HIDRÁULICA DE MICROASPERSORES E DE LINHAS LATERAIS PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

TARLEI ARRIEL BOTREL

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO LORDELO OLITTA

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1984

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé e perseverança concedidas em todos os momentos.

Ao Prof. Antonio Fernando Lordelo Olitta, pela orientação, amizade e apoio recebidos no decorrer do curso e na realização deste trabalho.

Ao Prof. Antonio Sanchez de Oliveira, pela revisão do texto acompanhada de valiosas sugestões.

Ao Prof. Dirceu Brasil Vieira, pelas oportunas questões levantadas durante a defesa e que contribuíram de uma maneira efetiva na concretização deste trabalho.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, pela concessão da bolsa de estudos para a realização do curso de mestrado em irrigação e drenagem.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pela acolhida e apoio concedido.

Às empresas DANTAS Indústria e Comércio S.A. e IRTEC Tecnologia de Irrigação Ltdª pela doação de parte dos materiais utilizados no experimento.

Aos demais professores, colegas de curso e funcionários do Departamento de Engenharia Rural pelas sugestões e convívio amigo.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

ÍNDICE

página

RESUMO v

SUMMARY viii

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO DE LITERATURA 3

2.1. Irrigação por Microaspersão 3

2.2. Hidráulica de Sistemas de Irrigação por Microaspersão. 5

2.2.1. Hidráulica de microaspersores 5

2.2.2. Hidráulica de linhas laterais 9

3. MATERIAL E MÉTODOS 15

3.1. Teste com os Microaspersores 18

3.1.1. Teste para determinação da equação característica de vazão-pressão e da uniformidade de vazão do microaspersor 18

3.1.2. Teste para determinação do perfil de distribuição da precipitação 23

3.2. Determinação da Perda de Carga 24

3.2.1. Perda de carga no tubo com e sem os microaspersores 25

3.2.2. Perda de carga na inserção do microaspersor na lateral 28

3.3. Cálculo do Comprimento da Linha Lateral e do Fator de Redução de Perda de Carga F de Christiansen 30

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 34

4.1. Equação Característica do Microaspersor 34

4.2. Perfil de Distribuição da Precipitação 37

4.3. Perda de Carga no Tubo 40

4.4. Fator de Atrito da Fórmula de Darcy-Weisbach .. 48

4.5. Coeficiente de Rugosidade C da Fórmula de Hazen-Willians 49

4.6. Perda de Carga no Tubo com Microaspersores Vedados 51

4.7. Perda de Carga Localizada na Inserção do Microaspersor 56

4.8. Coeficiente de Redução de Perda de Carga F de Christiansen e Comprimento da Linha Lateral ... 63

5. CONCLUSÕES 69

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74

ANEXO 77

HIDRÁULICA DE MICROASPERSORES E DE LINHAS LATERAIS PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Autor: Tarlei Arriel Botrel

Orientador: Prof.Dr.Antonio Fernando Lordelo Olitta

RESUMO

No Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, foram estudadas as características hidráulicas de dois microaspersores fabricados atualmente no Brasil, bem como das linhas laterais de sistemas de irrigação localizada.

Os materiais utilizados foram os microaspersores Dantas MA 120 e o Irtec rotativo, e as linhas laterias de polietileno flexível de baixa densidade com diâmetros reais de 15,94mm e 22,60mm, e diâmetros nominais de 1/2" e 3/4".

Os microaspersores foram submetidos a testes sob pressões constante e variável visando à determinação dos seguintes parâmetros: equação vazão-pressão, coeficiente de variação de vazão decorrente do processo de fabricação, perfil de distribuição da precipitação, alcance do jato e perda de carga localizada na inserção do microaspersor na linha lateral.

As equações vazão-pressão obtidas para o microaspersor Dantas MA 120 e o Irtec rotativo foram, respectivamente:

$$q = 18,54\ H^{0,54}$$

$$q = 12,78\ H^{0,55}$$

onde:

q = vazão do microaspersor, em ℓ/h

H = pressão na entrada do microaspersor, em mca.

Os coeficientes de variação determinados foram os seguintes: 2,7% para o microaspersor Dantas MA 120 e 12,18% para o Irtec rotativo.

Determinou-se a perda de carga nos tubos (H_{ft}) e a perda de carga nos tubos com microaspersores inseridos e previamente vedados (H_{ftv}). Por diferenças entre H_{ft} e H_{ftv}, determinou-se a perda de carga localizada na inserção dos microaspersores nos tubos. Determinaram-se, ainda, equações para estimar o valor do coeficiente de perda de carga localizada (K) em função do número de Reynolds.

Verificou-se o comportamento do coeficiente C da equação de Hazen-Willians e também do fator de atrito F da equação de Darcy-Weisbach. O coeficiente C da equação de Hazen-Willians variou com o número de Reynolds (Re) segundo as expressões a seguir, para o diâmetro de 15,99mm e 22,60mm, respectivamente:

$$C = 79{,}08\ Re^{0{,}0599}$$

$$C = 77{,}81\ Re^{0{,}0595}$$

O fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach para o material estudado pode ser estimado pela expressão

$$f = 0{,}332\ Re^{-0{,}254}$$

Foi elaborado um programa para determinar o coeficiente de redução de perda de carga F (Christiansen) e o número máximo de microaspersores por linha lateral. Os valores de F foram determinados em função do número de saídas, do espaçamento, do diâmetro da lateral e do tipo de microaspersor.

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF MINISPRINKLERS AND LATERAL LINES OF LOCALIZED IRRIGATION

Author: Tarlei Arriel Botrel

Adviser: Prof.Dr.Antonio Fernando Lordelo Olitta

SUMMARY

A study of the hydraulic characteristics of the minisprinklers Dantas MA 120 and Irtec, now manufactured in Brazil, and two diameters of lateral lines, was conducted at the hydraulic laboratory of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP.

These minisprinklers were tested under constant and variable pressure in order to define the following parameters: discharge-pressure equation, manufacturing variation coefficient, distribution water profile, coverage diameter and head loss at the minisprinkler attachment in lateral line.

The discharge-pressure equation and the manufacturing variation coefficient (CV_f) of these minisprinklers are shown below:

- Dantas MA 120: $q = 18,54\ H^{0,54}$; $CV_f = 2,7\%$

- Irtec: $q = 12,78\ H^{0,55}$; $CV_f = 12,18\%$

were q is discharge in ℓ/h and H is the pressure at with the minisprinkler operates.

The head loss in the hose, and the head loss in the hose with minisprinkler attached were determined. Equations were also determined to estimate the values of the following coefficients based on the Reynolds number: the friction factor (f) from Darcy-Weisbach equation, the coefficiente (C) from Hazen-Willians equation, and the friction coefficente (K) due to attachment of the minisprinklers in the hose.

A computer program was prepared in order to determinate the Christiansen coefficient (F) of reducing friction loss, as well as, the highest number of minisprinklers that could be used in irrigation lateral line.

The F values were determined based on the number, spacing, diameter of the lateral line on the type of the minisprinkler attachment.

1. INTRODUÇÃO

Na microaspersão, um dos métodos de irrigação localizada, a água é levada às plantas por meio de tubos, eliminando totalmente as perdas por condução e minimizando as perdas por evaporação, uma vez que a água só é aplicada em parte da área, sob a copa das plantas.

Inicialmente, todos os sistemas de irrigação localizada forneciam água às plantas por fontes puntuais, utilizando-se de dispositivos denominados gotejadores. Porém, com o aparecimento dos microaspersores, dispositivos que aspergem água de modo a cobrir uma pequena área, os sistemas de irrigação localizada tornaram-se melhor adaptáveis a diferentes condições de solo e cultura.

O sistema de irrigação por microaspersão vem se desenvolvendo bastante nos últimos anos em virtude da uniformidade de aplicação de água, da elevada eficiência do sistema, do bom controle do volume de água a ser aplicado em cada irri-

gação, da possibilidade de ser utilizado com água salina ou em solos salinos, da possibilidade de aplicação de fertilizantes diluídos na água de irrigação e também da eliminação dos perigos de erosão do solo.

Para uma aplicação uniforme de água e em quantidade adequada, de tal maneira que os custos do equipamento e sua operação sejam econômicos, torna-se necessário o conhecimento das características hidráulicas dos seus componentes.

Diante desses fatos, os objetivos deste trabalho são:

a) Determinar as características hidráulicas de dois modelos de microaspersores fabricados no Brasil e estabelecer uma relação pressão-vazão.

b) Estudar a perda de carga na linha lateral, com e sem microaspersores, nos diâmetros de 15,94mm e 22,60mm.

c) Estabelecer os valores do coeficiente F de redução de perda de carga.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação por Microaspersão

A irrigação localizada, de acordo com VERMEIREN e JOBLING (1980), foi utilizada primeiramente em estufas na Inglaterra, por volta de 1940, e em culturas abertas em Israel a partir de 1950, porém sua importância comercial se acentuou de 1960 em diante, com o desenvolvimento de tubos e acessórios plásticos.

A microaspersão é uma variação recente da irrigação localizada e se destaca nos seguintes aspectos:

FISCHER (1977) observou que no sistema de irrigação por microaspersão, a maior velocidade da água reduz a sedimentação das partículas coloidais nas paredes dos tubos, diminuindo o entupimento do sistema, e que a seção de saída d'água, geralmente maior que a do sistema por gotejamento, permite o emprego de filtros mais simples, apenas de telas metálicas, dispensando, portanto, os de areia.

Outro aspecto que contrasta a microaspersão com o gotejamento, de acordo com o mesmo autor, é que a distribuição de umidade lateralmente pouco depende (ou independe) das características do solo quando se usa irrigação por microaspersão, o que possibilita um melhor ajuste da área úmida à área do sistema radicular.

BEN'AMI *et alii* (1978), comparando irrigação por microaspersão, aspersao e gotejamento em abacate, utilizando água salina, chegaram a resultados favoráveis à microaspersão e relatam que, no caso da aspersao houve grande incidência de folhas queimadas pelo sal e no gotejamento houve grande lixiviação de sal para a zona radicular.

FOUCHE *et alii* (1979), estudando comparativamente a irrigação por microaspersão, aspersao, gotejamento e tubos perfurados, em cultura de laranja, concluíram que, em se tratando de produção por volume d'água, o gotejamento e a microaspersão levaram a melhores resultados, porém a melhor qualidade de frutos foi obtida com a microaspersão.

Entre os principais fatores que favorecem a aceitação da irrigação por microaspersão destacam-se: baixa precipitação pluvial, altas precipitações durante curto baixa disponibilidade de água, água com excesso de sais, culturas em locais com declividade acentuada, solos arenosos com pequena movimentação lateral de água, custo da água elevado ou mão-de-obra escassa.

2.2. Hidráulica de Sistemas de Irrigação por Microaspersão

As linhas laterais ou linhas porta-emissores apresentam microaspersores espaçados de acordo com o tipo de solo, a cultura a ser irrigada e as características do microaspersor.

Introduzidos na linha lateral, os microaspersores dissipam a energia da água espalhando-a pelo solo em forma de gotas, de modo a proporcionar uma superfície molhada. Tal superfície varia com as características do microaspersor e com a pressão de serviço.

A inserção do microaspersor na linha lateral, segundo BRUWER *et alii* (1979), pode ser feita em linha por meio de adaptadores de rosca ou pressão, na linha por meio de adaptadores especiais, ou ainda utilizando-se de uma haste prolongadora para linhas laterais enterradas.

2.2.1. Hidráulica de microaspersores

A relação entre vazão e pressão na entrada do microaspersor, a perda de carga localizada na sua inserção na linha lateral, o tamanho e forma da seção de passagem d'água nele existente, o alcance e intensidade de precipitação constituem as características hidráulicas do microaspersor. Tais características, segundo GILAAD *et alii* (1974), são influenciadas pela geometria, pelo processo de fabricação, pelo material e pelo método de instalação do microaspersor na linha lateral.

Essas características podem ser determinadas em laboratório e devem estar sempre disponíveis aos projetistas e usuários deste método de irrigação (SOARES, 1978).

BRUWER *et alii* (1979) citam que vários tipos de microaspersores foram desenvolvidos nos últimos anos, objetivando dar vazão e distribuição precisas associadas a um mecanismo durável, podendo-se encontrar uma série de opções adaptáveis a vários delineamentos de culturas.

VERMEIREIN e JOBLING (1980) consideram que o emissor, em um sistema de irrigação localizada, deve apresentar:

a) descarga uniforme e constante;

b) suficiente abertura para prevenir entupimentos;

c) baixo custo, robustez e homogeneidade.

Os métodos comumente empregados para dissipar energia de pressão nos emissores são o de percurso longo e de orifícios. Em qualquer um deles a relação entre descarga e pressão, de acordo com KELLER e KARMELI (1975), pode ser caracterizada pela equação:

$$q = KH^x \qquad (1)$$

onde:

q = vazao do emissor

K = coeficiente específico de cada emissor

H = pressão na entrada do emissor

x = um expoente cujo valor depende do regime de fluxo que opera o emissor.

Ainda KELLER e KARMELI (1975), estudando o efeito da temperatura da água na vazão de gotejadores, concluíram que em se tratando de fluxo turbulento esta influência é pequena, porem se acentua para fluxo laminar. Os autores apresentam uma tabela para correção da vazão em função da temperatura para diferentes valores do expoente x (tabela 1).

Tabela 1 - Fator de correção da Vazão em Função da Temperatura e do Expoente x da Equação (1).

Temperatura ºC	Fatores de correção		
	x = 1,0	x = 0,8	x = 0,6
10	0,75	0,92	0,95
20	1,00	1,00	1,00
30	1,28	1,10	1,04
40	1,56	1,19	1,08
50	1,85	1,29	1,12

OLITTA (1978) afirma que em sistemas de dissipação por orifícios, geralmente ocorre o regime de fluxo turbulento, e que o sistema de dissipação de longo percurso apresenta o expoente x variando de 0,5 a 1,0; isto quer dizer que nos emissores de fluxo laminar o relacionamento entre a vazão e a pressão e linear, ou seja, dobrando a pressão, a vazão também é dobrada.

Nos emissores de fluxo turbulento a vazão é proporcional à raiz quadrada da pressão, isto é, para o dobro da vazão é necessário aumentar quatro vezes a pressão.

Os emissores apresentam um pequeno orifício de saída da água (1 a 2mm). Pequenas variações neste orifício provocam grandes variações na descarga a uma mesma pressão. VERMEIREN e JOBLING (1980) afirmam que essas diferenças podem ultrapassar a 10%, o que em alguns casos as tornam mais significativas que variações da vazão devido a diferenças de pressão ao longo da linha lateral.

