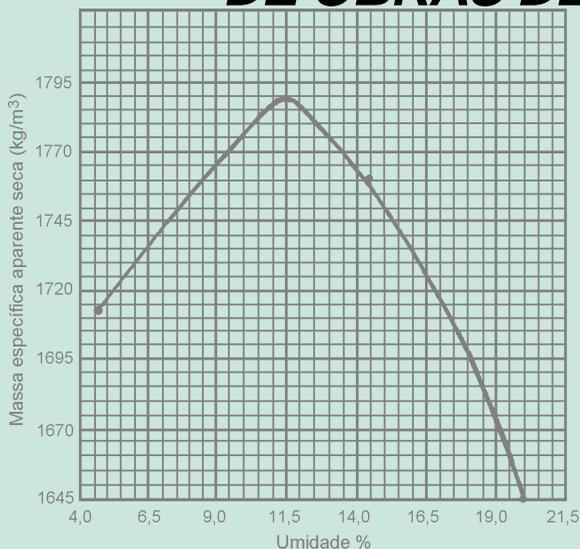


ESTUDO TÉCNICO

CONTROLE E FISCALIZAÇÃO DE OBRAS DE SOLO-CIMENTO



ET-36



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

**CONTROLE E FISCALIZAÇÃO
DE OBRAS DE SOLO-CIMENTO**

por

Márcio Rocha Pitta
Engenheiro Civil

São Paulo
junho de 2000

Rev. 4

1ª edição - 1980

2ª edição - 1983

3ª edição - 1986

4ª edição - 2000

PITTA, M.R. Controle e fiscalização de obras de solo-cimento.
4.ed.rev. atual. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento
Portland, 2000.
62p. (ET-36)

ISBN 85-87024-32-9

Pavimentos de solo-cimento

CDD 625.89

Todos os direitos reservados à
Associação Brasileira de Cimento Portland
Avenida Torres de Oliveira, 76 - Jaguaré
CEP 05347-902 São Paulo/SP
Tel.: (55-11) 3760-5300 - Fax: (55-11) 3760-5370

PITTA, Márcio Rocha. *Controle e fiscalização de obras de solo-cimento*. 4.ed. rev. atual. São Paulo, ABCP, 2000. 62p. (ET-36).

O controle da execução e a fiscalização de obras de solo-cimento envolvem quatro fatores básicos: teor de cimento, teor de umidade, compactação e espessura.

O trato dessas variáveis deve ser efetuado ordenada e sistematicamente, de maneira que sejam obtidas respostas propícias a um perfeito domínio do material e da obra em si.

A obtenção de um produto final de qualidade conveniente deriva da observação rigorosa dos itens a seguir discriminados:

- a) a pesquisa de jazidas, os ensaios de dosagem, o projeto geométrico e as especificações devem estar de acordo com os requisitos e condições da obra;*
- b) o equipamento de construção deve ser dimensionado e ajustado para as condições reais de trabalho;*
- c) a pulverização do solo deve ser suficiente e adequada para uma mistura fácil com o cimento;*
- d) a mistura do cimento ao solo deve ser uniforme e homogênea;*
- e) o controle de umidade deve ser rigoroso;*
- f) a espessura e a largura da camada devem estar de acordo com o projeto e dentro das tolerâncias admissíveis;*
- g) o acabamento deve proporcionar uma superfície final úmida, compacta e livre de “escamas” ou “lamelas”;*
- h) as juntas de construção devem ser executadas com solo-cimento bem misturado e bem compactado;*

- i) o grau de compactação deve ser alcançado sem grande dificuldade;*
- j) a cura deve ser realizada com material apropriado e mantida por tempo suficiente para que o solo-cimento alcance o endurecimento e as qualidades mínimas requeridas;*
- k) os defeitos porventura aparecidos devem ser reparados de pronto.*

O objetivo deste trabalho é sugerir métodos úteis no controle de cada um dos itens acima citados. A aplicação criteriosa das recomendações aqui contidas, por pessoal técnico capaz de avaliar a significância e as limitações delas, possibilitará a consecução de pavimentos econômicos, duráveis e eficazes.

Palavras-chave: Pavimentos de solo-cimento; Pavimentos de solo-cimento - Construção; Solos - Estabilização.

SUMÁRIO

RESUMO

<i>SIMBOLOGIA ADOTADA</i>	7
1 INTRODUÇÃO	9
2 IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS	9
3 PREPARAÇÃO DO SUBLEITO	9
4 VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO	11
5 PULVERIZAÇÃO	11
6 ADIÇÃO DE CIMENTO	16
6.1 Adição de Cimento para Construção com Mistura na Pista	16
6.1.1 Cimento a granel - <i>Espalhamento mecânico</i>	16
6.1.2 Cimento em sacos - <i>Espalhamento manual</i>	18
6.2 Proporcionamento de Cimento para Construção com Usina Central	21
6.2.1 Usina de mistura contínua	21
6.2.2 Usina do tipo argamassadeira	25
7 ADIÇÃO DE ÁGUA	26
7.1 Preliminares	26
7.1.1 Ensaio de compactação	27
7.1.2 Ensaio de determinação do teor de umidade	28
7.2 Cálculo da Quantidade de Água Necessária para Construção com Mistura na Pista	28
7.3 Cálculo da Quantidade de Água para Construção com Mistura Centralizada	32

