

SOLO-CIMENTO E SOLO-VINHAÇA NO REVESTIMENTO DE CANAIS DE  
IRRIGAÇÃO PARA TRANSPORTE DE VINHAÇA: ADEQUAÇÃO FÍSICA E  
PARÂMETROS HIDRÁULICOS

EDUARDO TEIXEIRA DA SILVA

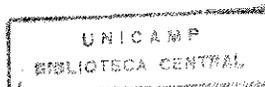
Parecer

*Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Eduardo Teixeira da Silva e aprovada pela Comissão Julgadora em 22 de dezembro de 1992. Campinas, 17 de fevereiro de 1993*

*x*  
*Waldemar Souza Junior*  
*Presidente da Banca*

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia  
Agrícola da Universidade  
Estadual de Campinas, pa-  
ra obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Agrí-  
cola, Área de Concentração:  
Construções Rurais.

CAMPINAS  
Estado de São Paulo - Brasil  
Dezembro - 1992



SOLO-CIMENTO E SOLO-VINHAÇA NO REVESTIMENTO DE CANAIS DE  
IRRIGAÇÃO PARA TRANSPORTE DE VINHAÇA: ADEQUAÇÃO FÍSICA E  
PARÂMETROS HIDRÁULICOS

EDUARDO TEIXEIRA DA SILVA  
Engenheiro Agrícola

---

Orientador: Prof. Dr. WESLEY JORGE FREIRE

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia  
Agrícola da Universidade  
Estadual de Campinas, pa-  
ra obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Agrí-  
cola, Área de Concentração:  
Construções Rurais.

CAMPINAS  
Estado de São Paulo - Brasil  
Dezembro - 1992

**DEDICATÓRIA**

É meu desejo oferecer este trabalho a várias pessoas que muito admiro:

- José e Djanira, "in memorian", meus avôs;
- Ely "in memorian", meu pai, pelo seu espírito de companheirismo;
- Manoelina, minha mãe, pelo espírito de luta que sempre transmitiu a seus filhos;
- Luiz Eduardo e André, meus filhos;
- Marise, minha esposa, pelo sacrifício;
- A Deus, pela fé concedida em todos momentos.

## AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Wesley Jorge Freire, pela orientação, amizade, compreensão e ensinamentos recebidos;
- ao Prof Julio Satto, pela co-orientação e ensinamentos transmitidos durante a realização deste trabalho;
- ao Departamento de Construções Rurais da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, pela oportunidade concedida para realização do curso de pós graduação;
- ao Setor Agrícola da Usina Costa Pinto, em especial ao Dr. João B. Saccomano e André M da Glória, pelo apoio e recursos concedidos;
- à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;
- ao Fundo de Apoio ao Ensino e Pesquisa (FAEP-UNICAMP) pela concessão do auxílio tipo ponte;
- à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão dos recursos financeiros;
- aos Departamentos de Engenharia Rural e Ciências Florestais da ESALQ/USP, pela possibilidade de realização dos ensaios de compressão simples;
- ao amigo Paulo J. R. Albuquerque, pela inestimável ajuda durante a realização dos ensaios em laboratório;
- às secretárias Ana Paula, Dayse e Vanessa, pela atenção sempre dispensada;
- Haydeê, João e Odete, meus tios, José Newton, meu sogro, Eny, "in memorian" minha sogra, que não mediram esforços em me incentivar nos momentos difíceis da minha vida;
- a todos aqueles que direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.

## CONTEÚDO

	Pag.
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	ix
RESUMO.....	xi
SUMMARY.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Utilização agrícola da vinhaça.....	8
2.2 Utilização da vinhaça como fertilizante.....	12
2.3 Sistemas de aplicação e transporte de vinhaça.....	17
2.3.1 Áreas de sacrifício ou despejo.....	18
2.3.2 Sulcos de infiltração.....	19
2.3.3 Caminhões-tanques.....	21
2.4.3.1 Processo por gravidade.....	23
2.4.3.2 Processo de descarga por bombas.....	27
2.3.4 Custos e distâncias máximas de aplicação de vinhaça com caminhões-tanques.....	31
2.3.5 Aspersão: sistema montagem direta....	33
2.3.6 Aspersão: sistema auto-propelido.....	36

2.3.7 Sistema: bi-carga.....	38
2.3.8 Transporte por circuitos hidráulicos.	40
2.4 Canais: aspectos gerais.....	44
2.4.1 Velocidade de escoamento.....	45
2.4.2 Coeficiente de rugosidade.....	46
2.4.3 Taxa de infiltração.....	49
2.4.4 Transporte dutoviário de vinhaça.....	51
2.5 Revestimento de canais: aspectos econômicos.	56
2.6 Solo-cimento "plástico".....	57
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>62</b>
3.1 Materiais.....	64
3.1.1 Solo.....	64
3.1.2 Vinhaça concentrada.....	64
3.1.3 Cimento.....	65
3.1.4 Equipamentos.....	65
3.1.4.1 Prensa.....	65
3.1.4.2 Medidor de nível de vinhaça no canal e diferença de pressão no tubo de "Plandt".....	66
3.1.4.3 Outros equipamentos.....	68
3.2 Métodos.....	68
3.2.1 Análises granulométricas.....	70
3.2.2 Limites de consistência.....	70
3.2.3 Índices físicos.....	70
3.2.4 Compactação.....	71
3.2.5 Dosagem da mistura solo-cimento.....	71

3.2.6	Moldagem de corpos de prova.....	72
3.2.7	Ensaio à compressão simples.....	72
3.2.8	Construção do canal experimental.....	73
3.2.9	Levantamento das seções do canal e medição de nível de vinhaça.....	75
3.2.10	Medida de perda de vinhaça no canal.	76
3.2.11	Cálculo do coeficiente de rugosidade	78
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
4.1	Análise granulométrica.....	79
4.2	Limites de consistência.....	87
4.3	Índices físicos.....	88
4.4	Compactação.....	89
4.5	Dosagem da mistura solo-cimento.....	90
4.6	Ensaio de compressão simples.....	91
4.7	Levantamento das seções transversais do ca- nal.....	92
4.8	Medição da perda de vinhaça por infiltração..	94
4.9	Coeficiente de rugosidade.....	97
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	100
5.1	Conclusões.....	100
5.2	Recomendações.....	102
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. "Croquis" da área pertencente à Usina Costa Pinto Açucar e Álcool S. A. ....	63
2. Aparelho medidor de nível e diferença de pressão..	67
3. Canal aberto, em funcionamento.....	74
4. Trechos represados do canal para medição da perda de vinhaça por infiltração.....	77
5. Curvas granulométricas do solo para o tratamento Testemunha.....	82
6. Curvas granulométricas do solo-cimento a 9% .....	83
7. Curvas granulométricas do solo-cimento a 11% .....	84
8. Curvas granulométricas solo-vinhaça (0,225 dm <sup>3</sup> /kg).	85
9. Curvas granulométricas solo-vinhaça (0,300 dm <sup>3</sup> /kg).	86
10. Perfil da seção transversal do trecho do canal revestido com solo-cimento a 11% .....	93
11. Perfil da seção transversal do trecho do canal revestido com solo-cimento a 9% .....	93
12. Perda de vinhaça, por infiltração, para os trechos do canal revestidos com solo-cimento .....	96
13. Relação entre o coeficiente de rugosidade "n" e o raio hidráulico, para os trechos do canal revestidos com solo-cimento.....	99

## LISTA DE QUADROS

Quadro	Pág.
1. Composição química da vinhaça (COPERSUCAR, 1979)...	7
2. Composição química da vinhaça de diferentes tipos de mosto (ORLANDO F <sup>o</sup> & LEME, 1984).....	7
3. Limites inferiores e superiores para velocidade média de escoamento da água em canais (PIZARRO et al. 1988).....	46
4. Perdas de vinhaça em canais de uso contínuo (MATIOLI, 1989).....	52
5. Perdas de vinhaça em canal de uso intermitente (MATIOLI, 1989).....	52
6. Dados operacionais de implementos modelo Copersucar utilizados na abertura de canais (PERTICARRARI, 1983).....	55
7. Custo relativo e capacidade operacional de equipamentos de abertura de canais, comparados com o modelo Copersucar (PERTICARRARI, 1983).....	55
8. Composição química do solo utilizado.....	64
9. Composição química da vinhaça concentrada.....	65
10. Composição granulométrica do solo, solo-cimento (9 e 11 %) e solo-vinhaça (0,225 e 0,300 dm <sup>3</sup> /kg), em porcentagem.....	80
11. Limites de consistência do solo e do solo-vinhaça concentrada, em porcentagem.....	87
12. Peso específico dos sólidos, em g/cm <sup>3</sup> .....	89
13. Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma$ máx) e umidade ótima ( $h$ ót) do ensaio de compactação.....	90

14. Resistência à compressão simples de corpos de prova de solo, solo-cimento (9 e 11 %) e solo-vinhaça concentrada (0,225 e 0,300 dm <sup>3</sup> /kg), em kgf/cm <sup>2</sup> .....	91
15. Perda de vinhaça, por infiltração, obtida pelo método do represamento nos trechos de solo-cimento, leituras realizadas no canal.....	94
16. Perda de vinhaça, por infiltração, obtida pelo método do represamento nos trechos de solo-cimento, leituras realizadas poço tranquilizador.....	95
17. Valores médios do coeficiente de rugosidade de Manning, para o trecho de solo-cimento a 11% .....	97
18. Valores médios do coeficiente de rugosidade de Manning, para o trecho de solo-cimento a 9% .....	98

---

**SOLO-CIMENTO E SOLO-VINHAÇA NO REVESTIMENTO DE CANAIS DE  
IRRIGAÇÃO PARA TRANSPORTE DE VINHAÇA: ADEQUAÇÃO FÍSICA E  
PARÂMETROS HIDRÁULICOS**

**Autor: EDUARDO TEIXEIRA DA SILVA**

**Orientador: Prof. Dr. WESLEY JORGE FREIRE**

**RESUMO**

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de se verificar a adequação do solo-cimento "plástico" e solo-vinhaça concentrada no revestimento de canais, em condições de campo, para condução de vinhaça "in natura", fornecendo parâmetros de projeto para a escolha do tipo de revestimento mais adequado.

Para tal, foi pesquisado um solo A 2-4(0), areno-argiloso, coletado na Usina Costa Pinto, município de Piracicaba, SP, local onde foi construído o canal experimental; utilizou-se, também, vinhaça concentrada a 30° Brix, obtida na Usina São Martinho, município de Pradópolis, SP. Uma vez coletado o solo, foram determinados a composição e distribuição granulométrica, os limites de consistência e os índices físicos, cujos resultados, juntamente com os do ensaio de compactação, permitiram determinar os teores mais adequados de cimento (9 e 11 %, em massa). Foram utilizadas as doses de vinhaça concentrada, correspondentes a 0,225 e

0,300 dm<sup>3</sup>/kg de solo, respectivamente. Os tratamentos foram submetidos aos mesmos ensaios anteriormente citados, e mais o ensaios de resistência à compressão simples.

Os dados obtidos foram estatisticamente analisados e os resultados permitiram que se tirassem algumas conclusões. No caso da vinhaça concentrada, houve pequeno e até mesmo negativo efeito das doses empregadas sobre as características do solo estudado o mesmo não ocorrendo com relação ao solo-cimento.

Após a caracterização físico-mecânica dos materiais empregados, foi construído um canal experimental com 5 trechos distintos, revestidos com solo-cimento "plástico" (11% e 9% de cimento, em massa, na mistura), solo-vinhaça concentrada (0,225 e 0,300 dm<sup>3</sup>/kg), além do trecho sem revestimento. Uma semana após o início de funcionamento do canal, os trechos com solo-vinhaça e sem revestimento haviam sido erodidos, permanecendo apenas os trechos revestidos com solo-cimento.

Avaliados em relação à perda de vinhaça por infiltração, observou-se que o trecho do canal revestido com 9% de cimento apresentou menor perda (0,15945 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*dia) que o trecho revestido com 11% de cimento, apresentando, também, menor coeficiente de rugosidade "n" de Manning.

De um modo geral, a aplicação de vinhaça concentrada, apresentou um péssimo padrão de comportamento quando utilizada para fins de revestimento de canais de irrigação e transporte de vinhaça.

SOIL-CEMENT AND SOIL-VINASSE ON IRRIGATION CHANNEL OVERLAY  
FOR TRANSPORTATION OF VINASSE: PHYSICAL ADEQUACY AND  
HYDRAULIC PARAMETERS

Author: EDUARDO TEIXEIRA DA SILVA

Adviser: Prof. Dr. WESLEY JORGE FREIRE

**SUMMARY**

This study was developed to investigate the adequacy of soil-cement "plastic" and soil-concentrated vinasse for channel overlay (service test), in field conditions for "in natura" flow of vinasse, furnishing project parameters for the optimum choice of overlay.

The following materials were used for the experiment: soil type A 2-4(0) sand-clayey collected at Costa Pinto sugar-cane plant, Piracicaba county, São Paulo State, in the same place where the experiment was located, and concentrated vinasse at 30° Brix, taken at São Martinho sugar-cane plant, Pradópolis county, São Paulo State.

Granulometric composition and distribution, toughness intervals and physical indexes were determined. These results combined with compactation tests, allowed determination of different levels of cement (9 and 11% in

weight). Levels of concentrated stillage, similar to 0,225 and 0,300 dm<sup>3</sup>/kg of soil were utilized. The treatments were subjected to the same tests listed before, more compactation the trial of resistance to simple compression.

Data were statistically treated. In the case of concentrated vinasse there was a small or negative effect of the different levels used on the characteristics of the studied soil, the same not occurring in relation to soil-cement.

After the physical and mechanical characterization of the materials used, a experimental channel was built with 5 (five) distinct paths covered by soil-cement "plastic" (11 and 9% cement in the mix), soil concentrated vinasse (0,225 and 0,300 dm<sup>3</sup>/kg), and a channel with no overlay. After a week in service the channel path of soil-concentrated stillage and of without overlay were eroded, and only the soil cement was kept functioning.

In relation to loss due to infiltration of vinasse the path of the channel covered with 9% cement presented lower loss than to the path with 11% cement overlay, presenting also a lower rugosity coefficient "n" of Manning.

In a general manner, the application of concentrated vinasse, presented an inadequate standard of behavior when utilized as overlay for irrigation channels and transportation of vinasse.

## 1 - INTRODUÇÃO

A vinhaça é o principal sub-produto gerado pelas destilarias de álcool, produzido na proporção de 13 a 15 litros por litro de álcool destilado, quantidade esta considerada relativamente muito grande; o problema é agravado, ainda, por se tratar de um líquido altamente poluente, caracterizado por uma elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

Diversos fatores interferem na composição química da vinhaça, sendo os mais importantes, segundo ORLANDO Fº (1981), a natureza e origem da matéria prima, bem como o tipo e condução do aparelho de destilação. Em função da sua composição química, a vinhaça pode ter diversos usos, dentre os quais destaca-se sua utilização "in natura" na fertirrigação sistemática da cana de açúcar, substituindo parcial ou mesmo totalmente as adubações minerais. A fertirrigação com vinhaça pode tornar-se interessante em solos de baixa fertilidade que exigem elevadas quantidades de resíduo por unidade de área, ou em locais onde o déficit hídrico seja acentuado e a prática da irrigação faz-se necessária. Os sistemas de fertirrigação normalmente exigem recal-

que do efluente para pontos de cota mais elevada, sendo o mesmo conduzido para os talhões, por gravidade, através de canais.

A utilização de revestimento em canais, para transporte de vinhaça, torna-se cada vez mais necessária, principalmente devido a possíveis infiltrações de vinhaça, que podem resultar em contaminação de aquíferos, redução das dimensões da seção transversal, prevenção de erosão, redução do arraste de partículas, melhoria das condições de manutenção e aumento do tempo de vida útil. A infiltração da vinhaça, aliada aos altos custos dos revestimentos convencionais, são os fatores mais decisivos no uso de revestimento em canais. A infiltração não somente causa o desperdício de vinhaça como pode causar poluição ambiental.

O revestimento de canais requer uma avaliação das vantagens e desvantagens, de tal forma a permitir a escolha mais adequada.

De entre os materiais alternativos, já empregados com sucesso no revestimento de canais de irrigação para transporte de água, está o solo-cimento.

Solo-cimento "plástico", é uma mistura íntima de solo pulverizado e cimento Portland, em quantidades definidas, combinados a uma quantidade de água suficiente para produzir, por determinado tempo, uma mistura de consistência similar a uma argamassa de revestimento, de maneira que

quaisquer outras formas da mistura de solo e cimento assumem, conseqüentemente, outros nomes, tais como, solo melhorado com cimento ou solo-cimento compactado.

O solo-cimento "plástico" tem maior teor de umidade e cimento que o solo-cimento compactado, sendo o mesmo usado no revestimento de canais já há algum tempo e em muitos países, relatando a literatura seu bom desempenho ao longo de muitos anos de serviço.

O solo constitui, em média, 85% dos componentes do solo-cimento e, embora quase todos os tipos de solo possam ser utilizados para tal fim, os solos economicamente viáveis se restringem apenas àqueles que necessitam de teores de cimento relativamente baixos e cuja execução em grande escala seja bastante facilitada.

A literatura é omissa quanto a definição de parâmetros hidráulicos para o dimensionamento de canais destinados ao transporte de vinhaça, da mesma forma que o é quanto às formas de revestimento mais adequadas para os referidos canais.

A fim de dar subsídios à elaboração de projetos de canais, realizou-se este trabalho que tem por objetivo a caracterização físico-mecânica dos materiais solo-cimento e solo-vinhaça, ora propostos no revestimento de canais para transporte de vinhaça "in natura", bem como a avaliação do desempenho dos revestimentos em condições de campo.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

A Cooperativa Central dos Produtores de Alcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR) relatou que, na medida em que a capacidade das destilarias e, conseqüentemente, a produção de álcool começou a se expandir de forma acelerada com a execução do Programa Nacional do Alcool, acentuou-se a necessidade imperiosa da análise das opções técnico-econômicas de aproveitamento da vinhaça. ORLANDO F<sup>o</sup> (1981) e ORLANDO F<sup>o</sup> & LEME (1984) afirmaram que a produção de um litro de álcool gera, em média, 13 litros de vinhaça, enquanto que, para VIEIRA (1986), essa geração é da ordem de 13 a 15 litros por litro de álcool destilado. VILLEN et al. (1981) destacaram que, se novos desenvolvimentos no processo de fabricação não forem implementados, a cifra aproximada de 13 litros de vinhaça por litro de álcool produ-

zido resultará num problema de grandes dimensões, em consequência do enorme volume de resíduo gerado.

De acordo com ALMEIDA (1952), a composição química da vinhaça é bastante variável, dependendo principalmente da composição do vinho submetido à destilação, o qual, por sua vez, está correlacionado com outros fatores, tais como: natureza e composição da matéria-prima, sistema usado no preparo do mosto, método de fermentação adotado, sistema de condução da fermentação alcoólica, raça da levedura utilizada, tipo de aparelho destilatório empregado e modo de destilação adotado. Como produto da destilação, ELIAS NETO (1988) afirmou que obtém-se, basicamente, o álcool e a vinhaça, à qual atribui três origens possíveis, conforme o tipo de mosto:

- vinhaça de mosto de caldo: produzida de caldo direto para a fermentação alcoólica, normalmente em destilarias autônomas;

- vinhaça de mosto de melaço: mosto preparado com melaço, subproduto da produção de açúcar, normalmente em destilarias anexas;

- vinhaça de mosto misto: mosto preparado com caldo direto e melaço, normalmente em destilarias anexas.

Segundo RITTNER (1980), ELIAS NETO (1988) e ORLANDO F<sup>o</sup> & LEME (1984), em virtude de seu elevado teor de matéria orgânica (88,68% em base seca), a vinhaça apresenta

uma DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) elevada, o que a torna altamente poluente. ELIAS NETO (1988), comentando o lançamento deste despejo em cursos de água, prática, aliás, proibida no Brasil, exemplifica o problema considerando uma destilaria de pequeno porte que produz 100.000 l/dia de álcool, correspondente a 1.500.000 l/dia de vinhaça. A partir de uma concentração média de 200.000 mg/l, tem-se uma carga orgânica de 30 t/dia de DBO, equivalente a uma população de 500.000 habitantes. CASTELLO et al. (1980) afirmam que, se a produção de vinhaça prevista para 1983, 60 bilhões de litros, fosse lançada em cursos de água, seu efeito poluente equivaleria àquele produzido pela contribuição em matéria orgânica de uma população de 70 milhões de habitantes.

A composição química da vinhaça está apresentada nos Quadros 01 e 02, mostrando-se a mesma variável em função da natureza do mosto. Tanto a COPERSUCAR (1979) como FERREIRA & MONTEIRO (1987) constataram ser a vinhaça um resíduo rico em matéria orgânica e potássio, relativamente pobre em nitrogênio e carente de fósforo; além destes elementos, apresenta teores apreciáveis de cálcio, magnésio e enxofre, e menores quantidades de outros elementos.

QUADRO 01 - Composição química da vinhaça (COPER-SUCAR, 1979).

Elementos *	Tipo de mosto		
	Melaço	Misto	Caldo
Nitrogênio (N)	1,18	0,70	0,28
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,15	0,11	0,13
Potássio (K <sub>2</sub> O)	7,83	4,57	1,22
Cálcio (CaO)	3,64	1,72	0,69
Magnésio (MgO)	0,99	0,66	0,21
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	6,40	3,73	0,62
Carbono (C)	19,20	11,50	5,90
Matéria-orgânica	63,40	38,00	19,50
Relação C/N	16,27	16,43	21,07

\* Valores em kg/m<sup>3</sup> de vinhaça.

