

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS



ESTABILIZAÇÃO DE  
SOLOS COM CIMENTO

SÍNTESE DE NOTAS DE AULA

Araken Silveira

PUBLICAÇÃO Nº 128

SÃO CARLOS

ESCOLA DE ENGENHARIA

1966

# ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTO

Síntese de Notas de Aula.

## I - CONCEITUAÇÃO GERAL

### 1 - INTRODUÇÃO

Na estabilização de solos com cimento o que se procura é fazer o denominado "solo-cimento", definido como uma mistura íntima de solo, cimento e água em proporções adequadas, previamente fixadas por ensaios de laboratório, mistura esta que deverá ser satisfatoriamente compactada.

Este tipo de estabilização foi iniciado nos Estados Unidos, por volta de 1935.

O teor de cimento geralmente utilizado varia de 5 a 15% (em peso).

### 2 - APLICAÇÕES

Em Construção de Estradas o maior interesse do solo-cimento tem sido para a construção de bases e sub-bases (para estradas, aeroportos e ruas) e como extensão, na construção de acostamentos e revestimento de valetas.

O solo-cimento, entretanto, pode ser utilizado para outras aplicações, tais como: fabricação de tijolos, melhoria de fundações, proteção de taludes, etc.

---

### 3 - FATÔRES QUE INFLUEM NAS PROPRIEDADES DO SOLO-CIMENTO

#### 3.1 - Fatôres principais:

- a) Tipo de Solo
- b) Teor de Cimento
- c) Teor de Umidade
- d) Compactação
- e) Mistura

##### 3.1.1. - Tipo de Solo

O tipo de solo a ser estabilizado é o fator mais importante a ser considerado.

Teòricamente, qualquer solo poderia ser estabilizado com cimento. Do ponto de vista prático, entretanto, imposições sobretudo de ordem econômica, limitam a faixa de solos estabilizáveis. O teor de cimento necessário é o principal fator condicionante. A partir de um certo teor de cimento, o preço do solo-cimento não mais compensa a sua fabricação. De um modo geral, como regra básica, o teor de cimento aumenta com o teor de argila ou com o grau de argilosidade do solo. Daí decorrerem as especificações para os assim chamados "solos estabilizáveis economicamente", isto é, os solos que normalmente comportam um tratamento econômico com cimento.

O Highway Research Board matém como especificação geral o seguinte: (também adotado pelo D.E.R.- S.P. ver I61 - 56 T).

Diâmetro Máximo dos Grãos - 3" (7,5 cm)

Porcentagem que passa na peneira nº 4 (4,76 mm) >50%

Porcentagem que passa na peneira nº40 (0,42mm) > 15%  
Porcentagem que passa na peneira nº200 (0,074mm) < 50%  
LL < 40%  
LP < 18%

A Associação Brasileira de Cimento Portland - (ABCP) divide os solos em função de sua granulometria, em três tipos:

a) Solos arenosos e pedregulhosos com cêrca de 10 a 35% da fração silte+ argila. Considera-os os mais favoráveis à estabilização com cimento.

b) Solos arenosos deficientes em finos. Consideraos tão bons quanto os anteriores, apenas havendo mais difilculdades na questão da compactação e acabamento. Apresentam sobretudo dificuldades no uso de equipamentos pesados sôbre pneus, dificuldades estas que podem ser contornadas por: correção de granulometria (adição de finos); uso de equipamentos sôbre esteiras e pré-umedecimento.

c) Solos siltosos e argilosos. Êstes solos apresentam dificuldades maiores principalmente na pulverização.

Outro fator relacionado ao tipo do solo é o teor de matéria orgânica, que tende a reduzir a resistência do solo-cimento.

Tem-se limitado êste teor a 2% no máximo, apesar de terem sido estabilizados solos com 3 a 5% de matéria orgânica e de solos com apenas 0,5% terem apresentado sérios problemas. Costuma-se corrigir tais solos pela adição de outro solo, cloreto de cálcio ou mesmo cal.

Também certos tipos de sais, principalmente os sulfatos, são prejudiciais, pelo fato de provocarem a re-cristalização nos poros da mistura, produzindo a desagregação do solo-cimento. Cumpre observar que também a água utilizada deve ser isenta destes sais.

### 3.1.2 - Teor de Cimento

Além do solo, tem influência direta na qualidade do solo-cimento, o próprio cimento naturalmente.

O cimento deverá obedecer às exigências das Normas Brasileiras (EB - 1).

Já vimos na introdução que o teor de cimento usual varia de 5 a 15%, apesar de já se ter utilizado com sucesso misturas com 4% e em outros casos, devido a circunstâncias especiais, terem tido econômicos tratamentos com até 20 a 25% de cimento.

A determinação do teor mais conveniente é feita através de ensaios de durabilidade ou de resistência à compressão simples de amostras moldadas em laboratório (ver Dosagem, ítem III).

Em laboratório tem sido mais fácil referir-se a um teor em peso de cimento em relação ao peso de solo seco; entretanto, para maior facilidade de construção às vezes o teor de cimento é dado em volume ou mesmo em kg de cimento por  $m^2$  de solo-cimento. De qualquer maneira a redução de um teor para outro não apresenta nenhuma dificuldade, como será visto oportunamente. Para efeito de cálculo costuma-se admitir que  $1 m^3$  de cimento solto pese 1,430 kg ou seja 1 saco de 50 kg, solto, equivale a 35 litros.

Para teores de cimento diferentes, a velocidade de endurecimento inicial é a mesma, a diferença aumentando com o tempo.

### 3.1.3 - Teor de Umidade

O efeito da umidade é apenas sobre a compactação da mistura. De maneira perfeitamente análoga à compactação de solos pode-se definir uma umidade ótima que é função, basicamente, do tipo de solo e do método de compactação.

Como a quantidade de água necessária à compactação é mais do que suficiente para efetuar a pega do cimento, a sua conceituação no caso se restringe apenas às características de compactação. não havendo maior interesse em relações água/cimento do tipo utilizado para concretos.

Apesar de se poder obter resistências maiores com solo-cimento compactado logo abaixo da umidade ótima, há uma tendência de se obter melhores valores com relação a durabilidade com umidades ligeiramente acima da ótima. Como também para efeito de cura da mistura tem sido mais satisfatória a utilização de umidades acima da ótima, as indicações gerais recomendam trabalhar-se com umidades no teor ótimo ou pouco acima, embora não se contenha até o momento, com resultados categóricos a este respeito.

O principal cuidado a ser observado é o de uma boa distribuição da água na mistura, a fim de se obter uma reação com o cimento a mais homogênea possível.

### 3.1.4 - Compactação

A compactação representa, em relação ao solo-ci

mento, o mesmo papel que para um solo em geral e sua importância já foi suficientemente enfatizada, tanto nos outros métodos de estabilização, como por ocasião do estudo da compactação de aterros. As curvas de peso específico aparente sêco em função da umidade, são em tudo análogas às já estudadas para solos. (v. Notas de Aula sobre Compactação).

A importância da compactação do solo-cimento torna-se bem clara, pelas conclusões obtidas por Staton, Hveem e Beatty, de que uma diminuição de 5% no peso específico aparente sêco da mistura, corresponde a um decréscimo de ressitência correspondente a uma diminuição de 10 a 15% no teor de cimento.

### 3.1.5 - Mistura

A homogeneidade das características do solo-cimento em seu todo dependerá, em grande parte, de se assegurar uma boa mistura entre o solo e o cimento, bem como da água, posteriormente. É fácil entender que, quanto melhor a distribuição, tanto do cimento como da água, na massa de solo a ser estabilizado, tanto mais se evitará ou se atenuará a formação de bolsões mais fracos (quer por falta de cimento, quer por falta de pega).

Para se ter uma idéia da importância da mistura, basta mencionar que os resultados de campo raramente ultrapassam 85% dos resultados conseguidos em laboratório com os mesmos materiais e a mesma dosagem, apenas com a diferença de ser a mistura em laboratório bem mais eficiente que no campo.

Deve-se observar que está implícito, no conceito de mistura, a pulverização do solo.

### 3.2 - Outros Fatôres.

Na realização do solo-cimento resta ainda tecer mos algumas considerações sôbre a idade e a cura da mistura. Durante a cura da mistura o único cuidado a ser observado é evitar-se a evaporação superficial, ou melhor, manter-se as características da mistura obtida logo após a compactação (v. Métodos Construtivos). É comum, quando certos cuidados não são tomados, a formação de uma crosta que se destaca facilmente (escamação).

A resistência do solo-cimento, como no concreto, aumenta com a idade, sendo que aqui a velocidade de endurecimento depende também do tipo de solo.

## II - ENSAIOS

### 1 - INTRODUÇÃO:-

Com relação aos ensaios feitos com solo-cimento, temos que distinguir basicamente os ensaios que são feitos apenas com o solo e os que já envolvem a mistura. Os primeiros, grupados sob a denominação de ensaios preliminares, serão apenas citados, uma vez que já são suficientemente conhecidos da Mecânica dos Solos.

Quanto aos ensaios com a mistura serão seguidas aqui, em linhas gerais, principalmente as recomendações da A.B.C.P.

### 2 - ENSAIOS PRELIMINARES

a) Limites de Liquidês e Plasticidade



- b) Granulometria
- c) Absorção
- d) Densidade dos Grãos.

### 3 - COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação em si é perfeitamente análogo aos ensaios de compactação em solos. Tem-se, até o momento, feito uso mais intensivo apenas do ensaio de Proctor Normal e, apenas quanto ao preparo da amostra, a A.B.C.P. recomenda a distinção entre dois métodos a serem utilizados: o chamado método A, quando 100% do solo passa na peneira nº4 (4,8mm) e o método B, quando parte do solo fica retido na mesma peneira.

3.1 - Método A. Neste caso o processo é análogo ao já visto para solos; a única diferença é que o cimento deve ser adicionado ao solo, antes da mistura com a água e na proporção estabelecida pelos critérios de dosagem (geralmente em porcentagem peso de cimento sobre peso de solo seco) (v. item III).

3.2 - Método B. A modificação introduzida neste caso é a seguinte (v. Fig.II.1): o material maior que 76 mm, está fora dos critérios estabelecidos para a estabilização e é recusado. O material entre as peneiras de 19 mm e 76 mm não é utilizado no ensaio e é substituído por material  $M_2$  da Fig.II (entre 4,8 e 19 mm), de tal modo a resultar x % de  $M_2$  na mistura ( $M_1 + M_2$ ), sendo que o material  $M_2$  só é adicionado a mistura após imersão (saturação) e secagem superficial.

Feito isto, procede-se normalmente.