7.4	Cálculo da Quantidade de Água para Construção com Mistura em Usina Tipo Argamassadeira	34
7.5	Controle do Teor de Umidade na Pista	34
7.5.1	Umídímetro (<i>Speedy</i>)	34
7.5.2	Frigideira	35
7.5.3	Massa específica aparente úmida	35
7.5.4	Álcool	35
8	GRAU DE COMPACTAÇÃO	36
8.1	Ensaio do Frasco de Areia	36
8.1.1	Calibração do frasco de areia	37
8.1.2	Calibração do funil	38
8.2	Ensaio de Óleo	42
8.3	Barrilete Amostrador	43
9	ESPESSURA	44
10	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	47
APÊNDICE I	Relação de Equipamentos de Laboratório de Campo	51
APÊNDICE II	Número Mínimo Recomendado de Ensaio Relativos à Inspeção de Área com Cerca de 1400 m ² (7 m x 200 m)	53
APÊNDICE III	Resumo das Exigências de Controle para Aceitação do Trecho	55
APÊNDICE IV	Método para Determinação do Teor de Cimento em Mistura Fresca de Solo-Cimento	57

SIMBOLOGIA ADOTADA

C	=	<i>comprimento da faixa de construção</i>
c_m	=	<i>teor de cimento em massa</i>
c_v	=	<i>teor de cimento em volume</i>
d	=	<i>distância percorrida</i>
e	=	<i>espessura compactada de solo-cimento</i>
\bar{e}	=	<i>espessura média</i>
e_i	=	<i>espessura individual</i>
f	=	<i>número de faixas de construção</i>
G_c	=	<i>grau de compactação</i>
G_p	=	<i>grau de pulverização</i>
h	=	<i>teor de umidade do solo</i>
h_e	=	<i>umidade de evaporação</i>
h_o	=	<i>teor de umidade ótima</i>
L	=	<i>largura de espalhamento</i>
L_f	=	<i>largura da faixa de construção</i>
N	=	<i>número de sacos de cimento</i>
n	=	<i>número de passadas da irrigadeira, por faixa de construção</i>
P_a	=	<i>massa de água</i>
P_{af}	=	<i>massa de areia no funil</i>
P_{ag}	=	<i>massa de areia gasto para preencher o furo, no ensaio de γ_s</i>
P_c	=	<i>massa de cimento</i>
P_{fc}	=	<i>massa final do conjunto</i>
P_g	=	<i>massa após secagem superficial</i>
P_h	=	<i>massa de solo úmido</i>
P_{hsc}	=	<i>massa úmida de solo-cimento</i>
P_{ic}	=	<i>massa inicial do conjunto</i>

P_r	=	<i>massa retida na peneira nº 4</i>
P_s	=	<i>massa de solo seco</i>
P_{sc}	=	<i>massa de solo-cimento</i>
P_{ssc}	=	<i>massa seca de solo-cimento</i>
P_t	=	<i>massa da amostra representativa</i>
P_1	=	<i>massa da amostra úmida mais aparelho</i>
P_2	=	<i>massa da amostra seca mais aparelho</i>
Q	=	<i>vazão da irrigadeira</i>
Q_a	=	<i>quantidade de água</i>
Q'_a	=	<i>volume total de água necessária</i>
Q_f	=	<i>quantidade de água, por faixa de construção</i>
Q_p	=	<i>quantidade de água lançada, por passada da irrigadeira</i>
S	=	<i>área a ser executada</i>
T	=	<i>tara de um recipiente</i>
t	=	<i>tempo gasto pela irrigadeira no percurso</i>
V	=	<i>volume de solo</i>
v	=	<i>velocidade da irrigadeira</i>
V_c	=	<i>volume de cimento</i>
V_f	=	<i>volume do furo</i>
V_{sc}	=	<i>volume de solo-cimento</i>
γ_{areia}	=	<i>massa unitária da areia</i>
γ_c	=	<i>massa específica aparente do cimento</i>
γ_s	=	<i>massa específica aparente seca do solo-cimento "in situ"</i>
γ_{sc}	=	<i>massa específica aparente seca do solo-cimento</i>

1 INTRODUÇÃO

Antes de ser iniciado o trecho da obra em questão, o engenheiro-fiscal deve rever as folhas de ensaios de laboratório, observando os resultados das pesquisas de jazidas, o projeto e as especificações. O local da obra deve ser inspecionado, no sentido de se estar seguro de que se observe o greide apropriado, e se as camadas de fundação (sub-base, reforço, subleito) estão nas condições previstas no projeto.

2 IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS

As características do solo e os elementos da dosagem de solo-cimento devem constar de uma folha-resumo ou certificado de ensaios, da qual a *Figura 1* é um exemplo típico. Os materiais processados no campo são comparados com os dados de identificação constantes da folha-resumo e com as informações fornecidas por projeto e especificações, o que irá assegurar o uso da quantidade de cimento requerida pelo solo. Se ocorrer uma diferença flagrante entre o solo ensaiado no laboratório e o solo disponível no campo, é óbvio que novos ensaios devem ser efetuados.

