

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

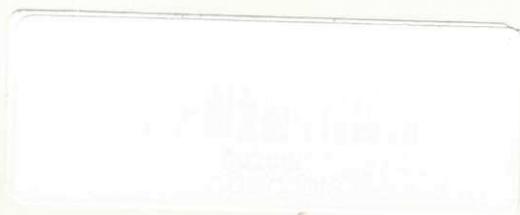
DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE UMA PARCELA
DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

JOÃO ABNER GUIMARÃES JÚNIOR

EP-3-15 308

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 1993



JOÃO ABNER GUIMARÃES JÚNIOR

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE UMA PARCELA
DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Dissertação apresentada ao Curso de MESTRADO
EM ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

AREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

VAJAPEYAM S. SRINIVASAN

Orientador

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 1993

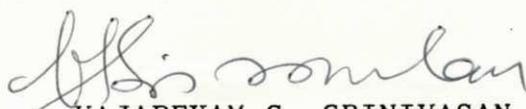


G963d	<p data-bbox="375 1240 1168 1388">Guimarães Júnior, João Abner. Dimensionamento econômico de uma parcela de irrigação por gotejamento / João Abner Guimarães Júnior. - Campina Grande, 1993. 158 f.</p> <p data-bbox="375 1411 1168 1500">Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1993.</p> <p data-bbox="375 1500 1168 1579">"Orientação : Prof. Dr. Vajapeyan Srirangachar Srinivasan". Referências.</p> <p data-bbox="375 1612 1168 1758">1. Irrigação por Gotejamento. 2. Técnicas Modernas de Irrigação. 3. Parcela de Gotejamento - Irrigação. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título</p> <p data-bbox="877 1780 1168 1805">CDU 631.674.6(043)</p>
-------	---

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE UMA PARCELA
DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

JOÃO ABNER GUIMARÃES JÚNIOR

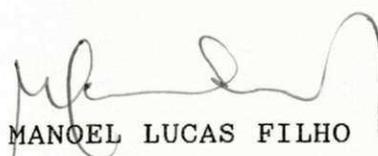
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/03/93


VAJAPEYAM S. SRINIVASAN

Orientador


HAMILTON MEDEIROS DE AZEVEDO

Componente da Banca


MANOEL LUCAS FILHO
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 1993

DEDICATÓRIAS

A minha esposa Rita e aos meus filhos Luis, Clarice e Cecília, pelo carinho e dedicação que sempre demonstraram. Ao meu pai João Abner (in memoriam) e a minha mãe Ivete, pela educação exemplar.

A G R A D E C I M E N T O S

A Universidade Federal do Rio Grande de Norte - UFRN, que, conjuntamente com o Programa Institucional de Capacitação de Docentes - PICD, da CAPES, possibilitou a realização deste curso de mestrado.

Ao Conselho Departamental do Centro de Tecnologia da UFRN, representado pela atual Direção do Centro de Tecnologia, e à Direção anterior, na figura da professor José Ivonildo do Rêgo, pelos apoios e incentivos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UFRN, e especialmente aos professores da Câmara de Recursos Hídricos e Saneamento deste Departamento, pelo desprendimento e solidariedade sempre demonstrados ao longo deste período de afastamento para realizar este mestrado.

Ao professor Manoel Lucas Filho, do Departamento de Engenharia Civil da UFRN, que acompanhou desde o primeiro momento o desenvolvimento deste trabalho e contribuiu, a partir de uma análise crítica sempre presente, para o bom andamento da pesquisa.

Ao engenheiro João Alberto Wanderley, pela prestimosa revisão na redação final deste trabalho.

Aos professores e funcionários da Área de Recursos Hídricos do Centro de Tecnologia da UFPB - Campus II, Campina Grande, representados pelo professor Eduardo Enéas de Figueiredo, pela dedicação e amizade.

Aos meus familiares, pelas ajudas e incentivos recebidos ao longo da minha vida.

A todos os outros que, de uma maneira ou de outra, possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradeço, mui especialmente, ao professor Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, que orientou esta pesquisa com dedicação exemplar.

RESUMO

Os elevados custos de instalação dos sistemas de gotejamento dificultam a difusão desta técnica. O projeto desses sistemas baseia-se nas parcelas, unidades básicas onde a maior parte das tubulações é instalada. A metodologia usual de projeto fundamenta-se nas recomendações de Keller e Karmeli (1975) para o projeto ótimo de uma parcela, a partir de parâmetros relacionados com o formato e a distribuição da perda de carga nos ramais e na derivação, tendo como base custos de equipamentos que retratam uma particular realidade de mercado. O presente trabalho, além de reavaliar e atualizar essa metodologia de projeto, inclui a determinação do ponto de entrega como um novo parâmetro de otimização, e baseia-se em elementos mais detalhados, tais como: "layout" das tubulações da parcela, variação da pressão na parcela, vazão dos gotejadores, espaçamentos entre os gotejadores e os fatores de custos das tubulações. Foi empregado um modelo de otimização analítico clássico que resultou em expressões genéricas, concisas e de fácil aplicação. Os resultados da aplicação da metodologia proposta ressaltaram a sua importância.

SUMÁRIO

	Página
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO.....	5
2.1 - Aspectos gerais.....	5
2.2 - Componentes do sistema.....	6
2.3 - Características dos emissores.....	8
2.3.1 - Classificação dos gotejadores quanto ao funcionamento hidráulico.....	8
2.3.2 - Aspectos hidráulicos dos emissores.....	10
2.4 - Uniformidade de irrigação.....	11
2.4.1 - Coeficiente de variação de fabricação dos emissores de gotejamento.....	12
2.4.2 - Coeficiente de uniformidade do sistema.....	13
2.5 - Limites de variação da pressão na parcela.....	16
2.6 - Considerações finais.....	16
3 - HIDRÁULICA APLICADA AOS SISTEMAS DE GOTEJAMENTO.....	18
3.1 - Considerações iniciais.....	18
3.2 - Cálculo da perda de carga uniforme em tubu- lações de gotejamento.....	19
3.3 - Perdas de carga localizadas nas linhas de irrigação.....	23
3.4 - Fatores de correção da perda de carga nas linhas de gotejamento.....	26

3.4.1 - Fator de correção da perda de carga para um modelo com distribuição contínua da vazão.....	27
3.4.2 - Fator de correção da perda de carga para uma distribuição discreta de vazão ao longo de uma linha de gotejamento.....	32
3.5 - Linha de energia de uma tubulação com saídas múltiplas.....	44
3.5.1 - Método gráfico.....	44
3.5.2 - Perdas de cargas intermediárias em linhas com distribuição de vazão.....	46
3.6 - Dimensionamento de uma linha de gotejamento com combinação de diâmetros.....	50
3.7 - Influências da variação da vazão distribuída no cálculo das perdas de cargas.....	53
3.7.1 - Determinação da lei de variação da vazão emitida.....	57
3.7.2 - Determinação da lei de variação da vazão longitudinal.....	58
3.7.3 - Determinação da perda de carga total.....	59
3.7.4 - Relação entre a perda de carga de uma distribuição parabólica e a perda de carga de uma distribuição contínua.....	60
3.8 - Considerações finais.....	61

4 - DIMENSINAMENTO ÓTIMO DE UMA PARCELA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO.....	63
4.1 - Introdução.....	63
4.2 - Metodologia de Keller e Karmeli (1975).....	64
4.3 - A metodologia proposta.....	66
4.4 - Variáveis do problema de otimização.....	67
4.5 - Tipos de "layout".....	68
4.6 - A função objetivo do problema de otimização.....	70
4.6.1 - Custo dos ramais.....	70
4.6.2 - Custo da derivação.....	73
4.6.3 - A função objetivo.....	77
4.7 - Análise da função-objetivo.....	77
4.8 - Solução ótima global do problema.....	75
4.8.1 - As derivadas parciais da função-objetivo....	72
4.8.2 - Desenvolvimento do problema.....	81
4.8.3 - Método prático.....	82
4.9 - Formato ótimo associado com um determinado diâmetro para os ramais.....	85
4.9.1 - Método prático para a determinação do formato ótimo associado com um determinado diâmetro dos ramais.....	87
4.10- Formato ótimo de uma parcela associado com um determinado diâmetro para a derivação.....	88
4.11- Relação ótima entre as perdas de carga dos ramais e da derivação.....	90
4.12- Abacos para a aplicação da metodologia.....	92

4.12.1-	Abaco para a determinação do comprimento ótimo de um ramal de uma parcela de gotejamento com "layout em "T".....	94
4.12.2-	Abaco para a determinação do comprimento ótimo de um ramal de uma parcela de gotejamento com "layout em "T" e diâmetro interno de 9,4 mm.....	97
4.12.3-	Abaco para a determinação da relação ótima entre as perdas de carga das tubulações de uma parcela de gotejamento com "layout" em "T".....	99
4.13 -	Otimização do ponto de entrega da água nas tubulações de uma parcela de gotejamento.....	102
4.13.1-	Relação entre os diâmetros de uma tubulação inclinada e uma horizontal com pontos de entrega central da água.....	104
4.13.2-	Relação entre o diâmetro de uma tubulação inclinada com entrega na extremidade superior e o diâmetro de uma horizontal com entrega no centro.....	110
4.13.3-	Método prático para a determinação do ponto de entrega ótimo em uma linha de irrigação inclinada.....	115
5 -	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	122
6 -	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	129
7 -	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
APÊNDICE A -	PROGRAMA DOPIG.....	138

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Irrigação por gotejamento é uma moderna técnica agrícola que se desenvolveu comercialmente em Israel, na década de 60, tendo-se expandido rapidamente por todo o mundo (San Juan, 1988). No Brasil, as primeiras experiências ocorreram no início da década de 70 e em escala industrial a partir de 1975 (Telles, 1982). Ultimamente, esta técnica vem sendo muito difundida principalmente na fruticultura, com bons resultados (Vieira, 1983). Tal fato deve-se principalmente à combinação de fatores vantajosos que este tipo de sistema apresenta frente à irrigação convencional. Pode-se citar como principais vantagens: um controle efetivo da distribuição da água no terreno, um padrão de automação elevado e um menor custo de bombeamento.

Entretanto, como se trata de um sistema fixo, o seu custo de instalação torna-se bastante elevado, limitando o seu uso às culturas com alta capacidade de retorno, e justificando o desenvolvimento de pesquisas que resultem na minimização dos custos dos equipamentos destes sistemas.

Acompanhando o extraordinário progresso na área de informática, diversos pacotes de otimização, como o Gams-Minos,

citado por Holzappel et alii (1990), têm sido testados no projeto de sistemas de irrigação por gotejamento. Porém, nem sempre esses modelos são acessíveis para o uso geral, pela indisponibilidade de "software" e equipamentos, ou até mesmo pela exigência de um usuário especializado, podendo resultar em um custo elevado para tais projetos. Nestes casos, é importante a formulação de uma metodologia prática, genérica e de fácil aplicação, que oriente o projetista em todas as etapas do projeto.

A metodologia usual de projeto dos sistemas de gotejamento baseia-se nas parcelas, unidades básicas dos sistemas de gotejamento que englobam a maior parte das tubulações do sistema.

Em 1975, J. Keller e D. Karmeli, referindo-se a instalações fixas de gotejamento e com base em dados experimentais, sugeriram parâmetros de otimização para o formato e a relação entre as perdas de cargas das tubulações de uma parcela de gotejamento. Apesar de essa metodologia retratar uma condição particular de mercado de equipamentos de irrigação, esses parâmetros são ainda recomendados pela literatura especializada.

A presente pesquisa consiste no desenvolvimento de uma metodologia de otimização do projeto de uma parcela de gotejamento, a partir de um modelo analítico de otimização dos custos das tubulações, que retrata, com detalhes, os elementos de projeto e as relações entre os custos das tubulações destas unidades, tendo como resultados expressões genéricas e concisas que facilitaram a geração de tabelas e ábacos. O estudo baseia-se no projeto ótimo de uma parcela horizontal, sendo que os efeitos dos desníveis topográficos são compensados por deslocamentos convenientes dos pontos de entrega da água nas tubulações. O modelo de otimização

do projeto de uma parcela de gotejamento é desenvolvido no **Capítulo 4**.

Como embasamento para este estudo, promoveu-se uma ampla revisão da bibliografia associada ao projeto hidráulico dos sistemas de gotejamento.

Inicialmente, no **capítulo 2**, procurou-se caracterizar os sistemas atuais de gotejamento, podendo-se destacar o emprego generalizado do conceito de irrigação por gotejamento, que atualmente se aplica a um grande número de técnicas de irrigação com entrega d'água pontual, as quais apresentam em comum uma extensa rede de tubulações pressurizadas. Hoje em dia, esses métodos de irrigação estão inseridos dentro de um contexto de uma agricultura altamente tecnificada e com um bom nível de automação.

A teoria hidráulica empregada no dimensionamento dos sistemas de gotejamento é analisada no **Capítulo 3**. As metodologias pesquisadas baseiam-se em uma distribuição uniforme, hipotética, da vazão ao longo das linhas de irrigação. Com o objetivo de avaliar o erro no cálculo da perda de carga, devido à influência da variação normal da vazão emitida pelos gotejadores, foi testado um modelo original, com uma função parabólica, mais real, para a vazão distribuída ao longo das linhas de gotejamento. Isso levou à conclusão de que o modelo com vazão distribuída constante pode ser empregado sem riscos para as variações permissíveis da vazão emitida, normalmente recomendadas, conduzindo a pequenos erros, que estão dentro da faixa de incerteza da metodologia empregada.

Em relação ao cálculo da perda de carga nas linhas de gotejamento, a pesquisa avançou além da revisão bibliográfica, podendo-se destacar as contribuições para a determinação de um fator genérico de correção da perda de carga, associado com um espaçamento inicial qualquer, assim como para o estabelecimento de uma metodologia que permite a determinação das perdas de carga intermediárias nas linhas de gotejamento, possibilitando a identificação, com uma maior precisão, da linha de energia de uma tubulação com distribuição discreta de vazão. Esta metodologia facilita bastante a adoção de diâmetros múltiplos para as linha de gotejamento com distribuição de vazão.

Para facilitar a aplicação e a análise da metodologia, foi desenvolvido o programa DOPIG (Dimensionamento Ótimo de uma Parcela de Gotejamento), onde o dimensionamento das tubulações da parcela resulta da combinação dos diâmetros comerciais disponíveis, permitindo a manutenção das relações originais entre as perdas de carga nas tubulações da parcela. O apêndice A descreve este programa.

O Capítulo 5 apresenta uma análise comparativa da metodologia proposta com a tradicional, a partir de um projeto básico, com o intuito de enfatizar a importância dos fatores de otimização identificados pela pesquisa.

E, por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações resultantes da análise detalhada da pesquisa.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

2.1 - Aspectos gerais

As definições clássicas da irrigação por gotejamento relacionam este método com a aplicação de água diretamente na zona radicular das plantas, com pequenas vazões emitidas e uma frequência de irrigação alta (Bernardo, 1987).

Segundo uma nova conceituação, gotejamento é um meio artificial de aplicação d'água sob condições altamente controladas e favoráveis para às plantas (San Juan, 1988).

Os sistemas de irrigação por gotejamento, conceitualmente, englobam um grande número de técnicas de irrigação localizada, com entrega d'água pontual. Tais técnicas apresentam em comum uma extensa rede de tubulações, projetada para garantir uma distribuição relativamente uniforme da água em toda a superfície do terreno, umedecendo apenas a parte do solo que envolve o sistema radicular das plantas, resultando em uma economia substancial de água.

Assim, pode-se classificar os principais tipos de sistema de irrigação por gotejamento, segundo Telles (1986), como:

- a) Gotejamento convencional;
- b) Tubos perfurados;
- c) Microaspersão;
- d) Irrigação por potes e cápsulas porosas;
- e) Jato pulsante;--

2.2 - Componentes do sistema.

Em um sistema de irrigação por gotejamento, uma rede de tubulações, normalmente fixa, que cobre toda a superfície do terreno, distribui a água diretamente para as plantas.

Para facilitar o controle da uniformidade na distribuição da água e a adaptação às características dos emissores, o sistema é dividido em unidades operacionais compostas por uma ou mais subunidades de irrigação. Uma subunidade de irrigação corresponde a uma fração da superfície do terreno, com formato geralmente retangular, definida pelo conjunto de ramais que são alimentados por cada derivação, sendo denominada no contexto deste trabalho de "parcela de irrigação".

Os ramais ou linhas laterais são as tubulações onde estão inseridos os gotejadores (Olitta, 1984).

Os gotejadores são os dispositivos que controlam a emissão da água pela dissipação da pressão nas linhas laterais (Olitta, 1984).

Geralmente a alimentação desses sistemas é feita por bombeamento direto, conduzindo a água para o cabeçal de controle, que a distribui, através de linhas primárias e secundárias, para

as diversas unidades operacionais do sistema.

O cabeçal de controle é um conjunto de equipamentos próximos e interligados, composto de: sistema de filtros, sistema de injeção de fertilizantes e um sistema de controle de operação (Telles, 1982).

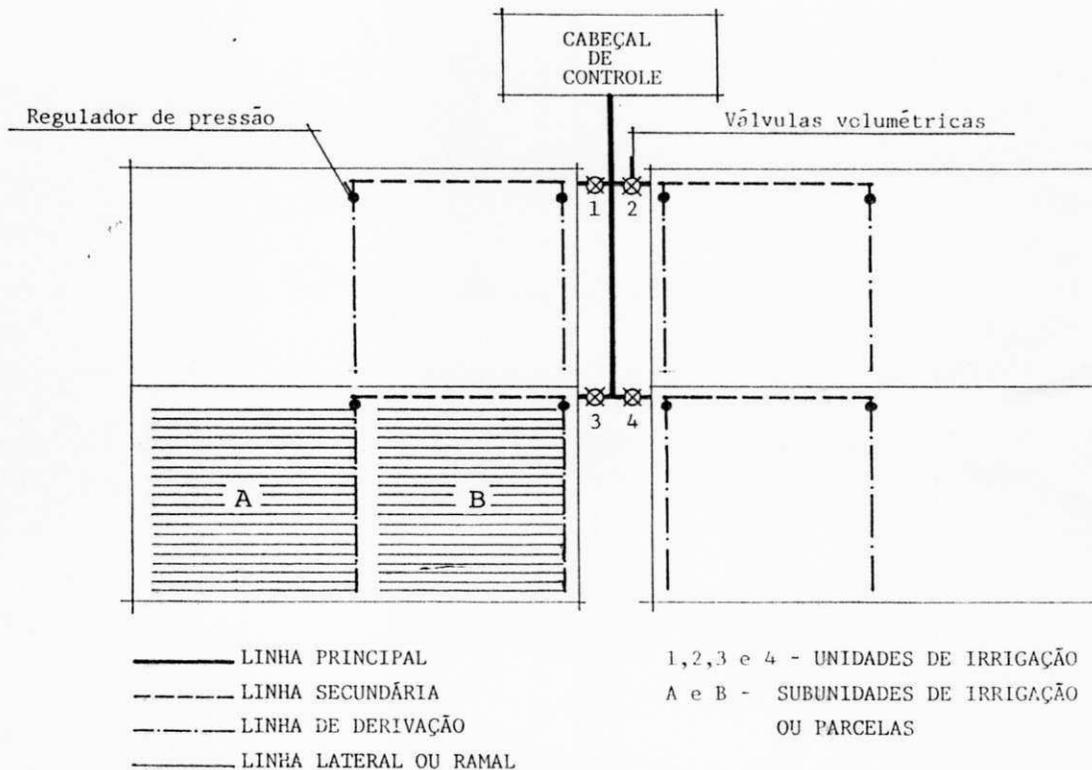


Figura 2.1 - Esquema de funcionamento de um sistema de gotejamento.

2.3 - Características dos emissores.

Os emissores são os equipamentos que permitem o controle da uniformidade da distribuição da água. Segundo Keller e Karmeli (1975), um emissor de gotejamento ideal deve apresentar as seguintes características:

- a) Vazão pequena, uniforme e constante;
- b) Orifício de saída da água relativamente grande, para reduzir a possibilidade de entupimentos;
- c) Compacto e de baixo custo.

2.3.1- Classificação dos gotejadores quanto ao funcionamento hidráulico.

Quanto ao funcionamento hidráulico, os emissores dos sistemas de gotejamento podem ser classificados, segundo Lopez (1986) e Telles (1986), como:

- a) Orifícios;
- b) Bocais difusores;
- c) De longo percurso;
- d) Com câmara de vórtice;
- e) Autorreguláveis;
- f) Microaspersores;
- g) Cápsulas porosas.

Orifícios: Neste tipo de emissores o escoamento ocorre, com pequena vazão e baixa pressão, a partir de um ou mais orifícios de pequenas dimensões.

Bocais difusores: - A água sai por um pequeno bocal cônico divergente, incidindo com grande velocidade em um deflector fixo, difundindo-se no ar e caindo no terreno formando um círculo molhado.

Emissores de longo percurso: - A água percorre um longo caminho em microtubos ou labirintos, dissipando a pressão residual, principalmente, pelo efeito do atrito viscoso.

Emissores com câmara de vórtice: - O escoamento da água ocorre a partir de uma câmara circular, onde se produz um movimento rotacional forçado que resulta em uma perda de carga maior do que nos emissores convencionais, resultando em um orifício de saída maior, com uma menor possibilidade de obstrução.

Emissores autoreguláveis: - O escoamento é controlado por uma membrana flexível que estrangula o orifício de saída, compensando as variações da pressão do sistema, mantendo a vazão praticamente constante.

Microaspersores: - Um pequeno jato d'água é lançada ao ar a partir de um dispositivo móvel circular, caindo pulverizado no terreno na forma de um círculo molhado, como nos difusores.

Potes ou cápsulas porosas: - A água percola através das paredes do emissor, umedecendo a massa de solo que envolve o mesmo.

2.3.2- Aspectos hidráulico dos emissores.

Em um emissor de gotejamento, o escoamento deve-se à carga de pressão efetiva na tubulação.

As características físicas dos emissores de gotejamento definem o seu comportamento hidráulico. Segundo Keller e Karmeli (1975), a vazão emitida (q) relaciona-se diretamente com a carga hidráulica atuante na entrada do emissor (H) pela equação:

$$q = K_d \cdot H^x, \quad (2.1)$$

onde:

q = Vazão do emissor;

K_d = Coeficiente característico de cada emissor;

H = Pressão de serviço do emissor;

x = Expoente, dependendo do regime de fluxo do emissor.

Os valores do expoente " x " variam de 0,5, para emissores com fluxo turbulento, a 1,0, para fluxo laminar, sendo que, em tese, os emissores autocompênsantes deveriam apresentar um expoente " x " nulo. Para a maioria dos emissores, o valor do expoente " x " situa-se entre 0,5 e 1,0. (Keller e Karmeli, 1975). /

Os emissores tipo orifícios ou bocais apresentam uma baixa resistência ao escoamento, resultando em pequenas seções de escoamento, maiores vazões e pequenas pressões de serviço. O escoamento neste tipo de emissor é geralmente turbulento.

Os emissores de longo percurso caracterizam-se por regime

laminar, secções de escoamento relativamente maiores e pressões de serviço também maiores.

Os emissores autoreguláveis, com uma baixa sensibilidade às variações de pressão, são, em tese, os que apresentam um comportamento hidráulico ideal, aproximando-se das características citadas por Keller e Karmeli (1975), podendo resultar em maiores comprimentos para os ramais e menores diâmetros para as tubulações, reduzindo os custos de instalação do sistema. Porém, aspectos relacionados principalmente com o processo de fabricação destes emissores podem alterar o seu funcionamento hidráulico. Este fato, segundo Keller e Karmeli (1975), deve-se a distorções na flexibilidade da membrana, que podem ser ocasionadas por desuniformidade ou fadiga do material.

2.4 - Uniformidade da irrigação.

Os sistemas de irrigação por gotejamento são projetados para a obtenção de uma razoável uniformidade na distribuição da água no terreno. (Perold, 1977).

As variações da vazão emitida são causadas, principalmente, por diferenças de pressão devidas às perdas de cargas normais do escoamento nas tubulações, aos desniveis topográficos e às obstruções ocasionais na rede (Keller e Karmeli, 1975).

Na prática usual de projeto, o controle da pressão do sistema é feito a partir das parcelas onde os gotejadores operam simultaneamente. No dimensionamento das tubulações das parcelas permite-se uma variação máxima da vazão emitida da ordem de 10% da vazão básica dos gotejadores, correspondendo a uma variação em

torno de 20% da pressão de serviço, para os gotejadores com fluxo turbulento, e a 10% da pressão de serviço, para os gotejadores com fluxo laminar. (Olitta, 1984).

Porém, alguns autores baseados em critérios práticos e econômicos apresentam critérios menos rigorosos. Bernardo (1987), para condições de irrigação suplementar no Brasil, recomenda uma variação máxima de 20% da vazão emitida para as linhas laterais.

Perold (1977) recomenda que a uniformidade numa linha lateral de irrigação deve-se basear em um coeficiente de uniformidade como o de Christiansen (1942), principalmente nas linhas em declive, onde a variação da pressão entre os emissores extremos não deve ser considerada.

A eficiência da aplicação da água num sistema de gotejamento, definida pela relação entre o volume de água efetivamente requerida pela planta e o volume total que chega na parcela, relaciona-se diretamente com o Coeficiente de Uniformidade do Sistema, CU (Lopez, 1986).

2.4.1- Coeficiente de variação de fabricação dos emissores de gotejamento.

Um outro aspecto importante que deve ser levado em consideração na seleção de um emissor de gotejamento é a identificação do Coeficiente de Variação de Fabricação do Emissor (CV), definido por Keller e Karmeli (1975) pela relação entre o desvio padrão e a média das vazões de uma amostra de emissores submetidos a uma mesma carga de pressão. Este parâmetro é

determinado em laboratório, sendo eventualmente fornecido pelos fabricantes (Olitta, 1986)

Telles (1986) apresenta a seguinte classificação para os gotejadores e microaspersores, em função do coeficiente de variação de fabricação:

$CV < 0,05$	Bom
$0,05 < CV < 0,10$	Médio
$0,10 < CV < 0,20$	Regular
$CV > 0,20$	Deficiente e inaceitável.

