

REVESTIMENTO DE CANAIS ESTADO DA ARTE  
PROPOSTA DE ESTUDO ESPECÍFICO PARA REVESTIMENTO  
COM SOLO ESTABILIZADO COM CIMENTO E/OU CAL

570  
57192

[REDACTED]

NEWTON MOREIRA DE SOUZA

[REDACTED]

REVESTIMENTO DE CANAIS - ESTADO DA ARTE  
PROPOSTA DE ESTUDO ESPECÍFICO PARA REVESTIMENTO  
COM SOLO ESTABILIZADO COM CIMENTO E/OU CAL

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

[REDACTED]

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

Prof. Doutor HEBER CARLOS FERREIRA  
(Orientador)

CAMPINA GRANDE

MAIO - 1984

666.912.2173  
541316

[REDACTED]

## AGRADECIMENTO

O autor expressa o seu agradecimento ao Professor Heber Carlos Ferreira, Ph.D., do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio de orientação a este trabalho.

Agradeço ainda:

- Aos Professores do Departamento de Engenharia Agrícola em especial ao Prof. Hugo Orlando Carvallo Guerra pelas sugestões e estímulo.

- Aos funcionários Vandemberg e Cardoso pelo apoio à arte final.

Em especial agradeço aos meus pais pela formação que me deram sem a qual não realizaria este trabalho.



S719r

Souza, Newton Moreira de.

Revestimento de canais : estado da arte proposta de estudo específico para revestimento com solo estabilizado com cimento e/ou cal / Newton Moreira de Souza. - Campina Grande, 1984.

143 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1984.

"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira".  
Referências.

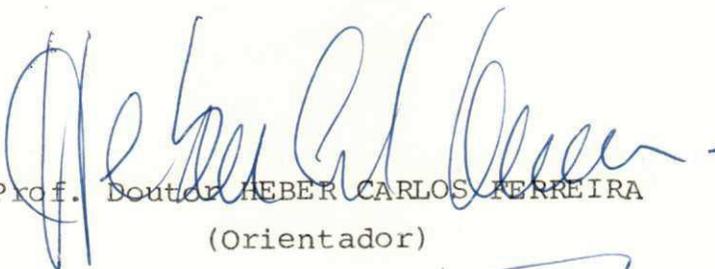
1. Cimento - Revestimento de Solos. 2. Cal. 3. Revestimento de Canais. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Ferreira, Heber Carlos. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 666.972.2(043)

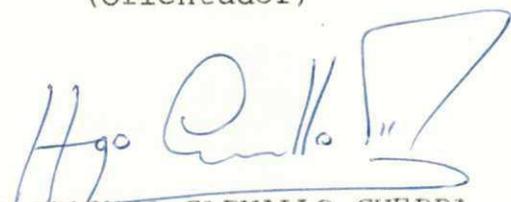
REVESTIMENTO DE CANAIS - ESTADO DA ARTE  
PROPOSTA DE ESTUDO ESPECIFICO PARA REVESTIMENTO  
COM SOLO ESTABILIZADO COM CIMENTO E/OU CAL

NEWTON MOREIRA DE SOUZA

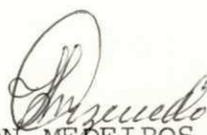
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11/05/84



Prof. Doutor HEBER CARLOS FERREIRA  
(Orientador)



HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA  
Componente da Banca



HAMILTON MEDEIROS DE AZEVEDO  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE  
MAIO - 1984

## SUMÁRIO

	página
AGRADECIMENTO .....	ii
SUMÁRIO .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SIMBOLOS .....	ix
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
CAPÍTULO I - REVESTIMENTO DE CANAIS .....	001
1 - Introdução .....	001
2 - Objetivos .....	004
3 - Justificativa .....	005
4 - Amplitude do Estudo .....	006
5 - Metodologia do Trabalho .....	007
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	009
1 - Parâmetros de Dimensionamento ...	009

	Página
2 - Considerações Gerais do Projeto..	022
3 - Tipos de Revestimento .....	037
<b>CAPÍTULO III - PROPOSTA E DISCUSSÃO DE ESTUDO ESPECÍFICO PARA REVESTIMENTO DE CANAIS COM SOLO ESTABILIZADO COM CIMENTO E/OU CAL .....</b>	<b>082</b>
1 - Introdução .....	082
2 - Investigações Preliminares .....	083
3 - Sondagem .....	086
4 - Caracterização do Solo .....	087
5 - Classificação .....	104
6 - Mapeamento Geotécnico .....	107
7 - Caracterização dos Aditivos .....	110
8 - Caracterização do Solo Estabilizado .....	111
9 - Avaliação do Revestimento .....	118
<b>CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>124</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>137</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
01	Distribuição da força trativa em uma secção trapezoidal .....	012
02	Força trativa unitária máxima .....	013
03	Zonas de diferentes sollicitação em um canal..	015
04	Infiltração para um canal cujo solo que está escavado, tem sob si um substrato permeável..	018
05	Infiltração para um canal cujo solo que está escavado, tem sob si um substrato impermeável	019
06	Infiltração para um canal revestido cujo solo que está apoiado, é muito permeável .....	019
07	Valores de $A'$ em função de $T/y$ para diferentes valores de $\alpha$ .....	020
08	Variação de $I_s T / k \sqrt{A}$ em função de $T/y$ para a condição $A'$ com $DP = \infty$ .....	021
09	Esquemas de cortes de canais em terrenos horizontais .....	027
10	Esquema da secção transversal de um canal em terreno inclinado .....	028
11	Espessura de revestimentos rígidos em função da vazão do canal .....	032
12	Recomendações para ranhuras de contração em revestimento de concreto simples .....	033

Figura		Página
13	Juntas Construtivas de revestimento .....	036
14	Recomendações de borda livre para revestimen- to e coroamento do aterro .....	037
15	Características de plasticidade indicada para solos a serem usados em revestimento de canal	039
16	Recomendações de força trativa admissível pa- ra solos coesivos .....	040
17	Recomendações da força trativa admissível pa- ra solos não coesivos .....	040
18	Secções típicas de revestimento de solo com - compactado .....	042
19	Alguns revestimentos pré-moldados .....	069
20	Detalhes de instalação de revestimento com membrana enterrada .....	078
21	Fluxograma dos estudos específicos para reves- timento de canal com solo-cimento e/ou cal...	084
22	Exemplo de apresentação de resultado de um ensaio do tipo mini-MCV com perda por imersão	106
23	grafico para classificação de solos segundo proposta por Nogami (1981) .....	108
24	Projeto de estrutura para ensaios de erodibili- dade .....	138
25	Aspectos de estrutura para teste de erodibili- dade .....	139
26	Características geométricas da secção para en	

Figura		Página
	saio de revestimento .....	140
27	Projeto de estrutura para ensaio de permeabilidade .....	142
28	Estrutura para ensaio de permeabilidade em canais .....	143



## LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
01	Comparação entre força trativa admissível em canais retilíneos e sinuosos .....	014
02	Valores aproximados da pressão crítica .....	021
03	Recomendações de declividade longitudinal ...	023
04	Valores de coeficiente de rugosidade de <u>Man</u> <u>ning</u> .....	031
05	Propriedades físicas importantes dos solos a serem usados em revestimento de canal .....	046
06	Recomendações de granulometria de agregado pa ra concreto asfáltico .....	072
07	Classificação das frações do solo segundo a escala internacional .....	088
08	Propriedades típicas dos grupos de solos se gundo classificação proposta por Nogami (1981)	109

---

## LISTA DE SIMBOLOS

- A - Área da secção molhada do canal
- A' - Parâmetro para cálculo de infiltração, função de  $\frac{T}{Y}$  e z.
- B - Largura das ranhuras de contração
- $\bar{B}$  - Benefício
- BN - Benefício no ano N
- C - Coeficiente de Chezy
- $\bar{C}$  - Custo
- CN - Custo no ano N
- C' - Profundidade da ranhura de contração
- D - Espessura de solo entre a superfície livre d'água do canal e o limite do substrato.
- Dp - Espessura da camada de solo entre o fundo do canal e um substrato permeável.
- Di - Espessura da camada de solo entre o fundo do canal e um substrato impermeável.
- Dw - Diferença de nível d'água no solo e uma distância L do centro do canal e a superfície livre d'água.
- H<sub>min</sub> - Altura mínima do coroamento acima do nível d'água.
- H' - Carga média
- Is - Vazão de infiltração por unidade de superfície livre do canal.
- L - Distância de um ponto vizinho ao canal, medida a

partir deste, em direção normal ao fluxo, até o centro do canal.

- L' - Comprimento das placas de revestimento.
- K - Permeabilidade do solo.
- Kr - Permeabilidade do revestimento.
- Kc - Coeficiente de sucção capilar
- N - ano para análise de benefício/custo contado a partir do início do projeto.
- NA - Nível d'água.
- P<sub>cri</sub> - Pressão crítica da curva permeabilidade pressão no solo
- P' - Peso por unidade de superfície do revestimento
- Pi - Percentagem da perda por imersão
- Q - Vazão do canal
- R - Raio hidráulico
- Ra - Impedância hidráulica
- S - Inclinação longitudinal do canal
- T - Tirante do canal - largura da superfície livre
- V - Velocidade média do fluxo
- V<sub>max</sub> - Velocidade máxima admissível para um revestimento
- a - Área da secção circular do corpo de prova
- b - Largura do fundo do canal
- c' - Tangente do angulo da curva media do grafico do mi-  
ni-MCV
- d' - Tangente do ramo seco da curva de compactação
- d<sub>35</sub> - Diâmetro correspondente a 35% do material retido

- d<sub>50</sub> - Diâmetro médio das partículas
- e - Índice de vazios do solo
- e' - parâmetro para classificar solo pela proposta de Nogami (1981)
- f - Força trativa unitária
- f' - Coeficiente de aderência entre revestimento e solo.
- g - Aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>)
- h - Profundidade considerada - Medida a partir da superfície
- i - Gradiente
- j - Pressão d'água sobre o revestimento
- l - Espessura do revestimento
- l<sub>1</sub> - Espessura do revestimento do solo no fundo do canal
- l<sub>2</sub> - Espessura do revestimento de solo na lateral, medida horizontalmente
- m - Cotangente de  $\alpha$
- n - Coeficiente de rugosidade de Manning
- n' - Numero de anos para análise benefício/custo de um projeto
- p - Teor de cimento em peso - peso cimento em relação ao peso do solo seco
- q - Vazão de infiltração
- t - Tempo decorrido
- r - taxa de depressiação
- y - Profundidade de fluxo

- $y_{bl}$  - Altura da borda livre
- $y_l$  - Profundidade do revestimento lateral
- $z$  - Inclinação das laterais - Tangente de  $\alpha$
- $\alpha$  - Ângulo formado pela lateral do canal com a horizontal
- $\gamma_a$  - Peso específico da água
- $\gamma$  - Viscosidade cinemática
- $\tau_0$  - Valor médio da força trativa por unidade de área
- $\tau_{crit}$  - Esforço trativo crítico

## RESUMO

O presente trabalho trata de revestimento de canais, equaciona os parâmetros necessários ao dimensionamento do revestimento, fornece elementos essenciais à execução de projeto e descreve os vários tipos de revestimentos usados atualmente. Estabelece uma metodologia de laboratório para caracterizar solos, aditivos e solos estabilizados para a construção de revestimento de canais e avaliar o revestimento pela sua erodibilidade e permeabilidade.

Na revisão, mostra-se que os parâmetros hidráulicos, de erosibilidade e permeabilidade, são a base para compreender os projetos e avaliar os revestimentos de canais. Revêem-se as bases de projeto: traçado, sub-leito, cortes, aterros, velocidade d'água, rugosidade, espessura, juntas e borda livre e são descritas entre outras técnicas as de revestimentos de solo, solo-estabilizado, concreto, superfícies rígidas, membranas expostas e enterradas.

A metodologia de caracterização permite; classificar o solo pela sua compactabilidade e susceptibilidade à água; conhecer elementos para inferir o comportamento do solo e do solo estabilizado e; indicar teores de cimento e/ou cal necessários à estabilização; avaliar a resistência à erosão e a permeabilidade em trechos de canais; indicar um revestimento estável.

## ABSTRACT

The present study deals with lining of canals, defines necessary design parameters for lining, as well as provides essential elements for carrying out projects, and describes various types of lining presently in use. It establishes a laboratory methodology for the characterization of soils, additives and stabilized soil leading to construction of canals, and evaluates the lining through its erodibility and permeability.

The literature reviewed proved that parameters of hydraulic erodibility and permeability are the basis for a better understanding of projects and evaluation of canal lining. With respect to projects, the following aspects were studied: location, subgrades, cuts, embankment, flow velocity with soils, stabilized soils, concrete, hard-surfaces, exposed and buried membranes and types are presented.

The methodology of characterization allows for: (a) classification of soils by its compactability and susceptibility to erosion, (b) the elements to infer the behavior of soil and stabilized soil, (c) estimation of cement and/or lime amounts necessary for stabilization, (d) evaluation of lining, to erosion and permeability in segments of canals, and (e) recommending on stable lining.

## CAPÍTULO I

### REVESTIMENTO DE CANAIS

#### 1 - Introdução

O estudo de revestimento de canais de irrigação interessa incontestavelmente ao Nordeste brasileiro, onde a implantação de uma estrutura permanente de canais para distribuição d'água coloca-se como uma alternativa segura para o atendimento em grande escala, tal como aconteceu em regiões de semelhança geoclimática nos EUA, México, URSS, Índia e outros países.

A formulações matemáticas, para a hidrodinâmica dos canais, são praticamente baseados no estudo do *Chezy*, que em 1775 definiu, através de uma fórmula, as relações entre os parâmetros do fluxo. Dentre as várias adaptações a esta fórmula, a que *Manning* fez em 1889, é uma das mais usadas nos dias de hoje.

Para o estudo dos revestimentos é fundamental conhecer os processos de desgaste e de perda d'água, dispor de métodos para calculá-los e selecionar os materiais adequados a estas solicitações.

O estudo da erosão das paredes dos canais, a partir do conceito de força trativa (arrastro), introduzido por *Du Boys* em 1879, foi completado por *Lane* em 1953. Em seus es-

critos encontra-se a teoria para cálculo dos esforços erosíveis do fluxo e valores admissíveis para solos coesivos e granulares.

O problema da perda d'água em canais, a partir da década de 30, foi objeto de um estudo matemático, consolidado no trabalho de Bower (1969) que apresentou modelos matemáticos, possibilitando o cálculo da infiltração para as várias condições que a natureza impõe.

No estudo das condições gerais de projetos e tipos de revestimento, destacam-se os trabalhos do Dpto. do Interior dos Estados Unidos · USDI (1963) e da FAO (1977) que estabelecem roteiro de projetos e relatam sobre a experiência com vários tipos de revestimentos, somam-se a estes trabalhos os de Israelsen (1962), ICPA (1971), Araujo (1976), Zimmermam (1976), AITEC (1979) e Montanes (1981) que muito cooperaram para fazer-se uma resenha com 20 tipos de revestimento de canais, dentre os quais destacam-se os de: solo compactado, solo solto, solo-cimento, concreto, argamassa, alvenarias, pre-fabricados, concreto asfáltico, membranas plásticas, sintéticas e bentoníticas, selantes químicos e de sedimentos.

Dos revestimentos mencionados, é o de concreto moldado "in loco" o mais usado, pelo domínio da tecnologia e pela qualidade e durabilidade do produto. Entretanto, o custo do cimento e do transporte de agregados pode inviabilizá-lo para pequenos e médios canais, para os quais se indica o solo

estabilizado com cimento e/ou cal como uma alternativa econômica.

As investigações tecnológicas do solo e do solo estabilizado, para o uso em revestimento de canais, são as mesmas usadas nos trabalhos de pavimentação.

A aplicação desta tecnologia tradicional aos solos de regiões equatorial e tropical tem despertado a crítica nos trabalhos de pesquisa geotécnica nos últimos anos.

Dentre os críticos, Nogami e Villibor (1981), propuseram um estudo preliminar para a implantação de um novo sistema classificatório, baseado no comportamento do solo à compactação, e a susceptibilidade à água. Por este sistema os solos são divididos em dois grandes grupos: saprolíticos, e lateríticos, e sete sub-grupos.

No desenvolvimento da metodologia para elaboração deste sistema classificatório, foram normatizados vários ensaios, todos eles com corpos de prova em tamanho reduzido. Estes ensaios permitem que sejam elaborados estudos mais por menorizados das propriedades geotécnicas com menor amostragem de material, em comparação com a metodologia tradicional.

A metodologia atual para o solo-cimento define a dosagem para uso em revestimento, a partir do ensaio de durabilidade, que mede a perda do "peso", de um corpo de prova submetido à escovação durante ciclos de molhagem e secagem. Entretanto, esta não é a única forma de avaliar a durabilidade. Segundo a AITEC (1973), vários países Europeus avaliam-

na pela perda de resistência ou de suas qualidades de variação dimensional, com os ciclos de molhagem e secagem.

Usando os ensaios normatizados pela USP em corpos de prova reduzidos e técnica européia de avaliar a durabilidade, foi possível definir uma metodologia capaz de fornecer elementos para se prever o comportamento do solo-cimento e/ou cal, quando usado em revestimento de canais.

A avaliação de desempenho dos revestimentos é em geral praticada em canais reais. Para laboratório, com algumas recomendações de Henderson (1970) e a experiência de trabalhos anteriores da UFPb, Araújo (1976) e Oliveira (1978), propõe-se uma metodologia para avaliar o revestimento, baseado em dois ensaios distintos: um para erosão e outro para perda d'água, ambos em trechos de canal sob ciclos de molhagem e secagem, um com fluxo d'água e outro com água parada.

## 2 - Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram: reunir os estudos existentes sobre os elementos necessários ao projeto, tais como características, qualidades e metodologias de construção dos revestimentos; apresentar os parâmetros básicos para projetar, caracterizar e avaliar canais revestidos; proporcionar material de divulgação didática àqueles que venham a trabalhar com sistemas de canais para irrigação; fundamentar uma metodologia de caracterização e avaliação dos materiais usados e do revestimento de canais, principalmente com

solo-cimento e/ou cal.

A proposta de metodologia, no que diz respeito ao solo, procurou dar condições de classificá-lo para prever o seu comportamento em obras de revestimento e traçar recomendações ao processo de estabilização. Para o solo estabilizado com cimento e/ou cal, deve-se conhecer as suas características de compactação, permeabilidade, contração, expansão, velocidade de sucção capilar, variação da resistência a seco e saturado e a variação de resistência e de dimensões no decorrer de ciclos de fadiga por molhagem e secagem. Deve ainda a metodologia dar condições de conhecer a influência da cura e medir a evolução da resistência com o tempo.

Para avaliar o desempenho e redefinir critérios para adoção de teores de aditivos, deve-se poder caracterizar a erodibilidade e a permeabilidade do material, quando udado em revestimento de canal. Assim sob condições de fadiga do material, acelerado por ciclos de molhagem e secagem, procurou-se estabelecer formas adequadas para a quantificação usando-se medições diretas e indiretas para cada experimento.

### 3 - Justificativa

Nas pesquisas desenvolvidas na UFPb, referentes ao estudo de revestimento de canais, três problemas fundamentais emergiram, exigindo uma análise mais detalhada: a metodologia construtiva, a caracterização dos materiais empregados e a avaliação do revestimento.

O estudo das metodologias construtivas foi revisto visando, a orientar a continuidade da linha de pesquisa em revestimento de canais. A experiência dos trabalhos desenvolvidos anteriormente neste Centro indicou o uso do solo estabilizado com cimento e/ou cal com alternativa viável para revestir pequenos e médios canais.

Para desenvolver esta pesquisa, tornou-se necessário adotar uma metodologia para caracterizar o solo, os aditivos e o solo estabilizado, visando a sua aplicabilidade em revestimento de canais definindo elementos que pudessem ser correlacionáveis com o seu comportamento em campo.

A avaliação técnica do revestimento, ou seja, a determinação de suas características de erodibilidade e permeabilidade, apareceu como forma prática de testar o material ou a metodologia construtiva.

#### 4 - Amplitude do Estudo

Os elementos coletados na revisão são utilizados para projetarem-se canais de irrigação, revestidos, dando condições de uma ação mais segura para a escolha do tipo de revestimento a ser usado.

A metodologia proposta é aplicável ao estudo sistemático de revestimento de canais na UFPb. Para a implantação de um sistema de canais num projeto de irrigação, a metodologia de caracterização do solo, dos aditivos e do solo estabilizado, pode ser usada para mapear os solos existentes,

selecionar alguns deles para testes de estabilização e ter recomendações para obras de revestimento.

No estudo de uma região propícia à implantação de vários projetos de irrigação, a metodologia de caracterização tem a mesma utilidade descrita anteriormente, além de servir para selecionar-se um ou mais métodos de revestir, a serem ensaiados com base na metodologia de avaliação do revestimento, e recomendar uma técnica padrão de revestimento de canal para a região.

## 5 - Metodologia do Trabalho

O trabalho desenvolveu-se à semelhança dos modelos tradicionais de tese, onde se faz uma revisão bibliográfica para orientar a execução do trabalho propriamente dito. Entretanto, a escassez de bibliografia sobre ensaios de laboratório específicos para revestimentos, levou a que fosse realizado um estudo amplo do estado da arte dos revestimentos de canais, para assim orientar a proposta de estudos específicos para revestimento com solo estabilizado com cimento e/ou cal.

O conhecimento dos parâmetros do dimensionamento, principalmente os de erosibilidade e permeabilidade, são básicos para se conhecerem quantitativamente os elementos que determinam a qualidade do revestimento, e definir as condições do ensaio para avaliação do revestimento.

Os estudos específicos para revestimento de solo esta

bilizado com cimento e/ou cal foram selecionados procurando satisfazer três critérios básicos: uma perfeita caracterização do material, ensaios simples de serem realizados e um pequeno consumo de amostra.

O levantamento preliminar surgiu como forma de orientar os trabalhos de coleta de amostra com base nos estudos já executados por outros órgãos.

Os ensaios de caracterização do solo e do solo estabilizado foram escolhidos de forma tal que seja possível, com base em seus resultados, prever o comportamento geotécnico para o uso em revestimento, indicando a forma mais adequada à estabilização.

Os ensaios de avaliação do revestimento procuram caracterizar o comportamento do solo estabilizado, quando usado no revestimento de canais, medindo-se a erosão e a perda d'água.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 1 - Parâmetros de Dimensionamento

Os canais são geralmente tratados como "estradas d'água" sugerindo uma comparação com as rodovias, o que é interessante para algumas determinações, desde que se tenha clareza de suas diferenças fundamentais.

As cargas atuantes nas rodovias têm grande pressão e pequeno tempo de aplicação comparadas com as dos canais. Nas rodovias a pressão dos pneus dos caminhões é da ordem de 10 kg/cm<sup>2</sup>, enquanto em pequenos canais é da ordem de 0,1 kg/cm<sup>2</sup> e dificilmente atinge 1 kg/cm<sup>2</sup> (≈10m.c.a) em grandes canais. Em um dado ponto do pavimento rodoviário a aplicação da carga é quase instantânea, originando um carregamento e descarregamento cíclico com a passagem dos caminhões; nos canais a passagem d'água provoca uma pressão praticamente constante, variando sensivelmente apenas com o esvaziamento e enchimento do canal.

Nos canais a umidade de trabalho é bem mais elevada pela sua própria natureza de funcionamento e pode vir a secar completamente quando vazio, o que lhe confere uma variação de umidade mais ampla e frequente, pois os pavimentos

têm, em geral, sua umidade pouco alterada, mesmo na época de chuva, já que deve existir a proteção impermeabilizante da capa de rolamento e dos drenos laterais. Assim, as condições de trabalho dos revestimentos de canais são bem mais severas que a dos pavimentos.

Enquanto no dimensionamento dos pavimentos os parâmetros elásticos são os mais importantes, no dimensionamento dos revestimentos de canais são mais importantes os parâmetros: hidráulico, de erosibilidade e permeabilidade.

#### 1.1 - Parâmetros Hidráulicos

As formulações matemáticas para o cálculo de um canal são praticamente baseadas na fórmula de Chezy, que em 1775 assim a definiu:

$$V = C \sqrt{R.S}$$

sendo:

V - velocidade média do fluxo,

C - coeficiente de Chezy, função da rugosidade e da secção,

R - raio hidráulico,

S - inclinação longitudinal do canal.

Muitos estudiosos procuraram melhorar esta fórmula, definindo valores de C que dessem melhores resultados práticos. No entanto, como se pode ver em diversos autores, tais como CHOW (1959), Israelsen (1962), USDI (1963) Henderson

(1970) e em ICID (1972), a adaptação feita por Manning em 1889 é uma das mais usadas nos dias de hoje, e por consequinte é a que apresenta maiores informações para o seu uso.

A fórmula de Manning é dada pela expressão:

$$v = \frac{R}{n}^{1/6} \cdot \sqrt{R \cdot S} = \frac{R}{n}^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

sendo:

n - coeficiente de rugosidade de Manning.

Para projetar-se um canal deve-se conhecer as demandas máxima e a de trabalho. O canal deve ser dimensionado de forma a trabalhar com uma secção de melhor eficiência e atender as exigências da demanda máxima.

Deve-se também conhecer ou fixar três elementos que aparecem na equação e com esta calcular o restante. Assim, com simples manuseio da fórmula de Manning, se conhecem as condições hidrodinâmicas do fluxo no canal.

## 1.2 - Parâmetros de Erosibilidade

A erosão é um fenômeno determinante no desempenho do revestimento. A força d'água que provoca o cisalhamento das superfícies do revestimento do canal, é chamada força trativa ou força de arrasto. Esta força hidrodinâmica para canais lineares de fluxo permanente uniforme pode ser expressa em termos de esforços, segundo Chow (1959), Henderson (1980), Shen (1977), entre outros, pela seguinte equação:

$$\tau_o = \gamma_a \cdot R \cdot S$$

sendo:

$\tau_0$  - valor médio da força trativa por unidade de área,  
 $\gamma_a$  - peso específico d'água.

No entanto, a força trativa não é uniformemente distribuída ao longo da secção do canal, tendo valores distintos para o fundo e as laterais, que em canais trapezoidais segundo Lane (1955), assume a conformação da fig. 1 e é expressa pela fórmula:

$$\tau_0 = f \cdot \gamma_a \cdot R \cdot S$$

sendo:

$f$  - força trativa unitária, adimensional função da posição e do tamanho do canal.

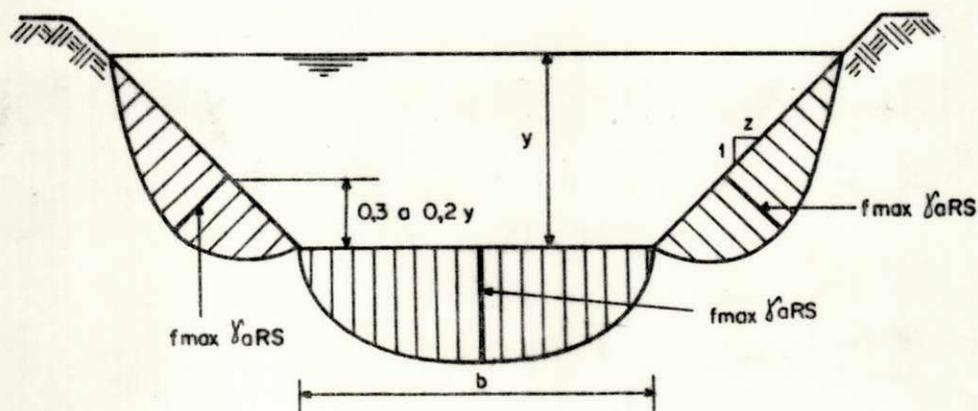


Fig.01 - Distribuição da força trativa em uma secção trapezoidal. (LANE, 1953)

Os valores máximos nas laterais e no fundo podem ser expressos em função da relação entre a largura do fundo (b), da profundidade de fluxo (y), e da inclinação das laterais (z); assim, o valor de f pode ser obtido na fig. 2.