QUADRO 02 - Composição química da vinhaça de diferentes tipos de mosto (ORLANDO F<sup>o</sup> & LEME, 1984).

Elementos	Tipo de mosto		
	Melaço	Misto	Caldo
Nitrogênio (N) *	0,57-0,79	0,33-0,48	0,26-0,35
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) *	0,10-0,35	0,09-0,61	0,09-0,50
Potássio (K <sub>2</sub> O) *	3,50-7,60	2,10-3,40	1,10-2,00
Cálcio (CaO) *	1,80-2,40	0,57-1,46	0,13-0,76
Magnésio (MgO) *	0,84-1,40	0,33-0,58	0,21-0,41
Sulfato (SO <sub>4</sub> ) *	1,05	1,60	2,03
Mat. orgânica *	37,3-56,9	19,1-45,1	15,3-34,7
Ferro **	52-120	47-130	45-110
Cobre **	3-9	2-57	1-18
Zinco **	3-4	3-50	2-3
Manganês *	6-11	5-6	5-10
pH	4,0-4,5	3,5-4,5	3,5-4,0

\* Valores em kg/m<sup>3</sup> de vinhaça.

\*\* Valores em ppm.

LIMA (1976) considera a vinhaça de destilarias de álcool como um resíduo composto de 93% de água e 7% de sólidos; destes, 5% são matéria orgânica, em quase sua totalidade de natureza coloidal. O pH, no caso, varia de 3,7 a 5,9.

THIAGO (1980) relatou que na vinhaça, ao contrário do esgoto sanitário, não estão presentes bactérias patogênicas, vírus, metais pesados ou policlorados orgânicos, o que a torna matéria prima de certo valor comercial, capaz de aumentar a rentabilidade dos complexos agroindustriais.

### 2.1 - Utilização agrícola da vinhaça

Segundo MATIOLI (1989), além do consagrado uso agrícola na fertirrigação de canaviais, existem outras alternativas para aproveitamento da vinhaça. Tais alternativas apresentam-se bastante polêmicas, quer sob o ponto de vista técnico quanto econômico. THIAGO (1980) relata que os principais produtos que podem ser extraídos da vinhaça estão englobados em três grandes grupos: fertilizante, ração animal e gás metano; a viabilidade econômica do processo de extração desses produtos depende, entretanto, dos seguintes fatores: escala de produção, competitividade comercial com produtos sucedâneos convencionais e condições de financia-

mento. De acordo com Sheehan & Greenfield (1980), citados por VILLEN et al. (1981), diversos processos têm sido considerados para o tratamento da vinhaça: utilização direta da vinhaça na fertirrigação, concentração por evaporação, digestão anaeróbia, fermentação aeróbia e tratamento físico-químico. Para RITTNER (1980), muitas são as alternativas viáveis: despejo da vinhaça em áreas de sacrifício, utilização como adubo na própria lavoura de cana, estocagem em lagoas sanitárias. Fermentação controlada do resíduo para produção de gás metano utilizável como combustível, concentração e eventual secagem para obtenção de concentrados armazenáveis destinados a uso como adubo ou como componentes de rações balanceadas. Segundo LIMA (1976), as aplicações mais destacadas são: alimentação animal, meio de cultura para desenvolvimento de microrganismos com vistas à produção de concentrados protéicos, matéria prima para produção de sais, recurso alternativo para produção de energia através de fermentação metanogênica, concentração e secagem; este mesmo autor afirma que, à primeira vista, todos estes tópicos são importantes, mas nenhum deles apresenta maiores vantagens que a utilização "in natura" como fertirrigação a curtíssimo e a curto prazo.

A COPERSUCAR (1979) apresenta algumas considerações sobre a exeqüibilidade das alternativas de aproveitamento da vinhaça, a saber:

- produção de proteína celular: a produção de biomassa através de fermentação aeróbia da vinhaça não deve ser encarada como uma solução global do problema, mas como uma opção complementar, sendo necessário efetuar um tratamento especial dos resíduos a serem descartados; a biomassa produzida por esse processo, para uso na ração animal, deve ser consumida em regiões próximas às destilarias, por causa do alto custo de transporte bem como das dificuldades de estocagem do produto. **Todavia, estudos realizados** apresentam a proteína obtida a partir da soja como forte concorrente daquela elaborada a partir da biomassa, em função do seu menor custo de produção;

- produção de gás metano: ressalta-se que, dado o baixo teor de sólidos na vinhaça "in natura", o rendimento da produção de metano é baixo, acarretando elevado custo do produto. A produção de metano constitui-se numa solução parcial do problema de sua destinação final, já que o efluente da fermentação anaeróbia apresenta um elevado teor de DBO, tornando necessária a aplicação de um outro processo associado. Esta alternativa constitui, portanto, uma opção apenas complementar;

- vinhaça como fertilizante: a utilização da vinhaça como fertilizante permite alcançar o objetivo de não poluir o ambiente, uma vez que todo o resíduo formado é devolvido ao solo. A possibilidade de arraste superficial

pela chuva e conseqüente contaminação dos cursos de água é desprezível, se a fertirrigação for feita dentro de critérios técnicos já comprovados experimentalmente;

- concentração da vinhaça: dependendo da natureza da vinhaça, da fonte de combustível empregada e dos aspectos econômicos, a concentração de vinhaça a 60° Brix poderá ser viável. O processo convencional de concentração industrial consiste em um pre-tratamento térmico e de vários estágios de evaporação, bem como de uma série de outras medidas que visam economizar vapor. O concentrado teria emprego no arraçoamento animal sob a forma de ração concentrada ou mesmo no solo, como fertilizante.

ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983) apresentaram as seguintes alternativas de utilização da vinhaça: produção de proteínas unicelulares, através da fermentação aeróbia; produção de gás metano, através da fermentação anaeróbia; concentração a aproximadamente 60° Brix, com possibilidade de uso como componente de ração animal; utilização como adubo; queima para produção de fertilizantes e, ainda, a utilização "in natura" em substituição total ou parcial a adubações minerais.

ELIAS NETO (1988), conduzindo estudo sobre a biodigestão da vinhaça com reator anaeróbio de manta de lodo, destaca as vantagens deste processo, favoráveis à fertirrigação com o efluente: a vinhaça biodigerida não perde seu

poder fertilizante; a vinhaça fica mais neutra e mais fria, contribuindo com a redução de custos referentes aos desgastes de equipamentos, tanques de caminhões, tubulações e bombas; o armazenamento da vinhaça biodigerida provoca menor impacto ambiental; o biogás pode ser utilizado na própria frota de caminhões-tanques, ou em sistemas estacionários de bombeamento, reduzindo os custos da fertirrigação.

## 2.2 - Utilização da vinhaça como fertilizante

Os primeiros estudos relativos aos efeitos da aplicação da vinhaça "in natura" ao solo foram realizados por ALMEIDA et al. (1950). Os autores concluíram que a aplicação de vinhaça ao solo não aumenta a sua acidez; muito pelo contrário, provoca uma elevação do pH, elevação esta tanto mais pronunciada quanto maior a quantidade de vinhaça aplicada ao solo. Observaram os autores que, em aplicações maiores ou iguais à 500 m<sup>3</sup>/ha, ocorria um aumento progressivo do poder de embebição do solo e uma melhoria nas propriedades físicas do solo.

FERREIRA & MONTEIRO (1987) afirmaram que a adição de vinhaça "in natura" ao solo é, sem dúvida, uma boa opção para aproveitamento deste resíduo, visto ser ele um exece-

lente fertilizante que proporciona inúmeros benefícios nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

A incorporação de vinhaça aos solos provoca, na maioria das vezes, certas alterações em suas características físicas, químicas e biológicas, dentre as quais FERREIRA & MONTEIRO (1987) destacam: elevação do pH; alteração da CTC (Capacidade de Troca Catiónica); maior desenvolvimento da microflora e microfauna do solo; melhor estruturação (o húmus age como agente cimentante das partículas do solo, formando agregados estáveis), melhor circulação de água e ar e menor susceptibilidade à erosão.

Analisando a constituição da vinhaça, GLORIA & ORLANDO F<sup>o</sup> (1983) notaram que, independentemente do seu tipo, predomina na fração sólida desse resíduo a matéria orgânica, sendo evidente que a adição de vinhaça ao solo corresponde, em primeiro lugar, a uma fertilização orgânica, devendo-se esperar, neste caso, todos os efeitos que geralmente são atribuídos à matéria orgânica, quando adicionada aos solos, isto é: elevação do pH; aumento da disponibilidade de alguns nutrientes; aumento do poder de retenção de água; melhoria da estrutura física do solo, através da ação direta da vinhaça aglutinando as partículas do solo e melhorando sua porosidade, ou através da ação indireta, pelo aumento de atividade microbiológica nos solos.

A aplicação de vinhaça na soqueira da cana de açúcar pode influenciar, positiva ou negativamente, algumas características do solo e do produto; de entre elas, SANTANA (1985) citou: elevação do pH; aumento da disponibilidade de alguns nutrientes; aumento da capacidade de retenção de água; melhoria na estrutura física do solo; aumento da população microbiana; imobilização de certos nutrientes; aumento da produtividade, aumento do número de cortes da cana, redução no teor de sacarose, atraso na maturação e um certo acúmulo de cinzas e amido no caldo.

MATIOLI (1989), citando trabalhos desenvolvidos pela COPERSUCAR (1989), afirma que a fertilização mineral da cana de açúcar, tanto no plantio como nas socas e ressocas subseqüentes, é prática indispensável e limitante na produção agrícola. A crescente elevação dos preços dos fertilizantes determina uma participação cada vez maior deste insumo no custo de produção da cana, gerando a necessidade de novos estudos que visem outras fontes alternativas de nutrientes, ou práticas que permitam maior eficiência no aproveitamento dos produtos atualmente usados.

A COPERSUCAR tem ressaltado sempre a marcante participação da matéria orgânica na manutenção da fertilidade do solo, contribuindo grandemente para a elevação das cargas negativas do complexo coloidal e determinando, em consequência disto, um correspondente aumento da capacidade

de troca catiônica. Esse aumento de carga faz com que os íons naturais do solo, adicionados através de fertilizantes químicos, sejam absorvidos com maior intensidade pelos colóides do solo, melhorando a eficiência do seu aproveitamento e minimizando consideravelmente o processo de lixiviação. Além do mais, a adição de matéria orgânica, atuando como material cimentante, beneficia a reestruturação do solo, com acentuada melhoria das suas propriedades físicas. A alta capacidade de retenção no solo é outra qualidade a ele conferida pela matéria orgânica, beneficiando diretamente as culturas e indiretamente o desenvolvimento da microflora e microfauna.

MATIOLI (1989) afirmou que, além dos aspectos puramente técnicos, a aplicação de vinhaça nas lavouras estaria pondo em prática a filosofia de devolver à terra, senão tudo, pelo menos parte do que dela havia sido extraído. Afirma ainda que:

- os processos de transformação pelos quais passa a vinhaça no solo resultam em elevação do pH;

- a fração orgânica e coloidal desempenha papel importante, não só pela própria contribuição para os conhecidos efeitos da matéria orgânica mas, também, pelo aumento do poder de adsorção do solo, minimizando ou mesmo evitando a lixiviação de elementos minerais, como por exemplo o K e Ca;

- sob o ponto de vista da própria planta, deve-se considerar que a vinhaça é um produto fertilizante desbalanceado, devendo sua utilização obrigatoriamente levar em consideração os tipos de solo, épocas e doses de aplicação, bem como possíveis complementações com outros fertilizantes;

- a aplicação de doses exageradas de vinhaça, provenientes principalmente do mosto de melaço ou misto, geralmente acima de 100 m<sup>3</sup>/ha (para solos argilosos) ou 150 m<sup>3</sup>/ha (para solos arenosos), além de provocar exuberante desenvolvimento vegetativo, acarreta marcantes alterações na curva de maturação, retardando ou mesmo evitando a maturação da cana e contribuindo para o aumento de cinzas no caldo e no açúcar produzido. Estes fatos, porém, de forma alguma anulam ou reduzem o potencial de utilização deste resíduo das destilarias como fertilizante para a cana de açúcar, mas simplesmente enfatizam a necessidade de seu uso racional.

### 2.3 - Sistemas de aplicação e transporte de vinhaça

Os sistemas utilizados atualmente para transporte e aplicação de vinhaça na lavoura canavieira, segundo MATIOLI (1989), são os seguintes: áreas de sacrifício, sulcos de infiltração, veículos-tanques convencionais, montagem direta de aspersão, transporte dutoviário, bí-carga, caminhão-aspersão e auto-propelido com carretel enrolador.

VIEIRA (1986) definiu a fertirrigação como sendo um processo conjunto de irrigação e adubação, ou seja a utilização da própria água de irrigação para conduzir e distribuir o adubo químico na lavoura. Na fertirrigação, a lâmina hídrica de irrigação é calculada em função da capacidade de retenção de água do solo, e a frequência de irrigação, com base no consumo de água pela cultura. No que concerne à vinhaça, a denominação fertirrigação, embora de uso generalizado, não é de todo correta, porque essa técnica visa essencialmente a substituição da adubação mineral, constituindo a quantidade de água aplicada através da vinhaça o suprimento mínimo para a cultura. Praticamente não se controla o volume de água aplicado e muito menos a frequência das aplicações, interessando apenas o teor de  $K_2O$  aplicado, juntamente com a vinhaça.

Segundo ORLANDO F<sup>o</sup> (1981), a fertirrigação exige normalmente recalque do efluente para pontos de cotas mais elevadas, sendo o mesmo conduzido para os talhões por gravidade, através de canais. A construção dos canais e o estabelecimento de bombas e tubulações exigem investimentos elevados, como também cuidados e alto custo de manutenção.

A rede de canais utilizada nos sistemas de fertirrigação, segundo VIEIRA (1986), deve ser dimensionada de acordo com os parâmetros hidráulicos: vazão, natureza das paredes e declividade. Os canais trapezoidais são mais eficientes e estáveis, notadamente quando não são revestidos. O autor ressalta que o perfeito dimensionamento hidráulico da rede de distribuição é fundamental para o êxito da fertirrigação com vinhaça.

### 2.3.1 - Áreas de sacrifício ou despejo

As áreas de despejo funcionam, segundo MATIOLI & MENESES (1984), como órgãos de segurança para os outros sistemas; normalmente estas áreas localizam-se próximas ao pátio industrial, apresentando-se sem cana e com a finalidade exclusiva de dar aos resíduos um destino antipolvente.

Os autores citados afirmaram também que a aplicação de vinhaça em áreas de despejo, além de não constituir-

se em uso racional desse resíduo, é considerada atualmente, por parte da CETESB, uma prática proibida, pois incorre-se no risco de contaminação do lençol freático. O dimensionamento destas áreas, segundo os autores, é função da capacidade de absorção do solo, sendo o manejo dos resíduos realizado normalmente, segundo um esquema de rodízio estabelecido para enchimento dos sulcos ou terraços.

### 2.3.2 - Sulcos de infiltração

ORLANDO F<sup>o</sup> (1981) e ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983) demonstraram que este sistema exige uma prévia preparação do terreno com canais principais trapezoidais ou triangulares, com declividades máximas de 0,5 a 1,0 %, os sulcos formando pequenos ângulos com os canais, ou quase a eles paralelos. De acordo com a topografia do terreno, os canais principais poderão estar distanciados de 200 a 500 m. O tráfego de veículos entre os talhões deve ser feito através de carregadores situados ao lado e a montante dos canais principais, facilitando a manutenção dos mesmos.

Com a finalidade de diminuir a velocidade do líquido e consequentemente possíveis erosões, ORLANDO F<sup>o</sup> (1981) e ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983) afirmaram que a alimentação dos sulcos deve ser feita através de chicanas perpen-

diculares à "cabeça" dos sulcos de plantio, canais diagonais a partir do canal principal, ou tubulação janelada de PVC flexível, posicionada no talhão de forma semelhante à das chicanas e dos canais diagonais, porém com a vantagem de permitir a transferência para outros locais de alimentação.

Os sulcos de infiltração devem ter comprimento variável de 80 a 100 m, para solos arenosos, e superiores a 150 m, para solos argilosos, de acordo com ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1984). A vazão de entrada na "cabeça" dos sulcos não deve exceder a 3 l/s.

MATIOLI & MENESES (1984) afirmaram que a implantação deste sistema de aplicação racional de resíduo líquido deve ser encarada como um sistema de irrigação por sulcos de infiltração propriamente dito, ou seja, executando-se uma rigorosa sistematização do terreno, de acordo com a topografia e tipo de solo. Somente assim é possível atingir eficiência de aplicação e facilidade operacional.

Os autores citados ainda afirmaram que o sistema de sulcos de infiltração, quando implantados sem considerar as exigências retro-mencionadas, provoca demanda de muita mão de obra, além de aplicação de dosagens excessivas e desuniformes, que podem implicar em graves prejuízos para a cultura e o solo.

O grande volume de resíduo produzido numa agroindústria sucro-alcooleira exige extensas áreas para aplicação racional. Diante da dificuldade de se dispor dessas áreas com características adequadas ao sistema de sulcos de infiltração, sua difusão pode ser considerada bastante restrita.

### 2.3.3 - Caminhões-tanques

O sistema de aplicação com caminhões-tanques, segundo MATIOLI & MENESES (1984), é o mais difundido para distribuição de vinhaça pura, realizando uma aplicação com certo controle e considerável uniformidade, sendo ele normalmente conjugado com outros sistemas, principalmente com uma área de despejo. Esta área destina-se a receber a totalidade das águas residuárias e o excedente de vinhaça que os caminhões não aplicam por motivos adversos à perfeita operação da frota.

Os autores afirmaram que o sistema de caminhões-tanques está limitado principalmente pela distância econômica do ponto de carregamento às áreas de aplicação. Esta distância econômica é calculada em função do custo da adubação mineral, existindo, portanto, uma distância máxima a partir da qual a aplicação torna-se antieconômica.

Os caminhões-tanques (tanque acoplado a um chassi de caminhão ou sobre carreta) transportam a vinhaça das destilarias aos talhões, onde realizam a aplicação com considerável uniformidade. A abertura da válvula aplicadora é, normalmente, realizada dentro ou próximo da cabina do motorista, a fim de melhor racionalizar o processo de distribuição.

Este método, segundo ORLANDO F<sup>o</sup> (1981), ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983) e ORLANDO F<sup>o</sup> & LEME (1984), requer estradas e carreadores em bom estado de conservação, frota de veículos, sistematização dos talhões, ausência de barrancos e obstáculos para melhor movimentação dos veículos e um planejamento de corte de cana de modo a permitir a aplicação da vinhaça 24 horas/dia.

As desvantagens desse sistema são a compactação do solo pelos veículos, a impossibilidade de aplicação em cana-planta e a inviabilidade de diluição da vinhaça com efluentes industriais, pois a concentração da vinhaça determina as distâncias econômicas a serem alcançadas pelos caminhões e as dificuldades de aplicação em dias de chuva.

ORLANDO F<sup>o</sup> (1981) e ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983) afirmaram que a durabilidade média dos tanques depende da manutenção e do material empregado, sendo que diversas unidades estão utilizando tanques de fibra de vidro.

Durabilidades médias estimadas para tanques utilizados no transporte e aplicação de vinhaça são, segundo ORLANDO F<sup>o</sup> (1981), as seguintes:

Material	Durabilidade média
Aço carbono 1010/1020	2 a 3 safras
Aço carbono naval	3 a 4 safras
Aço inox	7 a 8 safras

A capacidade dos tanques, segundo os autores, é variável, oscilando entre 7 e 18 m<sup>3</sup>, podendo os caminhões ter dois ou três eixos, em função do volume do tanque. Os veículos de maior capacidade transportam e aplicam o resíduo mais economicamente, porém, os de menor capacidade apresentam maior versatilidade, principalmente para manobras nos talhões, assim como para movimentação em terrenos mais acidentados.

Neste sistema destacam-se dois processos, segundo MATIOLI & MENESES (1984) e ORLANDO F<sup>o</sup> & LEME (1984): por gravidade e por saída forçada.

2.3.3.1 - Processo por gravidade: este processo, segundo MATIOLI & MENESES (1984), utiliza-se de tanques com barras aplicadoras sendo o descarregamento da vinhaça feito por gravidade. Apresenta, como fator limitante, o efeito da variação da carga hidráulica na uniformidade de aplicação, cujas consequências são agravadas com o uso de baixas dosagens (vinhaça concentrada). Este sistema, de acordo

com ORLANDO Fº et al. (1983) e ORLANDO Fº & LEME (1984), permite a aplicação da vinhaça através do escoamento por gravidade. Como se pode deduzir, esta técnica apresenta, sob um ponto de vista bastante rigoroso, certa heterogeneidade de aplicação, pois no início há maior volume de vinhaça no tanque, maior pressão e, por conseguinte, maior vazão. Com a diminuição do volume de vinhaça no tanque, registra-se menor pressão. Este fator impede a uniformidade de aplicação, cujas consequências são maiores quando se utiliza baixa quantidade do resíduo. Uma forma de contornar o problema da distribuição de vinhaça por gravidade é diminuir a velocidade do veículo após aplicação de metade da carga do tanque. Outro fator considerado é o baixo rendimento operacional, levando-se maior tempo para a completa aplicação da carga. Os terrenos mais acidentados apresentam maiores limitações para o uso desse sistema.