2.4.2-Coeficiente de uniformidade do sistema

Para uma parcela de gotejamento, desprezando-se os efeitos das obstruções, que devem ser controlados, pode-se avaliar a uniformidade na distribuição da água de um sistema de gotejamento a partir do coeficiente de uniformidade (CU) proposto por Keller e Karmeli (1975).

$$CU = 100. \left(1 - \frac{1,27.CV}{\sqrt{e}} \right) \cdot \frac{q_m}{q_b}, \quad (2.2)$$

Onde:

CU = Coeficiente de uniformidade do sistema;

CV = Coeficiente de variação de fabricação do emissor;

e = Número de emissores que recebem água por cada planta;

q_m = Vazão mínima que corresponde ao emissor de pressão mínima;

q_b = Vazão média ou vazão básica de projeto dos emissores.

Na equação (2.2) de Keller e Karmeli (1975), q_m pode ser estimado a partir de um valor de CU desejado. Para facilitar o emprego desta equação, Lopez (1986) apresenta a Tabela 2.1, com os valores práticos para o Coeficiente de Uniformidade CU, associados as diversas alternativas de projeto dos sistemas de gotejamento.

Tabela 2.1 - Coeficientes de unifomidade (CU) dos sistemas de irrigação por gotejamento. (Lopez, 1975).

Tipo de emissor	Topografia do solo	CU para zonas áridas
Cultivos permanentes Eg > 4 m	Uniforme (s < 2%)	90% a 95%
	Inclinado (s > 2%) ou ondulado	85% a 90%
Cultivos permanentes e semi-permanentes. Eg < 2.5 m	Uniforme	85% a 90%
	Inclinado ou ondulado	80% a 90%
Mangueiras de gojamento em cultivos anuais como o de hortaliças.	Uniforme	80% a 90%
	Inclinado ou ondulado	70% a 85%

Para zonas úmidas, os valores de CU, da tabela, devem ser rebaixados em 10%.

Onde: Eg é o espaçamento entre os gotejadores no ramal e s é a declividades representativa da topografia do terreno.

2.5 - Limites de variação da pressão na parcela.

A variação da carga de pressão da parcela (V_p) é associada com os limites adotados para a vazão emitida. Segundo Lopez (1986), a diferença máxima da carga de pressão permitida em uma subunidade de rega deverá ser proporcional à diferença entre a carga de pressão (H_b), que produz a vazão básica de projeto, e a carga de pressão mínima (H_m), que corresponde à vazão mínima compatível com o CU adotado para o projeto, de modo que:

$$V_p = M.(H_b - H_{min}), \quad (2.3)$$

onde:

V_p = Variação da pressão na parcela;

H_b = Carga de pressão que atua no emissor com vazão básica;

H_m = Carga de pressão mínima;

M = Parâmetro que depende das características topográficas do terreno. Segundo Lopez (1986)

$M = 2,5$.

2.6 - Considerações finais.

Apesar de o gotejamento constituir-se em uma técnica moderna de irrigação, com desenvolvimento relativamente recente, nota-se, a partir da grande diversidade de equipamentos e mate-

riais disponíveis atualmente no mercado, que um grande número de recursos tem sido empregado em pesquisas nesta área, principalmente, no desenvolvimento de equipamentos de controle e automação da distribuição d'água no terreno, facilitando o manejo e a elaboração dos projetos.

Além disto, nota-se claramente uma tendência a um emprego generalizado dos gotejadores autoreguláveis, principalmente nas áreas agrícolas em expansão, de regiões com pouca tradição de irrigação por gotejamento. Este fato credita-se principalmente às facilidades na elaboração do projeto hidráulico, reduzindo as possibilidades de erro na concepção do projeto destes sistemas, permitindo maiores variações de pressão que podem resultar em menores custos para o conjunto das tubulações.

O processo de dimensionamento dos sistemas de gotejamento em geral é bastante complexo, requerendo uma metodologia particular, principalmente com respeito ao dimensionamento das tubulações que será abordado no Capítulo 3, seguinte.

CAPITULO 3

HIDRÁULICA APLICADA AOS SISTEMAS DE GOTEJAMENTO

3.1 - Considerações iniciais.

Gotejamento é uma técnica de irrigação que requer uma extensa rede de tubulações, geralmente fixa, que cobre toda a superfície do terreno. A entrega da água é pontual, ocasionando, portanto, variações longitudinais nas vazões transportadas nas tubulações do sistema, dificultando o processo de dimensionamento destas tubulações. Este fato conduz ao estudo dos encanamentos com saídas múltiplas, sendo que algumas aproximações são necessárias para facilitar o cálculo.

Este capítulo aborda, principalmente, o cálculo da perda de carga nas linhas de gotejamento. Inicialmente, serão apresentadas as fórmulas práticas recomendadas para o cálculo normal das perdas de carga uniforme e localizada nessas tubulações. Em seguida, serão abordados os aspectos relacionados com a distribuição da vazão ao longo das tubulações, a partir de métodos práticos baseados em uma distribuição uniforme, hipotética, da água ao longo das tubulações. Para auxiliar na análise crítica desta metodologia, será proposto um modelo com uma função parabólica,

mais representativa da realidade, para a vazão distribuída ao longo das linhas de gotejamento.

3.2 - Cálculo da perda de carga uniforme em tubulações de gotejamento.

As redes de gotejamento, geralmente, são compostas de uma combinação de tubos de polietileno com PVC, materiais plásticos que apresentam superfícies semelhantes, lisas e com excelente acabamento.

Diversas fórmulas empíricas são empregadas no dimensionamento das tubulações de gotejamento. Estas fórmulas podem ser representadas genericamente pela seguinte expressão:

$$h_f = K \cdot \frac{Q^m}{D^n} \cdot L, \quad (3.1)$$

onde:

h_f = Perda de carga uniforme na tubulação, em m;

Q = Vazão de montante da tubulação, em m^3/s ;

D = Diâmetro interno da tubulação, em m;

L = Comprimento da tubulação, em m;

K = Coeficiente que depende da rugosidade da tubulação;

m e n = Expoentes associados ao regime do escoamento.

Keller e Karmeli (1975) recomendam o emprego da fórmula de Hazen-Williams para o cálculo das perdas de carga nas

tubulações dos sistemas de gotejamento:

$$J = \frac{10,642 \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (3.2)$$

em que: C é um coeficiente de rugosidade da tubulação, com um valor recomendado, para este caso de 150; e J é a perda de carga por unidade de comprimento da tubulação.

Oliveira (1978), pesquisando tubos de polietileno com diâmetro nominal de 9,5 mm e 12,7 mm, encontrou para o coeficiente da fórmula de Hazen-Williams um valor representativo de C = 144.

Gonçalves et alii (1988), a partir de pesquisas recentes em tubos comerciais perfurados de polietileno, recomendam o emprego das Fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao e Flamant. Essas fórmulas, assim como a de Cruciani-Magaritona, citada por Olitta (1986), pertencem a um grupo de fórmulas semelhantes á de Blasius, indicada para os condutos classificados como hidraulicamente lisos (Neves, 1975).

A fórmula de Blasius baseia-se na fórmula universal da perda de carga de Darcy-Weisback.

$$h_f = \frac{f V^2}{D 2g} \cdot L, \quad (3.3)$$

onde:

h_f = Perda de carga uniforme;

V = Velocidade média do escoamento;

D = Diâmetro interno da tubulação;

g = Aceleração da gravidade;

L = Comprimento da tubulação;

f = Fator adimensional que está associado com a resistência ao escoamento da água nas tubulações. Para os condutos ditos hidraulicamente lisos, esse fator pode ser determinado a partir da fórmula seguinte de Blasius (Neves, 1975):

$$f = \frac{0,3164}{(N_R)^{0,25}}, \quad (3.4)$$

onde: N_R é o Número de Reynolds, parâmetro adimensional definido pela seguinte relação:

$$N_R = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (3.5)$$

na qual: " ν " é um coeficiente que representa a viscosidade da água.

Substituindo-se na fórmula (3.4) de Blasius, do fator " f ", o Número de Reynolds pela expressão (3.5), combinando-se o resultado com a Fórmula Universal da Perda de Carga de Darcy-

Weisbach (3.3) e adotando-se para $\nu = 1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, um valor que corresponde a viscosidade da água na temperatura de 20° C (Neves, 1975), obtém-se:

$$J = 0,00078 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3.6)$$

Comparando-se esta expressão com a fórmula geral da perda de carga (3.1), nota-se que nesta: $K = 0,00078$, $m = 1,75$ e $n = 4,75$. A tabela 3.1 apresenta os valores do coeficiente "K" de um conjunto de equações da perda de carga que apresentam, em comum, os mesmos expoentes (m e n) da fórmula de Blasius.

Tabela 3.1 - Coeficientes K de um conjunto de fórmulas da perda de carga com expoentes $m = 1.75$ e $n = 4.75$.

Fórmulas	materiais	Valores de K
Blasius (Neves, 1979).....	tubos lisos.....	0,00078
Cruciani-Magaritona (Telles, 1986)..	polietileno.....	0,00099
Flamant (Neves, 1979).....	ferro fundido e aço, novos.....	0,00140
	cimento amianto....	0,00095
	PVC e polietileno..	0,00082
Fair-Whipple-Hsiao (Gonçalves, 1988)!	Plástico.....	0,00086

em que: K é o coeficiente de rugosidade da fórmula (3.1) geral da perda de cargas e m e n são os expoentes da vazão e do diâmetro dessa fórmula.

3.3 - Perdas de carga localizadas nas linhas de irrigação.

As perdas de cargas localizadas em uma linha de gotejamento devem-se, principalmente, aos efeitos da turbulência provocada pela conexão ou inserção dos gotejadores na tubulação, podendo aumentar em 30% ou mais as perdas normais nos ramais, segundo Abreu et alii (1986). As perdas ocasionadas pela derivação do fluxo para os emissores são compensadas pelo ganho de pressão resultante da redução da carga de velocidade no escoamento (Aguilera, 1972).

Keller e Karmeli (1975) apresentam uma metodologia que incorpora os efeitos da perda de carga localizada em um fator de correção para o coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams.

$$h_t = \left(\frac{150}{C_g} \right)^{1,852} \cdot \frac{J_{100} \cdot L}{100}, \quad (3.7)$$

onde:

h_t = Perda de carga total na tubulação;

C_g = Coeficiente de rugosidade que incorpora os efeitos das perdas localizadas;

L = Comprimento da tubulação.

J_{100} = Perda de carga para uma tubulação com 100 m de comprimento e $C = 150$.

Segundo os autores, os valores de C_g para emissores com espaçamentos até 1,5 m devem variar de 80 a 140; os menores valores correspondem aos emissores inseridos na linha.

Um outro método frequentemente utilizado é o dos comprimentos virtuais, onde as perdas localizadas são transformadas em comprimentos equivalentes, que são somados ao comprimento real da tubulação. Em termos práticos, as perdas localizadas são incorporadas a um fator multiplicativo de correção para a perda de carga nos ramais. Lopez (1986) apresenta a seguinte expressão para a determinação da perda de carga global (soma das perdas uniformes e localizadas) das linha de gotejamento:

$$J' = J \cdot \frac{E + f_e}{E}, \quad (3.8)$$

onde:

J' = Perda de carga global por unidade de comprimento da tubulação (m/m);

J = Perda de carga uniforme por unidade de comprimento da tubulação (m/m);

E = Espaçamentos entre os emissores (m);

f_e = Comprimento de ramal cuja perda de carga equivale à perda localizada produzida nas imediações dos emissores (m), conforme a figura 3.1.

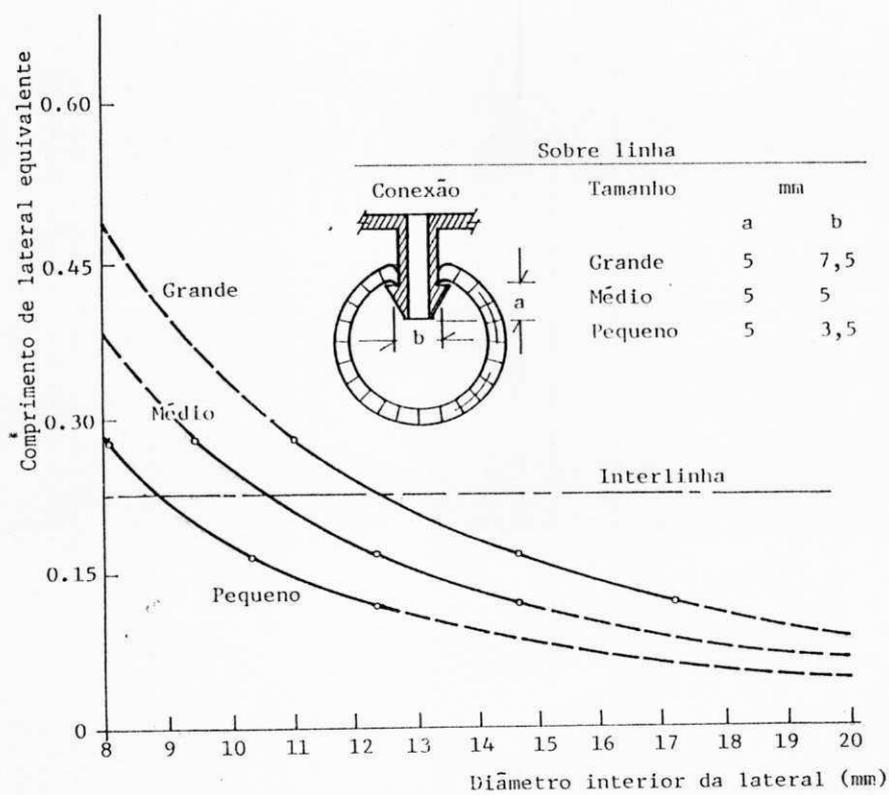


Figura 3.1 - Comprimentos equivalentes para o cálculo da perda de carga em linhas laterais de gotejamento (Abreu et alii, 1986).

3.4 - Fatores de correção da perda de carga nas linhas de gotejamento.

Em uma linha de gotejamento, ramal ou derivação, o efeito das múltiplas saídas laterais d'água reduz gradativamente a vazão inicial e conseqüentemente a declividade da linha de energia. Para evitar um processo iterativo no cálculo das perdas de cargas das linhas de irrigação com saídas múltiplas, foram desenvolvidos vários métodos práticos, como o de Christiansen (1942), citado por de Paco (1989). Nesses métodos, a perda de carga é determinada preliminarmente como em uma tubulação normal - a vazão de cálculo é a inicial -, sendo em seguida corrigida por um coeficiente que traduz o efeito da redução da vazão ao longo da tubulação, na forma:

$$h_f = F \cdot h_f', \quad (3.9)$$

onde:

h_f = Perda de carga real na tubulação;

h_f' = Perda de carga fictícia (a vazão de cálculo é a inicial);

F = Fator de correção da perda de carga nas linhas de irrigação com distribuição de vazão.

As seguintes considerações práticas são adotadas para facilitar a determinação do fator de correção (F):

- a) Vazão distribuída constante;
- b) Diâmetro da tubulação constante;
- c) Regime de fluxo inalterado;
- d) Espaçamentos entre as saídas constantes;

O problema é abordado segundo dois modelos distintos:

- a) Tubulação com distribuição contínua de vazão .
- b) Tubulação com distribuição discreta de vazão.

3.4.1- Fator de correção da perda de carga para um modelo com distribuição contínua de vazão.

O modelo com distribuição contínua de vazão é comumente empregado na irrigação por gotejamento como um cálculo aproximado da perda de carga nos ramais e nas linhas de derivação (de Paco, 1973), sendo também recomendado para o dimensionamento das tubulações com distribuição em marcha nas redes de abastecimento urbano (Neves, 1975). A figura 3.2 esquematiza o funcionamento hidráulico de uma tubulação com uma distribuição de vazão hipotética, contínua e uniforme.

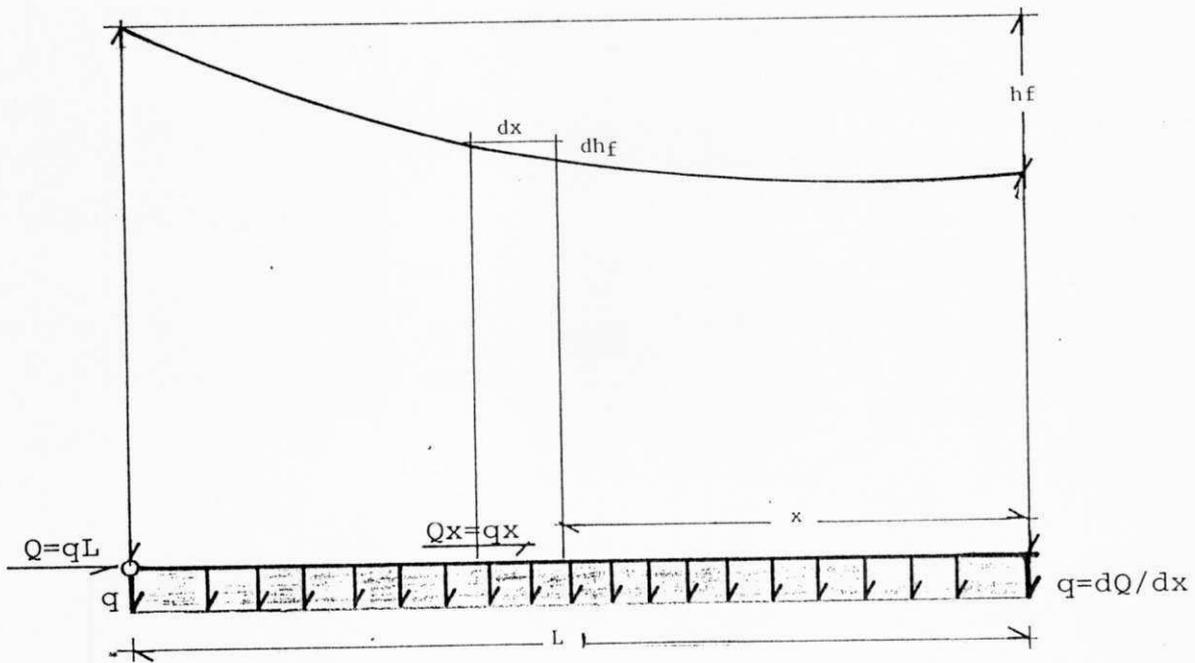


Figura 3.2 - Tubulação com distribuição contínua de vazão.

As linhas de gotejamento, ramais e derivações geralmente apresentam-se com a secção final obstruída. Desta forma, pode-se admitir que a vazão inicial (Q) será distribuída em cada unidade de comprimento da tubulação segundo uma taxa (q), constante, definida pela relação entre esta vazão (Q) e o comprimento total da tubulação:

$$q = Q/L , \quad (3.10)$$

onde:

q = Vazão distribuída em uma unidade de comprimento da tubulação;

Q = Vazão de alimentação da tubulação;

L = Comprimento total da tubulação.

Portanto, a vazão (Q_x) em uma secção qualquer pode ser expressada a partir do produto da vazão distribuída em uma unidade de comprimento (q) pela distância "x" da extremidade da tubulação até essa secção:

$$Q_x = q \cdot x . \quad (3.11)$$

A perda de carga (dh_f), em um trecho da tubulação com comprimento infinitesimal (dx), pode ser estimada a partir da fórmula geral (3.1), como na expressão seguinte:

$$dh_f = M \cdot Q_x^m \cdot dx , \quad (3.12)$$

sendo M um coeficiente dado por:

$$M = K/D^n , \quad (3.13)$$

onde:

K = Coeficiente da fórmula geral da perda de carga;

D = Diâmetro de cálculo da tubulação.

A perda de carga em toda a tubulação pode ser determinada pela integração da equação (3.11) combinada com a equação (3.12), isto é:

$$h_f = \int_0^L M \cdot (q \cdot x)^m \cdot dx , \quad (3.14)$$

resultando na seguinte expressão para a perda de carga real (h_f), global, da tubulação:

$$h_f = \frac{M \cdot q^m \cdot L^{(m+1)}}{(m+1)} . \quad (3.15)$$

A perda de carga de referência, fictícia (h_f'), é determinada para uma vazão de cálculo igual à vazão inicial, sendo dada, com base no desenvolvimento anterior, pela seguinte expressão:

$$h_f' = M.(q.L)^m.L , \quad (3.16)$$

ou

$$h_f' = M.q^m.L^{(m+1)} . \quad (3.17)$$

O fator (F) de correção da perda de carga foi definido anteriormente pela relação entre a perda de carga real (h_f) e a perda de carga fictícia (h_f'):

$$F = h_f/h_f' . \quad (3.18)$$

Substituindo-se nesta relação as perdas de carga pelas suas respectivas expressões, e simplificando-se os termos comuns, encontra-se uma expressão para o fator de correção (F) da perda de carga em tubulações com soldas múltiplas com uma distribuição uniforme e continua da vazão:

$$F = 1/(m+1) , \quad (3.19)$$

em que m é o expoente da vazão na fórmula geral (3.1) da perda de carga.

Este desenvolvimento conduz aos mesmos resultados obtidos por de Paco (1974) e Wu e Gitlin (1975), sendo também coerente com o desenvolvimento apresentado por Neves (1975), que encontrou, a partir da fórmula da perda de carga de Darcy e com base

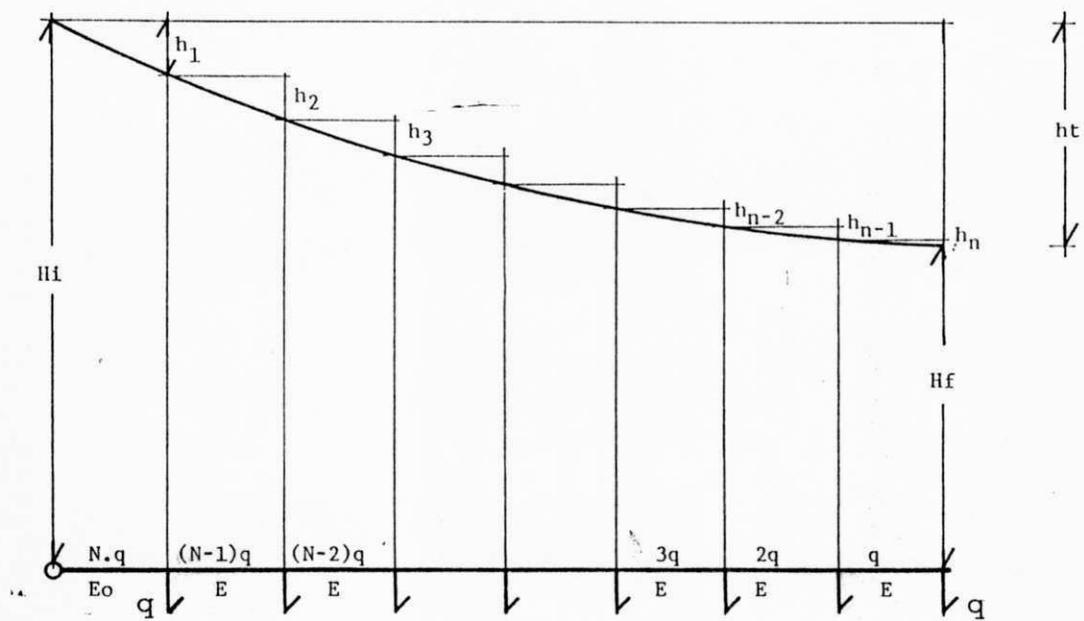
em um modelo com distribuição contínua e com vazão na extremidade nula, um valor de $1/3$ para o fator (F) de correção, idêntico ao determinado pela equação (3.19) quando $m=2$, valor do expoente da vazão da fórmula da perda de carga de Darcy.

3.4.2- Fator de correção da perda de carga para uma distribuição discreta de vazão ao longo de uma linha de gotejamento.

Em uma situação real numa linha de gotejamento a vazão longitudinal é mantida constante nos trechos entre os pontos de saída d'água, diferentemente do modelo do item anterior, que apresenta uma diminuição contínua de vazão ao longo de toda a tubulação, resultando em valores calculados para as perdas de carga sempre menores do que os reais.

Para a determinação exata da perda de carga em uma linha de gotejamento, deve-se somar as perdas de carga de todos os trechos da tubulação. O processo iterativo que será necessário, nesse caso, pode ser evitado utilizando-se um coeficiente (F) de correção da perda de carga, determinado a partir de um modelo, mais realista, que leve em consideração os efeitos da discretização na distribuição da vazão ao longo de um linha de gotejamento.

A figura 3.3 mostra uma linha de gotejamento com "N" pontos de saída d'água, espaçados uniformemente e com vazão derivada (q) constante.



3.3 - Tubulação com distribuição de vazão discreta.

Com base na consideração da igualdade das vazões derivadas, pode-se determinar a vazão ao longo da tubulação a partir do número de saídas situadas após cada trecho, isto é:

$$Q_1 = N \cdot q$$

$$Q_2 = (N-1) \cdot q$$

$$Q_3 = (N-2) \cdot q$$

.

.

.

$$Q_{(N-1)} = 2q$$

$$Q_N = q$$

A expressão seguinte representa uma vazão genérica (Q_k) para qualquer trecho:

$$Q_k = (N-k+1) \cdot q \quad (3.20)$$

A perda de carga em cada trecho, obtida pela fórmula geral da perda de carga (3.1), pode ser representada genericamente pela expressão:

$$h_k = M \cdot E \cdot Q_k^m \quad (3.21)$$

onde:

h_k = Perda de carga uniforme em um trecho qualquer;

E = Comprimentos dos trechos entre as saídas d'água;

Q_k = Vazão de qualquer trecho;

m = Expoente da fórmula geral da perda de carga;

M = Coeficiente definido na equação (3.13).

Substituindo-se a expressão genérica da vazão (3.20) na fórmula (3.21) da perda de carga para um trecho qualquer, encontra-se:

$$h_k = M.E.q^m.(N-k+1)^m . \quad (3.22)$$

A perda acumulada em toda a tubulação (h_t) é decorrente do somatório das perdas de todos os trechos.

$$h_t = \sum_k^N h_k . \quad (3.23)$$

Substituindo-se nesta expressão a perda de carga genérica (h_k) pela expressão (3.22), para um espaçamento inicial igual aos subsequentes, obtém-se a seguinte expressão para a perda de carga global, real, da tubulação:

$$h_t = M.E.q^m.[1 + 2^m + 3^m + \dots + (N-1)^m + N^m] , \quad (3.24)$$

A perda de carga de referência, fictícia (h_t'), é determinada para uma vazão na tubulação igual à vazão inicial, sendo dada pela equação:

$$h_t' = M.(N.q)^m.L . \quad (3.25)$$

O fator (F) de correção da perda de carga é obtido pela relação entre as equações (3.24) e (3.25), resultando:

$$F = \frac{[1 + 2^m + 3^m + \dots + (N-1)^m + N^m]}{N^{(m+1)}} \quad (3.26)$$

No numerador desta expressão encontra-se um somatório dos termos de uma série de potência de números inteiros positivos, onde o expoente "m" pode assumir valores não inteiros, o que dificulta uma solução geral, exata, para este problema.