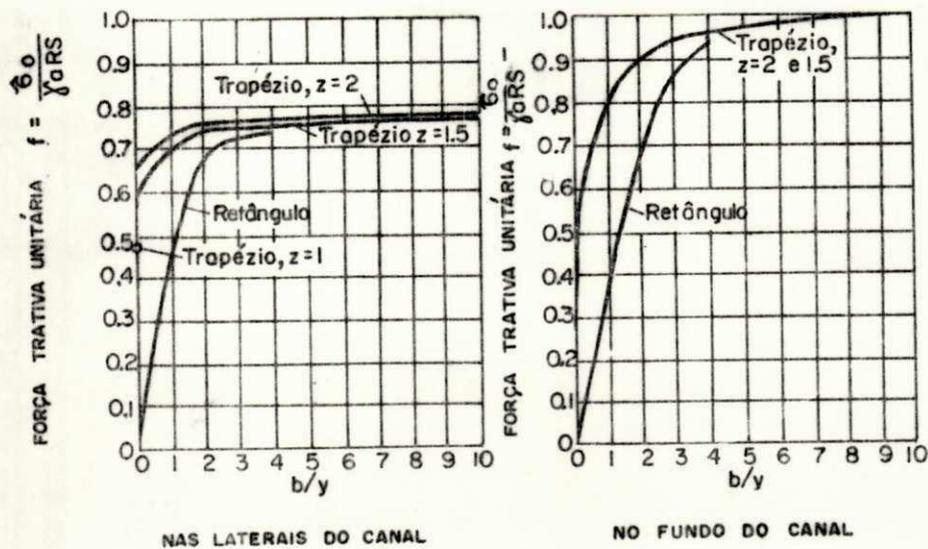


Fig.02 - Força trativa unitária máxima. (LANE, 1953)

Substituindo o valor de R.S da equação de  $\tau_0$  na fórmula de Manning, tem-se:

$$V = \frac{\tau_0^{1/2} \cdot R^{1/6}}{\gamma_a^{1/2} \cdot n \cdot f^{1/2}}$$

Baseado nesta equação, pode-se definir qual a velocidade máxima admissível em função das características do material do revestimento, isto é, do esforço trativo crítico- $\tau_{crit}$ , acima do qual se inicia a erosão. Assim:

$$V_{max} < V = \frac{\tau_{crit}^{1/2} \cdot R^{1/6}}{\gamma_a^{1/2} \cdot n \cdot f^{1/2}}$$

Para as situações onde se têm definidas as condições de fluxo, pode-se dizer que o material deve ter uma resistência maior que o esforço trativo atuante, assim:

$$\tau_{crit} > \tau_o = \frac{V^2 \cdot n^2 \cdot f \cdot \gamma_a}{R^{1/3}}$$

Desta forma, vê-se que a característica de erodibilidade do revestimento pode ser dada tanto em função do esforço trativo crítico, como pela velocidade máxima admissível.

Segundo Lane (1955), os valores do esforço trativo crítico e velocidade admissível devem ser minorados em caso de canais sinuosos e faz as recomendações da tab. 1.

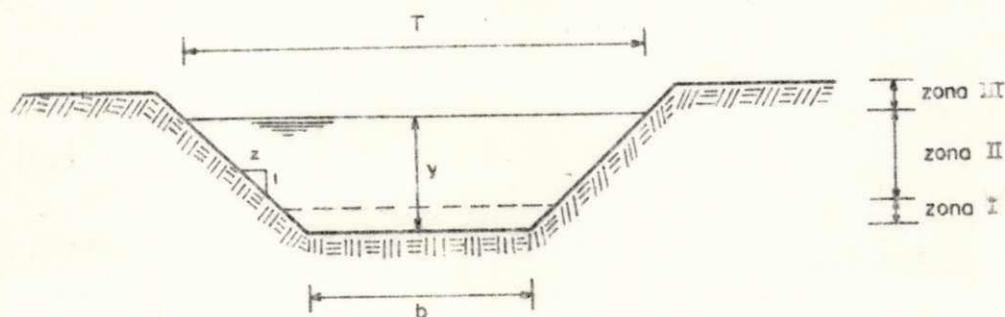
Tabela 1 - Comparação entre esforço trativo crítico em canais retilíneos e sinuosos, (Lane 1955).

Grau de Sinuosidade	Limite Relativo	
	Força trativa	Velocidade
Canal retilíneo	1,00	1,00
Canal pouco sinuoso	0,90	0,95
Canal moderadamente sinuoso	0,75	0,87
Canal muito sinuoso	0,60	0,78

Estudando revestimento de solo-cimento, Shen (1977) demonstrou que os ciclos de molhagem e secagem a que estão submetidos os revestimentos, são os responsáveis pela diminuição gradativa ao longo do tempo do valor característico

crit. e assim, para a caracterização do material, deve-se conhecer o valor de  $\tau_{crit}$  após o processo de fadiga, para então compará-lo com as solicitações da obra.

De uma forma geral, pode-se definir três zonas de solicitação onde o processo de fadiga devido aos ciclos de molhagem e secagem são distintos. A fig. 3 mostra estas zonas e é, sem dúvida, a zona II a mais afetada pelas variações de umidade e temperatura. Deve-se destacar, também, a interface da zona II e III onde ocorrem cavitação e outras solicitações devido à formação de ondas no fluxo, que danificam sensivelmente o revestimento.



- Zona I - O tempo todo com água  $\Rightarrow$  Umidade constante, pouca variação de temperatura.  
 Zona II - Ora com água, ora sem água  $\Rightarrow$  Grande variação de umidade e temperatura.  
 Zona III - Nunca em contato direto com a água  $\Rightarrow$  Variação média de umidade e temperatura.

Fig.03 - Zonas de diferente solicitação em um canal. (SHEN, 1977)

### 1.3 - Parâmetros de Permeabilidade

A perda d'água é o maior problema colocado na definição de um revestimento para canal de irrigação, USDI (1974). A perda d'água deve ser sempre minimizada, pois, além de diminuir a eficiência do sistema como um todo, pode elevar indevidamente o nível freático, provocando, entre outros problemas, a ascensão de sais, problema tão nocivo e presente nas terras nordestinas.

A vazão da água perdida por percolação depende das características de permeabilidade do revestimento propriamente dito e também das camadas do solo sob este.

Bower (1969) divide o problema em três condições básicas:

A - O canal está escavado em solo uniforme e tem sob si um substrato muito permeável (considerado de permeabilidade infinita) fig. 4.

B - O canal está escavado em solo uniforme e tem sob si um substrato pouco permeável (considerado impermeável) - fig. 5.

C - O canal é revestido e apoiado em solo muito permeável comparado com o material do revestimento. fig. 6.

Para o caso A, pode-se ver na fig. 4, uma situação particular A', quando a permeabilidade da camada subjacente é suficientemente grande para manter uma drenagem livre, ficando o nível freático abaixo da interface entre camadas, ( $DW > D$ ).

Chama-se  $q$  a vazão de infiltração da água perdida por unidade de comprimento de canal e  $I_s$  a vazão de percolação por unidade de superfície livre do canal. Assim:

$$I_s = \frac{q}{T}$$

sendo:

$T$  - tirante, largura da superfície livre do canal.

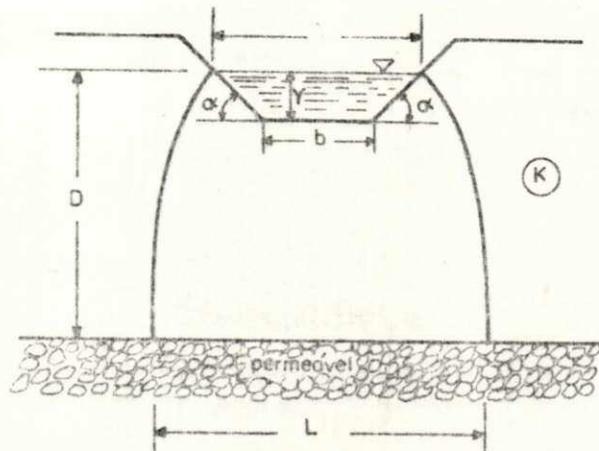
Normalmente, para a execução de ensaio, procura-se simplificar o modelo para a condição A' em caso de canais não revestidos, Harr (1962) e Oliveira (1981), e para a condição C' em caso de canais revestidos, Bower (1969).

Na condição A' supondo-se  $D_p$  suficientemente grande para ser considerada de espessura infinita, a condição A' expressa a perda d'água de um canal escavado em solo uniforme de permeabilidade  $k$ , com nível freático a uma profundidade também infinita. Nestas condições para canal trapezoidal a perda d'água pode ser dada por:

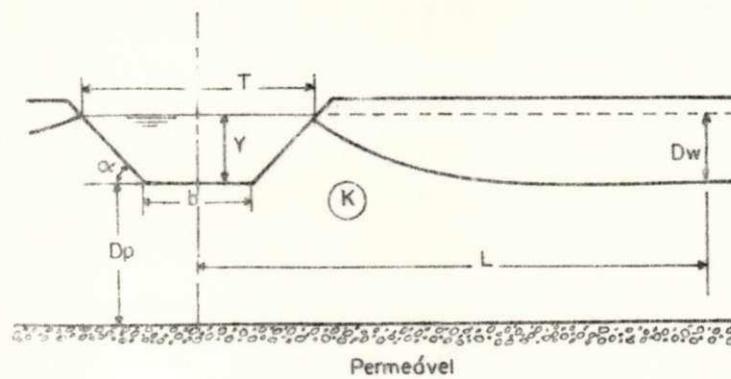
$$\frac{I_s}{k} = 1 + A' \frac{Y}{T}$$

sendo:

$A'$  - função da relação  $\frac{T}{Y}$  e da inclinação da lateral lateral



A' - Permeabilidade suficiente para manter drenagem livre.



A - Permeabilidade insuficiente para manter drenagem livre.

Fig.04- Condição A - Infiltração para um canal cujo solo que está escavado tem sob si um substrato permeável. (BOWER,1969)

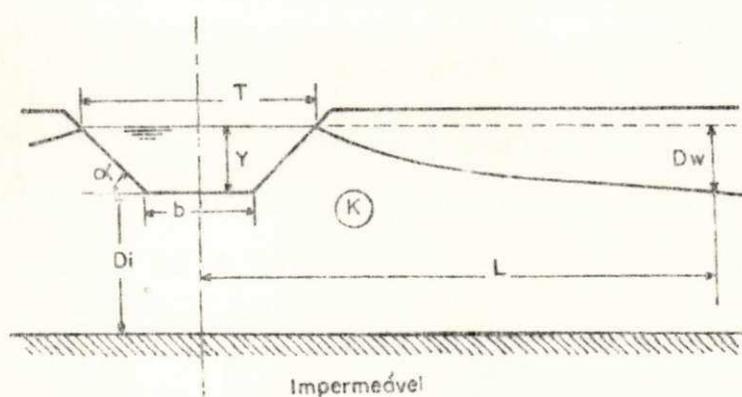


Fig.05- Condição B - Infiltração para um canal cujo solo que está escavado tem sob si um substrato impermeável. (BOWER 1969)

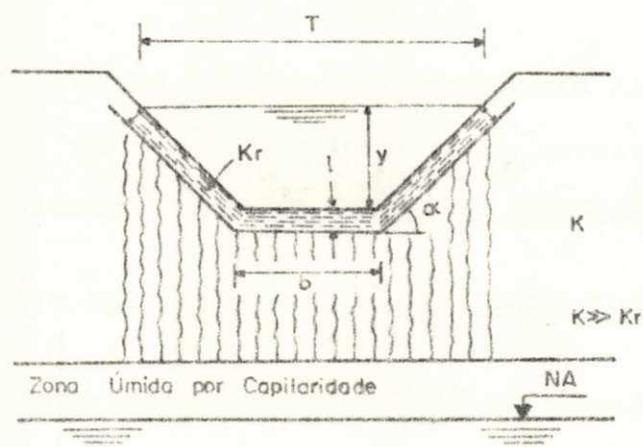


Fig.06- Condição C - Infiltração para um canal revestido cujo solo que está apoiado é muito permeável. (BOWER, 1969)

Tabela 2 - Valores aproximados da Pressão Crítica, (Bower 1969).

Solo	$P_{cri}$ em cm de água
pedregulho e areia média	- 20
areia fina e areia argilosa	- 50 a - 100
argila estruturada e argila pura	- 150 ou menos

A forma da secção também influi na infiltração como se pode ver na fig. 8 extraída de Bower (1969), na qual se percebe claramente que as menores perdas por infiltração se dão para uma relação entre a largura do tirante e a profundidade do fluxo ( $T/Y$ ) na ordem de 2 a 4.

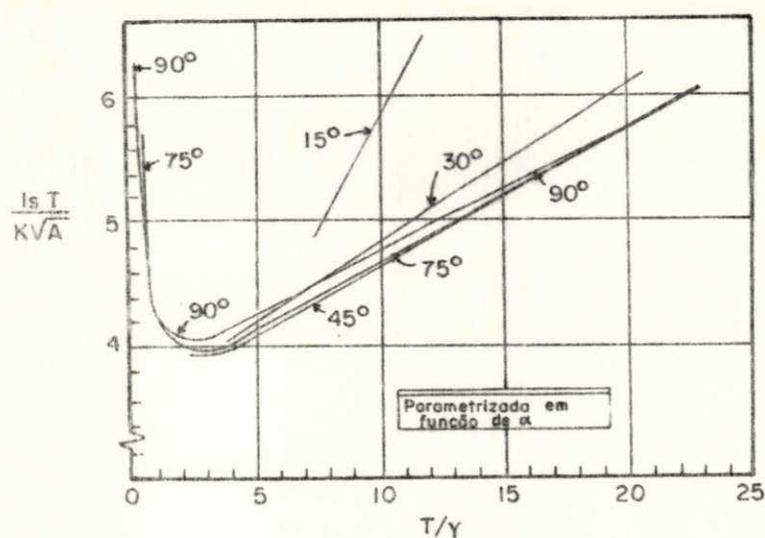


Fig.08- Variação de  $I_s T / KVA$  em função de  $T/Y$  para diversos valores de  $\alpha$ , sob a condição A com  $D_p = \infty$ . (BOWER, 1969)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coo de Educação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 832 - Tel. (33) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

## 2 - Considerações Gerais do Projeto

As definições das características do projeto de um canal revestido, na maioria das vezes, são determinadas por condições locais e não ideais. Assim, apesar de a secção semi-circular ser a mais eficiente do ponto de vista hidráulico, nem sempre esta pode ser utilizada. Na verdade, para grandes canais utiliza-se uma inclinação nas laterais de  $1\frac{1}{2}:1$  a  $2:1$  e em canais menores, usam-se inclinações maiores, conforme permita o material, USDI (1963).

Para os canais revestidos utiliza-se uma relação entre a largura do fundo e profundidade do canal na faixa de 1 a 2 para canais que vão de pequeno a grande respectivamente, USDI (1963). Para grandes canais em terra esta relação pode chegar a 8, USDI (1963), USDI (1974).

Antes de explanar sobre as características peculiares de cada revestimento, serão apresentados alguns elementos importantes na definição geral do projeto de um sistema de canais para irrigação.

### 2.1 - Traçado

Na definição do traçado de um sistema de irrigação deve-se ter em mente que os canais sempre ocupam os locais mais altos e os drenos, as depressões. Os canais principais ocupam os cumes principais e os secundários, os cumes secundários, Leliavski (1965). Daker (1976). Assim, de uma forma

geral, as inclinações longitudinais são mais acentuadas nos terre por onde passam os canais secundários, que o principal.

As curvas são preferencialmente circulares com um raio de curvatura com cerca de 10 a 15 vezes a largura do fundo.

O USDI (1963) recomenda uma tolerância de erros na execução da obra "compatível com uma boa engenharia" e fixa para canais de concreto uma variação permissível na horizontal, de 10 cm quando em curva, e 5 cm quando em tangente, e na vertical, de 2,5 cm, para ambos os casos.

A inclinação longitudinal deve ser tanto menor quanto maior for a vazão do canal, sendo usual os valores da Tabela 3.

Tabela 3 - Recomendações de declividade longitudinal. (Daker, 1976).

grandes canais (mais de 10 m /s)	S = 0,10 a 0,30%
canais medianos (3 a 5 m /s)	S = 0,25 a 0,50%
canais pequenos (0,1 a 3 m /s)	S = 0,50 a 1,00%
canais muito pequenos (menos de 0,1 m /s)	S = 1,00 a 4,00%

## 2.2 - Sub-leito

O sub-leito é um dos principais requisitos para o sucesso dos revestimentos, principalmente os rígidos. Somente uma fundação firme pode reduzir as possibilidade de trinca-

mento ou mesmo ruptura devido ao recalque.

Solo de baixa densidade deve ser compactado ou trocado por outro material de forma a garantir boas condições para o revestimento. Em caso de compactação, devem ser revolvidos com arado não menos de 15 cm, e colocados na umidade correta, antes de proceder à compactação.

Os solos arenosos, em geral, são bons para sub-leito de revestimento de canais, devido a sua boa capacidade drenante e estabilidade volumétrica, o que evita a elevação do lençol freático e oferece capacidade portante, uniforme e estável, de forma a não comprometer a integridade do revestimento.

Solos siltsos com baixa densidade podem formar vazios quando molhados, ao que deve ser dada atenção especial, USDI (1963).

Na medida em que os solos vão se tornando mais argilosos, eles passam a sofrer maior ou menor variação volumétrica, o que pode comprometer a qualidade do revestimento. Nos casos de solos expansivos, adota-se basicamente uma de duas soluções; uma, onde a camada sob o revestimento é trocada por um solo mais estável; outra, onde se procede à compactação daquele em condições de umidade acima da ótima, aplicando-se o revestimento antes que o solo perca umidade, USDI (1963), ICPA (1971, b). Esta última técnica requer muito cuidado, pois ao evitar a expansão pode-se provocar problemas de contração, quando da secagem do sub-leito.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso 882 Tel (083) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

Quando se prevê a possibilidade de solos argilosos im permeáveis no sub-leito impedirem o adequado fluxo d'água abaixo do revestimento, deve ser prevista a drenagem da área, para assim evitar os esforços de sub-pressão. A drena gem pode ser constituída por uma camada de 10 a 15 cm de material drenante sob o revestimento em um ou ambos os lados do canal. A água pode ser esgotada por drenos transversais ao canal para regiões mais baixas ou para dentro do canal através de válvulas de pressão tais como as desenhadas pelo USDI (1963), ou por juntas drenantes a base de concreto magro tais como as do canal principal de Morada Nova, cuja construção foi acompanhada pela ABCEP (1971).

Canais escavados em rocha podem apresentar problemas de incompatibilidade de deformações provocando trincas no revestimento. Isto ocorre principalmente para canais de con creto. Para evitar danos, se interpõe entre o revestimento e a rocha uma camada de no mínimo 7,5 cm e com 12,5 cm em média, de solo arenoso compactado, USDI (1963), ICPA (1971b). Para revestimentos com membranas finas, deve ser evitada a perfuração, utilizando-se a mesma técnica para uniformizar a superfície de apoio. Para revestimento com argamassa projetada sob pressão, (shotcrete), pode-se fazer aplicação di recta, pois suas características de aderência e deformação ga rantem o bom funcionamento quando aplicada em sub-leito ro choso.

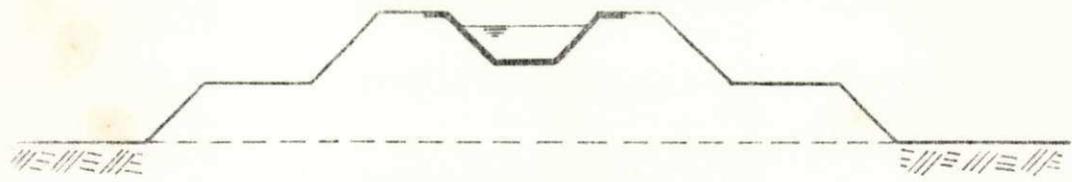
### 2.3 - Corte e Aterro

Na maioria das vezes, o perfil longitudinal do canal não consegue acompanhar a mesma inclinação do terreno, o que obriga a que sejam feitos cortes e aterros variados, ao longo do canal. A qualidade e quantidade destas obras devem ser definidas em consonância com o tipo de revestimento do canal.

Em conformidade com a disposição do nível do canal (fundo ou boca) em relação ao nível do terreno, têm-se situações variadas tais como as esquematizadas na fig. 9. Para a grande maioria dos casos, considera-se a situação c) como a mais apropriada para terrenos planos, Daker, (1976), pois além de diminuir os custos com movimento de terra, facilita-se o manejo d'água, que fica pouco acima do terreno a ser irrigado, o revestimento recebe poucos esforços, além dos do fluxo d'água. Situações extremas como a) e e) devem ser evitadas.

Na medida em que os terrenos são inclinados transversalmente à direção do canal, os cortes e aterros vão se tornando diferentes de um e outro lado do canal, combinando-se assim as diferentes situações mostradas na fig. 9. Um exemplo comum é o da fig. 10, onde se tem corte em um lado e aterro em outro.

A largura do coroamento em aterros, segundo o USDI (1963) e o ICPA (1971, 1972) é de 60 a 120 cm para canais



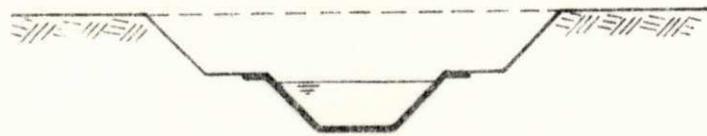
a) grande aterro



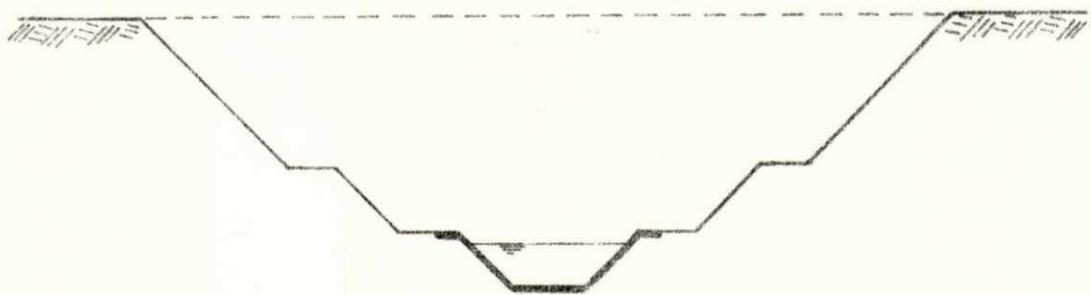
b) aterro



c) aterro e corte



d) corte



e) grande corte

Fig.09 - Esquema de cortes e aterros para canais em terrenos planos.

é  $3 \text{ m}^2/\text{s}$ , e de 180 a 240 cm para canais maiores. Segundo Daker (1976), estes podem ser mais estreitos para solos argilosos que para os arenosos e variam de 30% a 50% da largura total do canal. Para o caso de cortes, estes valores podem ser diminuídos, desde que seja garantida a estabilidade do talude.

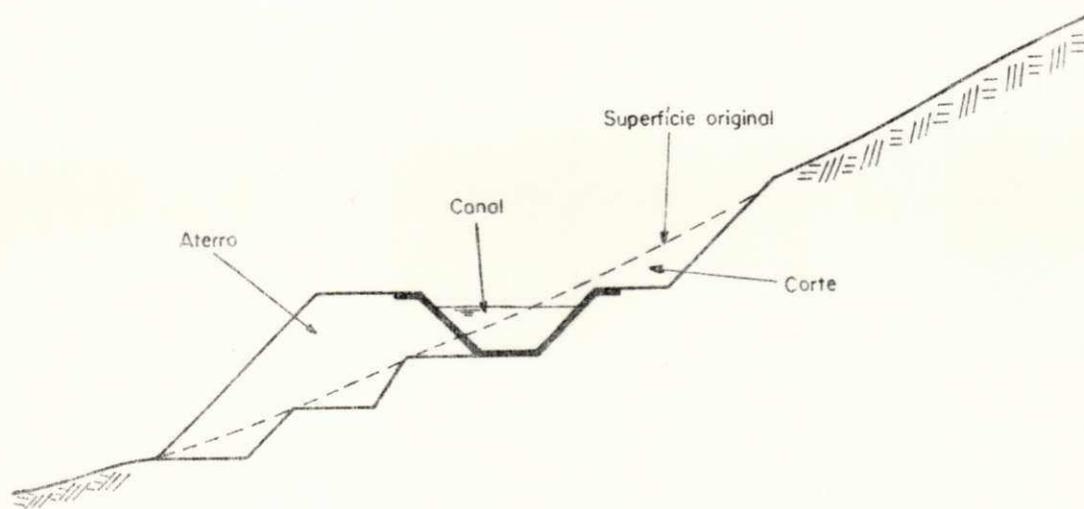


Fig. 10 - Esquema da seção transversal de um canal em terreno inclinado.

Em canal cuja largura exceda 13 m, deve ser prevista berma de manutenção abaixo do coroamento do aterro. Em cortes profundos, as bermas são usadas para reduzir a carga do solo sob o revestimento e prevenir escorregamento de terra para dentro do canal, USDI (1974).

Normalmente, os taludes de saída têm inclinação de 1:1, apesar de as operações de campo tenderem a formar talu

des mais suaves este é um bom valor para os solos que normalmente são usados, USDI (1963), ICPA (1971 b).

A compactação dos aterros deve ser executada em camadas com não mais de 15 cm medidos após a compactação. A densidade seca deve ser no mínimo 95% da máxima encontrada em laboratório, determinada no ensaio do próctor normal ou equivalente. A umidade deve ser a ótima. O material distribuído e compactado deve ser homogeneizado e isento de lentes e torções de argila.

Os solos usados para fins de aterros devem ser escolhidos e preparados de forma a suportar eventuais quebras localizadas do revestimento, garantindo a estabilidade de estrutura por perda de suporte devido ao umedecimento e/ou carregamento do solo.

O solo obtido da escavação do corte pode ser usado, desde que examinada sua característica de compactação. Quando este não apresentar condição necessária para suporte do revestimento, ele pode ser colocado no aterro de forma tal que funcione apenas como enchimento sem comprometer a estabilidade do aterro.

#### 2.4 - Velocidade d'água

O custo de um canal, como de qualquer conduto, é proporcional ao seu tamanho e será, portanto, tanto menor quanto menor a área de sua secção, o que se consegue, para uma dada vazão, aumentando a velocidade de escoamento ao máxi-

mo admissível, a qual é limitada pela resistência do revestimento à erosão. A velocidade de escoamento deve ser fixada, portanto, em função do material de revestimento das paredes e do fundo do canal, Neves (1979).

O período de erosão é diminuído com o emprego de velocidades baixas, o que, levado ao exagero, implica em canais de grande tamanho. As baixas velocidades também favorecem o crescimento de plantas aquáticas e a deposição do material suspenso, além de aumentarem as perdas por evaporação e infiltração, Neves (1979). Em geral, velocidades acima de 0,60 a 0,90 m/s são suficientes para impedirem o assoreamento e o crescimento de vegetação, Chow (1959), Henderson (1970), Lencastre (1976), Zimmerman (1976), Neves (1979).

Para canais onde a resistência à erosão é suficientemente grande para não interferir no dimensionamento, usa-se uma velocidade de 2,5 a 3,0 m/s, USDI (1963). Para os demais revestimentos, a velocidade depende das características peculiares de cada material.

## 2.5 - Coeficiente de Rugosidade

A rugosidade é inversamente proporcional à capacidade do canal. O valor da rugosidade vai depender essencialmente do tipo de material empregado e da qualidade do acabamento usado. Para a Fórmula de Manning este valor pode ser encontrado em diversas publicações, Chow (1959), USDI (1963), Henderson (1970), Lencastre (1972), Zimmerman (1976), Neves

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 Tel. (083) 321 7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

(1979), Silvestre (1979), Linsley (1978), entre outras, a partir das quais se constrói a tab. 4.

Tabela 4 - Valores de Coeficiente de rugosidade de Manning.

Material do revestimento	n	1/n
vidro, plástico metal laminado	0,010	100
Queimado com nata de cimento, tábua aplainada	0,011	91
Concreto bem liso (desempenado com metal)	0,012	83
Concreto, tábua serrada, alvenaria rebocada, solo-cimento bem acabado, material asfáltico e membranas pré-fabricadas	0,015	67
Argamassa bem acabada, solo-cimento	0,016	63
Solo-cimento e argamassa mal acabados	0,017	59
Areia fina, colóides	0,020	50
Argila dura, xisto, siltes aluvionais, areia, pedregulhos	0,025	40

Para canais, em material não coesivo, a rugosidade é função do diâmetro das partículas e do raio hidráulico, e segundo Lencastre (1979) é expressa pela fórmula:

$$\frac{1}{n} = 26 \left( \frac{R}{d_{35}} \right)^{1/6}$$

onde  $d_{35}$  é o diâmetro correspondente a 35% do material retido. Outras fórmulas para materiais não coesivos podem ser encontradas em Lane (1955).

## 2.6 - Espessura

A espessura dos revestimentos varia de acordo com o tipo de material empregado, sendo os mais finos aqueles de membranas plásticas com espessuras de 0,02 a 0,5 mm, seguidos das de borracha, de asfalto de fibra e outros com espessuras na faixa de 0,1 a 10 mm, e os mais grossos, os de terra com espessuras variando de 15 a 100 cm. Os revestimentos à base de cimento ou concreto asfáltico tem espessuras variáveis de 5 a 10 cm conforme seja a vazão do canal e a forma de aplicação do material; pode-se ainda obter espessuras menores na faixa de 2 a 5 cm para revestimentos pré-fabricados ou com argamassa fortemente adensada. A fig. 11 mostra as recomendações do USDI (1963), para espessuras de revestimentos rígidos, em função da vazão do canal.