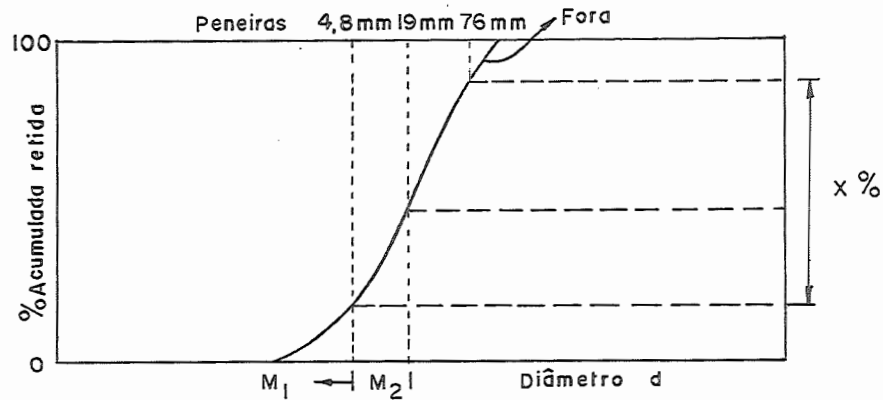


FIG. II. 1

#### 4 - DURABILIDADE MOLHAGEM E SECAGEM

##### 4.1 - Introdução

Os ensaios de durabilidade são os ensaios básicos do solo-cimento. São eles realmente, em última análise, que irão determinar a boa ou a má qualidade da estabilização procurada. Estes ensaios procuram medir principalmente a "perda de peso" e paralelamente as variações de umidade e de volume de corpos de prova submetidos a ciclos normalizados, de variações, que procuram reproduzir, em laboratório, as condições críticas de trabalho no campo. Existem dois tipos de ensaios de durabilidade: o de molhagem e secagem e o de congelamento e degelo ou congelamento e aquecimento. Este último, entretanto, devido às condições climáticas existentes no Brasil, não apresenta maior interesse. Assim sendo, só nos preocuparemos com o ensaio de molhagem e secagem e como ês-

te ensaio é na realidade o único ainda não detalhado anteriormente, iremos considerá-lo com algum detalhe.

#### 4.2 - Aparelhagem necessária

- Estufa para 71°C e para 105-110°C.
- Câmara de imersão à temperatura ambiente.
- Escôva de fios de arame padronizada de acôrdo com as seguintes especificações: fio chato nº 26, de 50 mm x 1,5 mm reunidos em 50 grupos de 10 fios cada, montados em 5 filas longitudinais e 10 transversais, num bloco de madeira dura de 185 mm x 60 mm.
- Balança para 5 kg  $\pm$  5 g.

#### 4.3 - Moldagem dos Corpos de Prova.

A moldagem dos corpos de prova é feita como se fôsse simplesmente a reprodução de um ponto especificado no ensaio de compactação (geralmente em tórno da umidade óti ma e do pêso específico aparente sêco máximo), seguindo-se os métodos A ou B, de acôrdo com a granulometria do solo - (v. ítem II.3).

A.A.B.C.P. recomenda uma precisão de moldagem de 1% em relação à umidade e de 0,03 g/cm<sup>3</sup> em relação ao pêso específico aparente sêco, devendo ainda os corpos de prova moldados, ser conservados em câmara úmida a 21°C.

#### 4.4 - Sequência do Ensaio

a) Os corpos de prova após 7 dias em câmara úmida devem ser colocados durante 5 horas na câmara de imersão (molhagem) e a seguir em estufa a 71°C, durante 42 horas (secagem).

b) Depois disso, os corpos de prova passam pela operação de escovação. A escovação é feita com a escôva já referida e deve ser procedida no sentido longitudinal em primeiro lugar e depois nas bases, sempre com a escôva no sentido longitudinal ou paralela às bases, respectivamente, e de modo a cobrir tôda a superfície externa do corpo de prova. A pressão da escôva sôbre o corpo de prova deve ser da ordem da correspondente a uma fôrça de 1,5 kg, o que é facilmente conseguido com o auxílio de uma balança.

c) Os ítems a) e b) acima, constituindo aproximadamente 48 horas, correspondem a um ciclo. O ensaio completo compõe-se de 12 ciclos.

d) Após os 12 ciclos os corpos de prova são colocados em estufa a 105 - 110°C, até constância de peso, obtendo-se o peso sêco após o ensaio,  $P'o_2$ .

e) Este peso sêco deve ser corrigido, uma vêz que o corpo de prova conserva uma parte da água que reagiu com o cimento, obtendo-se o peso sêco após o ensaio, corrigido,  $Po_2$ , dado por:

$$Po_2 = \frac{P'o_2}{B + 100} \times 100$$

onde B é a porcentagem de água retida no corpo de prova e é dado pela tabela seguinte:

S O L O		B
A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> .....		1,5
A <sub>2</sub> .....		2,5
A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> .....		3,0
A <sub>6</sub> , A <sub>7</sub> .....		3,5

f) A "perda de pêsos" é dada por

$$\text{Perda de pêsos} = \frac{P_{o1} - P_{o2}}{P_{o1}} \times 100 ,$$

onde  $P_{o1}$  é o pêsos sêco de moldagem e  $P_{o2}$  é o pêsos corrigido, após o ensaio.

## 5 - COMPRESSÃO SIMPLES

Este ensaio procura medir a resistênciã à compressão simples de corpos de prova moldados, e é análogo aos demais ensaios do gênero.

Os corpos de prova devem ser moldados de acôrdo com as Normas Brasileiras (MB - 2) e mantidos em câmara úmida até 4 horas antes do ensaio.

No dia do ensaio o corpo de prova é removido, e após os acertos das bases, feitos no dia anterior, é colocado em imersão durante 4 horas, após o que é resfriado, enxuto e rompido normalmente.



## III - DOSAGEM

O que se segue, neste capítulo, constitui básicamente, com alguma adaptação, numa transcrição das recomendações da A.B.C.P., para a dosagem do solo cimento. Em primeiro lugar temos que distinguir duas normas: a Norma Geral e a Norma Simplificada.

A Norma Geral, que seria a ideal e a teoricamente válida, infelizmente é muito complexa e sobretudo muito demorada. Baseado na observação, principalmente decorrente das experiências de autores ingleses, de que para a grande maioria dos solos, as características de resistência aos ensaios de durabilidade se refletem diretamente sobre a resistência à compressão simples, evoluiu-se no sentido do estabelecimento de uma norma mais simples, baseada neste último ensaio e que é o processo normalmente utilizado, ou pelo menos o primeiro a ser tentado. Só no caso da Norma Simplificada não apresentar resultados satisfatórios ou em casos especiais, é que se tem recorrido à Norma Geral.

III.1 - Norma Geral

1. Objetivo: Fixa os ensaios e estabelece os critérios para sua interpretação, com o fim de determinar o teor de cimento adequado à realização da estabilização de um solo com cimento.

2. Ensaio Preliminares:

- a) Limite de Líquidês e Plasticidade
- b) Análise Granulométrica

c) Absorção e Pêso Específico dos Grãos de Pedregulho.

### 3. Marcha Geral

#### 3.1 - Ensaio de Compactação

- a) Para a determinação do pêso específico aparente sêco máximo ( $\gamma_o$  máx) e da umidade ótima ( $h_{ot}$ ), da mistura
- b) Para tanto, temos que admitir um teor de cimento  $C_c$ , (utilizado no ensaio de compactação) e que é fixado ou em função da experiência anterior com solos análogos ou de acôrdo com a tabela I.

T A B E L A I

Tipo de Solo	Teor de cimento ( $C_c$ ) em pêso, indicado para o ensaio de compactação.
A - 1 - a	5
A - 1 - b	6
A - 2	7
A - 3	9
A - 4	10
A - 5	10
A - 6	12
A - 7	13

c) Procede-se ao ensaio normalmente, de acordo com II.3.

### 3.2 - Ensaio de Durabilidade, Moldagem e Secagem.

- a) Devem ser executados com 3 teores de cimento: o teor mais provável  $C_P$ , e  $C_P + 2\%$  e  $C_P - 2\%$
- b) O teor mais provável ( $C_P$ ) é indicado pela experiência ou dado pelas tabelas II e III, em função do tipo de solo e do % máx, obtido anteriormente.

T A B E L A II

Teor de cimento médio provável  $C_P$  para solos arenosos não orgânicos

Pedregulho grosso (%)	Silte mais argila(%)	Pêso esp. aparente sêco máx. (g/cm <sup>3</sup> )					
		1,68	1,76	1,84	1,92	2,00	2,08
		a	a	a	a	a	ou mais
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	8	8	7	7	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	8	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6



## T A B E L A III

Teor de cimento médio provável  $C_p$  para solos siltosos e argilosos

Índice de grupo do solo	Silte (%)	Pêso esp. aparente seco máx. (g/cm <sup>3</sup> )						
		1,44 a 1,52	1,52 a 1,60	1,60 a 1,68	1,68 a 1,76	1,76 a 1,84	1,84 a 1,92	1,92 a mais
0-3	0-19	12	11	10	8	8	7	7
	20-39	12	11	10	9	8	8	7
	40-59	13	12	11	9	9	8	8
	60 ou +	15	-	-	-	-	-	-
4-7	0-19	13	12	11	9	8	7	7
	20-39	13	12	11	10	9	8	8
	40-59	14	13	12	10	10	9	8
	60 ou +	15	14	12	11	10	9	9
8-11	0-19	14	13	11	10	9	8	8
	20-39	15	14	11	10	9	9	9
	40-59	16	14	12	11	10	10	9
	60 ou +	17	15	13	11	10	10	10
12-15	0-19	15	14	13	12	11	9	9
	20-39	16	15	13	12	11	10	10
	40-59	17	16	14	12	12	11	10
	60 ou +	18	16	14	13	12	11	11
16-20	0-19	17	16	14	13	12	11	10
	20-39	18	17	15	14	13	11	11
	40-59	19	18	15	14	14	12	12
	60 ou +	20	19	16	15	14	13	12

- c) Deverá ser moldado um corpo de prova para cada teor de cimento já fixado e de acôrdo com II.4.3.
- d) Determina-se a "Perda de Pêso" (II.4.4.)

### 3.3 - Ensaio de Compressão Simples.

- a) Serão executados com 2 teores de cimento: ou os intermediários ( $C_P + 1\%$  e  $C_P - 1\%$ ) ou com dois quaisquer dos utilizados anteriormente em III.1 - 3.2.a).
- b) Deverão ser rompidos corpos de prova com várias idades.
- c) Deverão ser moldados pelo menos dois corpos de prova para cada teor de cimento e para cada idade de ruptura.
- d) Determina-se a resistência à compressão simples de acôrdo com II.5 e para cada teor de cimento e para cada idade, adota-se como valor da resistência ( $R_c$ ) a média respectiva.