3 PREPARAÇÃO DO SUBLEITO

As áreas de subleito instável ou de qualidade suspeita devem ser substituídas ou corrigidas, de maneira a permitir uma compactação adequada das camadas superiores e, posteriormente, um comportamento correto do pavimento quanto às deformações de sua fundação.

Solos instáveis de subleito são geralmente sujeitos à saturação de umidade, podendo ser identificados pela constatação da excessiva deformação que apresentam quando solicitados por um rolo compressor. Manchas de umidade apenas superficiais podem ser eliminadas por aeração; caso atinjam profundidades maiores há necessidade de remoção da camada atingida e sua substituição por material de melhor qualidade, sendo também válida a alternativa de se realizar um tratamento do subleito por um aglomerante hidrófilo, por exemplo, pequenas quantidades de cimento.

F.7 - RESUMO DOS ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO

Interessado: Associação Brasileira de Cimento Portland

TRABALHO Nº 7305/42

Procedência: Estrada Belo Horizonte - Pedro Leopoldo (MG)

AMOSTRA Nº 2

Localização da amostra: Furo 37 - Prof. 0,30 m - 1,90 m - Jaz. única

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO					
GRANULOMETRIA		(%)	ÍNDICES FÍSICOS		(%)
Pedregulho grosso	4,8 mm a 76 mm	10,0	Limite de liquidez		Não determinado
Pedregulho fino	2,0 mm a 4,8 mm	18,0	Limite de plasticidade		NP
Areia grossa	0,42 mm a 2,0 mm	29,0	Índice de plasticidade		NP
Areia fina	0,05 mm a 0,42 mm	21,0	PEDREGULHO GROSSO		
Silte	0,005 mm a 0,05 mm	16,0	Absorção (%)		4,0
Argila	inferior a 0,005 mm	6,0	Massa específica absoluta (g/cm ³)		2,63
Inferior a	0,075 mm	25,0	Classificação segundo a AASHTO (M 145)		A1-b (0)

ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO					
Ensaio de compactação		Ensaio à compressão de corpos-de-prova		Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem	
Teor de cimento em massa (%)	5,0	Teor de cimento em massa	Resistência média à compressão simples aos 7 dias	Teor de cimento em massa	Perda de massa corrigida
Umidade ótima (%)	11,4	(%)	(kPa)	(%)	(%)
Massa específica aparente seca máxima (kg/m ³)	1980	5,0	3000		

Teor de cimento em volume indicado: 6,6 % de acordo com o Método Norma Simplificada "B"

OBSERVAÇÕES: Solo-cimento destinado à sub-base do pavimento de concreto da MG-010

São Paulo, 18 de maio de 1973

Márcio Rocha Pitta
Engenheiro Responsável

FIGURA 1

Devem ser colocadas estacas-guias cerca de 40 cm além dos bordos futuros do pavimento, para controlar a largura do tratamento e orientar os operadores durante a execução.

4 VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Todo o equipamento necessário à construção deve estar na obra e em boas condições de operação, antes do início do processamento.

É interessante — e constitui excelente ajuda no ajustamento do equipamento e do processo construtivo — a execução de um pequeno trecho experimental, com uns 100 m de extensão, quando serão estabelecidas diretrizes gerais para a execução da obra. Alguns pontos importantes do equipamento que devem ser inspecionados antes do início da execução:

- a) *na usina* - correia transportadora; silos de solo; distribuidor de cimento; engrenagens e mancais; lâminas da misturadora; barra de espargimento de água;
- b) *na pista* - motoniveladora; pulvimisturadora; barra distribuidora de água do caminhão-pipa; rolos compactadores; lastro; patas ou pneus.

5 PULVERIZAÇÃO

Alguns solos, principalmente os arenosos, requerem pouca ou nenhuma ação de pulverização antes do início do seu processamento. Todavia, os solos argilosos exigem esse trabalho preliminar. A correta operação de pulverização em solos finos é uma função do controle adequado de umidade, aliado a um equipamento apropriado para a pulverização.

A maioria das especificações fixa que, antes das operações da adição e mistura do cimento ao solo, 80% deste último passe na peneira nº 4 (4,8 mm), excluindo-se os pedregulhos e pedras naturalmente maiores que este diâmetro. O ensaio de grau de pulverização é o meio recomendado para essa verificação.

O ensaio de grau de pulverização (*Figuras 2a, b, c e d*) é feito com uma amostra representativa, de massa igual ou maior que 2000 g, e obedece à seguinte seqüência:

- a) pesa-se a amostra representativa, obtendo-se P_t ;
- b) peneira-se a amostra na peneira nº 4 (4,8 mm), obtendo-se a massa retida nessa peneira, P_r ;
- c) lava-se, na própria peneira nº 4, o material nela retido (de massa P_r), até que todo o material fino não pulverizado seja descartado da porção originalmente retida; obtém-se, então, a massa do material graúdo na amostra representativa (a pesagem deve ser feita após a secagem superficial do material graúdo), P_g ;
- d) calcula-se o grau de pulverização (G_p) pela fórmula:

$$G_p (\%) = \frac{P_t - P_r}{P_t - P_g} \times 100 \quad [1]$$

A inexistência de graúdos no solo ($P_g = 0$), transforma a fórmula [1] em:

$$G_p (\%) = \frac{P_t - P_r}{P_t} \times 100 \quad [2]$$

EXEMPLO:

Dados:

- massa da amostra representativa $P_t = 2500 \text{ g}$
- massa retida na peneira nº 4 $P_r = 914 \text{ g}$
- massa de pedregulho graúdo no solo ($> 4,8 \text{ mm}$) = 250 g



FIGURA 2a - Aspecto do colchão de solo em fase de pulverização



FIGURA 2b - Execução da pesagem da amostra total



FIGURA 2c - Final do peneiramento



FIGURA 2d - Peneira nº 4, material nela retido e material passando

Pedido:

Grau de pulverização e comentário sobre o resultado.