O coeficiente de variação de fabricação, CVf, é o parâmetro utilizado para medir a variação de vazão provocada pela desuniformidade entre emissores, sendo obtido pela expressão

$$CVf = \frac{\sigma f(q)}{\bar{q}f} \qquad (2)$$

onde:

CVf = coeficiente de variação de fabricação

$\sigma f(q)$ = desvio padrão da vazão a uma pressão de referência

$\bar{q}f$ = média da vazão dos distribuidores à pressão de referência.

O SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA (1979) sugere a seguinte classificação para os emissores quanto à uniformidade de fabricação:

- CVf até 4%: uniformidade excelente
- CVf de 4 a 7%: uniformidade média

- CVf de 7 a 11%: uniformidade marginal
- CVf de 11 a 15%: uniformidade pobre
- CVf acima de 15%: inaceitável.

Para a determinação da perda de carga localizada na inserção do microaspersor na linha lateral, pode-se utilizar a já consagrada expressão:

$$Hf = \frac{KV^2}{2g} \qquad (3)$$

onde:

Hf = perda de carga localizada na inserção do microaspersor na linha lateral, em mca

K = coeficiente de perda de carga localizada, adimensional

g = aceleração da gravidade m^2/s.

FEGHALI (1974) afirma que a grandeza utilizada para caracterizar a dissipação de energia localizada depende do número de Reynolds, da rugosidade e, principalmente, da geometria da superfície de contato, razão pela qual nas aplicações práticas adota-se um valor médio para K.

PUEYO e FORCADA (1982), para simplificar os cálculos de perdas de carga localizadas em linhas laterais, adotaram o método dos comprimentos virtuais.

2.2.2. Hidráulica de linha laterais

Várias equações que permitem calcular a perda de carga numa linha lateral estão disponíveis na literatura espe-

cializada. As equações de Hazen-Willians e Darcy-Wiesbach vêm sendo aplicadas com maior freqüência.

URBINA (1976) e PARAQUEIMA (1977), estudando perda de carga em linhas laterais para irrigação por gotejamento, chegaram à conclusão de que a equação de Hazen-Willians não é apropriada para esses cálculos, pois o coeficiente C empregado como constante para o material utilizado varia com a vazão.

ASSY (1977), estudando comparativamente a fórmula universal da perda de carga e as fórmulas teórico-empíricas, concluiu que a de Hazen--Willians apresenta-se correta apenas para condutos hidraulicamente lisos e para número de Reynolds acima de 5×10^5, onde o coeficiente C assume um valor sensivelmente constante (da ordem de 158); nos demais casos, o valor de C é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa.

A equação de Darcy-Weisbach pode ser utilizada tanto em regime laminar como turbulento, com resultados corretos. O fator de atrito f dessa equação pode ser obtido pelas seguintes expressões:

- para movimento laminar (Re < 2000)

$$f = \frac{64}{Re} \qquad (4)$$

- para movimento turbulento até número de Reynolds igual a 100.000, f é corretamente representado pela fórmula de Blasius

$$f = 0{,}316\ Re^{-0{,}25} \qquad (5)$$

onde:

f = fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach, adimensional

Re = número de Reynolds, adimensional.

A vazão é variável ao longo da linha lateral, pois cada microaspersor provoca um decréscimo na vazão que irá provocar também um decréscimo na perda de carga final. Assim sendo, para se obter a perda de carga que ocorre na linha lateral seria necessário computar a variação de perda de carga entre cada duas saídas adjacentes, adicionando-a à localizada que ocorre no ponto de inserção do microaspersor, partindo do final para o início da linha.

CHRISTIANSEN (1942), trabalhando com irrigação por aspersão, propôs um método para simplificar os cálculos de perda de carga em linhas laterais com aspersores espaçados uniformemente. Determinou um fator (F) que, multiplicado pela perda de carga em um tubo sem saídas laterais, permite estabelecer a perda de carga na linha lateral de irrigação. Expressou o valor de F em função do número de aspersores e do expoente da vazão utilizado na equação de perda de carga. Este mesmo tipo de solução tem sido proposto por vários autores (KELLER e KARMELI, 1975; OLITTA, 1978; VERMEIREN e JOBLING, 1980; BERNARDO, 1982) para facilitar os cálculos de linhas laterais em irrigação localizada.

OLIVEIRA (1978), SOARES (1981) e também FARIA (1981), estudando hidráulica de linhas laterais para irrigação

por gotejamento, observaram que o valor de F (Christiansen) aumentou para um mesmo número de gotejadores, à medida que se reduzia o espaçamento entre os mesmos.

Em todo sistema de irrigação é desejável que a água seja distribuída uniformemente às plantas. Por outro lado, à medida que se aproxima desta condição, geralmente há um aumento nos custos de implantação do projeto.

KARMELI e KELLER (1974) afirmam que a uniformidade de aplicação de água em irrigação por gotejamento é afetada pelos seguintes fatores: variações na pressão devido a perdas de carga ou elevações no terreno, variações entre emissores devido ao processo de fabricação e possíveis entupimentos. Os autores desenvolveram técnicas e critérios para determinar a uniformidade de distribuição da irrigação por gotejamento. Foi definida como uniformidade de emissão (E_u) a relação entre a vazão mínima e a vazão média encontrada no sistema, e como uniformidade de emissão absoluta (E_{ua}) a relação entre a vazão máxima e a vazão mínima. Estabeleceram como regra geral que um sistema de irrigação por gotejamento não deve ser projetado para valor de uniformidade de emissão absoluta (E_{ua}) menor que 90%.

HANDLEY *et alii* (1983) avaliaram 112 sistemas de irrigação localizada, incluindo 15 diferentes tipos de emissores e concluíram que 62% dos sistemas instalados foram de níveis bons a excelentes. O critério de classificação utilizado

pelos autores foi o seguinte:

- E_u maior que 90%: excelente
- E_u entre 80 e 90%: bom
- E_u entre 70 e 80%: satisfatório
- E_u menor que 70%: pobre.

Dos sistemas que apresentaram E_u menor que 80% (satisfatório a pobre), metade apresentou problemas com pressão, sendo que 20% dos problemas de pressão se devem ao inadequado comprimento das linhas laterais.

O critério de projeto adotado para diferenças admissíveis entre a vazão dos emissores difere entre alguns autores, cabendo ao bom senso do projetista adotar o que melhor convenha a cada caso.

Podem-se citar os seguintes critérios adotados ou sugeridos por alguns autores:

WU e GITLIN (1974) desenvolveram um método gráfico para cálculos de linhas laterais, baseado no critério de permitir uma variação na vazão dos emissores aceitável de 20% e desejável de 10%.

KELLER e KARMELI (1975) recomendam que em um sistema de irrigação localizada o critério seja de permitir uma variação na vazão de, no máximo, 10% entre emissores funcionando simultaneamente.

MICHAEL (1978) admite um critério menos rígido que outros autores, permitindo variação na vazão entre emissores de até 20%.

BRUWER *et alii* (1979), VERMEIREN e JOBLING (1980) e PUEYO e FORCADA (1983) adotam o critério de dimensionamento semelhante a KELLER e KARMELI (1975), ou seja, a máxima variação de vazão entre emissores funcionando simultaneamente deve ser de 10%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Foram estudados dois tipos de microaspersores encontrados no mercado nacional, o Dantas MA 120 e o Irtec Rotativo, os quais descrevemos a seguir.

Microaspersor Dantas MA 120 - é oferecido acompanhado de uma haste de 26cm que o sustenta a 15cm acima do solo, sendo conectado à linha lateral por meio de um tubo flexível de 40cm de comprimento por 4mm de diâmetro, com a conexão feita por meio de encaixe de pressão (figura 1). Sua vazão nominal é de 120 litros por hora a uma pressão de 15mca, sendo a água jorrada em pequenas gotas de modo a formar um pequeno círculo em torno do microaspersor.

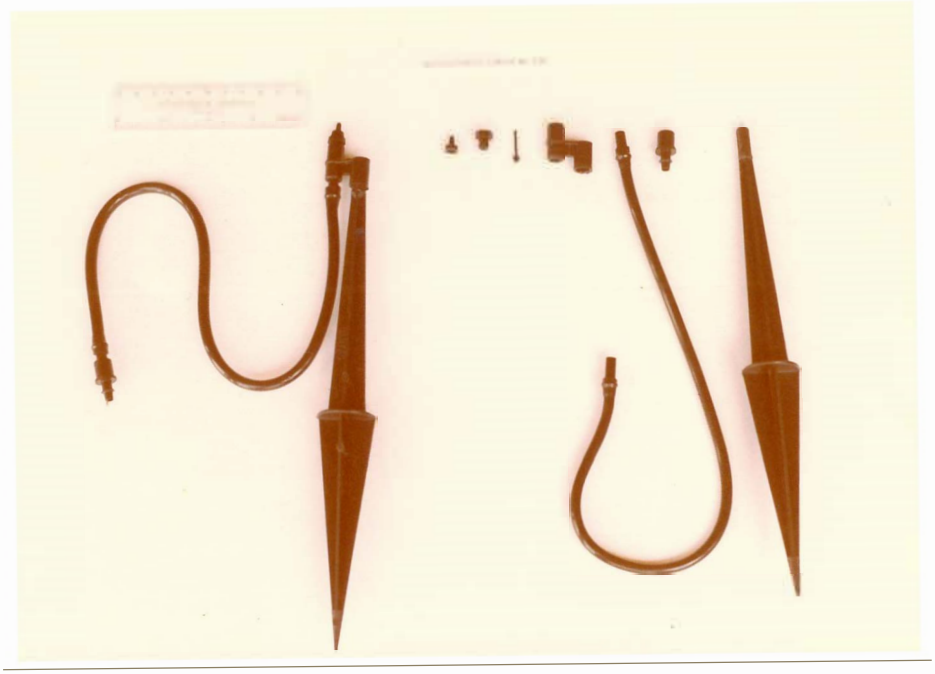


Figura 1 - Microaspersor Dantas MA 120.

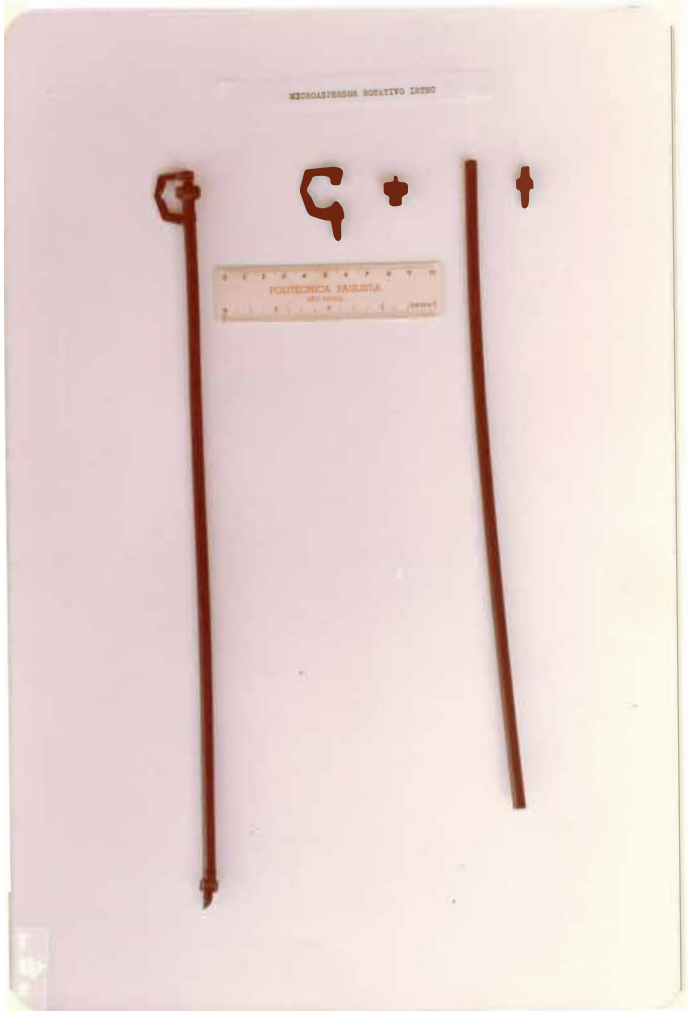


Figura 2 - Microaspersor Irtec Rotativo.

Microaspersor Irtec rotativo - neste a água flui através de duas aberturas, causando a sua rotação. A fixação à linha lateral se dá por meio de rosqueamento, podendo ser utilizado um tubo prolongador para que a linha lateral fique enterrada e o microaspersor sobre o solo (figura 2). Sua vazão nominal é de 40 litros por hora a uma pressão de 10mca.

Foram efetuados três tipos de testes, em laboratório, com os microaspersores:

1) para obtenção da uniformidade de vazão e da equação característica vazão-pressão;

2) para determinação do perfil de distribuição de precipitação;

3) para determinação da perda de carga localizada na inserção do microaspersor na linha lateral.

Foram feitos testes para avaliar a perda de carga que ocorre nos tubos de polietileno marca Dantas, de 15,94mm e 22,60mm de diâmetro real, que usualmente são empregados em linhas laterais dos sistemas de irrigação localizada.

O suprimento d'água foi mantido por meio de dois reservatórios do laboratório de hidráulica, um elevado situado a 15 metros acima do piso onde foi instalada a banca de ensaios, duas bombas retiram água do reservatório inferior e alimentam o elevado, um conjunto de calhas em nível, a guisa de vertedores faz com que o nível d'água se mantenha constante para quaisquer condições de funcionamento do sistema.

O suprimento de água para todos os testes foi feito através de uma derivação na tubulação de recalque de uma das bombas, o que possibilitou tanto a utilização do reservatório de nível constante como o bombeamento direto do reservatório subterrâneno.