### 4. Interpretação dos Resultados:

4.1 - O teor de cimento adotado  $C_A$ , será o mínimo que satisfizer às seguintes condições:

- a) A "Perda de Pêso" deverá ser superior a:
  - 14 para solos A1; A2-4; A2-5; e A3
  - 10 para solos A2-6; A2-7; A4 e A5
  - 7 para solos A6 e A7

- b) A Resistência à Compressão Simples ( $R_c$ ) deverá aumentar com a idade e com o teor de cimento

#### 4.2 - Observações:

- a) Admite-se interpolação  
 b) Conversão de teor em peso acima obtido, para teor em volume:

$$C_v = \frac{100 C_p}{100 + C_p} \cdot \frac{\gamma_o \text{ máx}}{\gamma_c}$$

onde:

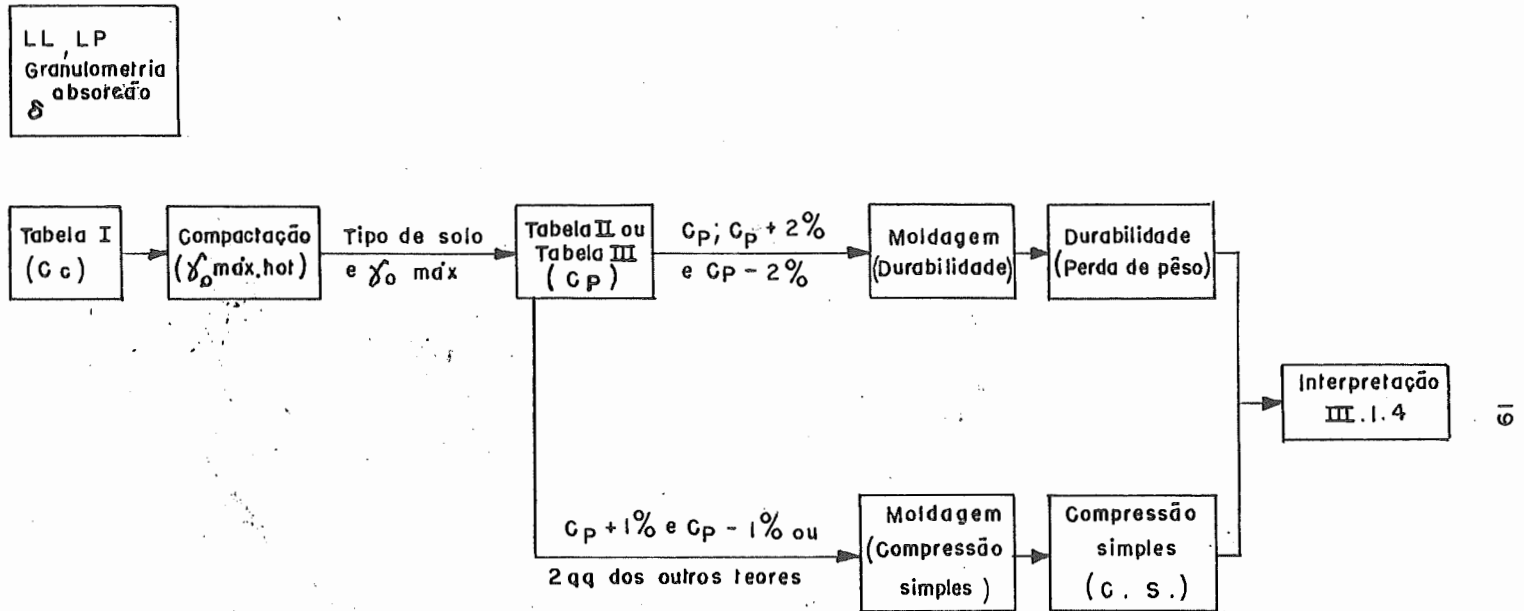
$C_v$  = volume de cimento solto/volume de solo cimento compactado.

$C_p$  = teor de cimento em peso (Peso cimento solto/  
 Peso de solo seco).

$\gamma_o \text{ máx}$  = peso específico aparente seco máx. ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\gamma_c$  = peso específico do cimento solto =  $1,43\text{g}/\text{cm}^3$ .

## 5.- RESUMO



III.2 - Norma Simplificada

1. Objetivo: Fixa o teor de cimento adequado em função das características físicas do solo e do ensaio de resistência à compressão simples.

2. Aplicabilidade: É aplicável aos seguintes solos:

- a) que possuam menos de 50% de material com diâmetro inferior a 0,05 mm (silte + argila)
- b) que possuam menos de 20% de material com diâmetro inferior a 0,005 mm (argila).

3. Divisões:

- 3.1 - Norma A - utilizada quando 100% do solo passa na peneira nº 4 (4,8 mm).
- 3.2 - Norma B - utilizada quando parte do solo fica retido na peneira nº 4. Neste caso só é utilizado o material que passa na peneira de 19 mm.

4. Ensaio Preliminares:

- a) Análise Granulométrica
- b) Absorção e peso específico dos Grãos de Pedregulho.

5. Norma A - (Simplificada).

5.1 - Ensaio de compactação

- a) Para a determinação do  $\gamma_o$  máx. e do  $h_{ot}$  da mistura.
- b) Para tanto temos que admitir um teor de cimento



$C_c$  (utilizado no ensaio de compactação). A estimativa deste valor se faz através da Figura III.2, em função do teor de silte + argila e do peso específico aparente seco máximo, que por sua vez é admitido através de experiência anterior ou pela Figura III.1, em função da granulometria do solo.

#### 5.2 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples.

- a) Com o  $\gamma$  máx. obtido no ensaio anterior, entra-se novamente na Figura III.2 e tira-se o teor de cimento mais provável ( $C_p$ ).
- b) Com este teor de cimento moldam-se três corpos de prova e determinam-se suas resistências à Compressão Simples, após sete dias, de acordo com II.5, calculando-se a média ( $R_c$ ).

#### 5.3 - Interpretação

- a) Da Figura III.3, em função da porcentagem de silte + argila, obtem-se a mínima resistência à compressão simples aceitável ( $\bar{R}_c$ ).
- b) Se a média dos valores encontrados acima no ítem 5.2.b) for superior ao mínimo indicado pela Figura III.3, o teor de cimento mais provável ( $C_p$ ) utilizado, será adotado.
- c) Se, pelo contrário  $R_c < \bar{R}_c$ , a amostra deverá ser ensaiada pela Norma Geral, com corpos de

prova para o ensaio de durabilidade, moldados com o mesmo teor  $C_P$  e com  $C_P + 2\%$

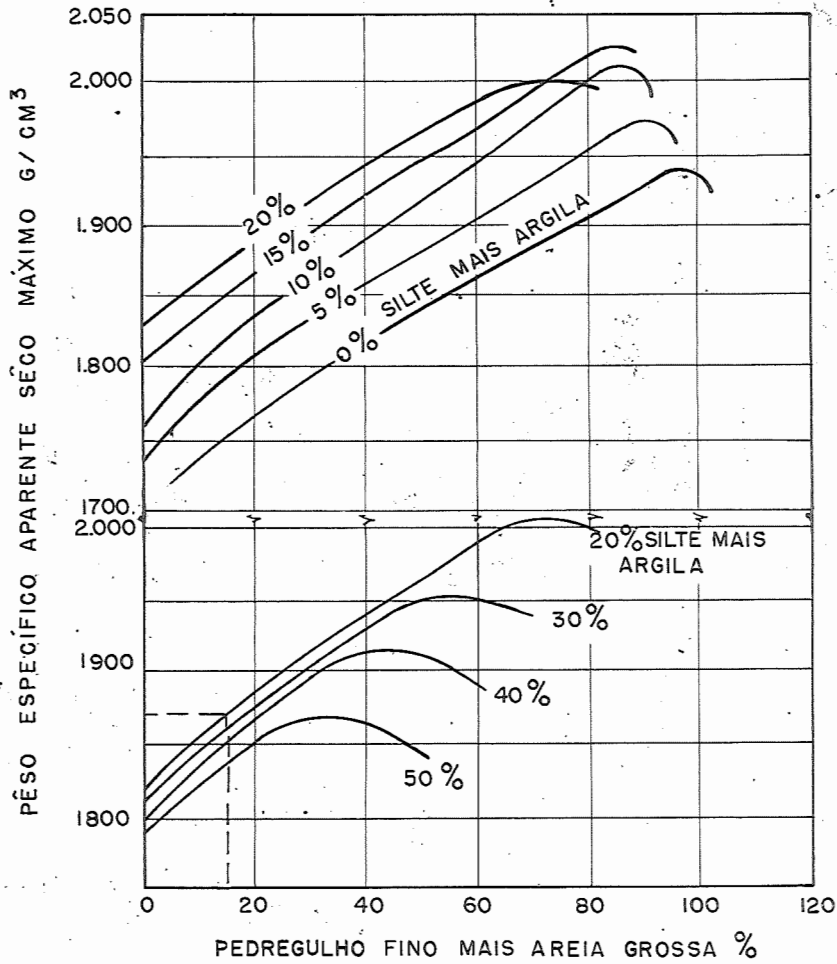


FIG. III. 1 - PÊSO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO MÁXIMO ESTIMADO