A aplicação por gravidade, segundo ORLANDO Fº et al. (1983), ORLANDO Fº & LEME (1984), MATIOLI & MENESES (1984) e MATIOLI et al. (1988), é bastante simples, apresentando baixos custos, quando comparada ao caminhão-tanque com aplicação por saída forçada.

Para a COPERSUCAR (1979), ORLANDO Fº et al. (1980), ORLANDO Fº et al. (1983), ORLANDO Fº & LEME (1984) e MATIOLI & MENESES (1984), dentre as variações do processo de aplicação de vinhaça por gravidade destacam-se quatro:

jato dirigido em duas entrelinhas, jato dirigido em três entrelinhas, chuveiro e descarga rápida.

Jato dirigido em duas entrelinhas: tal sistema consiste em aplicar vinhaça em jatos dirigidos, visando duas entrelinhas de cana. Este processo foi inicialmente desenvolvido objetivando diminuir o contato da vinhaça quente com a planta, nos casos de aplicações tardias do resíduo, evitando-se com isso possível queima das folhas.

Posteriormente, verificou-se que os danos sobre a superfície foliar, mesmo com a vinhaça quente, são mínimos e, com as recomendações de utilização do resíduo logo após a colheita e o tratamento do palhiço residual, tal efeito é praticamente eliminado. Atualmente, o mencionado processo encontra-se em desuso pelas unidades produtoras, pelo fato de que, dependendo da quantidade a ser aplicada por hectare e do diâmetro da saída na aplicação, poderá haver ligeira erosão do solo;

Jato dirigido em três entrelinhas: neste caso, a descarga do tanque é realizada por três jatos dirigidos, objetivando alcançar três linhas de cana. Os apologistas deste sistema destacam as seguintes vantagens: o fato de se concentrar a aplicação do resíduo (água + nutrientes + matéria orgânica) em uma região onde haverá maximização do aproveitamento do mesmo, inclusive forçando uma melhor

brotção da soca, principalmente para o início da safra, quando ocorre déficit hídrico no solo. A outra vantagem seria a menor germinação de ervas daninhas em virtude da vinhaça não atingir a entrelinha, facilitando, portanto, o seu controle. Não se encontra, na bibliografia disponível, trabalhos que realmente comprovem tais vantagens, devendo as mesmas ser testadas experimentalmente. A principal desvantagem está na aplicação de quantidades elevadas, quando então as saídas deverão ser de maior diâmetro o que poderá, também, dependendo do tipo de solo, causar problemas de erosão;

Chuveiro: o processo de distribuição da vinhaça por gravidade através de "chuveiro" é um dos mais difundidos na região centro-sul do país. Consiste em utilizar a barra aplicadora com perfurações que permitem a distribuição do resíduo em toda superfície do solo. Normalmente, a tubulação de saída do tanque é de 4 polegadas, valor igual ao somatório dos diâmetros das perfurações. Os primeiros chuveiros eram compostos de barra reta, de largura em torno de 2,20 m. Atualmente, visando atingir uma área maior em cada passada, as barras têm suas extremidades recurvadas, ("meia-lua"), permitindo atingir faixas com cerca de 4,00 m de largura. Neste sistema, ocorrendo menor impacto do líquido no solo, os problemas de erosão são minimizados;

Descarga rápida: o processo de descarga rápida é utilizado apenas em tanques de maior capacidade (14 a 18 m<sup>3</sup>). Uma tubulação de 12" alimenta uma barra aplicadora de 6", de onde emergem 6 saídas de 3", sendo a vinhaça defletida em pratos. Com isso há formação de um leque, atingindo em média cinco linhas de cana. O tempo de descarga é abreviado (até 4 m<sup>3</sup>/min) e, dentre os sistemas de aplicação do resíduo por gravidade, é o que alcança faixas mais longas. A principal desvantagem do sistema é a heterogeneidade de aplicação, ou seja, a distribuição é melhor quando o tanque está cheio e, à medida que a carga vai sendo aplicada, há uma diminuição da largura da faixa atingida pelo resíduo.

#### 2.3.3.2 - Processo de descarga por bombas

Esse processo consiste na aplicação da vinhaça sob pressão, através de um bico defletor, utilizando-se de bomba ou compressor, segundo MATIOLI & MENESES (1984). A vantagem principal deste processo consiste na aplicação rápida com rendimento maior, apresentando a princípio melhor uniformidade de distribuição do que no caso de aplicação por gravidade. O maior rendimento está associado à maior faixa de terreno abrangida por passada, atenuando o problema de compactação do solo. Outra vantagem deste processo a

ser destacada é a possibilidade de aplicar a vinhaça nas bordas dos talhões, quando da impossibilidade de trânsito nos mesmos, com os veículos percorrendo apenas os carreadores. A desvantagem principal reside na aquisição de mais equipamentos (tubulação, bomba, compressor), que resulta em maior investimento inicial e maior custo de manutenção. Esta desvantagem desestimula a difusão do processo e, em alguns casos, à sua contraindicação.

No processo por saída forçada, quatro variações principais foram desenvolvidos, segundo a COPERSUCAR (1979), ORLANDO F<sup>o</sup> (1981), ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983) e MATIOLI & MENESES (1894): com bomba acionada pela tomada de força do caminhão, com grupo moto-bomba independente, com compressor acionado pela tomada de força do caminhão e VDV (Veículo Distribuidor de Vinhaça).

Bomba acionada pela tomada de força do caminhão: o processo, mais utilizado atualmente, consiste na distribuição da vinhaça sob pressão através de um bico defletor, utilizando-se uma bomba acionada pela tomada de força da caixa de transmissão do motor do próprio caminhão, segundo MATIOLI (1989). A vantagem deste processo consiste numa aplicação rápida com rendimento maior e, a princípio, apresenta melhor uniformidade de distribuição que no caso de aplicação por gravidade. No entanto, a influência do vento sobre o jato e a variação da aceleração

do motor do caminhão podem afetar essa uniformidade. Por outro lado, a vinhaça é distribuída numa larga faixa do terreno (10 a 11 m) diminuindo as possibilidades de compactação, uma vez que os caminhões perfazem uma passada a cada 8 ruas de cana. A desvantagem principal está associada à aquisição de equipamentos, que resulta em maior investimento inicial e maior custo de manutenção;

Grupo moto-bomba independente: caracteriza-se pelo acoplamento ao caminhão-tanque de um grupo moto-bomba independente do motor do caminhão, que recalca a vinhaça através da barra aplicadora dotada de bicos com defletor. As vantagens são praticamente as mesmas salientadas no processo de aplicação com bomba acionada pela tomada de força, não apresentando, no entanto, o inconveniente da desuniformidade em função da aceleração do caminhão. As desvantagens deste processo estão relacionadas com a exigência de maior investimento inicial, associado ao aumento de despesas de manutenção com o mesmo, e ao maior consumo de combustível. Atualmente, face as desvantagens apresentadas, não é considerado uma opção viável, causando desinteresse por parte das usinas;

Compressor acionado pela tomada de força do caminhão: o processo consiste, segundo MATIOLI (1989), de um caminhão-tanque provido de um sistema de pressurização do tanque através de um compressor, que distribui a vinhaça

através de um bico defletor. A largura da faixa de aplicação é de 7,0 m e o sistema de pressurização do tanque é acionado pela tomada de força do caminhão. Neste processo foram constatados inúmeros inconvenientes pelas poucas usinas que o experimentaram, especialmente elevados custos de manutenção, tornando-se desaconselhável sua utilização;

Veículo distribuidor de vinhaça (V.D.V.): segundo a COPERSUCAR (1979) e MATIOLI (1989), o veículo distribuidor de vinhaça, consiste de uma carreta-tanque com capacidade para aproximadamente 15 m<sup>3</sup>, a qual é tracionada por um trator que trabalha somente com as rodas traseiras, sendo que a carreta opera com pneus de baixa pressão (pneus de avião), proporcionando menor compactação do solo. O conjunto é dotado de um sistema propulsor, composto de uma bomba acoplada ao trator que recalca a vinhaça, distribuindo-a através de um bico defletor localizado na extremidade superior do tanque. A vinhaça é transportada, através de caminhões-tanques, da indústria para os talhões de cana onde encontram-se os V.D.V. e a transferência da vinhaça é realizada pela própria bomba acionada pelo trator de cada conjunto. Os V.D.V. apresentam, como vantagens, a redução da compactação do solo em função do uso de pneus especiais, a facilidade de manejo, melhor retorno ao talhão, manobras rápidas nos carregadores evitando o "pisoteamento" das soqueiras, a aplicação em dias chuvosos uma vez que os

caminhões-tanques transitam somente em estradas e carreadores principais, não entrando nos talhões de cana; a aplicação dá-se numa faixa de aproximadamente 10 m de largura. Como desvantagem apresenta um maior investimento inicial, visto que, para um bom rendimento em distâncias médias de 10 km, é necessário dispor de 3 caminhões para transportar a vinhaça a um V.D.V., necessidade esta que aumenta com a distância média das áreas de aplicação; exigem **carreadores bem conservados para trânsito dos caminhões em dias chuvosos**; os pneus, por serem de baixa pressão, furam com certa facilidade. Todavia, este processo é muito pouco difundido nas usinas e destilarias do país.

#### 2.3.4 - Custos e distâncias máximas de aplicação de vinhaça com caminhões-tanques

A aplicação de vinhaça, segundo MATIOLI et al. (1988), é prática comum na grande maioria das usinas e destilarias, podendo-se afirmar que atualmente o volume de vinhaça aplicado por este sistema supera de maneira relevante os demais sistemas alternativos, como aspersão (montagem direta, convencional, autopropelido) e sulcos de infiltração. MATIOLI & MENESES (1984) afirmaram que, o sistema de caminhões-tanques convencionais está limitado principalmen-

te pela distância econômica do ponto de carregamento às áreas de aplicação. Esta distância econômica é calculada em função do custo da adubação mineral substituída, existindo, portanto, uma distância máxima a partir da qual a fertirrigação torna-se antieconômica. Outra limitação apontada é a baixa uniformidade de distribuição, proporcionada por este sistema, quando comparado com o sistema de aspersão por montagem direta.

**Os custos do sistema de caminhões-tanques foram**

estudados por ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1980), que mostraram a vantagem da utilização de tanques de maiores capacidades (15 m<sup>3</sup>), resultando em implicações diretas na redução do número de viagens por dia, com conseqüente diminuição da frota caminhoneira e dos custos de aplicação por unidade de área.

Para uma aplicação de 150 m<sup>3</sup>/ha, SANTANA (1985) calculou os custos em função da distância, para caminhões-tanques movidos a álcool aditivado, tipo Mercedes-Bens 2213, com 3 eixos, equipados com tanques de 15 m<sup>3</sup> em PVC revestidos com fibra de vidro. O autor optou pelo sistema "por gravidade", justificando que, embora não apresente boas características em termos de uniformidade de aplicação do fluido, é um dos mais econômicos e apresenta o menor custo por hectare em função da distância percorrida.

MATIOLI et al. (1988) desenvolveram um modelo matemático técnico-econômico computadorizado, que calcula o custo/m<sup>3</sup> em função da distância da área de aplicação. Os autores analisaram o desempenho do caminhão MB-2213 diesel (truck), com tanque de 15 m<sup>3</sup>, para diversas faixas de distâncias, quando foram medidas 329 viagens representativas do ciclo de aplicação da vinhaça.

#### 2.3.5 - Aspersão: sistema montagem direta

LEME et al. (1979), ORLANDO F<sup>o</sup> et al. (1983), MATIOLI & MENESES (1984) e MATIOLI et al. (1988) afirmaram que a aplicação de vinhaça, diluída com águas residuais ou não, pode ser realizada através de sistemas de irrigação por aspersão, com destaque para o sistema convencional e, principalmente, para o sistema de montagem direta.

Montagem direta, segundo MATIOLI & MENESES (1984) e MATIOLI et al. (1988), consiste basicamente num conjunto moto-bomba, acoplado a um aspersor tipo canhão, montados em chassis com rodas. A máquina, quando em funcionamento, atinge um diâmetro molhado de aproximadamente 140 m. Ela é estacionária e succiona os resíduos diretamente de canais, espaçados entre si de aproximadamente 100 m, dependendo das características topográficas do terreno. Os pontos de estação da montagem direta ao longo dos canais

também são espaçados entre si de aproximadamente 100 m, de modo que as posições da máquina perfazem uma rede com malhas de 100 m X 100 m e, conseqüentemente, em cada posição, a máquina irriga uma área de aproximadamente 1 hectare.

Os autores afirmaram que o processo não exige grandes sistematizações do terreno, como no caso de sulcos de infiltração, mas a construção de canais com carregadores ao lado, para locomoção dos equipamentos do sistema, implica numa reformulação da lavoura no tocante ao formato dos talhões.

LEME et al. (1979) apresentaram algumas vantagens e limitações do sistema montagem direta. As vantagens são:

- não há necessidade de sistematização do terreno ou sulcação em desnível;
- pode ser usado em áreas com declive acentuado;
- pode operar em qualquer tipo de solo;
- perfeito controle da quantidade de vinhaça aplicada;
- irriga grandes áreas por unidade de tempo;
- economia de mão-de-obra;
- baixo custo operacional por unidade de área;

Dentre as limitações os autores citaram:

- variações instantâneas na direção do vento podem comprometer a uniformidade de distribuição;

- exige a construção de um sistema de distribuição de vinhaça por canais adequados;
- requer alta pressão de serviço;
- mão-de-obra operacional adequada;
- durabilidade do equipamento sujeito à vinhaça, ainda desconhecida.

MATIOLI & MENESES (1984) e MATIOLI et al. (1988) afirmaram que a distribuição de vinhaça por este sistema pode ser considerada uniforme, mas está em função do paralelismo dos canais que por sua vez depende da topografia do terreno. Como em todo sistema de aspersão, a uniformidade pode também ser afetada pela ação do vento.

SANTANA (1985) analisou a economicidade da aplicação de vinhaça em comparação à adubação mineral numa área total de 1870 ha. Os resultados foram comparados com o custo/ha de adubação mineral considerando 500 kg da fórmula 8-6-44, número padrão para efeito desta análise e também por apresentar valores equivalentes à aplicação de 150 m<sup>3</sup>/ha de vinhaça.

### 2.3.6 - Aspersão: sistema auto-propelido

Segundo LEME et al. (1987), o sistema basicamente é composto por uma máquina montada sobre um chassi de formato circular, com 4 rodas, que sustenta o tambor permitindo giros de até 360°. Este tambor possibilita o enrolamento e armazenamento de tubos de polietileno. A máquina é acoplada a um hidrante ou diretamente a moto-bomba por meio de tubulação que possui conexão direta com o eixo do tambor. Pequena parte de vinhaça é desviada para a turbina através de uma válvula "by-pass", permitindo a regulação da velocidade de rotação da turbina e, conseqüentemente, a velocidade de rebocamento do carrinho aspersor. Desta forma a intensidade de aplicação de vinhaça no solo depende diretamente da velocidade de rebocamento do carrinho, do diâmetro de alcance do jato e da vazão de vinhaça no aspersor. Por sua vez, a lâmina de irrigação depende destes fatores e também da largura da faixa de aplicação.

LEME et al. (1987) realizaram uma comparação técnico-operacional entre os sistemas auto-propelido e o montagem direta, apontando as seguintes vantagens:

- redução da mão de obra empregada;
- maior automatização na operação do sistema;
- possibilidade de aplicação de vinhaça no período noturno;

- menor perda de área com canais, devido ao maior espaçamento entre os mesmos;
- rendimento operacional maior, tendo em vista o maior tempo efetivo de aplicação de vinhaça/dia da máquina;
- menor quantidade de mudança da máquina e do conjunto moto-bomba;
- menor quantidade de tubulação e acessórios;
- possibilidade de aplicação de vinhaça, com uma distribuição de pressão de aspensão mais equilibrada em função do tubo de polietileno operar em nível;
- flexibilidade de trabalho, facilitando a operação em áreas de formato irregular.

Os autores apontaram as seguintes desvantagens:

- requer maior pressão na entrada da máquina, necessitando, em decorrência disto, de um conjunto moto-bomba de maior potência;
- apresenta maior consumo de combustível;
- necessidade de transporte da máquina e do conjunto moto-bomba, por ocasião da mudança de posição;
- equipamento pesado, portanto, trazendo maior dificuldade de transporte.

Os autores verificaram, com base nos resultados obtidos, que os equipamentos programados para operar durante dois turnos levariam vantagens sobre os demais. No entanto, sob o ponto de vista prático, é reconhecida a di-

ficuldade de se operar durante o período noturno, principalmente os sistemas que requerem muita mão de obra para constantes mudanças. Esta dificuldade tem reduzido e até inviabilizado o uso do equipamento.

### 2.3.7 - Sistema: bi-carga

Segundo GLORIA (1987), a Usina Costa Pinto, analisando a localização geográfica de suas terras e o custo de implantação de um sistema de tubulação para condução de vinhaça, optou por dar início a um estudo pioneiro de distribuição no campo, ou seja, aproveitar o retorno do caminhão que tráz cana para a indústria e carregando-o com vinhaça que será transportada para a frente de corte.

Com a safra em andamento tem-se a frota de caminhões da usina trabalhando em vários setores, normalmente três, dos quais dois localizam-se em áreas a média e longa distância e que, normalmente, receberiam vinhaça via caminhões ou não receberiam, sendo que a terceira frente estaria operando próxima a usina em áreas onde se faz a aplicação da vinhaça por aspersão.

Equipados com os sacolões, como são conhecidos os tanques de vinilona, com capacidade de 10000 litros cada, 96 caminhões da usina, ao descarregarem a cana, são carregados com vinhaça que irão transportar até as frentes de

carregamento, a um custo bastante reduzido, deixando a mesma depositada num tanque pulmão, localizado num ponto estratégico.

Segundo GLORIA (1987), quando vazio, o tanque de vinilona estará enrolado e depositado na parte traseira do caminhão, protegido por uma chapa metálica, ocupando um volume reduzido. Quando descarrega a cana e vai ao carregador que nada mais é do que uma tubulação suspensa com cinco saídas de 8" sob pressão, o caminhão pára embaixo, um ajudante desenrola o sacolão sobre a carroceria, prende as cintas de fixação e dá início ao processo de enchimento.

O autor observou que, com o sistema em operação, o tempo perdido com o carregamento do caminhão e a descarga no campo é praticamente insignificante, quando comparado com os tempos totais da frota ou outros tipos de perdas que existem.

SACCOMANO et al. (1989), avaliaram o emprego do sistema bi-carga para transporte de vinhaça, sendo as distâncias percorridas por ciclo dos caminhões divididas em três categorias:

- curtas: variando de 13 a 28 km;
- médias: variando de 33 a 48 km;
- longas: variando de 55 a 68 km.

Concluíram os autores que a utilização da frota caminhoneira para transporte de vinhaça através da adapta-

ção de tanques flexíveis não acarreta perda de eficiência no ciclo operacional, visto que o somatório dos tempos perdidos por viagem não permite a realização de mais um ciclo, mesmo a curtas distâncias. Outro ponto interessante a ressaltar é o fato de não ter havido aumento significativo no consumo de diesel por parte dos caminhões carregados com vinhaça em relação às testemunhas. Dessa forma, se os tanques para descarregamento do efluente forem adequadamente localizados, o mesmo seria transportado praticamente a "custo zero", uma vez que não se conseguiu detectar o aumento de custo decorrente deste transporte.

#### 2.3.8 - Transporte por circuitos hidráulicos

Dentro das atividades de uma usina, o custo que mais se agravou nos últimos tempos foi, sem dúvida, o do transporte rodoviário. O que mais contribuiu para essa situação foi o aumento do preço do combustível. Uma alternativa para diminuição dos custos de transporte de vinhaça por caminhões-tanques, segundo MENESES et al. (1984), é o transporte dutoviário que consiste na substituição de parte do percurso por tubulações e/ou canais. Assim, em vez de um ponto de carregamento, normalmente centralizado nas proximidades da unidade industrial, passa-se para uma situação

de vários pontos de distribuição. Isto permite que a aplicação de vinhaça numa área se processe com menor número de caminhões, uma vez que a distância média das áreas de aplicação ao ponto de carregamento é substancialmente reduzida.

Como vantagens deste sistema os autores apontaram:

- redução dos custos de aplicação de vinhaça;
- redução do consumo de combustível;
- redução da frota de caminhões-tanques;
- maior uso de energia elétrica produzida pela

usina, substituindo os combustíveis automotivos, uma vez que, na maior parte dos casos, o transporte dutoviário depende de recalques, cujas bombas são acionadas por motores elétricos.

Os princípios físicos envolvidos no sistema de transporte por caminhão e por tubulação são diferentes e, conseqüentemente, resultam em consumo de energia diferentes por unidade de transporte realizado. Para MENESES et al. (1984), a energia consumida por caminhão está associada principalmente com a resistência ao rolamento dos pneus sobre a estrada. No caso do caminhão MB-2213, utilizado no transporte de vinhaça, o consumo de combustível é da ordem de 35 ml/t\*km. No caso do transporte dutoviário, a energia consumida está associada principalmente ao atrito entre as partículas ao longo da tubulação. No caso de bombeamento com motor diesel, o consumo específico é da ordem de 190

g/cv\*h. Os autores compararam os tipos de transporte considerando um bombeamento em nível, com perda de carga de 13 m/km, resultando em um consumo específico de 63,5 t\*km/l ou seja 66 % inferior ao transporte equivalente rodoviário.