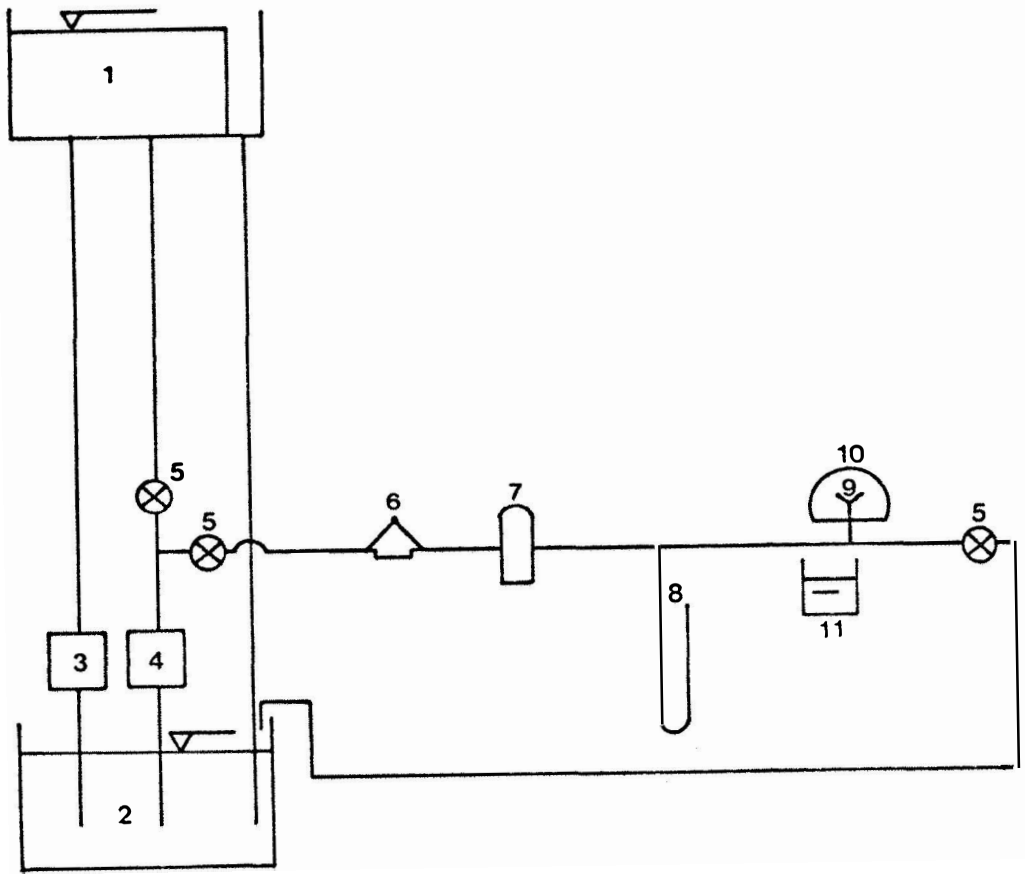
Para ensaios com pressões até 10mca foi utilizado o reservatório de nível constante e, acima desta valor, as pressões foram obtidas por bombeamento.

A pressão foi controlada por meio de uma válvula de regulagem manual da pressão e um registro de gaveta, instalados antes de uma câmara estabilizadora de fluxo e um manômetro de coluna de mercúrio. As figuras 3A e 3B mostram, respectivamente, o esquema de montagem dos testes.

3.1. Testes com os Microaspersores

3.1.1. Teste para determinação da equação característica de vazão-pressão e da uniformidade de vazão do microaspersor

Os objetivos desse teste foram a determinação de uma equação que relacione a vazão com a pressão na entrada do microaspersor e da avaliação das modificações que ocorrem na vazão entre microaspersores em razão de diferenças decorrentes do processo de fabricação.



1 - Reservatório de nível constante

2 - Reservatório subterrâneo

3 - Bomba ETA 150-27 (KSB)

4 - Bomba ETA 50-26 (KSB)

5 - Registros de gaveta

6 - Válvula manual de regulagem de pressão

7 - Câmera estabilizadora de fluxo

8 - Manômetro U com coluna de mercúrio

9 - Microaspersor a ser testado

10 - Cuba de acrílico

11 - Recipiente volumétrico graduado.

Figura 3A - Esquema de montagem dos testes.

Figura 3B - Sistema de regulagem de pressão e banca de testes.

A amostra utilizada nesse teste foi constituída de 20 microaspersores obtidos aleatoriamente numa população de 50.

Para determinar a vazão, o microaspersor previamente conectado ao sistema de alimentação e controle de pressão foi colocado sob uma cuba de acrílico para intercepção do jato, sendo a água coletada em um balde de 18 litros, com graduação a cada 100ml, e previamente aferido. O tempo de coleta foi de 5 minutos, cronometrados com precisão de décimos de segundo (figura 4).

A pressão foi medida com um manômetro de coluna tipo U graduado a cada 1mm, utilizando mercúrio como líquido manométrico, e conectado próximo ao ponto de inserção do microaspersor no tubo de polietileno.

O microaspersor Dantas MA 120 foi submetido às pressões de 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0, 17,5, 20,0, 22,5, 25,0 e 27,5 mca e o Irtec rotativo às pressões de 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0, 17,5 e 20,0 mca, de acordo com as recomendações do fabricante.

Os valores da vazão de cada microaspersor foram obtidos calculando-se a média aritmética de três repetições.

Nos testes o microaspersor Irtec rotativo foi conectado a um tubo prolongador de 20cm de comprimento e 4mm de diâmetro, que opcionalmente o acompanha para sustentá-lo sobre o solo.

Figura 4 - Sistema Coletor de Água do Microaspersor.

A curva característica de vazão-pressão foi obtida por análise de regressão a partir dos dados experimentais, sendo os valores de vazão uma média dos 20 microaspersores amostrados.

A uniformidade de vazão foi representada pela média dos coeficientes de variação de vazão dos microaspersores a cada pressão testada.

3.1.2. Teste para determinação do perfil de distribuição da precipitação

O objetivo deste teste foi observar o perfil de distribuição da água nos dois tipos de microaspersores estudados quando submetidos a diferentes pressões, visando a dar subsídios à determinação do espaçamento entre microaspersores.

Esse teste foi feito com uma amostra de 5 unidades de cada modelo de microaspersores estudados, os quais foram submetidos às pressões de 5,0, 10,0, 15,0, 20,0 e 25,0 mca para o Dantas MA 120 e 5,0, 10,0, 15,0 e 20,0 mca para o Irtec rotativo.

Os microaspersores foram colocados entre duas linhas de pluviômetros, dispostas de forma radial no círculo de abrangência da água, sendo postos a funcionar por um período de 1 hora para o Dantas MA 120 e 2 horas para o Irtec rotativo.

Como pluviômetros foram utilizados recipientes cilíndricos metálicos, com 6,5cm de diâmetro por 11cm de altu-

ra, colocados a um espaçamento de 10cm entre eixos.

Após o funcionamento foram medidos os volumes d'água contidos em cada pluviômetro, utilizando-se de uma proveta com capacidade para 100ml, graduada a cada 1ml. Esses valores foram convertidos em altura de precipitação.

Os dados de precipitação para cada ponto foram obtidos da média dos dois pluviômetros situados a uma mesma distância do microaspersor.

Foram traçadas as curvas que mostram o perfil de distribuição para cada pressão testada, sendo utilizados os dados médios dos cinco microaspersores amostrados.

O microaspersor Dantas MA 120 foi testado a uma altura de 15cm acima do nível dos pluviômetros, correspondendo à altura da haste de sustentação sobre o solo. Para o microaspersor Irtec rotativo o teste foi feito a uma altura de 10cm do nível dos pluviômetros.

3.2. Determinação da Perda de Carga

O estudo da perda de carga contínua foi conduzido em tubos com diâmetros reais de 15,94 e 22,60mm (diâmetro nominal de 1/2' e 3/4') e a da perda de carga localizada na inserção dos microaspersores nos tubos, tendo sido utilizada a metodologia descrita por OLIVEIRA (1978).

3.2.1. Perda de carga no tubo com e sem os microaspersores

Os tubos utilizados foram de polietileno flexível, de baixa densidade, da marca Dantas, com diâmetros reais de 15,94 e 22,60mm, específicos para serem usados em sistemas de irrigação localizada. A determinação exata dos diâmetros foi obtida pesando-se a água destilada contida no interior de segmentos de tubo com 20cm de comprimento, e relacionando esses pesos com o peso específico deste líquido à temperatura predominante.

A linha de teste utilizada nesta determinação continha 30 metros de comprimento. Uma câmera estabilizadora de fluxo, uma válvula manual de regulagem de pressão e um registro de gaveta de 3/4' foram instalados a 8 metros de seu início.

As perdas de carga nas linhas de teste foram medidas utilizando-se de um manômetro diferencial tipo U, com 3m de altura, graduado a cada 1mm, e utilizando-se mercúrio como líquido manométrico. Para aumentar a sensibilidade nas leituras, inclinou-se o manômetro em um ângulo de 30° em relação ao plano horizontal, até medidas de perda de carga de 16m/30m. Acima deste valor, o manômetro foi colocado novamente na vertical, pois a diferença de pressão excedia a capacidade do mesmo quando inclinado e também as pressões diferenciais maiores provocavam maiores diferenças entre as colunas do líquido manomé-

trico, dispensando a necessidade de se trabalhar com manômetro nesta posição.

A figura 5 apresenta o tipo de conexão utilizada para tomada de pressão ao manômetro diferencial e a figura 6 mostra uma das linhas de teste com o manômetro diferencial.

As vazões foram determinadas empregando-se um recipiente volumétrico com capacidade de 1200 litros, graduado a cada 100ml, e um cronômetro de precisão de décimos de segundo. O tempo de coleta foi fixado em 10 minutos até vazões de 1200 ℓ/h e 5 minutos para vazões maiores

Foram determinadas as perdas de carga para cada tubo sob três diferentes condições:

a) perda de carga no tubo;

b) perda de carga no tubo com 10 microaspersores Dantas MA 120 vedados, inseridos na linha de teste a cada 3 metros de comprimento;

c) perda de carga no tubo com 10 microaspersores Irtec rotativo, inseridos na linha de teste a cada 3 metros de comprimento.

Utilizando-se dos dados de vazão e correspondente perda de carga medidos nas linhas de testes nas condições a, b e c anteriormente descritas, por meio de análise de regressão foram estabelecidas equações da forma:

$$H_f = aV^b \qquad (6)$$

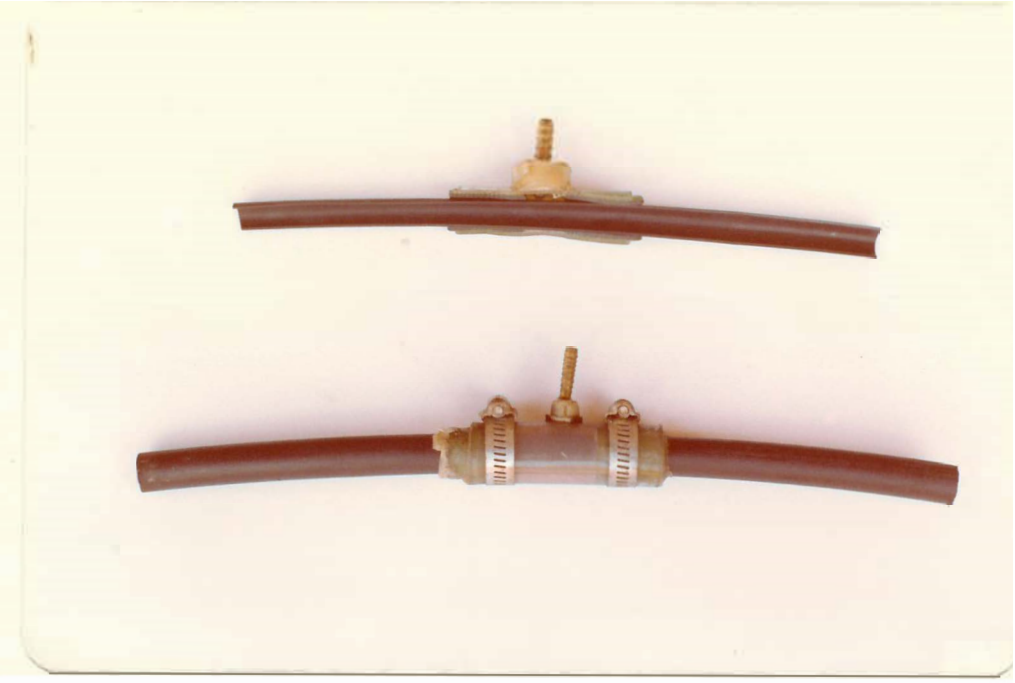


Figura 5 -Tomada de Pressão da Linha de Teste ao Manômetro Diferencial.

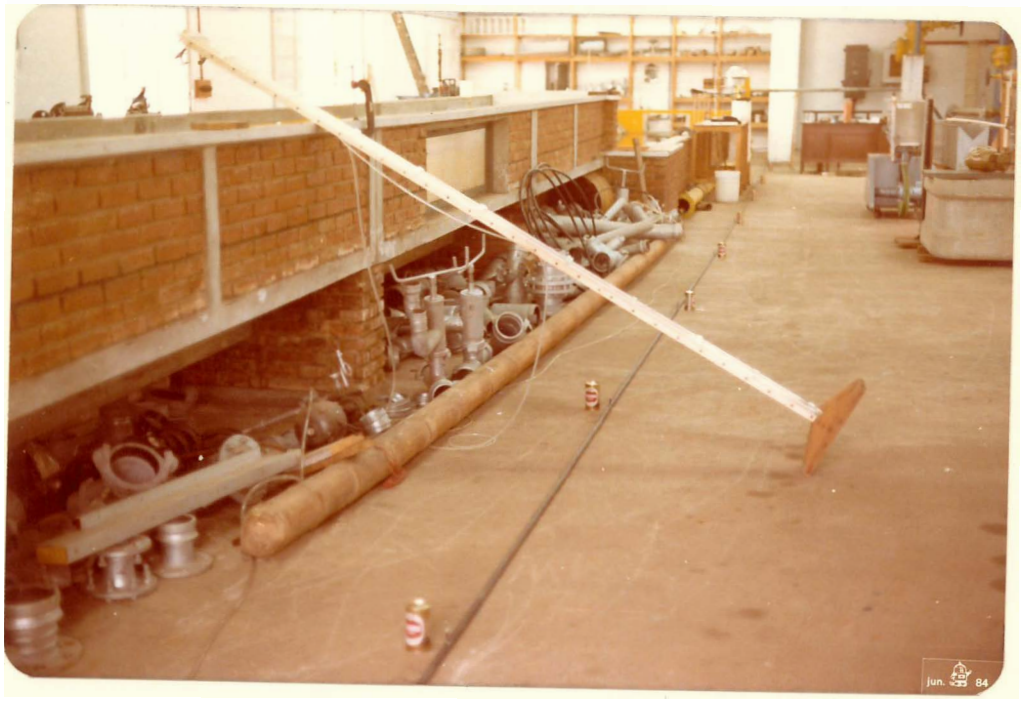


Figura 6 - Linha de Teste com Manômetro Diferencial Inclinado a 30º.

onde:

H_f = perda de carga no tubo ou perda de carga no tubo com microaspersores vedados, em mca

a = constante de regressão que depende do tubo estudado

b = constante de regressão que depende do regime de fluxo

V = velocidade média da água, em m/s.

Foram determinados os respectivos números de Reynolds, pela expressão:

$$Re = \frac{VD}{\gamma} \qquad (7)$$

onde:

Re = número de Reynolds, adimensional

V = velocidade média da água, em m/s

D = diâmetro do tubo, em m

γ = viscosidade cinemática da água à temperatura do ensaio, em m^2/s.