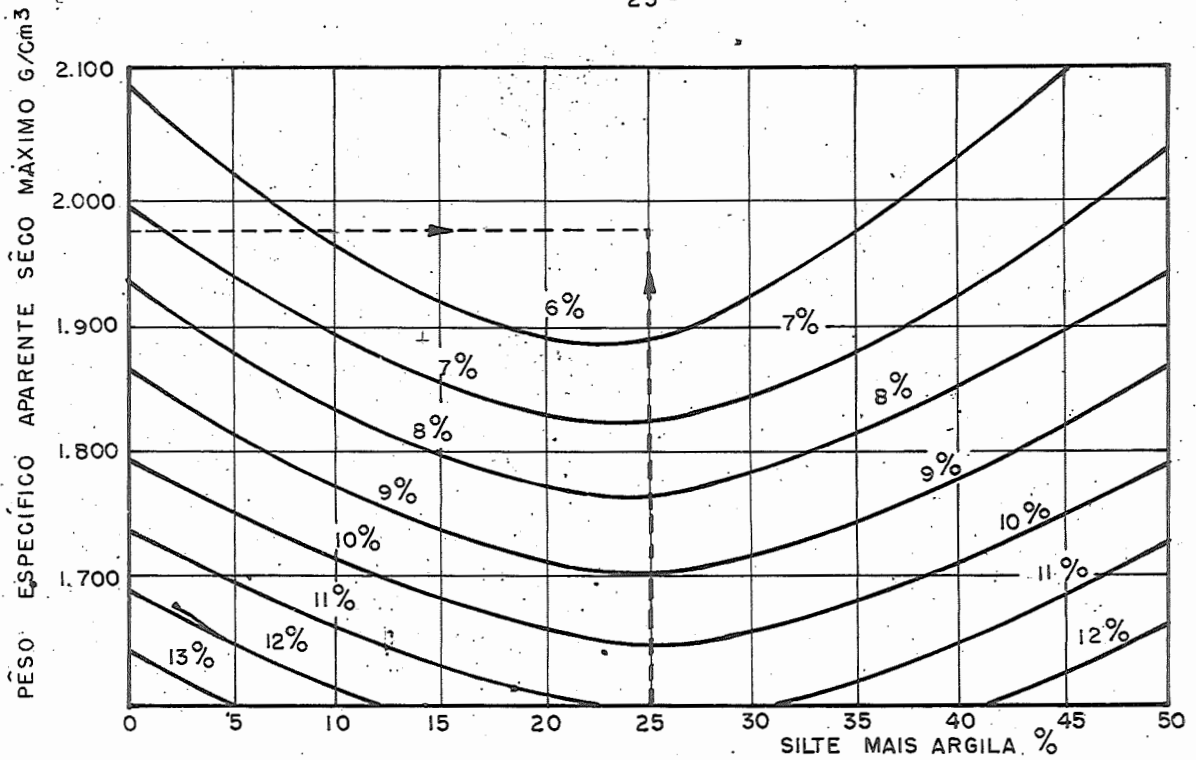


FIG. III 2 - NORMA A  
TEOR DE CIMENTO EM PÊSO ( $C_c$  ou  $C_p$ )

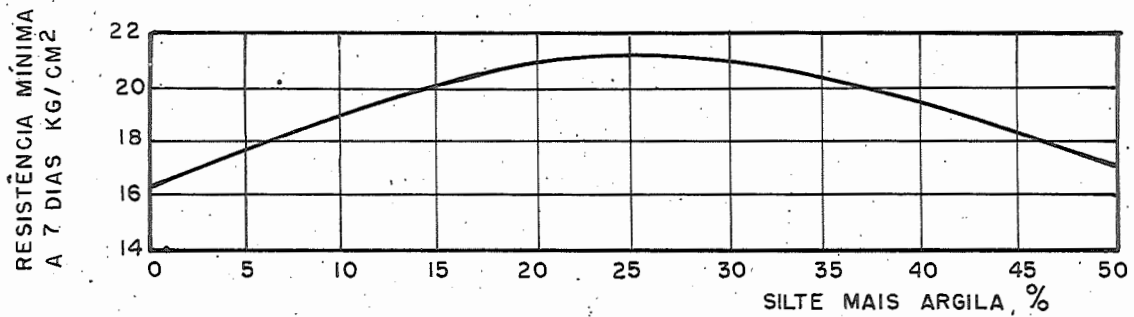
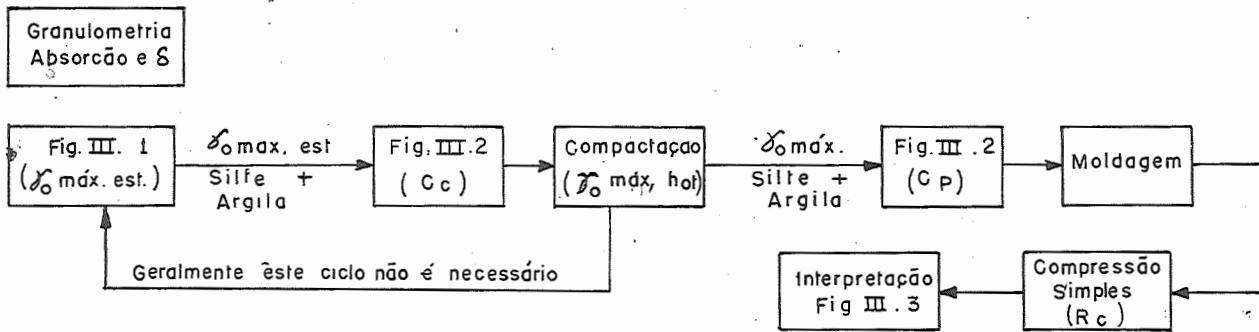


FIG. III 3 NORMA A  
MÍNIMA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA A 7 DIAS ( $\bar{R}_c$ )



5.4. RESUMO



6. NORMA B (Simplificada)

6.1 - A norma B é inteiramente análoga à norma A, apenas que as figuras a serem utilizadas serão agora: Fig. III.4; Fig. III.5; Fig. III.6

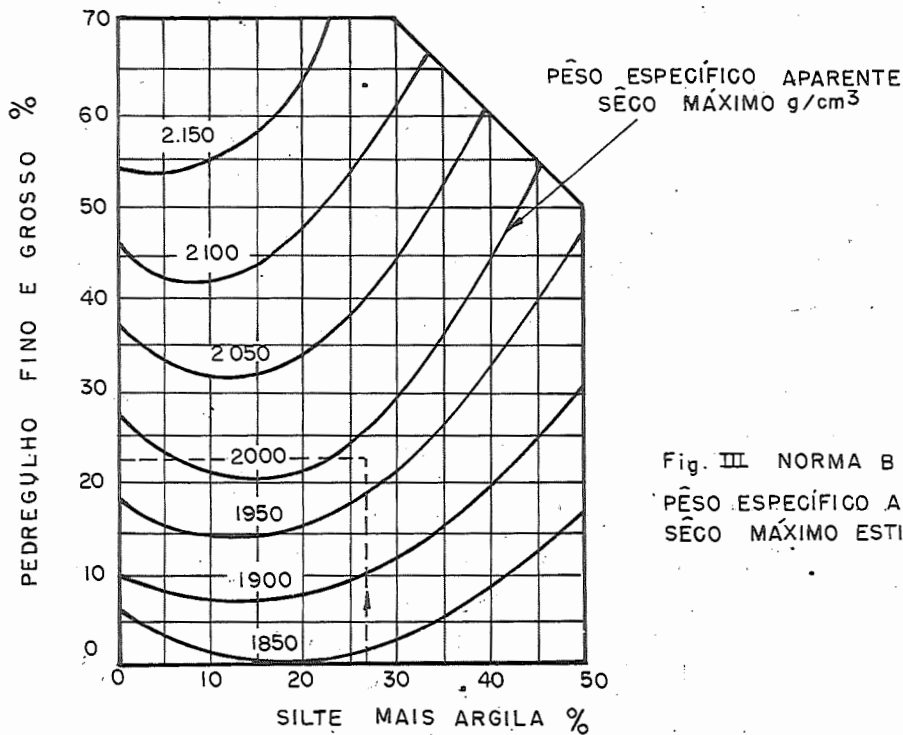


Fig. III NORMA B  
PÊSO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO MÁXIMO ESTIMADO

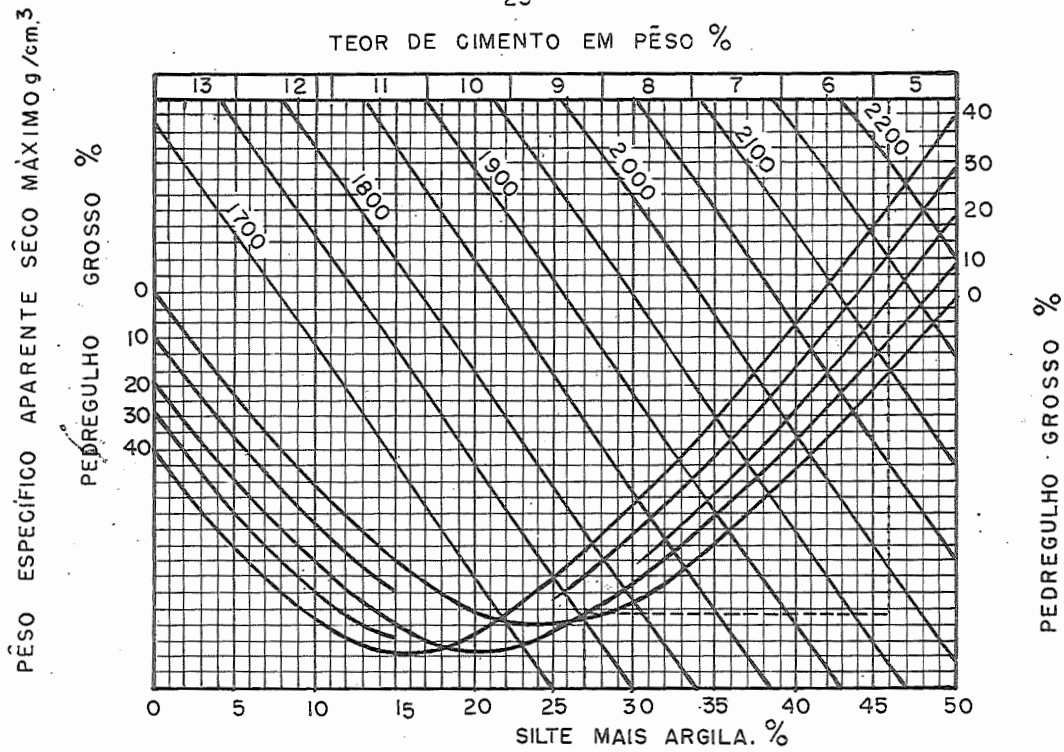


FIG. III. 5 NORMA B

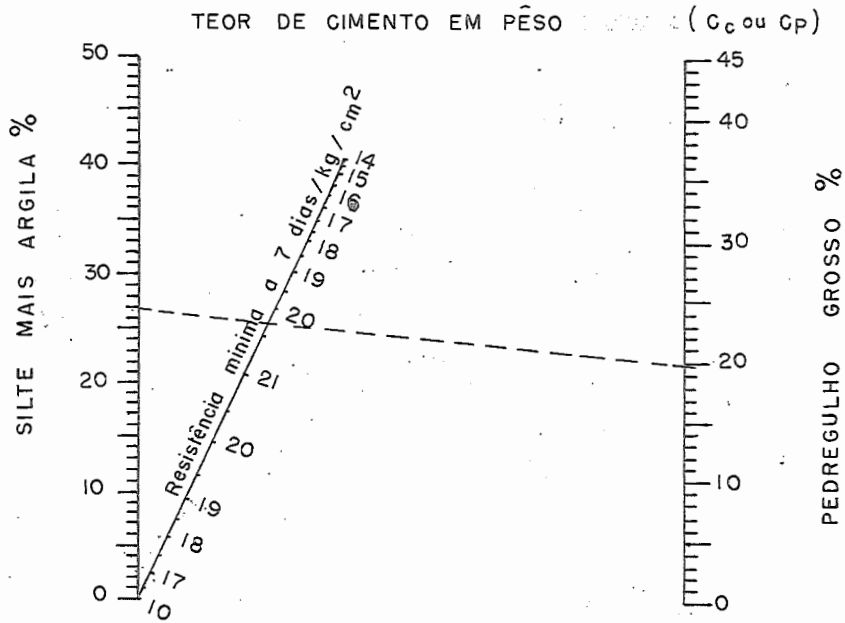


FIG. IV NORMA B

MINIMA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA A 7 DIAS ( $\bar{R}_c$ )