Segundo de Paco (1989), em 1942, J. E. Christiansen apresentou a seguinte solução geral, bastante aproximada, para este fator (F) de correção para o cálculo da perda de carga nas linhas de irrigação com distribuição de vazão, para uma condição específica em que o espaçamento inicial, ao primeiro ponto de saída d'água, é igual aos subsequentes:

$$F = \frac{1}{(m+1)} + \frac{1}{2.N} + \frac{(m-1)^{1/2}}{6.N^2} \quad (3.27)$$

A partir da análise da expressão proposta para este fator, depreende-se que um desenvolvimento semelhante para uma série de potências com expoentes inteiros conduz a uma solução bastante próxima desta, como será mostrado em seguida.

O somatório dos "N" termos de uma série de potências com expoentes inteiros pode ser determinado pela seguinte expressão (Spiegel, 1992):

$$S_N = \frac{N^{(m+1)}}{(m+1)} + \frac{N^m}{2} + \frac{B_1 \cdot m \cdot N^{(m-1)}}{2!} - \frac{B_2 \cdot m(m-1)(m-2)N^{(m-3)}}{4!} + \dots, (3.28)$$

onde "S_N" é o somatório dos "N" termos da série, dado por:

$$S_N = [1^m + 2^m + \dots + (N-1)^m + N^m], (3.29)$$

e B₁ e B₂ são os números de Bernoulli, assumindo os valores de 1/6 e 1/30 respectivamente (Spiegel, 1992).

A expressão (3.28) é uma série recessiva que apresenta uma solução, quando m=2, constituída apenas dos três primeiros termos, sendo adotada, por analogia, como uma solução geral, já que os valores práticos do expoente "m" situam-se próximos de 2. Desta forma:

$$S_N = \frac{N^{(m+1)}}{(m+1)} + \frac{N^m}{2} + \frac{(m/2) \cdot N^{(m-1)}}{6} . (3.30)$$

Dividindo-se esta expressão pelo denominador da expressão (3.26), chega-se à seguinte expressão para o fator "F":

$$F = \frac{1}{(m+1)} + \frac{1}{2 \cdot N} + \frac{(m/2)}{6 \cdot N^2} . (3.31)$$

Uma análise comparativa desta expressão com a fórmula (3.27) de Christiansen (1942), identifica apenas como divergentes os numeradores dos últimos termos dessas expressões, sendo que para $m = 2$ as duas equações resultam em valores iguais para o fator F . Para valores do expoente m menores, a expressão de Christiansen (1942) conduz a resultados apenas ligeiramente inferiores aos da expressão (3.31)

Frequentemente, o primeiro ponto de derivação em uma linha de irrigação situa-se a uma distância equivalente à metade dos espaçamentos subsequentes. Nestes casos, deve-se ajustar o fator de correção de Christiansen (1942). Estudos realizados por Jansen e Frantini (1957) resultaram na expressão seguinte:

$$F' = 1/(2N-1) + [2/(2N-1)N^m] \cdot [(N-1)^m + (N-2)^m + \dots + 1^m], \quad (3.32)$$

onde: F' é o fator de correção da perda de carga para um espaçamento inicial igual a metade dos subsequentes.

Os valores do Fator F' de correção de Jansen e Frantini (1957) foram originalmente calculados com o auxílio de um programa computacional iterativo.

Porém, algumas situações de projeto podem conduzir a espaçamentos iniciais, nas linhas laterais, diferentes dos anteriormente estudados, como nos casos da irrigação por gotejamento por faixa, onde os emissores são dispostos muito próximos e apresentam um espaçamento inicial igual a metade da distância entre as linhas laterais, superior aos espaçamentos entre os emissores. A figura 3.4 apresenta uma linha de

gotejamento com um espaçamento inicial genérico.

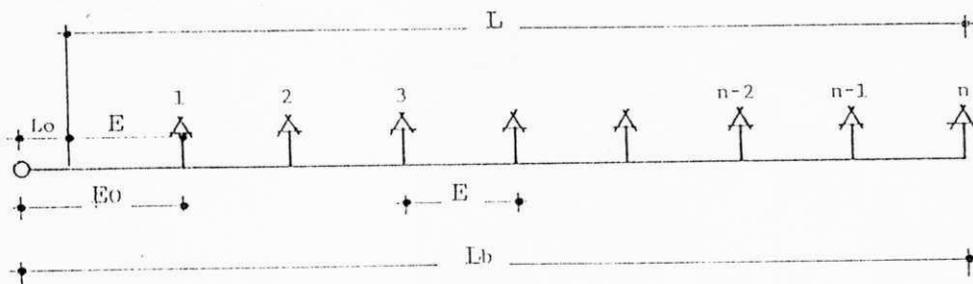


Figura 3.4 - Linha de irrigação com espaçamento inicial diferente dos subsequentes.

De Paco (1989) apresenta uma expressão geral, baseada no fator de Christiansen, para a determinação do fator de correção da perda de carga, associado a um espaçamento inicial genérico (L_0).

$$F' = (L_0 + F.L)/L_b \quad , \quad (3.33)$$

onde:

F' = Fator de correção da perda de carga para um comprimento inicial qualquer;

F = Fator de correção de Christiansen;

L_b = Comprimento real da tubulação;

L = Comprimento da tubulação associado com um comprimento inicial igual aos subsequentes, como no desenvolvimento original de Christiansen (1942);

L_0 = Complemento do comprimento real da tubulação em relação ao comprimento de referência L ;

em que:

$$L = N.E \quad , \quad (3.34)$$

e

$$L = L_b - L_0 \quad , \quad (3.35)$$

onde:

N = Número de saídas da tubulação;

E = Espaçamentos entre as saídas.

A metodologia de de Paco (1989) dificulta a geração de tabelas gerais práticas. Portanto, com este intuito, será desenvolvida em seguida uma outra alternativa para este problema, tendo como base um comprimento genérico para o trecho inicial de uma linha de gotejamento.

Como já foi visto anteriormente, a perda de carga total na tubulação é decorrente do somatório das perdas de carga de todos os trechos da tubulação:

$$h_1 = M.E_0.N^m.q^m$$

$$h_2 = M.E.(N-1)^m.q^m$$

.

.

.

$$h_k = M.E.q^m.(N-k+1)^m$$

.

.

.

$$h_{(N-1)} = M.E.q^m.2^m$$

$$h^N = M.E.q^m.1^m$$

Somando-se estas perdas e evidenciando-se os termos comuns, encontra-se:

$$h_t = M.E.q^m.[a.N^m + (N-1)^m + \dots + 2^m + 1^m] , \quad (3.36)$$

ou, de uma forma mais conveniente;

$$h_t = M.E.q^m.[N^m + (N-1)^m + \dots + 2^m + 1^m + (a-1)N^m] , \quad (3.37)$$

sendo o fator "a" dado pela relação entre o espaçamento inicial (E_0) e os espaçamentos (E) subsequentes;

$$a = E_0/E \quad (3.38)$$

O comprimento total da tubulação (L_b) será:

$$L_b = E_0 + (N-1).E$$

ou, desenvolvendo-se convenientemente:

$$L_b = (N + a - 1).E \quad (3.39)$$

A perda de carga de referência, fictícia (h_t'), será:

$$h_t' = M.(N.q)^m.(N + a - 1).E \quad (3.40)$$

O fator de correção da perda de carga (F'), para este caso, será determinado pela relação entre a perda de carga real (h_t), dada pela expressão (3.37), e a perda de carga de referência, fictícia (h_t'), definida em (3.39).

Dividindo-se estas expressões e simplificando-se os termos comuns chega-se à seguinte expressão genérica para o fator (F') de correção;

$$F' = \frac{(F.N + a - 1)}{(N + a - 1)}, \quad (3.41)$$

onde, relembrando:

F' = Fator de correção da perda de carga para um comprimento inicial diferente dos subsequentes;

F = Fator de correção de Christiansen (1942);

N = Número de saídas d'água na tubulação;

a = Relação entre o espaçamento inicial e os subsequentes como na expressão (3.38).

3.5 - Linha de energia de uma tubulação com saídas múltiplas.

A linha de energia de uma linha de gotejamento não é uma reta, mais sim uma curva do tipo exponencial (Wu e Gitlin, 1973). Este fato deve-se à variação gradual da vazão ao longo dessas tubulações.

A equação que define a forma da linha de energia nas tubulações com distribuição uniforme e contínua é do tipo de uma parábola do terceiro grau. (Neves, 1979).

A linha de energia de uma tubulação com distribuições de vazão uniformes e discretas pode ser estimada facilmente dividindo-se a linha em vários segmentos e usando-se as descargas médias destes para a determinação da perda de carga. O erro cometido quando unicamente dois segmentos são usados fica em torno de 5%. Se 3 ou 4 segmentos são usados, este erro pode ser reduzido para mais ou menos 2% ou 1%. (Wu e Gitlin, 1973).

Segundo Solon e Kēllēr (1978), de acordo com estudos feitos por Keller e Karmeli (1975), a distribuição da pressão em uma linha de irrigação ocorre de maneira que a carga piezométrica relativa à vazão média, definida pela média aritmética entre as vazões emitidas, ocorre a uma distância de 39% do comprimento.

3.5.1- Método gráfico.

Lopez (1986) apresenta um método gráfico, bastante prático, que facilita o projeto de linhas de irrigação, permitindo incluir os efeitos da declividade da tubulação, ponto de alimentação da tubulação e variação de diâmetros.

Este método baseia-se em uma curva adimensional, dada pela relação entre a perda de carga acumulada até um determinado ponto (h_{fx}) e a perda de carga total (h_f) em uma tubulação com distribuição contínua de vazão, de acordo com a seguinte expressão:

$$h_{fx}/h_f = (x/L)^{2.75} \quad . \quad (3.42)$$

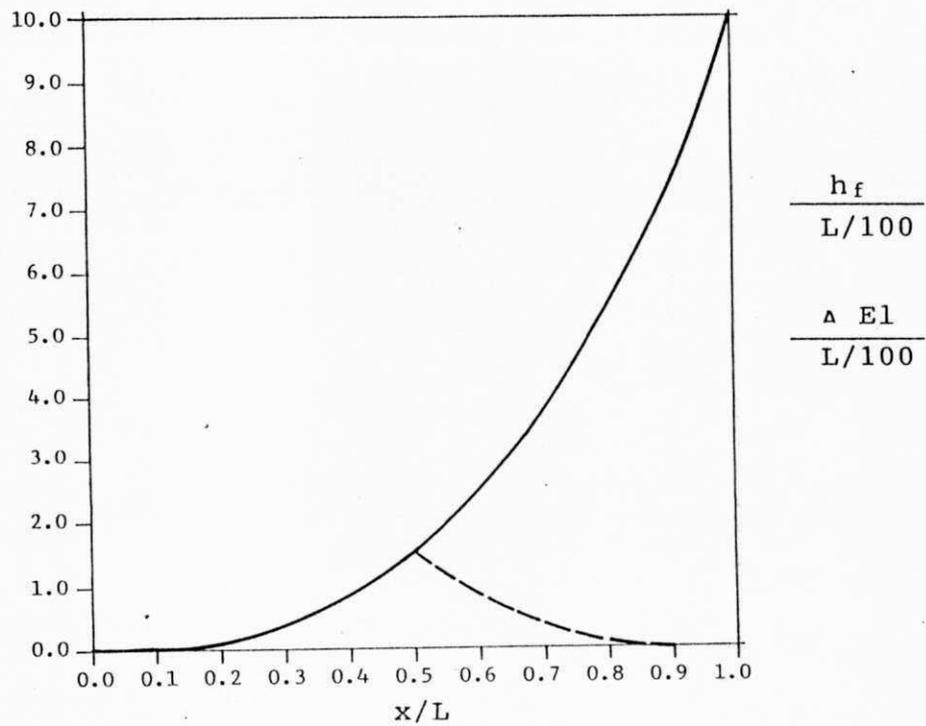


Figura 3.5 - Curva de perda de carga adimensional (Lopez, 1986).

3.5.2 - Perdas de cargas intermediárias em linhas com distribuição de vazão.

A linha de energia em uma tubulação com distribuição discreta de vazão não é contínua; compõe-se de diversos segmentos de retas com declividade decrescentes de montante para jusante. Exige-se, portanto, para uma identificação precisa desta linha, a determinação das perdas de carga acumuladas do início da tubulação a todos os pontos de derivação d'água.

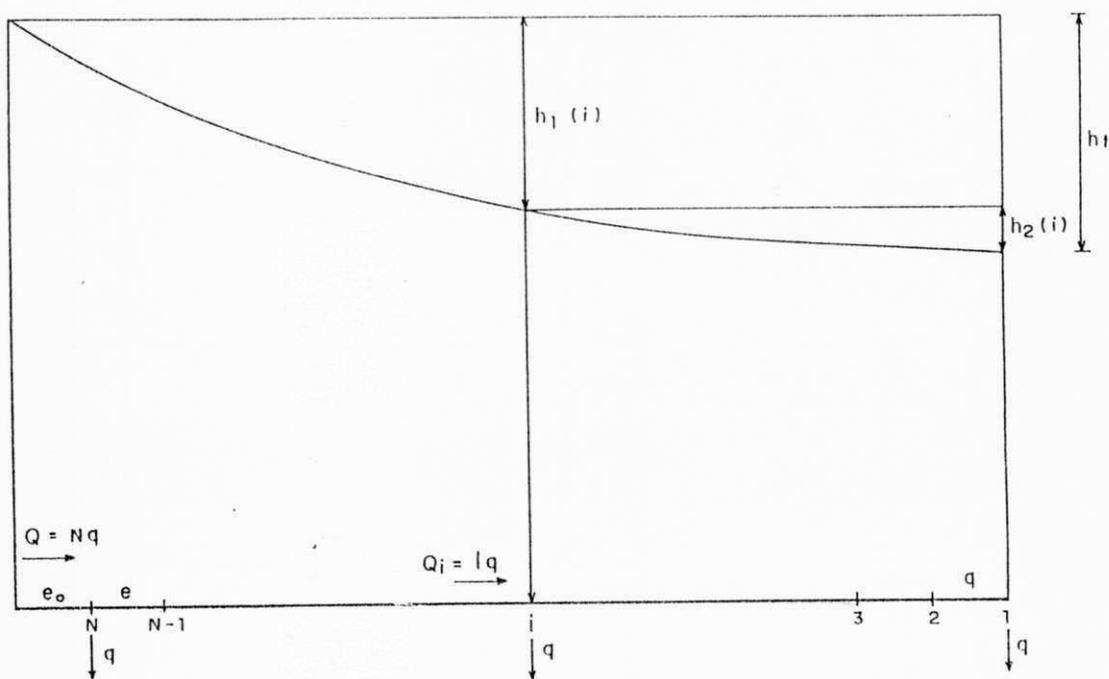


Figura 3.6 - Perdas de carga intermediárias em linhas com distribuição discreta de vazão.

De acordo com a figura 3.6, a perda de carga acumulada do início da tubulação até um ponto de derivação genérico será:

$$h_1(i) = h_t - h_2(i) , \quad (3.43)$$

onde:

$h_1(i)$ = Perda de carga do início da tubulação até um ponto de derivação qualquer;

h_t = Perda de carga total na tubulação;

$h_2(i)$ = Perda de carga no segundo trecho da tubulação.

Para facilitar, define-se $r(i)$ como a relação entre a perda no primeiro trecho e a perda total;

$$r(i) = h_1(i)/h_t = 1 - h_2(i)/h_t . \quad (3.44)$$

A perda de carga total na tubulação (h_t) será determinada a partir da fórmula geral (3.1), corrigida pelo fator de correção genérico (F') da perda de carga;

$$h_t = F'(N) \cdot M \cdot Q^m \cdot L , \quad (3.45)$$

onde:

h_t = Perda de carga total;

$F'(N)$ = Fator de correção da perda de carga para um número de saídas igual a N , definido em (3.41);

N = Número de pontos de saídas d'água;
Q = Vazão de alimentação da tubulação;
L = Comprimento total da tubulação.

em que M é um coeficiente da fórmula geral da perda de carga, dado por:

$$M = K/D^n \quad , \quad (3.46)$$

onde, lembrando:

K = Coeficiente de rugosidade da fórmula da perda de carga;
D = Diâmetro de cálculo da tubulação;
n = Expoente da fórmula da perda de carga.

A vazão de cálculo é determinada a partir do número de saídas d'água na tubulação:

$$Q = N \cdot q \quad , \quad (3.47)$$

com o comprimento da tubulação dado pela expressão seguinte (3.39), anteriormente demonstrada:

$$L = (N+a+1) \cdot E \quad .$$

Substituindo-se estas expressões na equação (3.35), encontra-se:

$$h_t = F'(N) \cdot M \cdot (N \cdot q)^m \cdot (N+a-1) \cdot E \quad , \quad (3.48)$$

sendo:

q = Vazão de cada saída;

a = Relação entre o comprimento inicial e os subsequentes (3.38).

A perda de carga no segundo trecho, $h_2(i)$, será:

$$h_2(i) = F(i-1) \cdot K \cdot [(N-1)q]^m \cdot (N-1) \cdot E \quad (3.49)$$

em que $F(i-1)$ é o fator de correção de Christiansen (1942), que está associado a um número de saídas igual a "i-1".

Substituindo-se estas fórmulas na fórmula (3.40) e desenvolvendo-se chega-se finalmente a:

$$r(i) = 1 - F(i-1)/F'(N) \cdot [(N-1)/N]^m \cdot (N-1)/(N+a-1) \quad (3.50)$$

O fator $r(i)$ permite determinar a perda de carga acumulada do início da tubulação até um ponto qualquer de saída d'água.

3.6 - Dimensionamento de uma linha de gotejamento com combinação de diâmetros.

Normalmente, no processo de dimensionamento das linhas de gotejamento encontram-se diâmetros não comerciais para estas tubulações. A solução usual para esse problemas consiste na adoção de um diâmetro único conveniente. Este procedimento, apesar de ser o mais prático, altera as relações preestabelecidas para as perdas de cargas nas tubulações do sistema, refletindo diretamente no custo do conjunto das tubulações.

Em algumas situações de projeto, principalmente nos processos de otimização do projeto de um sistema de gotejamento, torna-se importante a manutenção das relações originais entre as perdas de cargas nas tubulações. Nesses casos, o processo de dimensionamento das tubulações baseia-se em uma combinação adequada entre os diâmetros comerciais disponíveis no mercado.

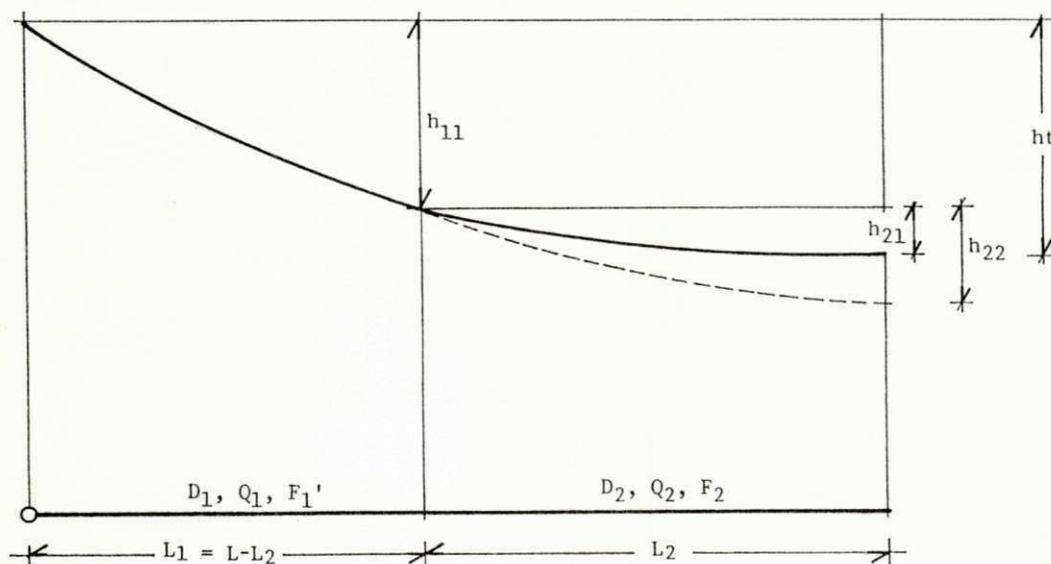


Figura 3.7 - Linha de gotejamento com combinação de diâmetros.

O desenvolvimento que será mostrado a seguir consiste na determinação dos comprimentos L_1 e L_2 , associados aos diâmetros comerciais D_1 e D_2 , selecionados convenientemente. Normalmente, para facilitar, empregam-se dois diâmetros comerciais, o diâmetro (D_1), imediatamente superior ao diâmetro teórico, e o diâmetro (D_2), imediatamente inferior, correspondendo este último ao segundo trecho da tubulação.

Este problema é resolvido a partir de um processo iterativo, por tentativas, testando-se as diversas possibilidades de repartição da tubulação, de maneira que resulte na perda de carga total preestabelecida para toda a tubulação.

De acordo com a figura 3.7, a perda de carga total (h_t) na tubulação será:

$$h_t = F'_1 \cdot J_{11} \cdot L - F_2 \cdot J_{12} \cdot L_2 + F_2 \cdot J_{22} \cdot L_2 , \quad (3.51)$$

ou, baseando-se no desenvolvimento para a determinação das perdas de cargas intermediárias;

$$h_t = r(i) \cdot F'_1 \cdot J_{11} \cdot L + F_2 \cdot J_{22} \cdot L_2 , \quad (3.52)$$

onde:

$r(i)$ = Relação entre a perda de carga no primeiro trecho e a perda de carga total;

h_t = Perda de carga total real na tubulação;

F'_1 = Fator de correção da perda de carga no trecho inicial;

- J_{11} = Perda de carga por unidade de comprimento no trecho inicial associada com o maior diâmetro (D_1);
 L = Comprimento total da tubulação;
 F_2 = Fator de correção da perda de carga no trecho final;
 J_{12} = Perda de carga por unidade de comprimento no trecho final associada com o maior diâmetro (D_1);
 J_{22} = Perda de carga por unidade de comprimento no trecho final associada com o menor diâmetro (D_2);
 L_2 = Comprimento do trecho final da tubulação.

Uma boa estimativa inicial para o comprimento do segundo trecho da tubulação resulta da adoção do modelo de distribuição contínua de vazão. Neste caso, tendo como base a fórmula (3.1) geral da perda de carga, e por analogia com a expressão (3.51), chega-se a:

$$h_t = M_1 \cdot q^m \cdot L^{(m+1)} - M_1 \cdot q^m \cdot L_2^{(m+1)} + M_2 \cdot q^m \cdot L_2^{(m+1)} \quad ; \quad (3.53)$$

onde:

- h_t = Perda de carga total da tubulação;
 q = Vazão distribuída em uma unidade de comprimento;
 L = Comprimento total da tubulação;

L_2 = Comprimento do segundo trecho da tubulação;

m = Expoente da vazão na fórmula da perda de carga;

e sendo M_1 e M_2 constantes características, assumindo para cada diâmetro as seguintes expressões:

$$M_1 = \frac{K}{(m+1) \cdot D^n} \quad (3.54)$$

e

$$M_2 = \frac{K}{(m+1) \cdot D^n} \quad (3.55)$$

A partir da expressão (3.53), pode-se determinar o comprimento L_2 do segundo trecho da tubulação:

$$L_2 = \left\{ \frac{h_t - M_1 \cdot q^m \cdot L^{(m+1)}}{(M_2 - M_1) \cdot q^m} \right\}^{1/(m+1)} \quad (3.56)$$

3.7 - Influências da variação da vazão distribuída no cálculo das perdas de carga.

Na maioria das situações de projeto assume-se uma vazão distribuída constante como uma simplificação para o cálculo. Apesar de essa condição poder ser obtida a partir do controle das características físicas dos emissores (Wu e Gitlin, 1973), isto

nem sempre é possível, devido aos aspectos de natureza prática e econômica.

Nos projetos de ramais com emissores semelhantes, o modelo de vazão distribuída constante tem sido empregado generalizada-mente. Sendo o controle do erro no cálculo das perdas de cargas feito a partir da verificação da variação da vazão emitida.

A vazão emitida em uma linha de gotejamento relaciona-se diretamente com a pressão em cada emissor. A variação da pressão ao longo de uma linha de gotejamento resulta da combinação dos efeitos das perdas de carga com o gradiente topográfico.

Com base na análise da condição real de fluxo em uma linha de gotejamento, podem-se levantar as seguintes considerações práticas, a partir de um modelo com distribuição contínua de vazão:

a) A vazão distribuída, que corresponde à taxa de variação da vazão longitudinal com respeito ao comprimento da tubulação, decresce com a carga piezométrica, sendo máxima no início da tubulação e mínima no final. Portanto:

$$q(x) = dQ/dx \quad , \quad (3.57)$$

onde: $q(L) = q(\max)$ e $q(0) = 0$.

b) A condição de vazão nula na extremidade da tubulação torna o gradiente de perda de carga em suas proximidades também nulo,

pois:

$$J = dh/dx = M.Q ; \quad (3.58)$$

portanto:

quando $Q = 0$, então $J = 0$.

c) A taxa de variação da vazão distribuída com respeito ao comprimento da tubulação é nula no final da mesma, isto é:

$$dq/dx = 0 \quad \text{quando } x = 0 \text{ .}$$

Para a avaliação do efeito da variação da vazão emitida no cálculo da perda de carga em um linha de irrigação, foi testada uma função parabólica para a distribuição da vazão ao longo da tubulação. Este modelo deve simular melhor a situação real, uma vez que atende as considerações práticas listadas anteriormente.

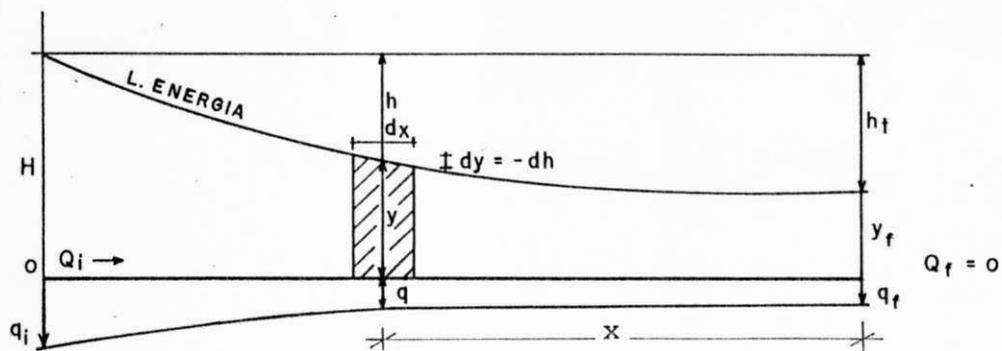


Figura 3.2 - Distribuição de vazão parabólica.