Também foram estudados os coeficientes C da fórmula de Hazen-Willians e o fator de atrito f da fórmula de Darcy-Weisbach, sendo que para determinação deste último procurou-se chegar a uma expressão que o relacione com o número de Reynolds.

3.2.2. Perda de carga na inserção do microaspersor na linha lateral

Procurou-se estabelecer a perda de carga na inserção dos dois modelos de microaspersores nos dois diferentes

diâmetros de tubos estudados, por meio da expressão:

$$H_{ft} = \frac{KV^2}{2g} \qquad (8)$$

onde:

H_{ft} = perda de carga localizada na inserção do microaspersor, em mca

K = coeficiente de perda de carga localizada na inserção do microaspersor, adimensional

V = velocidade da água na seção do tubo, em m/s

g = aceleração da gravidade, em m^2/s.

Os valores da perda de carga localizada (H_{fl}) foram obtidos utilizando-se da equação:

$$H_{fl} = \frac{H_{ftv} - H_{ft}}{10} \qquad (9)$$

onde:

H_{ft} e H_{ftv} = perda de carga na linha de teste e perda de carga na linha de teste com microaspersores vedados, estimados empregando-se as equações obtidas pela análise de regressão dos dados experimentais, da forma descrita na equação (6). O número 10 corresponde à quantidade de microaspersores conectados à linha de teste.

Determinando-se os valores de H_{fl} pela equação (9), o coeficiente de perda de carga localizada K pode ser aproximado pela equação (8).

Uma vez que o coeficiente de perda de carga localizada K varia de acordo com o número de Reynolds, por meio de

análise de regressao chegou-se a uma expressão que correlaciona as duas variáveis.

Foi calculado também o comprimento equivalente de tubo necessário para compensar a perda de carga localizada (H_{fl}), utilizando-se da expressão:

$$L = \frac{(H_{ftv} - H_{ft})30}{10 \cdot H_{ft}} \qquad (10)$$

onde:

L = comprimento de tubo equivalente à perda de carga que ocorre localizada na inserção do microaspersor, em mca

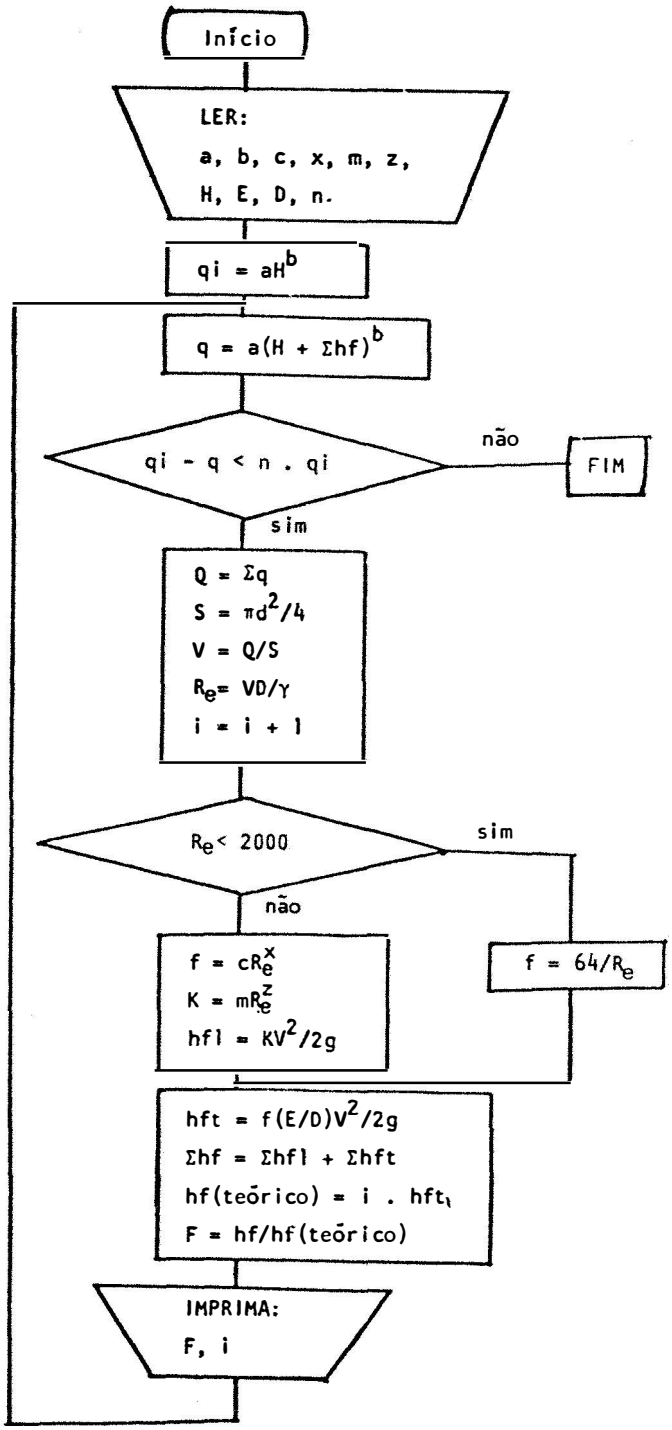
H_{ft} e H_{ftv} têm o mesmo significado descrito na equação (9).

3.3. Cálculo do Comprimento da Linha Lateral e do Fator de Redução de Perda de Carga F de Christiansen

Elaborou-se um programa para calcular as linhas laterais de irrigação localizada e também para determinar os valores do coeficiente de redução de perda de carga F de Christiansen, em função do número de saídas e do espaçamento entre os emissores. O fluxograma deste programa pode ser visto na figura 7, e uma versão para linguagem de calculadora Texas TI 58/59 é apresentada no Anexo.

O método de cálculo utilizado neste programa foi assim constituído:

a) acumulou-se a perda de carga entre duas saídas adjacentes, adicionando-a à que ocorre localizada no ponto



sendo:

qi = vazão no último emissor, em m^3/s
a, b = constantes da equação vazão-pressão da forma aH^b
H = pressão no último emissor, em mca
q = vazão no emissor, em m^3/h
Σhf = perda de carga até o trecho considerado, em mca
n = critério de variação de vazão admitido entre o primeiro e o último emissor na lateral (se for 10%, n = 0,1)
Q = vazão total da linha, em m^3/h
D = diâmetro do tubo, em metros
R_e = número de Reynolds
γ = viscosidade cinemática da água, em m^2/s ($1,01 \times 10^{-6}$ a 20ºC)
f = fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach
c, x = constantes da equação do fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach, da forma $f = cR^x$
K = coeficiente de perda de carga localizada na inserção do emissor no tubo
m, z = constantes da equação do coeficiente de perda de carga localizada, da forma $K = mR^z$
hfl = perda de carga localizada, em mca
g = aceleração da gravidade, em m/s^2
hft = perda de carga no trecho, em mca
E = espaçamento entre emissores, em metros
V = velocidade média da água, em m/s
i = número de emissores
hf(teórico) = perda de carga considerando toda vazão como se não houvesse saídas, em mca
F = fator de redução de perda de carga de Christiansen

Figura 7 - Fluxograma do Programa Utilizado para Calcular o Fator de Redução de Perda de Carga (F).

de inserção do microaspersor, partindo do final para o início da linha, até que se obtenha uma variação de vazão pré-fixada, de acordo com o critério adotado entre o primeiro e o último emissor;

b) calculou-se a perda de carga na linha lateral considerando a vazão de todos os emissores em toda linha, sem considerar as saídas laterais e as perdas localizadas;

c) a relação entre a perda de carga calculada pelo item a e item b representou o coeficiente de redução de perda de carga F.

As fórmulas utilizadas no programa foram:

- equação característica do emissor representada pela expressão (1);

- perda de carga no tubo utilizando-se a fórmula de Darcy-Weisbach

$$H_f = \frac{fLv^2}{D2g} \qquad (11)$$

onde:

H_f = perda de carga no tubo, em mca

f = fator de atrito, adimensional

L = comprimento do tubo, em m

D = diâmetro interno do tubo, em m

g = aceleração da gravidade, em m/s^2.

O fator de atrito f da fórmula de Darcy-Weisbach, para um número de Reynolds maior que 2000 foi obtido da equa-

ção experimental e para um número de Reynolds menor que 2000 foi obtido da equação (4).

Para perda de carga localizada utilizou-se a equação (8), sendo que os valores do coeficiente K da referida equação foram retirados da equação de regressão obtida a partir dos dados experimentais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Equação Característica do Microaspersor

A média dos valores de vazão obtidos dos 20 microaspersores amostrados a cada pressão, e os respectivos coeficientes de variação de vazão podem ser vistos nos quadros 1 e 2.

Com os dados de vazão e pressão apresentados nos quadros 1 e 2, por meio de análise de regressão, ajustaram-se as seguintes equações características, respectivamente, para o microaspersor Dantas MA 120 e o Irtec rotativo:

$$q = 18,54\ H^{0,54} \qquad (12)$$

$$q = 12,78\ H^{0,55} \qquad (13)$$

onde:

q = vazão do microaspersor, em ℓ/h

H = pressão na entrada do microaspersor, em mca.

Quadro 1 - Vazão Média Observada para o Microaspersor Dantas MA 120, a Diferentes Pressões, e Respectivos Coeficientes de Variação.

Pressão (mca)	Vazão (l/h)	C.V. (%)
05,0	44,08	3,14
07,5	55,19	2,83
10,0	64,70	2,77
12,5	73,16	2,67
15,0	79,66	2,72
17,5	87,34	2,48
20,0	94,06	2,81
22,5	99,53	2,44
25,0	105,32	2,55
27,5	111,49	2,54
	coeficiente de variação médio =	2,70%

Quadro 2 - Vazão Média Observada para o Microaspersor Irtec rotativo, a Diferentes Pressões, e Respectivos Coeficientes de Variação.

Pressão (mca)	Vazão (i/h)	C.V. (%)
02,5	20,66	12,54
05,0	31,26	11,67
07,5	39,00	12,07
10,0	45,28	12,11
12,5	51,53	11,65
15,0	55,84	12,34
17,5	60,44	12,59
20,0	64,83	12,50

coeficiente de variação médio = 12,18%

Os coeficientes de determinação (r^2) foram, respectivamente, 0,99978 e 0,99864. Os testes t foram significativos ao nível de 1% de probabilidade. As figuras 7 e 8 mostram a representação gráfica das referidas equações.

Os coeficientes de variação médios foram de 2,7% para o microaspersor Dantas MA 120 e 12,18% para o Irtec rotativo.

As condições de teste foram iguais para todos os microaspersores, portanto as diferenças verificadas na vazao dos mesmos devem ser atribuídas ao processo de fabricação.

Utilizando a classificação do SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA (1979) para gotejadores e microaspersores quanto ao valor do coeficiente de variação (CV), o microaspersor Dantas MA 120 se classifica como excelente e o Irtec rotativo se classifica como pobre.

4.2. Perfil de Distribuição da Precipitação

Houve grande variação no diâmetro de abrangência, e também no perfil de distribuição da precipitação entre os microaspersores amostrados, quando submetidos a uma mesma pressão.

Problemas semelhantes foram observados por BRUWER *et alii* (1979) ao estudar vários modelos de microaspersores norte-americanos, atribuindo-lhes como causa superfícies irre-

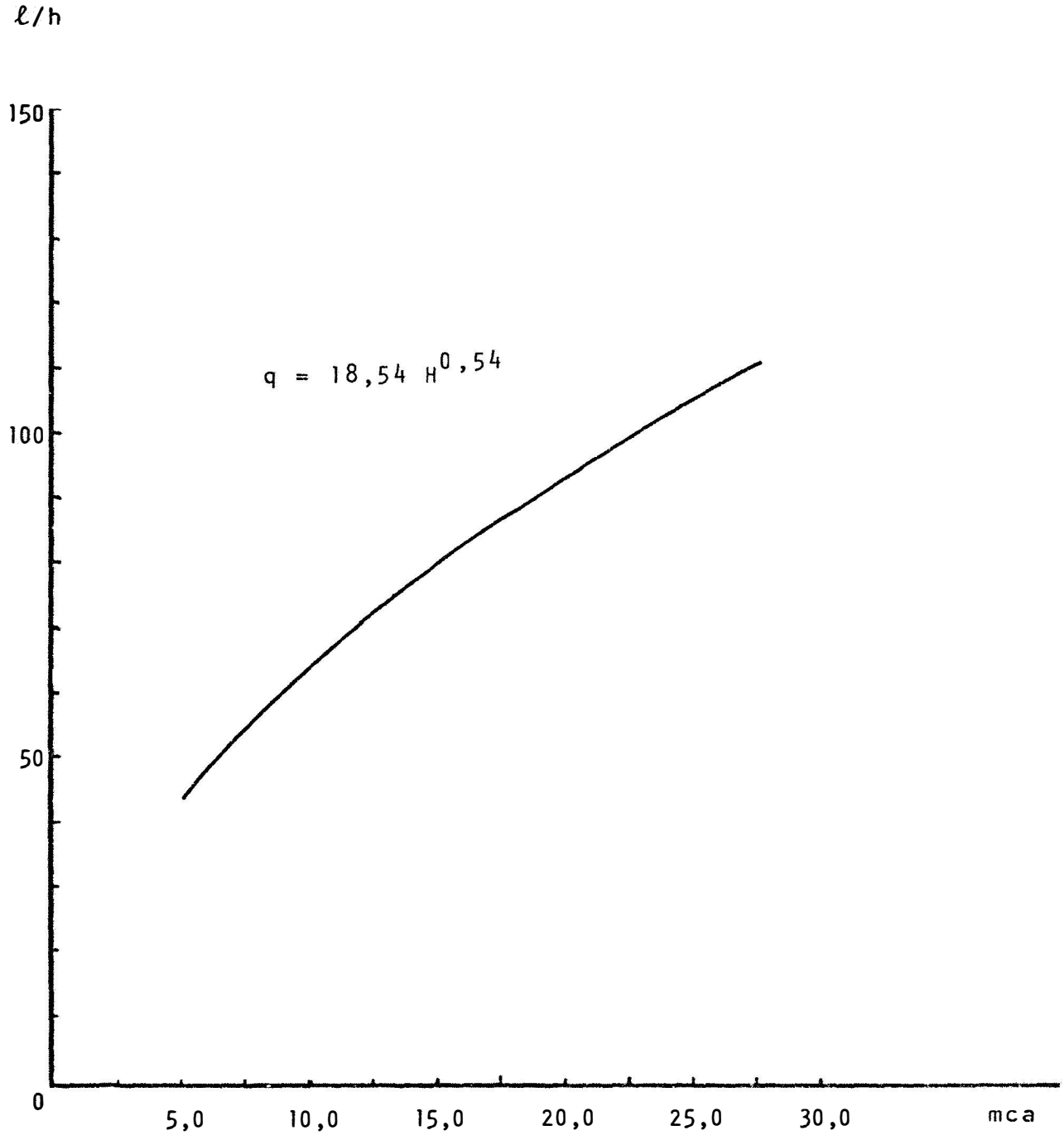


Figura 7 - Equação Característica Vazão-pressão do Microaspersor Dantas MA 120.