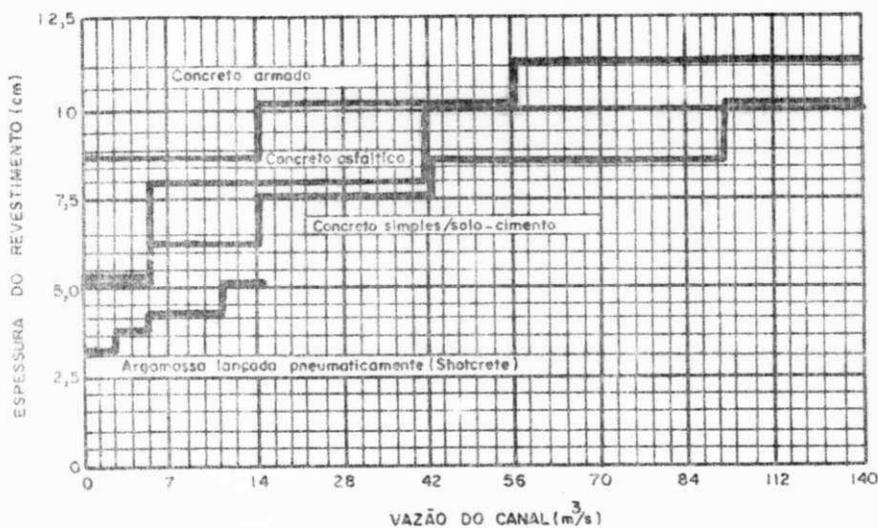


Fig. 11 - Espessura de revestimentos rígidos em função do vazão do canal. (USDI, 1963)

## 2.7 - Junta

As juntas são soluções de continuidade de revestimento e assumem diversas funções conforme sejam as causas de sua aplicação, sendo basicamente de 5 tipos: contração, expansão, longitudinais, drenantes e de construção.

As juntas de contração são geralmente usadas em revestimento de concreto, para se evitarem trincas provocadas pela dissipação do calor de hidratação. Estas juntas são basicamente ranhuras de 1/3 da espessura do revestimento e colocadas transversalmente ao canal a cada 3 a 4,5 m conforme as características do revestimento. As recomendações do USDI (1963) e ICPA (1971 b) são basicamente as da fig. 12. Estas juntas servem também para combater deformações diferenciais entre as duas faces do revestimento provocadas por diferença de temperatura e/ou umidade. Uma das vantagens deste tipo de junta é que a formação inevitável de trincas, dá-se em local conhecido, facilitando os possíveis reparos.

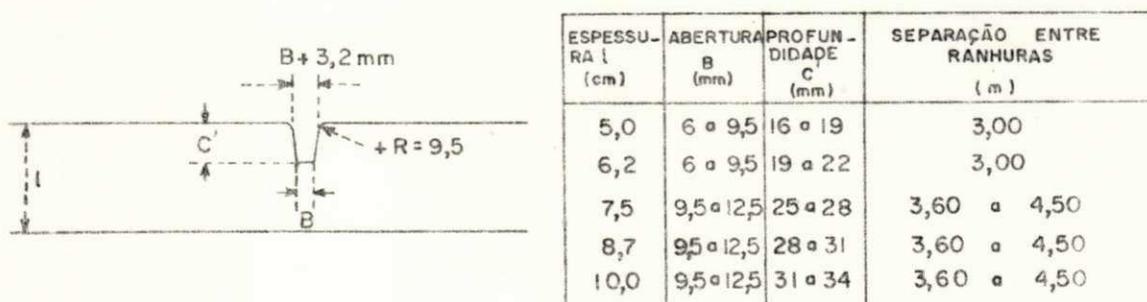


Fig.12 - Recomendações para ranhuras de contração em revestimento de concreto simples. (ICPA, 1971)

As juntas de expansão tem a finalidade de absorver esforços devido ao aumento das dimensões por aumento de temperatura e umidade. Ao mesmo tempo, devem manter a estanqueidade quando estes esforços deixam de atuar. Este tipo de junta é, porém, dispensável na maioria dos revestimentos, inclusive nos de concreto onde as tensões provocadas por aquecimento de até 45<sup>o</sup>C provocam esforços de ordem de 100kg/cm, plenamente suportáveis por este material. No entanto, devem ser usadas junto a obras fixas como pontes, casas de bombas, ou em curvas pronunciadas. Estas juntas são preferencialmente de material flexível aplicado nas lacunas entre peças. É o caso das juntas à base de betume mastic e outros produtos similares, colocadas após a execução das peças; podem, também, ser juntas pré-fabricadas em plástico ou borracha, aplicadas no momento da concretagem da peça.

As juntas longitudinais são usadas para canais de grande porte, para se evitarem fissuras longitudinais. Para canais com mais de 9,00 m de perímetro, as juntas são executadas à semelhança das de contração a cada 3,0 a 4,50 m, conforme a espessura do revestimento seja menor ou maior.

As juntas drenantes são usadas para aliviar a sub-presão provocada pela água que se interpõe entre o revestimento e o sub-leito, quando este tem fraca capacidade drenante. Estas juntas são constituídas de material poroso (concreto com pouca areia por ex.) para permitir a passagem d'água através de si, quando a pressão externa for mais que a inter

terna, (caso comum no esvaziamento do canal ou nas grandes precipitações).

As juntas construtivas são fruto das características de cada material e seu processo de aplicação. Em geral, estas são projetadas de forma tal a cumprir as funções das juntas anteriores.

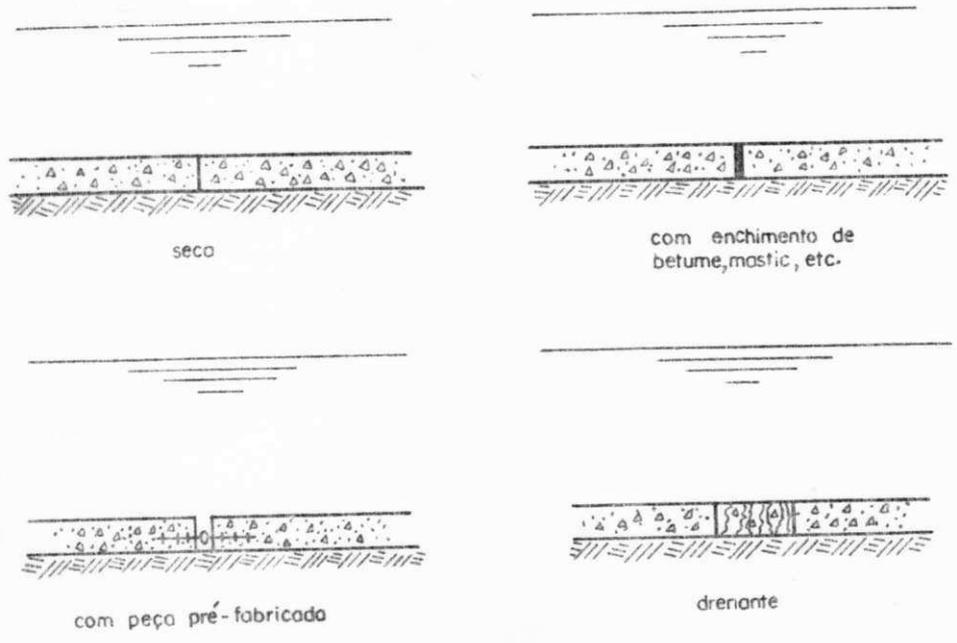
As juntas podem ser de topo, de superposição e de encaixe (fig. 13). Nas de topo, onde o revestimento é seccionado em um plano normal à superfície do revestimento; nas de superposição, onde uma parte do revestimento é colocada sobre a outra na direção do fluxo; nas de encaixe, uma parte da superfície encaixa-se à outra.

#### 2.8 - Borda Livre

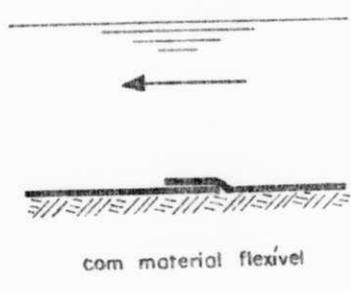
Deve-se projetar uma borda livre acima do nível previsto da água, como fator de segurança, para se evitarem problemas devido à redução da seção por deposição de material sólido; redução da capacidade de escoamento em face de crescimento de plantas; ação das ondas; recalque das margens; ou ainda, como salvaguarda em relação a vazões maiores que as do projeto, provocadas por temporais, Linsley (1978).

A faixa usual da borda livre é de 5 a 30% da profundidade de fluxo, sendo usual adotarem-se valores da ordem de 15 cm para pequenos canais, até 120 cm para grande canais, Chow (1959). Entre o fim do revestimento e o coroamento dos aterros, deve também existir uma folga que varia de 20 cm a 100 cm.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso 882 Tel (083) 321 7222-R 355  
58 100 - Campina Grande - Paraíba

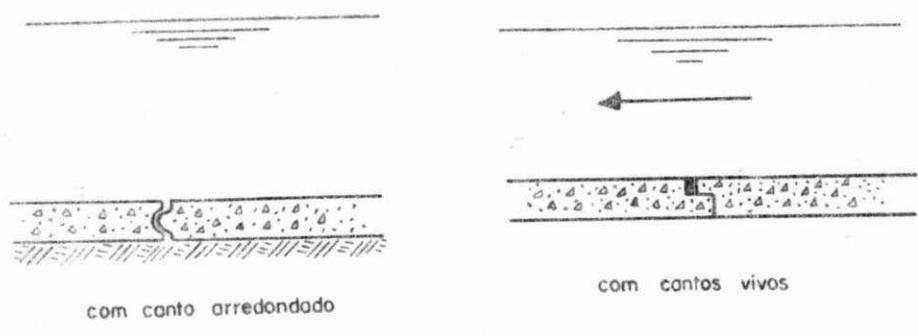


a) De topo



com material flexível

b) Superposta



com canto arredondado

com cantos vivos

c) Encaixadas

Fig. 13 - Juntas construtivas de revestimento.

Para fins práticos pode-se adotar os valores da fig. 14, fornecida pelo USDI (1963).

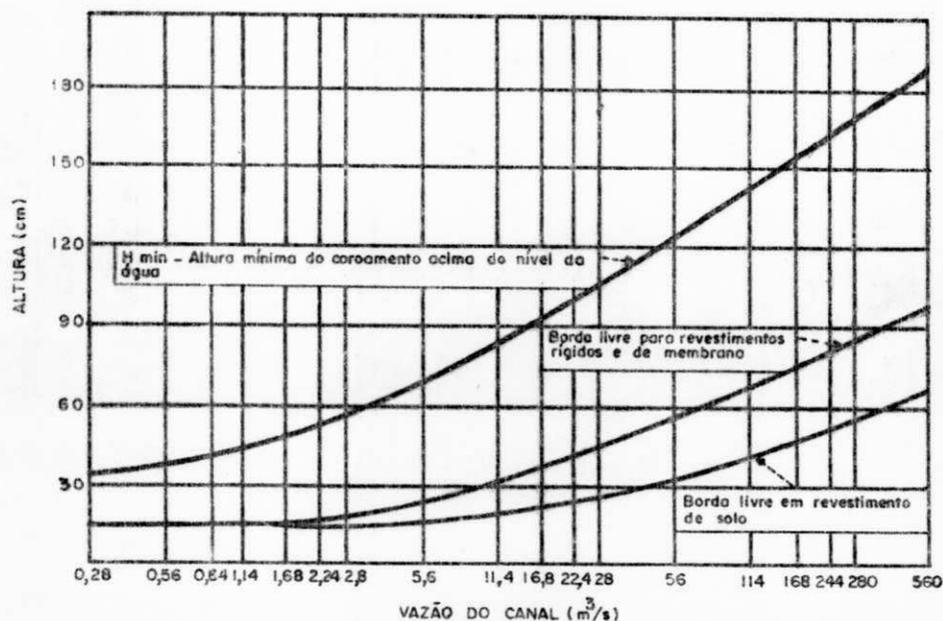


Fig.14 - Recomendações de borda livre para revestimento e coroamento do aterro. (USDI, 1963)

### 3 - Tipos de Revestimento

#### 3.1 - Revestimento de Solo

Nesta categoria de revestimento poderia ser incluído uma diversidade bastante grande de formas de controlar erosão e perda d'água em canais. Solos finos espalhados hidraulicamente ou mecanicamente para selar por sedimentação o perímetro molhado, esmectita (bentonita) seja como membrana en

terrada ou misturada com solo permeável, cobertura com solo granular para proteção de membranas enterradas e solos estabilizados serão estudados separadamente.

Como revestimento de solo será tratado aquele de solo compactado ou de solo solto. O revestimento de solo compactado é dividido em dois grupos: o solo compactado com grande espessura, a qual varia de 50 cm a 1 m nas laterais e de 30 a 50 cm no fundo, e revestimento é aplicado em camadas horizontais de no máximo 15 cm após compactadas; no de pequena espessura, a qual varia de 15 a 30 cm, o revestimento é aplicado em camada acompanhando o desenvolvimento da seção, sendo preciso em alguns casos usar uma cobertura de proteção. Para o revestimento de solo solto, usa-se solo argiloso em camada espalhada sobre o fundo e as laterais com espessura aproximada de 15 a 30 cm. Este tipo de revestimento requer, em geral, uma cobertura de material granular para protegê-lo contra a erosão Byrne (1946), Lauritzen (1948), USDI (1963).

Uma grande gama de solos impermeáveis podem ser usados com sucesso em revestimento de solo. Terão melhor resultado os solos com boa graduação, impermeáveis e de plasticidade adequada. Os mais adequados são os pedregulhos bem graduados, tendo areia argilosa como ligante (GW-GC). Os pedregulhos são providenciais na resistência à erosão e o material argiloso garante a impermeabilização, USDI (1963, 1974). Pedregulhos argilosos (GC) são os próximos em qualidade,

seguidos por areias misturadas com argila (SW-SC) e areias argilosas (SC). Silte pedregulhoso (GM) pode ser usado com sucesso. Em qualquer caso, o importante é se ter o material fino para garantir a impermeabilização e a ligação entre as partículas grossas que resistem à erosão, USDI (1974).

Solos finos, tal como argila de baixa plasticidade, (CL) também são usados desde que suas características de plasticidade se encontrem dentro de limites fixados na fig. 15, segundo as recomendações do USDI (1974).

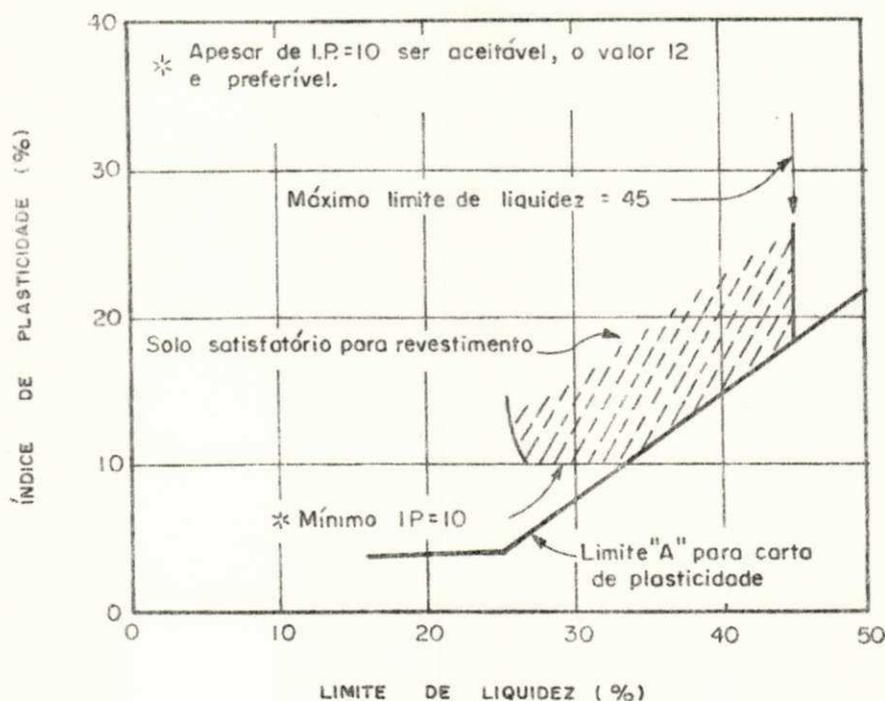


Fig.15 - Características de plasticidade indicada para solos a serem usados em revestimento de canal.(USDI,1974)

A força trativa crítica para cada solo pode ser avaliada pelas recomendações da fig. 16 e 17.

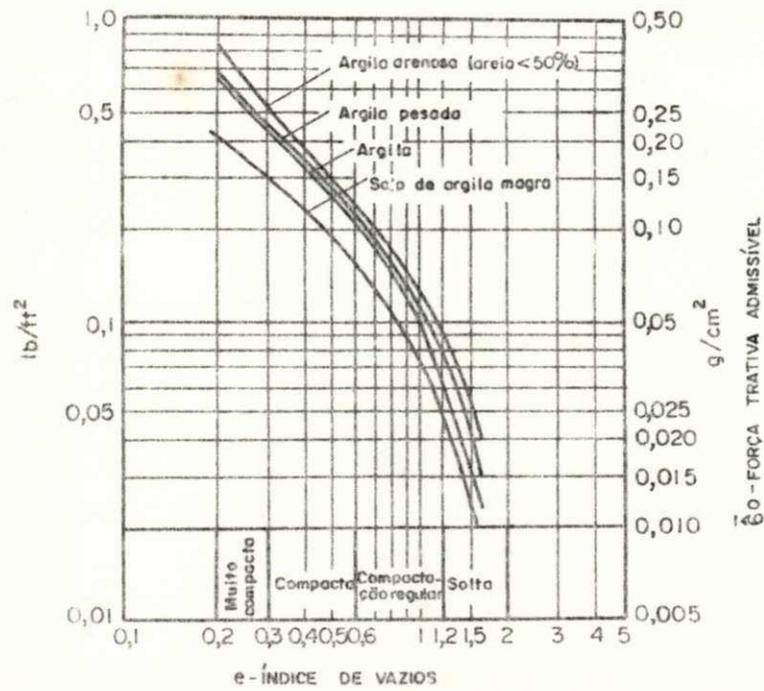


Fig. 16 - Recomendação de força trativa admissível para canais revestidos com solo coesivo.(CHOW,1959)

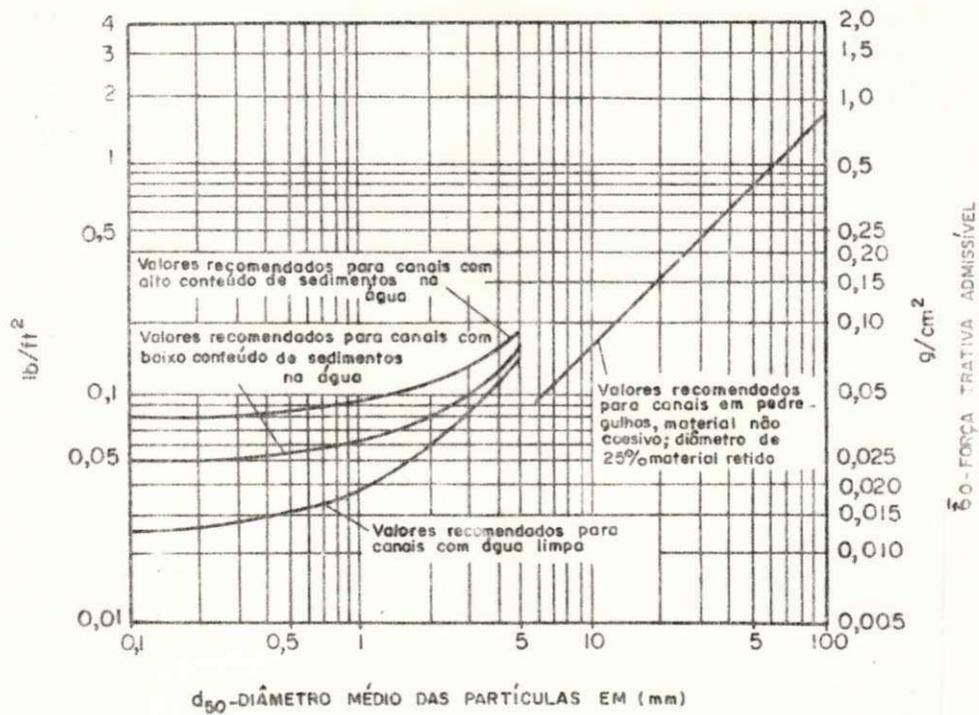


Fig. 17 - Recomendação de força trativa admissível para canais revestidos com material não coesivo.(CHOW,1959)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 832 - J. 1 (33) 321 7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Geral de Pós-Graduação  
Rua Américo Vespúcio, 812 - CEP 50071-900 - R. 355  
58.101-900 - Campina Grande - Paraíba

### 3.1.1 - Solo compactado de grande espessura

Este tipo é o que tem dado melhor resultado, entre os revestimentos de solo. A compactação em camadas horizontais com largura de 1,00 m a 2,40 m possibilita o uso de equipamento tradicionalmente usado em obras de terra, USDI (1963).

Um custo de construção relativamente baixo é conseguido quando a dimensão do serviço permite utilizar equipamento pesado e o solo escolhido não esteja a grande distância. A experiência americana tem mostrado obter-se um bom controle da perda d'água resultando permeabilidades da ordem de  $2,5 \times 10^{-5}$  cm/s, USDI (1963).

A fig. 18 mostra as secções típicas de canais revestidos com camada grossa de solo; a secção deve ser posicionada em relação ao nível original do terreno de forma a evitar-se o máximo de movimento da terra, aproveitar as características de permeabilidade das camadas do terreno e aproveitar o material escavado para aterro de proteção e/ou reaterro.

A inclinação das laterais é usualmente de  $1\frac{1}{2}:1$ ,  $2:1$  ou menos, dependendo do tamanho das partículas do solo. A velocidade usada é na faixa de 30 a 120 cm/s, preferindo-se, quando possível, velocidades acima de 90 cm/s, (Zimmerman, 1976).

O leito ou a fundação do aterro pode ser de solo ou de rocha. Quando em rocha, deve ser verificado se não há fissuração demasiada que possa implicar em perdas excessivas

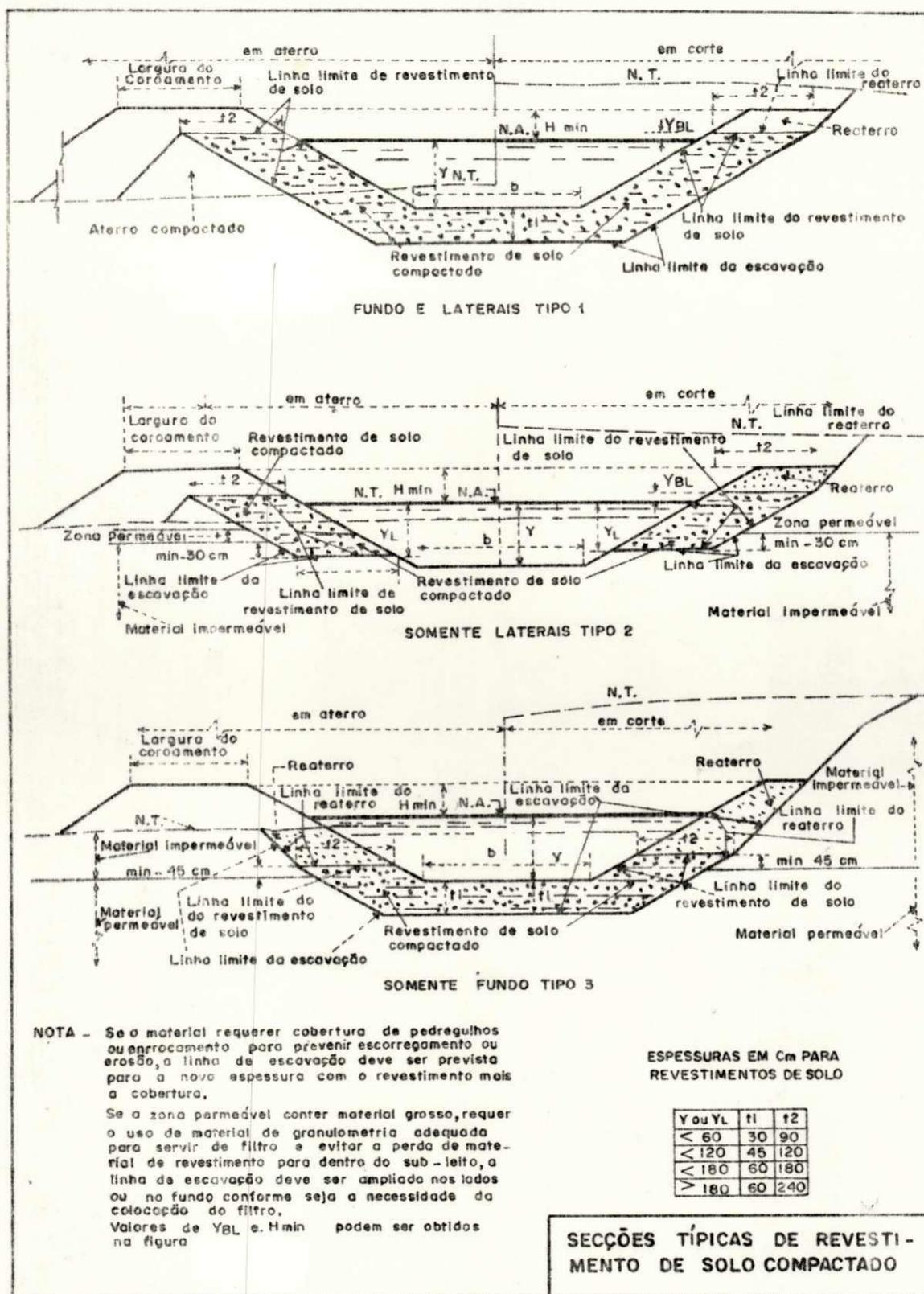


Fig.18 - Secções típicas de revestimento de solo compactado. (USDI, 1963)

d'água ou na ocorrência de "piping". Neste último caso, deve-se interpor entre a fundação e o revestimento uma camada de material granular que funcione como filtro invertido, USDI (1974).

No caso de a secção do canal ser escavada em solo de granulometria grossa, possibilitando também a ocorrência de "piping", a mesma providência deve ser tomada.

O uso de drenos para alívio de sub-pressão não é necessário neste tipo de revestimento, pois sua grande espessura é suficiente para aliviar este tipo de pressão. Em casos especiais de grandes cortes ou transposição por outro curso d'água, pode-se justificar a confecção de drenos.

A fundação deve ser preparada de forma a ficar isenta de matéria orgânica e ter condição de suporte. O comum é proceder a uma escarificação ou aração do solo de pelo menos 20 cm e não mais de 90 cm, após o que deve ser colocado na umidade adequada e compactado.

O material de "bota-fora" obtido da escavação deve ser jogado a não menos de 6 m da borda do canal, em caso do canal principal, e 3,50 m em caso de canal secundário ou dreno, USDI (1974).

O solo escolhido para o revestimento deve ter boas qualidades de impermeabilização e resistência à erosão. A tabela 5 fornece, em função da classificação unificada, um guia de seleção especialmente para esta finalidade.

O solo a ser selecionado deve passar por testes de La

tório, para que sejam avaliadas as suas características de compactação e permeabilidade. É normal exigir-se 95 por cento da densidade máxima obtida no ensaio de próctor normal. A umidade de compactação pode ser um pouco acima da ótima. Os testes de laboratório têm mostrado que para a maioria dos solos a permeabilidade decresce com o incremento da umidade (USDI (1963)).

Quando houver necessidade de se misturarem dois tipos de solo para o revestimento, a operação deve ser feita no próprio local de compactação. Primeiramente é colocada a camada de solo fino e sobre esta o solo granular; uma vez as duas camadas espalhadas, devem ser misturadas com um arado até apresentar-se homogênea, para então proceder-se à compactação (USDI (1974)).

A parte final da camada, isto é, aquela que irá ficar em contacto com a água, dificilmente chega às condições exigidas de compactação. No entanto, fazer-se uma camada mais longa, para dar-se posterior acabamento, é desnecessário, pois a ação d'água a descompactaria com o tempo, não compensando o serviço executado. Assim, o USDI (1963) recomenda que as amostras para verificação da obra sejam a, no mínimo, 60 cm do final da camada.