## IV - MÉTODOS CONSTRUTIVOS

## 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo se tratará, de maneira suscinta, de algumas técnicas de construção de solos estabilizados. Embora estas técnicas se adaptem a qualquer tipo de estabilização, - as diferenças sendo apenas de ordem secundária, - para maior concatenação os métodos aqui tratados se referirão especificamente à construção de solos estabilizados com cimento. Sempre que possível, entretanto, será utilizada uma nomenclatura genérica que permita uma fácil adaptação a outro tipo de estabilização. Para tanto, bastará ter-se em conta, como já foi visto anteriormente, que em qualquer estabilização trabalha-se com: -1) Um solo base, que poderá ser o local ou o importado e 2) Um agente estabilizador (outro solo, betume, cimento, cal, resinas e outras substâncias químicas), importado.

## 2 - PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO

Os processos de construção são os mais variados, dependendo sobretudo do equipamento e das disponibilidades do construtor. Costumam-se, entretanto, agrupar estes diversos processos em três grupos principais e distintos (embora algumas vezes haja alguma sobreposição entre eles):

- a) Método da mistura no local
- b) Método da Usina Móvel
- c) Método da Usina Fixa.

### 3 - MÉTODO DA MISTURA NO LOCAL

Este método tem como característica mais importante, o fato da mistura do solo com o estabilizador e a água se processar no próprio terreno de estabilização, praticamente sem a retirada da mistura fora da caixa de construção. As técnicas de construção dependem basicamente do equipamento disponível. De uma maneira geral o método compreende às seguintes fases:

- a) Preparo do leito
- b) Preparo e pulverização do solo
- c) Aplicação do estabilizador
- d) Mistura
- e) Adição de água
- f) Mistura
- g) Conformação
- h) Compactação
- i) Revestimento.

A primeira fase de preparo do leito consiste no acerto da superfície, visando a segunda operação que é o preparo do solo e sua conseqüente pulverização.

Se o solo a ser estabilizado é o local, este preparo é feito pela escarificação do sub-leito na profundidade desejada (dependendo do projeto) e se o solo é importado consiste no seu depósito na quantidade desejada. Tanto num caso como no outro a maior regularidade do leito será responsável pela melhor facilidade da operação. A pulverização é a operação de revolvimento do solo e desagregação das partículas visando a melhor penetração do estabili

zador e da água e a obtenção de uma melhor mistura.

A aplicação do estabilizador depende do seu tipo e no caso particular do cimento pode ser tanto a granel, através de caminhões basculantes ou caminhões especiais equipados com descarga pneumática, ou por sacos. Na distribuição por sacos, cada saco ocupa no terreno uma superfície de área necessária à sua utilização dependendo da dosagem e do dimensionamento. A "geometria" do processo é variável de acôrdo com as conveniências mas em geral adotam-se as indicadas na Fig. IV-1. Geralmente, neste caso costuma-se trabalhar em camadas, isto é, com o material ocupando tôda a

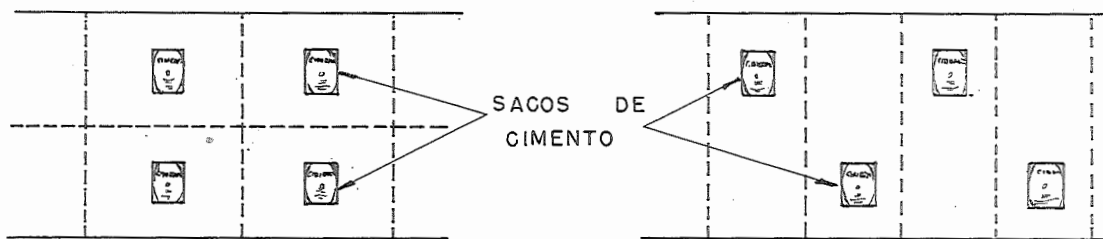


FIG. IV. 1

ESQUEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE CIMENTO POR SACOS

largura da faixa de estabilização. No caso de distribuição contínua do estabilizador e dependendo do equipamento disponível, pode-se trabalhar tanto em camadas como em cordões *couleiras* que consiste em fazer com o solo um cordão central que, depois de receber o estabilizador, é espalhado por tôda a faixa. Em alguns casos êste espalhamento e a mistura que seria a fase seguinte, são conjuntas. A mistura é feita por vários processos, desde o manual passando por esca-

rificadores e lâminas, grades de discos até a misturadores especiais tipo enxadas rotativas de maior eficiência (ver Fig. IV-2. À adição de água, normalmente feita através de caminhões tanques simples ou dotados de bombas de controle de vazão, segue-se nova mistura após o que o material é acertado ao longo da faixa, na espessura desejada (conformação) e compactado.

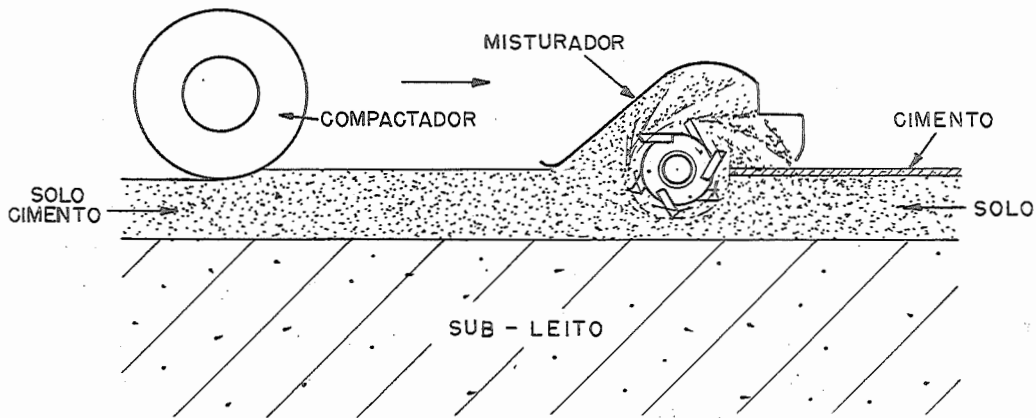


FIG - IV - 2

MISTURADORA ROTATIVA

A compactação geralmente é feita através de rolos compactadores e compreende duas fases.

Uma primeira constitui a compactação propriamente dita, podendo-se aí utilizar o tipo de rolo que se mostrar mais conveniente em função do tipo de solo e do estabilizador, seguida de uma segunda, geralmente precedida de leve escarificação e se necessário de uma correção da

umidade, que visa dar o acabamento final. Nesta segunda fase o rôlo deve ser liso ou de pneu.

Finalmente, depois de compactado o solo cimento deve receber uma cobertura de proteção durante a cura.

Nas Fig. IV-3,4 e 5 estão indicados alguns esquemas de construção por mistura no local.

#### 4 - MÉTODO DA USINA MÓVEL

Este método segue basicamente as mesmas fases do processo anterior. Normalmente, neste caso, trabalha-se sempre em cordões e a diferença essencial é que se dis-