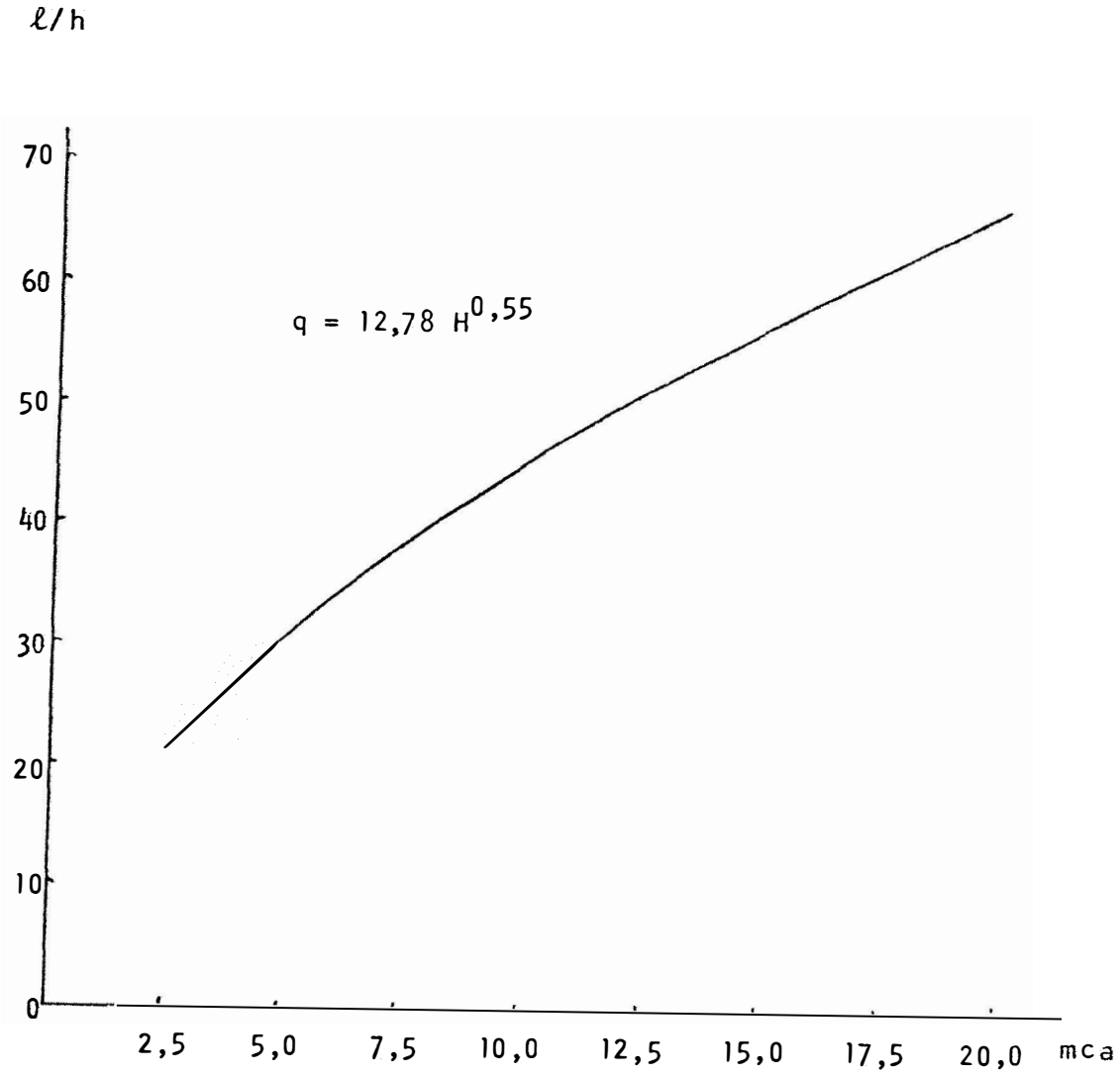


Figura 8 - Equação Característica Vazão-pressão do Microaspersor Isrtec rotativo.

gulares e rebarbas deixadas durante o processo de fabricação, ou a inclinação do jato contra o plano horizontal de ensaio.

Os quadros 3 e 4 mostram o alcance e o intervalo de variação do diâmetro de abrangência em função da pressão.

Nos quadros 5 e 6 podem ser vistos os valores da precipitação em função da distância para diferentes pressões, dados estes obtidos da média aritmética dos 5 microaspersores amostrados. As figuras 9 e 10 são representações gráficas dos perfis de distribuição da precipitação, obtidos a partir dos quadros 5 e 6.

Observando a figura 9 correspondente aos perfis de distribuição da precipitação do microaspersor Dantas MA 120 a diferentes pressões, nota-se que o melhor perfil foi obtido sob a pressão de 20mca. Em ambos os modelos de microaspersores, pressões de 20mca ou maiores provocaram grande formação de névoa.

4.3. Perda de Carga no Tubo

Utilizando-se da análise de regressão, a partir dos dados experimentais mostrados nos quadros 7 e 8, obtiveram-se as seguintes equações que permitem calcular a perda de carga nos tubos, em função da velocidade:

- para o tubo de 15,94mm de diâmetro

$$H_{ft} = 0,08833\ V^{1,74029} \qquad (14)$$

Quadro 3 - Alcance e Intervalo de Variação do Diâmetro Molhado para o Microaspersor Dantas MA 120 (Média de 5 Microaspersores).

Pressão (mca)	Intervalo de Variação (cm)	Diâmetro Médio de Alcance (cm)
05,0	160 - 220	182
10,0	250 - 420	344
15,0	340 - 500	414
20,0	460 - 580	514
25,0	430 - 610	512

Quadro 4 - Alcance e Intervalo de Variação do Diâmetro Molhado para o Microaspersor Irtec Rotativo (Média de 5 Microaspersores).

Pressão (mca)	Intervalo de Variação (cm)	Diâmetro Médio de Alcance (cm)
05,0	330 - 470	380
10,0	370 - 640	510
15,0	470 - 660	530
20,0	460 - 680	522

Quadro 5 - Precipitação, em mm/h, em funçao Distância para o Microaspersor Dantas MA 120 a Diferentes Pressões.

Pressão (mca)	Distância (cm)														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
5,0	18,9	46,3	83,6	50,5	21,6	18,3	15,8	7,9	1,7	0,1	-				
10,0	7,1	7,9	8,9	10,9	15,1	18,1	17,8	16,3	13,3	8,3	5,5	5,2	5,1	5,6	5,8
15,0	5,5	6,1	7,3	8,5	10,2	12,3	14,5	16,1	16,4	14,6	12,3	10,0	8,0	5,6	4,0
20,0	6,5	8,0	8,3	8,6	8,9	9,4	9,5	9,5	9,4	8,9	8,2	7,4	6,7	5,9	5,0
25,0	6,3	6,7	8,5	9,7	10,5	11,7	12,7	13,2	13,7	13,6	12,8	11,4	10,0	8,2	6,8

Pressão (mca)	Distância (cm)															
	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
5,0																
10,0	6,6	2,7	1,2	0,3	0,1	-										
15,0	3,1	2,7	2,5	2,3	1,9	1,4	0,9	0,4	0,1	-						
20,0	4,4	4,1	3,6	3,3	3,1	2,9	2,5	1,7	1,7	1,0	0,7	0,3	0,2	0,1	-	
25,0	5,7	4,7	3,6	2,8	2,2	1,8	1,6	1,5	1,3	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1	-

Quadro 6 - **Precipitação**, em mm/h, em função Distância para o Microaspersor Irtec Rotativo a Diferentes Pressões.

Pressão (mca)	Distância (cm)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
5,0	18,4	8,3	4,8	4,3	4,6	4,2	3,9	3,7	3,1	2,2	1,7	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1	0,9	0,5
10,0	29,1	17,8	12,3	8,1	6,8	4,4	3,5	3,3	2,6	2,4	2,2	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	0,9
15,0	31,2	16,5	13,2	8,7	6,7	5,5	4,9	4,4	4,3	3,8	3,3	3,0	2,5	2,2	1,8	1,5	1,2	0,9
20,0	50,9	19,3	15,9	12,4	9,2	7,7	6,4	5,5	5,0	4,3	3,8	3,3	2,8	2,3	1,9	1,5	1,1	0,9

Pressão (mca)	Distância (cm)																	
	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360
5,0	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	-									
10,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	
15,0	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-
20,0	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	-							

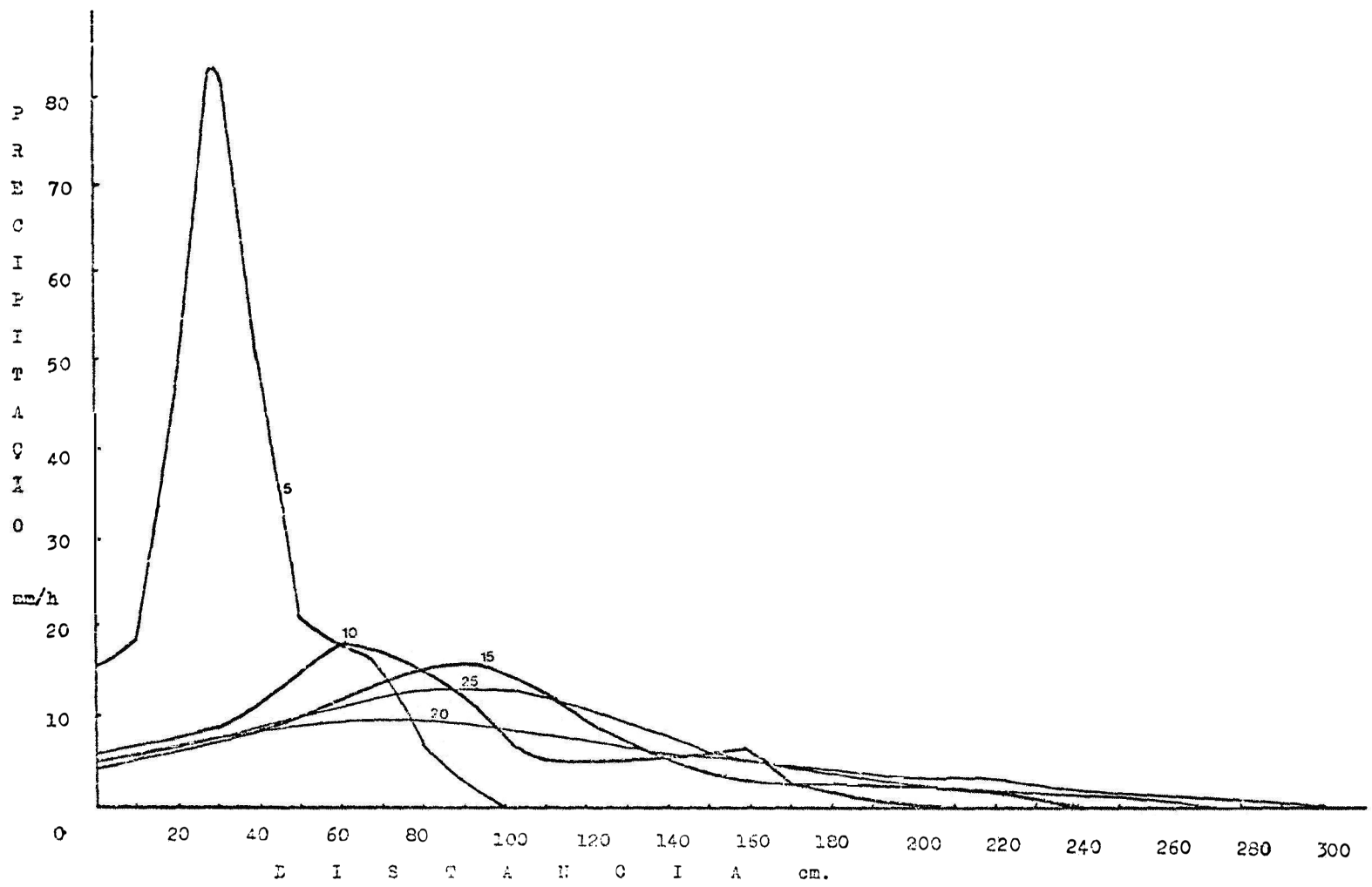


Figura 9 - Precipitação em Função da Distância para o Microaspersor Dantas MA 120 às Pressões de 5, 10, 15, 20 e 25 mca.