PERES & SUZAKI (1988) realizaram estudo sobre a perda de carga em bombeamento de vinhaça, caracterizando algumas propriedades físicas e parâmetros hidráulicos, a saber:

- massa específica da vinhaça;
- viscosidade dinâmica e cinemática da vinhaça;
- fator de atrito "f" para as interações vinhaça X tubo hidráulicamente liso, e água limpa X tubo hidráulicamente liso;
- comparação dos valores medidos e teóricos do fator de atrito "f";
- análise do desempenho da fórmula Universal, da fórmula de Hazen-Willians, e da fórmula da Norma ISO (International Standard Organization) específica para tubos de P.V.C. .

A vinhaça utilizada nos ensaios foi obtida na Usina Costa Pinto, localizada no município de Piracicaba S.P., apresentando a seguinte composição química, segundo PERES & SUZAKI (1988):

Componentes	C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
kg/m <sup>3</sup>	8,80	0,21	0,07	2,22	0,52	0,31

Através deste estudo os autores concluíram que:

- a vinhaça apresenta, massa específica muito próxima à da água limpa, podendo em projetos de bombeamento de vinhaça utilizarem-se as informações fornecidas pela literatura para o caso da água limpa;

- a vinhaça apresentou viscosidade dinâmica 10% superior à da água limpa para condições de temperatura variando de 20 a 40 °C. A partir do limite superior de temperatura a diferença diminui rapidamente para 3 %;

- a fórmula teórica de Plandtl apresentou valores aproximadamente 4,2 % superiores aos medidos, para cálculo do fator de atrito "f", para tubos hidraulicamente lisos;

- para tubos hidraulicamente lisos, o fator de atrito "f" pode ser considerado o mesmo para bombeamento de vinhaça ou de água limpa.

PIZARRO et al. (1988) descreveram sobre projeto e operação de circuitos hidráulicos para transporte de resíduos líquidos. Segundo os autores, o principal problema no dimensionamento de canais consiste em verificar com qual altura escoará uma certa vazão, em um canal suficientemente liso, para que seja estabelecido o regime uniforme. Os canais utilizados nos circuitos hidráulicos são em geral longos e a seção está pré-determinada pelo implemento de abertura do canal. Cabe, então, verificar com qual altura escoará a vazão de projeto, para uma determinada declividade, e

verificar se a velocidade está dentro dos limites adequados. Os autores afirmaram que a seção de um canal será mais econômica se para a mesma área (escavação) e mesma declividade do canal a vazão for a maior possível.

#### 2.4 - Canais: aspectos gerais

Como os revestimentos de superfícies duras costumam ser caros, KRAATZ (1977) conclui que a seção transversal de menor perímetro para determinada área é a que se apresenta mais econômica, recordando o autor que, sob este aspecto, 1,0 a 1,5 % é o máximo declive aceitável no caso da maioria dos canais. Da mesma forma, o valor da relação entre largura do fundo depois de acabado e a altura de água, para canais pequenos, normalmente é igual a 1,0.

Tanto o desgaste do material de revestimento como a estabilidade do solo são fatores que limitam a inclinação dos taludes quando revestidos com materiais duros, como o concreto, argamassa, solo-cimento, concreto asfáltico, ladrilhos e pedras.

CHOW (1959) recomenda que a inclinação da parede do canal (H:V) para solos argilosos seja de 1,5 : 1,0 sendo H a largura do canal e V a sua altura, devendo no entanto serem os mesmos checados com a máxima velocidade permitida, ou pelo princípio da força de cisalhamento.

Segundo a U.S.B.R. (1976), para canais retilíneos a inclinação da parede lateral deve ser igual a 1,5 : 1,0 (H:V), dessa forma, possibilitando o uso da maioria dos revestimentos.

JOHNSON (1962) observou que, para taludes fortemente inclinados, o solo-cimento plástico é o mais indicado, especialmente quando se tratar de pequenos canais.

#### 2.4.1 - Velocidade de escoamento

A velocidade média no canal, é estabelecida para evitar deposições, crescimento de plantas aquáticas e erosão nas paredes e no fundo do canal. PORTO (1983) recomenda que a velocidade média a ser estabelecida esteja compreendida entre 0,81 e 1,14 m/s.

Segundo PIZARRO et al. (1988), nos canais, assim como nas tubulações, a velocidade média da água normalmente não se afasta de uma pequena gama de valores, imposta pelas boas condições de funcionamento e manutenção. Dois limites extremos são estabelecidos na prática, ou seja, limite inferior: velocidade mínima e limite superior: velocidade máxima.

O Quadro 3 apresenta os limites inferiores e superiores, estabelecidos segundo PIZARRO et al. (1988).

QUADRO 3. Limites inferiores e superiores para velocidade média de escoamento de água em canais (PIZARRO et al., 1988).

Limite inferior	Velocidade média mínima (m/s)
Água c/ suspensões finas	0,30
Água carregando areias finas	0,45
Água de esgoto	0,60
Águas pluviais	0,75
Limite superior	Velocidade média máxima (m/s)
Canais arenosos	0,30
Saibro	0,40
Seixos	0,80
Materiais aglomerados consistentes	2,00
Alvenaria	2,50
Canais em rocha compacta	4,00
Canais em concreto	4,50

#### 2.4.2 - Coeficiente de rugosidade

CHOW (1959) afirmou que o coeficiente de rugosidade "n" de Manning é afetado por diversos fatores. Os principais, segundo o autor, seriam: a rugosidade da superfície, representada pela forma e tamanho do material de formação do perímetro molhado; a vegetação, considerada como um tipo de superfície rugosa; irregularidades no canal; material em suspensão e carga de fundo. O autor afirmou, ainda, que não existe um método preciso de seleção do coeficiente, uma vez que o valor de "n" é altamente variável. Considerando que, a distribuição de velocidade na seção do

canal depende da rugosidade, CHOW (1959) apresentou a fórmula abaixo em função da lei logarítmica de distribuição de velocidade, onde a rugosidade "n" é calculada da seguinte forma:

$$n = ((c-1)y^{1/6}) / (6,78(c+0,95)) \dots \dots \dots \text{Eq(01)}$$

sendo: y = altura de água, em pés;  $c = V_{0,2} / V_{0,8}$ , sendo  $V_{0,2}$  e  $V_{0,8}$ , respectivamente, as velocidades a 0,2 e 0,8 décimos da profundidade.

PAIVA (1987) trabalhando em condições de campo,

com cinco canais, recomenda que a rugosidade seja determinada pelo método proposto por FREAD & SMITH (1978), ou pela própria equação de Manning. Foram obtidos valores médios para o coeficiente de rugosidade de 0,0108 para o canal de manta de borracha, 0,0125 para o canal de concreto pré-moldado, 0,0121 para o canal de concreto moldado "in loco", e 0,0247 para os canais sem revestimento. Com exceção do revestimento com manta de borracha, verificou-se, para os demais casos, uma tendência de variação do coeficiente de rugosidade em função do raio hidráulico. O revestimento de concreto moldado "in loco" apresentou uma tendência de aumento do coeficiente de rugosidade com o aumento do raio hidráulico e os canais de concreto pré-moldado e sem revestimento apresentaram uma tendência de redução do coeficiente de rugosidade com o aumento do raio hidráulico. A autora concluiu que, havendo possibilidade de

manutenção dos canais, o revestimento que apresentou melhor eficiência hidráulica foi o de manta de borracha, seguido pelo de concreto moldado "in loco" e pelo de concreto pré-moldado e sem revestimento, para canais com dimensões próximas às testadas.

O coeficiente de rugosidade "n" pode ser estimado empiricamente através de equações, tais como a de SIMONS & SENTURK (1976), para os quais:

$$n = 0,047 \cdot d^{1/6} \dots \dots \dots \text{Eq}(02)$$

onde d=diâmetro uniforme de areia, em mm; a de RAUDIKIVI (1976), que estabelece:

$$n = 0,013 \cdot d_{65}^{1/6} \dots \dots \dots \text{Eq}(03)$$

onde  $d_{65}$  é o diâmetro da peneira em que 65% do material de base do canal é retido, em mm; a de SUBRAMANYA (1982), apresentada como sendo:

$$n = 0,047 \cdot d_{50}^{1/6} \dots \dots \dots \text{Eq}(04)$$

onde  $d_{50}$  é o diâmetro da peneira em que 50% do material de base é retido, em mm. A U.S.B.R. (1967) e, posteriormente, GARDE & RAJU (1985) sugeriram que o coeficiente de rugosidade de Manning "n" pode ser estimado, para canais sem revestimento, através da equação de Strincker, apresentada como sendo:

$$n = 0,0342 \cdot d_{50}^{1/6} \dots \dots \dots \text{Eq}(05)$$

onde  $d_{50}$ =diâmetro da peneira em que 50% do material do fundo do canal é retido, em pés.

FREAD & SMITH (1978) desenvolveram uma metodologia eficiente e relativamente simples, para determinação do coeficiente de rugosidade "n". Para tal, os autores desenvolveram um processo de cálculo iterativo, baseado no método de Newton-Raphson, que minimiza a diferença entre a profundidade da água calculada e observada. Na primeira iteração, o perfil d'água é calculado a partir de um valor inicial de "n", e nas seguintes iterações o valor de "n" é estimado a partir das estimativas anteriores e das diferenças obtidas entre profundidade de água calculada e observada. O processo iterativo continua até que a diferença entre as profundidades calculada e observada seja menor que um erro máximo pré-estabelecido.

#### 2.4.3 - Taxa de infiltração

A taxa de infiltração, nos canais cujos valores variam de 0,03 a 0,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*dia, segundo WORSTELL (1976) e ROBINSON & ROHWER (1957), depende de muitos fatores como: altura d'água, velocidade de escoamento, tempo de operação, profundidade do lençol freático, temperatura do solo e da água, umidade relativa do ar e do solo, grau de salinidade, quantidade de silte transportada, pressão barométrica e fatores biológicos; porém, a permeabilidade do material de

base é o mais importante, podendo todos os fatores interagirem entre si, tornando-se difícil separar o efeito de cada um deles.

Para a sua determinação, a U.S.R.B. (1976) considera que a taxa de infiltração, determinada pelo método do represamento, é mais precisa do que aquela determinada por medidas de vazões de entrada e saída, ou por infiltração. A entidade ressalta que, no estado permanente, a perda de água pode se dar por evaporação e infiltração. Porém, a quantidade evaporada é pequena, quando comparada com a quantidade infiltrada, podendo até mesmo ser desprezada. A desvantagem do método está no fato da medida ser realizada com o canal fora de operação e o comprimento do represamento ser limitado. Para canais sem revestimento, a perda de água média é de  $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ .

Segundo PAIVA (1987), que utilizou o método do represamento, os canais apresentaram perda média de 0,06, 0,54, 0,14, 0,39 e  $0,48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ , respectivamente, para os canais revestidos com manta de borracha, concreto pré-moldado, concreto moldado "in loco" e sem revestimento. Com exceção do canal revestido com manta de borracha, constatou a autora uma certa relação entre o aumento da perda de água com o aumento do raio hidráulico, sendo esta relação mais acentuada quanto maior a permeabilidade do material de revestimento.

#### 2.4.4 - Transporte dutoviário de vinhaça

MATIOLI (1989) salienta que a literatura pouco aborda os cuidados necessários para um rigoroso dimensionamento das obras hidráulicas envolvidas no transporte dutoviário, o qual deve ser elaborado por técnicos especialistas no assunto. Outro fato importante está relacionado com a perda de vinhaça conduzida por canais construídos em leito natural. Matioli & Guazzelli (1988), citados por MATIOLI (1989), baseados em levantamentos preliminares, colhidos na Usina Santa Luiza, localizada no município de Matão, S.P., apresentaram alguns resultados de perdas de vinhaça em canais de uso contínuo, conforme demonstrados nos Quadros 04 e 05.

MENEZES et al. (1984) apresentaram dois exemplos em que são empregados o transporte dutoviário. O primeiro consiste num estudo, elaborado para a Usina Santa Adélia, localizada no município de Jaboticabal, S.P., com proposta para aplicação de vinhaça na lavoura, tendo em conta a ampliação da destilaria; tal estudo foi elaborado para uma área de 7500 ha e previa a instalação de duas estações de carregamento para caminhões-tanques, localizadas a 3 e 15 km da unidade industrial. O transporte dutoviário constituir-se-ia de dois bombeamentos, com casas de bombas e linhas de recalque, além da construção de dois reserva-

QUADRO 04 - Perdas de vinhaça em canais\* de uso contínuo (4 safras), (Matioli & Guazzelli, 1988 citados por MATIOLI 1989).

Tipo de solo	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Perdas (m <sup>3</sup> /h)	Perdas (%)
LVE-4	124	1,8	1,5
LVE-4	173	5,0	2,9
LVE-4	159	1,9	1,2
Média	152	2,9	1,9

\*Canal construído com sulcador gigante.

QUADRO 05 - Perdas de vinhaça em canal\* de uso intermitente (1 aplicação/safra) (Matioli & Guazzelli, 1988, citados por MATIOLI 1989).

Tipo de solo	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Perdas (m <sup>3</sup> /h)	Perdas (%)
LVE-4	100	4,3	4,3
LVE-4	131	5,9	4,5
Média	115,5	5,1	4,4

\*Canal construído com sulcador gigante.

tórios em terra, de 30000 m<sup>3</sup> cada, e a construção de carregadores para os caminhões. Duas bombas, trabalhando em paralelo, no bombeamento I, recalcando 125 m<sup>3</sup>/h cada, altura manométrica de 93 m.c.a. (metros de coluna d'água), tubulação de recalque constituída de tubos de 250 mm, com 2500 m de extensão. No bombeamento II, duas bombas, trabalhando em paralelo, recalcando 125 m<sup>3</sup>/h cada, altura manométrica de 136 m.c.a., tubulação de recalque de 250 mm, com 1200 m de extensão.

O segundo exemplo citado refere-se a um projeto da Usina São Geraldo, localizada no município de Sertãozinho, S.P., para uma área de 4950 ha, com a instalação de três estações de carregamento de caminhões-tanques, localizadas a 2, 12 e 17 km do antigo carregamento. O transporte dutoviário compunha-se de três bombeamentos, 12080 m de canal em terra e 3400 m de manilhas cerâmicas vitrificadas, nos diâmetros de 200 e 250 mm. No bombeamento I, uma bomba recalcando 85 m<sup>3</sup>/h, altura manométrica de 20 m.c.a., tubulação de recalque constituída por tubos de 150 mm em fibra de vidro, com extensão de 310 m. No bombeamento II, uma bomba recalcando 150 m<sup>3</sup>/h, altura manométrica de 25 m.c.a., tubulação de fibra de vidro de 200 mm, com extensão de 820 m. No bombeamento III, uma bomba recalcando 200 m<sup>3</sup>/h, altura manométrica de 80 m.c.a., tubulação de recalque cons-

tituída de tubos de fibra de vidro de 200 mm com extensão de 820 m.

Pelos resultados obtidos na Usina São Geraldo e pelos esperados na Usina Santa Adélia, verificou-se que a diversificação dos pontos de carregamento dos caminhões com vinhaça, através do transporte dutoviário, apresenta-se altamente compensadora, com redução de aproximadamente 40% nos custos em ambos os casos.

PERTICARRARI (1983) relata que o sistema mais satisfatório para abertura de canais foi o adotado pela Usina Barra Grande, no município de Lençóis Paulista, S.P., cujo equipamento é acoplado à barra de tração de um trator de esteiras CAT-D6, ou trator de pneus com tração nas quatro rodas do tipo Engesa, Case ou Müller. Baseado neste implemento, conservando-se os pontos favoráveis e modificando-se os pontos desfavoráveis, chegou-se ao projeto final de um sulcador para abertura de canais, denominado modelo Copersucar.

PERTICARRARI (1983) apresentou, no Quadro 06 os dados operacionais de dois implementos modelo Copersucar, levantados durante a abertura de canais nas Usinas São Manuel e Barbacena, em áreas de solos argilosos.

O Quadro 07, apresenta uma estimativa do custo relativo e capacidade operacional de equipamentos, para abertura de canais, disponíveis atualmente no mercado,

comparativamente ao equipamento Copersucar, segundo PERTICARRARI (1983).

QUADRO 06 - Dados operacionais de implementos modelo Copersucar, utilizados na abertura de canais (PERTICARRARI, 1983).

Trator utilizado	CAT-D6D	CASE-4490
Marcha utilizada	2a	1a/2a
Velocidade (km/h)	4,0	4,4
Eficiência %	60	70
Capacidade operacional (m/h)	1200*	1540
Forma do canal	trapezoidal	trapezoidal
Profundidade (m)	0,60 a 0,70	0,60 a 0,70
Largura superior (m)	1,3 a 1,5	1,3 a 1,5

\* Valores de referência a duas passadas do trator para construção de um mesmo canal.

QUADRO 07 - Custo relativo e capacidade operacional de equipamentos de aberturas de canais, comparados com o modelo Copersucar (PERTICARRARI, 1983).

Sistema	Cap. operacional (m/h)	Custo Relativo
Retro-escavadeira	25,0	21,0
Motoniveladora	200,0	6,8
Valetadeira	280,0	1,8
Sulcador**	1200,0	1,3
Sulcador***	1540,0	1,0*

\* Valor de referência.

\*\* Sulcador modelo Copersucar operando com trator CAT-D6D.

\*\*\* Sulcador modelo Copersucar operando com trator CASE-4490

## 2.5 - Revestimento de canais: aspetos económicos

LOW (1967) afirmou que, caso o suprimento de água não seja limitado, o revestimento de canais não se torna importante, mas sempre será útil na prevenção da erosão, pois canais revestidos, podem ser economicamente vantajosos, particularmente no caso de altas velocidades de transporte.

TROUT (1982) desenvolveu uma solução gráfica e algébrica, baseada na teoria hidráulica e microeconómica, para determinar seções transversais de canais que minimize o custo do revestimento.

A U.S.B.R. (1976) forneceu o custo de construção de canais com vários tipos de revestimentos, no período compreendido de 1956 a 1960, porém, estes valores representam um item entre muitos que necessitam ser considerados.

BANDINI (1966) fornece equações de custo para canais revestidos e não revestidos através da análise de elementos geométricos e hidráulicos dos canais das condições topográficas do terreno; porém, deixou de considerar alguns fatores, como o custo de energia e seção transversal, que podem ser variáveis com o método de construção e condições de trabalho.

## 2.6 - Solo-cimento "plástico"

Segundo a P. C. A. (1971), quando a mistura de solo-cimento for usada para o revestimento de canais de irrigação, barragens, e estruturas de controle da erosão, pode ser vantajoso o incremento da quantidade de água requerida para a mistura de solo-cimento, formando uma mistura de consistência "plástica". Portanto, o solo-cimento plástico é definido como sendo uma mistura de solo e cimento portland, combinados a uma quantidade de água suficiente para produzir, por determinado tempo, uma mistura de consistência similar à de uma argamassa de revestimento.

As condições peculiares de solicitação a que o revestimento de uma estrutura é submetido tornam imprópria, quase sempre, a utilização pura e simples dos critérios de fixação dos teores de cimento aplicáveis a pavimentos. Segundo PITTA (1983), os efeitos combinados dos ciclos alternados de molhagem e secagem, da ação contínua das ondas e do eventual choque de partículas sólidas, muito distinto dos fatores solicitantes de uma rodovia, podem causar sérios danos, afetando a durabilidade do revestimento se este não possuir o grau de estabilização conveniente, proporcionado, em última análise, pela conjugação dos parâmetros tipo de solo, teor de cimento e teor de umidade.

Com relação aos tipos de solos empregáveis, na construção com solo-cimento, PITTA (1983) afirmou que, a não ser os solos finos do tipo A6 e A7 classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials, (A.A.S.H.T.O.), todos os demais já foram utilizados para construção de barragens, canais, diques e reservatórios.

Para fins rodoviários e para a construção de aeroportos, a Associação Brasileira de Cimento Portland (A.B.C.P.), citada por FREIRE (1976), BAPTISTA (1974) e A.B.C.P. (1985), prescreveu que, para execução de solo-cimento, podem ser empregados, normalmente, solos com as seguintes características: diâmetro máximo: 3"; passando na peneira nº 4: > 50 %; passando na peneira nº 40: 15 a 100 %; passando na peneira nº 200: < 50 %; limite de liquidez: < 40 %; índice de plasticidade: < 18 %. A partir do resultado das investigações processadas no CEPED (1984), pôde-se propor a seguinte especificação, para a fração de diâmetro inferior a 4,8 mm: teor de silte + argila: 10 a 55 %; teor de argila: < 20 %, e limite de liquidez: < 45 %.

Segundo a P.C.A. (1971), solos ligeiramente estruturados ou arenosos são mais satisfatórios, para misturas de solo-cimento plástico. Solos que contenham mais de 30 % do material passando pela peneira nº 200, geralmente não são usados, pois são de difícil pulverização, e mistu-

ra, principalmente quando assumem a característica plástica.

O solo-cimento plástico, segundo JOHNSON (1962), mostrou-se mais prático e econômico que outros materiais utilizados no revestimento de canais, especialmente no caso de solos arenosos, com 10 a 20 % de silte e pouca argila, estabilizando-se com 13 % de cimento em volume. O custo deste revestimento representa apenas a metade do custo do concreto simples, constituindo cuidados especiais de conservação apenas a proteção das bordas e os reparos periódicos das juntas de dilatação. O autor recomenda que a espessura do revestimento para canais deva ser de 7,5 a 15,0 cm.

