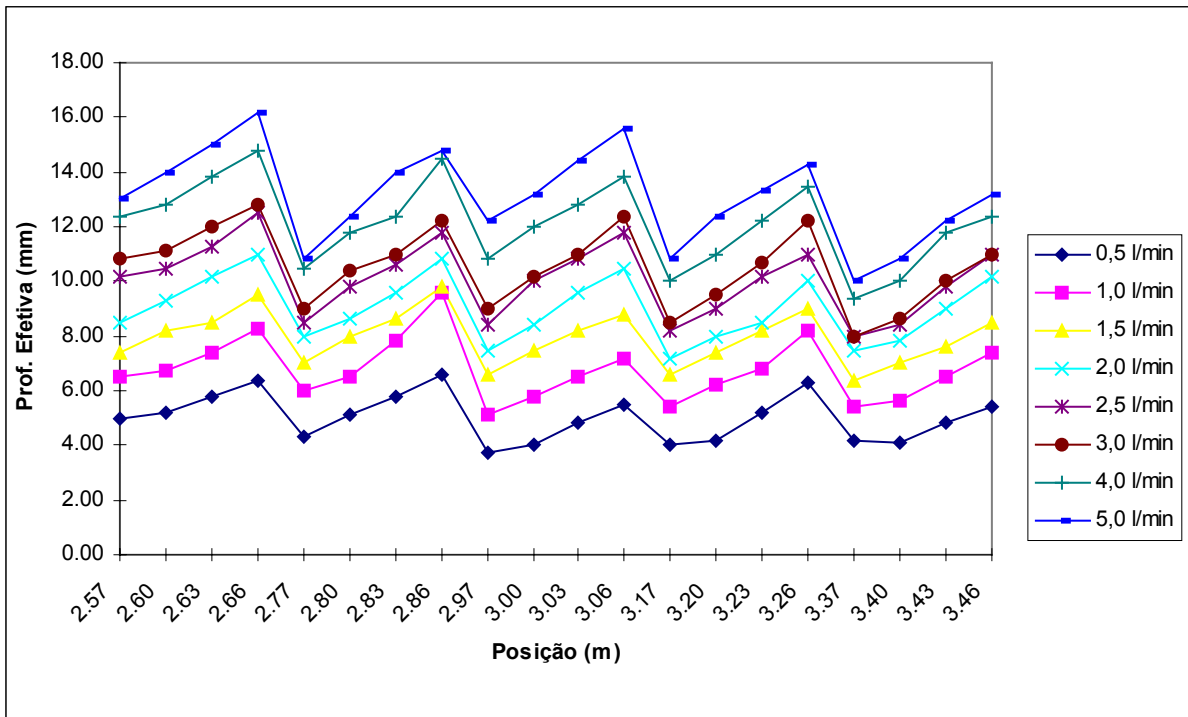
**Figura 3a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de transplântio.



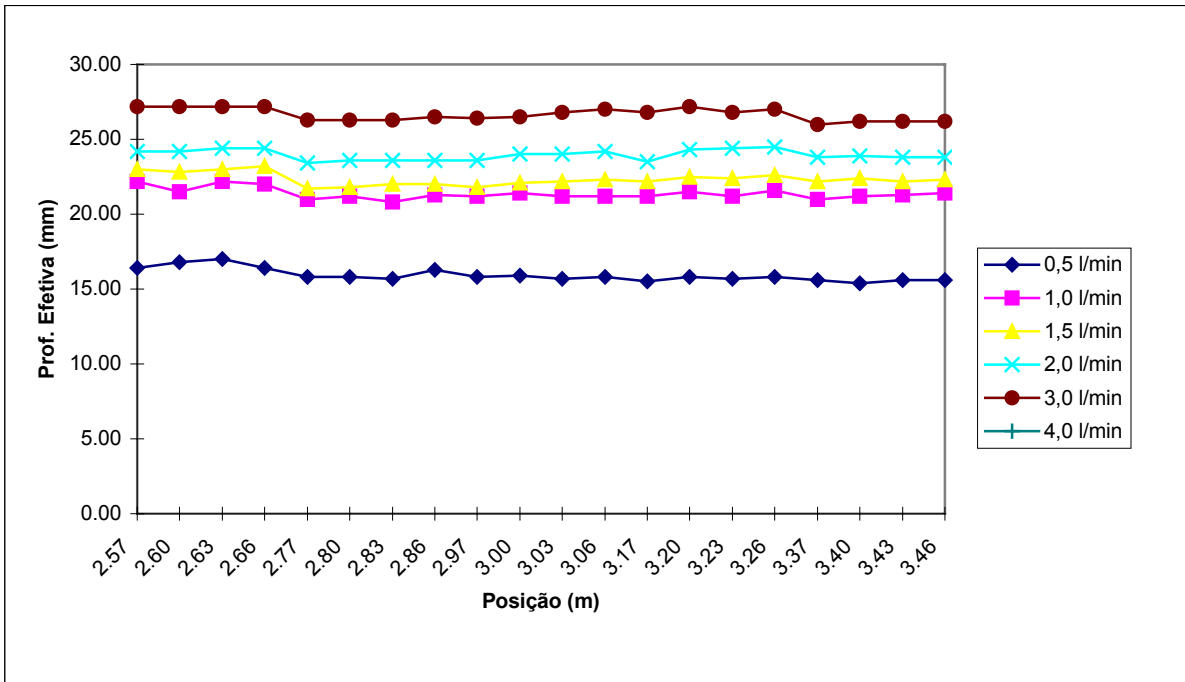
**Figura 4a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1% fase de 2 semanas após o transplântio.