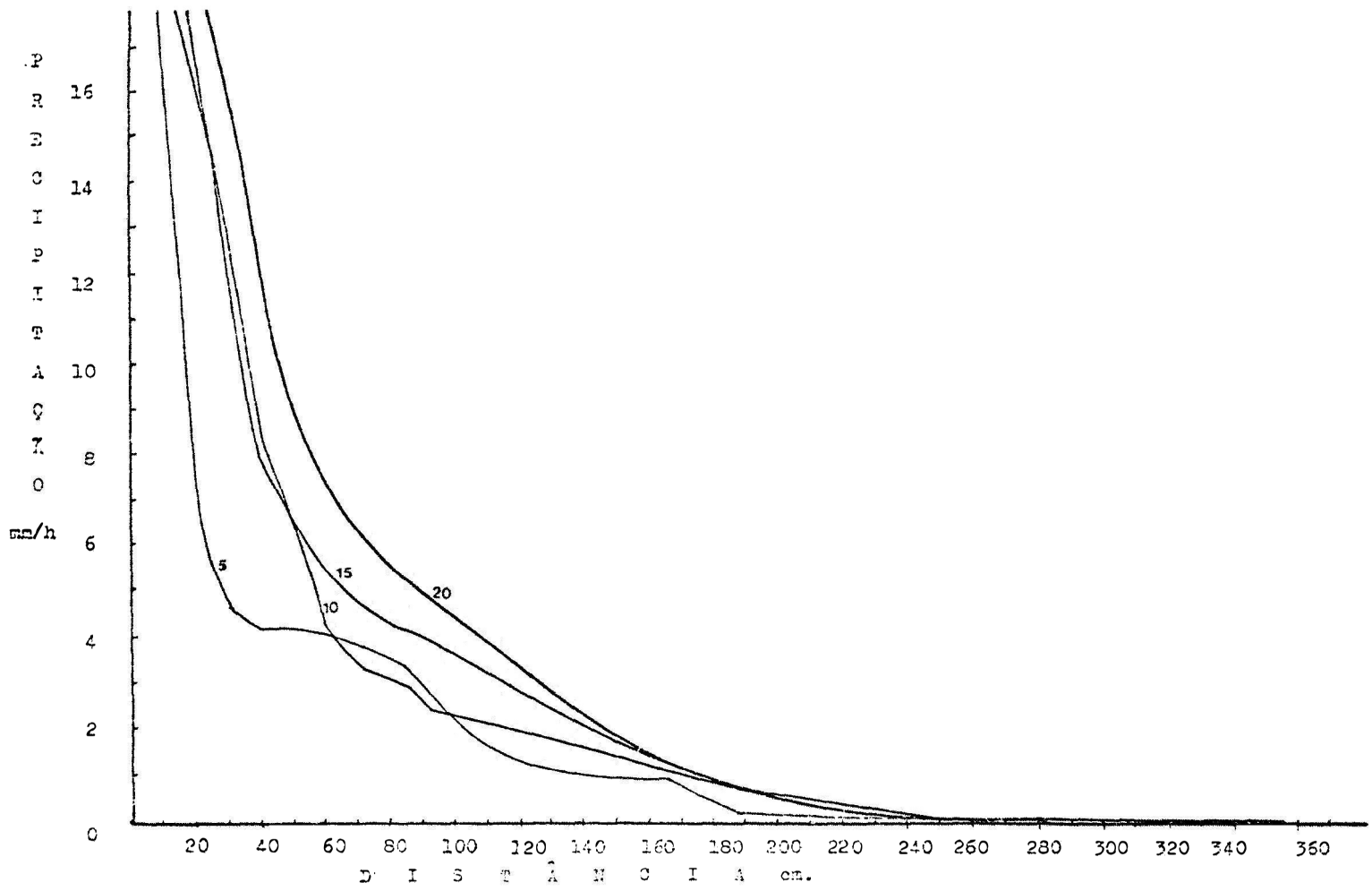


Figura 10 - Precipitação em Função da Distância para o Microaspersor Irtec Rotativo às Pressões de 5, 10, 15 e 20 mca.

Quadro 7 - Características Hidráulicas dos Tubos de Polietileno com 15,94mm de Diâmetro.

Nº da obs.	$Q \times 10^6$ m^3/s	V m/s	Hf m/m	Re adm.	f adm.	C adm.
01	51,67	0,2589	0,00840	4237	0,03915	130,6
02	57,87	0,2900	0,01029	4790	0,03823	131,1
03	67,42	0,3378	0,01323	5581	0,03621	133,4
04	109,20	0,5472	0,03056	9039	0,03199	137,2
05	131,98	0,6610	0,04326	11021	0,03094	137,6
06	165,02	0,8269	0,06384	13788	0,02917	139,6
07	191,00	0,9571	0,08253	15959	0,02815	140,6
08	224,47	1,1248	0,11025	18755	0,02722	141,3
09	248,10	1,2433	0,12852	20730	0,02598	143,8
10	285,07	1,4285	0,16212	23818	0,02482	145,8
11	312,67	1,5668	0,19152	26124	0,02437	146,1
12	329,27	1,6500	0,21105	27225	0,02422	146,0
13	358,33	1,7956	0,24612	29661	0,02385	146,3
14	388,83	1,9485	0,28245	32488	0,02324	147,3
15	418,40	2,0967	0,32130	35391	0,02284	147,9
16	427,63	2,1429	0,33096	36070	0,02252	148,7
17	452,57	2,2679	0,36540	38173	0,02220	149,2
18	476,16	2,3861	0,40089	40163	0,02200	149,3
19	496,70	2,4890	0,43218	41895	0,02179	149,6
20	516,30	2,5872	0,46410	43139	0,02166	149,6
21	531,93	2,6656	0,49098	44445	0,02159	149,5
22	570,93	2,8610	0,54684	47703	0,02087	151,4
23	594,10	2,9771	0,58590	49639	0,02065	151,8

Quadro 8 - Características Hidráulicas dos Tubos de Polietileno com 22,60mm de Diâmetro.

Nº da obs.	$Q \times 10^6$ m^3/s	V m/s	Hf m/m	Re adm.	f adm.	C adm.
01	74,63	0,1861	0,00315	4398	0,04031	128,0
02	88,78	0,2213	0,00420	5232	0,03798	130,3
03	130,55	0,3254	0,00840	7693	0,03513	131,8
04	161,78	0,4033	0,01197	9534	0,03260	134,9
05	195,15	0,4865	0,01680	11721	0,03144	135,5
06	328,38	0,8186	0,04137	19723	0,02735	140,2
07	415,00	1,0345	0,06132	24456	0,02538	143,2
08	483,53	1,2054	0,08085	29042	0,02465	143,7
09	561,97	1,4009	0,10647	33753	0,02403	144,0
10	622,17	1,5510	0,12558	37368	0,02313	145,8
11	680,67	1,6968	0,14700	40882	0,02262	146,5
12	736,53	1,8361	0,16842	44238	0,02213	147,3
13	781,43	1,9480	0,18774	46051	0,02191	147,4
14	830,70	2,0708	0,20916	49893	0,02161	147,8
15	885,03	2,2062	0,23310	53157	0,02121	148,5
16	929,53	2,3172	0,25347	55830	0,02091	149,1
17	976,67	2,4347	0,27594	58660	0,02062	149,6
18	1016,33	2,5336	0,29904	61043	0,02064	149,1
19	1062,00	2,6474	0,32025	63786	0,02024	150,1
20	1099,00	2,7396	0,33789	66008	0,01994	150,9
21	1144,83	2,8539	0,36330	68761	0,01976	150,2
22	1173,13	2,9244	0,38157	70461	0,01976	150,9
23	1217,70	3,0355	0,40593	73137	0,01924	151,5

- para o tubo de 22,60mm de diâmetro

$$H_{ft} = 0,05868\ V^{1,74099} \qquad (15)$$

onde:

H_{ft} = perda de carga no tubo, em m/m

V = velocidade média da água, em m/s.

Essas duas equações foram ajustadas com coeficientes de determinação (r^2) iguais a 0,99997 e 0,99999, respectivamente, e testes de t significativos ao nível de 1% de probabilidade.

Os valores experimentais utilizados na obtenção destas equações corresponderam a números de Reynolds superiores a 4000, caracterizando-se, portanto, regime de escoamento turbulento.

Observando as equações 14 e 15, verifica-se que o expoente da velocidade está próximo de 1,75, valor este encontrado na equação de Darcy-Wiesbach quando emprega-se o fator de atrito calculado pela fórmula de Biasius.

4.4. Fator de Atrito da Fórmula de Darcy-Weisbach

Utilizando-se de dados de perda de carga (H_f) e respectivos números de Reynolds contidos nos quadros 7 e 8, foram estabelecidas expressões que fornecem o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach para cada diâmetro de tubo estudado, e também uma expressão comum para os 2 diâmetros de tubos.

As expressões foram, respectivamente, para os diâmetros de 15,94mm, 22,60mm e comum.

$$f = 0,338\ Re^{-0,258} \qquad (16)$$

$$f = 0,348\ Re^{-0,257} \qquad (17)$$

$$f = 0,332\ Re^{-0,254} \qquad (18)$$

onde:

f = fator de atrito de fórmula de Darcy-Weisbach, adimensional

Re = número de Reynolds, adimensional.

Os coeficientes de determinação (r^2) foram 0,99840, 0,99922 e 0,99307, respectivamente para as equações 16, 17 e 18. Os testes t foram significativos a nível de 1% de probabilidade.

Observa-se que as equações encontradas se aproximam bastante da estabelecida por Blasius para o regime turbulento e condutos hidraulicamente lisos, onde $f = 0,316\ Re^{-0,25}$.

4.5. Coeficiente de Rugosidade C da Fórmula de Hazen-Willians

A partir dos dados de perda de carga nos tubos, obtiveram-se os valores do coeficiente de rugosidade C da fórmula de Hazen-Willians. Estes valores podem ser vistos nos quadros 7 e 8, respectivamente para os diâmetros de 15,94 e 22,60mm.

O coeficiente C que deveria ser constante para o material estudado variou com o número de Reynolds em ambos os diâmetros de tubos.

URBINA (1976), PARAQUEIMA (1977), ASSY (1977), OLIVEIRA (1978) e FARIA (1981) também encontraram valores variáveis para o coeficiente C, em um mesmo tubo sob diferentes vazões.

Foram estabelecidas expressões por meio de análise de regressão, procurando-se relacionar o coeficiente C com o número de Reynolds, chegando-se aos seguintes resultados, respectivamente para os diâmetros de 15,94 e 22,60mm:

$$C = 79{,}08\ Re^{0{,}0599} \qquad (19)$$

$$C = 77{,}81\ Re^{0{,}0595} \qquad (20)$$

Os coeficientes de determinação (r^2) foram 0,99202 e 0,99632, respectivamente para as equações 19 e 20. Os testes t foram significativos ao nível de 1% de probabilidade.

A expressão de Hazen-Willians pode ser utilizada com segurança nos cálculos de perda de carga para os tubos estudados, desde que se utilizem as expressões 19 ou 20 para a obtenção dos valores do coeficiente C.

Utilizando-se o valor médio para o coeficiente C, de 144,1 para o diâmetro de 15,94mm e 144,2 para o diâmetro de

22,6mm, pode-se cometer um erro no cálculo da perda de carga de até 11,2%, considerada a amplitude de vazão estudada.

4.6. Perda de Carga no Tubo com Microaspersores Vedados

Estudou-se a perda de carga ocorrida no tubo com microaspersores vedados, sendo estes inseridos nas linhas de teste com o espaçamento de três metros.

Este teste foi feito para os dois modelos de microaspersores, considerando-se os dois diâmetros de tubos estudados, dando, portanto, uma combinação de quatro resultados que podem ser vistos nos quadros 9, 10, 11 e 12.

Analisando-se os dados observados, por meio da análise de regressão, chegou-se as seguintes equações que fornecem a perda de carga no tubo com os microaspersores vedados:

- tubo com diâmetro de 15,94mm e microaspersores Dantas MA 120

$$H_{ftv} = 2,83912\ V^{1,75061} \qquad (21)$$

- tubo com diâmetro de 22,60mm e microaspersores Dantas MA 120

$$H_{ftv} = 1,81962\ V^{1,75273} \qquad (22)$$

- tubo com diâmetro de 15,94mm e microaspersores Irtec rotativo

$$H_{ftv} = 2,76743\ V^{1,73671} \qquad (23)$$

Quadro 9 - Características Hidráulicas dos Tubos de Polietileno de 15,94mm de Diâmetro, com Microaspersor Dantas MA 120 Vedados e Conectados a Cada 3 Metros.

Nº de Ordem	$Q \times 10^6$ m^3/s	V m/s	H_{ftv} m/30m
01	50,10	0,2511	0,25200
02	73,33	0,3675	0,47730
03	83,55	0,4187	0,63000
04	104,97	0,5260	0,93240
05	129,53	0,6491	1,31040
06	149,87	0,7510	1,71990
07	157,93	0,7914	1,90260
08	183,27	0,9184	2,43180
09	212,73	1,0660	3,17520
10	235,22	1,1787	3,84300
11	258,12	1,2935	4,50450
12	282,43	1,4153	5,22900
13	300,30	1,5048	5,89050
14	317,92	1,5931	6,37560
15	332,28	1,6651	6,99300
16	349,25	1,7501	7,57260
17	386,90	1,9388	9,02160
18	399,07	1,9998	9,58230
19	412,70	2,0681	10,13040
20	427,27	2,1711	10,79190
21	437,75	2,1936	11,34000
22	455,55	2,2828	12,08970
23	467,70	2,3337	12,63150
24	482,15	2,4161	13,35600
25	497,53	2,4932	13,94820
26	511,92	2,5653	14,74830
27	524,27	2,6272	15,37830
28	534,93	2,6806	15,93270
29	548,67	2,7494	16,59420
30	561,17	2,8121	17,11080
31	570,58	2,8593	17,76600

Quadro 10 - Características Hidráulicas dos Tubos de Polietileno de 22,60mm de Diâmetro, com Microaspersor Dantas MA 120 Vedados e Conectados a Cada 3 Metros.

Nº de Ordem	$Q \times 10^6$ m^3/s	V m/s	H_{ftv} m/30m
01	57,67	0,1438	0,0630
02	89,48	0,2231	0,1260
03	129,88	0,3238	0,2520
04	148,78	0,3709	0,3213
05	226,57	0,5648	0,6552
06	336,00	0,8376	1,3356
07	406,80	1,0141	1,8711
08	485,50	1,2078	2,5578
09	539,37	1,3446	3,0870
10	612,60	1,5271	3,8367
11	670,97	1,6726	4,4478
12	721,37	1,7983	5,1030
13	775,93	1,9343	5,7897
14	814,87	2,0313	6,3252
15	867,77	2,1632	6,9804
16	909,80	2,2680	7,6545
17	951,70	2,3724	8,2782
18	994,50	2,4791	8,8830
19	1029,43	2,5662	9,4563
20	1065,80	2,6569	10,0926
21	1100,90	2,7444	10,6848
22	1144,30	2,8526	11,4219
23	1180,80	2,9435	12,0897
24	1204,57	3,0028	12,5685

Quadro 11 - Características Hidráulicas dos Tubos de Polietileno de 15,94mm de Diâmetro, com Microaspersor Irtec Vedados e Conectados a Cada 3 Metros.

Nº de Ordem	$Q \times 10^6$ m^3/s	V m/s	H_{ftv} m/30m
01	62,05	0,3109	0,3528
02	70,78	0,3547	0,4536
03	86,02	0,4310	0,6426
04	112,95	0,5660	1,0206
05	128,97	0,6463	1,3230
06	164,10	0,8223	2,0160
07	196,65	0,9854	2,7279
08	217,40	1,0894	3,1941
09	234,33	1,1743	3,6918
10	264,43	1,3251	4,5045
11	283,80	1,4222	5,1345
12	302,47	1,5157	5,7267
13	326,30	1,6351	6,4953
14	342,60	1,7168	7,0812
15	356,13	1,7846	7,6419
16	375,67	1,8825	8,3916
17	389,73	1,9530	8,9460
18	406,87	2,0389	9,6327
19	435,73	2,1835	10,7919
20	460,80	2,3091	11,9700
21	487,90	2,4449	13,1796
22	511,13	2,5613	14,1120
23	536,17	2,6868	15,2712
24	555,27	2,7825	15,3044
25	574,10	2,8769	17,2368

Quadro 12 - Características Hidráulicas dos Tubos de Polietileno de 22,60mm de Diâmetro, com Microaspersor Irtec Vedados e Conectados a Cada 3 Metros.