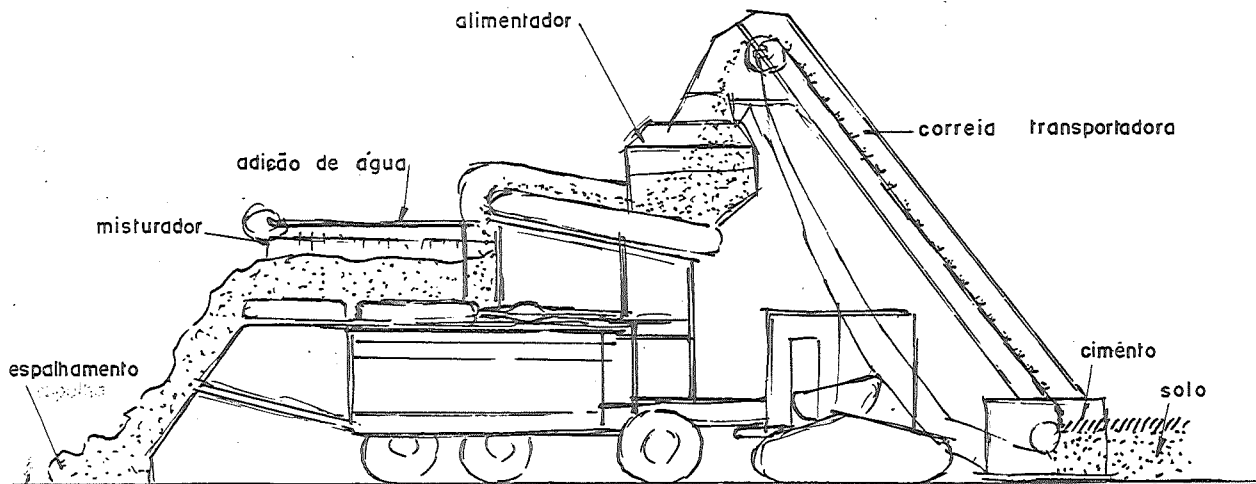
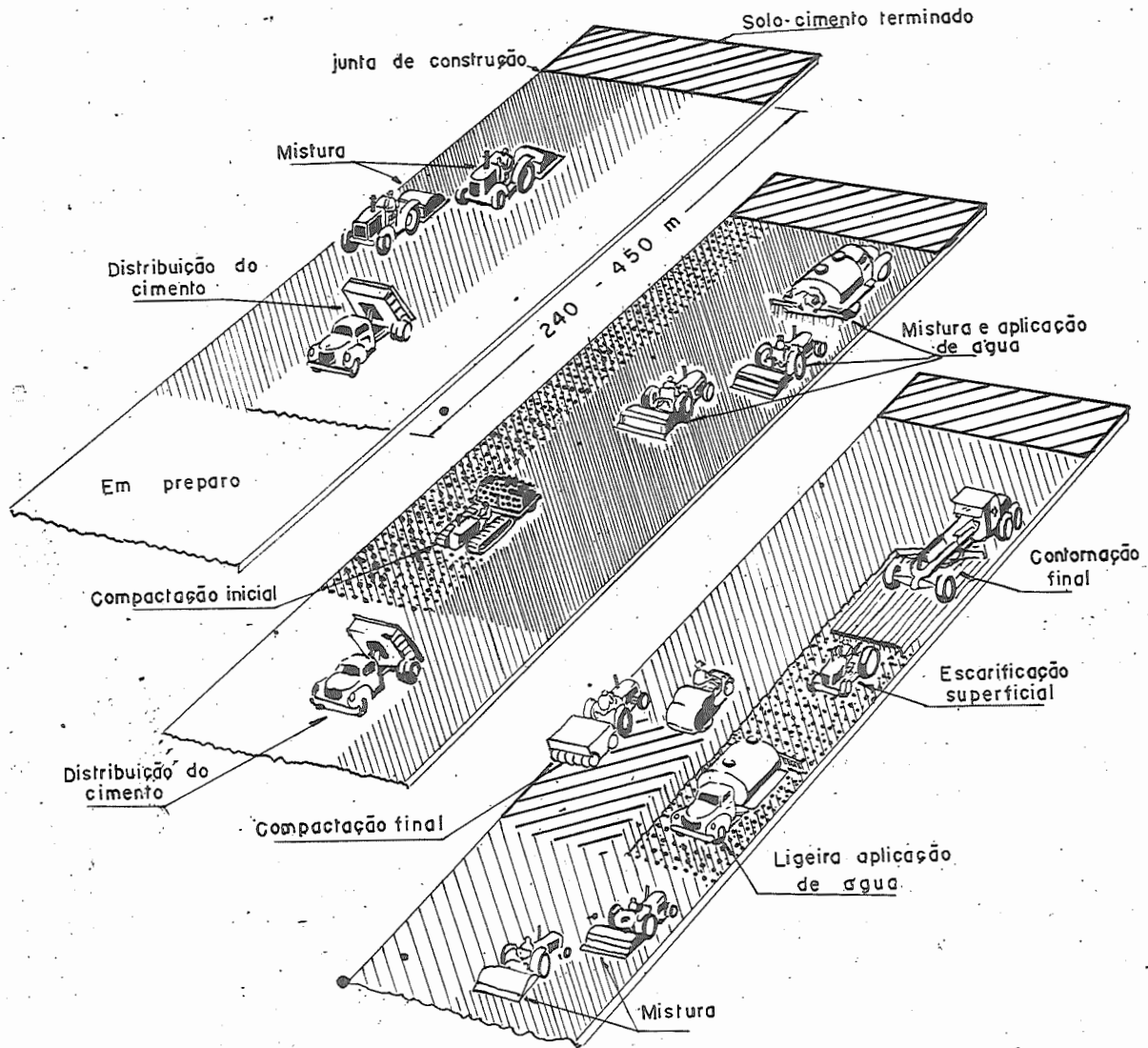


FIG. IV . 6 ESQUEMA DE USINA MOVEL



1	4
2	3

2 FAIXAS

1	6
2	5
3	4

3 FAIXAS

FIG. IV.3 DIAGRAMA DE EXECUÇÃO DO SOLO-CIMENTO COM MISTURADORAS ROTATIVAS



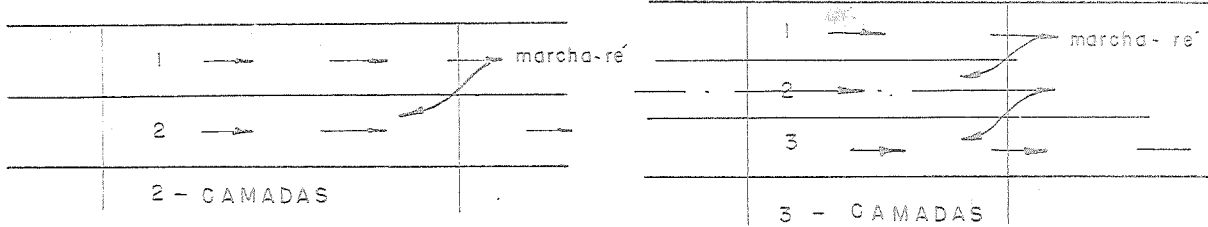
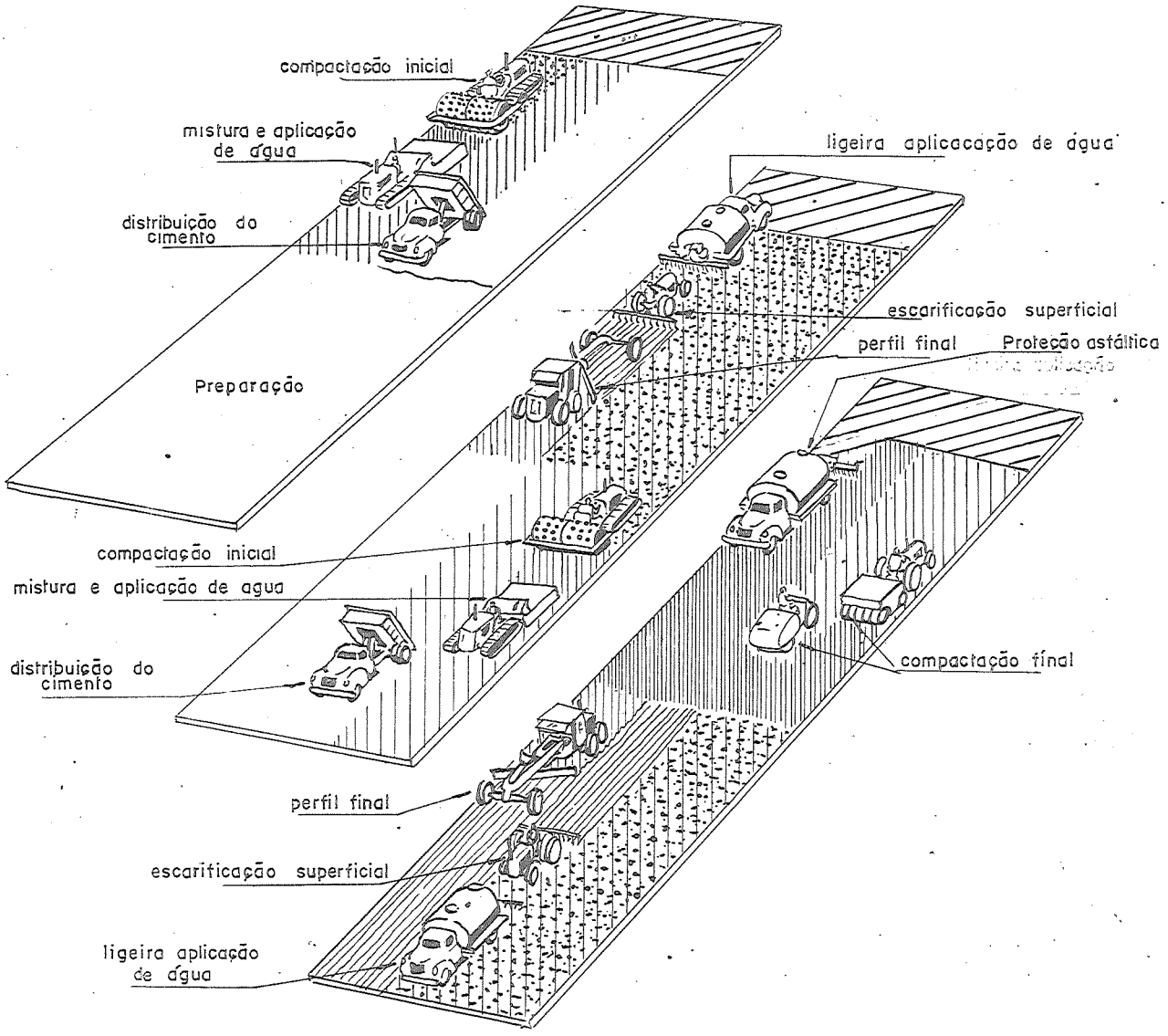
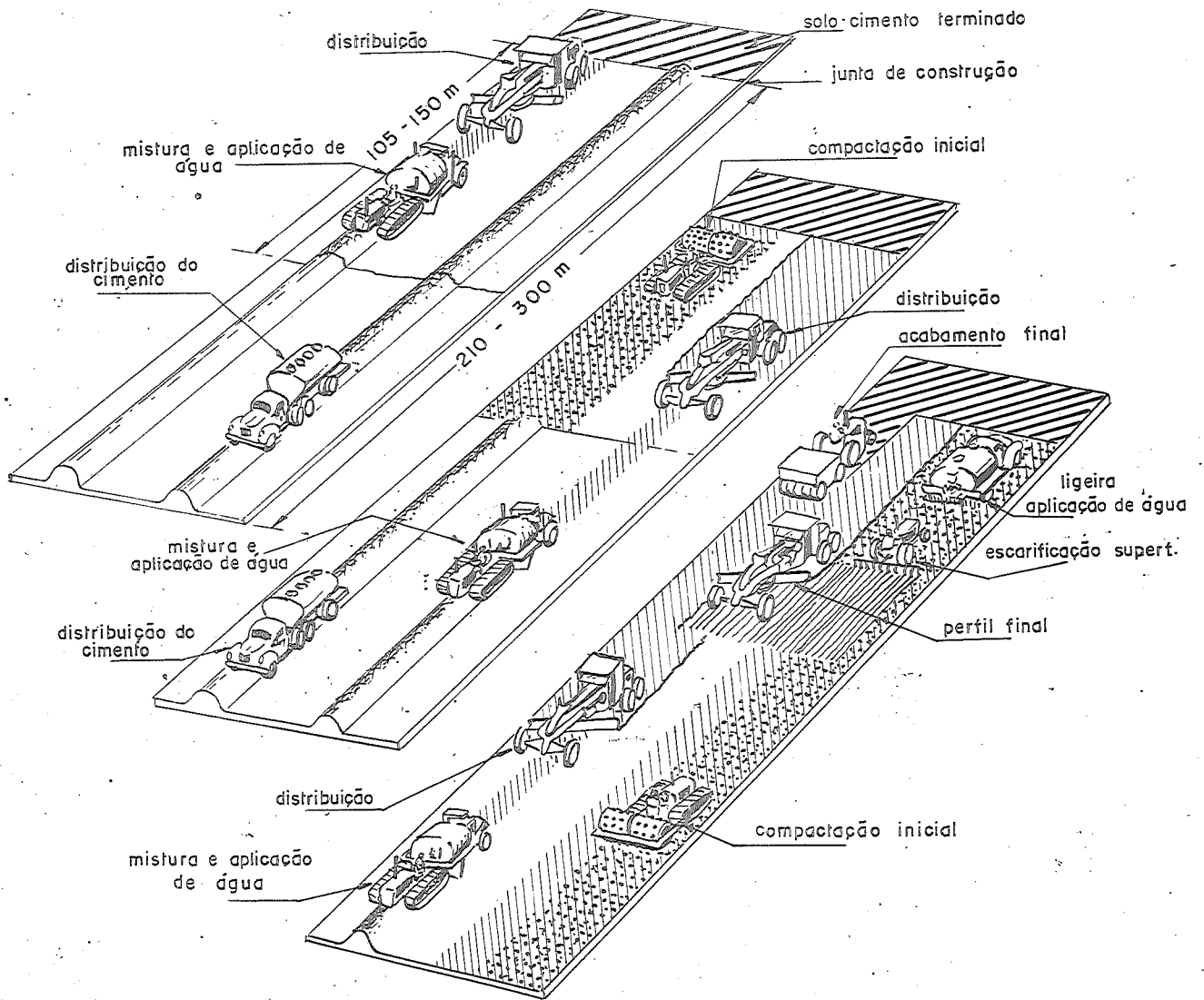
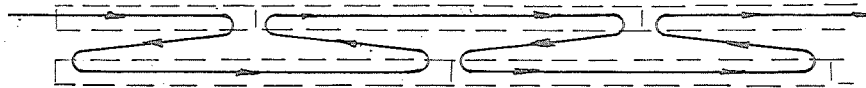