Na mistura solo-cimento tem sido empregado, normalmente, cimento portland comum. Pesquisas realizadas por Felt (1955) e Clare (1951), citados por PINTO (1980), mostraram que a utilização de cimento de alta resistência inicial, além de conferir ao solo-cimento resistências mais elevadas nos primeiros dias, desenvolve, durante sua hidratação, maior quantidade de íons cálcio, com o que se consegue neutralizar o efeito da matéria orgânica presente no solo.

Catton (1940), citado por FREIRE (1976), afirmou não haver correlação entre o teor de cimento necessário para um solo e o seu pH ou, ainda, o teor de matéria orgâ-

nica, muito embora a existência de matéria orgânica tenha se mostrado altamente prejudicial, em determinados casos, retardando o endurecimento do cimento. Todavia, este efeito prejudicial depende do tipo de matéria orgânica e da presença de compostos orgânicos de baixo peso molecular, como a glicose, os açúcares e o ácido húmico.

É de grande importância a quantidade de cimento a ser incorporado à mistura, pelos inconvenientes que podem surgir de uma opção errada: se insuficiente, fará com que o solo-cimento seja pouco resistente e pouco durável; em excesso, além de tornar a obra mais cara, pode agravar o aparecimento de trincas. Segundo TEIXEIRA (1986), poderá ser usado qualquer tipo de cimento normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (A.B.N.T.), de preferência um dos tipos mencionados a seguir: cimento portland comum, cimento portland de alto-forno e cimento portland pozolânico.

A água de amassamento, como se denomina a água usada na confecção do solo-cimento "plástico", deve ser isenta de impurezas que afetem sua reação com o cimento. Há, entretanto, águas com pequenas quantidades de impurezas que não produzem, pelo menos aparentemente, efeitos nocivos, podendo, portanto, ser toleradas.

KROCHIN (1960) afirmou que a quantidade de água da amassamento usada tem considerável influência sobre a

resistência e permeabilidade do solo-cimento, a tal ponto de a escolha da correta quantidade de água passar a ter maior importância que a proporção de cimento na mistura. Caso a quantidade de água adicionada for muito pequena, o cimento não se hidratará totalmente; por outro lado, a adição de uma grande quantidade de água torna impossível a compactação, provocando a segregação do cimento e dando origem a um material poroso, conseqüentemente, de menor resistência.

Segundo PINTO (1980), quanto à água, dela se exige que seja isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis ou matéria orgânica. Com efeito, a presença, na água, de substâncias consideradas nocivas ao solo, transferirá ao solo-cimento os mesmos efeitos indesejáveis. A água do mar pode ser utilizada sendo seu emprego até mesmo recomendável quando houver no solo elevados teores de matéria orgânica. A água pode servir, ainda, de veículo para a adição de produtos químicos ou substâncias que corrijam ou melhorem as características do solo-cimento.

### 3. - MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido, sob condições de campo, em área experimental da fazenda Santana, pertencente à Usina Costa Pinto Açúcar e Alcool S.A., localizada no município de Piracicaba, S.P., cujas coordenadas são 20°42'3" de latitude sul, 47°38'00" de longitude oeste, a 580 m de altitude. A Figura 01 apresenta, um "croquis" do local (entre os setores 1A e 1B) onde foram retiradas amostras de solo e construídos os canais experimentais.

Dados meteorológicos, coletados na Estação Meteorológica pertencente ao Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, mostram, em termos médios anuais, que a precipitação pluvial na região é de 1247,1 mm, ocorrendo a maior parte no verão; a temperatura do ar é de 20,8 °C; a umidade relativa do ar é de 69 %; e a velocidade do vento é de 2,5 m\*s<sup>-1</sup>, segundo CERVELLINI et al., (1973).

O clima da região, de acordo com os critérios propostos por Köppen, classifica-se como tipo mesotérmico Cwa, ou seja, subtropical úmido, com estiagem no inverno, com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C e a

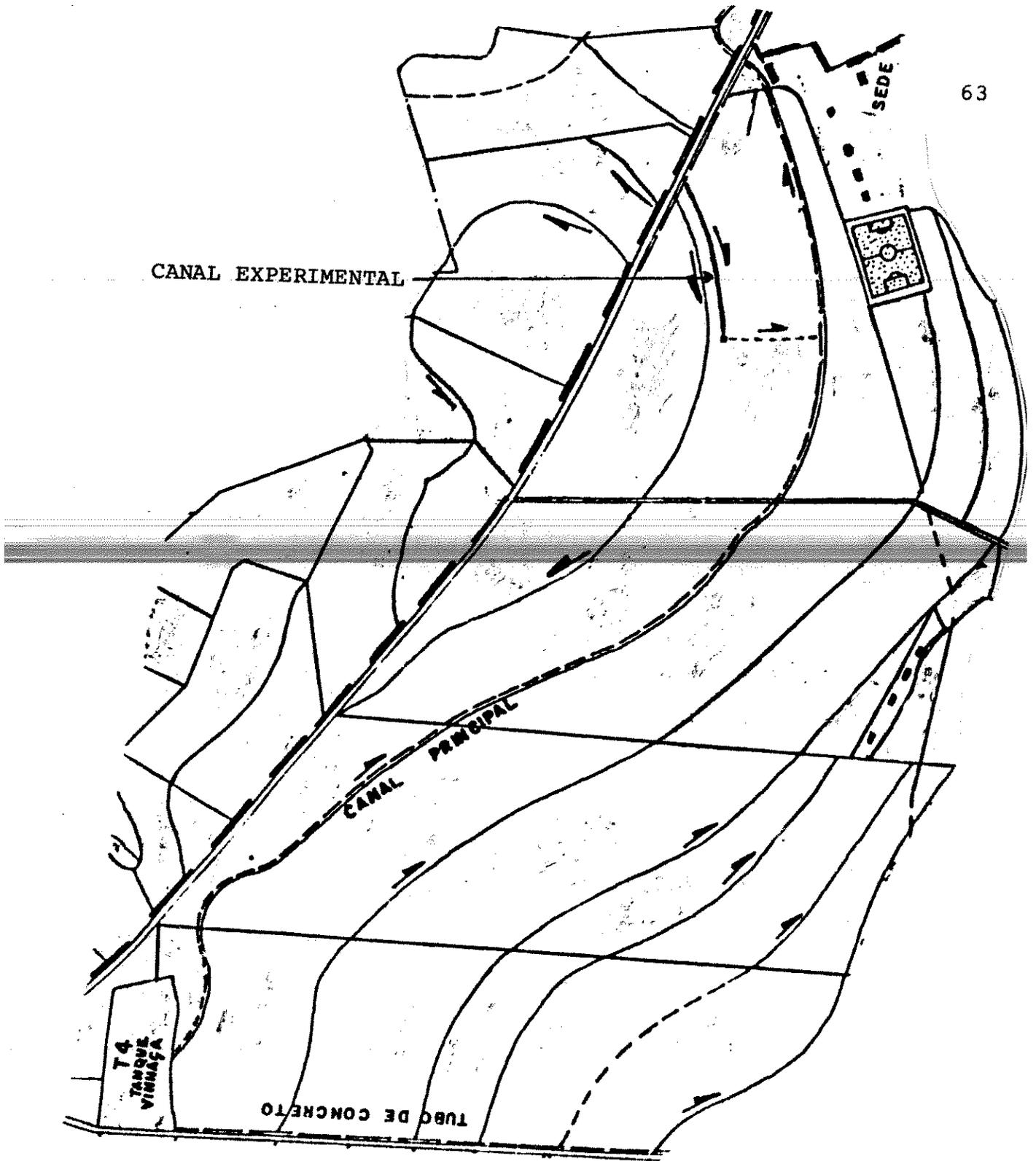


FIGURA 01 - "Croquis" da área pertencente a Usina Costa Pinto Açúcar e Álcool S. A., onde foi construído o canal experimental.

do mês mais quente superior a 22 °C, também denominado de tropical de altitude por CAMARGO et al., (1974).

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 - Solo

Segundo classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), o solo coletado e utilizado para a confecção do solo-cimento plástico e do solo-vinhaça é um solo A 2-4(0), areno-argiloso, de comportamento excelente a bom, para fins de utilização como solo-cimento. Sua composição química está apresentada no Quadro 08.

QUADRO 08 - Composição química do solo utilizado.

pH	mat.	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al <sup>+3</sup>	S	CTC	V
Ca Cl <sub>2</sub>	org.	*	**	**	**	**	**	**	**	**
6,6	4,7	52	0,31	4,6	3,2	1,5	0,5	8,11	9,61	84,39

\* - resina (ppm)

\*\* - (meq/100ml)

#### 3.1.2 - Vinhaça concentrada

A vinhaça concentrada utilizada nos ensaios foi obtida na Usina São Martinho, localizada no município de Pradópolis, S.P..

Análises de laboratório, realizada, pela Usina São Martinho, indicaram para esta vinhaça, originária de mosto misto, a composição química registrada no Quadro 09.

QUADRO 09 - Composição química da vinhaça concentrada.

pH	Brix	M.S.	Dens.	Umid.	M.O.	M.I.
Ca Cl <sub>2</sub>	(%)	(%)	(g/ml)	(%)	(% M S)	(% M S)
4,16	30,01	25,73	1,1105	74,27	72,37	27,63
C	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	
(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
119,00	3,18	0,403	28,80	8,69	4,20	

### 3.1.3 - Cimento

O cimento utilizado foi do tipo Portland Composto C.P.II-E-32, marca Votoran, normatizado pela NBR - 11578, adquirido, comercialmente, em casa idônea do ramo de materiais de construção.

### 3.1.4 - Equipamentos

#### 3.1.4.1 - Prensa

O rompimento dos corpos de prova de solo-cimento e solo-vinhaça concentrada foi feito em prensa de procedência alemã, marca LOSENHAUSENWERK, com capacidade máxima de 6 toneladas e sensibilidade de 20 kg. Tal prensa é dotada de duas outras escalas de menor capacidade, uma de 3 toneladas e sensibilidade de 10 kg e outra de 1,2 toneladas e sensibilidade de 5 kg, que eram usadas conforme a

conveniência. A máquina dispõe, também, de um dispositivo que permite regular a velocidade de carregamento.

#### 3.1.4.2 - Medidor do nível de vinhaça no canal e diferença de pressão no tubo de "Plandt"

O aparelho de medida consta de uma base móvel e duas hastes verticais, sendo que em uma destas hastes era instalado um pontalete e, na outra, um tubo de "Prandtl". Este tubo era conectado a um painel, graduado com o auxílio de uma mangueira de látex, onde eram efetuadas as leituras de diferença. Em cada haste foi conectada uma pequena placa graduada, de acrílico, alojada entre uma régua graduada e uma escala onde eram efetuadas leituras de nível.

Foram instaladas seções de medição em cada trecho do canal, distanciadas umas das outras de aproximadamente 30 m, compreendendo dois pilares de concreto, encravados nas laterais do canal, de modo a permitir a fixação da base de suporte do aparelho de medição de nível e diferença de pressão, de tal forma que o aparelho de medição permanesse com seu eixo, transversal à seção, na perfeita horizontal. Os desníveis remanescentes eram corrigidos através de quatro parafusos de chamada, instalados nas extremidades da base do aparelho. A Figura 2, permitem visualizar este aparelho.

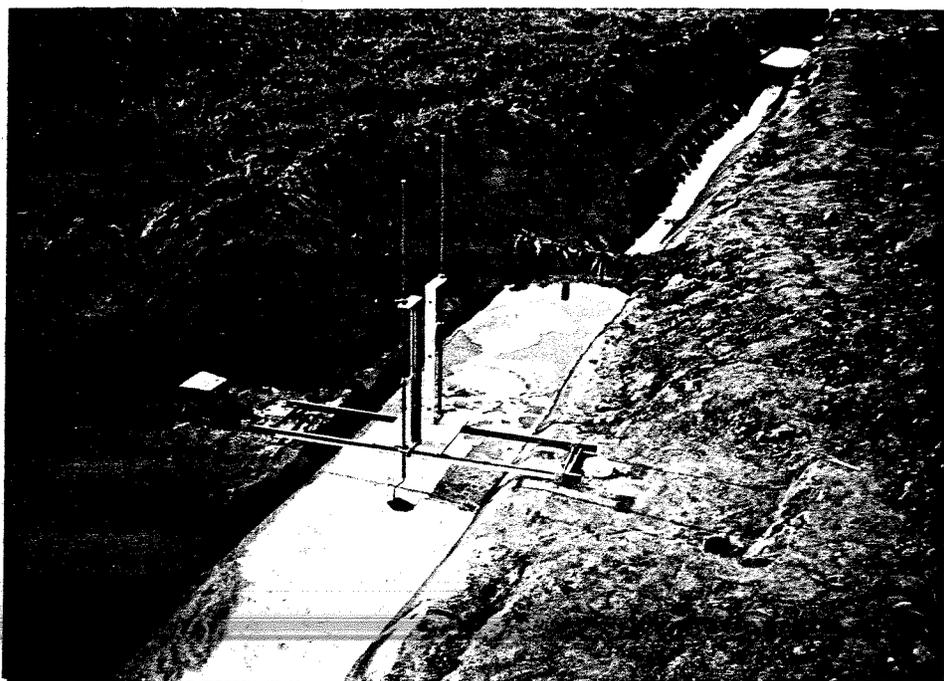


Fig. 2a - Vista do aparelho instalado.

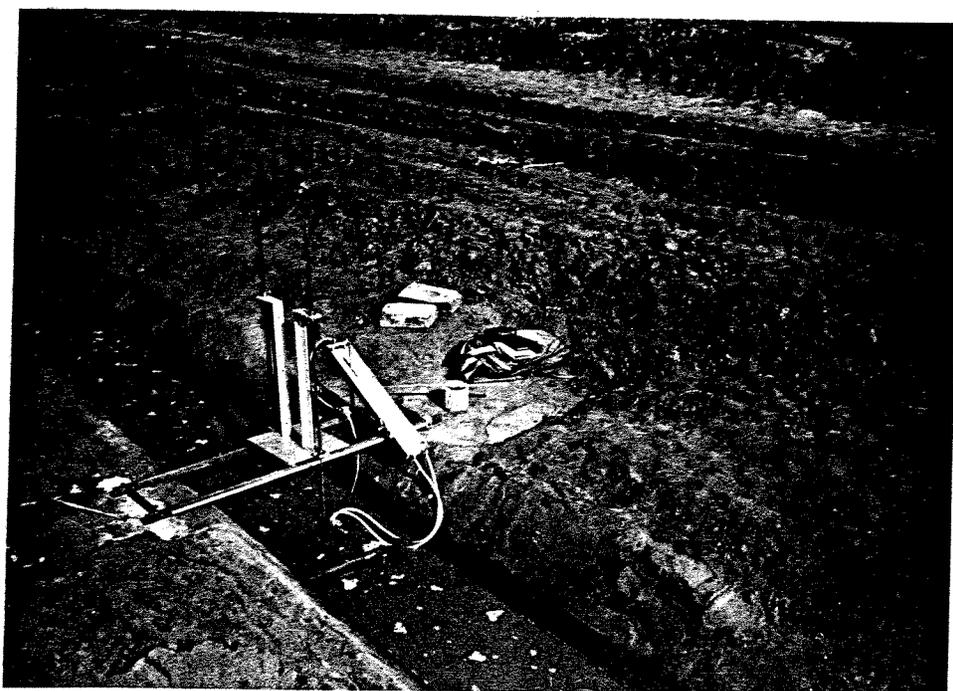


Fig. 2b - Aparelho em funcionamento para medição da perda de vinhaça por infiltração.

### 3.1.4.3 - Outros equipamentos

Para se proceder aos ensaios, foram utilizados, ainda, equipamentos como balança com precisão de 0,01 g, jogo de peneiras, cápsulas, estufa, bomba de vácuo, bandejas, régua de aço biselada e espátulas; moldes cilíndricos com base e dispositivo complementar (colarinho), soquetes cilíndricos e aparelho extrator de corpos de prova (nos ensaios de compactação e moldagem); aparelho de Casagrande, cápsulas de porcelana, cinzel e gabarito (nos ensaios de consistência do solo); placa e membrana de Richards (na determinação das curvas características); densímetro, penetrador automático e jogo de peneiras (nas análises granulométricas do solo), acrescentando-se, ainda, reservatório de cimento-amianto, níveis de borracha, gabaritos, trator de esteiras, sulcador gigante, aparelho medidor de nível, tubo de Prandtl, etc.

### 3.2 - Métodos

Após a escolha da área experimental que, necessariamente, deveria estar localizada próxima a um canal principal e outro secundário, bem como próxima a uma estação de bombeamento, para fornecimento contínuo de vinhaça, procedeu-se à coleta de amostras de solo, observando-se uma linha demarcada, com 200 m de comprimento, onde foram instalados os trechos do canal experimental. As amostras de

solo foram coletadas a uma profundidade de 0,20 a 0,40 m, espaçadas de aproximadamente 20 m, após o que foram misturadas homoganeamente e acondicionadas em caixas plásticas, sendo então encaminhadas ao Laboratório de Ensaios de Materiais e Mecânica dos Solos da FEAGRI-UNICAMP.

Após esta operação, procedeu-se à preparação de amostras para os ensaios de compactação e ensaios de caracterização, segundo a NBR - 6457.

Foram utilizadas as seguintes doses de vinhaça

concentrada à 30° Brix: 450 e 600 m<sup>3</sup>/ha, o hectare considerado a uma profundidade de 0,20 m, correspondentes a 225 e 300 ml/kg de solo, respectivamente, doses estas equivalentes às quantidades despejadas em áreas de sacrifício nas usinas.

A mistura de solo-vinhaça concentrada foi deixada em repouso, em condições ambientais, por um período de 11 dias, necessários para que o teor de umidade do material formado se estabilizasse, antes de ser submetida aos ensaios de laboratório.

Inicialmente, caracterizou-se o solo e as misturas de solo-vinhaça concentrada; posteriormente, foram determinadas as doses de cimento a serem utilizadas, conforme recomendação da ABCP (1986).

### 3.2.1 - Análise granulométrica

As análises granulométricas do solo, solo-cimento e solo-vinhaça concentrada, foram feitas de acordo com a NBR - 7181/84, da ABNT, realizada pela combinação da análise de sedimentação e peneiramento.

Os resultados desta análise foram expressos através de curvas características de distribuição granulométrica e de quadros de composição granulométrica para cada tratamento.

### 3.2.2 - Limites de consistência

A determinação dos limites de liquidez do solo e do solo-vinhaça concentrada, foi feita de acordo com o método de ensaio preconizado pela NBR - 6459/84, da ABNT, enquanto que a determinação dos limites de plasticidade foi feita conforme a NBR - 6459/84.

### 3.2.3 - Índices físicos

A umidade natural do solo (h) foi determinada pelo método da estufa; uma pequena porção do solo foi pesada e levada à estufa à temperatura de 105 a 110° C, até atingir constância de peso.

O peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) foi determinado de acordo com o método do picnômetro, descrito por NOGUEIRA (1973).

#### 3.2.4 - Compactação

Para o traçado das curvas de compactação do solo, solo-cimento e solo-vinhaça concentrada, empregou-se o ensaio normal de Proctor, de acordo com o método SC-1 da ABCP (1986), que fixa o modo pelo qual se determina a correlação entre o teor de umidade e peso específico aparente seco.

#### 3.2.5 - Dosagem da mistura solo-cimento

A escolha do teor de cimento para os ensaios foi feita de conformidade com as normas preconizadas pela PCA (1971) e ABCP (1986), que indicam os prováveis teores necessários a serem adotados, em função da classificação do solo, segundo a AASHO.

A PCA (1971) recomenda que, quando se tratar de solo-cimento plástico, deve-se adotar dois pontos percentuais acima do teor recomendado para solo-cimento compactado, e o teor de umidade deve ser tal que confira à mistura, característica plástica.

Os teores de cimento para o ensaio de resistência à compressão foram retirados de tabelas incluídas nas normas de dosagem da PCA (1971) e ABCP (1986), adotando-se dois e quatro pontos percentuais acima dos prováveis teores de cimento necessários, em função das características físicas apresentadas pelo solo, do peso específico aparente

seco máximo, obtido no ensaio de compactação, e dos limites de consistência.

#### 3.2.6 - Moldagem de corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova de solo, solo-cimento e solo-vinhaça concentrada, foi feita de acordo com o Método SC-2, da ABCP (1986), que descreve a técnica de moldagem de corpos de prova a serem submetidos ao ensaio de compressão simples.

#### 3.2.7 - Ensaio à compressão simples

O ensaio à compressão simples foi feito de acordo com o Método SC-4, da ABCP (1986), que descreve o modo pelo qual devem ser ensaiados à compressão simples corpos de prova de solo-cimento.

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em ambiente fechado, protegidos dos raios solares e periodicamente umedecidos, até 4 horas antes do ensaio, quando então foram removidos e colocados totalmente imersos em água; após 4 horas em imersão, os corpos de prova foram retirados da água, enxutos superficialmente, e rompidos à compressão, sob uma velocidade de carregamento de aproximadamente  $1,4 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ .

Os corpos de prova de solo e solo-vinhaça concentrada não passaram pelo processo de imersão em água, devido

aos péssimos resultados encontrados nos ensaios de absorção de água.