### 3.1.2 - Solo compactado de pequena espessura

Este tipo de revestimento requer maior cuidado na execução, sendo pequena sua espessura e mais susceptível a fa-

lhas. Quando em uso, pode haver danos localizados por ação da própria água e nos trabalhos de limpeza e manutenção. Segundo o USDI (1963), os gastos com manutenção são grandes neste tipo de revestimento, não compensando a diferença inicial entre este e o de grande espessura.

A compactação deste revestimento pode ser executada a partir das bermas laterais onde se instalam uma máquina para puxar um rolo pé-de-carneiro do fundo do canal pelas laterais acima e abaixo, Byrne (1946).

A escolha do solo segue as recomendações gerais para revestimento de solo e a tabela 5 pode ser usada como guia. Para os solos com material grosso é dispensável uma cobertura de material granular, que é necessária quando o solo for fino.

As recomendações usuais de compactação são válidas para este tipo de revestimento.

### 3.1.3 - Solo solto no local

Este tipo de revestimento consiste essencialmente em colocar sobre o leito previamente preparado uma camada de 30 cm, em média, do solo solto, isto é, sem compactação. Este revestimento proporciona boa redução na infiltração, a custo razoável, desde que se tenha solo, em geral fino, que apresente condição de impermeabilidade quando solto. Deve também o solo possuir, nestas condições, razoável resistência à erosão, USDI (1963).

MAIOR DIVISÃO DOS SOLOS	NOMES TÍPICOS DOS GRUPOS DE SOLO	SÍMBOLOS DOS GRUPOS	PROPRIEDADE DOS SOLOS			ADEQUABILIDADE PARA CANAIS			
			PERMEABILIDADE	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	DENSIDADE COMPACTADA	RESISTÊNCIA À EROÇÃO	REVESTIMENTO DE SOLO COMPACTADO		
SOLO DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais da metade do material é maior que a abertura da malha nº 200	PEDREGULHOS Mais da metade do grão grosso - maior que o nº 4 e menor que o nº 4 e (Para a classificação visual, a abertura da malha da nº 4 e equivalente a 5 mm)	PEDREGULHOS PUROS (Pouco ou nenhum fino)	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino.	G.W.	14	16	15	2	—
		Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino.	G.P.	16	14	8	3	—	
		Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados.	G.M.	12	10	12	5	6	
		Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila mal graduados.	G.C.	6	8	11	4	2	
		Pedregulho com areia - argila aglomerante	GW-GC	8	13	16	1	1	
		AREIAS Mais da metade da fração grossal - maior que o nº 4 e menor que o nº 4 (Para a classificação visual, a abertura da malha da nº 4 e equivalente a 5 mm)	AREIA PURA (Pouco ou nenhum fino)	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	S.W.	13	15	13	8
	AREIAS COM FINOS (Apreciável quantidade de finos)	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	S.P.	15	11	7	9	—	
	AREIAS COM FINOS (Apreciável quantidade de finos)	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.	S.M.	11	9	10	10	7	
	AREIAS COM FINOS (Apreciável quantidade de finos)	Areias argilosas, misturas mal graduadas de areia e argila.	S.C.	5	7	9	7	4	
	AREIAS COM FINOS (Apreciável quantidade de finos)	Areia com argila aglomerante	SW-SC	7	12	14	6	3	
	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais que a metade do material é menor que a abertura da malha nº 200. (A abertura da malha do nº 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu)	SILTOS E ARGILAS Limite de Liquidez menor que 50	Siltos inorgânicos e areias muito finas, alteração da rocha, areias finas, siltos ou argilosas com pequena plasticidade.	M.L.	10	5	5	—	8
			Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.	C.L.	3	6	6	11	5
Siltos orgânicos e siltos argilosos orgânicos de baixa plasticidade.			O.L.	4	2	3	—	9	
SILTOS E ARGILAS Limite de Liquidez maior que 50		Siltos inorgânicos, micáceos ou dia-tonáceos, fins arenosos ou solos siltosos, siltos elásticos.	M.H.	9	3	2	—	—	
		Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.	C.H.	1	4	4	12	10	
		Argilas orgânicas de média e alta plasticidade	O.H.	2	1	1	—	—	
SOLOS ORGÂNICOS	SOLOS ORGÂNICOS	Solos com elevado teor de matéria orgânica	Pt	*	*	*	**		

\* - NÚMEROS ACIMA INDICADOS DÃO A ORDEM DE INCREMENTOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS NOMINADAS

\*\* - NÚMEROS ACIMA INDICAM ADEQUABILIDADE RELATIVA (: = melhor)

TABELA 5 - Propriedades físicas importantes dos solos a serem usados em revestimento de canal. (USD1,1963)

Deve-se ter atenção especial, quando se utilizarem solos finos, a eventuais problemas do "piping" causado por um leito fissurado ou de material grosso.

A execução deste tipo de revestimento é relativamente simples, tanto em pequenos como em grandes canais. Exige poucos serviços de acabamento e não requer equipamentos sofisticados.

Solo solto sem proteção é muito susceptível à erosão e em poucos anos necessita de severos serviços de manutenção. No entanto, um efetivo controle de infiltração pode permanecer, pois o material fino penetra nos vazios do leito tornando-o impermeável. Sob condições não favoráveis, o revestimento de terra solta, quando não protegido, terá uso efetivo por uns poucos anos apenas.

A redução de infiltração com revestimento do solo solto não é tão efetiva e permanente como é com solo compactado; entretanto, o custo é bem menor. Em média, a duração deste tipo de revestimento é de 5 anos, USDI (1963).

### 3.2 - Revestimento de Solo Estabilizado

Chama-se estabilização de solo o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e da sua plasticidade, ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos, Vargas (1981).

Várias substâncias têm sido usadas como estabilizantes ou selantes de canal ou de seu leito. Nestes inclui-se principalmente tratamento com resinas, soluções químicas de silicato de sódio em combinação com cloreto de cálcio e sódio, resina de cimento, cal, cimento portland, asfalto, bentonita, petroquímicos e outros, inclusive a combinação entre eles. Sob certas condições, a estabilização é parte importante na permanência dos revestimentos de terra ou dos canais não revestidos, USDI (1963).

Nesta seção será tratado a estabilização física com cimento portland e cal. O uso de selantes químicos será visto à parte.

### 3.2.1 - Estabilização física

Método de estabilização física, incluindo a densificação do aterros naturais em combinação com material especial para a estabilização, tem sido usado experimentalmente com algum sucesso, mas o seu alto custo tem restringido a sua aplicação em campo, USDI (1963).

Tanto em solos granulares como em solos argilosos pode ser realizada a estabilização e a redução de permeabilidade e o aumento da resistência à erosão, combinando estes solos em proporções adequadas. Estas operações, chamada de "estabilização mecânica" em construção de estradas, pode ser melhorada, acrescentando-se pouco em seu custo, com a mistura do solo com discos e lâminas. A compactação do solo mis

turado resulta mais trabalhável e efetiva, USDI (1963).

A estabilização física visa à obtenção de uma mistura que contenha as características ótimas para a aplicação em revestimento de canal. Como já foi visto, os solos do grupo GW-GC propiciam o melhor resultado. No entanto, nem sempre será possível chegar-se a este resultado. Assim, valem as recomendações já prescritas para os demais solos, por ordem de preferência. Winterkorn (1975) traz recomendações de caráter geral para este tipo de estabilização, que também podem ser usadas.

A dosagem da mistura pode ser feita graficamente pelo método de *Ruthfuchs* indicado por Vargas (1981).

Esmectita pode ser usada como agente impermeabilizante em solos que tenham considerável resistência à erosão, pois sua ação é apenas impermeabilizante, como pôde constatar Oliveira (1973), que, estabilizando um solo SM com 7% de esmectita, obteve velocidade permissível de apenas 0,50 m/s.

### 3.2.2 - Solo-cimento

O uso do solo cimento é mais recomendado para o revestimento de canal em local onde o solo de sub-leito ou das adjacências é arenoso e bastante susceptível à erosão, USDI (1963).

O solo mais adequado para uso de solo-cimento é a areia siltosa (SM) com granulometria bem distribuída, com

15% a 25% de finos a um diâmetro máximo de 5 mm, USDI (1974). Mas os solos com 10% a 35% de finos e diâmetro máximo de 19 mm também oferecem bons resultados, USDI (1963).

Não só a distribuição de tamanho das partículas afeta o comportamento do solo-cimento. A composição mineralógica e química da argila tem muita influência no sucesso da estabilização do solo-cimento. Solos montmoriloníticos, com vários minerais de produto de degradação por intemperismo, retardam a hidratação e o endurecimento do cimento, e são mais adequados para estabilização com cal. Solos cauliniticos ou illíticos são razoavelmente inertes e desenvolvem satisfatoriamente resistência com quantidades econômicas de cimento após pequeno período de cura, CROF (1967).

A presença da matéria orgânica pode afetar as reações de hidratação do cimento. Alguns autores recomendam teores máximos permissíveis de matéria orgânica. Entretanto, Sherwood (1968) recomenda que seja avaliado o pH da mistura solo-cimento com 10% de cimento, em peso, pois só afetam as reações certos tipos de matéria orgânica, as quais não deixam o valor do pH subir a 12,2 ou mais, necessário para que o processo de cimentação se efetive.

Sulfatos são indesejáveis no solo e na água, pois formam compostos de maior volume que seus componentes, provocando a desagregação do solo-cimento. Carbonato de cálcio presente no solo é benéfico para a estabilização, Sherwood (1968).

À semelhança da tecnologia do concreto, a água utilizada não deve ser salobra ou, se o for, os cloretos não devem exeder a 500 ppm e o  $SO_3$  não deve exeder a 1000 ppm, Neville (1977).

Winterkorn (1975) classifica a estabilização com cimento em três categorias: solo-cimento compactado; solo-cimento plástico e solo melhorado; esta última refere-se a solo-cimento com teores de cimento abaixo de 5% em peso, como se pode ver no estudo técnico da ABCP (1983 a) e em algumas citações do USDI (1963).

O solo cimento compactado é a forma de aplicação do solo cimento frequentemente usada na construção de estradas, entretanto a não existência de equipamento especialmente desenhado para a compactação das laterais do canal dificulta o serviço. O USDI (1963) recomenda o uso de inclinação lateral de 4:1 ou mais suave, para possibilitar o uso de equipamento tradicional. Estas dificuldades têm contribuído para que este tipo de revestimento não tenha conseguido pleno sucesso.

O USDI (1963) recomenda que se use uma unidade de mistura pouco acima da ótima encontrada em laboratório. Em consonância a esta recomendação, Souza (1980) encontrou para solos SM e CL uma perda mínima, nos ensaios de durabilidade por ciclos de molhagem e secagem e escovação para umidade, na faixa de 2 a 3% acima da ótima.

A determinação do teor de cimento a ser usado segue

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

as recomendações vigentes para dosagem de solo-cimento da ABCP (1980), acrescentando-se arbitrariamente 2% em peso sobre o teor encontrado, para se ter resistência adequada ao fluxo USDI (1963). Os teores usados estão na faixa de 6 a 13%.

A mistura pode ser executada no próprio local com uso de misturadores do tipo "pugmil" ou com arados de disco, mesmo que este último método cause uma perda considerável de cimento, principalmente quando há vento; ele pode ser usado em pequenas obras. A mistura, também, pode ser executada em centrais montadas especialmente para esta finalidade. Embora esta última técnica propicie um material mais homogêneo e implique em economia de cimento, ela só se justifica para grandes serviços.

Como nos revestimentos do solo, a densidade na obra deve ter no mínimo 95% da máxima obtida em laboratório.

A compactação deve ser executada antes que se inicie a pega do cimento, isto é, o tempo entre o início da mistura e a compactação é no máximo duas horas. West (1959) demonstra em seu trabalho que a densidade aparente diminui sensivelmente com o aumento do tempo entre a mistura e a compactação, isto implica diretamente em um aumento na permeabilidade do material, que em absoluto não interessa a um revestimento de canal. A demora para a compactação causa também, a perda da resistência à compressão simples, fato igualmente indesejável.

A espessura para este revestimento varia de 5 a 10 cm

e é comparável com a de revestimento de concreto simples, cuja recomendação em função da vazão do canal é encontrada na fig. 11.

A cura nos primeiros 7 dias tem muita importância no resultado final do revestimento, pois neste período se desenvolve grande parte das reações de hidratação. Assim, é necessário manter o solo-cimento úmido para que as mesmas possam ocorrer e para que não haja simultaneamente fissuração por perda d'água. O método mais recomendado para cura é uma imprimadura com material asfáltico, embora também possam ser usadas técnicas mais rudimentares, tais como cobertura com areia úmida, sacos de estopa ou papel molhados e outros materiais que impeçam a perda d'água.

A compactação com tecnologia semelhante à de revestimento de solo de grande espessura ou mesmo de revestimento de barragens de terra, diques e pequenos reservatórios, como descritas pela ABNT (1983), são anti-econômicas para canais.

O solo-cimento plástico difere do anterior pela sua consistência, que se assemelha à do concreto. Esta característica permite que ele seja aplicado usando formas deslizantes, proporcionando uma superfície uniforme e bem acabada.

Podem ser usadas tanto areias bem graduadas como as pobremente graduadas com menos de 10% de material fino e um diâmetro máximo por volta de 10 mm. O solo mais recomendado para este serviço é o SW, USDI (1974).

A determinação do teor de cimento segue a mesma recomendação anterior. Entretanto, devido à grande quantidade de água, são encontrados teores mais elevados, ficando na faixa de 10% a 15% em peso.

O solo-cimento plástico pode ser misturado no local ou mais comumente em betoneiras. Sua aplicação mais recomendável é com o uso de formas deslizantes, mas quando aplicado manualmente também tem dado bons resultados, USDI (1963).

Revestimentos desta natureza examinados após dez anos de uso ainda se encontram em muito boas condições. Notou-se que as fissuras e deteriorização da superfície ocorrida logo no início permaneceram praticamente inalteradas como passar dos anos, USDI (1963).

### 3.2.3 - Solo-cal

O uso do solo-cal não tem sido frequente em obras de revestimento de canais. Na verdade, após o desenvolvimento da indústria de cimento portland, a cal ficou relegada a segundo plano. Entretanto, a necessidade econômica e o desenvolvimento da tecnologia têm possibilitado o retorno da cal como aditivo no processo da estabilização.

A cal tem sido aplicada principalmente na estabilização de solos argilosos. As reações desenvolvidas entre a cal e o solo são basicamente de quatro tipos: permuta iônica, floculação, pozolânicas e de carbonatação. A permuta iônica e a floculação são especialmente importantes no aumento da

A adição de cal a um solo geralmente provoca uma diminuição da densidade máxima e um aumento na umidade ótima. O limite de liquidez tende a diminuir, enquanto, o limite de plasticidade tende a aumentar, provocando conseqüentemente uma diminuição no Índice de plasticidade. Há um aumento imediato e a longo prazo da resistência, a expansividade é diminuída, o que lhe confere maior resistência a ciclos de molhagem e secagem, Thompson (1966), TRB (1976), Diamont (1965) indicam, além destas propriedades, uma diminuição na permeabilidade.

As propriedades do solo-cal dependem do tipo de solo, método e qualidade da construção e do tipo e duração da cura.

Thompson (1966) e Castro (1972) sugerem que os solos com predominância de montmorilonita, illita e haloisita sejam mais reativos com cal comparados aos cauliníticos.

Thompson (1966) sugere, para avaliar a reatividade de um solo com a cal, calcular a diferença entre a máxima resistência à compressão da mistura solo-cal aos 28 dias de cura a 23°C e a resistência à compressão do solo natural. Segundo este critério um solo é considerado reativo, quando este valor exceder a 3,5 kg/cm<sup>2</sup>.

Eades e Grim em 1966 propuseram, como forma de avaliar a reatividade, a medição do valor do pH para diversos teores de cal, sendo o indicado aquele que atinja o valor de 12,4. Thompson (1970) demonstrou que este teste dá bons in-

dicativos do teor a ser usado, sem entretanto prever as características da mistura.

Carvalho (1979) formula como índice de reatividade a diferença entre a capacidade de troca catiônica ao pH10 e pH7. Aplicando este método a vários solos do Nordeste, mostrou existir boa correlação entre o índice proposto e aquele de Thompson.

Castro (1972) recomenda que apenas solos com mais de 10% de expansividade devam ser tratados com cal.

A presença de matéria orgânica é tida como danosa para a estabilização com cal, Thompson (1966). Entretanto, a experiência do DNER (1974) com solo orgânico da Amazônia mostrou sua viabilidade.

O grau de intemperismo e de drenagem natural tem importância sobre o comportamento do solo-cal, ao que se deve dar especial atenção, pois a mudança de horizonte pode alterar fundamentalmente o comportamento da mistura, apesar de se manterem aparentemente as características do solo, Thompson (1966).

### 3.3 - Revestimento de Superfície Rígida ou Membrana Exposta.

Neste grupo de revestimento encontramos desde os revestimentos mais rígidos, como os de concreto, até membranas flexíveis a base de betume ou plástico. O que prevalece neste grupo, além de suas boas características de resistên-

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

a erosão e infiltração, é a sua resistência às condições de exposição, destacando entre elas a ação do sol, punção por pedras, patas de animais ou instrumentos pontiagudos, variação de temperatura e umidade, entre outras. Dentre estes grupos destacam-se os revestimentos de concreto moldado "in loco", argamassas, alvenarias, pré-fabricados, concreto asfáltico e membranas plásticas, de borracha sintética ou de asfalto.

### 3.3.1 - Concreto Moldado "in loco"

Os revestimentos a base de concreto simples ou armado têm sido até hoje dos mais usados, seja por sua alta qualidade, seja pela facilidade de aplicação e controle tecnológico. O fato é que dos canais nos EUA acompanhados pelo USDI até 1963, 38% eram de concreto simples e 18% de concreto armado, no que resultou ser este um dos revestimentos mais conhecidos naquele país.

Os canais de concreto vêm até hoje mostrando que são dos mais resistentes ao processo de desgaste provocado pelo fluxo d'água, podendo-se adotar tranquilamente uma vida útil em boas condições de, no mínimo, 40 anos.

A causa principal de danos sofridos por este tipo de revestimento, é a ação de pressões, de fora para dentro, do revestimento, em geral consequência do aumento da pressão neutra e da pressão do solo, geralmente onde existem taludes laterais com grande altura, solos expansivos no sub lei

leito ou sobre-carga lateral. Causa, também, danos ao revestimento a falta de suporte do sub-leito, provocada por recalque das camadas subjacentes ou por carreamento do solo de sub-leito devido à má compactação e à infiltração localizada. Sempre que estes problemas puderem colocar em risco a integridade do revestimento, devem ser tomadas providências localizadas para evitá-los, sendo o mais comum a confecção de drenos, juntas drenantes, diminuição da inclinação lateral, bermas, ou colocação de armadura.

Uma das muitas vantagens deste revestimento é sua baixa necessidade de manutenção, pois sua alta resistência lhe garante o bom funcionamento sob a maioria dos esforços, mesmo os não previstos. A sua solidez e continuidade impedem o aparecimento de ervas daninhas, um dos principais problemas de manutenção das condições do fluxo nos canais.

A espessura do revestimento varia segundo o USDI (1963) de 5 a 13 cm como se vê na fig. 11. Entretanto, ICAR (1970) e Zimmerman (1976) recomendam uma espessura de 3,5 cm para pequenos canais.

A velocidade de fluxo é preferivelmente alta ( $\approx 3$  m/s), o que lhe possibilita secções com menor área e menor perda d'água por infiltração e evaporação. No entanto, se as condições de projeto exigirem, pode-se usar velocidades menores na faixa de 1 a 3 m/s.

A aplicação do concreto pode ser de variadas formas, mas é sempre importante que seja sobre uma superfície bem

preparada, isto é, com boa capacidade de suporte, drenagem e alinhamento, ao que os solos arenosos se mostram mais apropriados.

Dos métodos existentes talvez o mais rendoso, em termos de velocidade de aplicação e qualidade final do serviço, seja o de formas deslizantes. Este método aplica-se para construções de grandes e pequenos canais, usando-se formas adequadas a cada tamanho de secção.

As formas podem ser de vários tipos. Para grandes canais usam-se formas semelhantes a uma ponte móvel, que é apoiada em rodas colocadas nas bordas do canal. Estas pontes podem incumbir-se desde a dosagem, misturação, aplicação e acabamento (juntas, selo p/cura etc), como por apenas parte destes serviços, ICPA (1971) USDI (1963). Em geral, fornecem superfícies lisas e alinhadas, massa homogênea e bem compactada.

Outro tipo de forma deslizante são as apoiadas e guiadas pela própria calha do canal; são movidas por tração na parte dianteira e, em geral, se encarregam apenas da aplicação do material, Israelsen (1962), USDI (1963) ICPA (1971, b 1972), Zimmerman (1976). O uso deste equipamento resulta principalmente em uma massa de concreto bem adensada e com boa aderência ao sub-leito, pois todo o peso do equipamento é depositado sobre a superfície revestida e não nas bordas, como no caso anterior. Estas formas adaptam-se bem a canais de porte médio, mas podem também ser usadas em pequenos ca

nais. Para pequenos canais pode-se ainda usar como formas deslizantes um gabarito de madeira apoiado em guias laterais e puxados manualmente, Israelsen (1962), Zimmerman (1976), ICAR (1970), ICPA (1971 a, 1972).

Em qualquer destes casos, a continuidade dada pelo processo só é quebrada por juntas de contração que são espaçadas conforme recomendações da fig. 12.

A concretagem pode também ser executada manualmente formando placas isoladas, Israelsen (1962), USDI (1963) ICPA (1971 a,b, 1972), Zimmerman (1976), AITEC (1979). Neste método as placas podem ser concretadas sequencialmente ou alternadamente, conforme se queiram juntas com enchimento ou secas, respectivamente. As juntas com enchimento de material betuminoso funcionam como juntas de dilatação, embora sua necessidade seja apenas decorrente do método construtivo, como se viu anteriormente. A concretagem alternada traz a vantagem de não ser necessário o preenchimento da junta e a segunda concretagem, nos espaços vazios deixados da primeira concretagem, dispensa o uso de forma.

As armaduras são usadas em geral para combater os afeitos de variação volumétrica diferencial entre as duas faces dos revestimentos. Esta variação é maior na superfície livre, porque, estando livre, é sujeita a maior variação de temperatura e umidade que a outra em contacto com o sub-leito, que tem seus movimentos parcialmente impedidos pela aderência ao sub-leito, e não sofre ação direta do sol e da água.

As amarraduras colocadas no centro da espessura devem ser interrompidas em coincidência com as ranhuras de contração, onde se formam as eventuais trincas do revestimento. O cálculo deste armadura baseia-se na força de tração ( $F$ ), desenvolvida quando da contração do revestimento e segundo o ICPA (1971 b) esta força é máxima na secção central e pode ser calculada segundo a fórmula:

$$F = \frac{f' L' P'}{2} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

sendo:

- $f'$  - coeficiente de aderência entre o revestimento e o solo. Varia entre 0,5 e 3, e são usados para condições normais os valores de 1,2 a 2,
- $L'$  - comprimento da placa do revestimento (m),
- $P'$  - peso por unidade de superfície do revestimento ( $\text{kg/m}^2$ ).

O concreto deve ser constituído de matéria prima da melhor qualidade e dentro das recomendações da ABNT (EB-1, EB-4). A dosagem de cimento deve estar na faixa normalmente usada em obras de concreto, isto é, um consumo de cimento da ordem de  $300 \text{ kg/m}^3$  de concreto, USDI (1963), ICPA (1972), Zimmerman (1976). O traço, pelo que pode se ver na experiência de vários países relatada pelo ICID (1972), é geralmente 1:3:6, usando-se em alguns casos concretos mais ricos no traço 1:2:4, quando se tem areia fina e traço mais pobre 1:4:8, adicionando-se cerca de 20% de pozolana (Sikhi) sobre

excessiva em regiões onde há grande variação de temperatura, devido aos esforços provocados pela contração e expansão e pelo congelamento d'água nos trechos úmidos. Com a evolução da técnica nos E.U.A., passou-se praticamente a usar argamassa lançada pneumáticamente, chamada de "shotcrete".

O "shotcrete", por possuir características de resistência à erosão semelhantes à do concreto, possibilita as mesmas vantagens deste no tocante à velocidade de fluxo d'água. A sua rugosidade superficial pode ser melhorada com um desempenho logo após a aplicação, o que, segundo o USDI (1963), é dispensável para pequenos canais que trabalhem com águas turvas, pois nestes casos é inevitável o crescimento de algas e musgo na superfície do revestimento definindo as características de rugosidade do mesmo.

Da mesma forma que no concreto, devem ser feitas juntas de contração para se evitar uma malha de fissuração dispersa e facilitar o trabalho de manutenção das mesmas. As juntas de dilatação são dispensáveis desde que a obra não seja executada no período mais frio do ano.

O equipamento para projetar a argamassa consiste basicamente de uma ou das câmeras pressurizáveis, contendo uma mistura de cimento e areia com diâmetro máximo de 9,5 mm, normalmente no traço 1:4,5. A água e a mistura são conduzidas por mangueiras separadas que se juntam em uma boca metálica, por onde sai o jorro de argamassa, USDI (1963).

O controle d'água neste processo é bastante difícil;

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

por isto, recomenda-se apenas que deva ser garantida uma baixa plasticidade para que a argamassa não escorra após a apli-cação e que seja suficiente para aderir ao sub-leito e ga-  
rantir a hidratação do cimento. Argamassa muito úmidas aumen-tam a malha de fissuração e perdem resistência.

O leito deve ser bem preparado, evitando-se elevações excessivas que geram reduções localizadas na espessura. As aplicações devem ser precedidas de um umedecimento do sub-leito, e feitas em camadas de aproximadamente 10 mm. Entre a aplicação de uma camada e outra deve-se esperar um tempo suficiente para haver o endurecimento da anterior.

Quando se utiliza armadura, esta deve ser colocada na metade da espessura e a não menos de 2 cm da superfície ex-posta. Para o cálculo pode-se adotar o mesmo critério que no caso do concreto moldado "in loco".

### 3.3.3 - Alvenarias

Por revestimento de alvenarias pode-se entender todos aqueles compostos pela argamassação de pequenas peças mono-líticas, tais como tijolos, pedras e lajotas, entre outras.

As alvenarias de tijolos não precisam ser constituí-  
das necessariamente de tijolos perfeitos. Em alguns casos, quando há disponibilidade de restos de construções demóli-das, pode-se usar tijolos quebrados sem muitos problemas.

Nos EUA, segundo o USDI (1963), o uso de alvenaria de tijolos foi praticamente abandonado após os anos 30, pois a

lização e o alto custo da mão-de-obra naquele país impediram o uso deste revestimento. Entretanto, alguma experiência foi adquirida usando-se tijolos de 4 x 14 x 20 cm assentados com argamassa no traço 1:3, obtendo-se revestimento de boa qualidade. Outros trabalhos foram executados com alvenaria reforçada, usando-se vergalhões de 1/4" espaçadas de 60 cm longitudinalmente e 30 cm transversalmente no fundo e nas laterais com 30 cm no sentido longitudinal e transversal. Este tipo de revestimento, apesar de ótimo resultado de estanqueidade, não foi recomendado para trabalhos futuros, pois em caso de ruptura por problemas de subpressão a área danificada era sempre bem mais extensa que no caso dos não reforçados, o que encarecia sobremaneira os trabalhos de reparo.

Na Índia, este revestimento tem sido largamente empregado, ICAR (1970), ICID (1972). Usa-se camada simples ou dupla conforme a dimensão do canal. Segundo o ICID (1972), tijolos de 30 x 15 x 10 cm são assentados sobre o sub-leito com uma camada de 1 cm (3/8") de argamassa 1:5 ou 1:6, com juntas entre tijolos de 1,2 cm (1/2") em argamassa 1:3. Os de camada simples são revestidos com 2 cm de argamassa 1:3 totalizando 13 cm de revestimento. Em caso de camada dupla, a primeira camada é revestida com 1,6 cm e a camada superior é assentada sobre esta após secagem, com uma espessura de 0,6 cm de argamassa e juntas entre tijolos de 1,2 cm, sempre com argamassa 1:3. Nos revestimentos de camadas duplas

tijolos restam aparentes e totaliza-se uma espessura de cm.