FIG. IV.4 DIAGRAMA DE EXECUÇÃO DO SOLO-CIMENTO COM O MATERIAL EM CAMADAS



2 - CORDÕES



3 - CORDÕES

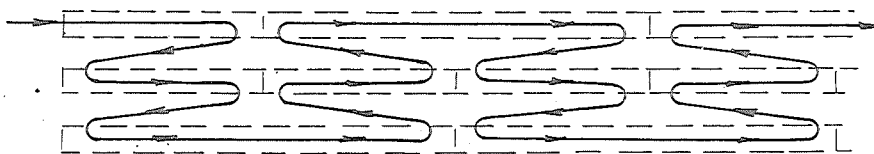


FIG. IV.5 DIAGRAMA DE EXECUÇÃO DO SOLO-CIMENTO COM MATERIAL EM CORDÕES

põe de uma máquina especial (a usina móvel) que, deslocando-se sobre o cordão, recolhe o solo com ou sem o estabilizador já distribuído sobre o mesmo, adiciona água, ou água e estabilizador e faz a mistura em misturadores especiais e devolve o material ao leito espalhando-o na espessura desejada.

Existem vários tipos de equipamentos deste tipo, dependendo da capacidade e dos fabricantes (vide catálogos especializados).

Um exemplo esquemático pode ser visto na Fig. IV-6.

## 5 - MÉTODO DA USINA FIXA

Neste método utiliza-se uma usina central fixa no ponto mais conveniente do trecho em execução (atendendo principalmente ao problema do transporte) e para onde são concentrados tanto o solo a ser estabilizado, como o estabilizador e a água.

Existem basicamente dois tipos de usina <sup>fixa</sup> móvel: a de mistura contínua e a de mistura em ciclo.

Os de mistura contínua são análogos às usinas móveis, com a diferença que estão estacionadas e descarregam a mistura pronta em transportadores que a conduzem ao local do espalhamento para a compactação.

Uma usina móvel estacionada e adaptada para alimentar transportadores (geralmente caminhões) torna-se uma usina fixa.

As usinas de mistura em ciclo não recebem os materiais de maneira contínua e funcionam no mesmo princípio das betoneiras para mistura de concreto.

Dada a sua característica de ser fixa, podem-se ter usinas de grande capacidade de produção.

Um esquema de uma usina fixa pode ser visto na Fig. IV-7.

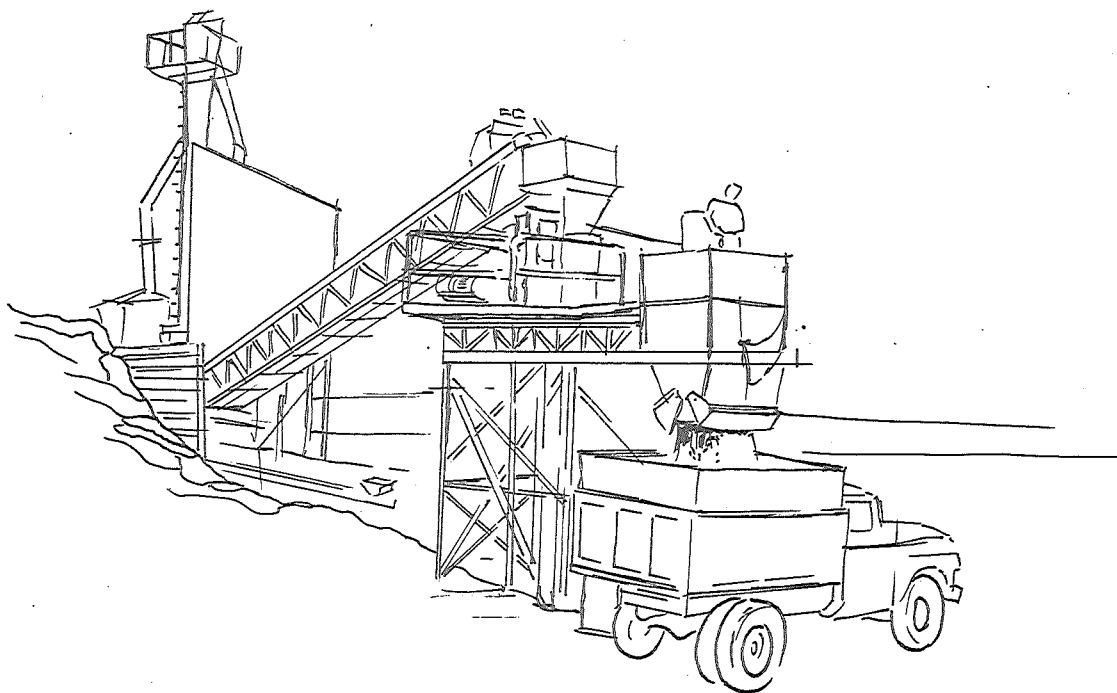


Fig. IV.7

## 6 - JUNTAS DE CONSTRUÇÃO

Sempre que houver necessidade de interromper-se o serviço para retomá-lo no dia seguinte ou algum tempo depois, impõe-se a necessidade de uma junta de construção que assegure uma boa continuidade e ao mesmo tempo facilite a construção.

Na Fig. IV.8 encontra-se detalhado um processo que tem sido mais comumente empregado para a construção de tais juntas e que dispensa maiores comentários.

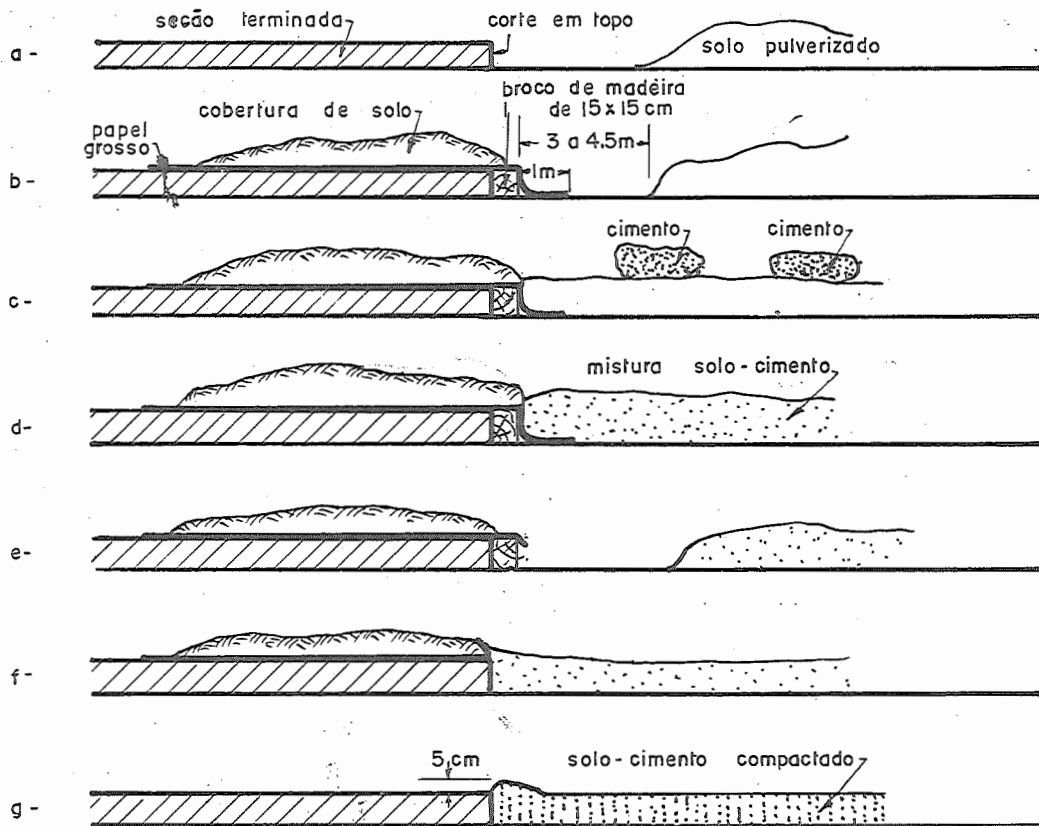


FIG. IV. 8 - JUNTA DE CONSTRUÇÃO

## 7 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DESCRITOS

Muito embora as vantagens e as desvantagens no emprêgo de qualquer dos métodos de construção dependam das características especiais do caso em aprêço e das disponibilidades existentes, podem ser enumeradas uma série de vantagens e desvantagens gerais inerentes a cada processo.