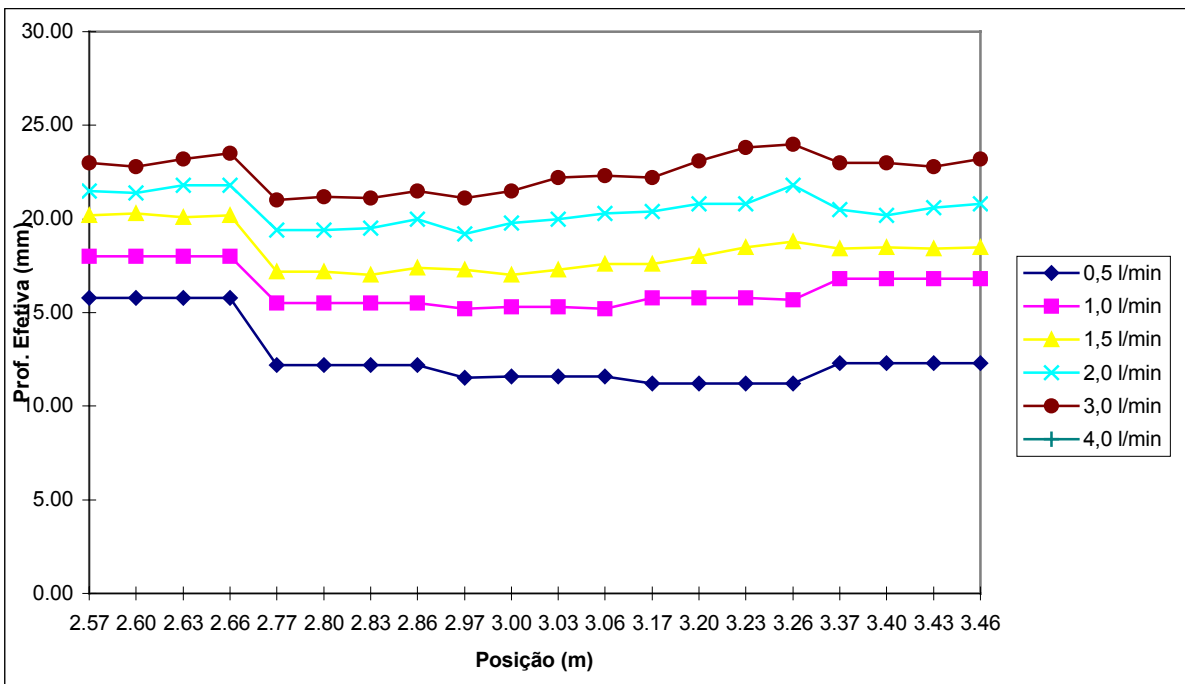
**Figura 5a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 1% fase de 2 semanas após o transplântio.