Em Morada Nova - CE, foram construídos canais retangulares para vazão de 30 l/s com fundo de concreto simples sobre camada de areia e laterais em alvenaria assentada e revestida em argamassa no traço 1:3. Construídos em 1972, apesar da boa aparência interna, apresentavam em certos trechos evidentes sinais de perda d'água, causada provavelmente por problemas do sub-leito. Em Condado-PB, o canal principal revestido com lajota aparentes de aproximadamente 30 x 30 x 3 cm tem até hoje bom aspecto, apresentando, entretanto, falhas localizadas, causadas também por problemas de sub-leito. 1/

As alvenarias de pedra são também bastante conhecidas. Embora dispensam uma mão-de-obra excessiva, nos locais onde existe pedra em abundância, pode ser recomendável. O USDI (1963) cita um projeto no Novo México onde foram argamassadas pedras com dimensões da ordem de 5 a 10 cm, resultando um revestimento com boas qualidades de serviço e baixa manutenção. A AITEC (1980) recomenda para proteção de rios uso de pedras com dimensões não inferiores a 3 cm e menores que 30 cm, para uma espessura de 40 cm de revestimento, a argamassa 1:3 é pressionada em um tubo para ser injetada nas juntas. Pedras na forma de placas são, também, bastante recomendáveis, Zimmerman (1976).

1/ Observações "in loco"

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso 882 Tel (083) 321 7222-R 355  
58 100 - Campina Grande - Paraíba

### 3.3.4 - Pré-Fabricados

Os pré-fabricados são todos aqueles que têm suas peças confeccionadas antes de serem aplicadas em campo. As peças são agrupadas por encaixe ou por colagem ou por ambos os processos concomitantemente.

Os pré-fabricados mais comuns são os de concreto. As peças podem ter tamanhos variados que vão desde 0,1 m<sup>2</sup> até peças da ordem de 8 m<sup>2</sup> AITEC (1979).

Os blocos ou placas de concreto para pequenos canais têm sua aplicabilidade econômica limitada sob certas condições. Os locais onde se tem mão-de-obra barata e pessoal não qualificado, são os mais adequados para a aplicação desta técnica, USDI (1963). Pequenos elementos podem ser usados nas tangentes e nas curvas, mas os largos têm aplicabilidade limitada às tangentes. Os materiais comumente usados nas juntas são à base de asfalto ou cimento, algumas vezes plásticos, borrachas ou espumas.

O USDI (1963) recomenda o uso de placas de 60 x 20 x 5 cm com duas juntas arredondadas nas faces longas e de topo plano nas faces menores. Na Índia - Mararashtra, ICID (1972), usaram-se placas de 60 x 60 x 5 cm com encaixes em cantos vivos e apoiadas em trilhos também pré-moldados em concreto de 10 x 10 cm a cada três fileiras de placas, estando o conjunto apoiado em solo compactado com 30 cm de espessura. Na Itália, o uso de pré-moldados é bastante difun-

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - (11) 331 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

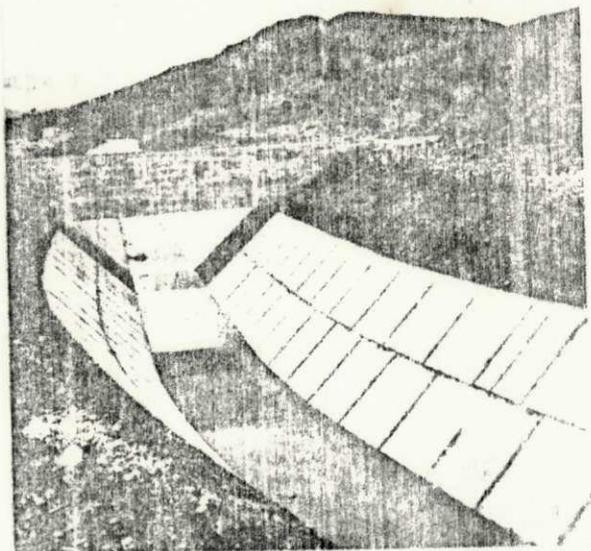
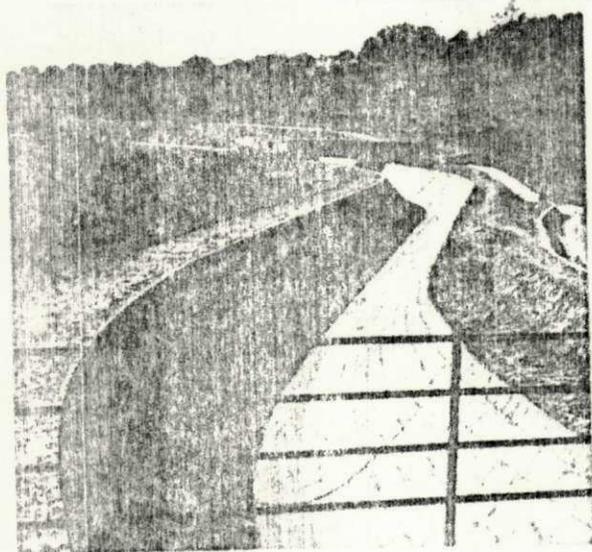
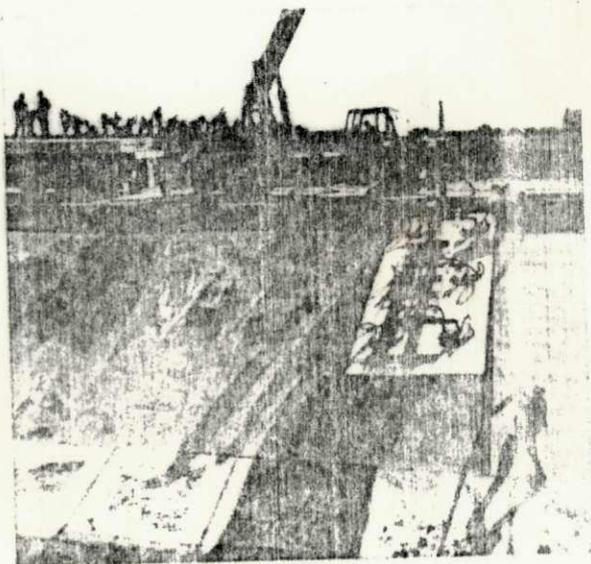
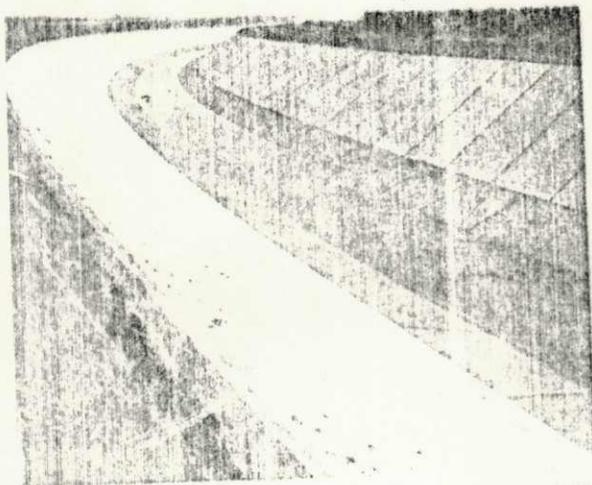
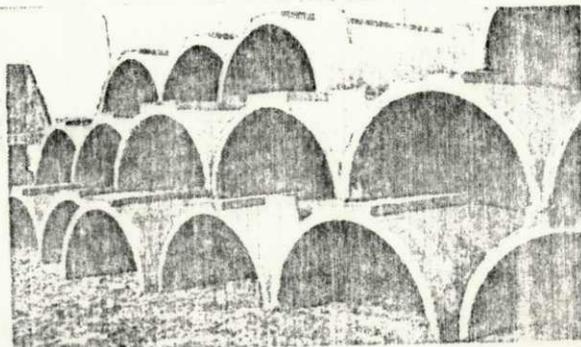
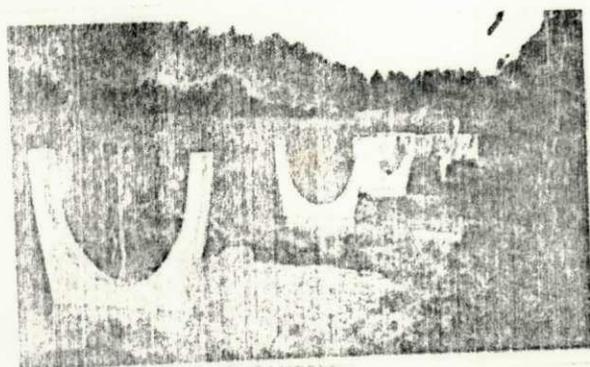


Fig. 19 - Alguns revestimentos pre-moldados. (AITEC 1979).

dido, desde pequenas e grandes placas pré-moldadas, como se pode ver na fig. 19 tirada da publicação da AITEC (1979). Segundo Sharma (1981), placas finas premoldadas de argamassa armada podem ser usadas com facilidade, para pequenos canais, pela sua leveza, resistência, qualidade de impermeabilização, durabilidade e simplicidade de execução.

#### 2.2.5 - Concreto Asfáltico

O concreto asfáltico pode ser de dois tipos, os misturados a quente e os misturados a frio.

O *Concreto Asfáltico misturado a quente* consiste na mistura cuidadosa de cimento asfáltico com agregados bem graduados misturados e aplicados sob alta temperatura. Pode ser usado para novos revestimentos e também para reparos de revestimento de concreto.

As espessuras a serem usadas são as recomendadas na fig. 11. Para o caso de reparos deve-se usar uma espessura mínima de 5 cm, USDI (1963).

A velocidade permissível para este revestimento é da ordem de 1,5 m/s.

Na aplicação do concreto asfáltico é exigido um alto grau de compactação. O uso de formas deslizantes é especialmente adequado a este material, resultando revestimentos econômicos uniformes e de alta densidade. Estes revestimentos são particularmente recomendados para pequenos canais, os quais permitem o uso de formas deslizantes de baixo custo,

USDI (1963).

Como toda superfície rígida, os problemas de sub-pres<sub>ão</sub> são afetar a integridade do revestimento. Entretanto, por suas características elásticas, este revestimento também pode ser usado cuidadosamente em terrenos de argila expansiva, USDI (1963).

Um problema potencial deste revestimento é o aparecimento de ervas daninhas ou a germinação de sementes de árvores, pois a superfície negra do revestimento absorve muita energia elevando a temperatura do sub-leito, favorecendo o processo germinativo.

A boa técnica recomenda que seja verificado o potencial de aparecimento de ervas e árvores no local do canal, sendo positivo aplica-se herbicida no sub-leito antes da execução do revestimento. Alguns herbicidas também podem ser usados sobre o revestimento, USDI (1963).

O uso de armadura não é recomendável neste tipo de revestimento, USDI (1963).

A dosagem de cimento asfáltico está na faixa de 7 a 10%. O uso do material local é possível, desde que bem estudado em laboratório e esteja dentro da faixa granulométrica recomendada na tabela 6, USDI (1963).

Tabela 6 - Recomendação de granulometria de agregado para concreto asfáltico (USDI, 1963).

Diâmetro (mm)	Porcentagem Pasando
19,1	100
12,7	85 a 100
4,8	55 a 100
2,0	35 a 60
0,4	18 a 30
0,074	5 a 12

O cimento asfáltico utilizado nas primeiras obras tinha uma penetração de 100 a 200; entretanto, a experiência tem indicado que o 50 - 60 é melhor. Sendo este último um asfalto mais rígido, ele é mais resistente ao aparecimento de ervas daninhas, mais estável nas laterais e, devido à formação de um filme mais espesso em torno do agregado, é provavelmente mais durável, USDI (1963).

A areia e o pedregulho são cuidadosamente dosados e misturados com o asfalto a uma temperatura de aproximadamente 180°C em uma central. Transportada ainda quente ao local de construção, a mistura é compactada a não menos de 92% da densidade máxima obtida em laboratório. Não são necessárias juntas neste revestimento. Cura, selantes ou outros trata-

mentos são igualmente desnecessários, estando o revestimento pronto para o uso. A vida útil para este revestimento pode estimar em no mínimo, 15 anos.

*Concreto asfáltico misturado a frio* é similar ao anterior, mas a mistura dos agregados com o asfalto é a *a frio* (emulsão ou cutback) e por isso pode ser efetuado no próprio local. Entretanto, neste caso é necessário um tempo de cura que se deve dar sob condições favoráveis de clima. Em alguns casos, a mistura (com emulsão) permanece indefinidamente mole, devendo-se criar uma forma para garantir a ruptura da emulsão, USDI (1963).

As misturas a frio têm em geral baixa resistência à erosão, estabilidade pobre. Assim, a vantagem de misturar-se a frio no local fica praticamente anulada. Por isso as misturas a frio só se justificam em locais com baixa solicitação à erosão e quando não se pode usar as misturas a quente.

Outros revestimentos a base de asfalto que pelas suas características não se enquadram perfeitamente na categoria de concreto asfáltico, têm sido usados com menor frequência. Entre estes, destacam-se as argamassas de asfalto, macadame asfáltico e o solo-betume.

*Argamassas de Asfalto*, aplicadas pneumaticamente consistem na mistura de areia com asfalto emulsificado. A aplicação dá-se com equipamento semelhante ao usado no "shotcrete". Este material pode também ser aplicado com forma desli

zante ou até manualmente. Algumas experiências com bons resultados têm sido feitas misturando-se areia com 8 a 18% de emulsão de ruptura lenta com até 10% de cimento portland.

Uma experiência realizada em 1945 com argamassa asfáltica lançada pneumaticamente, cujo asfalto adicionado era um cutback de cura rápida, resultou em um revestimento mole, quando examinada alguns anos após a construção, USDI (1963).

*Macadame Asfáltico.* Este revestimento consiste em uma camada de pedregulhos relativamente graduados, penetrados por asfalto, formando um revestimento flexível e resistente à erosão.

O macadame é normalmente executado com cimento asfáltico. Os experimentos com emulsão e cutback resultaram na falta de ligação entre o asfalto e o pedregulho. Talvez pela dificuldade de execução, este revestimento tem sido pouco usado, aparecendo em geral como recobrimento de membranas asfálticas.

O *Solo-betume* consiste em misturar o asfalto com solo em uma quantidade de 1 a 2% em peso, e a aplicação dá-se à semelhança dos revestimentos de solo. Para alguns tipos de solo este processo pode trazer um efetivo controle da erosão, embora na prática seja muito pouco usado, USDI (1963).

### 3.3.6 - Membranas Plásticas

Membranas plásticas de vários tipos com espessuras de 0,02 a 0,50 mm têm sido usadas para revestimento de peque-

as reservatórios e canais. São geralmente fornecidas em folhas ou rolos com largura variável. São estendidas sobre o sub-leito e as juntas são executadas por transpasse e/ou colagem de aproximadamente 7,5 cm. O mais comum é serem usadas com uma cobertura de proteção. Alguns tipos especiais de plásticos foram testados, mas apesar do alto custo, do bom desempenho inicial, tiveram uma vida útil de 2 a 4 anos, USDI (1957, 1963), razão pela qual Zimmerman (1976), recomenda que sejam usados os plásticos mais finos com cerca de 0,02 mm e trocados a cada ano.

### 3.3.7 - Membranas de Borracha Sintética

Estas membranas especialmente fabricadas para revestimento de canais com espessura de 0,5 a 1,0 mm, Davis (1970), têm proporcionado uma ótima performance, e algumas obras com mais de 12 anos encontram-se em bom estado, entretanto o seu alto custo tem sido o fator limitante, USDI (1957, 1963).

### 3.3.8 - Membranas de Asfalto

Estas membranas com espessuras de 3 a 6 mm têm sido usadas com relativo sucesso. As peças pré-fabricadas são aplicadas sobre o sub-leito. Algumas, com juntas de topo preenchidas com mastic ou concreto asfáltico; outras, superpostas e colocadas com asfalto quente. As peças são confeccionadas de diversas formas, em geral possuem reforços para manter firmes. Estes reforços podem ser de feltro, amianto, ju-

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 832 - (83) 321-7227-R 355  
58 100 - Campina Grande - Paraíba

ta e papel, entre outros materiais. Os elementos são de tamanhos variados que vão desde as pequenas dimensões de aproximadamente 80 x 150 cm até grandes tiras com 100 x 750 cm. Alguns destes revestimentos acompanhados pelo USDI já tinham mais de 9 anos e encontravam-se em bom estado, embora algumas juntas de topo executadas com asfalto, trabalhando abaixo do nível d'água, tenham-se deteriorado. De uma forma sucinta pode-se dizer que este revestimento promove um efetivo controle da perda d'água, mas tem custo elevado.

#### 3.4 - Revestimento de Membrana Enterrada

Revestimento de membrana enterrada consiste em uma barreira impermeável à água, relativamente fina, recoberta por uma camada protetora com a forma de secção do canal, As membranas mais comuns são as *asfálticas* aplicadas no local ou pré-fabricadas, as de *filme plástico*, de *borracha sintética* e as de *esmectita* (bentonita). A membrana tem a função de conter a infiltração, e a cobertura atua como proteção da membrana aos efeitos da erosão, do puncionamento, do crescimento das ervas daninhas e da passagem dos equipamentos de manutenção.

A cobertura geralmente usada é de terra ou pedregulho. Entretanto, algumas vezes o "shotecret" e o macadame asfáltico são usados na cobertura das membranas afálticas.

Nos revestimentos de membrana enterrada a parte mais

custosa é a escavação e a colocação da cobertura. Obviamente, do ponto de vista econômico é recomendável usar-se material local e uma camada mais fina possível para o recobrimento. A fig. 20 traz as recomendações para revestimento de membrana enterrada, nela pode-se ver que a espessura mínima é de 25 cm, somando-se um doze avos da profundidade do fluxo. O material a ser usado é a argila pedregulhosa, solo de superfície pedregulhosa ou qualquer outro material resistente à erosão. A tabela 4 serve de guia para escolha do material.

A declividade lateral não deve exceder a 3:1, para evitar-se o escorregamento. A relação entre a largura do fundo e a profundidade de fluxo deve ser em torno de 4, USDI (1963).

Para o dimensionamento de resistência à erosão calculam-se os esforços trativos, como recomendado anteriormente em parâmetros de erosibilidade. Conhecendo-se as características do material de cobertura, pelas fig. 16 e 17 tira-se o valor da força trativa admissível do material, devendo ser maior que a força atuante, para não ocorrer erosão.

### 3.5 - Selantes

O uso de selantes é uma alternativa para o controle da perda d'água onde o canal é aberto em solo permeável normalmente arenoso. Os principais selantes são os sedimentos, a esmectita e os químicos.

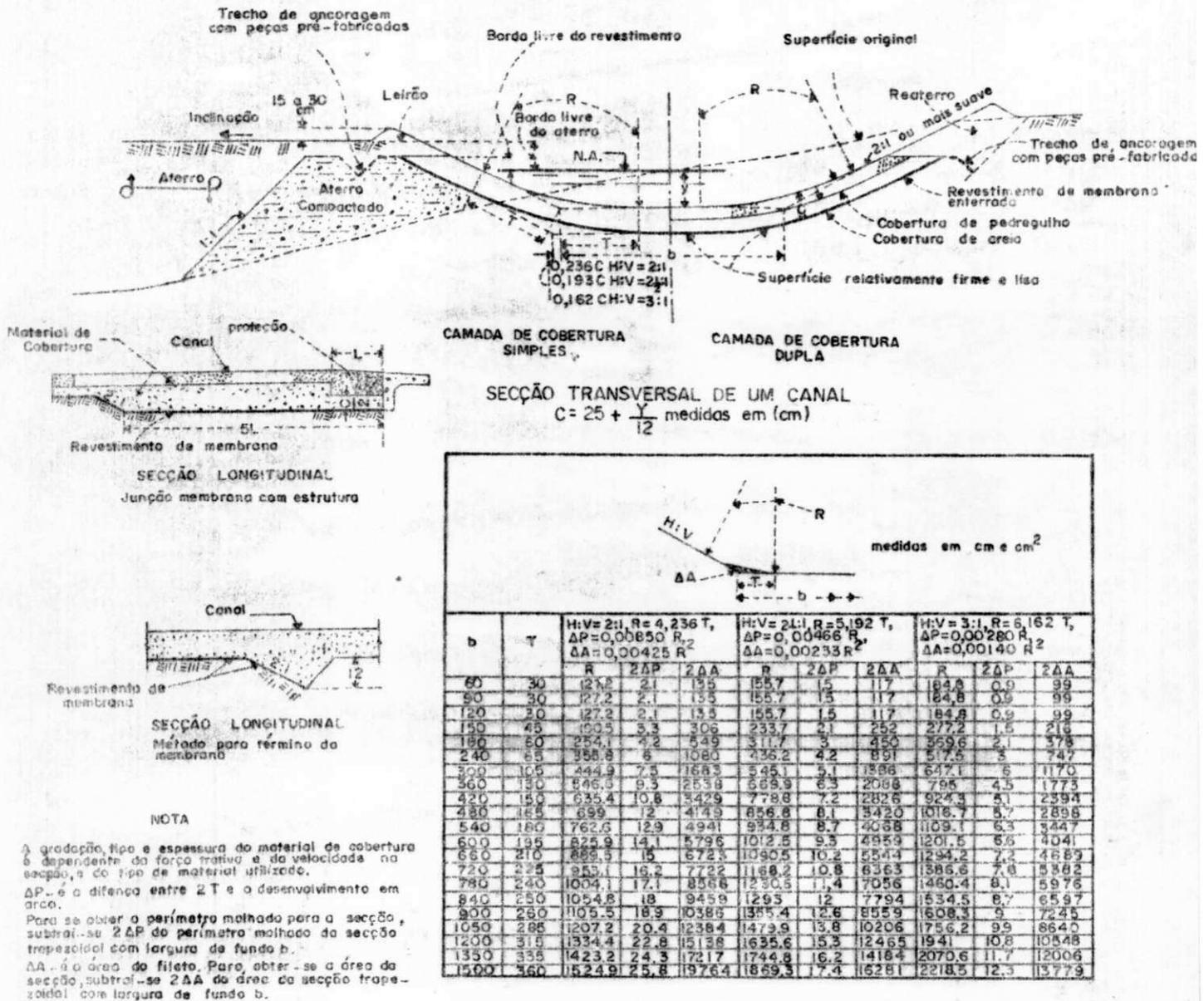


Fig.20- Detalhes de instalação de revestimento com membrana enterrada. (USDI,1963)

*Handwritten note:* ... para garantir a impermeabilização ...

Os selantes podem ser basicamente aplicados de três formas: adicionados à água do canal, diretamente sobre a superfície do canal, ou injetados no solo, USDI (1957 a, 1958, 1960, 1963).

### 3.5.1 - Sedimentos

Os sedimentos (siltes e argilas) coletados nos fundos de barragens ou em depósitos do próprio canal são materiais bastantes apropriados para o uso como selantes, USDI (1963). Em geral o custo de aplicação é pequeno, bastando dissolver os sedimentos em água e adicioná-los gradativamente na água do canal nos trechos onde se deseja diminuir a perda d'água. Os sedimentos são carregados pela água para os vazios do solo e diminuem a permeabilidade dos mesmos.

A eficácia deste método está ligada à possibilidade de controle contínuo da perda d'água, para definir os locais onde há necessidade de aplicação do selante. O tempo de efetivo controle da perda d'água deste método é pequeno e depende principalmente da velocidade da água, e da formação estrutural onde se dá a percolação, USDI (1963). A pequena camada selante pode também ser destruída por punçionamento, variação das condições de trabalho e nas operações de limpeza. Entretanto, com sucessivas aplicações, o selo vai se tornando mais difícil de estragar-se.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321-7227-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

### 3.5.2 - Esmectita

O uso da esmectita como selante obedece aos mesmos princípios dos sedimentos. Entretanto, para dissolver a esmectita na água deve-se usar um defloculante e agitar fortemente. O trecho de canal onde será aplicada a mistura, deve ter o fluxo interrompido por pelo menos 24 horas, para que haja uma boa penetração da esmectita nos vazios do solo, USDI (1957, 1963).

A esmectita usada deve ser do tipo sódica e é usada em uma dosagem de aproximadamente 1% em relação ao peso d'água. Nos locais onde a água ou o solo possuem grande quantidade de cálcio, a qualidade deste selante é rapidamente deteriorada; em outras condições, pode durar alguns meses. Sendo facilmente danificada, exige um controle constante da perda d'água, justificando seu uso onde se tem este material a baixo custo. Algumas recomendações para este selante são vistas em USDI (1957 a, 1958) Molina (1974) e Millar (1975).

### 3.5.3 - Selantes Químicos

O termo "selantes químicos" é usado para os produtos químicos que podem ser aplicados no sub-leito do canal e reagem formando um gel sólido ou semi-sólido, precipitando nos vazios do solo, USDI (1960).

Segundo o USDI (1963), o selante químico deve atender aos seguintes requisitos: não ser tóxico ao homem, animais ou colheita; ser capaz de resistir, pelo menos por alguns

anos, à variação do pH e sais contidos na água, aos esforços da água de pressão e de fluxo, aos danos provocados pelos animais e equipamentos; ser durável, isto é, não se deteriorar por variações das condições climáticas, por molhagem e secagem, por ação de micro-organismos do solo, por reemulsificação ou mudança química; por fim, ser de uso eficiente, isto é, de baixo custo.

A publicação do USDI (1960) faz uma extensa revisão sobre selantes químicos e cita cerca de 75 substâncias químicas que podem ser usadas.

No Brasil Interaminense (1975) estudando, impermeabilização de canais com hidróxido de sódio (NaOH), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e metassilicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), chegou a conclusão que para os dois primeiros produtos uma concentração de 3 a 7% e de 3 a 5% para o último, podem ser usados indistintamente, independente do estado de umidade do solo, promovendo uma efetiva impermeabilização. Entretanto o autor destaca a necessidade de se conhecer melhor a durabilidade destes processos e a toxidez que pode causar as plantas e ao homem.

## CAPÍTULO III

### PROPOSTA E DISCUSSÃO DE ESTUDO ESPECÍFICO PARA REVESTIMENTO DE CANAIS COM SOLO ESTABILIZADO COM CIMENTO E OU/CAL

#### 1 - Introdução

O estudo que por ora se pensa implantar, tem como objetivo caracterizar geotecnicamente os solos de uma região escolhida, avaliar a potencialidade dos solos para uso em obras de revestimento de canais, avaliar a estabilização do solo cimento e/ou cal, e avaliar revestimento de canais construídos com solo-cimento e/ou cal.

A primeira etapa de estudo são as investigações preliminares. Com base no acervo existente, mapas pedológicos, geológico, topográfico, de uso da terra e de índices hídricos, faz-se a definição da área de estudo e mapeamento para orientar a sondagem.

A sondagem feita a trado fornece amostras para a cacterização geotécnica; com base nos resultados de ensaios destas amostras e o mapeamento executado na fase preliminar, faz-se o mapeamento geotécnico da região.

Uma vez caracterizados, os solos serão selecionados para ensaios de estabilização com cimento e/ou cal.

Entre os solos estudados na fase anterior será selecionado um solo mais conveniente, pela sua abundância e qualidades de estabilização para que seja avaliado técnica e economicamente o revestimento construído com este material.

Os estudos propostos, esquematizados na fig. 21, serão detalhados a seguir.

## 2 - Investigações Preliminares

A primeira medida a ser tomada é reunir todo o acervo bibliográfico relacionado à região, principalmente os mapeamentos de solos e recursos hídricos.

Os levantamentos das características: topográficas, geológicas, pedológicas, de uso da terra e dos índices hídricos, visam a detectar os solos e demais elementos que definam os problemas e as soluções que são factíveis na região, relacionadas à implantação da irrigação.

Este estudo deve dar base às investigações de campo. Neste sentido o levantamento deve procurar estabelecer os grupos de solos existentes, delimitar as áreas de maior potencial para implantação de sistemas de canais, prever e orientar as localizações dos furos de sondagem.