Nº de Ordem	$Q \times 10^6$ m^3/s	V m/s	H_{ftv} m/30m
01	56,40	0,1406	0,0630
02	91,43	0,2279	0,1386
03	110,95	0,2766	0,1890
04	131,30	0,3273	0,2520
05	149,97	0,3738	0,3150
06	178,83	0,4458	0,4410
07	196,41	0,4896	0,5166
08	227,81	0,5679	0,6615
09	324,10	0,8079	1,2348
10	415,93	1,0369	1,8963
11	495,23	1,2345	2,5830
12	551,53	1,3749	3,1122
13	623,20	1,5535	3,8619
14	676,70	1,6869	4,4352
15	725,53	1,8086	5,0904
16	779,97	1,9443	5,6889
17	829,70	2,0683	6,3819
18	878,67	2,1904	7,0434
19	919,03	2,2910	7,6230
20	960,67	2,3948	8,2089
21	992,53	2,4742	8,7822
22	1023,53	2,5864	9,4563
23	1080,70	2,6940	10,1178
24	1115,77	2,7814	10,7226
25	1152,30	2,8725	11,3904
26	1193,20	2,9745	12,0897
27	1230,20	3,0667	12,6945

tubo com diâmetro de 22,60mm e microaspersores Irtec rotativo

$$H_{ftv} = 1,79869\ V^{1,73985} \qquad (24)$$

onde:

H_{ftv} = perda de carga nos 30 metros de tubo com os microaspersores vedados, em mca

V = velocidade média de água, em m/s.

Os coeficientes de determinação (r^2) foram 0,99992, 0,99992, 0,99976 e 0,99990, respectivamente para as equações 22, 23, 24 e 25. Os testes t foram significativos a nível de 1% de probabilidade.

4.7. Perda de Carga Localizada na Inserção do Microaspersor

Com as equações 14 e 15 de perda de carga nos tubos, e com as equações 21, 22, 23 e 24 de perda de carga nos tubos com os microaspersores vedados, foi determinada a perda de carga localizada na inserção dos microaspersores utilizando-se a equação 9, onde $H_{fl} = (H_{ftv} - H_{ft})/10$.

Sendo a perda de carga localizada usualmente apresentada na forma da expressão 8, determinaram-se os valores do coeficiente K desta expressão. Tais valores podem ser observados nos quadros 13, 14, 15 e 16.

Observando os referidos quadros, nota-se que o coeficiente de perda de carga localizada K variou com a vazão.

A solução prática dada a estes casos é adotar um valor médio para tal coeficiente, porém, procurando mais rigor nos cálculos, foram ajustadas equações que fornecem este coeficiente em função do número de Reynolds. São elas:

- microaspersor Dantas MA 120 instalado no tubo de 15,94mm de diâmetro

$$K = 0,98046\ Re^{-0,10049} \qquad (25)$$

- microaspersor Dantas MA 120 instalado no tubo de 22,60mm de diâmetro

$$K = 6,2833\times10^{-2} + 3,9315\times10^{-6}\ Re - 8,4843\times10^{-11}\ Re^{2} + 6,1238\times10^{-16}\ Re^{3} \qquad (26)$$

- microaspersor Irtec rotativo instalado no tubo de 15,94mm de diâmetro

$$K = 6,66326\ Re^{-0,34517} \qquad (27)$$

- microaspersor Irtec rotativo instalado no tubo de 22,60mm de diâmetro

$$K = 1,75519\ Re^{-0,31271} \qquad (28)$$

onde:

K = coeficiente estimado de perda de carga localizada na inserção do microaspersor no tubo

Re = número de Reynolds.

As equações foram ajustadas com coeficientes de determinação (r^2) de 0,98533, 0,95995, 0,99770 e 0,99998, res-

Quadro 13 - Características Hidráulicas do Escoamento e Perda de Carga na Inserção do Microaspersor Dantas MA 120 no Tubo de Polietileno com Diâmetro de 15,94mm.

Nº de Ordem	V m/s	H_{fl} mca	K adm.	L m	Re adm.
01	0,2	0,00087	0,4244	0,16	3399
02	0,4	0,00330	0,4044	0,18	6797
03	0,6	0,00717	0,3904	0,20	10196
04	0,8	0,01240	0,3797	0,21	15595
05	1,0	0,01894	0,3712	0,21	16994
06	1,2	0,02674	0,3640	0,22	20392
07	1,4	0,03578	0,3578	0,23	23791
08	1,6	0,04604	0,3525	0,23	27119
09	1,8	0,05747	0,3477	0,23	30583
10	2,0	0,07008	0,3434	0,24	33987
11	2,2	0,08383	0,3395	0,24	37386
12	2,4	0,09872	0,3359	0,24	40785
13	2,6	0,11473	0,3326	0,25	44183
14	2,8	0,13184	0,3296	0,25	47582
15	3,0	0,15004	0,3267	0,25	50981
Valor Médio			0,3564	0,22	

Quadro 14 - Características Hidráulicas do Escoamento e Perda de Carga na Inserção do Microaspersor Dantas MA 120 no Tubo de Polietileno com Diâmetro de 22,60mm.

Nº de Ordem	V m/s	H_{fl} mca	K adm.	L m	Re adm.
01	0,2	0,00015	0,0745	0,04	4819
02	0,4	0,00080	0,0985	0,07	9638
03	0,6	0,00198	0,1079	0,08	14456
04	0,8	0,00368	0,1128	0,09	19275
05	1,0	0,00591	0,1158	0,10	24094
06	1,2	0,00865	0,1178	0,11	28913
07	1,4	0,01191	0,1191	0,11	33731
08	1,6	0,01566	0,1200	0,12	18550
09	1,8	0,01995	0,1207	0,12	43369
10	2,0	0,02472	0,1211	0,13	48188
11	2,2	0,02999	0,1215	0,13	53006
12	2,4	0,03576	0,1217	0,13	57825
13	2,6	0,04202	0,1218	0,14	62644
14	2,8	0,04877	0,1219	0,14	67463
15	3,0	0,05600	0,1220	0,14	72281
Valor Médio			0,1145	0,11	

Quadro 15 - Características Hidráulicas do Escoamento e Perda de Carga na Inserção do Microaspersor Irtec Rotativo no Tubo de Polietileno com Diâmetro de 15,94mm.

Nº de Ordem	V m/s	H_{fl} mca	K adm.	L m	Re adm.
01	0,2	0,00081	0,3898	0,15	3399
02	0,4	0,00257	0,3152	0,14	6797
03	0,6	0,00505	0,2747	0,14	10196
04	0,8	0,00813	0,2490	0,14	15595
05	1,0	0,01177	0,2306	0,13	16994
06	1,2	0,01591	0,2166	0,13	20392
07	1,4	0,02054	0,2054	0,13	23791
08	1,6	0,02561	0,1961	0,13	27190
09	1,8	0,03111	0,1882	0,13	30588
10	2,0	0,03702	0,1814	0,13	33987
11	2,2	0,04333	0,1755	0,12	37386
12	2,4	0,05002	0,1702	0,12	40785
13	2,6	0,05708	0,1655	0,12	44183
14	2,8	0,06449	0,1612	0,12	47582
15	3,0	0,07226	0,1574	0,12	50981
Valor Médio			0,2185	0,13	

Quadro 16 - Características Hidráulicas do Escoamento e Perda de Carga na Inserção do Microaspersor Irtec Rotativo no Tubo de Polietileno com Diâmetro de 22,60mm.

Nº de Ordem	V m/s	H_{fl} mca	K adm.	L m	Re adm.
01	0,2	0,00025	0,1234	0,07	4819
02	0,4	0,00081	0,0995	0,07	9638
03	0,6	0,00161	0,0877	0,07	14456
04	0,8	0,00261	0,0802	0,07	19275
05	1,0	0,00382	0,0748	0,07	24094
06	1,2	0,00519	0,0707	0,06	28913
07	1,4	0,00673	0,0673	0,06	33731
08	1,6	0,00843	0,0646	0,06	38550
09	1,8	0,01028	0,0622	0,06	43369
10	2,0	0,01228	0,0602	0,06	48188
11	2,2	0,01442	0,0584	0,06	53006
12	2,4	0,01670	0,0568	0,06	57825
13	2,6	0,01910	0,0554	0,06	62644
14	2,8	0,02164	0,0541	0,06	67463
15	3,0	0,02431	0,0529	0,06	72281
Valor Médio			0,0712	0,06	

pectivamente, para as equações 25, 26, 27 e 28. Os testes t foram significativos ao nível de 1% de probabilidade.

Foram também estabelecidas equações por análise de regressao que correlacionam a perda de carga localizada diretamente com a velocidade média da água. Tais equações foram do tipo

$$H_{fl} = pV^x \qquad (29)$$

sendo:

H_{fl} = perda de carga localizada, em mca

V = velocidade média da água, em m/s

p e x = constantes da regressão.

Os valores de p e x, e também os coeficientes de determinação (r^2) encontrados são apresentados no quadro 17.

Quadro 17 - Valores das Constantes de Regressão p e x e dos Coeficientes de Determinação Obtidos para a Equação 29.

Diâmetro do tubo (mm)	Microaspersor					
	Dantas MA 120			Irtec Rotativo		
	p	x	r^2	p	x	r^2
15,94	0,01879	1,89903	0,99998	0,01174	1,65738	0,99999
22,60	0,00558	2,15128	0,99889	0,00381	1,68722	0,99999

A equação 8 ($hf = KV^2/2g$), que normalmente é utilizada para expressar perdas de carga localizadas, apresenta o expoente da velocidade igual a 2. Já as equações experimentais, segundo modelo da equação 29, apresentaram valores diferentes de 2, conforme pode ser visto no quadro 17. Portanto ao expressar-se a perda de carga localizada com base na equação 8, o coeficiente K desta equação variará com a velocidade de modo a compensar a diferença entre os expoentes.

A perda de carga localizada foi melhor representada pelo modelo da equação 29, pois os valores de p e x são constantes em toda faixa de velocidade. Já na equação 8, o valor do coeficiente K é variável com a velocidade.

Alguns técnicos recomendam o método dos comprimentos virtuais para compensar as perdas localizadas na inserção dos emissores. Para dar subsídio a tal metodologia de cálculo, foram incluídos nos quadros 13, 14, 15 e 16 os valores do comprimento de tubo, equivalentes às perdas localizadas na inserção dos microaspersores.

4.8. Coeficiente F de Redução de Perda de Carga de Christiansen e Comprimento da Linha Lateral

Com base no programa cujo fluxograma foi mostrado na figura 7, determinaram-se os valores do coeficiente F para os microaspersores em estudo, em função do número e espaça-

mento entre microaspersores na lateral e também do diâmetro de tubo utilizado.

Para esses cálculos, foram consideradas cargas de pressão no último microaspersor de 15mca e 10mca, para o Dantas MA 120 e o Irtec, respectivamente.

Foram utilizados dois critérios diferentes para determinação dos valores de F, determinando-se, portanto, F1 e F2.

Para os cálculos de F1, empregou-se a equação de Darcy-Wiesbach considerando uma região de ocorrência de regime laminar e outra de regime turbulento. A perda de carga localizada na inserção do microaspersor na lateral não foi considerada no regime laminar (Re < 2000).

Nos cálculos de F2 utilizou-se também a equação de Darcy-Weisbach, porem admitindo apenas regime turbulento em toda linha; a perda de carga localizada na inserção do microaspersor na lateral doi desprezada.

O uso dos valores de F1 conduz a resultados mais exatos, uma vez que leva em consideração os dois regimes de escoamente e também as perdas localizadas, contudo o critério que utiliza o cálculo de F2 é o mais empregado.

Os quadros 18, 19 e 20 mostram os valores de F1 e F2 calculados para espaçamentos de 3, 6 e 9 metros entre microaspersores. Tais valores foram calculados até um limite má

ximo de 20% na variação da vazão entre o primeiro e o último microaspersor.

Para um mesmo numero de microaspersores, e a partir de um determinado número destes, os valores de F aumentaram quando diminuiu o espaçamento entre microaspersores, o que está de acordo com os trabalhos de OLIVEIRA (1978) e FARIA (1982).

O comprimento máximo das linhas laterais depende do critério adotado para variação de vazão máxima permissível entre o primeiro e o último emissor. Uma grande parte dos autores adota o critério de 10%; outros, menos rigorosos, admitem até 20%.

Quadro 18 - Valores dos Coeficientes de Redução de Perda de Carga (F1 e F2), em Função do Número e Tipo de Microaspersores Espaçados de Três Metros.

Nº de M.A.	Diâmetro da Linha Lateral							
	15,94 mm				22,60 mm			
	Dantas		Irtec		Dantas		Irtec	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
02	0,637	0,649	0,750	0,649	0,648	0,649	0,750	0,649
03	0,562	0,546	0,515	0,546	0,551	0,546	0,555	0,546
04	0,520	0,498	0,496	0,498	0,504	0,498	0,508	0,498
05	0,494	0,469	0,478	0,470	0,477	0,470	0,480	0,470
06	0,476	0,451	0,464	0,451	0,459	0,451	0,462	0,451
07	0,463	0,437	0,453	0,438	0,446	0,438	0,449	0,438
08	0,454	0,427	0,444	0,428	0,437	0,429	0,439	0,429
09	0,446	0,419	0,437	0,420	0,430	0,421	0,431	0,421
10	0,439	0,412	0,431	0,414	0,424	0,415	0,425	0,415
11	0,433	0,406	0,426	0,408	0,419	0,410	0,420	0,410
12	0,428	0,401	0,421	0,403	0,415	0,406	0,416	0,406
13	0,423*	0,396	0,417	0,399	0,412	0,402	0,412	0,403
14	0,419	0,392*	0,413	0,396	0,409	0,399	0,409	0,400
15	0,415	0,388	0,409	0,392	0,406	0,396	0,406	0,397
16	0,410	0,384	0,406	0,389	0,404	0,393	0,404	0,395
17	0,406	0,380	0,402*	0,386*	0,402	0,391	0,401	0,392
18		0,376	0,399	0,383	0,400	0,389	0,399	0,390
19			0,396	0,380	0,398	0,387	0,398	0,389
20			0,392	0,377	0,396	0,385	0,396	0,387
21			0,389	0,374	0,394	0,383	0,394	0,385
22				0,371	0,393	0,381	0,393	0,384
23					0,391	0,380	0,391	0,382
24					0,389	0,378	0,390	0,381
25					0,388*	0,366*	0,388	0,380
26					0,386	0,374	0,387	0,378
27					0,385	0,373	0,385	0,377
28					0,383	0,371	0,384	0,376
29					0,382	0,369	0,383	0,374
30					0,380	0,368	0,382*	0,373
31					0,378	0,366	0,380	0,372*
32					0,377	0,364	0,379	0,371
33							0,378	0,369
34							0,376	0,368
35							0,375	0,367
36							0,374	0,366
37							0,372	0,364
38							0,371	0,363
39							0,370	0,362
40								0,360

M.A. - Microaspersores.