### 7.1 - Mistura no local.

#### Vantagens:

- a) Equipamento simples, barato e de fácil transporte
- b) O número de máquinas pode ser ajustado ao serviço
- c) Tôda a secção fica pronta para a compactação ao mesmo tempo.
- d) Rendimento médio elevado
- e) Permite evaporação natural em clima úmido

#### Desvantagens:

- a) Maior dificuldade de obtenção de espessura uniforme
- b) Mistura menos homogênea
- c) Maior influência de chuvas fortes
- d) Exige grande contrôle de água em clima sêco

### 7.2 - Usina Móvel

#### Vantagens:

- a) Maior exatidão na água adicionada
- b) Mistura uniforme

- c) Menor tempo de mistura
- d) Espessura controlada e superfície de subleito uniforme
- e) Maior rendimento para uma dada despesa de usina e de mão de obra (dependendo de condições locais)

Desvantagens:

- a) Custo inicial elevado
- b) Necessidade de utilização da usina em plena capacidade
- c) Risco de paralização do serviço devido a qualquer avaria

### 7.3 - Usina Fixa

Vantagens:

- a) Dosagem rigorosa
- b) Fácil contrôle da espessura da camada
- c) Possibilidade de utilização de misturados - res de concreto
- d) Pequenas perdas de umidade no transporte e na mistura
- e) Melhor adaptação a serviços que utilizem fôrmas
- f) Nenhum transporte adicional se fôr utilizado solo importado.

Desvantagens:

- a) Muito caro se o tratamento é feito com solo local.

- b) A compactação é feita de acôrdo com o descarregamento em não em secção completa.

## 8 - CONTRÔLE

Executada a camada de solo-cimento ou de solo estabilizado, qualquer que seja o método utilizado, é necessário ter-se uma medida do produto acabado para se saber até que ponto êle difere das especificações de projeto e se deve ou não ser aceito.

Deixar esta verificação tôda para o final do trabalho, após a execução tôda do serviço envolve o risco de se ter que destruir e refazer o produto que não atenda aos mínimos exigidos.

O que se faz então, é controlar a obra em suas várias fases a fim de assegurar um produto acabado com gran de probabilidade de aceitação.

Assim costuma-se controlar:

- a) a espessura de tratamento e espalhamento;
- b) a área da secção transversal dos cordões;
- c) a qualidade dos materiais;
- d) o grau de pulverização
- e) o teor de umidade;
- f) a relação  $\frac{\text{pêso específico aparente sêco}}{\text{teor de umidade}}$ ;
- g) o teor de estabilizador.

Nos ítems a), b), c) e f) empregam-se as técnicas normais de contrôle de compactação, já examinadas em detalhe (v. compactação dos solos).



Para contrôlo do grau de pulverização utiliza-se a inspeção visual e tátil do material ou um ensaio de peneiramento simples, com uma ou duas peneiras e de acôrdo com as condições próprias do solo em questão.

O contrôlo do teor de estabilizador depende da estabilização.

Em linhas gerais, entretanto, consiste em separar o estabilizador do solo e medir a sua quantidade. - Quando possível esta separação pode ser física (por ex.: estabilização granulométrica), ou então química.

No caso do solo-cimento vários são os processos que têm sido utilizados para a determinação do teor de cimento. Citaremos aqui apenas os mais importantes, resumindo-os rapidamente. Maiores detalhes poderão ser facilmente encontrados nas fontes indicadas à medida que os processos forem sendo expostos.

#### 8.1 - O método da A.S.T.M.

Um dos processos mais utilizados tem sido o da A.S.T.M. que poderá ser encontrado em seus "Padrões" (Standards), na Secção de Solos, sob o número D 806 - 57. Consiste basicamente em uma análise química. Primeiramente, uma amostra do solo natural, do cimento e da mistura de solo-cimento são tratados com ácido clorídrico, eliminando-se os precipitados resultantes. O filtrado é então tornado ligeiramente amoniacal deixando-se assentar os hidróxidos. O precipitado é lavado com nitrato de amônio e os hidróxidos são dissolvidos com ácido clorídrico. A solução é novamente ligeiramente amoniacal, o precipitado sendo lavado com nitrato de amônia, eliminando-se o hidróxido precipitado.

Adiciona-se hidróxido de amônia ao filtrado, aquece-se a solução e adiciona-se oxalato de amônia. O oxalato de cálcio é filtrado, lavado para um beaker e diluído. Adiciona-se, então, ácido sulfúrico. O resultado é titulado com uma solução padrão de permanganato de potássio. A porcentagem de cimento em pêsso (em relação ao solo sêco) é dada por

$$C (\%) = \frac{J - I}{5H - I} \times 100,$$

onde,

H é a solução de  $KM_nO_4$  necessário à titulação da amostra de cimento, (ml);

I é a solução de  $KM_nO_4$  necessário à titulação do solo, (ml); e

J é a solução de  $KM_nO_4$  necessário á titulação do solo-cimento, (ml).

## 8.2 - Método da Análise Química

Este método é o mesmo, essencialmente, que o anterior, apenas que aqui o ferro e o alumínio não são precipitados, mas apenas o cálcio, sob a forma de oxalato.

O ácido clorídrico é neutralizado com hidróxido de amônia e adiciona-se ácido acético para tornar o pH menor que 7 e deixar o ferro e o alumínio em solução. O precipitado de oxalato de cálcio é obtido pela adição de excesso de oxalato de amônia ao cálcio. Daí em diante o processo é o mesmo que para o método A.S.T.M.

8.3 - O Método Califórnia (State of California, Div. of Highways Materials Manual Test Method nº 338 A)

O método Califórnia também é baseado em titulações químicas que relacionam o teor de cimento de amostras de solo-cimento com concentrações de soluções conhecidas.

São utilizados dois tipos de titulações: uma titulação ácido-base; usada quando não há reação do agregado com o ácido clorídrico, e um método de neutralização constante quando há esta reação.

No primeiro caso faz-se uma neutralização do cimento com excesso de ácido clorídrico. O ácido residual em excesso é titulado com uma base e é inversamente proporcional ao teor de cimento da mistura.

No segundo caso procede-se a uma neutralização contínua de uma solução aquosa da mistura, em um dado tempo, adicionando-se apenas o ácido suficiente para neutralizar os ions OH que vão sendo continuamente liberados durante a hidratação do cimento. A quantidade de ácido é diretamente proporcional ao teor de cimento da mistura.

8.4 - O Método do Versenato (Sherwood P.T. - "Laboratory Method for the Determination of the Cement or Lime Content of Cement or Lime Stabilized Soil" e "The Determination of the Cement Content of Soil Cement" - British Road Research Laboratory)

O método do Versenato é utilizado na Inglaterra e pode ser usado para todos os solos, menos aqueles que contenham uma grande quantidade ou quantidades muito variáveis de cálcio.

Este mesmo processo é também utilizado para a determinação do teor de cal em solo-cal.

Aqui, também devem ser ensaiadas separadamente amostras do solo, do cimento e da mistura. Adiciona-se ácido clorídrico às amostras para dissolver os compostos de cálcio, magnésio, ferro, alumínio, etc. Depois adiciona-se hidróxido de amônia a uma alíquota até tornar azul o avermelhado (vinho). Os hidróxidos de ferro, alumínio e titânio, por ventura existentes, precipitam-se, enquanto que o cálcio e o magnésio permanecem em solução.

Uma alíquota desta solução é então, titulada com o sal disódico do ácido etileno-diamino-tretacético - (EDTA) utilizando-se como indicador o prêto de ériocromo a até serem eliminados todos os traços de rosa.

- 8.5 - O Método de Nevada (A Rapid Method for Determination of Cement Content of Cement Treated Base Materias - Record nº 86 - Highway Research Board - 1965 - pag. 73)

Mais recentemente, Budd F. Rude, do Departamento de Estradas de Nevada, propos uma variante do método do Versenato ou Método EDTA, utilizando um novo indicador de cálcio mais específico, o azul de hidroxinaftol. Este novo processo parece bastante promissor e está sendo testado na Escola de Engenharia de São Carlos para alguns solos brasileiros, pelo que será preferível aguardarmos até serem obtidos os primeiros resultados.

8.6 - O Método da Condutividade (Le Clerk Sandahl - "A Rapid Method for Determining Cement of Plastic Cement - Treated Base" - Washing State Highway Commission.)

Este método baseia-se na variação da condutividade da água pela adição do cimento. Feita a medida ela deve ser comparada com curvas padrões estabelecidas previamente através de misturas com teores de cimento conhecidas.

Este processo é dos mais simples e baratos mas envolve detalhes que devem ser rigorosamente controlados, a fim de serem obtidos bons resultados.

8.7 - O Método do Fotômetro de Chama

Este processo é dos mais rápidos e acurados e é baseado em análise fotométrica, exigindo portanto a aparelhagem adequada que é bastante cara. Só se justificaria para uma grande quantidade de determinações utilizando-se o mesmo solo devido à necessidade de calibração prévia do equipamento.

8.8 - Concluindo restaria dizer que em discussão feita por Curtis e Forbes (Determination of Cement Content of Soil - Cement Mixtures - Highway Research Record nº 36 - Highway Research Board - 1963), sobre estes processos conclui-se que os Métodos da Califórnia e da Condutividade seriam os mais práticos para utilização no campo, enquanto que para uso em laboratório seriam recomendados os Métodos da ASTM, do Versanato e da Califórnia.

Estas conclusões são, entretanto, anteriores ao aparecimento do Método de Nevada.

\* \* \* \* \*

vmv/66.

# C O N T E Ú D O

	página
I - CONCEITUAÇÃO GERAL .....	
1 - Introdução.....	1
2 - Aplicações.....	1
3 - Fatores que influem nas Propriedades do Solo-Cimento	2
II - ENSAIOS	
1 - Introdução.....	7
2 - Ensaio Preliminares.....	7
3 - Compactação.....	8
4 - Durabilidade, Molhagem e Secagem.....	9
5 - Compressão Simples.....	12
III - DOSAGEM	
III.1 - Norma Geral	
1.- Objetivo.....	13
2.- Ensaio Preliminares.....	13
3.- Marcha Geral.....	14
4.- Interpretação dos Resultados.....	17
5.- Resumo.....	19
III.2 - Norma Simplificada	
1.- Objetivo.....	20
2.- Aplicabilidade.....	20
3.- Divisões.....	20
4.- Ensaio Preliminares.....	20
5.- Norma A (Simplificada).....	20
6.- Norma B (Simplificada).....	24
IV - MÉTODOS CONSTRUTIVOS	
1 - Introdução.....	26
2 - Processos de Construção.....	26
3 - Método da Mistura no Local.....	27
4 - Método da Usina Móvel.....	30
5 - Método da Usina Fixa.....	34
6 - Juntas de Construção.....	36
7 - Vantagens e Desvantagens dos Métodos Descritos	37
8 - Contrôles.....	39