A topografia pode ser vista a princípio nos mapas do "zoneamento agropecuário da Paraíba" na escala 1:200.000, com curvas de nível de 200 em 200 m. Entretanto, por serem as cartas de relevo bastante frequentes, deve-se procurar

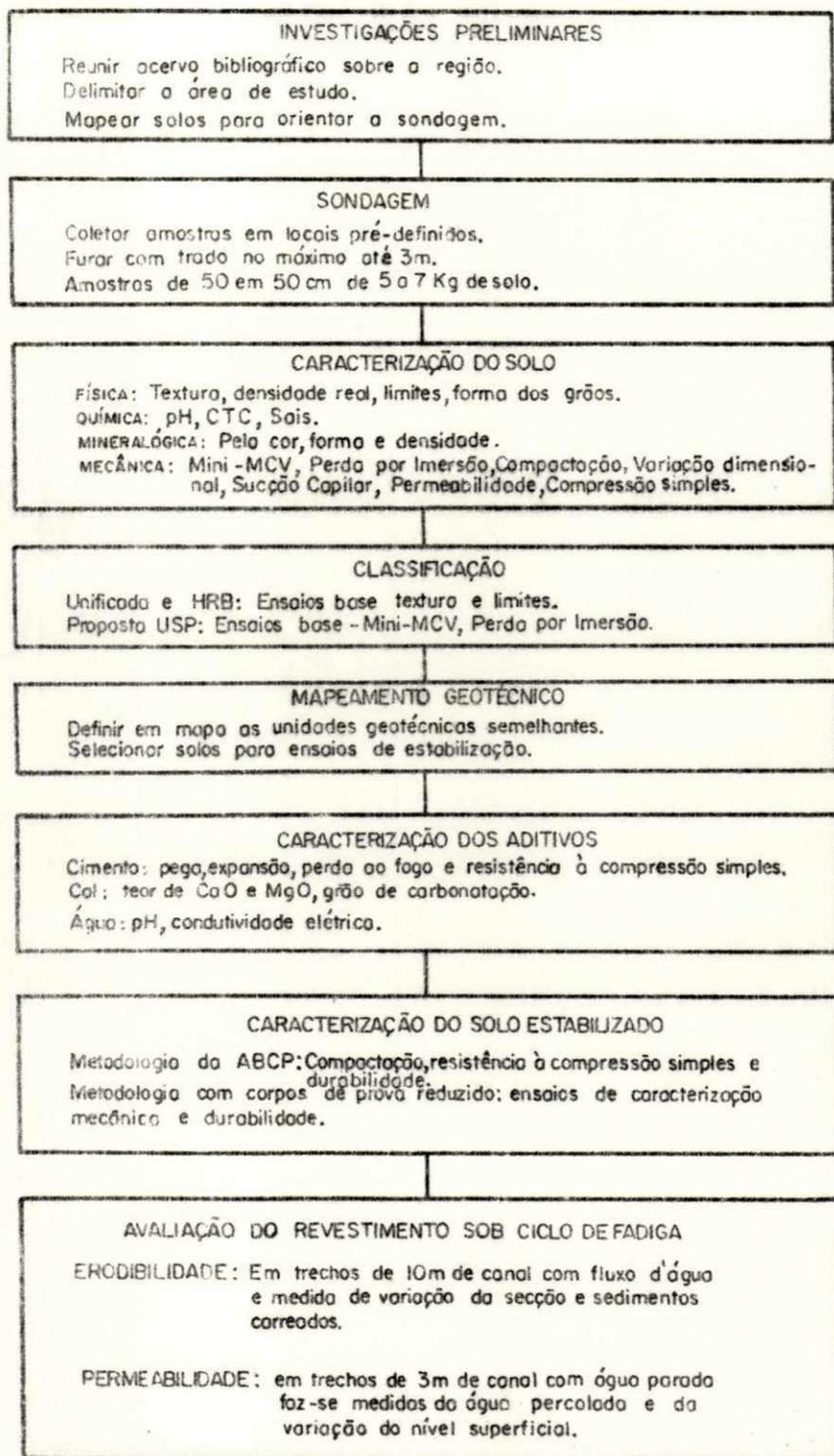


Fig. 21 - Fluxograma dos estudos específicos para revestimento de canal com solo-cimento e/ou cal.

informações de maior precisão, para a região em estudo.

A geologia pode ser avaliada com o "mapa geológico" publicado pela CDRM em 1982 na escala 1:500.000. Surge como alternativa a este, o mapeamento que vem sendo executado pelo Departamento de Mineração e Geologia da UFPb, na escala 1:250.000.

A pedologia pode ser avaliada com o uso de três trabalhos, a saber: "Levantamento exploratório do estado da Paraíba" SUDENE (1971) na escala 1:500.000; "Zoneamento agropecuário da Paraíba" SAA/PB (1978) com mapa na escala 1:400.000; e com os mapas na escala de 1:100.000 e 1:200.000 da região extremo-oeste do Estado, do trabalho de Santos (1983), do Departamento de Engenharia Agrícola da UFPb.

Com o uso dos mapas geológico e pedológico deve-se procurar delimitar as unidades de solos que possam ter as mesmas características geotécnicas, à semelhança do trabalho desenvolvido pelo IPT, SALOMÃO (1983), para uma micro-região homogênea do Estado do Sergipe.

Os mapas de uso da terra, índices hídricos e outros da SAA/PB (1978) complementarão os dados necessários à delimitação de regiões mais adequadas à irrigação e ao uso de canais.

Do conjunto das características levantadas com estes mapeamentos deve-se definir as unidades de solos a serem sondados. De cada unidade deve-se ter a delimitação aproximada e as características esperadas do solo, as quais devem guiar

colha dos furos em campo.

### 3 - Sondagem

Dentro de cada unidade definida anteriormente deve-se fazer um número de amostragens suficiente para se ter a classificação geotécnica e avaliar a uniformidade da unidade.

A sondagem será de simples reconhecimento, com uso de trado, fazendo-se furos com profundidades de até 3m, quando não se encontrar camada impenetrável a menor profundidade. Na medida do possível serão seguidas as recomendações da ABNT NB-617/80 . A amostragem deve se dar de forma a representar solos de 50 em 50 cm ao longo do perfil. Caso haja variação das características tócteis ou visuais do solo, esta deve ser registrada juntamente com as demais observações de campo. As amostras com 5 a 7 kg são acondicionadas em sacos de lona com malha fina ou em sacos plásticos.

As amostras em laboratório devem ser secas ao ar, homogeneizadas, destorroadas e separadas em quantis de 2,0 kg, 0,5 kg e 3,0 kg para a caracterização física, química e mecânica respectivamente, sendo opcional um quantil de 1,5 kg para ensaios complementares de caracterização mecânica. Com a sobra do material usado na textura é avaliada a mineralogia e a forma de grãos.

## - Caracterização do Solo

### 4.1 - Física

A caracterização física consiste em determinar a textura por peneiramento e sedimentação, os limites de consistência e a densidade real dos grãos das frações pedregulho, areia grossa e fina e silte mais argila.

A caracterização física do solo é importantíssima a quem pretende conhecer o comportamento geotécnico do solo. Embora as características físicas do solo sejam insuficientes para prever detalhadamente as suas propriedades de engenharia, elas têm sido largamente usadas para esta finalidade. De tal ordem é esta importância que apenas com estas características pode ser feita a classificação HRB e unificada, e inferir certos comportamentos do solo.

#### 4.1.1 - Textura

A textura é, sem dúvida, uma das características mais importantes a ser levantada em uma análise de solo. Com ela pode-se prever as propriedades do solo com certa segurança, principalmente em se tratando de solos grossos. Entretanto, quanto mais fino for o solo, o conhecimento da textura passa a ter menor significado, visto que os siltes e argilas têm comportamentos bastante diferentes, dependendo da qualidade dos mesmos.

A textura deve ser executada, salvo a alteração abaixo,

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso 882 Tel (083) 321-7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

segundo as recomendações da ABNT (MB-32/68). Do procedimento cabe destacar que o peneiramento é executado com 1 kg de material até o tamanho de 2 mm, a partir do qual se utilizam 100 g para o peneiramento via úmida, até o tamanho de 0,074 mm, e como recomenda Lima (1983) a sedimentação deve ser feita com o material que passou na lavagem das peneiras.

A classificação das frações deve seguir os critérios da escala internacional que apresenta a vantagem de ser facilmente memorizável, Vargas (1981), como se vê na tab. 7.

Tabela 7 - Classificação das frações do solo segundo a escala internacional, (VARGAS, 1981).

FRAÇÃO		DIÂMETRO	ORDEM DE GRANDEZA em m.
Pedregulhos		> 2 mm	$> 2 \times 10^{-3}$
Areia	Grossa	de 0,2 a 2 mm	$2-20 \times 10^{-4}$
	Fina	de 0,02 a 0,2 mm	$2-20 \times 10^{-5}$
Silte		de 0,002 a 0,02 mm	$2-20 \times 10^{-6}$
Argila		<0,002 mm	$< 2 \times 10^{-6}$

Os materiais retidos nas peneiras após terem sido pesados, não devem ser jogados fora, mas sim reagrupados de forma a ter-se as frações, pedregulho, areia fina e grossa, que serão usadas para a determinação de forma dos grãos, densidade real de mineralogia. Para estes ensaios a fração sil

te mais argila será obtida mediante peneiramento na peneira de 0,074 mm, de parte da amostra passada na peneira 2 mm ainda não usada nos ensaios.

#### 4.1.2 - Densidade Real

A densidade real mostra-se importante não apenas como elemento para poder-se calcular a sedimentação, mas também para dar indicativo da constituição dos grãos do solo, e é neste sentido que se recomenda a determinação da densidade real para as diversas frações do solo, que pode ter minerais diferentes concentrados em diferentes frações.

A densidade real dos grãos mostra-se necessária na determinação de alguns elementos da análise física do processo de compactação. Dentre estes pode-se destacar as curvas de diferentes graus de saturação, índice de vazios e porosidade.

Pelos motivos expostos a densidade real será executada em três frações distintas: pedregulhos, areia e silte mais argila. O material para este ensaio deve ser obtido a partir do usado para a textura.

O ensaio segue basicamente as recomendações da ABNT (MB-28/69).

#### 4.1.3 - Limites de Consistência

Os limites de consistência têm sido tradicionalmente indicados como elemento básico para prever-se o comportamen

to geotécnico de solos finos. Os limites de liquidez e de plasticidade idealizados por Atterberg mostraram-se muito práticos para os solos de clima sub-tropical, sendo usados no processo classificatório conjuntamente com a textura, são capazes de separar os solos, em grupos distintos, com propriedades peculiares, suficientes para fornecer os elementos geotécnicos básicos para um projeto de engenharia.

Entretanto, como fica dito nos vários trabalhos de Nogami (1980, 1981, 1982 a.b) e Villibor (1981) e também em outros, os solos tropicais não têm as suas propriedades de engenharia correlacionáveis com estes limites. Assim, eles se tornam impróprios para ser usados como parametro em um processo classificatório. Por outro lado, a classificação proposta pela USP ainda se encontra em fase preliminar, necessitando de maiores estudos, como afirma o próprio prof. Nogami, seu idealizador. Abandonar de vez o processo tradicional neste momento seria bastante temerário, por isto é que se propõe que continuem a serem determinados os limites de liquidez e plasticidade segundo a metodologia da ABNT (MB-30/69 e MB-31/69).

#### 4.1.4 - Forma de Grãos

A avaliação sistemática da forma dos grãos, mesmo por métodos grosseiros, pode nos fornecer indicativos importantes para a compreensão de algumas propriedades de engenharia, tais como permeabilidade, angulo de atrito e compacta-

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (033) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

bilidade.

A avaliação da forma dos grãos deverá ser feita separadamente, nas frações pedregulho, areia grossa e areia fina. De cada fração, com uma lupa faz-se um aumento tal que possa perceber-se a forma dos grãos e separá-los e quantificá-los em três categorias: a) angular e sub angular, b) sub arredondado e arredondado, c) bem arredondado. As características de cor e angulosidade das faces e arestas devem ser registradas para auxiliar a identificação mineralógica.

#### 4.2 - Química

No estudo da estabilização de solos com aditivos de atividade química, tais como cimento e cal, tem mostrado ser importante o conhecimento das características químicas do solo. Assim, a avaliação quantitativa dos sais, da capacidade de troca catiônica, do pH, da variação do pH com os aditivos e a presença de sulfatos são elementos mínimos para uma análise sistemática do solo.

##### 4.2.1 - Potencial do Hidrogênio - pH

As reações do cimento e da cal são tipicamente alcalinas. Quando o meio está a um pH menor que 12, as reações de aglomeração são dificultadas, Sherwood (1968), ATTEC (1974).

O pH do solo fornece uma previsão inicial do que pode acontecer, assim sempre foi recomendável não se usar cimento em solos com valores de pH menores que 5 ou 6. Entretanto

to, os trabalhos de Sherwood (1968), Thompson (1970) e DNER (1974), entre outros, foram suficientes para demonstrar que alguns solos ácidos podem ser estabilizados com cimento e/ou cal sendo mais importante a variação do pH com o acréscimo de aditivos, isto é o pH de mistura e que deve ser no mínimo 12. Este ensaio, de fácil execução, dispensa a determinação do teor de matéria orgânica, além de nos fornecer indicativos de teores a serem usados.

A metodologia é basicamente a preconizada por Eads e Grím para cal, DNER (1974), TRB (1976), sendo estendida para o cimento. Basicamente, o método consiste em medir o valor do pH em solução aquosa 1:2,5, da mistura solo-aditivo em percentagens que vão de 0 a 10% variando de 2 em 2%.

#### 4.2.2 - Capacidade de Troca Catiônica - C.T.C.

A capacidade de troca catiônica fornece indicativos do comportamento do solo, principalmente quando na presença de aditivos químicos. É fácil imaginar que, quanto mais cations se envolvam nas reações, maior a quantidade final de aglomerante. Os vários trabalhos que tentaram correlacionar os valores desta variável com o comportamento da mistura solo-aditivo, seja ele o cimento ou a cal, nem sempre encontram muito boas correlações, talvez pela magnitude deste frente aos outros fatores que definem o comportamento do solo.

Entretanto, Carvalho (1979) observou boa correlação

entre a diferença de troca catiônica medida o pH 7 e 10 com o comportamento da mistura solo cal. A idéia básica do ensaio é fazer a extração das posições trocáveis do solo com uso de uma solução de acetato de amônia ajustada ao pH 7 e medir quantas foram as posições trocadas, repetir a mesma operação usando a solução estratora ajustada ao pH 10 e fazer a diferença dos resultados.

#### 4.2.3 - Sais

Os sais têm influência incontestável sobre a durabilidade dos revestimentos com solo estabilizado.

Os sais carregados pelo solo e pela água, se em quantidades maiores que 1% em relação ao peso do cimento, podem trazer problemas ao concreto, como afirma Neville (1977). Os efeitos mais comuns são a eflorêscencia e o fofamento da superfície.

A determinação dos sais solúveis do solo, segundo o manual da EMBRAPA (1979), é facilmente determinado, medindo se a condutividade elétrica do extrato líquido de uma pasta da amostra do solo.

#### 4.2.4 - Sulfatos

A constatação de presença de sulfatos no solo deve sempre ser testada, pois estes na presença de cimento e/ou cal e argila por hidratação formam produtos de volume maior que seus componentes, proporcionando a desagregação do re-

vestimento.

A análise qualitativa do sulfato no solo segue as recomendações da EMBRAPA (1979).

#### 4.3 - Mecânica

A caracterização mecânica do solo é extremamente útil na medida em que ela fornece diretamente elementos de comportamento do solo, e com alguns de seus resultados pode-se prever outras propriedades de engenharia.

Os ensaios de mini-MCV e perda por imersão são os dois necessários para a caracterização proposta pela USP; assim, para fins de levantamento geotécnico dos solos existentes na área de estudo, eles são suficientes.

Para completar as informações das características mecânicas, pode-se fazer outros ensaios, tais como contração, sucção capilar d'água, expansão, permeabilidade e compressão simples.

Sugere-se que para obter o maior número de resultados com uma pequena amostra, se proceda aos ensaios em um sequência de forma que o corpo de prova seja aproveitado para vários ensaios.

Neste sentido sugere-se para experimentação do solo que este seja compactado a várias umidades, e que para cada corpo de prova sejam realizados os ensaios na seguinte sequência: contração por secagem ao ar sem extração do corpo de prova do molde, sucção capilar d'água, expansão, permea-

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria para Assuntos de Ensino  
Coordenação de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321 7222-R 355  
68.100 - Campina Grande - Paraíba

bilidade e compressão simples.

#### 4.3.1 - Mini-MCV

Os ensaios de MCV (Moisture Condition Value) foi concebido por Parson (1978), para fazer uma avaliação rápida e segura das condições de umidade do solo, para fins de terra plenagem.

Entretanto, o próprio autor do método mostrou mais tarde de ser este ensaio correlacionável com as características de resistência do solo e ainda podendo fornecer elementos para um novo processo de classificação.

No fim da década de 70, sob a orientação de Nogami, começou-se a desenvolver na USP uma adaptação do equipamento para compactação de corpos de prova em tamanho reduzido (mini-MCV), que resultou nos vários trabalhos apresentados pelo pessoal daquela universidade.

A metodologia do ensaio mini-MCV é encontrada com detalhes no trabalho de Soria (1980) que sobre o ensaio escreve:

"É fato conhecido que, quando se compacta um solo com energias diferentes, as relações entre densidade e teor de umidade convergem à medida que o teor de umidade aumenta, indicando, assim, que em cada teor de umidade há um número máximo de golpes que o corpo de prova pode transformar em compactação, sem expulsão de água".

"O ensaio MCV consiste basicamente em determinar os

esforços de compactação em termos de número de golpes, necessário para a compactação completa de uma amostra de solo".

Os ensaios do tipo MCV são ensaios que avaliam a susceptibilidade de compactação dos solos, e por isto são potencialmente úteis para a solução de uma série de problemas associados à compactação, tais como:

- a) medida das condições de compactação "in situ", avaliação dos efeitos de excesso e falta de umidade;
- b) indicação do teor de umidade mais adequado à compactação;
- c) avaliação da energia mais adequada à compactação;
- d) identificação dos solos mais problemáticos quanto à compactação e dos tipos de dificuldades que podem ser encontradas;
- e) avaliação do desempenho das máquinas de terraplenagem;
- f) classificação de solos.

O ensaio fornece também a família de curvas de compactação, correspondente a várias energias, isto é, a vários números de golpes.

Em suma, o ensaio de mini-MCV, além de fornecer os elementos fundamentais para a classificação do solo, nos dá parâmetros para avaliação do processo de compactação, isto com apenas 1,5 kg de solo.

#### 4.3.2 - Perda por Imersão

O ensaio de perda por imersão é um ensaio simples que consiste em determinar porcentualmente o solo que se desagrega na presença d'água, em relação ao peso de solo do corpo de prova que deve ficar saindo 1 cm do molde após ter sido compactado pelo método mini-MCV.

Este ensaio tem clara importância para solos que serão utilizados em revestimento de canais, tendo em vista ser a ação d'água uma das principais causadoras de danos ao revestimento. O ensaio proposto e descrito por Nogami (1981) fornece o elemento complementar para a classificação proposta pela USP. Assim, os corpos de prova utilizados no ensaio anterior são reaproveitados neste, para fornecer características de grande importância para o estudo de solo, principalmente para aqueles que trabalharão na presença d'água.

#### 4.3.3 - Compactação

O ensaio de compactação idealizado por Proctor é um dos ensaios mecânicos tradicionalmente mais usados, para fornecer dados de controle de compactação. Outros ensaios mecânicos, tais como resistência à compressão simples, permeabilidade e CBR entre outros, em geral são executados para condições pre-determinadas por este ensaio.

Por sua vez, um dado processo de compactação em laboratório tem correspondência aproximada a apenas alguns pro

processos de compactação na obra. O ensaio de Proctor tem boa correspondência à compactação com rolo pé de carneiro, e vai sendo diminuída sua correspondência ao caminhar a compactação para processos por amassamento, prensagem, vibração e outros, como ocorre com rolos lisos ou pneumáticos, formas deslizantes, rolos vibratórios etc.

Entre outros, o problema maior que pode trazer este ensaio à sistemática proposta, é a quantidade de material usada. Uma curva de compactação com 5 pontos, sem repetição, consome cerca de 15 kg de solo, o que traria grande dispêndio aos estudos.

De uma forma geral, os estudos propostos visam a obter resultados confiáveis, com a menor quantidade de amostra possível. Neste sentido, a proposta da USP vem colaborar com estas expectativas, pois o ensaio de compactação necessita apenas de 1,5 kg de solo para ser realizado. A sua correspondência com o ensaio Proctor é razoável, apesar do processo de compactação aproximar-se mais a um amassamento, e ser realizável apenas para amostra cujo diâmetro máximo é de 2 mm, Nogami (1980), Villibor (1981).

Entretanto, a tradição de uso de ensaio Proctor o colocou como ensaio obrigatório para a análise de obras de terra que envolvam a compactação. A princípio este ensaio deve ser realizado sempre que houver disponibilidade de solo, para se ter uma idéia padrão do comportamento da curva densidade aparente seca versus umidade.

O método de ensaio proctor a ser usado é o descrito pela ABNT (MB-33/68), sem reutilização do solo.

O método de ensaio de compactação em tamanho reduzido é o adotado e deve seguir as recomendações apresentadas por Villibor (1981).

#### 4.3.4 - Contração e Expansão

O ensaio é realizado medindo-se diretamente a contração axial dos corpos de prova por secagem lenta ao ar. Segundo as recomendações de Villibor (1981), devem ser utilizados corpos de prova não imersos em água. Os corpos de prova são extraídos de seus moldes para secagem de 24 h, sendo anotadas as dimensões inicial e final; calcula-se a contração em termos percentuais em relação à dimensão inicial.

Pensando-se em fazer um uso sequencial dos corpos de prova, nota-se que, ao extraí-lo do molde, poder-se-ia apenas realizar o ensaio de compressão simples, os demais ensaios ficariam impedidos de ser realizados. Assim, para um estudo sequencial das propriedades do solo, sugere-se inicialmente, medir-se a contração do corpo de prova no próprio molde, e fora do molde na fase final antes de medir-se a compressão simples.

Para os ensaios executados sequencialmente, os resultados de contração e expansão devem-se referir à dimensão do corpo de prova no momento de término da compactação.

#### 4.3.5 - Sucção Capilar d'água

Este ensaio pode ser realizado logo após a compactação ou em corpos de prova secos ao ar, conforme seja a situação do campo que se quer retratar. Como descreve Villibor, "O corpo de prova absorve a água através de uma placa porosa saturada que é ligada a um tubo graduado, disposto horizontalmente e cheio de água. Os volumes de água absorvidos pelo corpo de prova  $q$  (cm<sup>3</sup>), medidos através do deslocamento do menisco da água no tubo, são lançados em gráficos, em função de  $t$  ( $t$ , em minutos). Da parte retilínea da curva obtém-se o coeficiente de sucção capilar d'água  $K_c = q/a \cdot t$  em que  $a$  = área da secção do corpo de prova em cm<sup>2</sup>".

Este ensaio permite que seja realizado qualquer outro ensaio na sua sequência, sendo preferenciais aqueles que envolvam umedecimento como expansão ou permeabilidade.

Para o uso sequencial recomenda-se que sejam feitas leituras das dimensões do corpo de prova no início e no final do ensaio, para que não sejam mascarados os resultados do ensaio de expansão que vem na sequência.

#### 4.3.6 - Permeabilidade

A permeabilidade é medida com permeâmetro de carga variável, que consiste em um tubo de vidro, de pequena secção, colocado na vertical e conectado ao molde onde se encontra o corpo de prova, por meio de uma rolha de borracha furada

conectada a um tubo de latex; a rolha prende-se a um dos lados do molde e o tubo de latex prende-se ao tubo de vidro. Os detalhes específicos podem ser vistos em Villibor (1981).

#### 4.3.7 - Compressão Simples

O ensaio de compressão simples tem a vantagem de fornecer valores das características elásticas do solo. Assim, obtêm-se diretamente os valores da pressão máxima de compressão e do "módulo de elasticidade" do solo, que podem ser usados em cálculo.

Este ensaio que pode ser considerado um caso particular de um ensaio triaxial, onde a pressão de confinamento é nula, pode fornecer grosseiramente os valores de ângulo de atrito e coesão do solo, o primeiro por observação do ângulo da cunha de ruptura e o segundo a partir do gráfico de tensão cisalhante versus tensão normal, supondo-se conhecido o valor do ângulo de atrito que define a reta de Colomb, que tangencia o círculo de Mohr, que passa pela origem e tem diâmetro igual à pressão máxima de compressão, assim o valor da coesão é dado pelo cruzamento desta reta com o eixo das tensões cisalhantes.

Na realização do ensaio deve-se ter o cuidado com o capeamento do corpo de prova e de ler-se aproximadamente dez pares de deformação tensão antes da ruptura. No mais este ensaio é bastante conhecido.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Geral de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel. (083) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

#### 4.4 - Mineralógica

O estudo da mineralogia do solo tem mostrado trazer indicativos para prever-se o comportamento do solo-estabilizado, CROFT (1967).

Os estudos do solo-estabilizado, têm demonstrado existirem certas relações entre os minerais presentes e o comportamento da mistura. A avaliação mineralógica executada com rigor é dispendiosa e injustificável para o estudo em questão; entretanto, pelo menos uma determinação, simples e aproximada, poderá fazer parte da sistemática.

##### 4.4.1 - Minerais das Argilas de Siltes

A determinação dos minerais das frações argila e silte é na verdade a mais importante. Infelizmente, essa determinação é custosa e depende de aparelhos relativamente sofisticados.

Os métodos usuais para análise são; difração do raios-X, análise térmica diferencial e/ou <sup>gravimétrica</sup> quevimétrica, microscopia eletrônica e fluorescência de raios-X. Com exceção da análise térmica diferencial, os demais ensaios não têm condições de ser executados em Campina Grande.

Dentro desta ótica, considera-se mais lógico avaliar a mineralogia das frações argila e silte somente para os solos que servirão de matéria prima para os ensaios de avaliação do revestimento, ficando assim dispensados para a gran-

de gama de solos que serão analisados.

#### 4.4.2 - Minerais de Areias e dos Pedregulhos

Dos minerais normalmente encontrados nas areias o quartzo merece atenção por ser ele muito resistente ao inteperismo e dificilmente ser reduzido a tamanhos menores. No entanto, outros minerais podem fazer-se presentes, alterando o comportamento esperado das areias. Assim, a determinação dos minerais pode dar elemento para a explicação de certas anomalias aparentes.

Os pedregulhos refletem em boa parte as características mineralógicas da rocha-mãe, podendo-se ter uma idéia do espectro mineral formador do solo.

A mineralogia pode ser definida com bastante precisão, o que evidentemente envolveria métodos custosos, o que não é o objetivo neste trabalho. Assim, os minerais presentes devem ser avaliados por estimativa, com base nos seguintes elementos: cor, forma e densidade real.

Da fração analisada deve-se procurar separar os grãos de aspectos semelhantes, considerando-se principalmente a cor e a forma. Feito isto, caso não seja suficiente para se estimar o mineral separado, faz-se a determinação da densidade real de cada grupo mineral.

### classificação

A classificação do solo é a expressão concreta do conjunto de resultados obtidos para a caracterização. Assim, a classificação é tão mais coerente com o comportamento "in situ" quanto melhores os ensaios usados para caracterizar o solo.

A grande variação dos resultados de limites, para os solos tropicais, coloca em dúvida a validade deste, como elemento fundamental para classificar solos.

Entretanto, a tradição do uso faz que as classificações HRB (BPR) e unificada sejam indispensáveis na caracterização geotécnica de um solo.

Assim uma nova proposta de classificação mais adaptada aos solos tropicais, baseada nos ensaios de mini-MCV e perda por imersão, surge como alternativa viável para compreensão dos nossos solos, Nogami (1981).

#### 5.1 - Unificada

A classificação unificada é uma das mais usadas em trabalhos geotécnicos, por isto mesmo a maioria dos livros de mecânica dos solos trazem as indicações para executá-la.

Para se proceder a esta classificação deve-se conhecer a textura do solo, seu limite de liquidez e índice de plasticidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (CSC) 321-7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

## 5.2 - HRB

Esta classificação nasceu principalmente para uso rodoviário, tendo sido muito usada por diversos organismos que trabalham com pavimentação. Ela entre outras é usada na metodologia da ABCP para solo-cimento.

Os parâmetros para a classificação são os mesmos usados para a unificada, e também podem ser facilmente encontrada as suas regras em qualquer livro sobre o assunto.