Procedimentos:

- o grau de pulverização será:

$$G_p = \frac{P_t - P_r}{P_t - P_g} \times 100$$

$$G_p = \frac{2500 - 914}{2500 - 250} \times 100 \quad \therefore \quad G_p = 70,5\%$$

Comentário:

Os trabalhos de pulverização devem prosseguir, até $G_p \geq 80\%$. A pulverização do solo pode ser conseguida por:

- *passadas adicionais da pulvimisturadora;*
- *diminuição de sua velocidade;*
- *substituição das lâminas gastas do rotor e verificação dos discos de fricção;*
- *pré-umedecimento e homogeneização do solo no início do processamento.*

Solos contendo teores excessivos de umidade não se misturam facilmente com o cimento; assim, o teor de umidade do solo deve ser avaliado, pelo menos empiricamente, antes da adição do cimento. O teor de umidade do solo antes dessa adição não deve exceder a umidade ótima, sendo aconselhável que esteja pelo menos 2 pontos percentuais abaixo dela.

6 ADIÇÃO DE CIMENTO

6.1 Adição de Cimento para Construção com Mistura na Pista

6.1.1 Cimento a granel - *Espalhamento mecânico*

As espalhadoras de cimento devem operar em velocidade baixa e constante, de modo a se obter um espalhamento uniforme do cimento.

EXEMPLO

Dados:

- teor de cimento em volume (c_v) = 10%
- espessura compactada de solo-cimento ... (e) = 15 cm
- largura do espalhamento (L) = 2,4 m
- carga útil do caminhão = 3400 kg

Pedido:

Quantidade de cimento a ser espalhada (P_c), por metro linear, e distância a ser percorrida pelo caminhão para espalhar o cimento necessário (d), dentro de uma determinada vazão unitária.

Procedimento:

- a) Determinar o volume de solo de uma faixa de 1 m de comprimento:

$$V = 0,15 \cdot 2,4 = 0,36 \text{ m}^3$$

- b) Determinar o volume de cimento:

$$V_c = 0,10 \cdot 0,36 = 0,036 \text{ m}^3$$

c) Determinar a massa de cimento:

$$P_c = \gamma_c \cdot V_c = 1430 \cdot 0,036 \text{ m}^3 = 51,48 \text{ kg/m}$$

d) Determinar a distância percorrida pelo caminhão:

$$d = \frac{3400}{51,48} = 66,0 \text{ m}$$

e) o gráfico da *Figura 3* fornece o consumo de cimento por metro quadrado de pista.

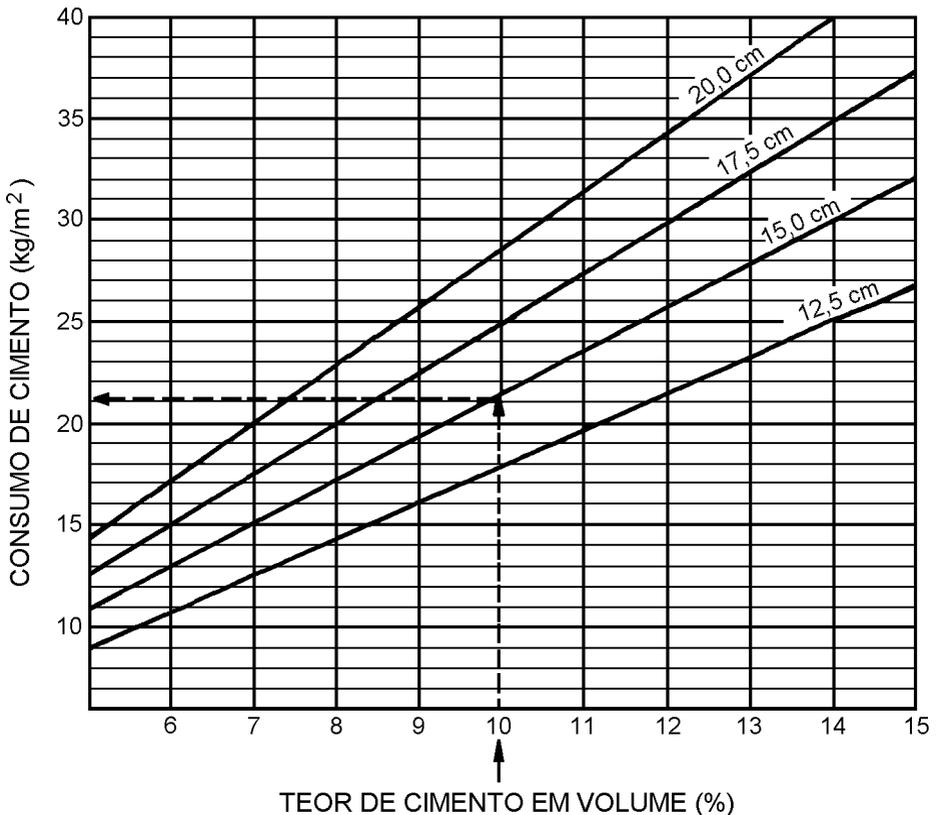


FIGURA 3 - Quantidade de cimento por m² x teor de cimento em volume x espessura compactada