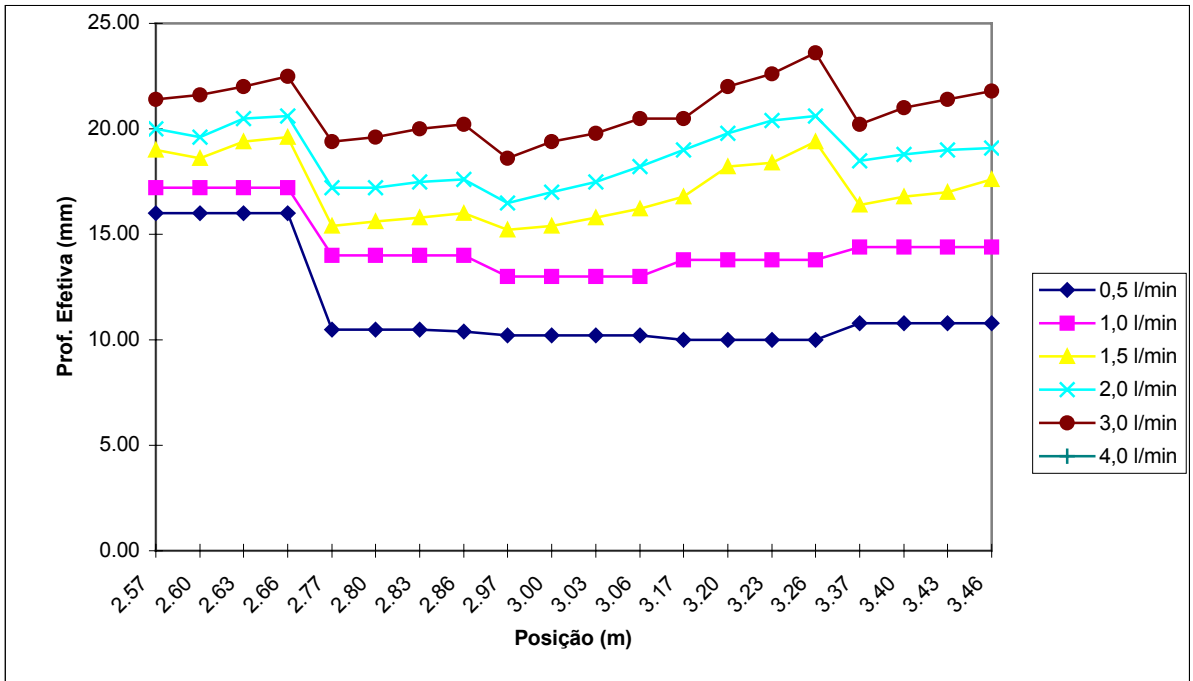
**Figura 6a.** Profundidade do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de 2 semanas após o transplântio.



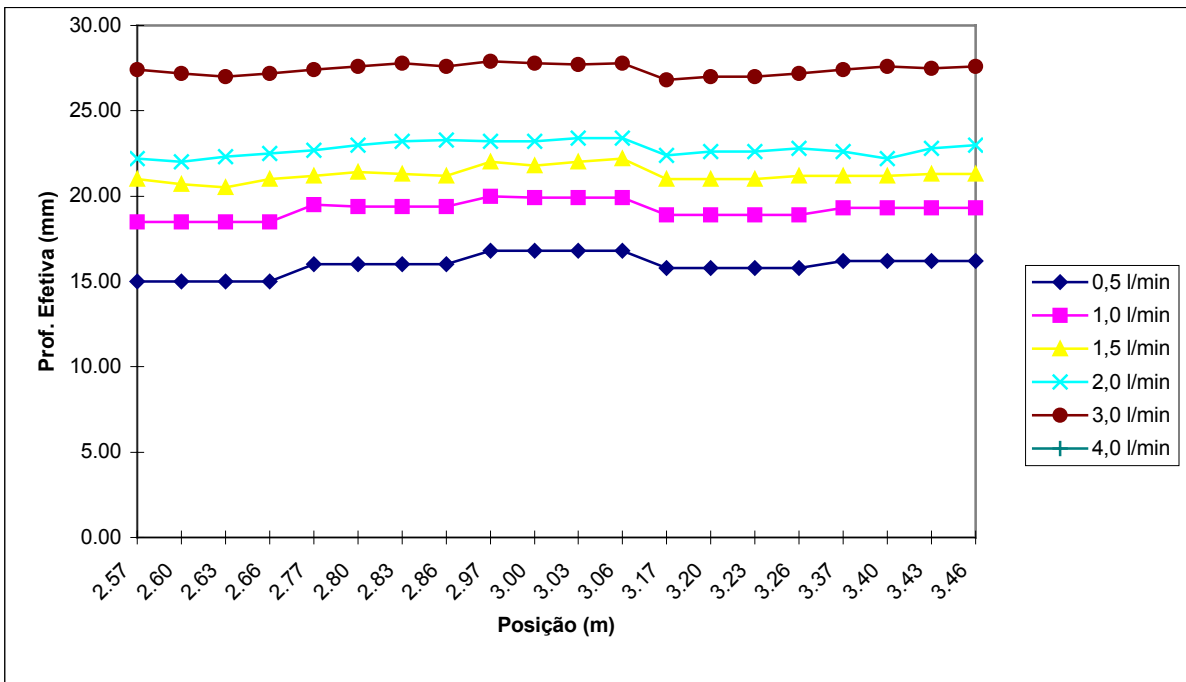
**Figura 7a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições, para a declividade de 1% fase de 3 semanas após o transplântio.