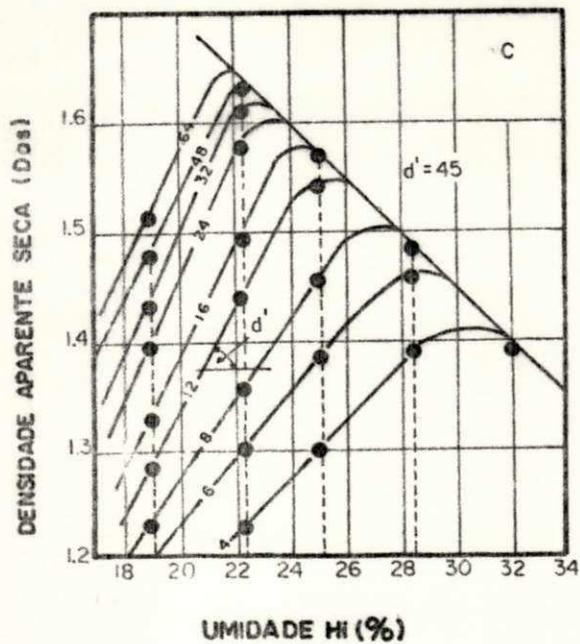
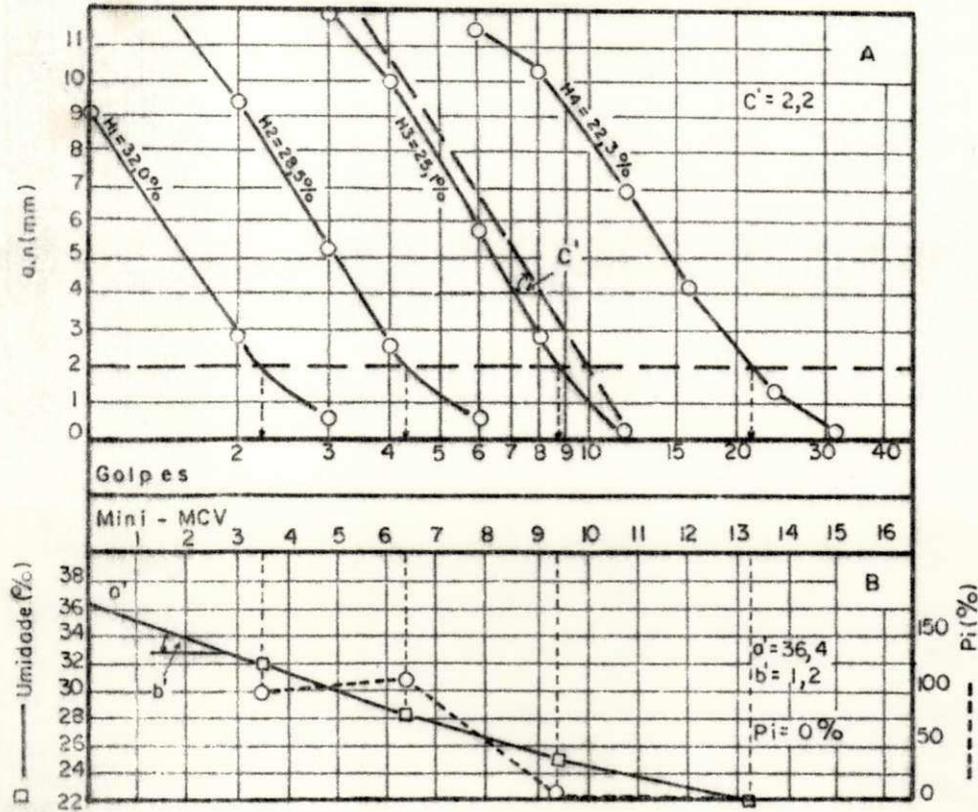
## 5.3 - Proposta da USP

A classificação proposta por Nagami e Villibor (1981) como já foi insistentemente falado, baseia-se nos resultados dos ensaios de mini-MCV e perda de imersão.

Do ensaio de mini-MCV obtêm-se os parâmetros  $c'$  e  $d'$ , sendo o primeiro dado pela tangente do ângulo de uma reta média das obtidas no gráfico da variação da altura versus mini-MCV (função de número de golpes), passando pelo ponto de mini-MCV igual a 10;  $d'$  é dado pela tangente do ramo seco obtido para a compactação com 10 golpes (equivalente à energia Normal). Com o valor da perda por imersão  $P_i$  para MCV entre 10 e 15 e o valor de  $d'$  calcula-se  $e'$  segundo a fórmula:

$$e' = \frac{20}{d'} + \frac{P_i}{100}$$

A título de exemplo são mostrados os valores de  $c'$ ,  $d'$ ,  $P_i$  e  $e'$  na fig. 22



- A - Curvas  $a_n$  em função do número de golpes.
- B - Curvas de  $P_i$  (Perda por imersão) e teor de umidade em função do Mini-MCV.
- C - Curvas de compactação

Fig. 22 - Exemplo de apresentação de resultados de ensaio do tipo mini-MCV com perda por imersão. (NOGAMI, 1981)

Com os valores  $e'$  e  $c'$  entra-se em um gráfico que fornece a classificação do solo, fig. 23.

De uma forma geral, o fator  $c'$  diz respeito à textura do solo e varia de 0 a 2,5 quando o solo varia de arenoso para argiloso. O fator  $e'$  expressa o caráter laterítico ou saprolítico do solo. Entende-se aqui, de forma simplificada, por solo laterítico aquele não susceptível à água e com curva de compactação bastante inclinada no ramo seco, e como solo saprolítico aquele susceptível à água e com curva de compactação achatada. Assim, para um fator  $e'$  que varia aproximadamente de 0 a 2, são considerados solos lateríticos, aqueles com valores  $e'$  menores que 1,1 para solos argilosos siltosos, e menores que 1,4 para solos arenosos, e solos saprolíticos, aqueles com valores acima dos especificados.

Com a classificação pode-se inferir algumas propriedades de engenharia como se ve na Tab. 8.

## 6 - Mapeamento Geotécnico

O mapeamento geotécnico deve ser executado com base na interpretação de dados de imagens LANSAT, fotos aéreas, sondagem em campo e mapeamentos anteriores. São definidas as unidades geotécnicas que possuem comportamento semelhante permitindo estabelecer, em consonância com as demais características do meio físico uma solução mais racional aos problemas de engenharia que dependam da geotecnia como é o caso

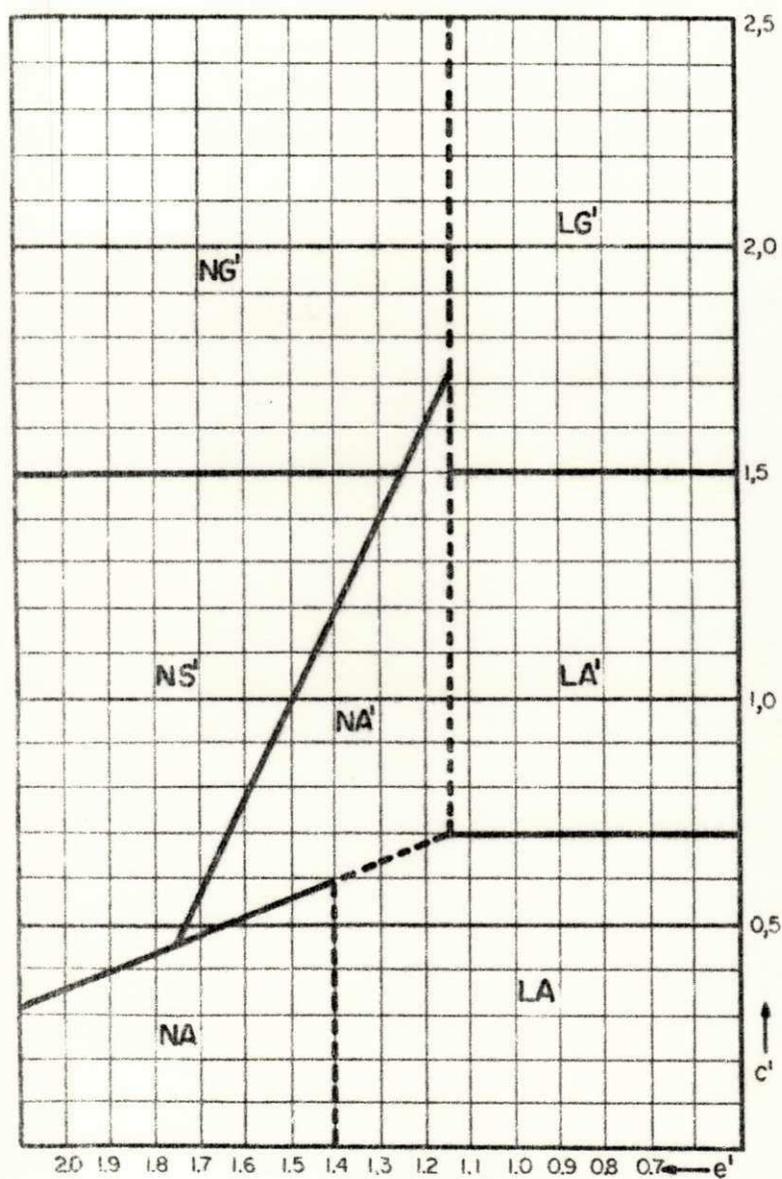


Fig. 23 - Gráfico para classificação dos solos. Segundo proposto por Nogami (1981).

CLASSES				N - SOLOS DE COMPORTAMENTO "NÃO LATERÍTICO"				L - SOLOS DE COMPORTAMENTO "LATERÍTICO"			
GRUPOS				NA AREIAS	NA' ARENOSOS	NS' SILTOSOS	NG' ARGILOSOS	LA AREIAS	LA' ARENOSOS	LG' ARGILOSOS	
GRANULOMETRIAS TÍPICAS (minerais (1))				areias, areias siltosas, siltes (q)	areias silto- sas, areias argilosos	siltes (K, m) siltes areno- sos e argi- losos	argilas, argilas arenosas, argi- los siltosos	areias com pouca argila	areias argi- losas, argilas arenosas	argilas, argilas arenosas	
CAPACIDADE DE SUPORTE	MINI-CBR sem imersão (%) (2)	m. alto > 30		alto o		médio o	alto	alto	alto o muito alto	oito	
		alto 12-30		médio		alto					
		médio 4-12									
		baixo < 4									
	PERDA DE SUPORTE POR IMERSÃO (%) (2)	alto > 70		médio o		alto	alto	baixo	baixo	baixo	
		médio 40-70		baixo							
		baixo < 40									
	EXPANSÃO (%) (2)	alta > 3		baixo	baixo	alto	alto o médio	baixo	baixo	baixo	
média 0.5-3			baixo o	baixo o	média	alto o médio	baixo	baixo o médio	médio o alto		
CONTRAÇÃO (%) (2)	baixa < 0.5		baixo o	baixo o	média	alto o médio	baixo	baixo o médio	médio o alto		
PERMEABILIDADE log(K(cm/s)) (2)	alta > (-3)		médio o	baixo	médio o	baixo o	médio o baixo	médio o	baixo	baixo	
	média 0 (-3) (-6)		alto		baixo	médio					
	baixa < (-6)										
PLASTICIDADE	IP	LL	alta > 30	baixo o	médio o	médio o	alto	NP o	baixo o	médio o	
			média 7-30	NP	NP	alto		médio	alto		
			baixa < 7								
			< 30								

(1) q = quartzo, m = micas, K = caulinita  
(2) Corpos de prova compactados na umidade ótima da energia "Normal", com sobrecarga padrão quando pertinente; sem fração retida na peneira de 2.00 mm de abertura.

TABELA-8 - Profundidades típicas dos grupos de solos segundo classificação proposta por NOGAMI(1981).

plantação de o sistema de canais de irrigação e drena  
em.

## 7 - Caracterização dos Aditivos

### 7.1 - Cimento

O cimento é caracterizado seguindo método da ABNT (MB-1/79). Os seus resultados devem ser comparados com as especificações também da ABNT (EB-1/77) para a classe de cimento em uso.

Entretanto, para um controle sistemático do cimento usado no laboratório, deve-se selecionar alguns daqueles ensaios, que sejam mais simples de ser executados, para servir de controle de qualidade.

Assim, a finura pode ser verificada a cada série de moldagem, os ensaios de pega, resistência a compressão simples e perda do fogo deve ser feito para cada partida de cimento usada no laboratório.

### 7.2 - Cal

A cal deve ter ensaiadas as suas características pelos métodos normatizados pela ABNT (MB-432/67), sendo que os teores de Calcio e Magnesia são os elementos mais importantes para definir o tipo de cal.

Para o controle sistemático, sugere-se sempre que for

1, verificar o grau de carbonatação, por meio de uma solução ácida, que pode ser com HCl. 1:1, ou simplesmente com vinagre de acidez comprovada.

A análise que caracteriza a qualidade de cal, tal como manda a norma, deve ser feita para uma amostra da cal usada na pesquisa.

### 7.3 - Água

A água deve ser verificada a sua salinidade, pela condutividade elétrica. O valor do pH é também conveniente ser conhecido.

De forma geral, qualquer água potável é indicada para a mistura.

## 8 - Caracterização do Solo-Estabilizado

Ao se falar sobre caracterização de solo-estabilizado, deve-se ter em mente que a tecnologia para estabilização do solo com cimento está vários passos adiante da estabilização com cal, Bueno (1982).

O uso de uma sistemática adequada para o solo-cimento resultou na simplificação da própria sistemática com o passar do tempo. Nos primeiros ensaios para determinar os testes necessários à estabilização, eram medidos a variação de umidade e volume nas várias fases dos ensaios de compressão simples e durabilidade; mais tarde estas medidas

ornaram-se desnecessárias e para alguns casos até o ensaio de durabilidade é dispensável, Pinto (1980).

Sob esta ótica, não se temeu definir uma metodologia que detalhe minuciosamente as características do solo estabilizado, pois com o passar do tempo isto pode ser simplificado, sem que se carregue a dúvida de não conhecer alguns valores característicos tão necessários.

### 8.1 - Metodologia da ABCP para Solo-Cimento

A metodologia divulgada pela ABCP é, basicamente, a desenvolvida pelo PCA nos EUA. Esta metodologia, já simplificada desde a sua criação, ainda é bastante trabalhosa quando cumpre definir teores de cimento para uso em revestimento de canal. Para esta finalidade o ensaio de durabilidade é básico. Este ensaio é demorado e trabalhoso e consome razoável quantidade de solo. A adaptação desta metodologia para o solo-cal esbarra em sérios problemas, tais como tempo de cura e intensidade de desgaste na escovação, a serem usados como referência.

Entretanto, para se resolverem problemas práticos imediatos, com solo-cimento, ele é de utilidade incontestável. Nesta metodologia são 3 os ensaios fundamentais, ABCP (1980).

#### 8.1.1 - Compactação Prôctor Normal

Para o solo-cimento é a mesma para o solo, isto é, to

e 5 pontos de umidade de forma que, pelo menos, dois pontos sejam do ramo seco e dois do ramo úmido.

Devem os valores de umidade referir-se ao peso de cimento mais solo-seco e a percentagem de cimento calculada em relação ao peso do solo-seco.

#### 8.1.2 - Resistência à Compressão Simples

O ensaio é realizado em corpos de prova, moldados pela compactação próctor normal, curados por 7 dias em câmara úmida e imersos na água 4 h antes de serem submetidos à compressão.

O corpo de prova deve ter o seu diâmetro cuidadosamente medido, momentos antes do ensaio. A velocidade do ensaio deve ser de aproximadamente  $1,5 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ . Após a ruptura deve-se observar se a penetração da água foi homogênea e tirar duas capsulas para umidade, uma da parte central e outra da parte superficial do corpo de prova.

#### 8.1.3 - Durabilidade

A durabilidade é avaliada por ciclos de molhagem, secagem e escovação. Consiste em submeter um corpo de prova moldado por compactação próctor normal, após 7 dias de cura à doze deste ciclos, e medir a perda de peso no final deste, para comparar com valor pré-fixado em norma.

Este não é ensaio de ação de intempéries sobre o solo-cimento, mas seus critérios indicam um teor de cimento, com

Qual o solo-cimento resistirá aos agentes atmosféricos ,  
(1980).

Para o uso de revestimento de canais, o USDI (1963) recomenda que sejam acrescentados 2% ao teor de cimento encontrado pela metodologia prescrita. O ICPA (1972) recomenda que para solos com menos de 50% de material fino sejam acrescentados 2% ao teor de cimento encontrado e 4% para solos com mais de 50% de finos.

#### 8.2 - Metodologia com Corpos de Prova em Tamanho Reduzido

Os ensaios, em sua essência, são os mesmos descritos para a caracterização mecânica do solo. Entretanto, para o solo-estabilizado sempre surge a necessidade de um tempo de cura. Para o solo-cimento parece ser o tempo de 7 dias suficiente para que a maioria das reações aglomerantes se realizem. Entretanto, com o solo-cal ou com o solo-estabilizado com cimento e cal simultaneamente, isto pode não ser verdade, e não é para a maioria dos solos, aos quais a cal serve como aditivo estabilizante, pois as reações pozolânicas, principais responsáveis pela aglomeração das partículas, são relativamente lentas, necessitando-se conhecer a evolução da resistência com o tempo e a influência do tempo de cura, para avaliar a estabilização do solo.

### 8.2.1 - Mini-MCV

Para este ensaio deve-se ter o cuidado para que o tempo entre o umedecimento da mistura e a compactação seja aproximadamente o mesmo para todos os corpos de prova. Não se recomenda uma compactação imediata após a mistura, para que haja tempo de a umidade se tornar homogênea, e tampouco um tempo demasiado para que não sejam formados cristais aglomerantes. Em princípio, este tempo pode ser de 30 min. a 1 h., nunca passando de 2 hs.

### 8.2.2 - Perda por Imersão

Para este ensaio, o tempo decorrido entre a compactação e a colocação em imersão é determinante no resultado. O estudo da variação deste tempo para uma dada umidade de compactação pode resultar na definição deste tempo. Entretanto, apesar da pouca experiência com estes ensaios, o autor sugere que o tempo entre o umedecimento e a colocação em imersão seja fixado em 2 h., e que para a umidade considerada ótima seja estudada a variação deste tempo, colocando-se corpos de prova imersos após 1, 2, 4, 8 e 24 h. após o umedecimento.

### 8.2.3 - Compactação

Para este ensaio são válidas as mesmas recomendações do ensaio mini-MCV, e usados 5 golpes em cada face do corpo de prova, como recomenda Villibor (1981).

#### 8.2.4 - Contração e Expansão

Simplesmente a medida de contração, ou da expansão, tem muita importância no estudo do solo-estabilizado. Entretanto, as medidas de contração e expansão com o decorrer dos ciclos de molhagem e secagem são importantes e podem até servir de base para a avaliação de durabilidade. Juntamente com as leituras de dimensão, os corpos de prova deve ser pesados, para que seja determinada a umidade e densidade.

#### 8.2.5 - Sucção Capilar

Este ensaio não leva nenhuma recomendação especial. Entretanto, a sucção capilar pode ter seu valor alterado com o tempo de cura, e portanto deve ser, na medida do possível, estudada esta variação. Em princípio, este ensaio deve ser realizado como fase preliminar dos ensaios de expansão e permeabilidade.

#### 8.2.6 - Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade pode ser bastante afetado pelo tempo de cura. Um ensaio logo após a moldagem pode lixiviar parte do gel formado pelo aditivo e alterar as condições do material. Definir um tempo de cura sem um estudo preliminar e, no mínimo, temerário. Entretanto, para efeito prático, pode-se em princípio adotar o período de 7 dias de cura antes do ensaio, e sempre que possível, estudar pelo menos para uma umidade a importância do tempo de cura

nos resultados de permeabilidade.

Os corpos de prova ensaiados à permeabilidade, ao término do ensaio, devem ser submetidos a compressão simples, para que sejam comparados com os resultados de compressão simples dos corpos de prova que não se submeteram à percolação forçada d'água.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - 511-9000 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

#### 8.2.7 - Durabilidade

Este ensaio objetiva avaliar a durabilidade, do solo estabilizado, por aceleração da fadiga com ciclos de molhagem e secagem. Para cada situação que se quer analisar devem ser moldados no mínimo 6 corpos de prova, 3 para serem rompidos sem ciclos de molhagem e secagem, e curados imersos por 7, 14 e 28 dias; 2 que devem iniciar os ciclos após 7 dias de cura e ser rompidos com a idade de 14 e 28 dias; e 1 que deve ter iniciados os seus ciclos após 14 dias de cura a ser rompido com 28 dias.

Os ciclos de molhagem e secagem devem iniciar-se pela manhã com 4 h de imersão e colocados em estufa a 70°C por 19 h. A ruptura deve-se dar ao final da imersão. Os corpos de prova não submetidos ao processo cíclico devem ser imersos após 3 dias da moldagem. Ao final de cada ciclo deve ser medido o peso e as dimensões do corpo de prova.

Este ensaio, que se propõe substituir o ensaio tradicional de durabilidade, tem a vantagem de que, com aproximadamente 2 kg de solo, pode ser avaliada a durabilidade por

das medidas, a da perda de resistência e das características de variação dimensional, avaliar a influência do tempo de cura e ter a evolução da resistência com o tempo. Considerando que para determinação de um ponto no ensaio de durabilidade tradicional são necessários pelo menos 2 corpos de prova sendo 1 para comparação e isto demandaria cerca de 4 kg de solo, torna-se evidente que os objetivos de ampliar o número de respostas com menor gasto de solo serão alcançados.

Segundo a AITEC (1973), os países que adotam esta técnica de avaliação de durabilidade, impõem uma resistência mínima obtida nos corpos de prova submetidos aos ciclos de 75 a 80% do valor da resistência dos corpos de prova não ciclados. A perda das características de variação dimensional também é usada como critério para avaliar a estabilização. Esta técnica também foi usada por Bezerra (1976) e Tesoriere (1981), mostrando bons resultados.

## 9 - Avaliação do Revestimento

### 9.1 - Avaliação Técnica

Os ensaios de avaliação do revestimento só devem ser executados para solos que tenham um grande potencial de ser usados em revestimento de solo-estabilizado, isto é, somente para os solos predominantes na região onde se pensa implantar sistemas de canais. Esta medida preventiva é tomada

pe. O custo inerente destes ensaios que necessitam para a sua realização uma amostra relativamente grande.

Os ensaios de avaliação do revestimento são realizados em dois "aparelhos" distintos: um que simula um canal com fluxo d'água, e outro um canal fechado nas extremidades, conseqüentemente sem fluxo d'água. No primeiro se realiza o ensaio de erodibilidade e no segundo, os ensaios de permeabilidade.

#### 9.1.1 - Erodibilidade

O ensaio de erodibilidade será realizado em canal com 9,50 m de comprimento, onde após o período de 7 dias de cura, a contar da confecção do revestimento, será promovido um fluxo uniforme d'água, em alternância com a secagem, promovida por lâmpadas infra-vermelho. O desgaste será avaliado pelos sedimentos retidos em câmara apropriada colocada no final do canal e pela medição do desgaste através de pinos metálicos cravados no revestimento imediatamente após a sua confecção.

Dos três canais existentes no laboratório cada um deve ter um teor de aditivo diferente, os três canais devem ser confeccionados com o mesmo método e testados para as mesmas condições de fluxo. Assim, a variação do desgaste será função exclusiva do teor de aditivo.

O princípio deste ensaio é semelhante ao dos demais ensaios de durabilidade, mas com a vantagem de fazer medi-

sob solicitação que o material estará sofrendo quando acabado na obra. Como nos outros ensaios, os ciclos de mo e secagem têm a função de acelerar a fadiga do mate

Os ciclos devem iniciar-se no fim do dia, quando o canal deve ser cheio d'água, sem no entanto promover o fluxo. Esta situação deve perdurar por 14 h., isto é, até a manhã seguinte. Esta medida visa a eliminar problemas de sub-presão. Pela manhã inicia-se o fluxo d'água a uma velocidade de 1 m/s, que deve permanecer no decorrer do dia, isto é, aproximadamente 10 h. Após três dias esta fase termina e o canal é esvaziado e assim deve pernoitar (14 h.). No dia seguinte devem ser acesas lâmpadas infra-vermelho sobre o canal. Esta situação deve permanecer cerca de 48 h. O canal então deve passar 1 h resfriando-se para em seguida ser avaliado reiniciar o ciclo com o enchimento do canal com água.

As medidas de desgaste devem ser realizadas e registradas a cada ciclo, no final da secagem, pouco antes do canal ser reenchido.

O ensaio é dado por acabado após 4 meses de ensaio ou em caso de deteriorização excessiva.

Avaliação do desgaste deve ter como base o exposto em parâmetros de erosibilidade.

Os detalhes do canal encontram-se no Anexo 1.

### 9.1.2 - Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade será realizado em canal horizontal com 3 m de comprimento e fechado nas extremidades. O canal é assentado em um leito de areia contido em um filme plástico com uma única saída para a água. Após 7 dias de cura o canal deve sofrer ciclos de molhagem e secagem por um período mínimo de 4 meses.

Os ciclos de molhagem e secagem consistem em deixá-los cheios d'água por 72 h e secos por 96 h.

As medidas de infiltração serão de duas espécies: uma medida direta, que consiste em coletar a água infiltrada pelo revestimento na única saída existente; e outra medida indireta, que consiste em verificar a variação do nível d'água no canal, devendo-se, para minimizar o efeito da evaporação e precipitação, ter um canal de comparação impermeabilizado com plástico.

A avaliação do coeficiente de permeabilidade do revestimento será com base no exposto no item de parâmetros de permeabilidade.

Os detalhes da estrutura de ensaio encontra-se no Anexo 1.

O ensaio de fissuração é parte do ensaio de permeabilidade, pois consiste simplesmente em medir a malha de fissuração do revestimento, quando na fase de secagem daquele ensaio.

A fissuração deve ser medida em termos de comprimento de fissura por área de revestimento. Na medida do posas as fissuras devem ser separadas pela sua espessura.

## 9.2 - Avaliação Econômica

A implantação de um sistema de irrigação pode levar à construções de barragens, poços de captação, canais de irrigação e drenagem, tubulações, terraceamentos, fontes de energia, casas para os trabalhadores, estradas indústrias de conservação e transformação de produtos obtidos, além de outras eventuais. Assim, a análise econômica de um sistema de irrigação usualmente baseada na relação benefício/custo depende de como se interrelacionam os custos e benefícios desses projetos, lembrando-se que algumas vezes as razões político-sociais definem benefícios muitas vezes intangíveis.

Para um primeiro estudo dos canais de irrigação basta computar os benefícios que se apresentem mais claramente. Se a relação benefício/custo não mostrar nítida vantagem da aplicação do capital, deve-se considerar outros benefícios de mais difícil determinação para serem adicionados à análise.

Deve-se calcular os custos do investimento e de manutenção e estimar uma vida útil compatível com o experiência acumulada. Os custos devem ser levantados de acordo com o método construtivo compatível com a disponibilidade do material e não de obra.

Na construção de revestimento a água economizada é o maior benefício, por isso deve-se lembrar que alguns reatores durante a sua vida útil passam por um processo de degradação, aumentando as perdas d'água com o tempo, enquanto em outros tipos de revestimentos e nos canais não revestidos, as perdas d'água tendem a diminuir com o tempo devido à comatação dos vazios do solo. O valor d'água em termos econômicos é definido pela inversão de capital necessário para obtê-la, isto é depende do custo da infra-estrutura adequada de captação, armazenamento e recalque d'água.

Os custos e benefícios devem ser preferencialmente expressos, em unidades econômicas mais estáveis como o ORTUNN e UPC. Os valores da relação devem ser todos transportados a data inicial para se compensar a taxa de depreciação ( $r$ ). Assim segundo Montanes (1981) a relação Benefício/custo ( $\bar{B}/\bar{C}$ ) fica:

$$\bar{B}/\bar{C} = \frac{\sum_{N=0}^{n'} \frac{BN}{(1+r)^N}}{\sum_{N=0}^{n'} \frac{CN}{(1+r)^N}}$$

onde:  $B_N$  e  $C_N$  são respectivamente os Benefícios e os Custos obtidos no ano  $N$  e  $n'$  é o número de anos de vida útil do revestimento.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho de dissertação constitui basicamente em revisar o estudo da arte dos revestimentos de canais e propor os específicos para revestimento de canais a base de solo estabilizado com cimento e/ou cal, na qual definiu-se as etapas e metodologia de ensaio para execução da pesquisa, "revestimento de canais para pequenos sistemas de irrigação" desenvolvida na UFPb.

Ac termino do trabalho pode-se concluir que:

A revisão

- . forneceu parametros para análise dos ensaios de avaliação do revestimento.
- . expôs os problemas relativos a projeto de canais revestidos.
- . descreveu a cerca de varias alternativas para revestir canais de irrigação.

O estudo proposto

- . prevê um mapeamento preliminar com base em bibliografia seleccionada.
- . prevê um mapeamento geotecnico confeccionada a partir de

dados de campo, interpretação de imagens, e levantamento bibliográfico.

- . prevê seleção de solos para ensaios de estabilização com base no mapeamento geotécnico.
- . estabelece metodologia para coletar, caracterizar e classificar solos.
- . estabelece, metodologia para avaliar revestimento de canais construídos com solo estabilizado com cimento e/ou cal.
- . estabelece metodologia de ensaios com corpos de prova em tamanho reduzido, visando conhecer-se as características de compactabilidade, susceptibilidade a água, sucção capilar, permeabilidade, resistência a compressão simples, variação dimensional e durabilidade.

#### A metodologia de caracterização do solo

- . prevê ensaios físicos, químicos, mecânicos e mineralógicos.
- . prevê a classificação do solo pela metodologia da HRB, unificada de casa grande e proposta por Nogami (1980)

#### A metodologia para solo-estabilizado com cimento e/ou cal

- . avalia a evolução da resistência com o tempo e a influência do tempo de cura na estabilização.
- . avalia a durabilidade pela influência dos ciclos de molha

gem e secagem nas medidas de resistência a compressão simples e variação dimensional.