6.1.2 Cimento em sacos - *Espalhamento manual*

EXEMPLO

Dados:

- comprimento da faixa de construção $(C) = 200 \text{ m}$
- largura da faixa de construção $(L_f) = 7,2 \text{ m}$
- teor de cimento em volume $(c_v) = 8\%$
- espessura compactada de solo-cimento $(e) = 15 \text{ cm}$
- massa específica aparente solta do cimento . $(\gamma_c) 1430 \text{ kg/m}^3$

Pedido:

Número de sacos por metro quadrado de pista, espaçamento transversal e longitudinal entre os sacos de cimento.

Procedimento:

Na *Tabela 1*, nota-se que são necessários 0,343 sacos de cimento por metro quadrado de pista. A *Figura 4* fornece o espaçamento longitudinal, fixado o espaçamento transversal entre os sacos de cimento (caso mais comum), ou o inverso.

Analiticamente:

- a) Volume de solo-cimento, por metro de camada compactada:

$$V_{sc} = 1,00 \times 1,00 \times e = 1,00 \text{ m} \times 1,00 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} = 0,15 \text{ m}^3$$

- b) massa de cimento, por m^2 :

$$P_c = c_v \times V_{sc} \times \gamma_c \quad [3]$$

$$P_c = 0,08 \times 0,15 \times 1430 = 17,16 \text{ kg/m}^2$$

TABELA 1 - Quantidade de cimento por metro quadrado x espessura compactada de solo-cimento x teor de cimento em volume

% cimento em volume (c_v)	Espessura compactada (cm)							
	12,5		15,0		17,5		20,0	
	kg	sacos	kg	sacos	kg	sacos	kg	sacos
4	7,15	0,143	8,58	0,171	10,01	0,200	11,44	0,228
5	8,94	0,178	10,72	0,214	12,51	0,250	14,30	0,286
6	10,72	0,214	12,87	0,257	15,01	0,300	17,16	0,343
7	12,51	0,250	15,01	0,300	17,51	0,350	20,02	0,400
8	14,30	0,286	17,16	0,343	20,02	0,400	22,88	0,457
9	16,08	0,321	19,30	0,386	22,52	0,450	25,74	0,514
10	17,87	0,357	21,45	0,429	25,02	0,500	28,60	0,572
11	19,66	0,393	23,59	0,471	27,52	0,550	31,46	0,629
12	21,45	0,429	25,74	0,514	30,03	0,600	34,32	0,686

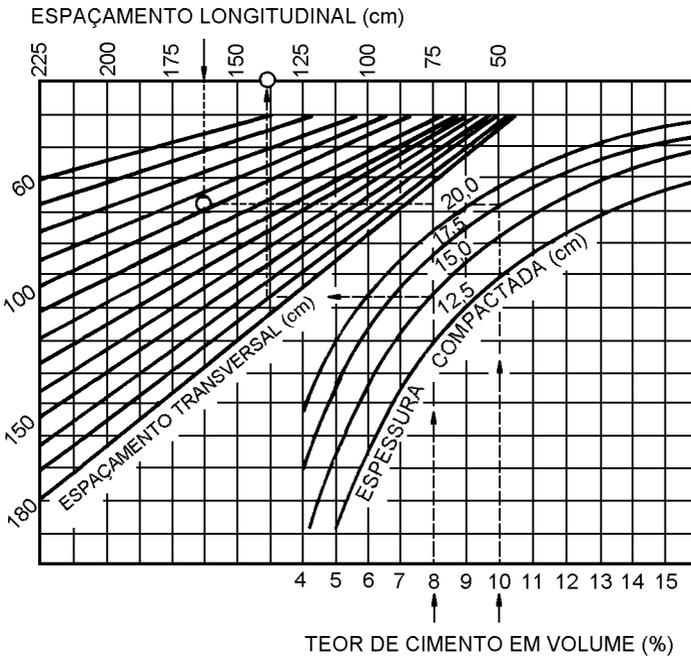


FIGURA 4 - Espaçamento dos sacos de cimento x teor de cimento em volume x espessura compactada

c) Número necessário de sacos de cimento para a área total:

$$N = \frac{P_c \times C \times L_f}{50 \text{ kg}} \quad [4]$$

$$N = \frac{17,16 \times 200 \times 7,2}{50} = 494 \text{ sacos de cimento}$$

d) Dividindo a faixa total em 3 subfaixas de 2,4 m de largura cada, o número de sacos por fileira será:

$$\frac{N}{6} = \frac{494}{6} \cong 83 \text{ sacos (para mais)}$$

e) Para o subtrecho de 200 m de comprimento, a distância entre os centros de dois sacos de cimento consecutivos será:

$$2 L_f = \frac{200}{83} \cong 2,40 \text{ m}; \quad e \quad L_f = \frac{2,40}{2} = 1,20 \text{ m}$$

f) A disposição esquemática será a da *Figura 5*.