**Figura 8a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de 3 semanas após o transplântio.

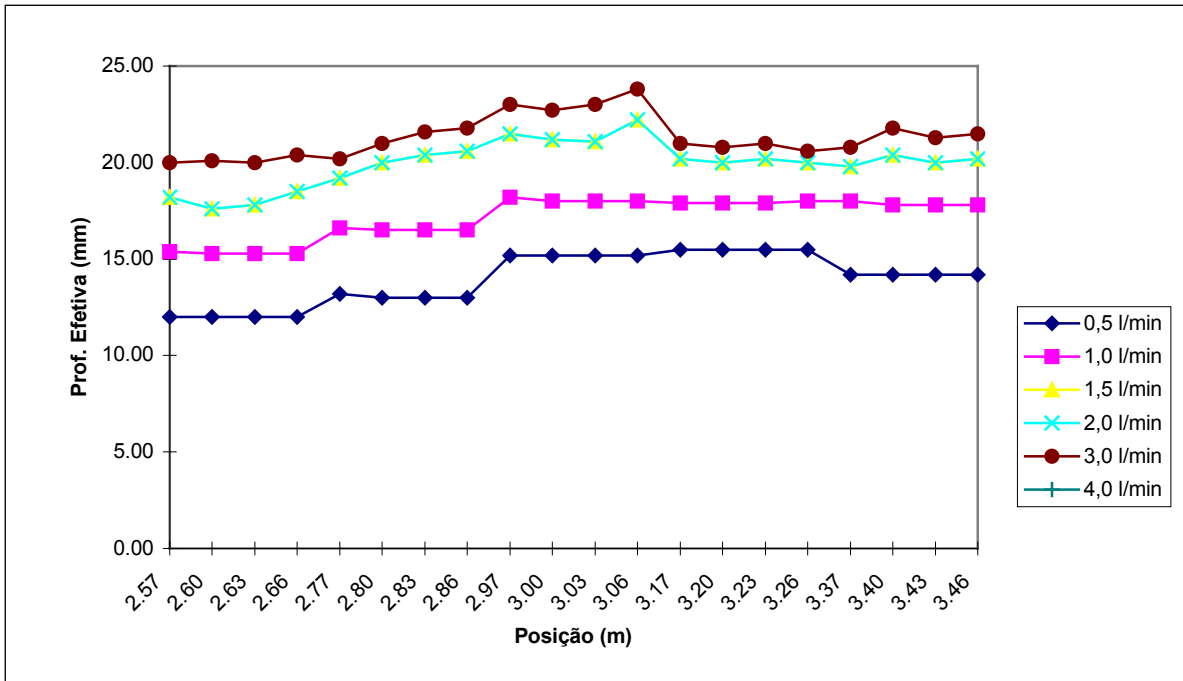


**Figura 9a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de 3 semanas após o transplântio.

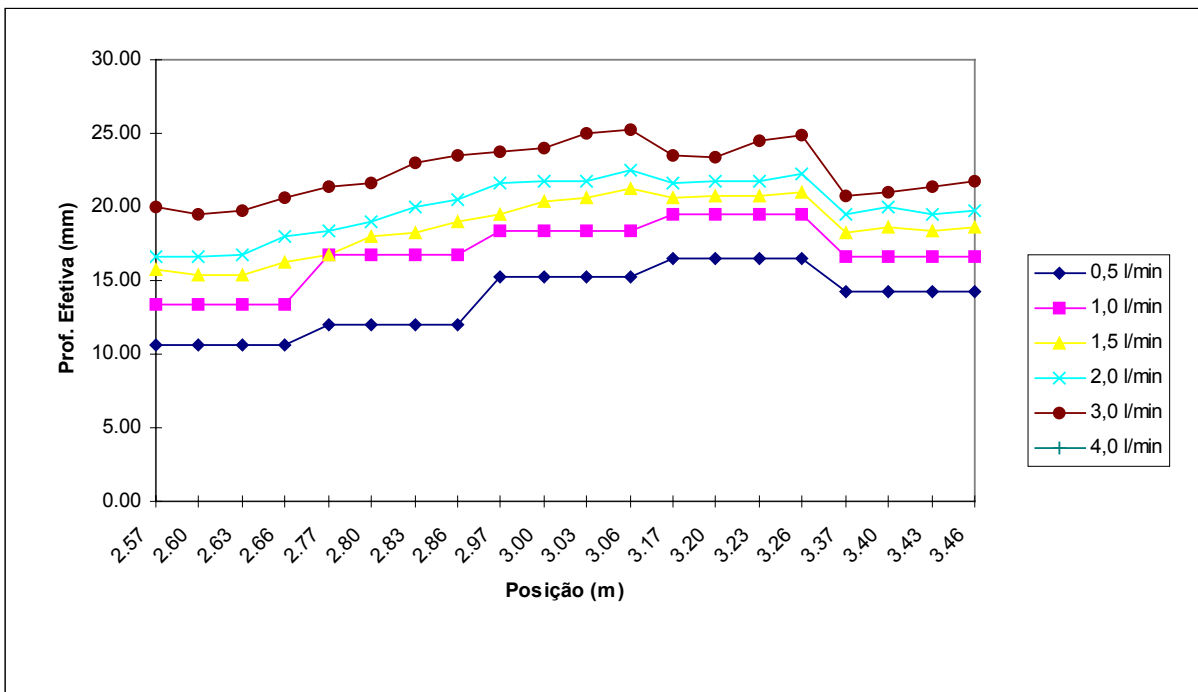


**Figura 10a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições d'água no canal, para a declividade de 1% fase de 4 semanas após o transplântio.





**Figura 11a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 2% fase de 4 semanas após o transplante.



**Figura 12a.** Profundidade efetiva do nível d'água em função das vazões e posições no canal, para a declividade de 3% fase de 4 semanas após o transplante.

## **ANEXO II**

**Tabela 1b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 2 mm.

Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1202	0,71	0,92	3,78	7556	0,89
1303	0,81	1,18	4,28	8551	0,89
1403	0,87	1,48	4,60	9202	0,95
1500	0,95	1,80	5,03	10063	0,84
1600	1,03	2,15	5,49	10968	0,84
1701	1,12	2,47	5,94	11871	0,85
1801	1,20	2,83	6,36	12714	0,85
1902	1,28	3,27	6,80	13598	0,85
2003	1,32	3,68	7,23	14452	0,85

**Tabela 2b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 2,5 mm.

Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1102	0,83	0,49	2,80	5607	0,91