Os corpos de prova, para este ensaio, foram executados com dois teores de cimento (9 e 11 % em peso) e duas doses de vinhaça concentrada (0,225 e 0,300 dm<sup>3</sup>/kg), além da testemunha, e rompidos com idades de 7 e 28.

### 3.2.8 - Construção do canal experimental

O sistema constou de um canal de funcionamento contínuo, com cinco trechos distintos, localizado no sentido da menor declividade do terreno e abastecido por uma estação de bombeamento e/ou por um canal de retorno.

Cada trecho do canal tinha aproximadamente 30 m de comprimento, declividade do fundo em torno de 0,010 m/m e seção transversal aproximadamente trapezoidal, com largura da base de 0,15 m, declividade das paredes laterais de 45°, profundidade de aproximadamente 0,75 m.

Os revestimentos utilizados nos trechos foram: trecho 1: solo-cimento "plástico" (11 % de cimento em peso); trecho 2: solo-cimento "plástico" (9 % de cimento em peso); trecho 3: solo-vinhaça concentrada (0,225 dm<sup>3</sup>/kg); trecho 4: solo-vinhaça concentrada (0,300 dm<sup>3</sup>/kg), e trecho 5: solo (sem revestimento). A espessura média do revestimento, ao longo do canal, foi de 0,08 m, e a unidade média adotada para a mistura de solo-cimento, para os dois teores

de cimento empregados foi em média 25 %. Figura 03 mostra o canal aberto e em funcionamento.



FIGURA 03 - Canal aberto, em funcionamento.

Para abertura do canal foi utilizado um sulcador gigante, acoplado a um trator de esteiras Caterpillar - D6.

Os trechos foram moldados "in loco", utilizando-se o próprio solo, depositado pelo sulcador gigante nas laterais do canal, para a confecção do solô-cimento e solô-vinhaça. Para manter a uniformidade da espessura do revestimento, foram utilizados gabaritos de madeira, espaçados a cada 1,5 m. Após a moldagem, as paredes do canal eram desempenadas e alisadas, utilizando-se para tal, colher de pedreiro e desempenadeira; com início do proces-

so de cura, os canais eram umedecimento e suas paredes protegidas com cobertura apropriada (sacos vazios de cimento). Cabe ressaltar que, no caso dos trechos onde utilizou-se vinhaça concentrada, foi necessário promover um segundo revestimento superficial, devido ao excesso de trincas que surgiram durante o período de cura, que compreendeu 14 dias.

Após o período de cura, o canal foi posto em funcionamento contínuo durante 7 dias antes de se fazerem as medidas de nível e perda de vinhaça.

Devido à pequena durabilidade do revestimento com solo-vinhaça concentrada, não foi possível testar estes trechos.

O tempo de operação do sistema, uma vez colocado em funcionamento, somente era interrompido quando ocorria falha no fornecimento de vinhaça.

#### 3.2.9 - Levantamento das seções do canal e medida de nível de vinhaça

Foram instaladas cinco seções de medição, uma em cada trecho do canal, distanciadas 5 m das extremidades de montante e jusante.

O levantamento das seções foi feito com os canais secos. As medidas verticais em cada seção foram feitas dis-

tanciadas 0,02 m entre si, de uma borda a outra da seção do canal.

As medidas de nível de vinhaça, feitas com o canal em funcionamento, foram realizadas nos pontos centrais de cada seção, medindo-se também, neste ponto, o nível do fundo do canal. Pequenos poços de tranquilização foram instalados junto a uma borda do canal, nas seções de medição. Estes poços foram construídos em tubo de PVC, de 100 mm de diâmetro. Tais poços foram interligados ao canal por meio de mangueira de cristal de 1/8"; foram feitas, também, medidas de nível de vinhaça nos poços de tranquilização.

#### 3.2.10 - Medida de perda de vinhaça no canal

A perda de vinhaça, devido à infiltração nas paredes do canal, foi avaliada pelo método do represamento, proposto por PAIVA (1987). Trechos de 6 m de comprimento, foram isolados com auxílio de sacos plásticos cheios de terra. A vinhaça foi introduzida no trecho e medido o abaixamento da lâmina de vinhaça em determinados intervalos de tempo. A perda de vinhaça foi, então, calculada pela equação:

$$P = [(A_i - A_f) * L / (((P_i + P_f) / 2) * t * L)] \text{ em } [(m^3 / m^2) * \text{dia}] \dots \text{Eq}(05)$$

onde:  $L$  = comprimento do trecho represado (m);

$A_i$  = área molhada inicial ( $m^2$ );

$A_f$  = área molhada final ( $m^2$ );

$P_i$  = perímetro molhado inicial (m);

$P_f$  = perímetro molhado final (m);

$t$  = intervalo de tempo (dia).

A Figura 04 mostra trechos represados do canal, por ocasião da medição de perda de vinhaca por infiltração.

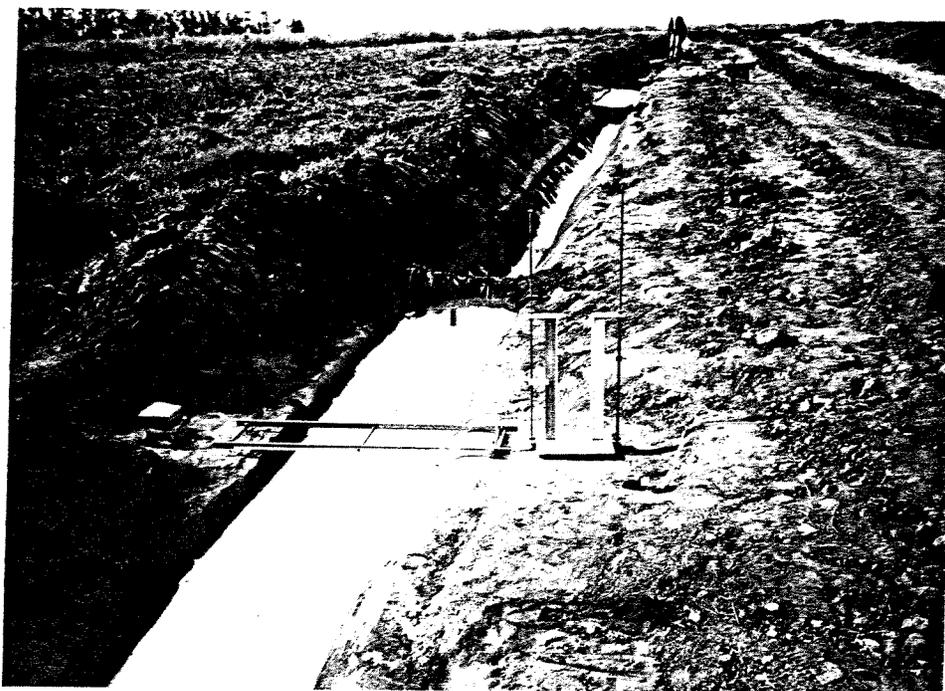


FIGURA 04 - Trechos represados do canal para medição da perda de vinhaca por infiltração.

### 3.2.11 - Cálculo do coeficiente de rugosidade "n" de Manning

A avaliação do coeficiente de rugosidade foi feita de acordo com o método descrito por PAIVA (1986), conforme segue: sendo o valor de "n" obtido diretamente da equação de Manning, utilizando-se a declividade de fundo do canal.

$$"n" = [\hat{A} * R_H^{2/3} * S_o^{1/2}] / Q \dots \dots \dots \text{Eq(06)}$$

onde:  $\hat{A}$  = área das seções transversais medidas (m<sup>2</sup>);

$R_H$  = raio hidráulico das seções (m);

$S_o$  = referência de nível do fundo do canal (m);

$Q$  = vazão no trecho.

#### 4. - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados dos experimentos realizados com o solo, solo-cimento e solo-vinhaça concentrada.

##### 4.1 - Análise granulométrica

Todos os tratamentos (solo, solo-cimento a 9 %, solo-cimento a 11 %, solo-vinhaça concentrada à razão de 0,225 dm<sup>3</sup>/kg e solo-vinhaça concentrada à razão de 0,300 dm<sup>3</sup>/kg, foram submetidos a ensaios de granulometria (penetramento + sedimentação).

No Quadro 10 estão relacionados os resultados das análises granulométricas dos tratamentos, cujas representações gráficas estão apresentadas nas Figuras 5 a 9.

Os efeitos da aplicação dos tratamentos com cimento e vinhaça concentrada sobre o solo, mostraram que, com relação à composição granulométrica, os tratamentos com diferentes doses de cimento não tiveram efeito algum sobre a composição percentual das frações argila, porém, os tratamentos com diferentes doses de vinhaça concentrada apre-

QUADRO 10 - Composição granulométrica do solo, solo-cimento (9 e 11 %) e solo-vinhaça (0,225 e 0,300 dm<sup>3</sup>/kg), em porcentagem.

TRATAMENTOS						
Fração do solo	Test.	SC 9%	SC 11%	SV 450 m <sup>3</sup> /ha	SV 600 m <sup>3</sup> /ha	
ARGILA	A	17	16	21	21	
	B	17	17	20	22	
	C	17	16	20	20	
MÉDIA	17	16,3	16,6	20,3	21	
SILTE	A	18	23	14	12	
	B	18	23	13	12	
	C	18	23	14	13	
MÉDIA	18	23	25,3	13,6	12,3	
AREIA FINA	A	56	54	55	59	
	B	56	52	58	57	
	C	56	54	56	58	
MÉDIA	56	53,3	49,3	56,3	58	
AREIA MÉDIA	A	9	7	10	8	
	B	9	8	9	9	
	C	9	7	10	9	
MÉDIA	9	7,3	8,6	9,6	8,6	

A,B,C = repetições  
 SC = solo-cimento  
 SV = solo-vinhaça

sentaram um aumento percentual nas frações argila ao nível de 1 % de probabilidade. Dentro da fração silte, os tratamentos com vinhaça não foram diferentes entre si; porém, os tratamentos com cimento, além de diferenciarem-se entre si, diferenciaram-se também da testemunha, a nível de 1 % de probabilidade. Dentro da fração areia fina, o

tratamento do solo com 11% de cimento diferenciou-se dos demais, enquanto que, os tratamentos do solo com 9% de cimento e a testemunha não apresentaram diferença entre si, bem como não houve diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos do solo com vinhaça 0,225 e 0,300  $\text{dm}^3/\text{kg}$  de vinhaça. Dentro da fração areia média, apenas o tratamento do solo com 9% de cimento diferenciou-se dos demais a nível de 1 % de probabilidade.

---

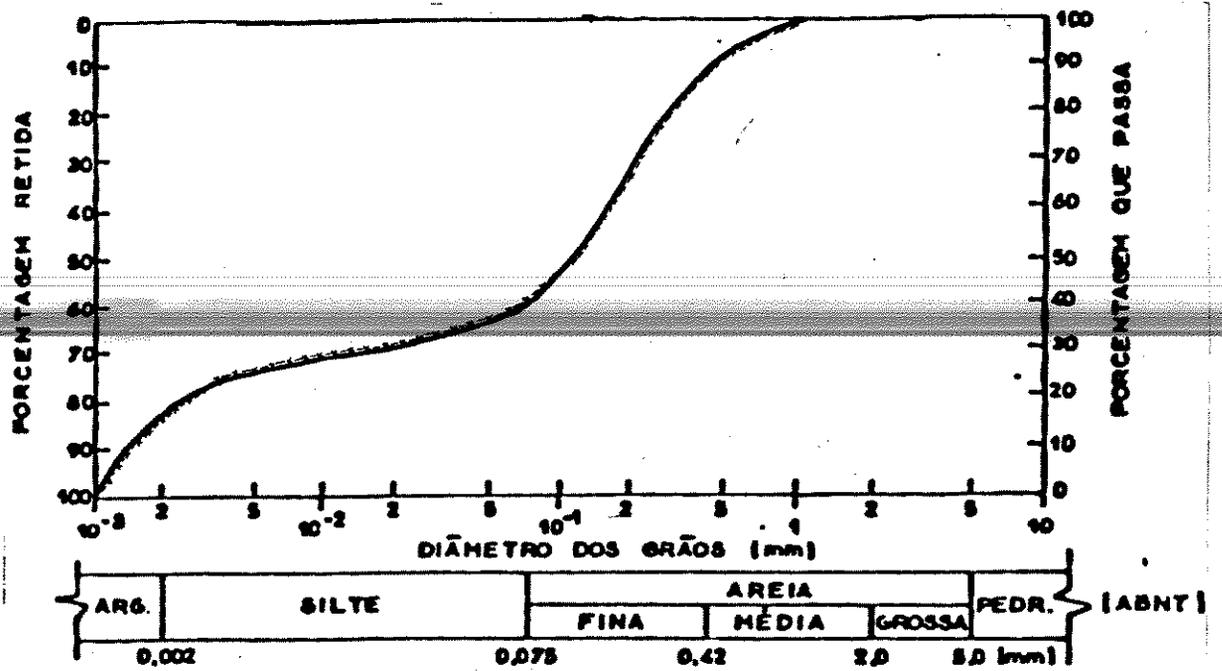


FIGURA 5 - Curyas granulométricas do solo para o tratamento Testemunha.

1ª rep. ——— 2ª rep. - - - - 3ª rep. - . - . - .

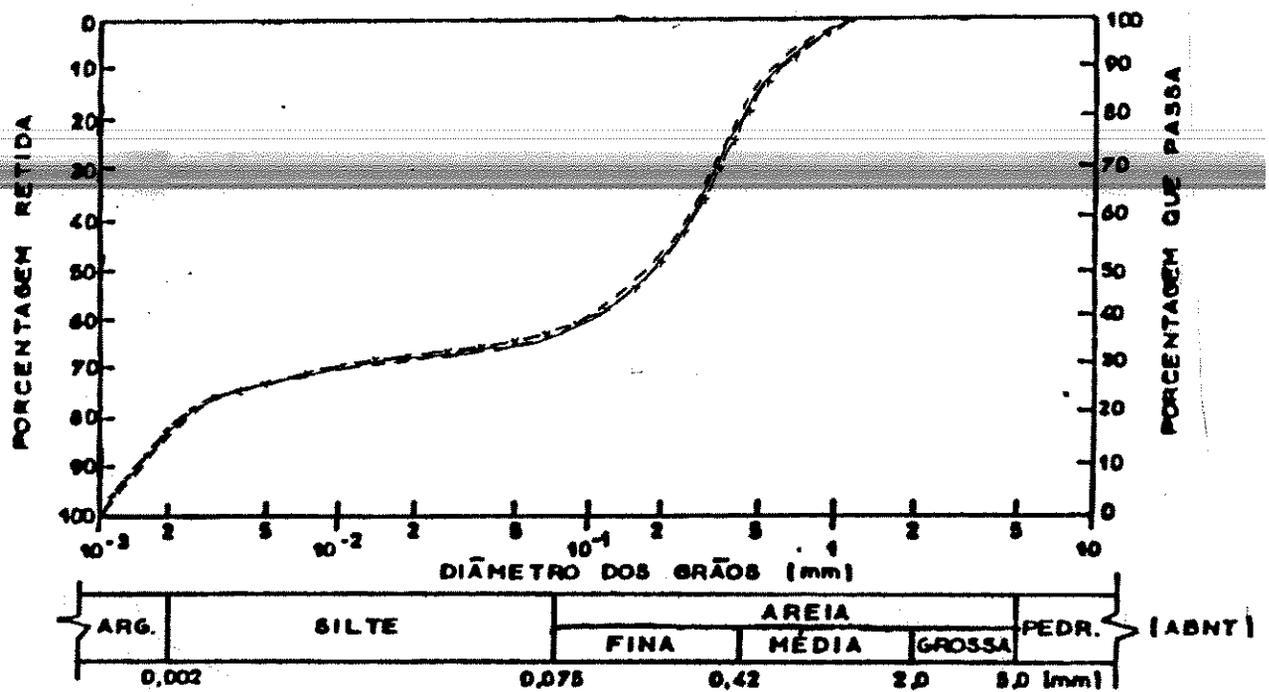


FIGURA 6 - Curvas granulométricas do solo-cimento

a 9%.

1ª rep. — 2ª rep. - - - - - 3ª rep. - x - x - x -

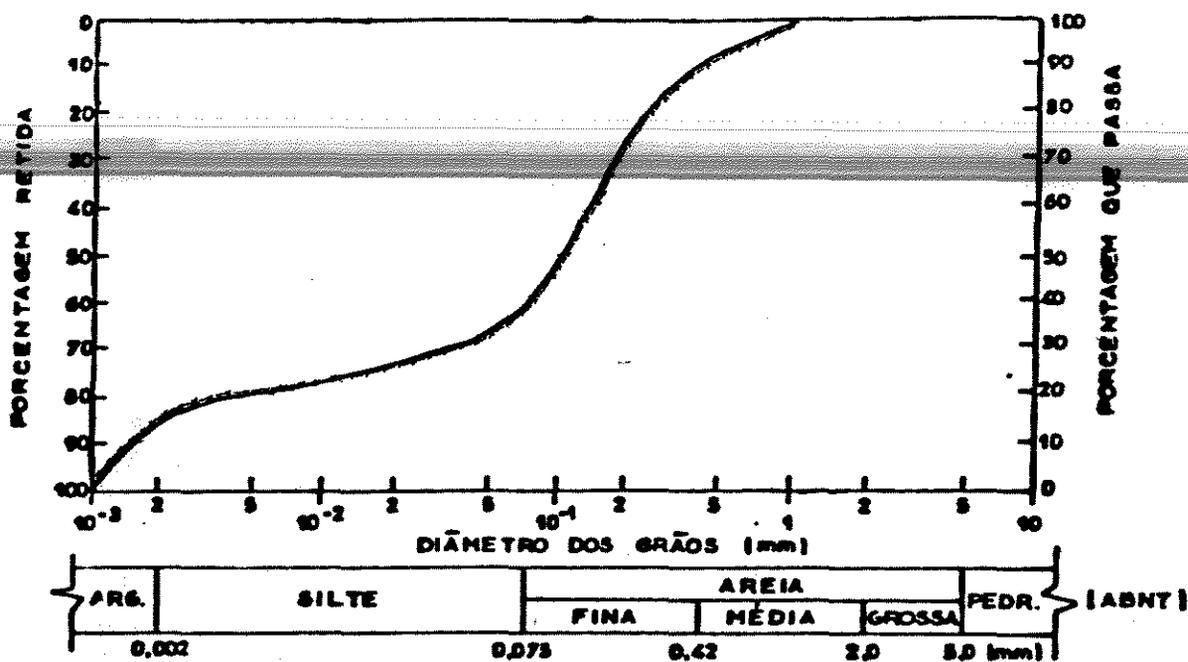


FIGURA 7 - Curvas granulométricas do solo-cimento a 11%.

1ª rep. — 2ª rep. - - - 3ª rep. - - - -

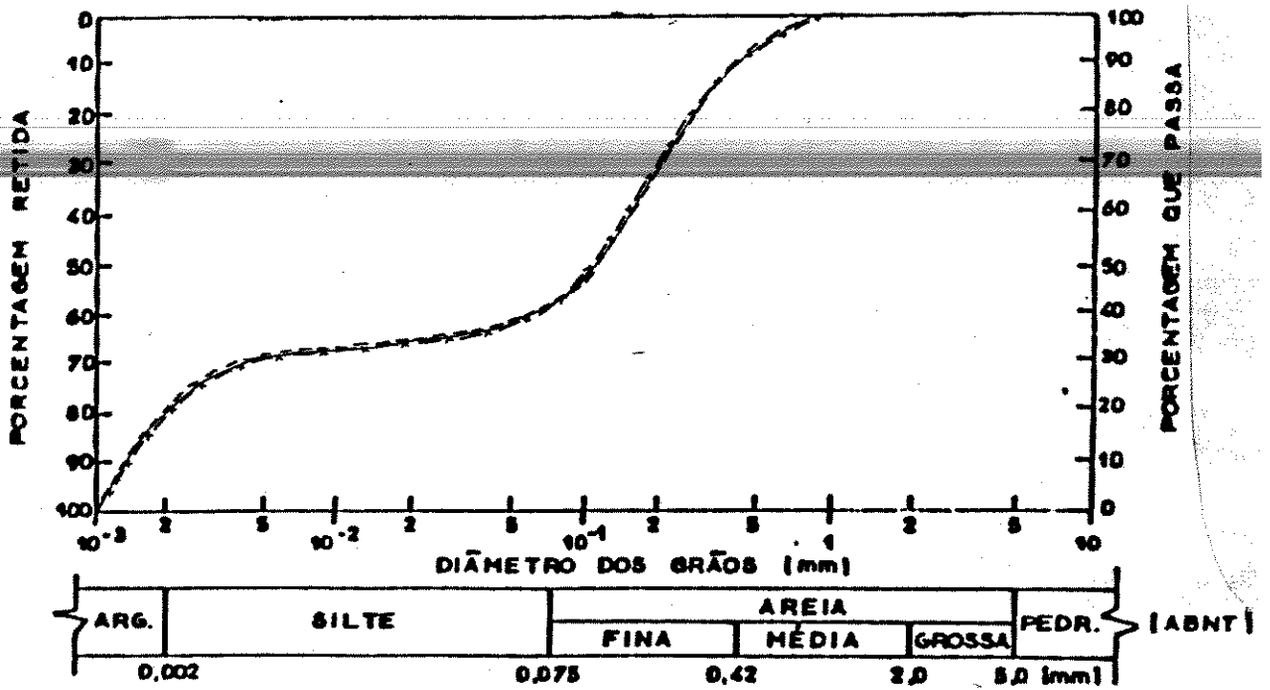


FIGURA 8 - Curvas granulométricas do solo-vinhaça (0,225 dm<sup>3</sup>/kg).