* Valor limite para se obter 10% de variação de vazão entre o primeiro e o último microaspersor.

Quadro 19 - Valores dos Coeficientes de Redução de Perda de Carga (F1 e F2), em Função do Número e Tipo de Microaspersores Espaçados de Seis Metros.

Nº de M.A.	Diâmetro da Linha Lateral							
	15,94 mm				22,60 mm			
	Dantas		Irtec		Dantas		Irtec	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
02	0,623	0,649	0,750	0,649	0,645	0,649	0,750	0,649
03	0,547	0,546	0,506	0,546	0,548	0,546	0,551	0,546
04	0,506	0,498	0,466	0,498	0,501	0,498	0,503	0,498
05	0,480	0,469	0,468	0,469	0,473	0,470	0,475	0,470
06	0,462	0,450	0,454	0,450	0,455	0,451	0,456	0,451
07	0,448	0,436	0,442	0,437	0,442	0,438	0,443	0,438
08	0,438	0,425	0,433	0,427	0,432	0,428	0,434	0,428
09	0,429	0,416	0,426	0,418	0,425	0,420	0,426	0,421
10	0,422*	0,409	0,419	0,412	0,419	0,414	0,420	0,415
11	0,415	0,402*	0,414	0,406	0,414	0,409	0,415	0,410
12	0,409	0,396	0,408	0,400	0,409	0,405	0,410	0,406
13	0,403	0,390	0,403*	0,395*	0,406	0,401	0,407	0,402
14	0,397	0,384	0,399	0,391	0,402	0,397	0,403	0,399
15			0,394	0,386	0,399	0,394	0,400	0,396
16			0,390	0,382	0,396	0,391	0,398	0,393
17			0,386	0,378	0,393	0,388	0,395	0,391
18					0,391	0,386	0,393	0,389
19					0,388*	0,383*	0,391	0,386
20					0,386	0,381	0,389	0,384
21					0,384	0,378	0,387	0,382
22					0,381	0,376	0,385	0,381
23					0,379	0,373	0,383	0,379
24					0,377	0,371	0,381*	0,377*
25					0,374	0,369	0,379	0,375
26							0,377	0,373
27							0,376	0,372
28							0,374	0,370
29							0,372	0,368
30							0,370	0,366
31							0,368	0,364

M.A. - Microaspersores.

* Valor limite para se obter 10% de variação de vazão entre o primeiro e o último microaspersor.

Quadro 20 - Valores dos Coeficientes de Redução de Perda de Carga (F1 e F2), em Função do Número e Tipo de Microaspersores Espaçados de Nove Metros.

Nº de M.A.	Diâmetro da Linha Lateral							
	15,94 mm				22,60 mm			
	Dantas		Irtec		Dantas		Irtec	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
02	0,618	0,649	0,750	0,649	0,644	0,649	0,750	0,649
03	0,543	0,546	0,503	0,546	0,546	0,546	0,546	0,546
04	0,501	0,497	0,482	0,498	0,499	0,498	0,501	0,498
05	0,474	0,468	0,464	0,469	0,472	0,470	0,473	0,470
06	0,456	0,449	0,450	0,450	0,453	0,451	0,455	0,451
07	0,442*	0,435	0,438	0,436	0,440	0,438	0,441	0,438
08	0,431	0,423	0,429	0,426	0,431	0,428	0,432	0,428
09	0,422	0,414*	0,421	0,417	0,423	0,420	0,424	0,421
10	0,414	0,405	0,414	0,410	0,416	0,414	0,418	0,414
11	0,406	0,398	0,408*	0,403*	0,411	0,408	0,412	0,409
12	0,399	0,390	0,402	0,397	0,407	0,403	0,408	0,405
13			0,397	0,392	0,402	0,399	0,404	0,401
14			0,391	0,386	0,399	0,396	0,401	0,398
15				0,381	0,395	0,392	0,398	0,395
16					0,392	0,389	0,395	0,392
17					0,389*	0,386*	0,392	0,389
18					0,386	0,382	0,390	0,387
19					0,383	0,379	0,387	0,384
20					0,380	0,376	0,385	0,382
21					0,377	0,374	0,382*	0,380*
22					0,374	0,371	0,380	0,377
23							0,378	0,375
24							0,376	0,373
25							0,373	0,371
26							0,371	0,369
27							0,369	0,366

M.A. - Microaspersores.

* Valor limite para se obter 10% de variação de vazão entre o primeiro e o último microaspersor.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, nos métodos aplicados e condições locais em que foram realizados os testes, pode-se concluir que:

a) As equações características de vazão-pressão dos microaspersores Dantas MA 120 e Irtec rotativo foram, respectivamente:

$$q = 18,54\ H^{0,54}$$

$$q = 12,78\ H^{0,55}$$

sendo:

q = vazão do microaspersor, em ℓ/h

H = pressão na entrada do microaspersor, em mca.

b) Os coeficientes de variação de vazão dos microaspersores foram: 2,7% para o Dantas MA 120 e 12,18% para o Irtec rotativo. Tais valores, de acordo com os parâmetros preconizados pelo SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA (1979), classi

ficam o microaspersor Dantas MA 120 como de excelente uniformidade e o Irtec rotativo como de uniformidade pobre.

c) Ambos os modelos de microaspersores, quando submetidos a uma mesma pressão, apresentaram variações no diâmetro molhado e no perfil de distribuição e o seguinte alcance médio:

pressão (mca)	diâmetro médio de alcance (cm)	
	Dantas MA 120	Irtec
5,0	182	380
10,0	344	510
15,0	414	530
20,0	514	522
25,0	512	-

d) As equações para determinação da perda de carga nos tubos com diâmetros de 15,94mm e 22,60mm foram, respectivamente:

$$H_{ft} = 0,08833\ V^{1,74029}$$

$$H_{ft} = 0,05868\ V^{1,74099}$$

sendo:

H_{ft} = perda de carga no tubo, em m/m

V = velocidade média da água, em m/s.

e) As equações para determinação da perda de carga no tubo com microaspersores inseridos e previamente vedados

foram as seguintes:

- tubo com diâmetro de 15,94mm e microaspersores Dantas MA 120

$$H_{ftv} = 2,83912\ V^{1,75061}$$

- tubo com diâmetro de 22,60mm e microaspersores Dantas MA 120

$$H_{ftv} = 1,81962\ V^{1,75273}$$

- tubo com diâmetro de 15,94mm e microaspersores Irtec

$$H_{ftv} = 2,76743\ V^{1,73671}$$

- tubo com diâmetro de 22,60mm e microaspersores Irtec

$$H_{ftv} = 1,79869\ V^{1,73985}$$

sendo:

H_{ftv} = perda de carga em 30 metros de tubo com microaspersores vedados e inseridos a cada três metros, em mca

V = velocidade média da água, em m/s

f) O fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach (f) para o material estudado pode ser determinado pela seguinte equação

$$f = 0,332\ Re^{-0,254}$$

g) O valor do coeficiente C da fórmula de Hazen--Willians variou com o número de Reynolds segundo as expressões abaixo, respectivamente para os diâmetros de 15,94 e 22,60mm

$$C = 79{,}08\ Re^{0{,}0599}$$

$$C = 77{,}81\ Re^{0{,}0595}$$

h) A perda de carga localizada foi melhor representada pela equação $Hf = pV^x$, pois os valores de p e x permaneceram constantes em toda faixa de vazão. Já a equação usual $Hf = KV^2/2g$ apresentou o coeficiente K variável segundo as expressões:

- microaspersor Dantas MA 120 inserido no tubo de 15,94mm de diâmetro

$$K = 0{,}98946\ Re^{-0{,}10049}$$

- microaspersor Dantas MA 120 inserido no tubo de 22,60mm de diâmetro

$$K = 6{,}2833\times10^{-2} + 3{,}9315\times10^{-6}\ Re - 8{,}4843\times10^{-11}\ Re^2 + 6{,}1238\times10^{-16}\ Re^3$$

- microaspersor Irtec rotativo inserido no tubo de 15,94mm de diâmetro

$$K = 6{,}66326\ Re^{-0{,}34517}$$

- microaspersor Irtec rotativo inserido no tubo

de 22,60mm de diâmetro

$$K = 1,75519\ Re^{-0,31271}$$

sendo:

K = coeficiente de perda de carga localizada, adimensional

Re = número de Reynolds, adimensional.

i) Para um mesmo número de microaspersores e a partir de um determinado número destes, os valores do coeficiente de redução de perda de carga (f) de Christiansen aumentaram à medida que diminuiu o espaçamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSY, T.M., 1977. O Emprego da Fórmula Universal de Perda de Carga e as Limitações das Fórmulas Empíricas. São Paulo, CETESB. 64 p.

BEN'AMI, A.; M.UZRAD e A.ORESTEIN, 1978. Ein-tal Minisprinklers. Haifa, Faculty of Agriculture. 7 p.

BERNARDO, S., 1982. Manual de Irrigação. Viçosa, Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa. 463 p.

BRUWER, J.; L.SCHEEPERS e L.VENTER, 1979. Microjets for Irrigation. The Citrus and Subtropical Fruit Journal. Johansburg, 552: 4-7.

CHRISTIANSEN, J., 1942. Irigation by Sprinkling. Logan, Utah State University. 124 p.

FARIA, M., 1981. Características Hidráulicas do Microgotejador Irtec e da Linha Lateral de Irrigação. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 78 p. (tese de mestrado).

FEGHALI, J., 1974. Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 2 v.

FISHER, J., 1977. Irrigation. The Citrus Industry. Panpa, 58 (9): 32-42.

FOUCHÉ, P.; D.BESTER e G.VELDMAN, 1979. A Comparison of Different Methods to Increase Productivity of Navel Trees. The Citrus and Subtropical Fruit Journal. Johansburg, 542: 4-6.

GILAAD, Y.; L.KRYSTAL e K.ZANKER, 1974. Hidraulic and Mechanical Properties of Drippers. *In*: Second International Drip Irrigation Congress, San Diego, 311-316.

HANDLEY, D.; H.VAUX e N.PICKERING, 1983. Evaluation Low-volume Irrigation Systems for Emission Uniformity. California Agriculture. Berkeley, 27: 10-12.

KARMELI, D. e J.KELLER, 1974. Evaluation of a Trickle Irrigation System. *In*: Second International Drip Irrigation Congress, San Diego, 287-292.

KELLER, J. e D.KARMELI, 1975. Trickle Irrigation Design. Glendora, Rain Bird Sprinckler Mfg Co. 133 p.

MICHAEL, A., 1978. Irrigation Theory and Practices. New Delhi, Vikas Publishing House Put Ltd. 801 p.

OLITTA, A., 1978. Os Métodos de Irrigação. São Paulo, Livraria Nobel. 267 p.

OLIVEIRA, C., 1978. Hidráulica de Gotejadores e de Linhas Laterais para Irrigação por Gotejamento. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 72 p. (tese de mestrado).

PARAQUEIMA, J., 1977. Study of Some Frictional Characteristcs of Small Diameter Tubing for Trickle Irrigation Lateral. Logan Utah State University. 64 p. (thesis of MS).

PUEYO, L. e J.FORCADA, 1982. Cálculo Hidráulico - Instruções para Redes de Microaspersão. Item. Brasília, 11: 28-35.

SOARES, A., 1981. Características Hidráulicas de Microtubos Cipla e de Linhas Laterais para Irrigação por Gotejamento. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 72 p. (tese de mestrado).

SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA, 1979. Trickle Irrigation, chapter 7, section 15, Irrigation, Washington D.C. (traft edition).

URBINA, J., 1977. Head Loss Characteristics of Trickle Irrigation Hose with Emitters. Logan, Utah State University. 54 p. (thesis of MS).

VERMEIREN, L. e G. JOBLING, 1980. Localized Irrigation. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 203 p.

WU, I. e H. GITLIN, 1974. Design Charts for Drip Irrigation System. *In*: Second Internacional Drip Irrigation Congress, San Diego, 287-292.

A N E X O

Versão do Programa Utilizado para Calcular o Fator de Redução de Perda de Carga F (Christiansen) em Linguagem de Calculadora Texas TI 58-59.

1 2nd LBL	44 01	87 +	130 0
2 A	45 =	88 1	131 2nd LBL
3 RCL	46 STO	89 9	132 C
4 12	47 17	90 ,	133 6
5 x^2	48 RCL	91 6	134 4
6 x	49 14	92 =	135 +
7 2nd π	50 x	93 STO	136 X ⇄ t
8 +	51 RCL	94 21	137 =
9 4	52 10	95 1	138 STO
10 =	53 =	96 SUN	139 22
11 STO	54 X ⇄ t	97 15	140 2nd LBL
12 13	55 RCL	98 RCL	141 D
13 RCL	56 17	99 20	142 x
14 07	57 -	100 X ⇄ t	143 RCL
15 y^x	58 RCL	101 RCL	144 08
16 RCL	59 14	102 11	145 +
17 02	60 =	103 2nd ≥ t	146 RCL
18 x	61 2nd x ≥ t	104 c	147 12
19 RCL	62 2nd A'	105 X ⇄ t	148 x
20 01	63 RCL	106 y^x	149 RCL
21 =	64 17	107 RCL	150 21
22 STO	65 SUN	108 06	151 =
23 14	66 18	109 x	152 SUN
24 0	67 RCL	110 RCL	153 16
25 STO	68 18	111 05	154 x
26 15	69 +	112 =	155 RCL
27 STO	70 RCL	113 x	156 15
28 16	71 13	114 RCL	157 =
29 STO	72 =	115 21	158 STO
30 18	73 STO	116 =	159 23
31 2nd LBL	74 19	117 SUN	160 +
32 B	75 x	118 16	161 RCL
33 RCL	76 RCL	119 RCL	162 16
34 07	77 12	120 20	163 =
35 +	78 +	121 y^x	164 1/x
36 RCL	79 RCL	122 RCL	165 RS
37 16	80 09	123 04	166 RCL
38 =	81 =	124 x	167 15
39 y^x	82 STO	125 RCL	168 RS
40 RCL	83 20	126 03	169 B
41 02	84 RCL	127 =	170 2nd LBL
42 x	85 19	128 STO	171 2nd A'
43 RCL	86 x^2	129 22	172 RS

A entrada de dados foi feita através das memórias, sendo:

memória	conteúdo	memória	conteúdo
01	a	07	H
02	b	08	E
03	c	09	Y
04	x	10	n
05	m	11	2000
06	z	12	D