1202	0,99	0,69	3,36	6720	0,91
1303	1,14	0,93	3,87	7737	0,90
1403	1,31	1,17	4,44	8885	0,93
1500	1,45	1,46	4,91	9821	0,92
1600	1,59	1,73	5,42	10812	0,93
1701	1,74	2,07	5,91	11821	0,93

**Tabela 3b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 3 mm.

Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1102	0,88	0,43	2,08	4150	0,72
1202	1,05	0,64	2,48	4968	0,70
1303	1,20	0,86	2,84	5680	0,69
1403	1,35	1,13	3,18	6357	0,68
1500	1,48	1,35	3,49	6982	0,68

1600	1,62	1,58	3,81	7620	0,68
1701	1,73	1,89	4,07	8141	0,67
1801	1,86	2,39	4,39	8788	0,68

**Tabela 4b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 3,5 mm.

Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1202	1,17	0,48	2,03	4067	0,66
1303	1,35	0,68	2,34	4669	0,64
1403	1,53	0,87	2,66	5314	0,64
1500	1,70	1,09	2,94	5877	0,64
1600	1,86	1,33	3,23	6457	0,63
1701	2,03	1,57	3,51	7023	0,63

**Tabela 5b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 4 mm.

Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1202	1,31	0,37	1,73	3464	0,64
1303	1,53	0,52	2,03	4061	0,64
1403	1,74	0,69	2,31	4618	0,63
1500	1,90	0,85	2,56	5124	0,61
1600	2,13	1,05	2,83	5658	0,62
1701	2,32	1,26	3,08	6161	0,62
1749	2,39	1,33	3,17	6348	0,62
1850	2,57	1,53	3,40	6808	0,62