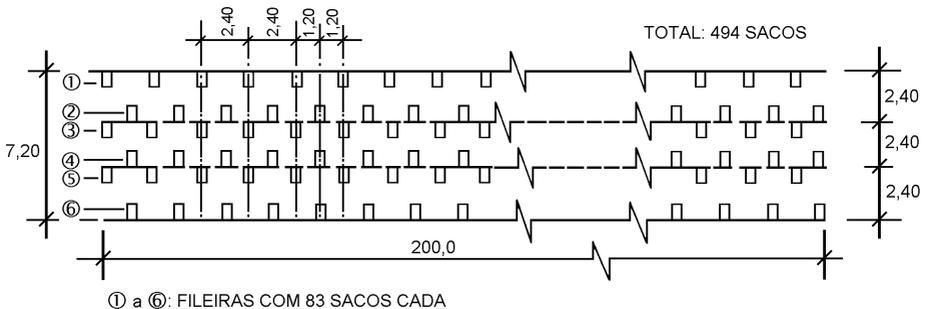


FIGURA 5 - Distribuição esquemática de sacos de cimento

6.2 Proporcionamento de Cimento para Construção com Usina Central

É dominante, hoje, a tendência de utilizar usinas centrais na construção de solo-cimento. Equipadas com misturadoras do tipo *pug-mill*, facilitam sobremaneira as operações de mistura *solo-areia*, ou *solo-agregado*, com cimento.

O uso de tal equipamento exige que se proporcionem o cimento e o solo antes de entrarem na câmara de mistura. Assim, faz-se necessário calibrar a usina, da maneira que segue:

6.2.1 Usina de mistura contínua

Opera-se inicialmente apenas com o solo caindo na correia transportadora. Determina-se a massa de solo por um comprimento qualquer da correia, por exemplo, 5 m; com a determinação da umidade do solo, calcula-se a massa seca.

A usina é a seguir operada somente com o cimento caindo na correia transportadora; quando se usa um silo alimentador de correia devem ser feitas várias tentativas, com diferentes aberturas do alimentador de cimento. A massa do cimento contido na unidade de comprimento da correia é determinada, então, para as várias aberturas do alimentador. Desenha-se um gráfico de calibração, relacionando as aberturas do alimentador de cimento com as massas de cimento por unidade de comprimento (adotada) da correia transportadora. Assim, para uma constante vazão de solo, pode-se determinar a abertura que fornecerá a vazão de cimento requerida, por relacionamento entre a massa de cimento e a massa de solo seco. É aconselhável que cada ponto do gráfico corresponda ao valor médio obtido em, pelo menos, 3 determinações.

EXEMPLO

Dados:

- teor de umidade do solo (h) = 5%
- teor de cimento em massa (c_m) = 6%

Pedido:

Abertura do silo de alimentação de cimento.

Procedimento:

- a) Determinar a massa de solo numa extensão de 5 m da correia transportadora. Para este exemplo, considerar um valor de 300,00 kg para o solo úmido (P_h);
- b) Converter a massa de solo úmido em massa de solo seco:

$$P_s = \frac{P_h}{100 + h} \times 100 \quad [5]$$

$$P_s = \frac{300,0}{100 + 5} \times 100 = 285,7 \text{ kg}$$

- c) A quantidade necessária de cimento será:

$$P_c = c_m \times P_s \quad [6]$$

$$P_c = 0,06 \times 285,7 = 17,14 \text{ kg/m de correia transportadora;}$$

- d) Operar a usina somente com o cimento, e pesar o cimento depositado em 5 m de correia transportadora, para quatro diferentes aberturas do silo de cimento; por exemplo:

$$2,0 \text{ cm de abertura} - P_c = 10,00 \text{ kg de cimento} \\ \text{(média de 3 determinações)}$$

$$3,5 \text{ cm de abertura} - P_c = 17,50 \text{ kg de cimento} \\ \text{(média de 3 determinações)}$$

$$5,0 \text{ cm de abertura} - P_c = 25,00 \text{ kg de cimento} \\ \text{(média de 3 determinações)}$$

$$6,5 \text{ cm de abertura} - P_c = 31,50 \text{ kg de cimento} \\ \text{(média de 3 determinações);}$$

- e) Colocar estes resultados em um gráfico, com as aberturas em abscissas e as massas em ordenadas. A *Figura 6* mostra o gráfico resultante para o presente exemplo;