3.7.1- Determinação da lei de variação da vazão emitida.

Para uma distribuição parabólica:

$$q = A.x^2 + B.x + C \quad , \quad (3.59)$$

onde:

q = vazão distribuída por unidade de comprimento da tubulação;

x = Distância do final até um determinado ponto da tubulação;

$A, B, e C$ = Parâmetros da função parabólica.

Determinação dos parâmetros; A, B e C :

Quando $x = 0, q = q_f$;

Logo $C = q_f$. (3.60)

Derivando-se a função da vazão distribuída:

$$dq/dx = 2A.x + B \quad . \quad (3.61)$$

Como $dq/dx = 0$, quando $x = 0$, então $B = 0$.

Substituindo-se os parâmetros B e C na equação geral, chega-se a:

$$q = Ax^2 + q_f \quad . \quad (3.62)$$

O valor de A é determinado pela condição; $x = L$, $q = q_i$;

então: $A = (q_i - q_f)/L^2 \quad . \quad (3.63)$

Substituindo-se os parâmetros A, B e C na fórmula geral, chega-se finalmente a:

$$q = \left(\frac{q_i - q_f}{L^2} \right) \cdot x^2 + q_f \quad , \quad (3.64)$$

onde:

q_i = Vazão distribuída por unidade de comprimento no início da linha;

q_f = Vazão distribuída por unidade de comprimento no final da linha.

3.7.2- Determinação da lei de variação da vazão longitudinal.

Por definição;

$$dQ/dx = q = \left(\frac{q_i - q_f}{L^2} \right) \cdot x^2 + q_f \quad . \quad (3.65)$$

Integrando-se esta expressão, sabendo-se que quando $x = 0$, $Q=0$, e desenvolvendo-se, chega-se a:

$$Q = \left(\frac{q_i - q_f}{L^2} \right) \cdot x^3 / 3 + q_f \cdot x \quad , \quad (3.66)$$

sendo Q a vazão longitudinal na tubulação.

3.7.3- Determinação da perda de carga total.

Na fórmula de Darcy, temos:

$$dh/dx = J = K \cdot Q^2 \quad , \quad (3.67)$$

Onde:

h = Perda de carga na tubulação;

J = Perda de carga por unidade de comprimento;

K = Coeficiente da Fórmula de Darcy.

Integrando-se esta expressão e desenvolvendo-se, para as condições de contorno; $x=0$, $h=0$ e $x=L$, $h=h_t$, chega-se a:

$$h_t = \frac{K \cdot L^3 \cdot q_f^2 \cdot (5 + 32a + 68a^2)}{315a^2} \quad , \quad (3.68)$$

ou

$$h_t = \frac{K.L^3 . q_i^2 . (5 + 32a + 68a^2)}{315} , \quad (3.69)$$

sendo:

$$a = q_f / q_i . \quad (3.70)$$

Fazendo-se na fórmula (3.66) $x=L$, encontra-se a vazão inicial (Q_0):

$$Q_0 = q_i . L . (1+2a) / 3 . \quad (3.71)$$

Combinando-se esta expressão com a fórmula (3.28), chega-se a:

$$h_t = K . Q_0^2 . L . \left[\frac{5 + 32a + 68a^2}{35 . (1 + 2a)^2} \right] . \quad (3.72)$$

3.7.4- Relação entre a perda de carga de uma distribuição parabólica e a perda de carga de uma distribuição contínua.

Para efeito de análise, será estudada a condição mais desfavorável, que corresponde a uma vazão distribuída uniforme igual à vazão distribuída final do modelo com distribuição parabólica.

Para o modelo com vazão distribuída constante:

$$h_t' = K \cdot (q_f \cdot L)^2 \cdot L/3 \quad (3.73)$$

Comparando esta expressão com a (3.72), chega-se à seguinte relação:

$$h_t/h_t' = \frac{(5 + 32a + 68a^2)}{105a^2} \quad (3.74)$$

Tabela 3.2 - Relação entre h_t/h_t'

$a = q_f/q_i$	h_t/h_t'
0,1	8,457
0,2	3,362
0,3	2,193
0,4	1,707
0,5	1,448
0,6	1,288
0,7	1,180
0,8	1,103
0,9	1,045
0,95	1,021
1,0	1,000

3.8 - Considerações finais.

A análise da Tabela 3.2 mostra que o modelo com distribuição uniforme de vazão pode ser empregado sem riscos, desde que seja controlada, dentro dos padrões normalmente recomendados, a variação da vazão emitida pelos gotejadores, .

Vale salientar que a fórmula da perda de carga empregada

na análise, com expoente $m = 2$, valor máximo, acentua os desvios entre as metodologias analisadas.

Apesar de pesquisas recentes recomendarem o emprego das fórmulas indicadas para os condutos hidráulicamente lisos para o cálculo da perda de carga nas linhas de gotejamento, outras fórmulas, como a de Hazen-Williams, apropriadas para o cálculo das perdas de cargas no regime de transição nos condutos de maiores diâmetros ainda são empregadas.

Com respeito aos modelos empregados no cálculo das perdas de carga nas linhas de gotejamento, nota-se um uso indiscriminado das fórmulas derivadas tanto do modelo com distribuição de vazão contínua como do modelo com distribuição discreta. O modelo com distribuição de vazão contínua é um modelo simplificado, simulando melhor as tubulações com grande número de saídas d'água, como nas linhas de gotejamento, conduzindo, nestes casos, a resultados bastantes próximos do modelo com distribuição discreta, mais realista.

O projeto hidráulico de um sistema de gotejamento envolve um grande número de variáveis que interferem diretamente no custo final do sistema. Para evitar um processo cansativo de pesquisa da melhor solução, torna-se necessário o estabelecimento de uma metodologia prática de otimização do projeto desses sistemas. Estas constatações conduziram ao presente trabalho, constituindo-se no objetivo básico deste, como será visto no Capítulo 4, seguinte:

C A P Í T U L O 4

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE UMA PARCELA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

4.1 - Introdução.

O objetivo fundamental do projeto de um sistema de gotejamento constitui-se no dimensionamento adequado da rede de tubulações, de forma a garantir-se uma boa uniformidade na distribuição da água no terreno.

A metodologia usual baseia-se nas parcelas - unidades básicas que englobam o conjunto de tubulações, ramais e derivação, que alimentam diretamente os emissores -, onde o controle da vazão emitida está diretamente relacionado com a variação da pressão na rede e conseqüentemente com a perda de carga global estabelecida para a parcela.

O projeto dessas unidades relaciona-se diretamente com a distribuição das perdas de cargas nos ramais e na derivação, assim como com os comprimentos e a disposição destas tubulações no terreno. Na maioria das situações aceita-se uma considerável flexibilidade nestes elementos de projeto, conduzindo a diferentes soluções, com custos diversos. Embora um número limitado de

alternativas seja suficiente para orientar a escolha da solução ótima, este processo é cansativo, justificando o desenvolvimento de métodos práticos que orientem o projetista quanto à otimização desses fatores de projeto. Contudo, pouco se tem feito nesta linha, encontrando-se atualmente na literatura especializada referências apenas à metodologia de Keller e Karmeli (1975).

4.2 - Metodologia de Keller e Karmeli (1975).

Para facilitar o processo de otimização do projeto de uma parcela de gotejamento, foi desenvolvido por Keller e Karmeli (1975) um método geral, aplicado a situações de projeto onde as condições físicas do terreno não são muito restritivas. Esta metodologia deriva de um processo analítico de minimização do custo por unidade de área das tubulações de um sistema de gotejamento, resultando em expressões sintéticas e razoavelmente universais, segundo esses autores.

A metodologia de Keller e Karmeli (1975) refere-se a parâmetros de otimização, bastante simplificados, para o formato da parcela e a distribuição da perda de carga nos ramais e na derivação.

O comprimento ótimo dos ramais, que determina o formato ótimo da parcela, apresenta-se diretamente relacionado com a área da parcela, de acordo com a expressão:

$$l_r = K \cdot A^{0,45} \quad , \quad (4.1)$$

onde:

l_r = Comprimento dos ramais em metros (m);

A = Área do terreno em m^2 ;

K = Coeficiente que depende do layout das tubulações.

Para as unidades métricas, $K = 1,0$, quando a linha lateral estende-se em uma só direção, e $K = 0,685$, quando a linha é dividida ao meio.

Em relação à distribuição ótima da perda de carga nas tubulações da parcela, Olitta (1984) e de Paco (1989), citando Keller e Karmeli (1975), objetivando atingir uma alta uniformidade de aplicação e o custo do sistema em um mínimo, sugerem que a perda carga admissível para uma parcela plana e com pequena declividade seja dividida entre a linha lateral e a linha de distribuição na base de 55% e 45%, respectivamente.

Uma análise crítica revela que a metodologia de Keller e Karmeli (1975) simplifica bastante as variáveis do problema, universalizando aspectos importantes e diversos dos sistemas de gotejamento, tais como: fatores de custos das tubulações, densidade de ramais, parâmetros do modelo hidráulico e os efeitos das declividades do terreno. Estas constatações justificam o presente trabalho.

Apresenta-se em seguida um procedimento que resultará numa metodologia alternativa à metodologia de Keller e Karmeli (1975), em que os fatos citados são levados em conta no projeto de um sistema de gotejamento.

4.3 - A metodologia proposta.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho visa a minimização dos custos do conjunto das tubulações de uma parcela, a partir de um modelo genérico e de fácil aplicação, com base em elementos de projeto bem detalhados e em fatores de custos das tubulações disponíveis no mercado.

O estudo baseia-se no projeto ótimo de uma parcela plana e horizontal, sendo que os efeitos das possíveis inclinações do terreno serão compensados por deslocamentos convenientes dos pontos de entrega da água nas tubulações das parcelas.

Para a determinação do formato ótimo e da relação ótima entre as perdas nos ramais e na derivação, optou-se por um modelo analítico clássico, onde as condições de otimização são determinadas a partir das técnicas tradicionais de minimização de funções de múltiplas variáveis. O modelo baseia-se nas primeiras e segundas derivadas parciais da função-objetivo, que neste caso é definida pelo custo do conjunto das tubulações da parcela.

Desta forma, apresenta-se um algoritmo para a solução geral do problema. Para facilitar a aplicação da metodologia, desenvolveu-se um método prático, com base em restrições relacionadas com os diâmetros e comprimentos das tubulações da parcela, tendo-se gerado tabelas e ábacos de fácil manuseio.

O modelo fundamenta-se em uma função custo-diâmetro contínua e linear, porém o dimensionamento das tubulações ocorre por combinação entre os diâmetros comerciais disponíveis, garantindo

a manutenção das relações originais entre as perdas de cargas nas tubulações. Os custos de conexão das tubulações da rede são desprezados.

4.4 - Variáveis do problema de otimização

Os dados básicos de projeto de uma parcela de gotejamento são:

- A_p = Área da parcela;
- V_{pp} = Variação da pressão na parcela;
- q = Vazão dos gotejadores;
- E_g = Espaçamentos entre gotejadores;
- E_r = Espaçamentos entre ramais;

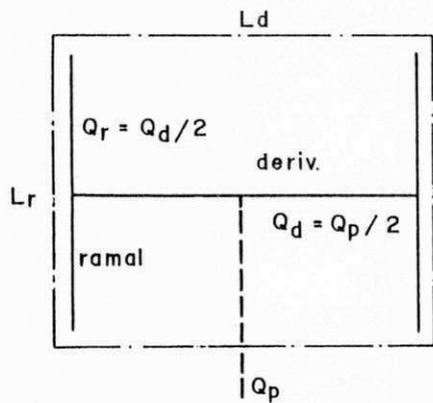
As características do emissor, vazão e espaçamentos associados com a lâmina e a frequência de irrigação determinam o número de unidades operacionais do sistema e conseqüentemente a área das parcelas.

A variação máxima da pressão na parcela está associada com a variação máxima permitida para a vazão emitida, que é um fator que retrata a uniformidade de distribuição da água no terreno.

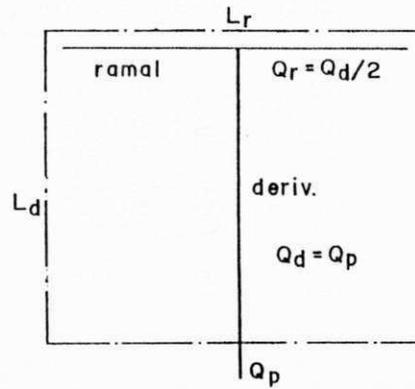
Os espaçamentos dos gotejadores estão associados com os espaçamentos da cultura, número de gotejadores por planta e características do solo.

4.5 - Tipos de "layout".

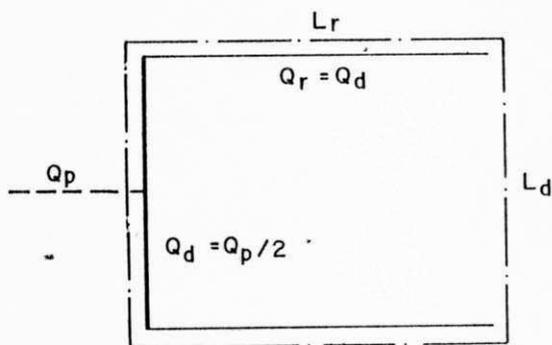
O "layout" das tubulações da parcela constitui-se em um elemento de projeto importante. Para facilitar o emprego generalizado do modelo, os diferentes tipos práticos de "layout" foram classificados conforme a figura 4.1. Destes, o "layout" em H, repartindo a vazão nas tubulações, é o que resulta em um menor custo para as tubulações da parcela. O "layout" em T exigindo um menor número de linhas secundárias e/ou principais, pode conduzir, em alguns casos, a uma melhor solução. Os "layout" em C e L são recomendados para a irrigação de terrenos em encostas, com grande declividade, permitindo a compensação da perda de carga nos ramais pelo gradiente topográfico, resultando em menores diâmetros para os ramais e um menor custo.



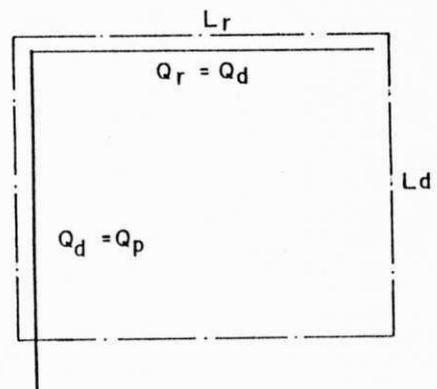
a) Layout em H



b) Layout em T



c) Layout em C



d) Layout em L

Figura 4.1 - Tipos de "layout" para uma parcela de gotejamento.

4.6 - A Função-objetivo do problema de otimização.

A função-objetivo do problema é definida pelo custo do conjunto das tubulações de uma parcela, resultando da combinação do custo dos ramais com o da derivação:

$$C_p = C_r + C_d , \quad (4.4)$$

onde:

C_p = Custo das tubulações da parcela;

C_r = Custo do conjunto dos ramais;

C_d = Custo da derivação.

Para facilitar, o desenvolvimento literal da expressão do custo global das tubulações da parcela será desmembrado em duas partes.

4.6.1- Custo dos ramais.

O custo do conjunto de ramais (C_r) é determinado pelo produto entre o custo de uma unidade de comprimento de ramal (c_r) e o comprimento total dos ramais, que pode ser estimado a partir da relação entre a área da parcela (A_p) e o espaçamento entre os ramais (E_r), como na expressão seguinte:

$$C_r = c_r \cdot (A_p / E_r) . \quad (4.5)$$

O dimensionamento das tubulações de uma parcela envolve a seleção de diâmetros comerciais em um número limitado de opções próximas, tanto para os ramais como para as derivações. Normalmente, estão disponíveis no mercado três ou quatro opções de diâmetro, variando de 3/8" a 3/4" para os ramais e de 2" a 4" para as derivações (Olitta, 1986). Este fato justifica a adoção de uma função de regressão linear para as relações custo-diâmetro das tubulações da parcela:

$$c_r = a_r \cdot D_r + b_r \quad , \quad (4.6)$$

onde:

D_r = Diâmetro teórico dos ramais;

a_r e b_r = Coeficientes da função custo-diâmetro para os ramais;

O diâmetro dos ramais (D_r) será determinado pela equação (4.7) seguinte, de acordo com a fórmula geral da perda de carga (3.1):

$$D_r = \left(\frac{k_r \cdot Q_r^m \cdot L_r}{h_r \cdot f_r} \right)^{1/n} \quad , \quad (4.7)$$

em que:

Q_r = Vazão de cálculo dos ramais;

L_r = Comprimento dos ramais;

h_r = Perda de carga nos ramais;

m e n = Expoentes da vazão e do diâmetro da fórmula geral da perda de carga (3.1);

f_r = Fator de repartição da vazão dos ramais, dado pela relação entre a vazão de alimentação dos ramais e a vazão de cálculo dos ramais. $f_r=1$ para um "layout" em L ou C e $f_r=2$ para um "layout" em H ou T.

O valor de k_r é dado por:

$$k_r = F_{lr} \cdot F_{dr} \cdot K_r , \quad (4.8)$$

onde:

F_{lr} = Fator de correção das perdas localizadas;

F_{dr} = Fator de correção da distribuição em percurso;

K_r = Coeficiente na fórmula geral da perda de carga (3.1).

A vazão de cálculo dos ramais (Q_r) é determinada pelo produto entre a vazão de cada gotejador (q) e o número de gotejadores por ramal, que pode ser estimado a partir da relação entre o comprimento dos ramais (L_r) e o espaçamento entre os gotejadores (E_r).

$$Q_r = [(L_r/E_r) \cdot q] / f_r , \quad (4.9)$$

onde, lembrando, f_r é o fator de repartição da vazão dos ramais:

Substituindo-se as expressões (4.9) e (4.7) na expressão (4.6) e, finalmente, combinado-se a expressão resultante com a expressão (4.5), obtem-se uma expressão simplificada para o custo global dos ramais (C_r) em função de h_r e L_r , isto é:

$$C_r = G_1 \cdot \frac{L_r^{(m+1)/n}}{h_r^{1/n}} + G_2 \quad , \quad (4.10)$$

onde G_1 e G_2 são constantes características do sistema, dadas por:

$$G_1 = \frac{a_r \cdot A_p \cdot k_r^{1/n} \cdot q^{m/n}}{E_r \cdot E_g^{m/n} \cdot f_r^{(m+1)/n}} \quad e \quad (4.11)$$

$$G_2 = b_r \cdot (A_p / E_r) \quad . \quad (4.12)$$

4.6.2- Custo da derivação.

O custo total da derivação (C_d) será;

$$C_d = c_d \cdot L_d \quad , \quad (4.13)$$

Onde:

c_d = Custo de uma unidade de comprimento de derivação;

L_d = Comprimento da derivação.

Com base nas justificativas anteriormente expostas, admitiu-se também para a derivação uma função linear para a relação custo-diâmetro da derivação, resultando na relação:

$$c_d = a_d \cdot D_d + b_d \quad , \quad (4.14)$$

em que:

D_d = Diâmetro teórico da derivação;

a_d e b_d = Coeficientes da função de regressão custo-diâmetro para a derivação.

O diâmetro teórico da derivação (D_d) será determinado, como na equação (4.7), a partir da fórmula geral da perda de carga (3.1), isto é:

$$D_d = \left(\frac{k_d \cdot Q_d^m \cdot L_d}{h_d \cdot f_d} \right)^{1/n} \quad , \quad (4.15)$$

onde:

Q_d = Vazão de cálculo da derivação;

L_d = Comprimento da derivação;

h_d = Perda de carga na derivação;

f_d = fator de repartição da vazão na derivação, sendo
 $f_d=1$ para um "layout" em L ou T e $f_d=2$ para um
"layout" em H ou C.

O valor de k_d é expresso por:

$$k_d = F_{ld} \cdot F_{dd} \cdot K_d \quad , \quad (4.16)$$

onde:

F_{ld} = Fator de correção das perdas localizadas;

F_{dd} = Fator de correção da distribuição em percurso;

K_d = Coeficiente da fórmula geral da perda de carga
(3.1).

A partir da relação entre a área da parcela (A_p) e a área de influência de cada gotejador pode-se avaliar o número total de gotejadores da parcela, facilitando o cálculo da vazão de projeto da derivação (Q_d), como na expressão seguinte:

$$Q_d = \left(\frac{A_p}{E_r \cdot E_g \cdot f_d} \right) \cdot q \quad , \quad (4.17)$$

onde, relembrando:

A_p = Área da parcela;

E_g = Espaçamentos entre gotejadores nos ramais;
 E_r = Espaçamentos entre ramais;
 f_d = Fator de repartição da vazão na derivação;
 q = Vazão dos gotejadores.

A perda de carga na derivação relaciona-se com a perda de carga dos ramais através da perda de carga total da parcela, h_p :

$$h_d = h_p - h_r \quad . \quad (4.18)$$

As dimensões da parcela estão relacionadas por:

$$L_d = A_p / L_r \quad . \quad (4.19)$$

Com as substituições sucessivas das relações obtidas acima, chega-se a uma expressão simplificada para o custo da derivação (C_d) em função de h_r e L_r :

$$C_d = \frac{G_3}{L_r^{(n+1)/n} \cdot (h_p - h_r)^{1/n}} + G_4 / L_r \quad , \quad (4.20)$$

sendo G_3 e G_4 constantes do sistema, dadas por:

$$G_3 = \frac{a_d \cdot K_d^{1/n} \cdot q^m / n \cdot A_p^{(m+n+1)/n}}{E_g^{m/n} \cdot E_r^{m/n} \cdot f_d^{(m+1)/n}} \quad e \quad (4.21)$$

$$G_4 = b_d \cdot A_p \quad (4.22)$$

4.6.3- A função objetivo.

Como já foi mostrado anteriormente, a função-objetivo do problema resulta da combinação dos custos dos ramais (C_r) com o da derivação (C_d). Substituindo-se as expressões (4.10) e (4.20), dos custos dessas tubulações, na expressão geral (4.4) do custo da parcela, obtém-se:

$$C_p = \frac{G_1 \cdot L_r^{(m+1)/1}}{h_r^{1/n}} + G_2 + \frac{G_3}{L_r^{(n+1)/n} \cdot (h_p - h_r)^{1/n}} + G_4/L_r, \quad (4.23)$$

onde, lembrando: G_1 , G_2 , G_3 e G_4 são constantes características do sistema e estão definidas anteriormente nas expressões (4.11), (4.12), (4.21) e (4.22), respectivamente.

4.7- Análise da função-objetivo.

A função-objetivo apresenta-se com duas variáveis independentes:

$$C_p = f(h_r, L_r),$$

e com domínio restrito à região:

$$0 < h_r < h_p \quad \text{e} \quad 0 < L_r < +\infty$$

Dentro do domínio, a função objetivo é contínua e assume

valores significativamente grandes, próximo à região de contorno deste, o que pode ser explicado pelas seguintes razões: quando a perda de carga nos ramais é pequena e/ou o comprimento dos ramais é grande, o custo do conjunto dos ramais cresce muito; ocorrendo o contrário, o custo da derivação onera bastante o custos do conjunto das tubulações da parcela.

Estes fatos garantem a existência de um mínimo absoluto dentro do domínio da função-objetivo, sendo este um ponto crítico.

4.8 - Solução ótima global do problema.

A solução ótima global do problema corresponde ao mínimo absoluto da função-objetivo, que é um ponto crítico. Os critérios para a determinação e identificação de pontos críticos, mínimos locais, num problema como o estudado, são:

$$a) \quad \frac{\partial C_p}{\partial h_r} = 0 \quad e \quad \frac{\partial C_p}{\partial L_r} = 0 .$$

$$b) \quad \frac{\partial^2 C_p}{\partial h_r^2} > 0 \quad e \quad H = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 C_p}{\partial h_r^2} & \frac{\partial^2 C_p}{\partial h_r \partial L_r} \\ \frac{\partial^2 C_p}{\partial L_r \partial h_r} & \frac{\partial^2 C_p}{\partial L_r^2} \end{vmatrix} > 0 .$$

A solução do sistema de equações definido no item "a" determina os possíveis pontos críticos dentro do domínio da função-objetivo.

A identificação da natureza dos pontos críticos, se mínimos locais, máximos locais ou pontos de sela, vêm da análise das derivadas parciais de segunda ordem, como no item "b", onde "H" é a matriz hessiana.

Para a identificação das condições ótimas de projeto para a parcela resta apenas a pesquisa do mínimo absoluto dentre os mínimos locais.

4.8.1- As derivadas parciais da função-objetivo.