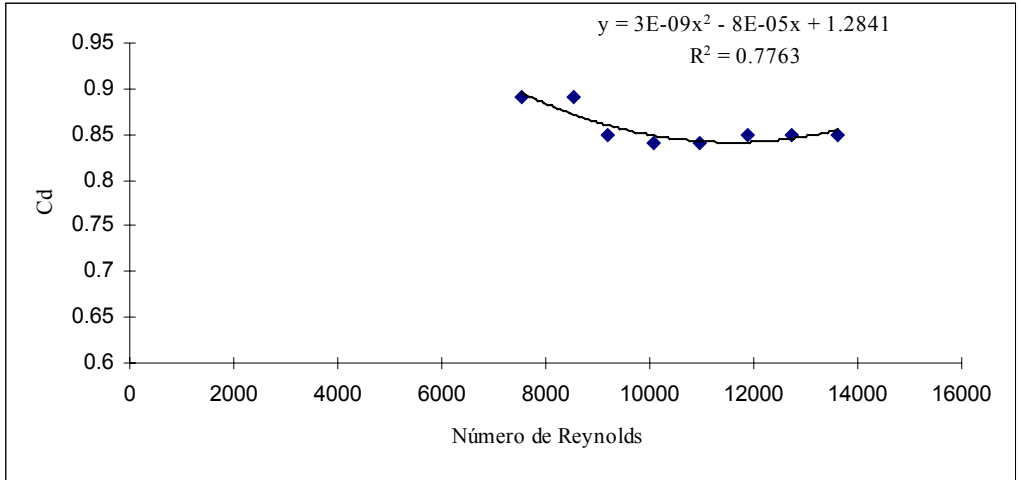
**Tabela 6b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 4,5 mm.

Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1202	1,60	0,30	1,68	3361	0,70
1303	1,85	0,36	1,99	4255	0,68
1403	2,09	0,55	2,19	4373	0,67
1500	2,30	0,65	2,42	4832	0,68

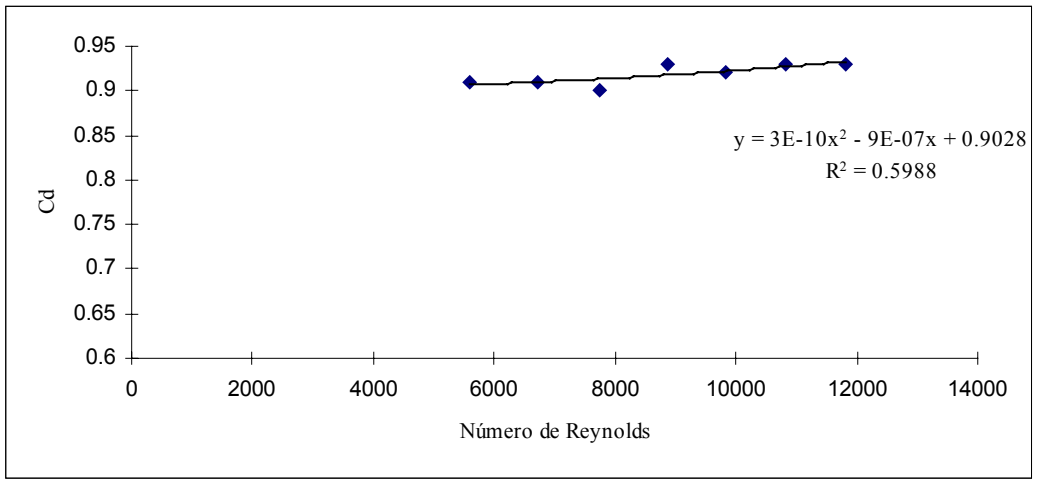
1600	2,52	0,79	2,64	5283	0,67
1701	2,72	0,93	2,85	5705	0,67
1749	2,82	1,01	2,96	5918	0,67

**Tabela 7b.** Valores médios de parâmetros hidráulicos para diferentes rotações do motor e diâmetro do orifício do “manifold” de 5 mm.