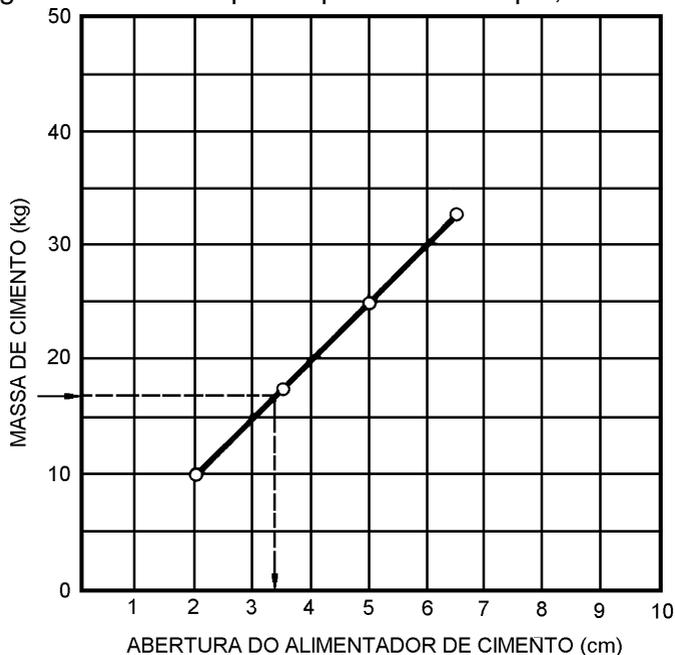


FIGURA 6 - Gráfico de calibração da usina

- f) A partir do gráfico, selecionar a abertura que fornecerá 17,14 kg de cimento por metro linear de correia, correspondente a 6% de teor de cimento em massa. No caso presente, a abertura requerida seria de 3,43 cm;
- g) Verificar, por meio de pesagem direta em 5 m de correia, se a quantidade de cimento está, realmente, sendo a requerida.

O mesmo procedimento pode ser usado quando o alimentador é um parafuso sem fim com velocidade de rotação variável. Basta construir um gráfico *revoluções por minuto x quilos de cimento por unidade de comprimento da correia transportadora*.

Outro processo de calibração da usina de mistura contínua é determinar, separadamente, as quantidades de solo e de cimento que alimentam o misturador, durante um certo tempo — geralmente, 60 segundos. Primeiro, o solo é lançado no misturador durante esse período de tempo, descarregado num caminhão, e pesado. Então, o cimento é coletado diretamente do alimentador, pelo mesmo espaço de tempo, e reajustada a abertura, se necessário, repetindo-se as operações até que a proporção exata entre cimento e solo seja atendida.

A calibração da usina deve ser efetuada sempre que o ritmo de serviço permitir. Usinas excepcionalmente precisas admitem 2 verificações semanais, no mínimo; em certos casos a verificação deve ser diária. Como recomendação adicional, deve-se evitar que a usina seja paralisada freqüentemente durante o dia de serviço, pois isso acarreta uma constante descalibração, obrigando a uma ajustagem amiudada.

O controle do teor de cimento, no solo-cimento usinado, tem sido feito através do ensaio químico de titulação, segundo a norma ASTM D 2901. A prática corrente é executar a verificação de hora em hora, com 2 amostras de cada vez, no mínimo. O ensaio tem um inconveniente sério, qual seja, a pequena quantidade de amostra por ensaio — 5 g, quarteadas de 500 g originais; esse inconveniente pode ser minimizado pela calibração cuidadosa e freqüente do solo-cimento usinado e das soluções empregadas.

A tolerância admitida na variação do teor de cimento é tomada na faixa de 10% sobre o valor especificado, para mais ou menos, em quase todos os órgãos rodoviários.

No caso de solo-cimento endurecido, pode-se empregar o método ASTM D 806, aplicável ao caso.

No apêndice, apresenta-se um método-alternativa; um método para a determinação do teor de cimento em misturas de solo-agregado é objeto da publicação *Solo-brita tratado com cimento: método para determinação do teor de cimento em misturas frescas*, da ABCP.

6.2.2 Usina do tipo argamassadeira

Quando o solo-cimento é misturado numa usina desse tipo, todos os materiais são pesados para cada mistura, antes de serem transferidos para o misturador *pug-mill*.

EXEMPLO

Dados:

- teor de cimento em massa (c_m) = 5%
- teor de umidade ótima (h_o) = 10%
- teor de umidade natural do solo (h) = 4%

Pedido:

Massas de solo, cimento e água por betonada.

Procedimento:

Cálculo para betonada de 500 kg

a) Proporções e percentagens

- solo seco	=	100,0%
- cimento	=	5,0%
- água: $10\% \times (100\% + 5\%)$	=	<u>10,5%</u>
Total		115,5%

b) Massa de solo seco:

$$P_s = \frac{500}{1,155} \dots\dots\dots = 432,9 \text{ kg}$$

c) Massas para a betonada, baseadas no solo seco:

- cimento: $P_c = 0,05 \times 432,9 \dots\dots\dots = 21,6 \text{ kg}$

- água: $P_a = 0,105 \times 432,9 \dots\dots\dots = \overline{45,5 \text{ kg}}$

- massa total da mistura $\dots\dots\dots = 500,0 \text{ kg}$

d) Água levada pelo solo, por betonadas:

$$P_a = 0,04 \times 432,9 = 17,3 \text{ kg}$$

e) Massas corrigidas para o solo úmido:

- cimento: $\dots\dots\dots P_c = 21,6 \text{ kg}$

- solo úmido: $\dots\dots\dots P_h = 432,9 + 17,3 = 450,2 \text{ kg}$

- água $\dots\dots\dots P_a = 45,5 - 17,3 = 28,2 \text{ l}$

$$(Y_{\text{água}} = 1)$$

Numa usina-betoneira o solo e o cimento devem ser misturados antes da adição de água. É interessante manter anotações contínuas das massas de solo e cimento usados, para controle e comparação.