A modelo de otimização baseia-se nas primeiras e segundas derivadas parciais da função objetivo:

$$a) \quad \frac{\partial C_r}{\partial h_r} = - \frac{G_1 \cdot L_r^{(m+1)/n}}{n \cdot h_r^{(n+1)/n}} \quad , \quad (4.24)$$

$$b) \quad \frac{\partial C_d}{\partial h_r} = \frac{G_3}{n(h_p - h_r)^{(n+1)/n} \cdot L_r^{(n+1)/n}} \quad , \quad (4.25)$$

$$c) \quad \frac{\partial C_r}{\partial L_r} = \frac{G_1(m+1) \cdot L_r^{(m-n+1)/n}}{n \cdot h_r^{1/n}} \quad , \quad (4.26)$$

$$d) \quad \frac{\partial C_d}{\partial L_r} = - \frac{G_3(n+1)}{n(h_p - h_r)^{1/n} \cdot L_r^{(2n+1)/n}} - \frac{G_4}{L_r^2} \quad , \quad (4.27)$$

$$e) \frac{\partial^2 C_r}{\partial h_r^2} = \frac{G_1 (n+1) L_r^{(m+1)/n}}{n^2 \cdot h_r^{(2n+1)/n}}, \quad (4.28)$$

$$f) \frac{\partial^2 C_d}{\partial h_r^2} = \frac{G_3 (n+1)}{n^2 (h_p - h_r)^{(2n+1)/n} \cdot L_r^{(n+1)/n}}, \quad (4.29)$$

$$g) \frac{\partial^2 C_r}{\partial L_r^2} = \frac{G_1 (m+1) (m-n+1) L_r^{(m-2n+1)/n}}{n^2 \cdot h_r^{1/n}}, \quad (4.30)$$

$$h) \frac{\partial^2 C_d}{\partial L_r^2} = \frac{G_3 (2n+1) (n+1)}{n^2 \cdot (h_p - h_r)^{1/n} \cdot L_r^{(3n+1)/n}} + \frac{2 \cdot G_4}{L_r^3}, \quad (4.31)$$

$$i) \frac{\partial^2 C_r}{\partial h_r \partial L_r} = \frac{\partial^2 C_r}{\partial L_r \partial h_r} = - \frac{G_1 (m+1) L_r^{(m-n+1)/n}}{n^2 \cdot h_r^{(n+1)/n}}, \quad e \quad (4.32)$$

$$j) \frac{\partial^2 C_d}{\partial h_r \partial L_d} = \frac{\partial^2 C_d}{\partial L_d \partial h_r} = \frac{G_3 (n+1)}{n^2 (h_p - h_r)^{(n+1)/n} L_r^{(2n+1)/n}}. \quad (4.33)$$

Como o custo total da parcela resulta da soma dos custos dos ramais com o da derivação, então as derivadas também podem ser somadas, isto é:

$$\partial C_p / \partial h_r = \partial C_r / \partial h_r + \partial C_d / \partial h_r \quad (4.34)$$

$$\partial C_p / \partial L_r = \partial C_r / \partial L_r + \partial C_d / \partial L_r \quad (4.35)$$

$$\partial^2 C_p / \partial h_r^2 = \partial^2 C_r / \partial h_r^2 + \partial^2 C_d / \partial h_r^2 \quad (4.36)$$

$$\partial^2 C_p / \partial L_r^2 = \partial^2 C_r / \partial L_r^2 + \partial^2 C_d / \partial L_r^2 \quad (4.37)$$

$$\partial^2 C_p / (\partial h_r \partial L_r) = \partial^2 C_r / (\partial h_r \partial L_r) + \partial^2 C_d / (\partial h_r \partial L_r) \quad (4.38)$$

$$\partial^2 C_p / (\partial L_r \partial h_r) = \partial^2 C_p / (\partial h_r \partial L_r) \quad (4.39)$$

4.8.2- Desenvolvimento do problema.

Igualando-se a zero as primeiras derivadas e desenvolvendo-se algebricamente, chega-se às seguintes expressões: A partir da equação (4.34):

$$h_r / (h_p - h_r) = (G_1 / G_3)^{n / (n+1)} \cdot L_r^{(m+n+2) / (n+1)}, \quad (4.40)$$

e de (4.35), deriva a equação mostrada a seguir:

$$\frac{G_1 (m+1) L_r^{(m-n+1) / n}}{n \cdot h_r^{1/n}} - \frac{G_3 (n+1)}{n (h_p - h_r)^{1/n} L_r^{(2n+1) / n}} - \frac{G_4}{L_r^2} = 0 \quad (4.41)$$

Combinando-se as equações (4.40) e (4.41), reduz-se o sistema a uma equação com apenas uma incógnita. Porém, permite apenas uma solução numérica, o que dificulta a apresentação de soluções genéricas para o problema de otimização do formato da parcela.

4.8.3- Método prático.

A partir da análise do sistema de equações apresentado anteriormente, identificou-se o termo G_4/L_r da expressão (4.41) como o elemento complicador do desenvolvimento algébrico do problema. Pode-se entretanto, na prática, desprezar este termo pelas seguintes razões:

a) A constante G_4 definida na expressão (4.21) é diretamente proporcional ao coeficiente linear (b_d) da função de regressão custo-diâmetro da derivação, que em geral é negativo;

b) O custo por unidade de comprimento em uma linha completa de tubos comerciais cresce mais para os diâmetros maiores, indicando uma função de natureza exponencial para a relação custo-diâmetro;

c) O pequeno número de opções de diâmetros próximos para as linhas de derivação justifica a adoção de uma função de regressão linear para as relações custo-diâmetro dessas tubulações da parcela e explica a ocorrência com frequência de coeficientes (b_d) negativos, como está mostrado na figura 4.2; e

d) Os custos de montagem da linha de derivação, incluído o custo de escavação das valas, são bastante significativos, justificando a sua inclusão no problema de otimização do formato da parcela. Estes custos, somando-se ao custo por unidade de comprimento das tubulações tende a anular o coeficiente linear (b_d) da função de custo da derivação assim como o termo G_4/L_r^2 da

equação (4.41), facilitando a solução geral do problema.

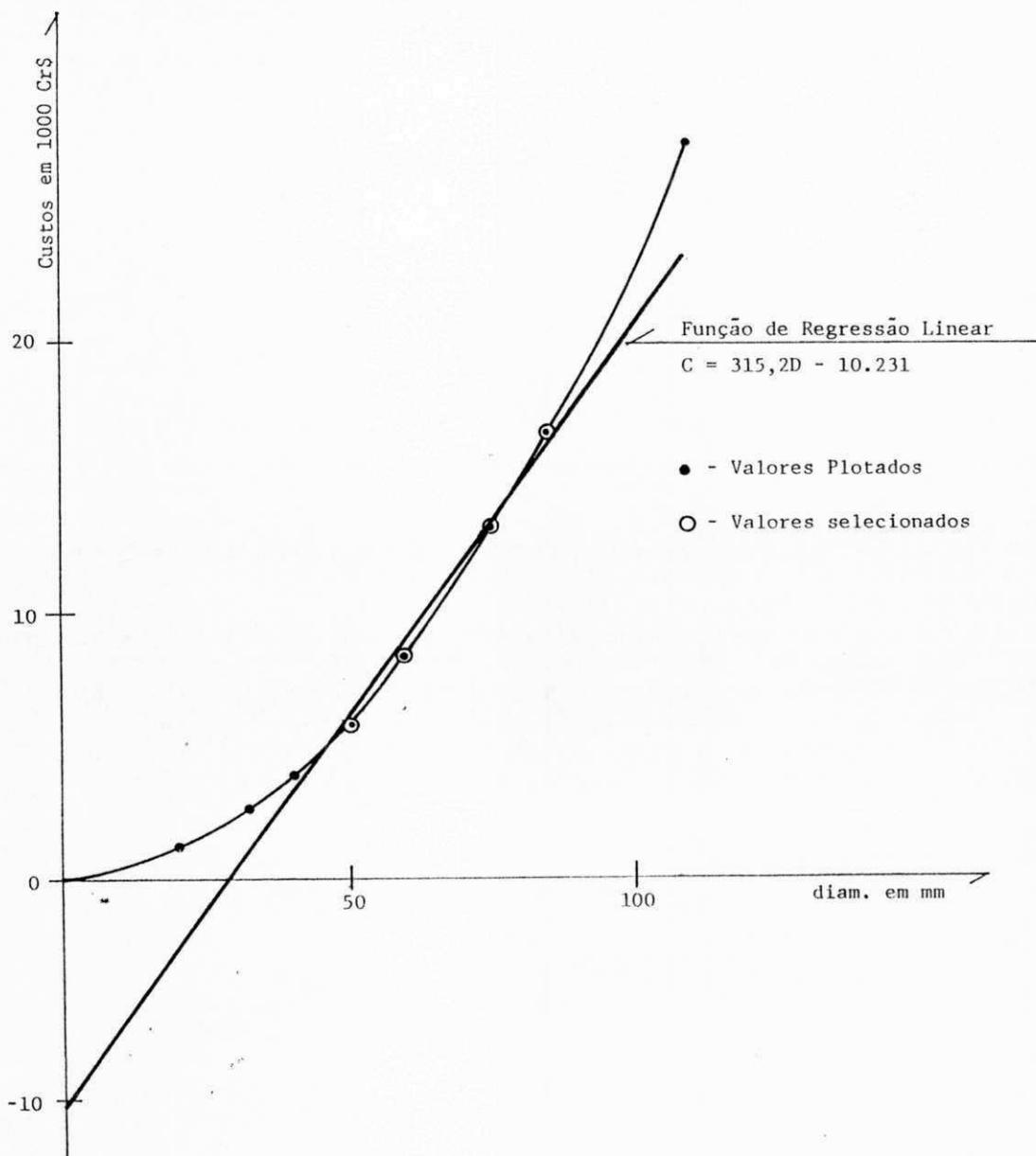


Figura 4.2 - Função custo-diâmetro de uma linha comercial de tubos para a irrigação por gotejamento.

Fazendo-se na equação (4.41) o termo $G_4/L_r^2 = 0$ e isolando-se o comprimento dos ramais (L_r), obtém-se:

$$L_r^{(m+n+2)} = (G_3/G_1)^n \cdot \left(\frac{n+1}{m+1}\right)^n \cdot \left(\frac{h_r}{h_p-h_r}\right) \quad (4.42)$$

Combinando-se esta expressão com a equação (4.40), e desenvolvendo-se algebricamente, encontra-se a seguinte relação ótima entre as perdas de carga das tubulações da parcela:

$$h_r/(h_p-h_r) = (n+1)/(m+1) \quad (4.43)$$

Substituindo-se esta relação na expressão (4.41) anterior, chega-se a uma expressão para a determinação do comprimento ótimo do ramal:

$$L_r = [(G_3/G_1)^n \cdot \left(\frac{n+1}{m+1}\right)^{n+1}]^{1/(m+n+2)} \quad (4.44)$$

Substituindo-se nesta expressão as constantes G_1 e G_3 , definidas anteriormente em (4.11) e (4.21), e desenvolvendo-se algebricamente, encontra-se finalmente uma expressão simplificada para o comprimento ótimo dos ramais:

$$L_r = M_1 \cdot [A_p^{(m+1)} \cdot E_r^{(n-m)}]^{1/(m+n+2)} \quad (4.45)$$

em que M_1 é uma constante característica do sistema e está definida na expressão seguinte:

$$M_1 = [(a_d/a_r)^n (k_d/k_r) (f_r/f_d)^{(m+1)} \left(\frac{n+1}{m+1}\right)^{n+1}]^{1/(m+n+2)} \quad (4.46)$$

4.9 - Formato ótimo de uma parcela associado com um determinado diâmetro para os ramais.

A adoção prévia de um diâmetro para os ramais - uma prática bastante frequente nos projetos dos sistemas de gotejamento - reduz a expressão de custo da parcela a uma função de apenas uma variável, facilitando o processo de minimização da função-objetivo.

Como já foi mostrado anteriormente, a expressão geral de custo da parcela (4.23) é uma função de duas variáveis independentes, h_r e L_r , isto é:

$$C_p = \frac{G_1 \cdot L_r^{(m+1)/1}}{h_r^{1/n}} + G_2 + \frac{G_3}{L_r^{(n+1)/n} \cdot (h_p - h_r)^{1/n}} + G_4/L_r \quad (4.23)$$

onde, lembrando: G_1 , G_2 , G_3 e G_4 são constantes características do sistema e estão definidas anteriormente nas expressões (4.11), (4.12), (4.21) e (4.22), respectivamente.

Com a adoção de um determinado diâmetro para os ramais cria-se uma nova relação entre estas variáveis a partir da expressão do cálculo da perda de carga nessas tubulações, o que permite a redução do sistema a uma equação com apenas uma única incógnita, como será visto a seguir:

A partir da fórmula geral da perda de carga (3.1), relaciona-se diretamente a perda de carga nos ramais (h_r) com o seu comprimento (L_r), isto é:

$$h_r = \frac{f_r \cdot k_r \cdot Q_r^m \cdot L_r}{D_r^n} , \quad (4.47)$$

em que f_r é o fator de repartição da vazão nos ramais e todas as outras variáveis têm os mesmos significados atribuídos anteriormente.

A vazão dos ramais (Q_r) é determinada pela equação (4.9), anteriormente exposta, mostrada a seguir:

$$Q_r = [(L_r/E_g) \cdot q] / f_r . \quad (4.9)$$

Combinando-se a equação (4.9) com a equação (4.47) e desenvolvendo-se convenientemente chega-se, finalmente, a uma equação simplificada para a perda de carga dos ramais (h_r), em função do comprimento L_r , na forma:

$$h_r = G_5 \cdot L_r^{(m+1)} , \quad (4.48)$$

onde:

$$G_5 = \frac{k_r \cdot q^m}{D_r^n \cdot E_g^m \cdot F_r^{(m+1)}} . \quad (4.49)$$

Substituindo-se a equação (4.48) da perda de carga nos ramais (h_r) na equação (4.23) do custo global da parcela (C_p), chega-se a uma função de uma única variável, o comprimento dos ramais (L_r), porém, com minimização apenas a partir de processos numéricos.

Para permitir o desenvolvimento de uma metodologia genérica e prática será apresentado, em seguida, um desenvolvimento analítico como uma solução com boa aproximação para o problema.

4.9.1- Método prático para a determinação do formato ótimo associado com um determinado diâmetro dos ramais.

Um problema de otimização do formato de uma parcela, associado com um diâmetro dos ramais (D_r) previamente adotado, depende apenas das condições de projeto da derivação. Isto porque o comprimento total dos ramais pode ser estimado, com precisão, como na expressão (4.5), a partir da relação entre a área da parcela (A_p) e os espaçamentos entre os ramais (E_r), não dependendo, portanto, do formato da parcela.

As considerações práticas levantadas anteriormente para a solução global do problema de otimização do projeto da parcela podem ser estendidas para esta situação, facilitando um desenvolvimento literal e resultando em uma solução analítica geral.

Na expressão (4.20) do custo da derivação, fazendo-se o termo $G_4/L_r = 0$ e substituído-se nesta a perda de carga nos ramais (h_r) pela expressão (4.48), encontra-se:

$$C_d = \frac{G_3}{L_r^{(n+1)/n} \cdot (h_p - G_5 \cdot L_r^{m+1})^{1/n}} \quad (4.50)$$

Minimizando-se esta função, chega-se a seguinte relação para o comprimento ótimo dos ramais da parcela:

$$L_r = \left[\frac{(n+1) \cdot h_p}{G_5 \cdot (m+n+2)} \right]^{1/(m+1)} \quad (4.51)$$

Substituindo-se nesta expressão a constante G_5 , como em (4.49), e simplificando-se, chega-se finalmente a uma expressão sintética para o cálculo do comprimento ótimo dos ramais, estando este associado com um determinado diâmetro adotado inicialmente para os ramais (D_r):

$$L_r = M_2 \cdot [D_r^n \cdot h_p / (q/E_g)^m]^{1/(m+1)} \quad (4.52)$$

onde M_2 é uma constante característica da parcela, dada por:

$$M_2 = f_r \cdot \left[\frac{n+1}{(m+n+2) \cdot k_r} \right]^{1/(m+1)} \quad (4.53)$$

4.10 - Formato ótimo de uma parcela associado com um determinado diâmetro para a derivação.

Este problema é análogo ao anterior, diferindo apenas quanto ao cálculo da perda de carga dos ramais (h_r), que neste caso será expresso em função do diâmetro da derivação (D_d).

A perda de carga nos ramais (h_r) relaciona-se com a perda de carga na derivação (h_d) a partir da perda de carga total da parcela (h_p):

$$h_r = h_p - h_d \quad , \quad (4.54)$$

sendo a perda de carga na derivação (h_d) calculada a partir da fórmula geral da perda de carga (3.1), isto é:

$$h_d = \frac{f_d \cdot k_d \cdot Q_d^m \cdot L_d}{D_d^n} \quad , \quad (4.55)$$

A vazão na derivação (Q_d) é determinada a partir da equação (4.17) mostrada a seguir:

$$Q_d = [A_p / (E_r \cdot E_g) / f_d] \cdot q \quad , \quad (4.17)$$

Os comprimentos da derivação (L_d) e dos ramais (L_r) são interrelacionados através da área da parcela (A_p);

$$L_d = A_p / L_r \quad . \quad (4.56)$$

Substituindo-se esta equação (4.56), assim como a equação (4.17) do cálculo da vazão na derivação (Q_d), na fórmula (4.55) da perda de carga na derivação (h_d), e o resultado disto na relação (4.54), encontra-se uma expressão simplificada para a perda de carga nos ramais (h_r), como uma função apenas do comprimento dos ramais (L_r):

$$h_r = h_p - G_6 / L_r \quad , \quad (4.57)$$

em que:

$$G_6 = \frac{k_d \cdot q^m \cdot A_p^{(m+1)}}{(E_r \cdot E_g)^m \cdot f_d^{(m+1)} \cdot D_d^n} \quad . \quad (4.58)$$

Substituindo-se esta expressão da perda de carga nos ramais (h_r) (4.57), na expressão geral do custo da parcela (4.23), fica ela reduzida a uma função de uma única variável, simplificando o processo de minimização da função-objetivo do problema, porém, permitindo apenas uma solução a partir de métodos numéricos.

4.11 - Relação ótima entre as perdas de carga dos ramais e da derivação.

A relação ótima global entre as perdas de carga das tubulações de uma parcela está associada ao formato ótimo sem restrições, sendo determinada pela expressão (4.43), seguinte:

$$h_r / (h_p - h_r) = (n+1) / (m+1) \quad . \quad (4.43)$$

Porém, nem sempre esta relação pode ser adotada, como nos casos em que as dimensões do terreno limitam o formato da parcela, determinando os comprimentos das tubulações. Nestes casos, a equação (4.40) pode ser empregada para a determinação da relação ótima entre as perdas de carga das tubulações a partir de

um comprimento de ramal (L_r) previamente adotado. A condição de custo mínimo é assegurada pela análise da segunda derivada parcial da função-objetivo em relação a h_r , que assume valores sempre positivos dentro do domínio da função.

Substituindo-se na equação (4.40) as constantes G_1 e G_3 , definidas nas expressões (4.11) e (4.21), respectivamente, e desenvolvendo-se algebricamente, chega-se a uma expressão simplificada para a relação ótima entre as perdas de carga das tubulações da parcela, sendo definida pelo fator "r".

$$h_r / (h_p - h_r) = r \quad , \quad (4.59)$$

onde:

$$r = k \cdot \left[\frac{L_r^{(m+n+2)}}{A_p^{(m+1)} \cdot E_r^{(n-m)}} \right]^{1/(n+1)} \quad , \quad e \quad (4.60)$$

$$k = \left[(k_r/k_d) \cdot (a_r/a_d)^n \cdot (f_d/f_r)^{(m+1)} \right]^{1/(n+1)} \quad . \quad (4.61)$$

Fazendo-se na equação (4.60):

$$A_p = t \cdot L_r^2 \quad , \quad (4.62)$$

com $t = L_d / L_r \quad , \quad (4.63)$

chega-se finalmente a uma expressão simplificada para o fator "r":

$$r = k \cdot \left[\frac{(L_r / E_r)^{(n-m)}}{t^{(m+1)}} \right]^{1/(n+1)}, \quad (4.64)$$

e as condições ótimas para os ramais e a derivação são:

$$h_r = [r/(r+1)] \cdot h_p \quad (4.65)$$

e
$$h_d = h_p - h_r \quad (4.66)$$

ou
$$h_d = h_p / (r+1). \quad (4.67)$$

4.12 - Abacos para a aplicação da metodologia.

O processo de minimização do custo da parcela resultou em expressões genéricas e sintéticas, permitindo a elaboração de abacos que facilitam bastante a aplicação da metodologia.

A construção dos abacos baseou-se nas seguintes considerações práticas:

a) Uma combinação de tubos de polietileno nos ramais com tubos de PVC de baixa pressão na derivação, de acordo com a tabela 4.1;

b) Uma função de regressão linear para a relação custo-diâmetro, conforme a tabela 4.1;

c) Os expoentes da fórmula da perda de carga admitidos foram: $m = 1.75$ e $n = 4.75$, como nas fórmulas de Blasius e

Flamant, que são fórmulas indicadas para o dimensionamento de condutos hidráulicamente lisos.

d) Considerou-se a relação $(k_r/k_a) = 1$, indicando uma semelhança entre os fatores de correção associados com a rugosidade, a distribuição em percurso da vazão nas tubulações e as perdas localizadas nos ramais e na derivação. Este procedimento é justificado pelas seguintes razões: o polietileno e o PVC são tubos de materiais plásticos que apresentam um acabamento interno liso muito semelhante; essas tubulações apresentam-se geralmente com um grande número de saídas, conduzindo a fatores de correção da perda de carga, como o de Christiansen (1942), bastante próximos; e foram desprezados os efeitos das perdas localizadas nas tubulações.

e) Um "layout" e "T", com $f_d=1$ e $f_r=2$;

Tabela 4.1 - Dados de uma linha de tubos de irrigação por gotejamento.

Tipo de Material	Diâmetro (mm)		Custo Cr\$/m	Função de Regressão		Coef. de Correlação
	ext.	int.		coef.ang. (a)	coef.lin. (b)	
Poliétileno (ramal)	12.0	9.4	108,00	16,245	-40,522	0,992
	16.0	13.4	186,00			
	20.0	17,0	231,00			
PVC PN-40 (deriv.)	50.5	48.1	520,30	21,243	-516,111	0,999
	75.5	72.5	995,10			
	101.6	97.6	1.571,40			

Obs: Os preços dos tubos, ao nível de atacado, foram coletados em outubro de 1991, na cidade de Campina Grande-PB, Brasil.

4.12.1- Abaco para a determinação do comprimento ótimo de um ramal de uma parcela de gotejamento com "layout" em "T".

A figura 4.3 facilita a determinação da solução ótima global para o projeto de uma parcela de gotejamento, a partir da determinação do comprimento ótimo dos ramais (L_r) associado com um "layout" em T,

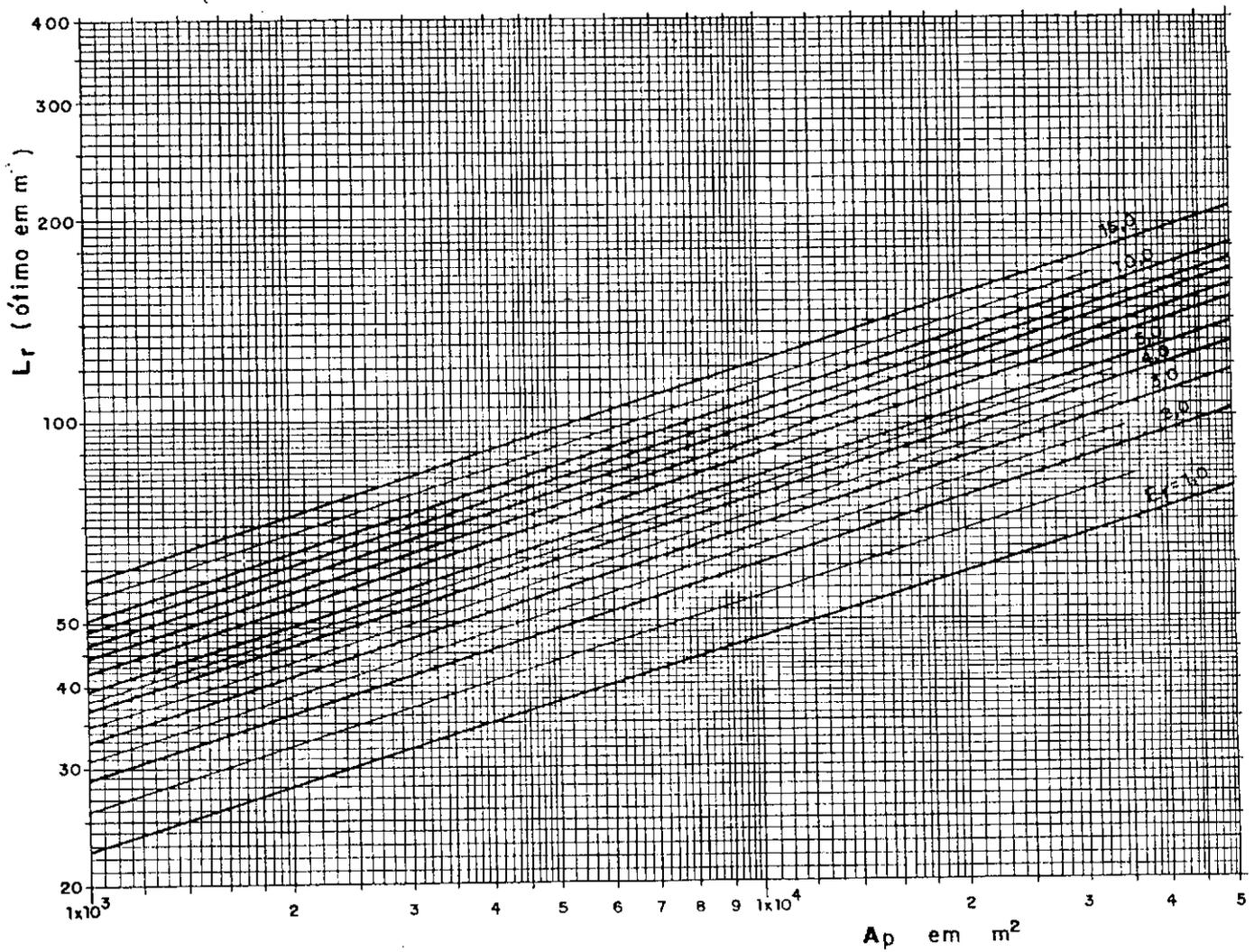


Figura 4.3 - Comprimento ótimo de um ramal de uma parcela de gotejamento com "layout" em "T".

Para outras situações de "layout", deve-se multiplicar o valor de L_r da figura 4.3 por um fator de correção determinado a partir da expressão (4.45), sendo dado por:

$$L_r = L_r' \cdot \left[\frac{f_r}{2 \cdot f_d} \right]^{(m+1)/(m+n+2)}, \quad (4.68)$$

em que:

L_r = Comprimento ótimo corrigido em "m";

L_r' = Valor obtido da figura 4.3 em "m";

f_r = Fator de "layout" dos ramais;

f_d = Fator de "layout" da derivação;

m e n = Expoentes da fórmula da perda de carga.

a) Para um "layout" em "H", onde $f_d=2$ e $f_r=2$;

$$L_r(H) = 0,7991 \cdot L_r'. \quad (4.69)$$

b) Para um "layout" em "C", onde $f_d=2$ e $f_r=1$;

$$L_r(C) = 0,6386 \cdot L_r'. \quad (4.70)$$

c) Para um "layout" em "L", onde $f_d=1$ e $f_r=1$;

$$L_r(L) = 0,7991 \cdot L_r'. \quad (4.71)$$

4.12.2- Abaco para a determinação do comprimento ótimo de um ramal de uma parcela de gotejamento com "layout" em "T" e diâmetro interno de 9,4 mm.