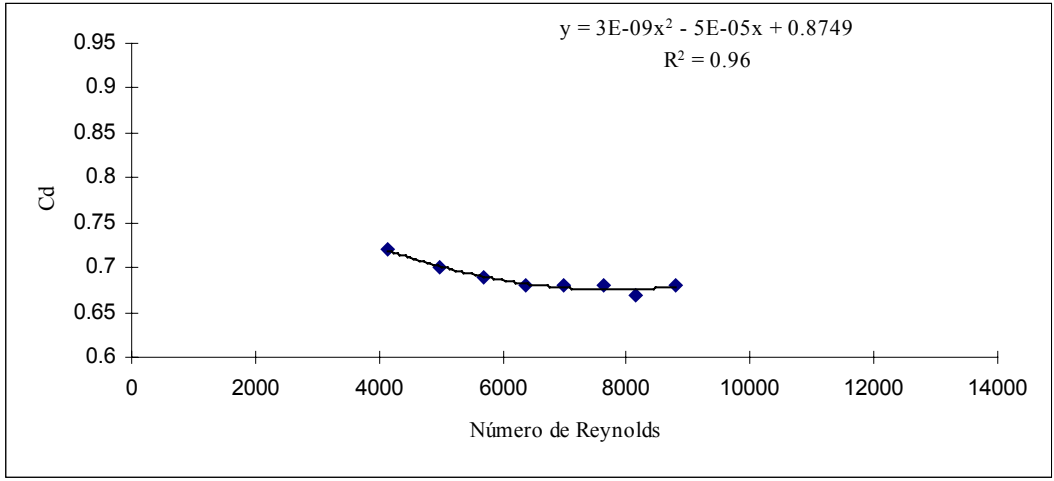
Rotação do motor (rpm)	Vazão média (l/min)	Pressão média (m.c.a)	Velocidade média (m/s)	Rey	Cd
1202	1,61	0,24	1,37	2734	0,63
1303	1,88	0,32	1,60	3196	0,64
1403	2,13	0,39	1,81	3618	0,65
1500	2,37	0,49	2,01	4400	0,65
1600	2,60	0,59	2,20	4408	0,65
1653	2,66	0,63	2,26	4517	0,64
1701	2,82	0,69	2,40	4791	0,65
1749	2,89	0,75	2,46	4913	0,64
1801	2,97	0,77	2,52	5042	0,65



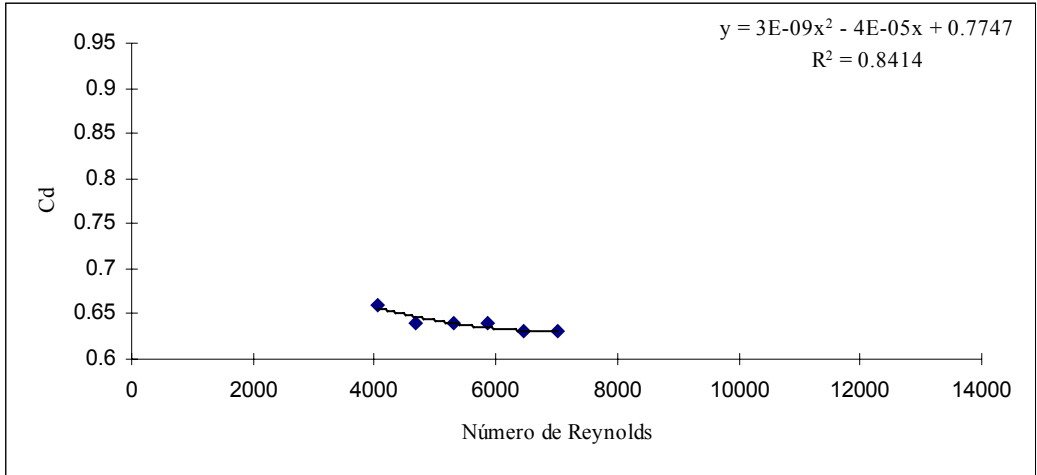
**Figura 1b.** Rey x Cd para orificio de 2mm de diâmetro.



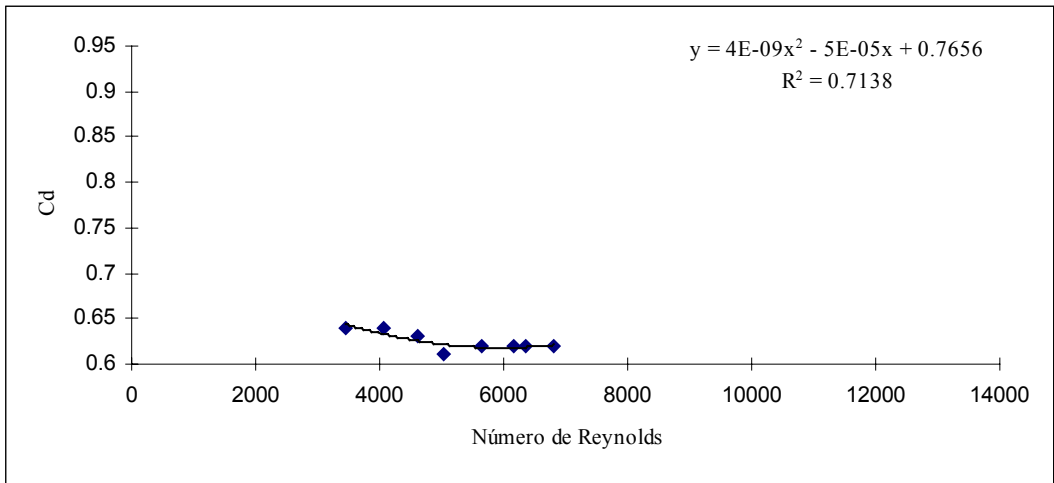
**Figura 2b.** Rey x Cd para orificio de 2,5 mm de diâmetro.