1<sup>a</sup> rep. — 2<sup>a</sup> rep. - - - 3<sup>a</sup> rep. - x - x - x -

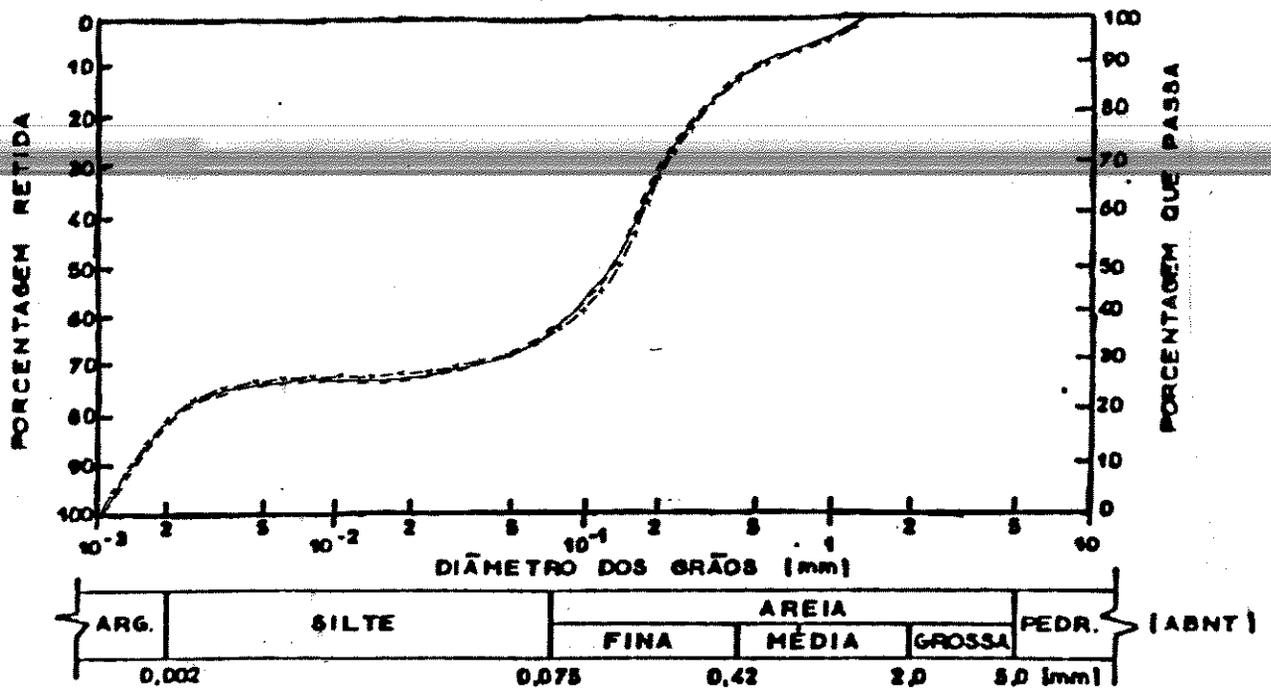


FIGURA 9 - Curvas granulométricas do solo-vinhaça  
(0,300 dm<sup>3</sup>/kg).

1<sup>a</sup> rep. ——— 2<sup>a</sup> rep. - - - - - 3<sup>a</sup> rep. -x-x-x-

#### 4.2 Limites de consistência

Com exceção dos tratamentos com solo-cimento, todos os demais foram submetidos aos ensaios de consistência, estando os resultados apresentados no quadro 11.

QUADRO 11 - Limites de consistência do solo e do solo-vinhaça concentrada, em porcentagem.

=====				
TRATAMENTOS				
=====				
LIMITES DE CONSISTÊNCIA		Test.	SV 0,225 dm <sup>3</sup> /kg	SV 0,300 dm <sup>3</sup> /kg
=====				
LIMITE DE LIQUIDEZ	A	20,93	19,80	21,30
	B	21,35	20,00	21,13
	C	21,26	20,40	20,70
MÉDIA		21,18	20,06	21,04
-----				
LIMITE DE PLASTICIDADE	A	15,70	14,50	15,43
	B	16,10	14,67	15,20
	C	16,28	14,90	15,10
MÉDIA		16,01	14,69	15,24
-----				
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	A	5,23	5,30	5,87
	B	5,25	5,33	5,93
	C	5,03	5,50	5,60
MÉDIA		5,17	5,37	5,80
=====				

A,B,C = repetições  
SV = solo-vinhaça

No que se refere aos limites de consistência o tratamento do solo com 0,225 dm<sup>3</sup>/kg de vinhaça concentrada provocou uma diminuição significativa no limite de liquidez; o tratamento de solo com 0,300 m<sup>3</sup>/ha de vinhaça concentrada, por outro lado, não se diferenciou da testemunha.

Quanto ao limite de plasticidade, o tratamento com 450  $\text{dm}^3/\text{kg}$  de vinhaça concentrada diferenciou-se dos demais, o mesmo não ocorrendo entre os tratamentos 0,300  $\text{dm}^3/\text{kg}$  de vinhaça concentrada e a testemunha que não apresentaram diferença entre si a nível de 1 % de probabilidade. Quanto ao índice de plasticidade, verificou-se um efeito positivo da aplicação de vinhaça concentrada, para a dose de 0,300  $\text{dm}^3/\text{kg}$ , com os demais tratamentos revelando-se estatisticamente iguais entre si a nível de 1 % de probabilidade.

No caso da testemunha, esta mostrou-se utilizável para fins de solo-cimento, segundo critérios da ABCP (1985), PCA (1971), BAPTISTA (1974) e CEPED (1984).

#### 4.3 Índices físicos

Com relação aos índices físicos do solo, solo-cimento e solo-vinhaça concentrada, o Quadro 12, apresenta os valores encontrados para o peso específico dos sólidos.

Avaliados quanto aos efeitos sobre o peso específico dos sólidos, os tratamentos que receberam vinhaça concentrada diferenciaram-se dos demais tratamentos e entre si, o mesmo não ocorrendo com os demais.

QUADRO 12 - Peso específico dos sólidos, em g/

cm<sup>3</sup>.

TRATAMENTOS						
PESO ESPECÍFICO DOS SÓLIDOS	Test.	SC		SV		
		9%	11%	0,225 dm <sup>3</sup> /kg	0,30 dm <sup>3</sup> /kg	
REPETIÇÕES	A	2,67	2,70	2,70	2,56	2,52
	B	2,67	2,70	2,69	2,56	2,53
	C	2,68	2,68	2,69	2,57	2,53
MÉDIA		2,67	2,69	2,69	2,56	2,53

A, B, C = repetições

SC = solo-cimento

SV = solo-vinhaça

#### 4.4 Compactação

Todos os tratamentos foram submetidos ao ensaio de compactação, procurando-se determinar o peso específico aparente seco máximo, em g/cm<sup>3</sup>, e a umidade ótima em %, estando os resultados do ensaio de compactação relacionados no Quadro 13.

Avaliados quanto aos efeitos sobre o peso específico aparente seco máximo, os tratamentos não provocaram quaisquer alterações a nível de 1 % de probabilidade; quanto à umidade ótima, os tratamentos com vinhaça concentrada não diferenciaram-se entre si e da testemunha a nível de 1 % de probabilidade.

QUADRO 13 - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma$  máx) e umidade ótima ( $h$  ót) do ensaio de compactação.

PARÂMETROS	Test.	TRATAMENTOS				
		SC 9%	SC 11%	SV 0,225 $\text{dm}^3/\text{ha}$	SV 0,3 $\text{dm}^3/\text{ha}$	
$\gamma$ máx ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	A	1,800	1,765	1,740	1,690	1,725
	B	1,825	1,740	1,770	1,680	1,750
	C	1,765	1,735	1,745	1,715	1,740
MÉDIA		1,796	1,746	1,751	1,695	1,740
$h$ ótima (%)	A	14,2	15,7	16,3	13,6	13,2
	B	14,3	16,3	15,9	13,5	13,8
	C	14,6	16,0	16,6	13,8	13,5
MÉDIA		14,36	16,00	16,26	13,63	13,50

A,B,C = repetições  
 SC = solo-cimento  
 SV = solo-vinhaça

#### 4.5 - Dosagem da mistura solo-cimento

A escolha do teor de cimento foi feita de acordo com recomendações das normas da PCA (1971) e ABCP (1986). Baseados nos ensaios de caracterização, classificou o solo como pertencente ao grupo A 2-4(0). Para o solo em estudo, a ABCP (1986) recomenda que se utilize um teor de cimento em massa igual a 7 %, para fins de utilização como solo-cimento compactado; a PCA (1971), porém, recomenda que, quando se tratar de solo-cimento plástico, deve-se adotar dois pontos percentuais acima do indicado motivo pelo qual então utilizou-se, neste trabalho, os teores de 9 e 11 % de cimento em massa.

#### 4.6 - Ensaio à compressão simples

A resistência à compressão simples é utilizada como parâmetro de qualidade do material formado. Segundo a ABCP (1986), a resistência à compressão mínima admissível de corpos de prova de solo-cimento rompidos aos 7 dias, deverá ser de 210 N/cm<sup>2</sup> (21,0 Kgf/cm<sup>2</sup>), quando o solo utilizado possuir um total de silte mais argila de 35 % .

No Quadro 14 estão registrados os resultados dos ensaios de compressão simples aos quais foram submetidos os tratamentos.

QUADRO 14 - Resistência à compressão simples de corpos de prova de solo, solo-cimento (9 e 11 %) e solo-vinhaça concentrada (0,225 e 0,300 dm<sup>3</sup>/kg) em N/cm<sup>2</sup>.

		TRATAMENTOS				
		Test.	SC 9 %	SC 11 %	SV 450 m <sup>3</sup> /ha	SV 600 m <sup>3</sup> /ha
7 Dias	A	44,3	126,5	142,0	87,5	93,0
	B	50,5	126,5	142,0	93,0	97,6
	C	44,0	134,5	151,0	86,8	101,1
	D	4,73	12,94	14,92	8,95	99,5
	E	49,6	136,0	152,5	91,5	100,5
MÉDIA		47,14	131,48	148,44	89,66	98,3
28 Dias	A	52,3	184,3	219,7	107,4	128,4
	B	61,4	187,0	226,0	110,5	136,0
	C	57,8	182,5	224,5	106,3	132,2
	D	59,6	191,0	221,0	113,2	130,2
	E	60,1	189,4	217,8	106,8	129,7
MÉDIA		58,24	186,84	221,8	108,84	131,3

A,B,C,D,E = repetições

SC = solo-cimento SV = solo-vinhaça

1 kgf/cm<sup>2</sup> = 9,806 N/cm<sup>2</sup> = 10 N/cm<sup>2</sup>

Com relação à resistência à compressão simples aos 7 dias de idade, os tratamentos apresentaram um aumento positivo em relação à testemunha, a nível de 1 % de probabilidade; todavia, os tratamentos que receberam cimento e vinhaça concentrada foram diferente entre si. Aos 28 dias de idade, todos os tratamentos apresentaram um aumento positivo em relação à testemunha; os tratamentos com solo vinhaça concentrada não diferiram entre si, o mesmo não ocorrendo com o solo-cimento, cuja dose maior teve, também, maior efeito.

#### 4.7 Levantamento das seções transversais do canal

Após uma semana do início do funcionamento do canal, este foi totalmente esvaziado a fim de que se procedesse ao levantamento de suas seções transversais; todavia, os trechos revestidos com solo-vinhaça concentrada sofreram forte erosão, arrastando grandes quantidades de partículas para o trecho não revestimento, de maneira que estes trechos foram abandonados, trabalhando-se apenas com os trechos revestidos com solo-cimento.

As Figuras 10 e 11 apresentam as seções transversais dos trechos do canal seco, revestidos com solo-cimento a 11 % e solo-cimento a 9 %, respectivamente.

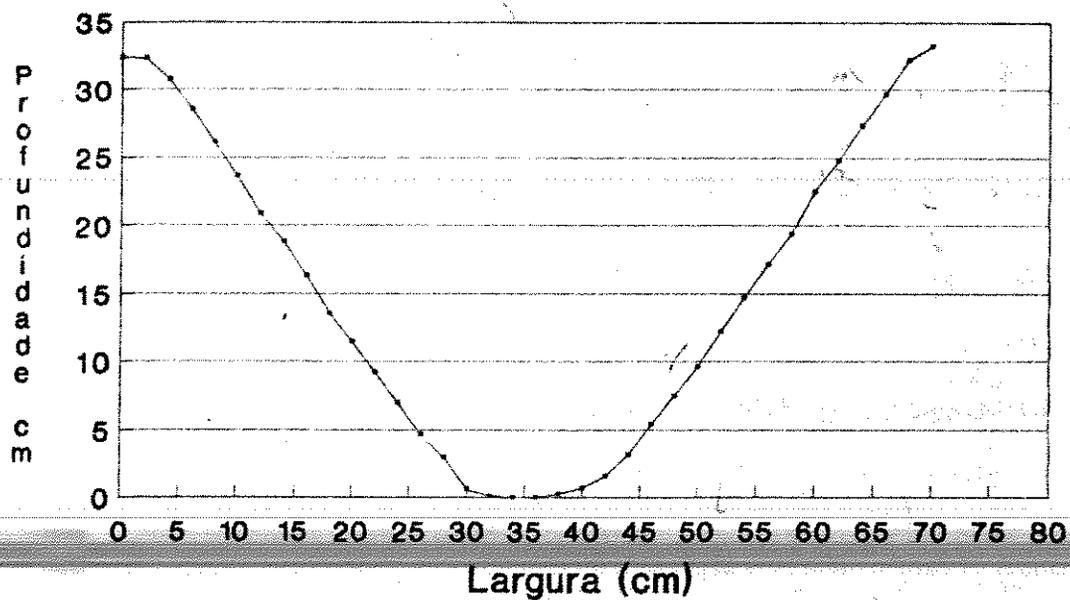


FIGURA 10 - Perfil da seção transversal do trecho do canal revestido com solo-cimento a 11% .

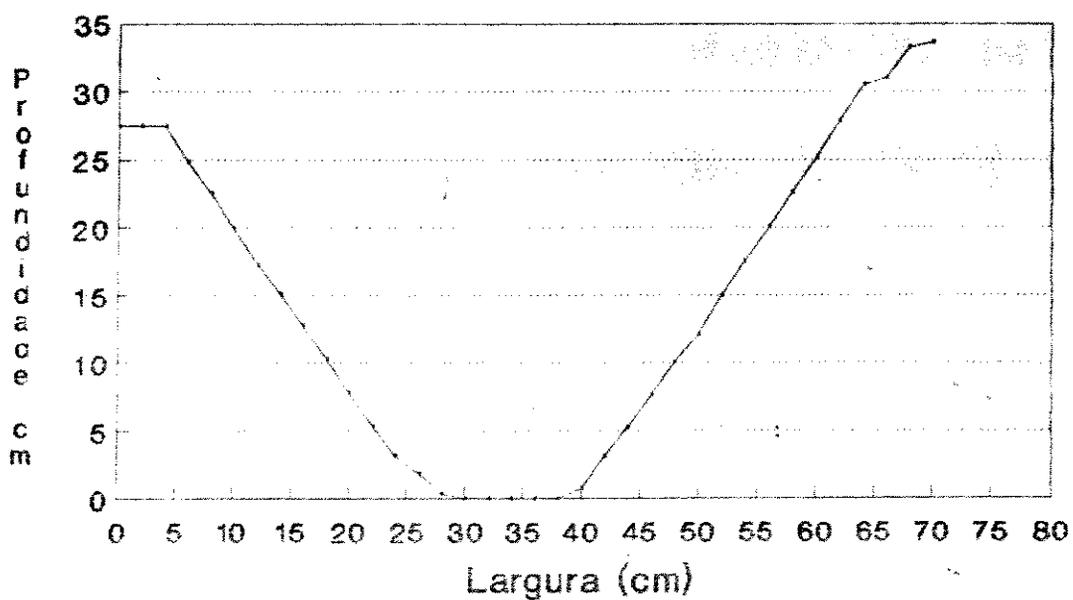


FIGURA 11 - Perfil da seção transversal do trecho do canal revestido com solo-cimneto a 9% .

#### 4.8 Medição da perda de vinhaça por infiltração

O canal foi mantido em funcionamento durante vários dias antes de proceder-se ao isolamento dos trechos represados. A seguir, o sistema foi desligado, os trechos a serem represados foram isolados e enchidos totalmente, aguardando-se o decorrer de um determinado tempo, após o qual procedia-se a sucessivas medições de profundidade, estando os resultados apresentados nos Quadros 15 e 16.

QUADRO 15 - Perda de vinhaça, por infiltração, obtida pelo método do represamento nos trechos de solo-cimento, leituras realizadas no canal.

Revestido com SC, a 11 %			Revestido com SC, a 9 %		
D	t	P	D	t	P
0,2382	30	0,3357	0,2750	40	0,4864
0,2290	30	0,2781	0,2580	30	0,2990
0,2214	30	0,2055	0,2498	30	0,3247
0,2158	30	0,1975	0,2409	30	0,2339
0,2105	40	0,3068	0,2344	30	0,1010
0,1993	20	0,1316	0,2317	30	0,1624
0,1975	30	0,2128	0,2273	30	0,0852
0,1917	30	0,1682	0,2240	30	0,1045
0,1873	30	0,1642	0,2221	30	0,0868
0,1829	70	0,1606	0,2197	30	0,0688
0,1730	23	0,1083	0,2179	30	0,0882
0,1707	30	0,0686	0,2155	30	0,0763
0,1688	30	0,1391	0,2133	30	0,0704
0,1651	30	0,1256	0,2114	30	0,0580
0,1617	30	-	0,2099	30	-

D = profundidade hidráulica, em m.  
t = intervalo de tempo, em min.  
P = perda de vinhaça, em m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*dia  
SC = solo-cimento

QUADRO 16 - Perda de vinhaça, por infiltração, obtida pelo método do represamento nos trechos de solo-cimento, leituras realizadas no poço tranqüilizador.

Revestimento com SC, a 11 %			Revestimento com SC, a 9 %		
D	t	P	D	t	P
0,2563	30	0,2163	0,2453	30	0,2887
0,2504	43,5	0,3232	0,2374	30	0,2967
0,2375	30	0,2067	0,2291	30	0,2130
0,2319	20	0,1447	0,2237	30	0,3505
0,2249	40	0,2918	0,2137	30	0,1800
0,2187	20	0,2551	0,2089	30	0,2166
0,2140	30	0,2384	0,2030	30	0,1878
0,2076	30	0,1313	0,1978	30	0,0748
0,2040	30	0,1235	0,1959	30	0,0479
0,1962	30	0,1721	0,1945	30	0,0413
0,1915	42	0,2889	0,1934	30	0,1319
0,1807	30	0,0291	0,1899	30	0,0914
0,1799	30	0,1027	0,1874	30	0,0496
0,1772	30	0,0444	0,1861	30	0,0499
0,1760	30	-	0,1847	30	-

D = profundidade hidráulica, em m.

t = intervalo de tempo, em min.

P = perda de vinhaça, em  $m^3/m^2 \cdot dia$

SC = solo-cimento

Na Figura 12 são apresentados os gráficos da variação de perda de vinhaça em relação à profundidade hidráulica, para os trechos do canal em solo-cimento, leituras realizadas nos trechos e no poço tranqüilizador.

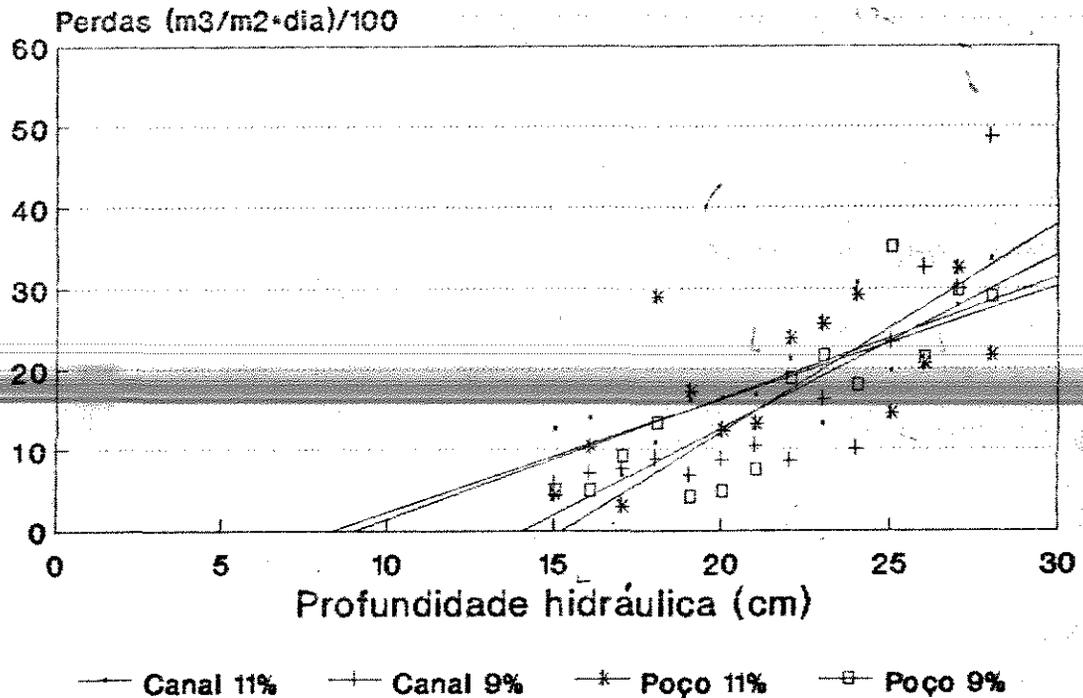


FIGURA 12 - Perda de vinhaça, por infiltração, para os trechos de canal revestidos com solo-cimento.