Para exemplificar a aplicação da metodologia, foi construído o ábaco da figura 4.4, que permite a determinação do comprimento ótimo dos ramais associado com um determinado diâmetro da série apresentada na tabela 4.1 ($D_r = 9,4$ mm).

Os valores derivados da Figura 4.4 podem ser estendidos para outras situações diferentes, a partir do seguinte fator de correção determinado com o auxílio da expressão (4.52):

$$L_r = 0,0104 \cdot f_r \cdot D_r^{[n/(m+1)]} \cdot L_r' , \quad (4.72)$$

em que:

L_r = Comprimento ótimo corrigido em "m";

L_r' = Valor obtido da figura 4.4 em "m";

f_r = Fator de "layout" dos ramais;

D_r = Diâmetro dos ramais em "mm";

m e n = Expoentes da fórmula da perda de carga.

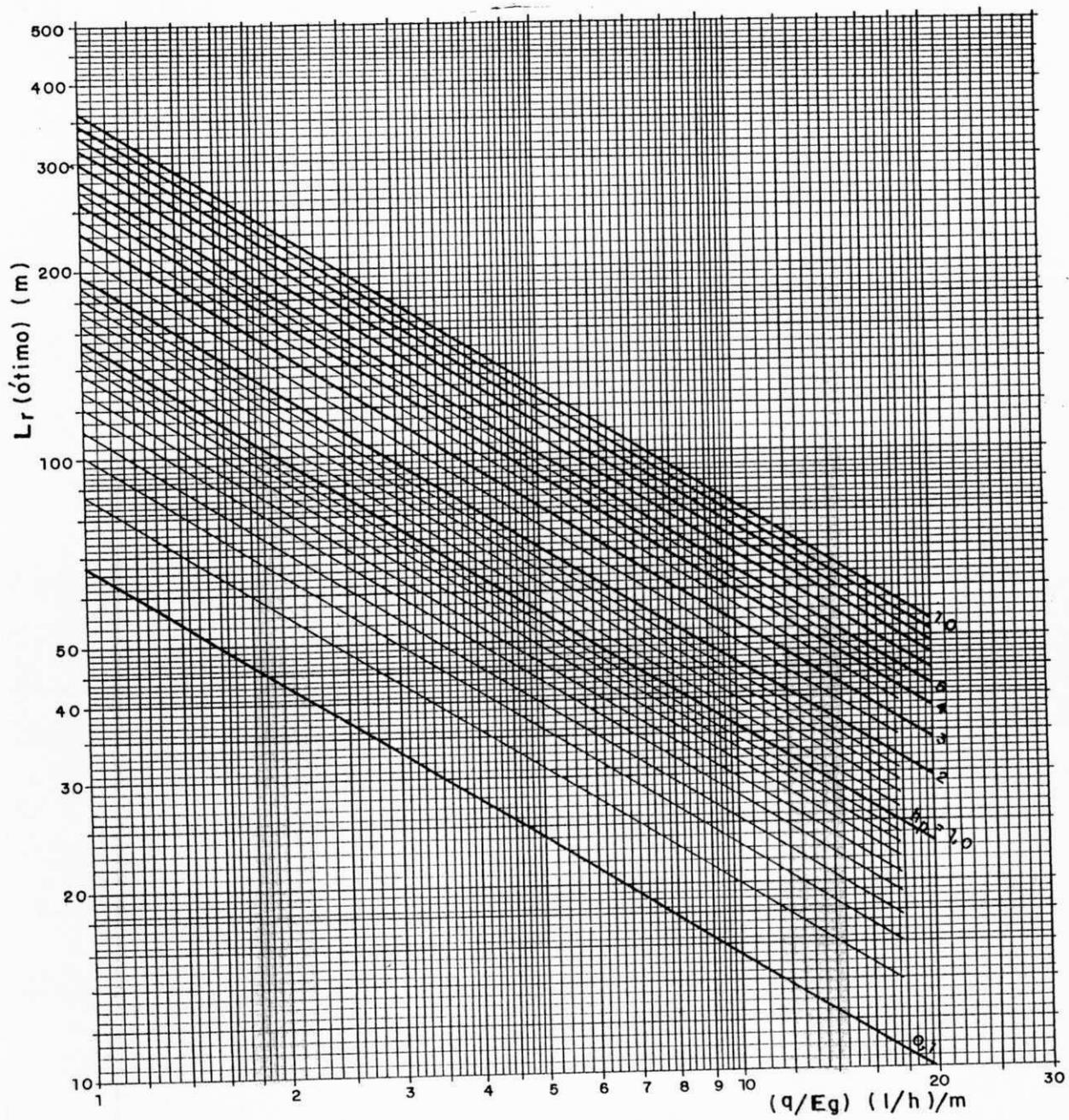


Figura 4.4 - Comprimento ótimo de um ramal de uma parcela de gotejamento com "layout" em "T" e diâmetro interno de 9,4 mm.

4.12.3- Abaco para a determinação da relação ótima entre as perdas de carga das tubulações de uma parcela de gotejamento com layout em "T".

A figura (4.5) mostra a relação ótima entre as perdas de carga das tubulações de uma parcela de gotejamento com "layout" em T.

Para outras situações de "layout" deve-se corrigir os valores obtidos na figura (4.5) pela expressão seguinte derivada da equação (4.52):

$$r = r' \cdot [2 \cdot f_d / f_r]^{(m+1)/(n+1)} , \quad (4.73)$$

em que:

r = Relação ótima entre as perdas de carga dos ramais e da derivação para o formato desejado;

r' = Valor obtido da figura 4.5 para o formato em T;

f_d = Fator de layout da derivação;

f_r = Fator de layout do ramal;

m e n = Expoentes da fórmula da perda de carga.

a) Para um layout em "H", onde $f_d=2$ e $f_r=2$;

$$r(H) = 1,3931 \cdot r' . \quad (4.74)$$

b) Para um layout em "C", onde $f_d=2$ e $f_r=1$;

$$r(C) = 1,9406 \cdot r' . \quad (4.75)$$

c) Para um layout em "L", onde $f_d=1$ e $f_r=1$;

$$r(L) = r' . \quad (4.76)$$

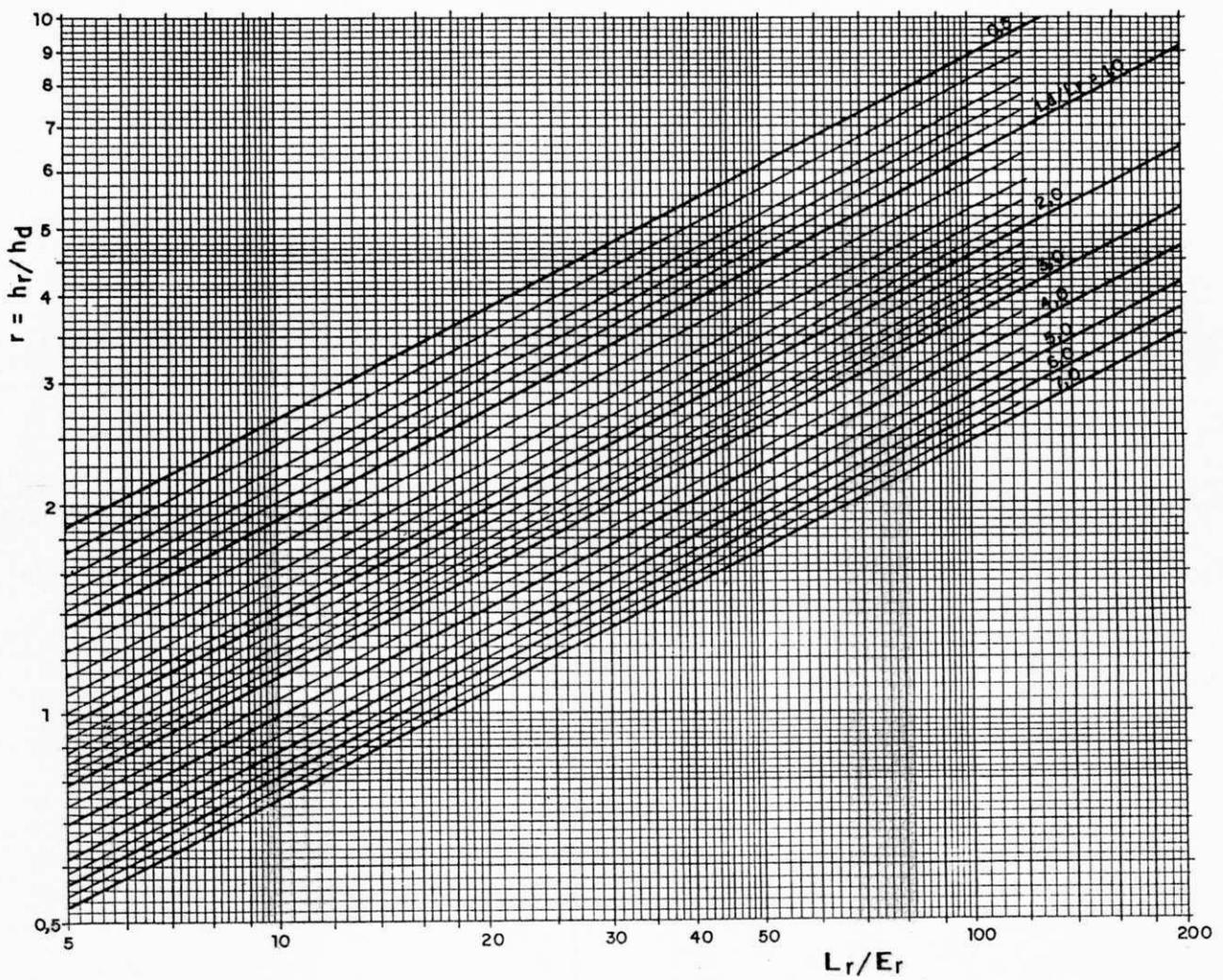


Figura 4.5 - Relação ótima entre as perdas de carga das tubulações de uma parcela de gotejamento com layout em "T".

4.13 - Otimização do ponto de entrega da água nas tubulações de uma parcela de gotejamento.

Em uma parcela de gotejamento os efeitos combinados das perdas de carga com o gradiente topográfico do terreno alteram a pressão ao longo das tubulações. A distribuição da pressão na rede pode ser representada por uma superfície piezométrica semelhante a uma grande tenda que cobre todo o terreno.

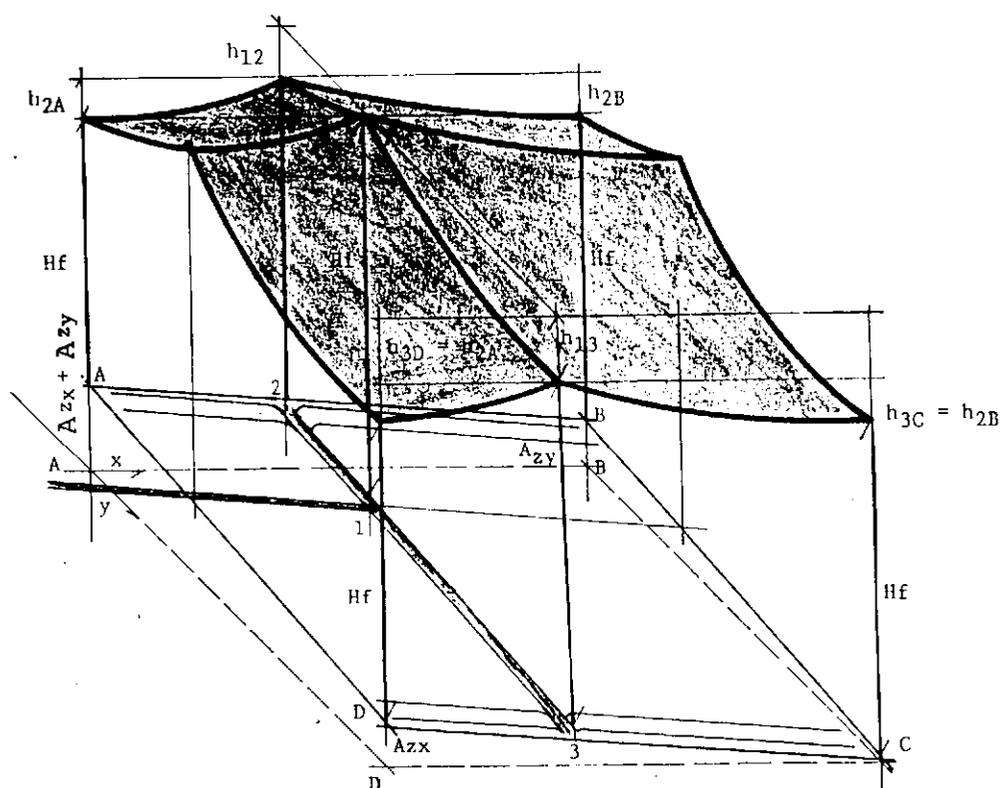


Figura 4.6 - Distribuição da pressão em uma parcela inclinada com pontos de entrega da água otimizados.

O projeto ótimo de uma parcela plana horizontal resulta na repartição das tubulações ao meio (Lopez, 1986). Em uma parcela inclinada, os desníveis topográficos podem ser compensados por deslocamentos convenientes, para cima, dos pontos de entrega da água nas tubulações. Este fato cria um elemento adicional no processo de otimização do projeto de uma parcela. Assim, torna-se necessário incorporar um novo fator na otimização - o ponto de entrega da água nas tubulações - aos já analisados anteriormente para uma parcela em nível.

A metodologia tradicional aborda superficialmente o problema da otimização do projeto de uma parcela inclinada de gotejamento. Em relação à distribuição ótima da perda de carga nas tubulações de uma parcela de gotejamento, Olitta (1984) e Lopez-Sanches (1989) apenas alertam que as diferenças de elevação do terreno devem acarretar um aumento ou diminuição na faixa de variação da pressão admissível, conforme a metodologia de Keller e Karmeli (1975), citada anteriormente.

Com respeito ao dimensionamento das linhas inclinadas de irrigação alimentadas por um ponto intermediário, a prática usual recorre a métodos iterativos, gráficos e analíticos, como os demonstrados por Lopez (1986), para a determinação do ponto de entrega da água que produza a mesma diferença de pressão nas duas direções do escoamento. Esses métodos requerem um dimensionamento prévio para as tubulações, que não está necessariamente associado com a solução ótima do problema.

Propõe-se neste trabalho, uma solução bastante simplificada e eficaz para o problema do projeto ótimo de uma parcela

inclinada. A metodologia baseia-se no projeto ótimo de uma parcela horizontal e os efeitos dos desniveis topográficos do terreno são compensados por deslocamentos convenientes dos pontos de entrega da água nas tubulações.

Para delimitar o emprego da metodologia proposta, com o estabelecimento de limites de declividades que justificam a otimização do ponto de entrega nas tubulações inclinadas, serão feitas inicialmente duas análises comparativas com respeito a uma tubulação horizontal com entrega central. A primeira refere-se a uma tubulação inclinadas com entrega central e a segunda a uma tubulação inclinada com entrega na extremidade superior.

4.13.1 - Relação entre os diâmetros de uma tubulação inclinada e uma horizontal com pontos de entregas da água central.

a) O diâmetro teórico da tubulação horizontal.

Em uma tubulação horizontal, como na figura 4.7, a variação da pressão (V_p), dada pela diferença entre as cargas de pressão do ponto de alimentação (H_i) e da extremidade da tubulação (H_f), decorre unicamente da perda de carga do escoamento (h), isto é:

$$V_p = H_i - H_f \quad e \quad (4.77)$$

$$V_p = h \quad . \quad (4.78)$$

A perda de carga (h) em cada parte da tubulação pode ser determinada a partir da fórmula (3.1) geral da perda, isto é:

$$h = \frac{K \cdot Q^m}{D^n} \cdot \frac{L}{2}, \quad (4.79)$$

onde: $L/2$ é o comprimento de cálculo da tubulação, dado que o ponto de entrega da água é central.

Como anteriormente, K , m e n são coeficientes característicos das fórmulas práticas aplicadas no cálculo da perda de carga nas tubulações em geral.

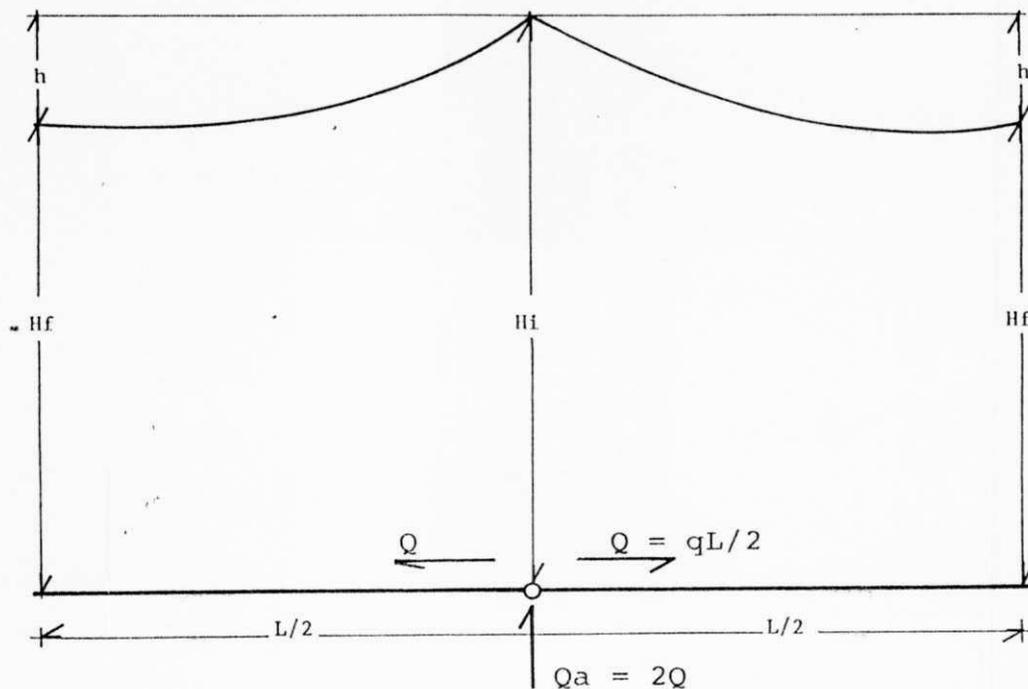


Figura 4.7 - Tubulação horizontal com entrega no centro.

A vazão de cálculo (Q) será a metade da vazão de alimentação (Q_a), podendo ser determinada a partir da vazão distribuída por unidade de comprimento da tubulação (q), ou:

$$Q = q \cdot L/2 \quad , \quad (4.76)$$

onde:

Q = Vazão de cálculo da tubulação;

Q_a = Vazão de alimentação da tubulação;

q = Vazão distribuída por unidade de comprimento;

Substituindo-se na fórmula da perda de carga (4.79) os termos da perda de carga (h) e o da vazão de cálculo (Q) pelas suas respectivas expressões, (4.78) e (4.80), o diâmetro da tubulação horizontal pode ser explicitado na forma:

$$D = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot L^{(m+1)}}{2^{(m+1)} \cdot V_p} \right]^{1/n} \quad (4.81)$$

b) O diâmetro representativo da tubulação inclinada com entrega no centro.

Uma tubulação inclinada com um ponto de entrega intermediário, conforme a figura 4.8, apresenta-se com um trecho em aclave e um outro em declive. Uma condição ideal de projeto deve conduzir a uma mesma variação de pressão nos dois trechos, resul-

aclive (D_a) e declive (D_d):

$$\bar{D} = (D_a + D_d)/2 \quad . \quad (4.86)$$

Substituindo-se na fórmula anterior os diâmetros D_a e D_d por suas expressões (4.84) e (4.85) respectivamente, e pondo-se em evidência os termos comuns, obtém-se:

$$\bar{D} = (K/2)q^m(L/2)^{(m+1)} \left[\frac{1}{(V_p - s.L/2)^{1/n}} + \frac{1}{(V_p + s.L/2)^{1/n}} \right] \quad . \quad (4.87)$$

c) Relação entre o diâmetro médio da tubulação inclinada (\bar{D}) e o diâmetro da tubulação horizontal (D).

Para efeito de comparação, pode-se relacionar o diâmetro médio da tubulação inclinada (\bar{D}) com o diâmetro da tubulação horizontal (D). Dividindo-se a equação (4.87) do diâmetro médio pelo diâmetro da tubulação horizontal, calculado segundo a equação (4.81), e simplificando-se, chega-se à seguinte relação:

$$\bar{D}/D = 1/(1 - u)^{1/n} + 1/(1 + u)^{1/n} \quad , \quad (4.88)$$

onde, $u = (s.L/2)/V_p \quad . \quad (4.89)$

O termo "u" representa a relação entre o desnível médio da tubulação e a variação da pressão no trecho.

tando em diferentes perdas de carga e conseqüentemente em diâmetros distintos.

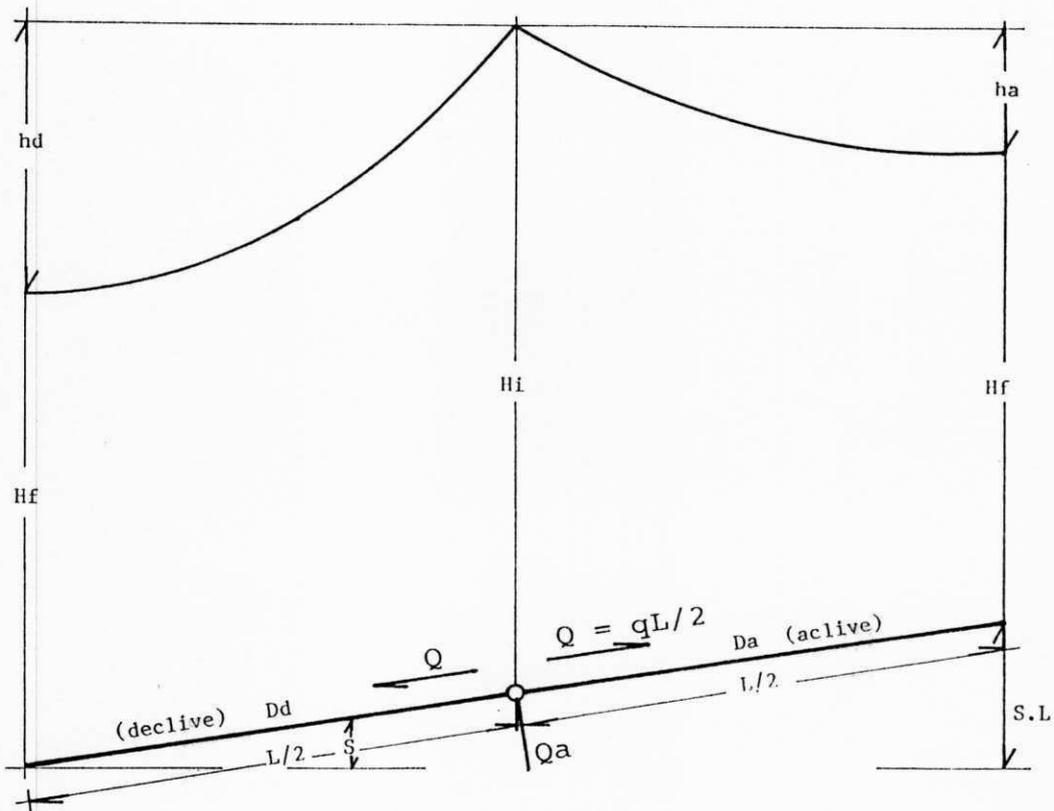


Figura 4.8 - Tubulação inclinada com entrega no centro.

Para uma mesma variação de pressão, o desnível topográfico reduz a perda de carga de cálculo (h_a) do trecho em aclive e aumenta perda de carga no trecho em declive (h_d), isto é:

$$h_a = V_p - s.L/2 \quad (4.82)$$

$$h_d = V_p + s.L/2 \quad (4.83)$$

Sendo:

V_p = variação de pressão na tubulação;

s = Declividade da tubulação;

L = Comprimento total da tubulação.

Por analogia com o desenvolvimento anterior, substituindo-se na expressão (4.81) o termo da variação da pressão (V_p) pelas expressões (4.82) e (4.83), encontram-se os diâmetros dos trechos em aclive (D_a) e declive (D_d), sendo estes, respectivamente:

$$D_a = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot (L/2)^{(m+1)}}{V_p - s.L/2} \right]^{1/n} \quad e \quad (4.84)$$

$$D_d = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot (L/2)^{(m+1)}}{V_p + s.L/2} \right]^{1/n} \quad (4.85)$$

Para facilitar a análise comparativa, definiu-se como diâmetro representativo da tubulação inclinada o diâmetro médio (\bar{D}), dado pela média aritmética dos diâmetros dos trechos em

4.13.2 - Relação entre o diâmetro de uma tubulação inclinada com entrega na extremidade superior e o diâmetro de uma tubulação horizontal com entrega no centro

A experiência mostra que o ponto de entrega ótimo de uma tubulação com forte declividade localiza-se na sua extremidade superior. A figura 4.9 mostra uma tubulação em declive com ponto de entrega na extremidade superior. Em uma situação de projeto como esta, o desnível topográfico amplia a perda de carga permitível na tubulação para uma variação de pressão (V_p) admitida. Este fato, nos casos de tubulações com forte declividade, pode conduzir a um menor diâmetro e, conseqüentemente, a um menor custo para a tubulação.