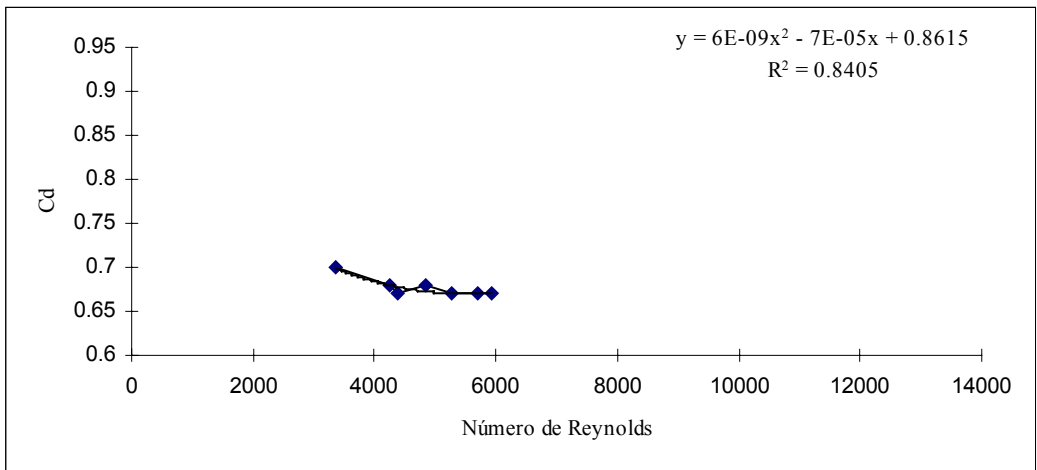
**Figura 3b.** Rey x Cd para orificio de 3 mm de diâmetro.



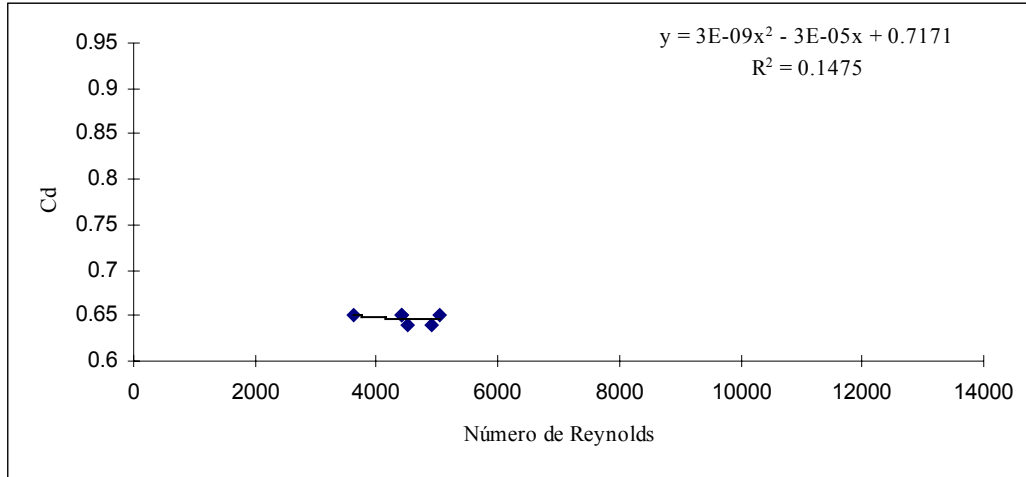
**Figura 4b.** Rey x Cd para orifício de 3,5 mm de diâmetro.



**Figura 5b.** Rey x Cd para orifício de 4 mm de diâmetro.



**Figura 6b.** Rey x Cd para orifício de 4,5 mm de diâmetro.



**Figura 7b.** Rey x Cd para orifício de 5,0 mm de diâmetro.