Os trechos do canal moldados com solo-cimento a 11 e 9 %, apresentaram uma perda média de vinhaça de 0,18465 e 0,15945 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*dia, respectivamente. Embora os pontos estejam bastante dispersos, pode-se verificar uma tendência de aumento da perda de vinhaça em relação ao aumento da profundidade hidráulica. Pode-se observar que, no trecho onde se empregou o maior teor de cimento (11 %), do qual esperava-se menor perda, o efeito foi exatamente o

contrário. A diferença entre as leituras realizadas no trecho do canal e no poço tranquilizador pode até mesmo ser desprezada, pois esta é da ordem de 2,5 e 1,9 l/m<sup>2</sup>/dia, respectivamente, para os trechos revestidos com 11 e 9 % de cimento.

#### 4.9 Coeficiente de rugosidade "n" de Manning

A avaliação do coeficiente de rugosidade "n" de Manning, foi feita empregando-se a Eq.(06). Os Quadros 17 e 18 apresentam os resultados obtidos para o coeficiente de rugosidade.

QUADRO 17 - Valores médios do coeficiente de rugosidade de Manning, para o trecho de solo-cimento a 11 %.

Data	D(m)	R <sub>H</sub> (m)	V(m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	n
15/07/92	0,1326	0,0712	0,9843	0,0368	0,0174
16/07/92	0,1600	0,0821	1,4600	0,0724	0,0129
17/07/92	0,1280	0,0695	0,9389	0,0334	0,0180
19/07/92	0,1885	0,0934	1,2898	0,0823	0,0159
20/07/92	0,1953	0,0959	1,2829	0,0864	0,0163
21/07/92	0,1545	0,0800	1,2885	0,0605	0,0144
22/07/92	0,1885	0,1197	1,2859	0,0820	0,0188
23/07/92	0,1280	0,0695	0,9448	0,0336	0,0179
24/07/92	0,1600	0,0823	1,0266	0,0509	0,0184

valor médio = 0,01670

D = profundidade hidráulica  
R<sub>H</sub> = raio hidráulico  
V = velocidade de escoamento  
Q = vazão  
n = coeficiente de rugosidade

QUADRO 18 - Valores médios do coeficiente de rugosidade de Manning, para o trecho de solo-cimento a 9 %.

Data	D(m)	R <sub>H</sub> (m)	V(m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	n
15/07/92	0,1082	0,0612	1,1073	0,0310	0,0139
16/07/92	0,1340	0,0718	1,1441	0,0552	0,0119
17/07/92	0,1280	0,0695	1,1244	0,0400	0,0150
19/07/92	0,1632	0,0835	1,3563	0,0693	0,0141
20/07/92	0,1765	0,0887	1,3770	0,0793	0,0144
21/07/92	0,1314	0,0707	1,4006	0,0517	0,0122
22/07/92	0,1632	0,0835	1,3563	0,0747	0,0130
23/07/92	0,1350	0,0724	1,1643	0,0448	0,0149
24/07/92	0,1350	0,0719	1,4619	0,0555	0,0118

valor médio = 0,01346

D = profundidade hidráulica  
R<sub>H</sub> = raio hidráulico  
V = velocidade de escoamento  
Q = vazão  
n = coeficiente de rugosidade

A Figura 13 apresenta a relação entre o coeficiente de rugosidade "n" e o raio hidráulico, para os trechos revestidos com solo-cimento a 11 e 9 %, respectivamente.

Os valores do coeficiente de rugosidade "n" de Manning apresentaram-se bastante dispersos, não se observando qualquer tendência de aumento em relação ao raio hidráulico. Em relação à média dos valores encontrados, o trecho onde se empregou solo-cimento a 9 % resultou mais satisfatório que o trecho revestido com solo-cimento a 11% por apresentar menor coeficiente de rugosidade (n=0,01346).

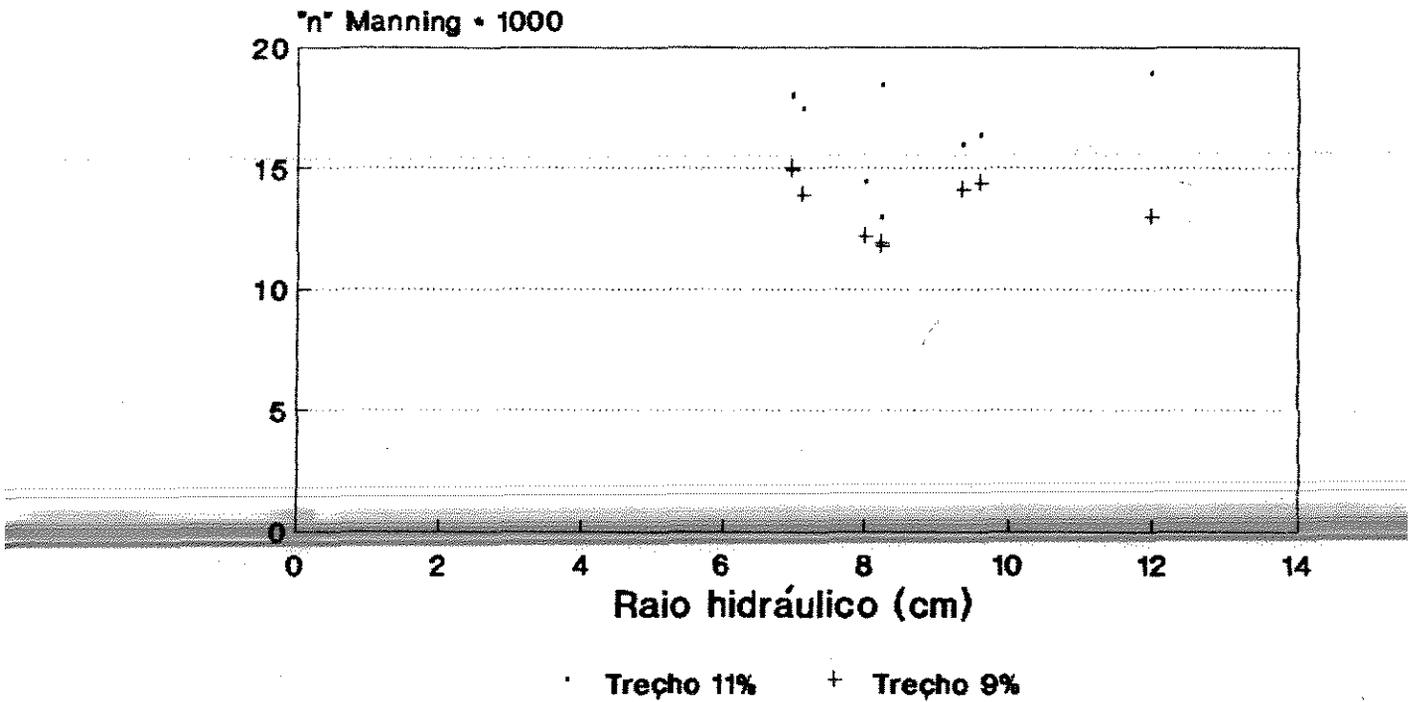


FIGURA 13 - Relação entre o coeficiente de rugosidade "n" e o raio hidráulico, para os trechos de canal revestidos com solo-cimento.

## 5. - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 - Conclusões

Através da comparação dos dados obtidos, analisados e interpretados estatisticamente, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- os tratamentos do solo com vinhaça concentrada aumentaram o teor de argila de forma inversamente proporcional ao teor de silte; no caso dos tratamentos com cimento, houve diminuição do teor de argila e um aumento no teor de silte; no caso da areia fina os tratamentos com cimento, reduziram seu teor enquanto que os tratamentos com vinhaça concentrada tiveram efeito contrário; no caso da areia média, seu teor foi reduzido em função do tratamento do solo com cimento;

- os tratamentos com vinhaça concentrada provocaram diminuição nos limites de consistência do solo em relação à testemunha;

- os tratamentos com vinhaça concentrada provocaram diminuição no peso específico dos sólidos do solo em relação à testemunha; no caso dos tratamentos com cimento,

houve aumento apenas para a dose empregada de 11 % de cimento;

- os tratamentos do solo com vinhaça concentrada provocaram diminuição no peso específico aparente seco máximo e umidade ótima em relação à testemunha; por outro lado, os tratamentos com cimento que também provocaram redução no peso específico, aumentaram, por sua vez, a umidade ótima de compactação;

- os tratamentos do solo com vinhaça concentrada e cimento apresentaram um aumento na resistência à compressão simples do material formado;

- o teor de umidade influi direta e negativamente na resistência e durabilidade do material formado pela mistura de solo-vinhaça concentrada;

- a avaliação da perda de vinhaça por infiltração, pelo método do represamento, apresentou resultados satisfatórios; o revestimento do canal com solo-cimento a 9 % apresentou menor perda em relação ao revestimento com solo-cimento a 11 %;

- mesmo apresentando valores dispersos em relação ao coeficiente de rugosidade "n" de Manning, o trecho onde se empregou 9 % de cimento apresentou menor coeficiente de rugosidade em relação ao trecho onde se empregou 11 % .

## 5.2 - Recomendações

- recomenda-se o uso do solo-cimento "plástico" no revestimento de canais de irrigação para transporte de vinhaça, desde que o solo empregado seja adequado e que se faça um estudo da relação benefício-custo para implantação de canais revestidos;

- sugere-se que pesquisas sejam feitas com o objetivo de testar outras dosagens e tipos de cimento, espessura de revestimento e a criação de uma metodologia específica para solo-cimento "plástico", bem como o uso de aditivos impermeáveis e revestimentos superficiais no caso do material solo-vinhaça.

- o solo-vinhaça não se apresentou adequado para fins de revestimento de canais para transporte de vinhaça.

## 6. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. R. de. O problema da vinhaça em São Paulo. Boletim do Instituto Zimotécnico, Piracicaba, n. 3: p.1-24, 1952.

ALMEIDA, J. R. et. al. La vinasse dans l'agriculture. Piracicaba, Boletim do Instituto Zimotécnico, Piracicaba, n.1, p.1-21, 1950.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Dosagem da mistura de solo-cimento; normas de dosagem e métodos de ensaios. 3. ed. São Paulo: ABCP. 1986. 57p. (ET-35).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Fabricação de tijolos de solo-cimento com utilização de prensas manuais. São Paulo: 1985. 8p. (ET-111).

BANDINI, A. Economical Problems of Irrigation Canals: Seepage Losses. Journal of the irrigation and Drainage Division, New York, v.92, n. IR4, dec. p.35-57, 1966.

BAPTISTA, C. de F. N. Pavimentação. Porto Alegre. Globo, 1974. 178p. 3 v.

CAMARGO, A.; PINTO, H. S.; PEDRO Jr., M. J.; ALFONSI, R. R. ; ORTOLANI, A. A. Clima do Estado de São Paulo. In: SAEESP. Inst. Agrônômico. Zoneamento agrícola do Estado de São Paulo, São Paulo, v.1. 1974.

CASTELLO, J. R.; COSTA RIBEIRO, C. ; LACAZ, P. A. A. Oportunidades para a industria de equipamentos no aproveitamento do vinhoto. Sugar y Azucar do Brasil n.1, p.11-36, 1980.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO (CEPED). THABA, Camaçari. Manual de construção de solo-cimento. Convênio CEPED/BNH/URBIS/CONDER/PMC/OEA/CEBRACE. 3ª ed. São Paulo. ABCP. 1984. 147p.

CERVELLINI, A.; SALATI, E.; BARROS FERRAZ, E. S.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; DECICO, A.; OMETTO, J. C.; PEDRO Jr., M. J. Análise dos dados meteorológicos de Piracicaba. ESALQ/USP, Boletim Científico, Piracicaba, p.1-26, 1973. n:36.

CHOW, V. T. Open Channel Hydraulics, New York Mc Graw Hill, 1959, 680p.

COOPERATIVA CENTRAL DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR E ALCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Centro de Tecnologia. Aproveitamento da vinhaça; viabilidade tecno-econômica. 2. ed. São Paulo, 1979. 71p.

ELIAS NETO, A.. Biodigestão da vinhaça com reator anaerobio de manta de lodo. São Carlos, EESC/USP, 1988. 30p.

FERREIRA, E. S. & MONTEIRO, A. de O. Efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas físicas e biológicas do solo. Boletim Técnico. COPERSUCAR, Piracicaba, n.37, p.3-7, jan. 1987.

FREAD, D. L. & SMITH, G. F. Calibration Technics for 1-d Unsteady Flow Models. Journal of the Hydraulics Division, v.104, n.Hy 7, 1978. p.1024-44, july.

FREIRE, W. J. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seus efeitos sobre a qualidade do solo-cimento. Tese (Doutoramento em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) Depto. de Solos, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 1976. 142 f.

GARDE, R. J. & RAJU, K. G. R. Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems, 2. ed. Roorkee, India. J. Wiley & Sons, 1985. 618p.

GLÓRIA, A. M. Usina Costa Pinto; o sistema bi-carga. Revista Usineiro, São Paulo, v.2, n.70, p.21-7, jan.

- GLÓRIA, N. A. da ; ORLANDO F<sup>o</sup>. J. Aplicação de vinhaça como fertilizante. Boletim Técnico PLANALSUCAR. Piracicaba, v.5, n.1, p.1-38, jan. 1983.
- JOHNSON, E.G. Soil-Cement For Channel Stabilization. Agr. Eng. v.42, n.7, p.402-4, 1962.
- KRAATZ, D. B. Revestimento de Canales de Riego.. ROMA:FAO, 1977. 217p.
- KROCHIN, I. S. Soil-Cement for Channel Lining. Int. Comn. Irrig. & Drain, India. An. b. p.101-8, 1960.
- LEME, E. J. A. Montagem direta otimizado - o sistema para reduzir consumo de energia. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE INOVAÇÕES TÉCNICAS NA APLICAÇÃO DE VINHACA POR ASPERSÃO, Araras, 1987. Araras, Aspersolo, 1987. p.21-56.
- LEME, E. J. A.; ROSENFELD, U. ; BAPTISTELLA, J. R. Aplicação de vinhaça em cana de açúcar por aspersão. Boletim Técnico PLANALSUCAR, Araras, v.1, n.4, p.1-4, set. 1979.
- LEME, E. J. A.; SILVA, V. C.; HENRIQUE, J. L. P.; MICKLOS, J. E. W. O uso do auto-propelido na aplicação de vinhaça por aspersão; viabilidade técnico-econômica. Piracicaba: PLANALSUCAR. 1987. 65p.
- LIMA, U. de A. Utilização da Vinhaça "In Natura" Como Fertilizante. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE TRATAMENTO DE VINHOTO. Rio de Janeiro, 1976. Anais. Rio de Janeiro, 1976. p.59-60.
- LOW, E. J. Economic Problems of Irrigation Canals: Seepage Losses. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, n.93, n.IR2, p.98-91, jun. 1967.
- MATIOLI, C. S. Aspectos técnicos-econômicos e critérios básicos para otimização de sistemas de fertirrigação de lavoura canavieiras com vinhaça. Piracicaba, 1989. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Depto. de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Univ. de São Paulo. 1989. 195f.

MATIOLI, C. S.; GUAZZELLI, M. A. N.; GAZON, A. L.; MANOEL, A. L.; GAVA, D. A. Controle e manejo de sistemas de fertirrigação. Boletim Técnico. COPERSUCAR, Piracicaba, n.48 p.3-7, 1989.

MATIOLI, C. S.; GUAZZELLI, M. A. N.; LAZO, M. E. P.; GAVA, D. A. Uniformidade de distribuição com caminhões-tanques. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4, Piracicaba, 1988. Anais. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1988. p.249-69.

MATIOLI, C. S.; MENEZES, J. A. Otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura. In: REUNIÃO TÉCNICA AGRONÔMICA. Piracicaba, 1984. Anais. Piracicaba, Centro de Tecnologia Copersucar, 1984. p.67-70.

MENEZES, J. A.; PAIXÃO, A. C. S.; SIRIO, K. J. Transporte dutoviário de vinhaça. Boletim Técnico. COPERSUCAR, Piracicaba, n.25, p.21-3, jan. 1984.

NOGUEIRA, J. B. Mecânica dos Solos: ensaios de laboratório. São Carlos: EESC/USP, Depto. de Geologia e Mecânica dos Solos. 1973. 150p.

ORLANDO F<sup>o</sup>, J. Sistemas de aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar. Alcool e Açúcar, São Paulo, v.1, n.1 p.28-36, nov. 1981.

ORLANDO F<sup>o</sup>, J.; LEME, E. J. de A. Utilização dos Resíduos da Agroindústria Canavieira. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA CANAVIEIRA. 1984, Brasília. D. F. Anais. Brasília: EMBRAPA; Depto. de Estudos e Pesquisas, 1984, p.451-75.

ORLANDO F<sup>o</sup>, J.; SILVA, G. M. A.; LEME, E. J. A. Utilização agrícola dos resíduos na Agroindústria canavieira. In: PROGRAMA NACIONAL DE MELHORAMENTO DE CANA DE AÇÚCAR. Nutrição e adubação de cana de açúcar no Brasil. Piracicaba, 1983. cap.10, p.229-64.

ORLANDO F<sup>o</sup>, J.; SOUZA, I. C. & ZAMBELLO Jr., E. Aplicação vinhaça em soqueira de cana-de-açúcar: economicidade do sistema caminhões tanques. Boletim Técnico. PLANALSUCAR, Piracicaba, v.2, n.5, p.1-35, set. 1980.

- PAIVA, E. M. C. D. Desempenho de Revestimento de Canais em Condições de Campo. São Carlos, 1987. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) Depto. de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Univ. de São Paulo. 1987. 133f.
- PEREZ, J. G. ; SUZAKI, S. Bombeamento de vinhaça; um estudo sobre perda de carga. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, v.106, n.3, p.2-8, maio/jun. 1988.
- PERTICARRARI, J. G. Sulcador para abertura de canais. Boletim Técnico. COPERSUCAR, Piracicaba, n.24, p.2-4, nov. 1983.
- PINTO, C. de S. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento. São Paulo: ABCP. 1980. 22p.
- PITTA, M. R. Solo-cimento para revestimento de barras de terra, diques e reservatórios. 2. ed. São Paulo. A.B.C.P., 1983. 18P. (ET-34).
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Soil-cement laboratory handbook. Illinois, 1971. 62p.
- PORTO, R. M. Escoamento em Superfície livre: Regime Permanente. Univ. Fed. de São Carlos. 1983.
- RAUDIKIVI, A. J. Loose Boundary Hydraulics, 2. ed. New York, Pergamon Press, 1976.
- RITTER, H. Vinhoto: o velho problema vai dar lucro. Química e Derivados, São Paulo, n.167, p.28-32, jun. 1980.
- ROBINSON, A. R. ; ROHWER, C. Measurement of Channel Seepage. Trans A.S.C.E., St. Joseph, paper nº 2865, 122, p.347-363, 1957.
- SACCOMANO, J. B.; GLÓRIA, A. M. & TEIXEIRA, L. F. G. A valiação do emprego de tanques flexíveis para o transporte de vinhaça em frota canaveieira. Alcool e Açúcar, São Paulo, v.9, n.49, p16-20, jul/ago. 1989.
- SANTANA, S. S. Economicidade da aplicação de vinhaça em comparação a adubação mineral. Alcool e Açúcar, São Paulo, v.5, n.23, p.26-38, jun/ago. 1985.

- SIMONS, D. B. ; SENTURK, F. Sediment Transport Technology. Fort Collins, Col. Water Resources Publications 1976
- SUBRAMANYA, K. Flow in Open Channels. New Delhi: India Mc Graw Hill, 1982.
- TEIXEIRA, F. J. Aplicação de solo-cimento em pequenas áreas urbanas. São Paulo: ABCP. 1986. 12p. (BT-109).
- THIAGO, L. R. L. de S. Alternativas para utilização do vinhoto. Miscelânea. EMBRAPA Centro Nacional de Pesquisa do Gado de Corte. Campo Grande, M.S., n.2, p.1-12, dez. 1980.
- TROUT, T. J. Channel Design to Minimize Lining Material Cost. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York. v.108, n.1R4, p.242-49, dec. 1982.
- U.S.B.R. Linings of Irrigation Channels. Washington, 1976. 149p.
- VIEIRA, D.B. Fertirrigação sistemática de cana-de-açúcar com vinhaça. Alcool e Açúcar, São Paulo, v.6, n.28, p.26-30, maio/jun. 1986.
- VILLEN, R. A.; CRAVEIRO, A. M.; ROCHA, B. M. ; NETTO, W. S. Tratamento do vinhoto por digestão anaeróbia sistema de fluxo ascendente. Energia: fontes alternativas, São Paulo, v.3, n.15, p.22-4, 1981.
- WORSTELL, R. V. Estimating Seepage Losses from Canals Systems. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York. v.102, n.I.R.1, p.137-147, March, 1976.