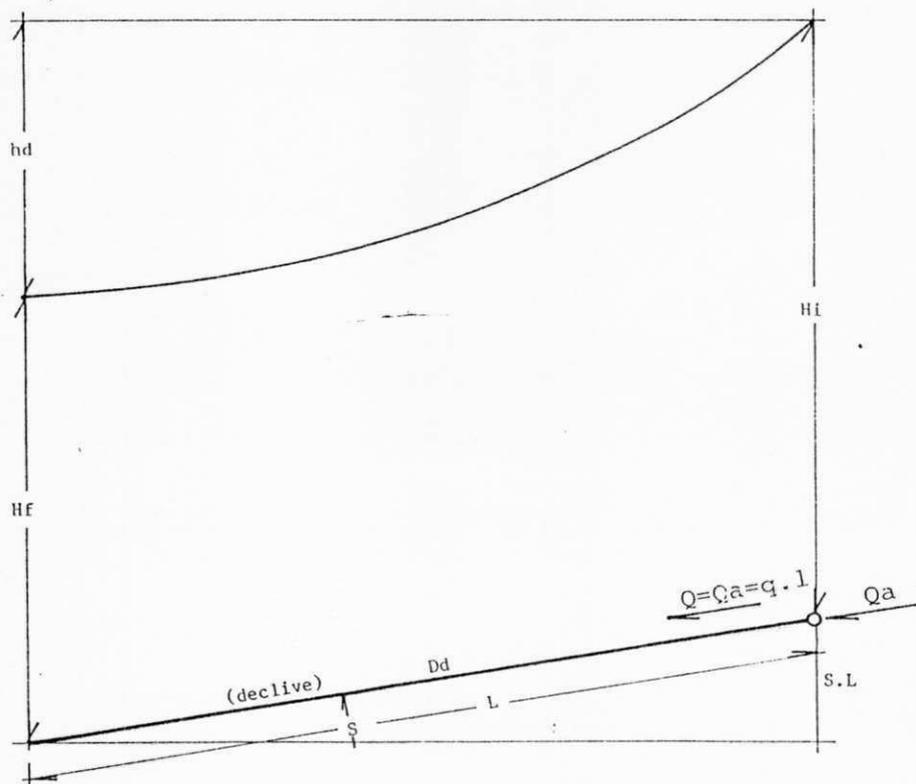


Figura 4.9 - Tubulação inclinada com entrega na extremidade superior

Na forma semelhante a equação (4.83), para uma tubulação inclinada, a perda de carga (h) é dada pela equação:

$$h = V_p + s.L \quad . \quad (4.90)$$

A variação da pressão na tubulação (V_p) é decorrente da diferença entre as pressões na extremidade superior (H_i) e inferior (H_f) da tubulação:

$$V_p = H_i - H_f \quad . \quad (4.91)$$

O diâmetro da tubulação inclinada (D_e) com entrega na extremidade superior pode ser determinado, como nos desenvolvimentos anteriores, a partir da fórmula geral da perda de carga, isto é:

$$D_e = \left[\frac{K.Q^m.L}{h} \right]^{1/n} \quad . \quad (4.92)$$

A vazão de cálculo (Q) é dada por:

$$Q = q.L \quad . \quad (4.93)$$

Substituindo-se na relação da perda de carga (4.92) os termos representativos da vazão (Q) e da perda de carga (h) pelas suas respectivas expressões, (4.90) e (4.93), chega-se à seguinte expressão para o diâmetro da tubulação inclinada (D_e) com entrega

na extremidade superior:

$$D_e = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot L^{(m+1)}}{V_p + s \cdot L} \right]^{1/n} . \quad (4.94)$$

Comparando-se este diâmetro com o de uma tubulação horizontal com entrega no centro e simplificando-se, encontra-se:

$$D_e/D = [2^{(m+1)} / (1 + 2u)]^{1/n} . \quad (4.95)$$

A variação desta relação (D_e/D) com o fator de declividade "u" é mostrada na figura 4.10. A figura 10 mostra também a relação entre (\bar{D}/D) e o termo "u" para o ponto de entrega central.

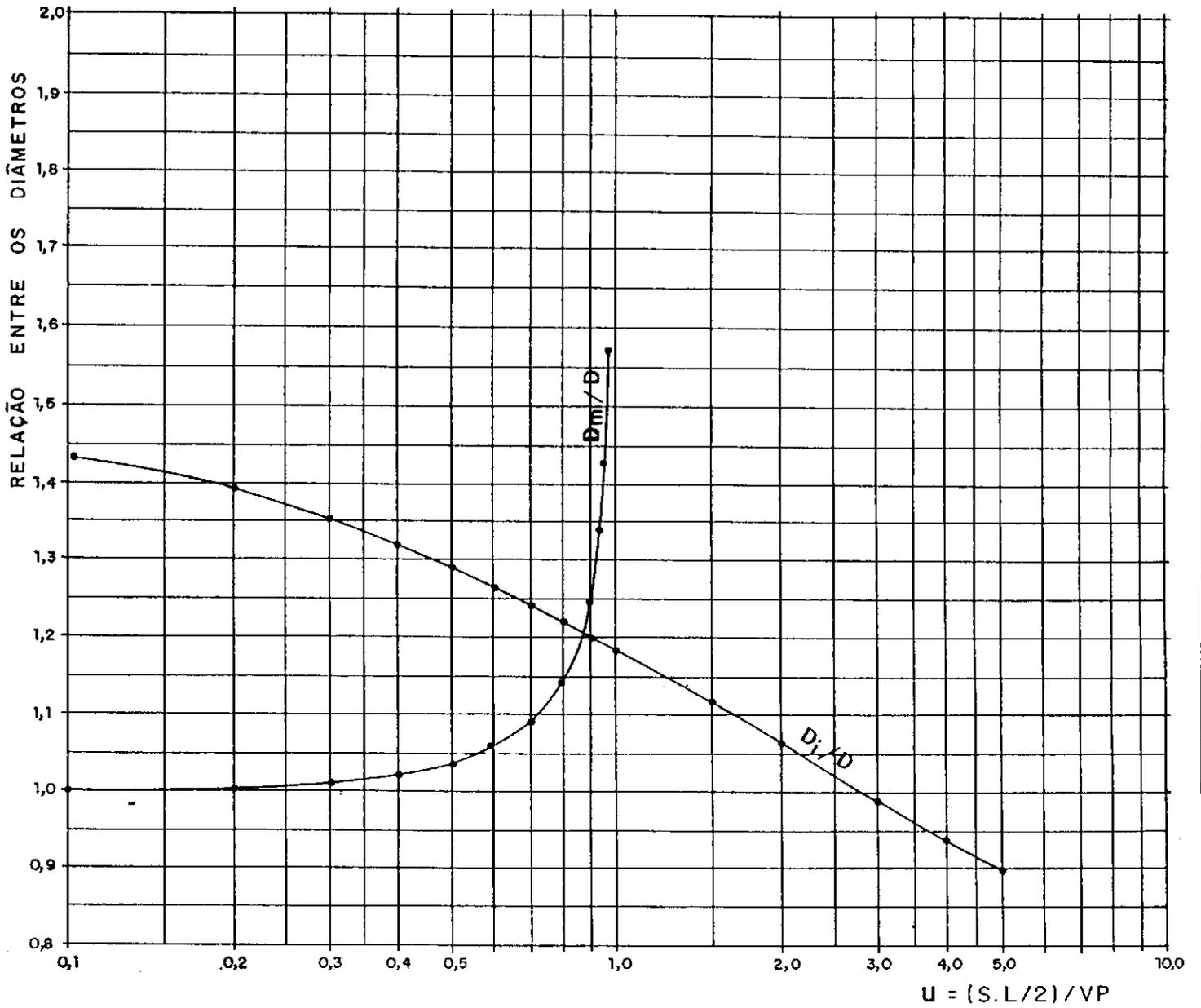


Figura 4.10 - Relações entre os diâmetro de uma tubulação inclinada e uma horizontal.

A figura 4.10 mostra o comportamento das relações \bar{D}/D e D_e/D com respeito ao fator "u". Uma análise destas funções identifica limites para o fator de declividade "u" que justificam o deslocamento do ponto de entrega da água da região central da tubulação, assim como viabiliza a adoção do ponto de entrega na extremidade superior da tubulação.

A partir dos resultados indicados pela figura 4.10 pode-se concluir que:

a) Uma linha de irrigação, ramal ou derivação, inclinada com alimentação central apresenta um diâmetro médio (\bar{D}) sempre superior ao de uma linha horizontal (D). Porém, para pequenas declividades, este fato é praticamente insignificante.

b) O diâmetro de cálculo das linhas de gotejamento com pequenas inclinações com alimentação na extremidade superior apresenta-se bem superior ao da tubulação horizontal de referência, reduzindo-se significativamente com o crescimento da declividade, indicando esta alternativa de projeto para as tubulações com declividades fortes.

A partir desta análise, pode-se concluir que uma declividade média deve conduzir a uma condição intermediária de projeto, quanto ao ponto de entrega em uma linha inclinada de gotejamento. Isto é, que um deslocamento conveniente do ponto de entrega da água em uma tubulação inclinada deve situar o diâmetro médio da tubulação próximo ao diâmetro de referência da tubulação horizontal.

Face ao exposto, de acordo com a figura 4.10, pode-se admitir:

valores de "u"	Recomendações
$u < 0,4$	Ponto de entrega central.
$0,4 < u < 2,5$	Otimizar ponto de entrega.
$u > 2,5$	Ponto de entrega na extremidade superior.

4.13.3 - Método prático para a determinação do ponto de entrega ótimo em uma linha de irrigação inclinada

A condição de entrega da água em um ponto intermediário divide uma linha de gotejamento inclinada em um trecho em aclave e um outro em declive. O desnível topográfico compensa o efeito da perda de carga no trecho em declive e agrava no trecho em aclave. Este fato, como já foi mostrado anteriormente para uma tubulação com alimentação em um ponto central, resulta em um diâmetro para o trecho em aclave maior do que o do trecho em declive. Porém, esta solução é recomendada apenas para as tubulações com pequenas declividades ($u < 0,4$).

Uma alternativa para as situações de projeto com declividades maiores consiste na compensação dos efeitos do desnível topográfico pela redução do comprimento do trecho em aclave, deslocando para cima o ponto de alimentação da tubulação, reduzindo o diâmetro do trecho em aclave e aumentando o do trecho em declive, podendo conduzir a um diâmetro único para a tubulação.

A identificação do ponto de entrega em uma linha de irrigação inclinada com diâmetro único requer uma solução iterativa e complexa. Para evitar um processo repetitivo e tedioso propõe-se neste trabalho uma solução simples e eficaz para este problema. Esta proposta consiste na localização do ponto de entrega da água que resulte em um diâmetro para a tubulação inclinada idêntico ao determinado para uma tubulação horizontal com entrega central.

a) Identificação do ponto de entrega de uma tubulação inclinada associado a uma tubulação horizontal semelhante.

A metodologia baseia-se na determinação dos comprimentos dos trechos em aclave e declive, a partir das relações de igualdade entre os diâmetros calculados para a tubulação inclinada e a horizontal.

Por analogia com o desenvolvimento anterior, como na expressão (4.80), o diâmetro do trecho em aclave (D_a) será dado por:

$$D_a = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot X_a^{(m+1)}}{V_p - s \cdot X_a} \right]^{1/n}, \quad (4.96)$$

onde X_a , é o comprimento do trecho em aclave,

Igualando-se esta expressão com a empregada no cálculo do diâmetro de uma tubulação horizontal com entrega central (4.81), obtém-se:

$$\left[\frac{K \cdot q^m \cdot X_a^{(m+1)}}{V_p - s \cdot X_a} \right]^{1/n} = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot (L/2)^{(m+1)}}{V_p} \right]^{1/n}$$

Colocando-se em evidência os termos comuns, e desenvolvendo-se algebricamente esta relação, encontra-se uma equação com uma única incógnita, X_a/L , a qual pode ser resolvida com o auxílio de métodos numéricos iterativos, isto é:

$$2^{(m+1)} \cdot (X_a/L)^{(m+1)} + 2u \cdot (X_a/L) - 1 = 0 \quad , \quad (4.97)$$

sendo "u" o fator de declividade da tubulação definido pela equação (4.87),

$$u = (s \cdot L/2)/V_p \quad . \quad (4.87)$$

O diâmetro do trecho em declive (D_d), por analogia com o desenvolvimento anterior, será:

$$D_d = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot X_d^{(m+1)}}{V_p + s \cdot X_d} \right]^{1/n} \quad , \quad (4.98)$$

em que X_d é o comprimento do trecho em declive.

Como no desenvolvimento anterior, a comparação deste diâmetro com o de uma tubulação horizontal facilita a determinação do comprimento do trecho em declive, X_d , a partir da seguinte equação:

$$2^{(m+1)} \cdot (X_d/L)^{(m+1)} - 2u \cdot (X_d/L) - 1 = 0 \quad . \quad (4.99)$$

A solução numérica das equações (4.98) e (4.95) são mostradas na Tabela 4.5, nas colunas 2 e 3, encontrando-se os valores das relações X_a/L e X_d/L associados ao fator de declividade "u".

Uma análise criteriosa desta tabela, de acordo com os valores da coluna 4, identifica para o trecho em declive um comprimento ligeiramente superior ao complemento do trecho em aclive, indicando um diâmetro um pouco menor para o trecho em declive ou um pequeno deslocamento, para cima, do ponto entrega da tubulação, o que conduziria a um novo dimensionamento para esta. Porém, este fato é praticamente insignificante para pequenos valores do fator de declividade "u". Entretanto, torna-se importante à medida em que o fator "u" cresce, necessitando, portanto, de uma avaliação mais criteriosa quanto à possibilidade de redimensionamento do trecho em declive.

b) Diâmetro teórico do trecho em declive.

Para a determinação do diâmetro teórico do trecho em declive, deve-se promover um redimensionamento deste trecho, considerando-se neste caso o seu comprimento real, dado pelo complemento do trecho em aclive:

$$X_d = (1 - X_a/L) \cdot L \quad , \quad (4.100)$$

Substituído-se na equação (4.94), do cálculo do diâmetro do trecho em declive (D_d), o termo representativo do comprimento deste trecho (X_d) pela expressão (4.96), obtém-se:

$$D_d = \left[\frac{K \cdot q^m \cdot (1 - X_a/L)^{(m+1)}}{V_p + s \cdot (1 - X_a/L) \cdot L} \right]^{1/n} \quad (4.101)$$

Relacionado-se este diâmetro com o da tubulação horizontal e simplificando-se, encontra-se:

$$D_d/D = \left[\frac{2^{(m+1)} \cdot (1 - X_a/L)^{(m+1)}}{1 + 2u \cdot (1 - X_a/L)} \right]^{1/n} \quad (4.102)$$

c) Diâmetro médio da tubulação inclinada.

Para facilitar a análise comparativa, definiu-se como o diâmetro médio da tubulação inclinada (D_m) a média ponderada dos diâmetros dos trechos em aclave (D_a) e declive (D_d), sendo os comprimentos relativos de cada trecho adotados como os pesos de ponderação, isto é:

$$D_m = D_a \cdot (X_a/L) + D_d \cdot (1 - X_a/L) \quad (4.103)$$

Relacionando-se este diâmetro com o da tubulação horizontal, obtém-se:

$$D_m/D = X_a/L + (D_d/D)(1 - X_a/L) \quad (4.104)$$

Tabela 4.5 - Comprimentos relativos dos trechos de uma tubulação inclinada com ponto de entrega intermediário com dimensionamento associado a uma tubulação horizontal.

u (1)	X/L		(X _a + X _d)/L (4)	D/D _m (5)
	aclive (2)	declive (3)		
0,0	0,5	0,5	1,000	1,000
0,1	0,482	0,518	1,000	1,000
0,2	0,464	0,537	1,001	1,001
0,3	0,446	0,555	1,001	1,001
0,4	0,429	0,574	1,003	1,001
0,5	0,412	0,592	1,004	1,002
0,6	0,396	0,611	1,007	1,003
0,7	0,380	0,629	1,009	1,004
0,8	0,364	0,648	1,012	1,005
0,9	0,349	0,666	1,015	1,007
1,0	0,334	0,684	1,018	1,008
1,1	0,321	0,702	1,023	1,010
1,2	0,307	0,720	1,027	1,012
1,3	0,295	0,738	1,033	1,014
1,4	0,283	0,756	1,039	1,016
1,5	0,271	0,774	1,045	1,019
1,6	0,260	0,791	1,051	1,021
1,7	0,250	0,808	1,058	1,024
1,8	0,241	0,826	1,067	1,028
1,9	0,231	0,843	1,074	1,030
2,0	0,223	0,860	1,083	1,033
2,1	0,215	0,876	1,091	1,036
2,2	0,207	0,893	1,100	1,040
2,3	0,200	0,910	1,110	1,043
2,4	0,193	0,926	1,119	1,046
2,5	0,187	0,942	1,129	1,050
2,6	0,181	0,958	1,139	1,053
2,7	0,175	0,974	1,149	1,057
2,8	0,169	0,990	1,159	1,060
2,85	0,167	0,998	1,165	1,062
3,0	0,159	1,021	1,180	1,067

Obs:

Col. (1) - Fator de declividade dado por $u = (S.L/2)/V_p$.

Col. (2) e (3) - Comprimentos relativos dos trechos em aclive (X_a) e declive (X_d).

Col. (5) - Relações entre o diâmetro da tubulação horizontal e o diâmetro médio da tubulação inclinada.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para ilustrar a aplicação da metodologia, foi escolhido um exemplo de dimensionamento, apresentado por Olitta (1984), de uma parcela plana de um sistema de gotejamento para um pomar de citros com uma área de 16 ha (400 m x 400 m), dividida em 8 parcelas de 2 ha, correspondendo cada uma a uma unidade operacional do sistema.

Para ressaltar a importância dos fatores de otimização identificados pela pesquisa, foram desenvolvidas diversas alternativas de projeto para a parcela. O Quadro 5.1 apresenta os elementos de projeto, determinados com o auxílio do programa DOPIG, para essas alternativas. A primeira alternativa corresponde a um projeto básico, e as alternativas seguintes introduzem progressivamente a metodologia de otimização desenvolvida no capítulo 4.

A alternativa 1, que corresponde ao projeto básico, está de acordo com um projeto original apresentado por Olitta (1984) e fundamenta-se na metodologia tradicional que frequentemente recomenda a utilização de um diâmetro único para os ramais e um maior comprimento para essas tubulações, reduzindo o comprimento das derivações. O layout do sistema adotado pelo autor (Olitta, 1984)

baseou-se em critérios intuitivos, na prática e no bom senso, tendo como objetivo uma maior economia no dimensionamento, resultando em uma parcela com ramais conectados em T em uma derivação de 100 m de comprimento. Os ramais foram dispostos na maior dimensão da parcela, 200 m.

Para facilitar a análise promoveu-se, nas alternativas seguintes, uma combinação entre os diâmetros comerciais disponíveis para os ramais e a derivações, possibilitando a manutenção das relações otimizadas entre as perdas de carga das tubulações da parcela.

Na alternativa 2, manteve-se o formato e o "layout" original e otimizou-se a relação entre as perdas de carga nas tubulações da parcela.

Em um "layout" em H, como na alternativa 3, a vazão na derivação é repartida, devendo seguramente resultar em um menor custo para as tubulações da parcela. Devido a este fato, adotou-se para as alternativas seguintes um "layout" em H.

O formato da parcela apresentou-se como o fator de otimização mais importante, como está demonstrado nas alternativas seguintes. Na alternativa 4, alterou-se o formato da parcela, sem contudo conflitar com o formato do terreno original. Nas alternativas restantes, como na alternativa 5, o formato da parcela foi otimizado.

As duas últimas alternativas de projeto apresentam um ponto de entrega d'água otimizado. Além disto, a alternativa 6 apresenta uma solução com diâmetro único e mínimo para os ramais. Este fato resultou de uma aproximação para o diâmetro mínimo disponível, como nas situações de projeto com diâmetro teórico

inferior ao mínimo arquivado. Nesses casos, o programa DOPIG adota o diâmetro mínimo e recalcula a perda de carga nos ramais, assim como a perda na derivação, alterando a relação ótima original entre as perdas de carga, que está associada ao formato ótimo. A solução ótima global, para um problema como este, deverá resultar da otimização do formato da parcela que está associado ao diâmetro mínimo adotado para os ramais, como na alternativa 7.

Para ressaltar a importância dos fatores de otimização identificados pela pesquisa, relacionou-se os custos das tubulações das parcelas, das diversas alternativas de projeto, com o custo das tubulações do projeto básico.

Para possibilitar uma análise preliminar da influência da metodologia proposta pela pesquisa, no contexto do projeto do conjunto de todas as tubulações do sistema, estendeu-se esta análise comparativa aos custos globais das tubulações do sistema a partir de um projeto adequado para cada alternativa. Para evitar a influência dos custos de bombeamento, manteve-se constante, em todas as alternativas de projeto do sistema, a carga de pressão disponível no cabeçal de controle da primeira alternativa de projeto do sistema.

A figura 5.1 apresenta as alternativas mais representativas de projeto para o sistema de gotejamento.

Quadro 5.1 - Alternativas de projeto para a parcela.

continua...

Alternativas		1	2	3	4					
Layout		T	T	H	H					
Formato Lr x Ld		200 x 100	200 x 100	200 x 100	100 x 200					
hr/ha		1,75	* 5,03	* 7,94	* 2,87					
S E T O R	Diam.	Comprimentos								
	(mm)	(m) acl.; dec.								
A C L I V E	R A M A L	9.4						29	29	
		13.4		45	45	59	59	21	21	
		17.0	100	100	55	55	41	41		
	D E R I V.	48.1	25				27		56	
		72.5	71		65		21		43	
		97.6			31					
D E C I V E	R A M A L	9.4						39	39	
		13.4				73	73	11	11	
		17.0					27	27		
	D E R I V.	48.1					30		75	
		72.5					18		24	
		97.6								
Custo parcela		869.060	829.945	752.886	586.895					
(CP _i /CP _j)x100		1	95,5	86,6	67,5					
Custo sistema		7.614.904	7.301.982	6.301.982	5.640.728					
(CS _i /CS _j)x100		1	95.9	91.5	74.1					

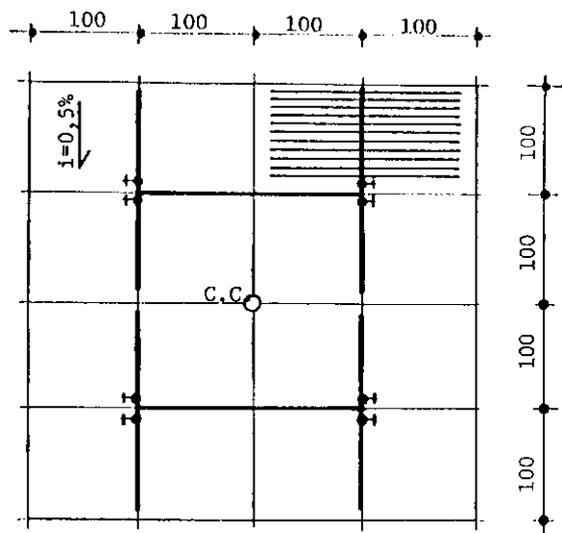
Obs: "*"...valores otimizados.

Quadro 5.1 - Continuação

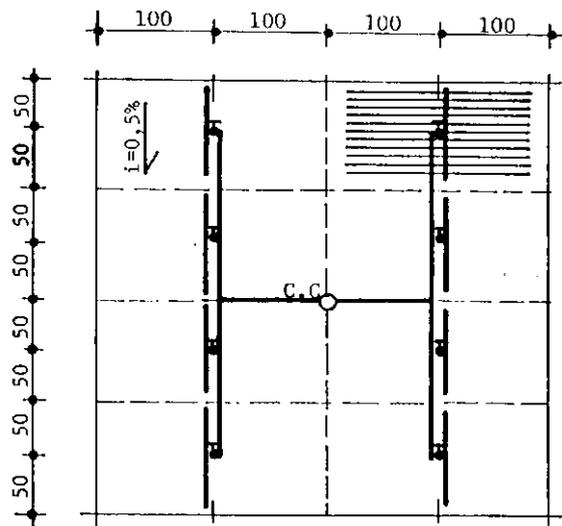
conclusão.

Alternativas		5	6		7				
Layout		H	H		H				
Formato Lr x Ld		* 64 x 311	* 64 x 311		* 77 x 258				
hr/hd		* 1,46	* 1,46		1,61				
S E T O R	R A M A L	Diam. (mm)	Comprimentos (m) acl.; dec.						
		9.4	27	27	32	32	38	38	
		13.4	5	5					
		17.0							
	D E R I V	48.1	80		* 70		* 66		
		72.5	73		* 35		* 26		
		97.6							
	D E C I V E	R A M A L	9.4	32	32	* 32	* 32	* 38	* 38
			13.4						
			17.0						
		D E R I V	48.1	153		* 148		* 128	
			72.5	73		* 53		* 38	
97.6									
Custo parcela		573.576	560.418		525.777				
(CP ₁ /CP _j)x100		66,0	64,5		60,5				
Custo sistema		5.233.210	5.127.952		4.936.288				
(CS ₁ /CS _j)x100		68,7	67,3		64,8				

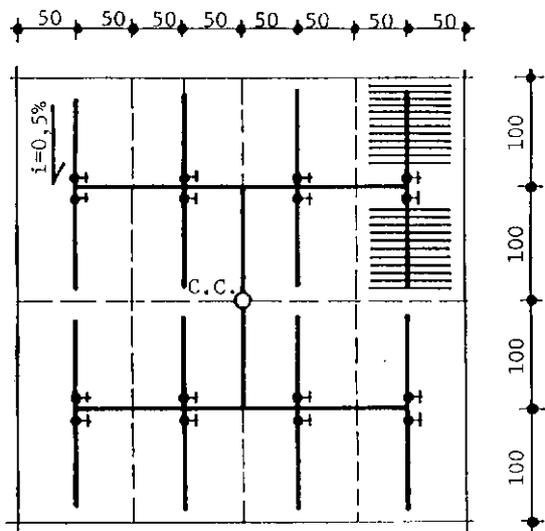
Obs: "*"...valores otimizados.



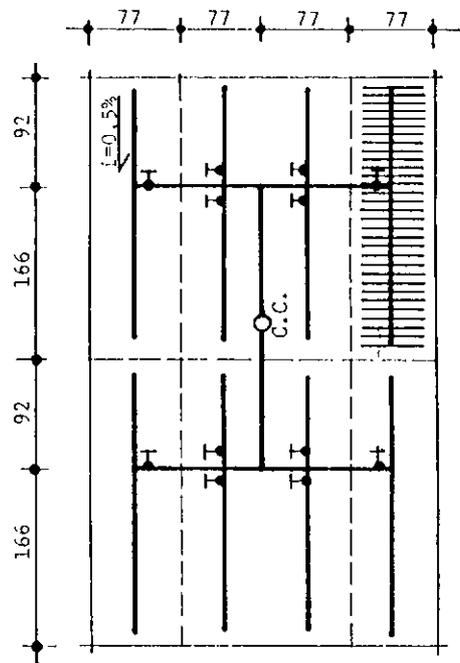
ALTERNATIVAS 1 e 2



ALTERNATIVA 3



ALTERNATIVA 4



ALTERNATIVA 7

Figura 5.1 - Alternativas de projeto para o sistema de gotejamento

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo básico da pesquisa constituiu-se no estabelecimento de uma metodologia alternativa à metodologia de Keller e Karmeli (1975).