A metodologia de avaliação do revestimento

- . prevê ensaios de erodibilidade e permeabilidade realizada em trechos simulado de canais.
- . prevê avaliação econômica pela análise custo/benefício.

Com base no exposto sugere-se:

- . Equipar o laboratório para realizar todos os ensaios propostos.
- . Treinar laboratorista para execução dos ensaios.
- . Escolher uma micro-região homogênea do estado da Paraíba para realizar os estudos propostos.
- . Estudar metodologia construtivas para canais a base de solo estabilizado com cimento e/ou cal.
- . Estudar a possibilidade de emprego do solo estabilizado com cimento e/ou cal em outras construções rurais.
- . Estabelecer metodologia para testes com outros tipos de revestimento.
- . Estabelecer metodologia para testes com outras estruturas hidráulicas usadas no meio rural.

Finalmente, espera-se que com a metodologia traçada possa-se contribuir com o desenvolvimento da tecnologia e com a construção de canais revestidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, Méllia Delabianca. *Estudo Econômico Simplificado de cinco diferentes tipos de revestimento de canais de irrigação*. Tese de M.Sc., UFPb, Campina Grande, 1976. 47p.
- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Relatório de viagem do Município de Morada Nova*. Fortaleza, jan. 1972, 8p.
- \_\_\_\_\_. *Dosagem das misturas de solo-cimento*. Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio. Estudo Técnico 35. São Paulo, 1980, 31p.
- \_\_\_\_\_. *Dosagem de solo melhorado*. Com cimento por modificações físicas, químicas e mecânicas do solo original. Estudo Técnico 53. Por PITTA, Marcio Rocha & Nascimento Auriñilce A. Port. São Paulo, jun. 1983. 62p.
- \_\_\_\_\_. *Solo-cimento para revestimento de Barragens de Terra, Diques e Reservatórios*. 2<sup>a</sup> ed. Estudo Técnico 34. Por PITTA. Marcio Rocha, São Paulo, set. 1983. 18p.
- AITEC - ASSOCIAZIONE DELL'INDUSTRIA ITALIANA DEL CEMENTO. *La Stabilizzazione delle terre con calce*. trad "Lime Stabilization Construction Manual". Roma, 1974. 54p.
- \_\_\_\_\_. *Stabilizzazione di terre con cemento calcestruzzo magro o misto cementato sulle strade europee*. Trad "Beton Verlag GmbH". Cembureau - Associazione Europea del cemento. Roma. Apr. 1973. 159p.

- mpianti di irrigazione - costruire in cemento. Roma. 1979. 8p.
- \_\_\_\_\_. Difesa delle rive-19 - Construire in cemento. Roma. 1980. 8p.
- BEZERRA, Raimundo Leidimar. A durabilidade de Solos Lateríticos estabilizados com cimento e aditivos. Tese M.Sc., UFPb - Campina Grande, 1976. 98p.
- BOWER, Herman. Theory of seepage from open channels. *Advances in hidrociencia*. Phoenix, 1969. p:121, 172.
- BUENO, Benedito de Souza et alii. Critério de dimensionamento de mistura solo-cal, para fins rodoviários, no Brasil: Crítica e sugestões. 17<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPV. Brasília, jul. 1982. p: VII 126, VII 135.
- BYRNE, W. S.. Canal lined with stabilized earth. *Engineering news-Record*. Vol. 412, 21 mar. 1946, p:70-72.
- CARVALHO, João Batista Queiroz & CABRERA, J. G. Um método simples para avaliar a reatividade à cal dos solos vermelhos tropicais. VI Congresso Panamericano de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações. Perú. Dez. 1979. 17p.
- CASTRO, Elba & LUIZ Antonio Serafim. O solocal na pavimentação de estradas e aeródromos. *Geotecnia*, 10. Lisboa 1972. p:29-59.
- CDRM/PB - Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Mapa geológico do estado de Paraíba Texto Explicativo - Paraíba, 1982. 133p.

- W, Ven te. *Open-channel hydraulics*. 1<sup>a</sup> ed. Harmer E. Davis, Consulting Editor. Mc-graw-Hill Civil Engineering series. New York, 1959, 680p.
- CROFT, J. B. The Influence of soil mineralogical composition on cement stabilization *geotechnique* - 17. 1967, p: 119-135.
- DAKER, Alberto. *Hidráulica aplicada à agricultura*. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. Livraria Freitas Bastos S.A. 1976. 19 vol., 302p.
- DAVIS, Calvim Victor & SORENSEN, Keuneth E. *Handbook of Applied hydraulics*. 3<sup>a</sup> ed. New York. EUA. Mc graw-Hill Book Company. 1970. Capítulo 7. 34p.
- DIAMOND, Sidney & KINTER, E. B. Mechanisms of soil-lime stabilization, an interpretive review. *Public Roads*. Vol. 33, No 12, 1966.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Estabilização de um solo da Amazônia - solos orgânicos*. Por Engº Salomão Pinto, Rio de Janeiro - 1974. 44p.
- FAO - Food and Agriculture Organization of United Nations. *Revestimento de canais de Riego*. Por D. B. Kraatz. Colecion FAO nº 1. 1977.
- HARR, Milton. Seepage from canals and Ditches. in *groundwater and seepage*. cap. 9. 1962 p:231-248.
- HENDERSON, F. H. *Open chanel Flow*. 5<sup>a</sup> ed. Toronto - EUA. Macmillan Company. Macmillan series in civil engineering. 1970. 522p.

- CID - Internacional commission on irrigation and drainage .  
*Design Practices of irrigation canals in the world.* Edited  
 by K. K. Franji. New Dalhi. 1972. 276p.
- ICAR-INDIAN AGRICULTURAL RESEARCH INSTITUTE. Division of  
 agricultural engineering., *Handbook of farme irrigation  
 structures.* New Delhi. 1970. 82p.
- ICPA - INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO. *Revestimen  
 to de pequenos Canales.* Por Mário E. Aubert. Buenos Aires.  
 1971. 31p.
- \_\_\_\_\_. *Grandes Canales - projeto y construtrucion de su re  
 vestimento com hormigou-aplicaciones del suelo-cemento y  
 de la prefabrication.* Por Raul A. Colombo. Buenos Aires.  
 1971. 40p.
- \_\_\_\_\_. *Revestimento de Canales para riego.* Buenos Aires.  
 1972. 31p.
- INTERAMINENSE, ERMANO A. "*Impermeabilização de canais de ter  
 ra com substâncias químicas, para fins de irrigação*". Te-  
 se de Mestrado - U.F.V., Viçosa-MG. 1975.
- ISRAELSEN. Orson W. & HANSEN, Vanghn E. *Irrigation princi  
 ples and Practices.* 3<sup>a</sup> ed. New York. John Wiley and Sous,  
 Inc, 1962. 447p.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN. R. V.. *Mecanica de Suelos.* Mexico .  
 Limusa. 1976. 582p.
- LANE, Emory W. *Design of stable channels.* American society  
 of civil engineers, transactions, vol 120. paper 2776:  
 1229. 1955.

- LAURITZEN, C. W & ISRAELSEN, O. W. *Earth lining for irrigation canals and reservoirs*. Soil Science Society of America, Proceeding 1948, vol. 13.
- LELIAVSKT, Serge *Irrigation engineering: canals and barrages*. Chapiman and Hall. 1<sup>a</sup> ed. London. Design textbooks in civil engineering: Volume I. 1965. 297p.
- LENCASTRE, Armando. *Manual de hidraulica geral*. Coordenação Carlos Eduardo de Almeida. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo, Editora Edgard Bleicher Ltda. 411p.
- LIMA, Ricardo Correia. *Granulometria de solos lateríticos, metodologia, efeitos das energias térmica e mecânica e relação com a composição química e mineralógica*. Tese M.Sc., UFPb, Campina Grande, 1983. 110p.
- LINSLEY, Ray K. A FANZINI, Joseph B.. *Engenharia de recursos hídricos*. Water-Resources Engineering. trad. Luiz Américo Pastorino. 1<sup>a</sup> Ed. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo. 1978. 798p.
- MILLAR, Agustin A. & DOERS, Maarten. *Uso de bentonita no controle das perdas por filtração em canais de irrigação*. III Seminário Nacional de Irrigação e Drenagem. Fortaleza . 1975. 6p.
- MOLINA, H. A. V. & ORELLANA. *Reducción de infiltraciones en suelos permeables por defloculación química y adiciones de arcillas expandibles*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Montessey y la Scuola Superior de Agriculture Antonio Nerro de la Universidad de Conshuila, México. 1974. 14p.

- MONTAÑES, José Lira. *Regadios*. Universidade de Santander, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y puertos. Santander, Espanha. 1981. 216p.
- NEVES, Eurico Trindade. *Curso de hidráulica*. 6<sup>a</sup> ed. Porto Alegre, Editora globosa. 1979. 577p.
- NEVILLE, A. M. *Tecnología del concreto*. Properties of concrete trad. Victor m. Pavon. 1<sup>a</sup> ed. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 1977. 383p.
- NOGAMI, JS & VILLIBOR, D. F. *Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitações do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática*. 15<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Belo Horizonte, 1980. 38p.
- \_\_\_\_\_. *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro, 1981. P: 30-41.
- \_\_\_\_\_. *Novo Critério para escolha de solos arenosos finos para base de pavimentos*. 17<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPV. Brasília, jul. 1982. p: VII 105, VIII 127.
- \_\_\_\_\_. *Algumas considerações entre uma nova classificação de solos e as tradicionais, principalmente para finalidades rodoviárias*. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS. Olinda/Recife, set. 1982. p:160-173.
- \_\_\_\_\_. *Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação*. 18<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPV. Porto Alegre, set. 1983. p:463-484.

- WEIRA, Francisco Queiroga de. *Uso de argila Montmoriloní-  
licas para impermeabilização de canais de irrigação*. Tese  
M.Sc., UFPb, Campina Grande, 1978. 58p.
- WEIRA, Antonio Manoel Santos & CORREA FILHO, Diogo. En-  
saio de permeabilidade em solos. Associação Brasileira  
de Geologia de Engenharia - ABGE, Boletim nº 4. São Paulo.  
jan. 1981. 36p.
- PERSONS, A. W. - *Moisture condition test of assessing the  
engineering behaviour of earthwork material*. Institution  
of civil Engineers, London, 1978. p:169-175.
- PINTO, Carlos de Souza. *Evolução das pesquisas de laborató-  
rio sobre solo-cimento*. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo. ABCP. 1980. 22p.
- SALOMÃO, Fernando Ximenes T. et alii. *Aproveitamento da  
água e do solo da região semi-árida do Sergipe*. IPT, Pes-  
quisa e desenvolvimento nº 15. São Paulo, agosto 1983. 80p.
- SANTOS, Maria José dos et alii. *Relatório de Pesquisa CNPq-  
UFPb - Levantamento e acompanhamento de áreas salinizadas  
do estado da Paraíba através de dados de sensoriamento re-  
moto*. Campina Grande, set. 1983.
- SAA/PB - Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Esta-  
do da Paraíba. Comissão Estadual de Planejamento Agrícola  
- CEPA. *Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba*. dez.  
1978.
- SHARMA, P. C. et alii. *Ferrocement application for rural de-  
velopment in Asian Pacific countries*. in: International  
Symposium of Ferrocement. Bergamo. 1981. p: 3/117-3/126.

- N, C. K. & AKKY, M. R. Erodibility and durability of cement stabilized loam soil. *Transportation Research Board USA* 1974. p: 54-58.
- \_\_\_\_\_. Us of Cement stabilized soil in canal lining. In: the Southeast Asian Conference on soil engineering. Bangkok - Thailand, July 1977. p: 401-411.
- SHERWOOD, P. T. The properties of cement stabilized materials Crowthorne. Road research laboratory. RRL Report LR 205. 1968. 54p.
- SILVESTRE, Paschoal. *Hidráulica geral*. 1<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. Livro Técnico e Científico editora S.A. 1979. 316p.
- SORIA, M. H. A; FABRI, G. T. *O ensaio mini-MCV - Um ensaio de MCV. Moisture Condition Value, com corpos de prova de dimensões reduzidas*, 15<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, 1980. 31p.
- SOUZA, Newton Moreira & CARVALHO, Hugo O. *Revestimento de canais de irrigação - características físico-mecânicas do solo-cimento*. In: Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - SBEA. Campinas. julho 1980. p: 16-29.
- TESORIERE, giuseppe et alii - *Studio sperimentale sulle miscele terra calce - cemento*. Estratto de L'Industria Italiana del cemento. Roma. 1981. 18p.
- THOMPSON, Marshall R. Lime Reativity of illinois soil. *Journal of soil Mechanics and Foudation Division, ASCE*, vol. 96. SM5. Sept. 1966. p: 67-92.

- SON, M. R. & EADES, J. L. Evaluation of quick test lime stabilization. *Journal of the soil mechanics and foundation Division, ASCE, vol 96. n° SM 2, march 1970 . p: 795-800.*
- TRB - Transportation Research Board Committee on Lime and lime-Fly Ash Stabilization. State of the art: Lime stabilization Reaction, properties, design, construction. *Transportation Research circular n° 180. sep. 1976. Washington 30p.*
- USDI - United States Department of Interior. Bureau of Reclamation. the use of bentonite in decreasing the seepage loss in canal. *Earth laboratory Report n° Em-504. Denver Colorado. july. 1957, 21p.*
- \_\_\_\_\_. Evaluation of plastic films as canal lining materials. Interim report. *laboratory Report n° B-25. Denver Colorado. july 1957. 21p.*
- \_\_\_\_\_. Physical characteristic of the bentonite soil interface - sediment sealing bentonite/soils inter-face-sediment sealing project. Lower-cost canal lining program. *Petrographic Laboratory Report n° Pet-122. Denver Colorado. sep. 1958. 18p.*
- \_\_\_\_\_. A review of the use of chemical sealants for reduction of canal seepage losses. Lower-cost canal lining program. *Analytical Laboratory Report n° CH-102. Denver Colorado. Feb. 1960.*

- \_\_\_\_\_. *Linings for irrigation Canals*. 1<sup>a</sup> ed. Washington .  
Floyd E. Donning Commissiones. 1963. 149p.
- \_\_\_\_\_. *Earth Manual*. 2<sup>a</sup> ed. Washington. A Water Resources  
Technical Publication. 1974. 810p.
- VILLIBOR, Douglas Fadul. *Pavimentos Econômicos. Novas Consi-  
derações*. Tese Doutorado. USP, São Paulo, 1981, 233p.
- WEST, Graham. A laboratory investigation into the effect of  
elapsed time after mixing on the compaction and strength  
of soil-cement. *Geotechnique*. 1979 p:22-28.
- WINTERKORN, Hans F. & FANG. Hasai - Yang. *Foundation Enginee-  
ring Handbook*. New York. USA. Litton Educational Publi-  
shing, Inc. Van Nostrand Rennhold Company. 1975. Capítulo  
8 - Soil Stabilization. p: 312-336.
- ZIMMERMAN, Joset D. *El riego*. 4<sup>a</sup> ed. México. Compañia Edito-  
rial Continental S/A. 1976. 604p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Serencial de Pós-Graduação  
Rua Aprigo Veloso, 882 Tel (083) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

## A N E X O 1

### PROJETO DOS EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO

#### Erodibilidade

Para o ensaio de erodibilidade a ser realizado no laboratório de Engenharia de Irrigação, construiu-se a estrutura que se vê na fig. 24. Fazem parte deste aparato: uma câmara de amortecimento e entrada d'água; uma calha de 9,5m para instalação do revestimento a ser adotado; câmara de sedimentação; um sistema de canal para retorno da água a uma caixa de onde é bombeada para a câmara de amortecimento. Alguns aspectos desta estrutura podem ser vistas na fig. 25.

As condições de ensaio foram definidas em função das características desta estrutura, assim o canal deveria ter uma vazão máxima da ordem de 60 l/s e uma largura máxima da boca do canal, da ordem de 60 cm. A secção semi-hexagonal foi escolhida por ser de alta eficiência hidráulica. Adotou-se a velocidade de 1 m/s por ser julgada suficiente para evitar problemas de deposição de sedimentos, dificultar o nascimento de ervas daninhas e ser um valor usual na prática, se fossem adotados valores maiores para acelerar o desgaste, a secção do canal resultaria pequena demais, difi

As fotos da fig. 28 mostram a construção das calhas para o ensaio, primeiramente na fase de colocação do filme plástico, depois já pronto para receber o canal para ensaio do revestimento.

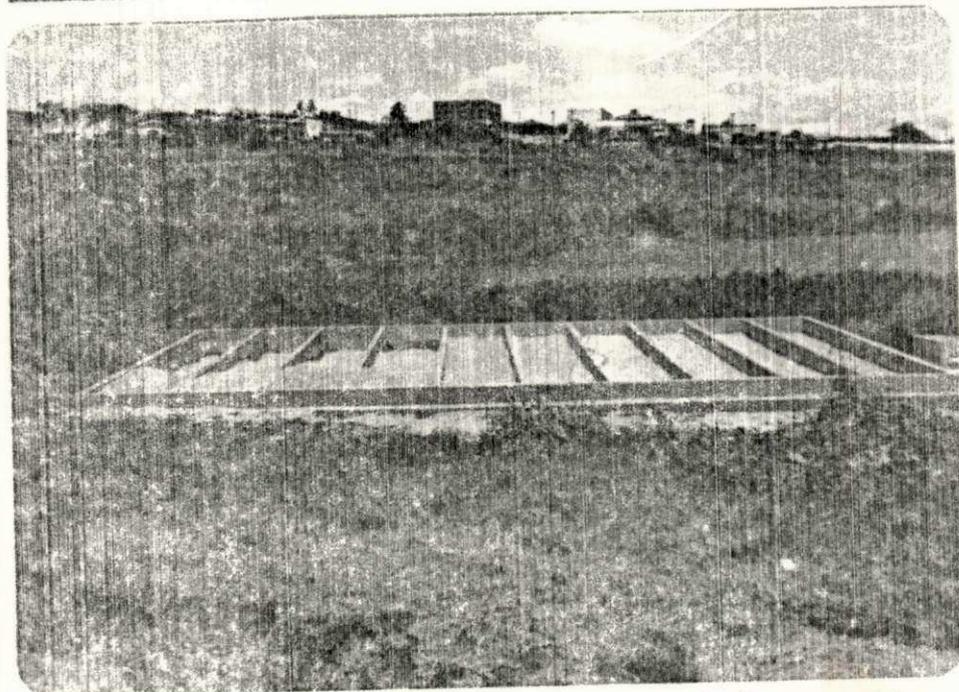
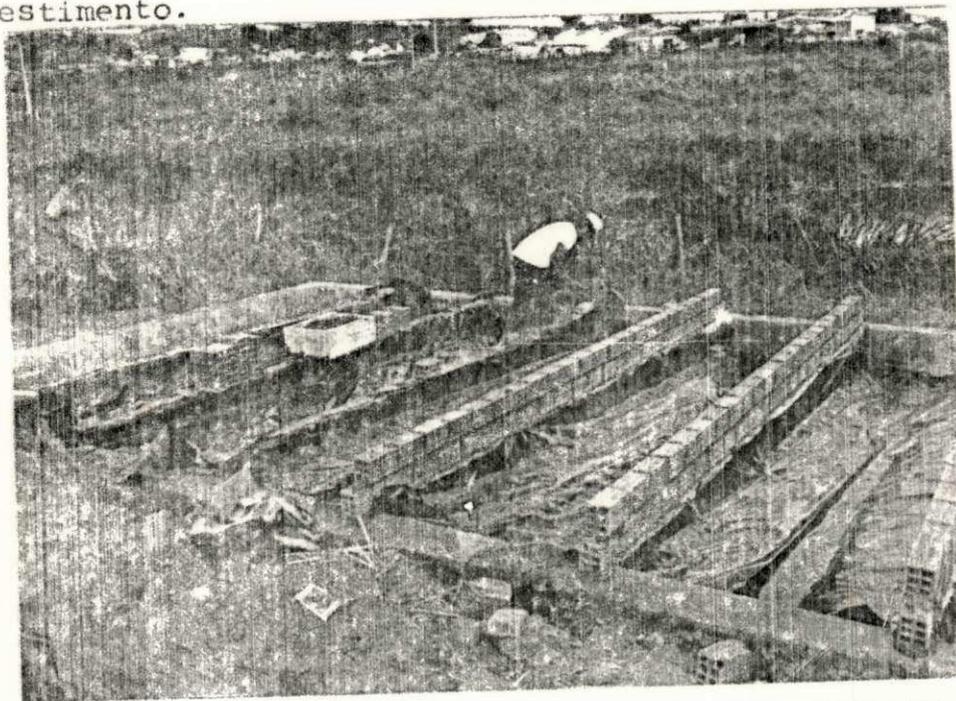


Fig. 28 - Estrutura para ensaio de permeabilidade em canais.

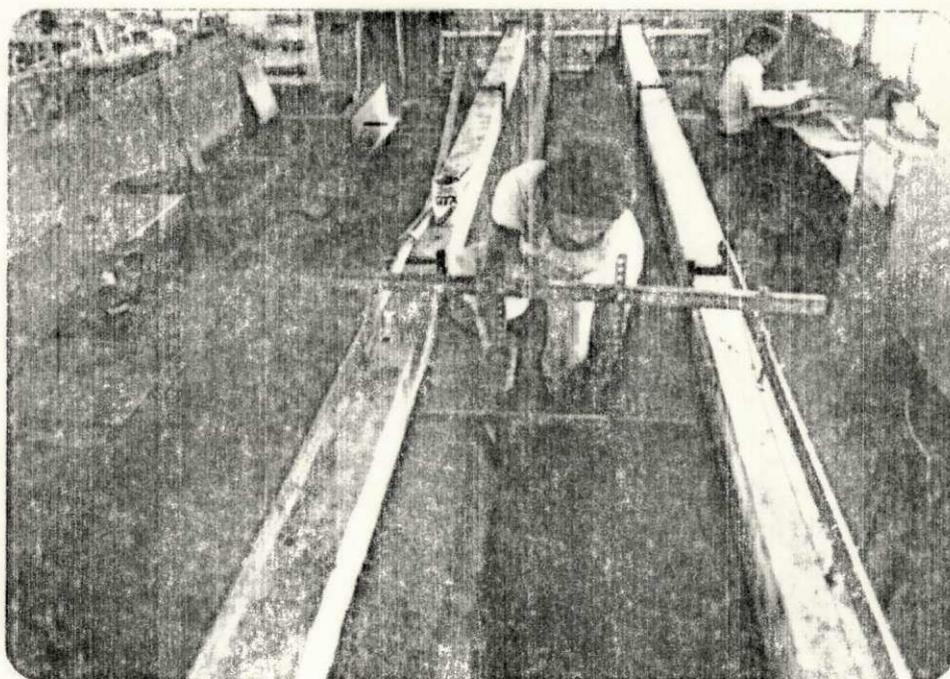
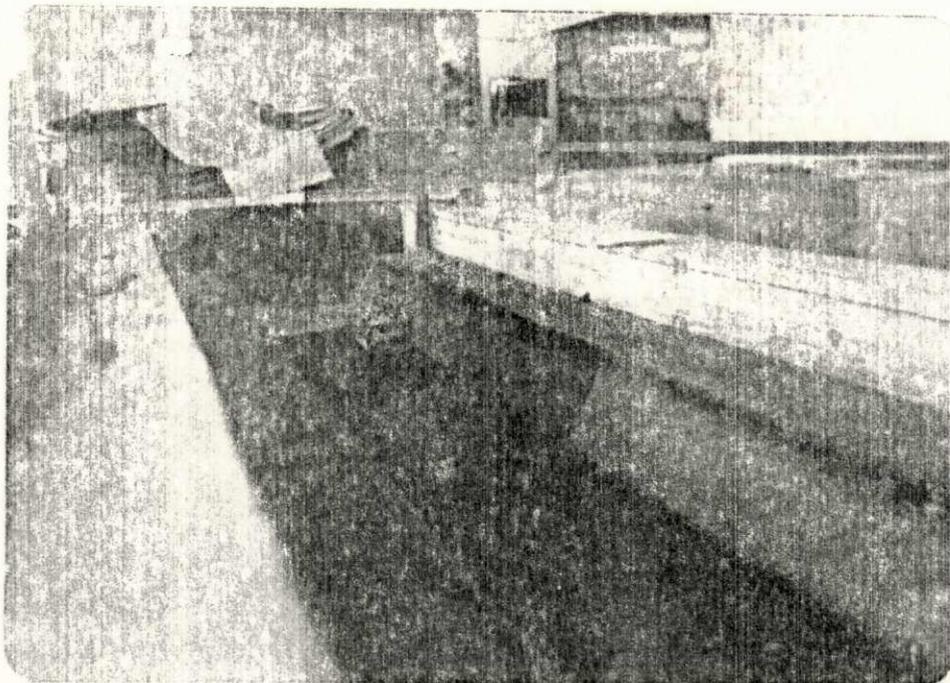


Fig. 25 - Aspectos da estrutura para teste de erodibilidade.

cultando a sua confecção.

Assim, procurou-se uma secção com medidas inteiras e que fornecesse uma área de, no máximo, 600 cm<sup>2</sup>. Com base nestas considerações a secção do canal para teste de revestimento ficou com as características da fig. 26.

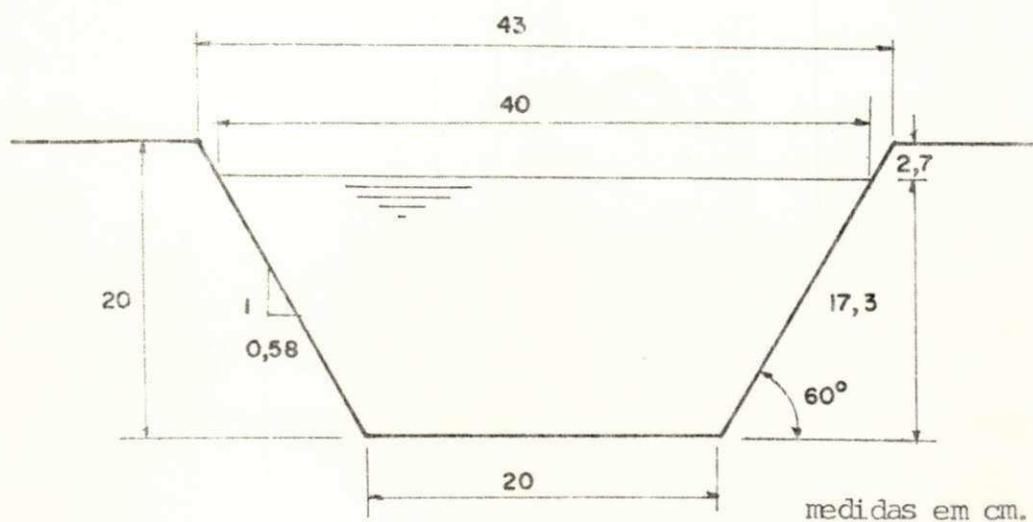


Fig. 26 - Características geométricas da secção do canal para ensaio de revestimento.

Com  $A = 520 \text{ cm}^2$  - Área molhada

$P = 60 \text{ cm}$  - Perímetro molhado

$R = 8,7 \text{ cm}$  - Raio hidráulico

$n = 0,016$  - Coeficiente de rugosidade

$V = 1,0 \text{ m/s}$  - Velocidade média do fluxo

Usando a fórmula de Manning calcula-se a declividade longitudinal  $S$ .

$$V = \frac{R^{1/2}}{n} \cdot S^{1/2}$$

$$S = \frac{n \cdot v^2}{R^{2/3}} = \frac{0,016 \times 1^2}{(0,087)^{1/2}} = 0,0066$$

$$S = 6,66\%$$

Nestas condições, a força trativa no revestimento se  
rá:

$$\tau_0 = f \cdot \gamma \cdot R \cdot S$$

$$\tau_0 = f \cdot 1.8,7 \times 0,0066 = f \cdot 0,057 \text{ g/cm}$$

da fig. 02 tira-se os valores de f assim:

$$\text{para as laterais } \tau_0 = 0,0342 \text{ g/cm}$$

$$\text{para o fundo } \tau_0 = 0,0399 \text{ g/cm}$$

### Permeabilidade

Para o ensaio de permeabilidade, adotou-se a mesma sec  
ção do canal. Foram construídas 10 calhas impermeabilizadas  
contendo uma única saída para água, como se pode observar  
na fig. 25.

A calha é cheia com areia, bastante permeável em rela  
ção ao material do revestimento, de forma que se pode ado  
tar as hipóteses de cálculo da condição C descrita na revi  
são na secção de parâmetros de permeabilidade.