O estudo baseou-se em um modelo analítico de otimização do custo das tubulações de uma parcela de gotejamento, tendo como resultado expressões genéricas e concisas que derivaram em ábacos e tabelas de fácil aplicação.

A pesquisa não identificou desvios significativos nos parâmetros de otimização do modelo teórico em decorrência do processo de discretização dos diâmetros das tubulações.

A análise de regressão custo-diâmetro das séries de diâmetros disponíveis apresentou uma excelente correlação para uma função linear e coeficientes (b) negativos.

Os fatores de otimização identificados pela pesquisa foram: o formato da parcela definido pelo comprimento dos ramais, a relação entre as perdas de carga das tubulações da parcela e o ponto de entrega da água nestas tubulações.

As variáveis do modelo de otimização retrataram aspectos genéricos e diversos dos sistemas de gotejamento, tais como: área

da parcela, vazão dos emissores, fatores de custos das tubulações, espaçamentos entre os emissores, variação da pressão na parcela, parâmetros do modelo hidráulico e um fator de "layout".

O "layout" das tubulações da parcela mostrou-se como um elemento de projeto importante. O "layout" em H é o que resulta em um menor custo para as tubulações da parcela. O "layout" em T exigindo um menor número de linhas secundárias e/ou principais, pode conduzir, em alguns casos, a uma melhor solução global para o sistema. Os "layout" em C e L são os recomendados para a irrigação de terrenos em encostas, com grande declividade, permitindo a compensação da perda de carga nos ramais pelo gradiente topográfico, resultando em menores diâmetros para os ramais e um menor custo.

A metodologia tradicional aborda superficialmente o problema da otimização do projeto de uma parcela inclinada de gotejamento. A metodologia proposta baseia-se no projeto ótimo de uma parcela horizontal, sendo que os efeitos dos desniveis topográficos do terreno podem ser compensados, dependendo do fator de declividade "u", por deslocamentos convenientes dos pontos de entrega da água nas tubulações. Para pequenas declividades, $u < 0,4$, recomenda-se a manutenção do ponto de entrega no centro das tubulações inclinadas; para as declividades fortes, $u > 2,5$, o ponto de entrega deve ser deslocado para a extremidade superior das tubulações; e para os valores intermediários do fator "u" o ponto de alimentação da tubulação deve ser deslocado para cima de forma que o diâmetro do trecho em aclive seja igual ao determinado para uma tubulação horizontal. Para efeitos práticos recomenda-se a adoção deste mesmo diâmetro para o trecho em declive.

A importância da metodologia proposta pelo presente estudo foi comprovada a partir da análise comparativa das diversas alternativas de projeto para uma parcela plana de gotejamento. A análise ressaltou a importância de cada um dos fatores de custo levantados pela pesquisa, que conduziram, em conjunto, a uma economia substancial no custo das tubulações da parcela, da ordem de 40%, em relação a um projeto convencional, fundamentado na metodologia tradicional. Além do mais, uma análise preliminar também revela que a solução ótima para o projeto da parcela constitui-se em um bom referencial para a otimização global do sistema de gotejamento.

Os resultados apresentados no Quadro 5.1 ressaltam a importância de cada um dos fatores de otimização identificados na pesquisa. Na alternativa 2, manteve-se o formato e o "layout" em T do projeto básico e otimizou-se a relação entre as perdas de carga nas tubulações da parcela, conduzindo a uma economia substancial nos custos das tubulações, da ordem de 4,5%. Na alternativa 3, a mudança para um "layout" em H resultou em uma economia de 9,3% em relação ao custo da alternativa 2.

O formato da parcela apresentou-se como o fator de otimização mais importante. Na alternativa 4, alterou-se o formato da parcela, sem contudo conflitar com o formato do terreno original, resultando numa redução de custos muito importante, da ordem de 22% em relação a anterior. Nas alternativas restantes, o formato da parcela foi otimizado, resultando em custos menores. A alternativa 5 apresenta uma economia em torno de 2,3% em relação a alternativa 4.

As duas últimas alternativas de projeto apresentam um ponto de entrega d'água otimizado. O efeito deste procedimento sobre o custo da parcela pode ser quantificado pela relação entre os custos das alternativas 5 e 6. Esta última alternativa apresenta um custo cerca de 2,3% menor do que o custo da alternativa anterior. As alternativas 6 e 7 apresentaram como soluções diâmetros únicos e mínimos para os ramais, sendo que a alternativa 7, que corresponde a solução ótima global, apresenta-se com formato otimizado e com um custo 6,7% menor do que o da anterior.

Os excelentes resultados alcançados pela metodologia proposta justificam a insistência nesta linha de pesquisa. Entendemos que este estudo representa a primeira etapa de um processo que conduzirá a uma metodologia prática de otimização do projeto global de um sistema de gotejamento. Pode-se contar para isto com o auxílio de recursos potentes e versáteis, como a programação dinâmica, permitindo incorporar na análise de otimização os outros fatores que interferem diretamente nos custos globais dos sistemas de gotejamento, tais como: as características dos emissores, o "layout" global do sistema, o dimensionamento da rede de tubulações que alimentam as parcelas, o padrão de uniformidade da distribuição da água no terreno, o tempo disponível para a irrigação e os custos de bombeamento dos sistemas de gotejamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ABREU, J. M. et alii. Componentes de la instalación, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Santa Cruz de Tenerife, 1986.
02. AGUILERA, L. T. Analisis Hidraulico en una Tuberia com Saldas Multiples y su Aplicacion a un Sistema de Riego por Goteo. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, 1972.
03. AZEVEDO NETO, J.M. e ALVAREZ, G. Manual de Hidráulica. 6. ed. S. Paulo. Ed. Edgard Blucher Ltda. 1977.
04. BERNADO, Salassier. Manual de Irrigação. 4. ed. Viçosa. UFV. Impr. Univ. 1987.
05. BEZDEK, J. C. Approximating Friction Factor for Trickle Tubing. JIDD, ASCE, IR4. dez - 1978. pp. 351-359.
06. BOSWELL, M. J. Manual de Diseño y Manejo de Sistemas de Micro-Irrigación - Traducción y Adaptación. Ed. James Hardie Irrigation (Iberia) S. A. Sevilha, Espanha, 1989.
07. CABRERA, E. et alii., Sistemas Hidraulicos a Presion - Aspectos Práticos de su Diseño y Exploración. Universidade Politecnica de Valencia, Valencia, Espanha, 1990.
08. CHRISTIANSEN, J. E., Irrigation by Sprinkling. Berkeley,

California, EUA, 1942.

09. DE PACO, J. L. Fundamentos del Calculo Hidraulico en los Sistemas de Riego y Drenaje. Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentos, Castellón, Espanha, 1989.
10. Idem. Curso de Hidráulica Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Valencia, Espanha, 1973.
11. Idem. Conducción com servicio en ruta. Aplicación para el riego com métodos de superficie, Jornadas de la C.I.G.C. Córdoba, Espanha, 1977.
12. GILLESPIE, Y. A., PHILLIPS, A. L. e WU, I-Pai. Drip Irrigation Design Equations. JIDD, ASCE, IR3. set - 1979.
13. GONÇALVES, A. C. A. et alii, Análise da Perda de Carga em Tubos Perfurados para Irrigação, pela comparação entre o Conceito de Vazão Fictícia e a Metodologia Proposta por Christiansen. Anais VII CONIRD, Florianópolis, SC, out/88.
14. HOLZAPFEL, E. A. et alii, Drip Irrigation Nonlinear Optimization Model. JIDD, ASCE, vol. 116, N. 4 jul/ago 90. pp. 479-495.
15. HOWELL, T.A. e HILER, E. A. Designe Tricker Irrigation Lateral for UNiformity. JIDD, ASCE, IR4, dez - 1974. pp. 443-453.
16. JANSEN, M. C. e FRANTINI, A. M. Adjusted "F" Factors for Sprinkler Lateral Diesign. Agricultural Engineering, abr-1957.

pp. 247.

17. KELLER, J. e KARMELI, D. Trickler Irrigation Design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.
18. KHATRI, K. C., WU, I-Pai e GITLIN, H. M. Hidraulics of Microtube Emitter. JIDD, IR2, set - 1972. pp. 341-345.
19. LOPEZ, J. R. Deseño hidráulico. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Santa Cruz de Tenerife, 1986.
20. LUCAS FILHO, M. Metodologias de Optimizacion de Redes Colectivas Ramificadas de Riego a Pression que Consideren el Timbraje como Variable Intrinseca de Proceso- Tesis Doctoral. Universidade Politecnica de Madri, Madri, Espanha, 1991.
21. MYERS, L. E. e BUCKS, D. A. Uniform Irrigation with Low-Pressure Trickler System. JIDD, IR3, set-72. pp. 341-345.
22. NEVES, E. T. Curso de Hidráulica. 6. ed. Porto Alegre. Editora Globo. 1979.
23. OLITTA, A. F. Os Métodos de Irrigação. São Paulo. Nobel. 1984
24. Idem. Projeto de Irrigação Localizada - Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação. Programa Nacional de Irrigação, Brasília, 1986.
25. LIVEIRA, C. A. S. Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais para irrigação por gotejamento. Viçosa, UFV. Imprensa Universitária, 1978, 72 p (Tese M. S.).

26. PEROLD, R. Design of Irrigation Pipe Laterals with Multiple Outlets. JIDD, ASCE, IR2, jul-1977. pp. 179-193.
27. Idem. Computer Design of Microirrigation Pipe System. JIDD, ASCE, IR4, dez-1979. pp. 403-417.
28. PIKE, R. W. e GUERRA, G. L. Optimizacion en Ingenieria. Ed. Alfaomega, México, 1991.
29. SAN JUAN, J. A. M. Riego por Goteo - Teoria y Prática. Ediciones Mundi-Prensa, Madri, Espanha, 1988.
30. SOLOMON, K. e KELLER, J. Trickle Irrigation Uniformity and Efficiency. JIDD, ASCE, IR3, set-1978. 293-305.
31. SPIEGEL, M. R. Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas Matemáticas. Ed. McGraw - Hill, São Paulo, 1992. p 167-181.
32. TALENS, J. A. M. Riego Localizado a Goteo y de Pie. Graficas Miguel, Madri, Espanha, 1986.
33. TAVARES, L. V. E CORREIA, F. N. Otimização Linear e não Linear. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1984.
34. TELLES, D. D. Métodos de Irrigação - Elaboração de Projetos de Irrigação, Programa Nacional de Irrigação, Brasília, 1986.
35. Idem. Equipamentos: Características, Operação e Manutenção. Elaboração de Projetos de Irrigação, Programa Nacional de Irrigação, Brasília, 1986.
36. Idem, Irrigação por Gotejamento: Subsídios Para Sua Utili-

zação. Boletim Técnico DAEE, São Paulo, Brasil, v.5, n.1, p. 1-127, jan/abr 1982.

37. VIEIRA, D. B. Engenharia de Irrigação. Limeira, Faculdade de Engenharia de Limeira - UNICAMP, 1983. 433 p (2 vol.)
38. WU, I-Pai. Design of Drip Irrigation Main Line. JIDD, ASCE, IR4, dez-1979. pp. 403-417.
39. Idem. Drip Irrigation Design on Nonuniform Slops. JIDD, ASCE, IR3, set-1979. pp. 403-417
40. WU, I-Pai e GITLIN, H. M. Hydraulics and Uniformity for Drip Irrigation. JIDD, ASCE, IR2, jul-1973. pp. 157-167.
41. Idem. Energy gradient line for drip irrigation lateral. JIDD, ASCE, Vol. 101. N. IR4. 1975.

APÊNDICE A

PROGRAMA DOPIG

1 - Introdução.

Com o intuito de facilitar a aplicação da metodologia proposta e a análise comparativa desta com a tradicional, foi desenvolvido o "software" DOPIG (Dimensionamento Ótimo de uma Parcela de Gotejamento). O programa foi idealizado como um ambiente de projeto de uma parcela de gotejamento, tendo sido desenvolvido em linguagem "BASIC" para microcomputadores compatíveis com o IBM-PC/XT/AT.

Como um instrumento da pesquisa, o programa permitirá a calibração do modelo analítico simplificado, a revisão do projeto piloto e a geração de dados para a análise das relações entre as variáveis do problema.

2.- Menu Principal

A execução do programa inicia-se a partir do subprograma MENU PRINCIPAL, que direciona o fluxo para as diversas opções do programa.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** MENU PRINCIPAL ***

```
1 - LER DADOS?
2 - GRAVAR DADOS?
3 - MOSTRAR DADOS?
4 - IMPRIMIR DADOS?
5 - ATUALIZAR DADOS?
6 - OTIMIZAR FORMATO?
7 - DIMENSIONAR PARCELA?
8 - APRESENTAR RESULTADOS?
9 - FIM?
```

DIGITE (1,2,3,4,5,6,7,8 ou 9)?

```
=====
tela 01 - Menu Principal
```

3 - Entrada de Dados

A entrada dos dados é via teclado, a partir do subprograma ATUALIZAR DADOS.

3.1- Menu de Entrada de Dados.

Para facilitar a manipulação dos dados, foi criado um banco de dados, com acesso por grupo de variáveis, via Menu de Entrada de Dados, evitando-se a revisão global do conjunto de dados do programa.

=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *

*** ENTRADA DE DADOS ***

- 1 - DIAM. E CUSTOS DAS TUBULACOES?
- 2 - TIPO DE LAYOUT?
- 3 - DIMENSOES E DECLIVIDADES DA PARCELA?
- 4 - DADOS DO SISTEMA?
- 9 - FIM?

DIGITE (1,2,3,4 ou 9)?

=====
tela 2 - Menu Entrada de Dados

3.2 - Dados das tubulações

As tubulações de uma parcela, ramais e derivação, apresentam características diferentes, justificando a distinção no agrupamento dos seus dados.

=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *

*** DIAM. E CUSTOS DAS TUBLACOES ***

1 - RAMAIS?
2 - DERIVACOES?
9 - FIM?

DIGITE (1,2 ou 9)?

=====
tela 2.1 - Menu Dados das Tubulações.

O programa mantém um banco de dados atualizados dos tubos disponíveis no mercado, com respeito aos diâmetros internos e custos por unidade de comprimento dos tubos.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DADOS DOS RAMAIS ***

Numero de diam. dif. disponiveis?

Diam. interno em 'mm'/Custo em 'Cr\$/m'

Dr(i)= ?

Cr(i)= ?

Custo de montagem em Cr\$/m ?

```
=====
tela 2.1.1 - Dados dos Ramais
```

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DADOS DA DERIVACAO ***

Numero de diam. dif. disponiveis?

Diam. interno em 'mm'/Custo em 'Cr\$/m'

Dd(i)= ?

Cd(i)= ?

Custo de montagem em Cr\$/m ?

```
=====
tela 2.1.2 - Dados das derivacoes.
```

Após a atualização dos dados dos tubos, o programa encaminha-se à Rotina de Regressão Linear, para a determinação dos parâmetros da função custo-diâmetro.

3.3- "Layout" dos Sistemas

O "layout" de uma parcela é definido pela disposição dos ramais com respeito à derivação.

Conforme a pesquisa, identificou-se quatros tipos de "layout".

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** TIPOS DE LAYOUT ***

- 1 - LAYOUT em H?
- 2 - LAYOUT em T?
- 3 - LAYOUT em C?
- 4 - LAYOUT em L?

Digite (H, T, C ou L)?

```
=====
tela 2.2 - Tipos de Layout.
```

3.4- Dados da parcela

Uma parcela é definida pela superfície do terreno que contém o conjunto de ramais que são alimentados por uma derivação.

O dimensionamento é aplicado a uma parcela plana e retangular, admitindo-se declividades nas direções dos ramais e na derivação.

O formato da parcela dado pelos comprimentos dos ramais e da derivação é definido posteriormente.

Os dados preliminares com respeito aos aspectos físicos da parcela, são: área da superfície e declividades.

```
=====  
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *  
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *  
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DADOS DA PARCELA ***

Area em 'm2' ?

Declividades do terreno em 'm/m'
na direcao dos ramais ?
na direcao da derivacao ?

```
=====  
tela 2.3 - Dados da Parcela.
```

3.5- Dados gerais do sistema.

Os dados complementares do programa, que estão associados às características do sistema de gotejamento, estão agrupados no bloco DADOS DO SISTEMA.

O sistema de unidades adotado no programa está coerente com a maioria dos catálogos de equipamentos de sistemas de gotejamento.

O programa baseia-se em uma fórmula genérica para o cálculo da perda de carga, definida pelos coeficientes: "K", fator de rugosidade da tubulação; "x", expoentes da velocidade e "Y", expoente do diâmetro.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DADOS DO SISTEMA ***

Vazao dos gotejadores em.....l/h ?
Variacao da pressao na parcela emmca ?
Espacamentos entre gotejadores em.....m ?
Espacamentos entre ramais em.....m ?

Coeficientes da formula da perda de carga.

K= .4925

x= 1.75

y= 4.75

Deseja atualizar, (S/N)? s

K= ?

x= ?

y= ?

Fator de perda localizada nos ramais ?

Fator de perda localizada na derivacao ?

=====

tela 2.4 - Dados do Sistema.

4 - Banco de dados em disco.

Para facilitar a pesquisa, evitando-se a repetição de entrada de dados comuns na inicialização do programa, permitiu-se a manutenção de um banco de dados, em disco, no drive A, a partir dos subprogramas LER DADOS e GRAVAR DADOS.

```
=====  
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *  
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *  
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** LEITURA DOS DADOS ***

DRIVE A: PRONTO (S/N) ?

```
=====  
tela 3 - Leitura dos dados.
```

=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *

*** GRAVACAO DOS DADOS ***

DRIVE A: PRONTO (S/N) ?

=====
tela 4 - Gravacao dos dados.

5 - Apresentação dos dados do programa.

A conferência dos dados do programa é possível, via tela, a partir do subprograma APRESENTAR DADOS, ou via impressora, a partir do subprograma IMPRIMIR DADOS.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** APRESENTACAO DOS DADOS ***

TUBULACOES

Diam. em 'mm' e Custos em Cr\$/m.

Ramais

... ..

Derivacao

... ..

Layout em ...

Area em 'm2' =

Vazao dos gotejadores em l/h = ...

Espacamentos entre gotejadores em 'm' = ...

Espacamentos entre ramais em 'm' = ...

Form. da perda de carga (coef.)

K = ... x = ... y = ...

Fator de perdas localizadas

Ramal ... Derivacao ...

Custos de montagem

Ramal ... Derivacao ...

=====

tela 5 - Conferencia dos dados

6 - Otimização do formato da parcela

O subprograma OTIMIZAR FORMATO auxilia a elaboração do projeto indicando o formato ótimo da parcela. Para facilitar a otimização, nos casos em que o formato adotado resultar em diâmetros não disponíveis, permitiu-se a otimização do formato para uma restrição de diâmetro, para os ramais ou para a derivação.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** OTIMIZACAO DO FORMATO DA PARCELA ***

- 1 - SEM RESTRICOES?
- 2 - PARA UM DADO DIAM. DE RAMAL?
- 3 - PARA UM DADO DIAM. DE DERIVACAO?
- 9 - FIM?

DIGITE (1,2,3 ou 9) ?

```
=====
tela 6 - Menu Otimizacao Formato
```

6.1 - Formato ótimo sem restrições de diâmetro.

Este problema conduz à determinação da solução ótima global para o formato da parcela. Porém, para evitar que esta solução resulte em diâmetros não disponíveis, são estabelecidos limites para o comprimento dos ramais. O limite inferior está associado com o comprimento máximo da derivação, que é determinado a partir do diâmetro máximo disponível para a derivação. O limite superior é determinado a partir do diâmetro máximo disponível para os ramais.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** FORMATO OTIMO SEM RESTRICOES ***

... < Lr < ...

Lr(min)= ?

Lr(max)= ?

Aguarde...

Formato Otimo: Lr= ... Ld= ...

Digite <-----> p/continuar.

```
=====
Tela 6.1 - Otimizacao do formato sem restricoes.
```

6.2- Formato ótimo associado a um dado diâmetro de ramal.

O problema de otimização dos custos das tubulações de uma parcela, quando se adota previamente o diâmetro dos ramais, como nos casos dos gotejadores conectados " in line" ou mangueiras perfuradas, restringe-se à determinação do formato ótimo da parcela, que é definido a partir do comprimento ótimo dos ramais.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** FORMATO OTIMO P/DADO DIAM. RAMAL ***

Diam. do ramal em 'mm' ?

... < Lr < ...

Lr(min)= ?

Lr(max)= ?

Aguarde...

Formato Otimo: Lr= ... Ld= ...

Digite <-----> p/continuar.

```
=====
tela 6.2 - Formato otimo para um dado diam. ramais.
```

6.3- Formato ótimo associado a um dado diâmetro da derivação.

Em algumas situações de projeto é interessante a verificação do formato ótimo que está associado a um determinado diâmetro para a derivação.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** FORMATO OTIMO P/DADO DIAM. DERIVACAO ***

Diam. da deriv. em 'mm' ?

... < Lr < ...

Lr(min)= ?

Lr(max)= ?

Aguarde...

Formato Otimo: Lr= ... Ld= ...

Digite <-----> p/continuar.

```
=====
tela 6.3 - Formato otimo p\diam. da deriv.
```

7 - Dimensionamento das tubulações.

O subprograma DIMENSIONAMENTO DA PARCELA, baseia-se em um dimensionamento exato para as tubulações da parcela, ramais e derivações, por combinação dos diâmetros disponíveis e determinação dos comprimentos associados a cada diâmetro.

O programa requer a entrada das dimensões do terreno nas direções dos ramais e da derivação. Como na determinação do formato ótimo, para evitar que esta solução resulte em diâmetros não disponíveis, também são estabelecidos limites para o comprimento dos ramais.

Para facilitar a pesquisa, este subprograma apresenta quatro rotinas de dimensionamento.

Em todas as alternativas de dimensionamento, será permitido, a critério do usuário, o dimensionamento com otimização do ponto de entrega nas tubulações.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DIMENSIONAMENTO DA PARCELA ***

- 1 - DIMENSIONAMENTO ECONOMICO?
- 2 - DIM. P/DADO DIAM. DOS RAMAIS?
- 3 - DIM. P/DADO DIAM. DA DERIVACAO?
- 4 - DIM. P/DADA RELACAO...Hr/Hd?
- 5 - FIM

DIGITE (1,2 ou 5)?

```
=====
tela 7 - Menu Dimensionamento da Parcela
```

7.1- Dimensionamento econômico.

O dimensionamento baseia-se na relação ótima entre as perdas de carga das tubulações da parcela, conforme a metodologia desenvolvida na pesquisa.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DIMENSIONAMENTO ECONOMICO ***

Deseja otimizar o ponto de entrega do ramal...(S/N)?n
Deseja otimizar o ponto de entrega da derivacao...(S/N)?n

Aguarde...

... m < Lr < ... m
... m < Ld < ... m

Entre com as dimensoes da parcela em 'm'.

Lr= ?
Ld= ?

```
=====
tela 7.1 - Dimensionamento economico.
```

7.2- Dimensionamento para um dado diâmetro dos ramais.

Em alguns situações de projeto é importante a verificação de alternativas com diâmetro único para os ramais. Nestes casos, o dimensionamento baseia-se em um determinado diâmetro para os ramais, que é selecionado dentre as opções arquivadas.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DIM. P/DADO DIAM. RAMAIS ***

Deseja otimizar o ponto de entrega do ramal...(S/N)?n
Deseja otimizar o ponto de entrega da derivacao...(S/N)?n

Aguarde...

... m < Lr < ... m
... m < Ld < ... m

Entre com as dimensoes da parcela em 'm'.

Lr= ?
Ld= ?

Dr > ... mm

Diam. disponiveis p/os ramais.

	Diam em (mm)	Custos em (Cr\$/m)
i	Dr(i)	Cr(i)

Digite i ?

```
=====
. tela 7.2 - Dim. p/dado diam. ramais
```

7.3- Dimensionamento para um dado diâmetro da derivação.

O programa também permite o dimensionamento a partir de um determinado diâmetro para a derivação.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DIM. P/DADO DIAM. DERIVACAO ***

Deseja otimizar o ponto de entrega do ramal...(S/N)?n
Deseja otimizar o ponto de entrega da derivacao...(S/N)?n

Aguarde...

... m < Lr < ... m
... m < Ld < ... m

Entre com as dimensoes da parcela em 'm'.

Lr= ?
Ld= ?

Dr > ... mm

Diam. disponiveis p/a deriv.

	Diam em	Custos em
	(mm)	(Cr\$/m)

i	Dr(i)	--Cr(i)
---	-------	---------

Digite i ?

```
=====
tela 7.3 - Dim. p/dado diam. deriv.
```

7.4- Dimensionamento para uma dada relação entre as perdas de carga das tubulações da parcela.

A metodologia tradicional, de Keller e Karmeli (1975), baseia-se em uma relação ótima entre as perdas de cargas nas tubulações de uma parcela. Para auxiliar na análise comparativa entre a metodologia proposta pela pesquisa e a tradicional,

permitiu-se o dimensionamento baseado numa determinada relação entre as perdas de carga das tubulações da parcela.

```
=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *
```

*** DIM. DADO Hr/Hd ***

Deseja otimizar o ponto de entrega do ramal...(S/N)?n
Deseja otimizar o ponto de entrega da derivacao...(S/N)?n

Aguarde...

```
... m < Lr < ... m
... m < Ld < ... m
```

Entre com as dimensoes da parcela em 'm'.

Lr= ?
Ld= ?

Hr/Hd?

```
=====
tela 7.4 - Dim. dado Hr/Hd.
```

8 - Apresentação dos resultados.

Os resultados serão conferidos via monitor ou impressora.

=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *

*** APRESENTACAO DOS RESULTADOS ***

1 - MOSTRAR?
2 - IMPRIMIR?
3 - FIM?

DIGITE (1, 2 ou 3) ?

=====
tela 8 - Menu Apresentacao dos Resultados

=====
* UFPB - CCT - MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL *
* Programa D.O.P.I.G. - Versao 1.0 - 1992 *
* Autor: J. Abner G. Jr - Tese de Mestrado *

*** RESULTADOS DAS TUBULACOES ***

Diam. (mm)/Comp. (m)

Ramal

.../... .../...
.../... .../...

Derivacao

.../... .../...

Custo da Parcela em Cr\$...

=====
tela 8.1 - Resultados das tubulacoes