7 ADIÇÃO DE ÁGUA

7.1 Preliminares

Um dos quatro parâmetros de controle para o solo-cimento é o teor de umidade. A umidade ótima determinada no laboratório é usada como referência quando se inicia a construção. Ao se concluir a mistura úmida (execução com mistura na pista) ou o espalhamento da mistura (execução com central), faz-se um ensaio de compactação na energia normal (conforme o método preconizado pelo projeto 16:5.2-3, da ABNT), com uma amostra representativa do material. Isso determina a umidade

ótima e a densidade máxima a serem usadas no controle de execução do subtrecho a ser construído. Os resultados podem diferir dos valores de laboratório, devido à variação do solo, ou aos efeitos de hidratação parcial do cimento durante o período de mistura.

7.1.1 Ensaio de compactação

No ensaio, a mistura solo-cimento é disposta em 3 camadas, dentro de um cilindro metálico com o volume útil de, aproximadamente, 1000 cm³. Cada camada é compactada por 25 golpes verticais de um soquete padronizado, com 2,5 kg de massa e diâmetro de 5 cm, caindo livremente de uma altura igual a 30,5 cm (*Figuras 7a e 7b*).



FIGURA 7a - Equipamento para ensaio de compactação



FIGURA 7b - Equipamento para ensaio de compactação

A espessura das camadas é controlada de tal modo que a terceira camada atinja, quando compactada, cerca de 1 cm acima do topo do molde, para dentro do colar.

Depois de ser removido o colar, o solo-cimento é rasado rente ao topo do molde.

A seguir, determina-se a massa do cilindro com o corpo-de-prova. Essa massa é determinada para diferentes teores de umidade, da maneira descrita.

Os teores de umidade são calculados, bem como as massas secas dos corpos-de-prova e as massas específicas aparentes secas correspondentes. Relacionando-se num gráfico os teores de umidade (em abscissas) e as massas específicas aparentes secas (em ordenadas), obtém-se a curva de compactação (*Figura 8*). O teor ótimo de umidade é aquele em que a maior massa específica aparente é obtida no ensaio; é então chamada *massa específica aparente seca máxima*, e deverá aproximadamente, ser obtida na execução do solo-cimento.

7.1.2 Ensaio de determinação do teor de umidade

Para estimar a quantidade de água necessária para a execução de solo-cimento deve-se determinar a umidade de solo ou da mistura, a partir de amostras representativas.

As amostras são pesadas úmidas, depois postas a secar completamente em estufa a 105°C - 110°C, e pesadas após a secagem. O teor de umidade será calculado por:

$$h \text{ (em \%)} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \times 100 = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad [7]$$

Para o ensaio realizado no campo, as amostras representativas que contenham pedregulho retido na peneira de 4,8 mm (nº 4) devem pesar, pelo menos, 300 gramas; as amostras que não possuam pedregulho podem pesar cerca de 70 gramas.

7.2 Cálculo da Quantidade de Água Necessária para Construção com Mistura na Pista

A quantidade de água necessária para elevar a mistura solo-cimento até a umidade ótima é calculada tomando em consideração esta última, a umidade higroscópica do solo e a umidade de evaporação (para compensar as perdas de água durante as operações de mistura e compactação). A umidade ótima e a de evaporação são referidas à mistura solo-cimento; a umidade higroscópica é referida ao solo puro.

F.3 - ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO

TRABALHO Nº: 7303/39

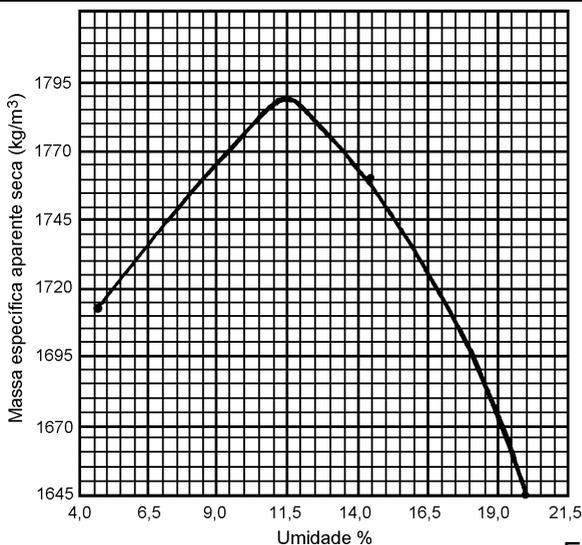
AMOSTRA Nº: 1

DADOS DO ENSAIO	
% de solo graúdo	-
Absorção do solo graúdo	-
Umidade do solo miúdo	7, 2%
Teor de cimento	6%

DADOS DOS APARELHOS		
Soquete nº:	1	
Cilindro nº:	4	
Volume do cilindro	0, 996	dm ³
Massa do cilindro	2374	g

COMPOSIÇÃO DA MISTURA			
Massa total do solo (g)	Solo graúdo (g) Massa seca: - Massa úmida: -	Solo miúdo (g) Massa seca: 2500 Massa úmida: 2680	Massa do cimento (g) 150
2500			

PONTO	Massa do corpo-de-prova úmido + cilindro (g)	Massa do corpo-de-prova úmido (g)	Determinação do teor de umidade							Massa do corpo-de-prova seco (g)	Massa específica aparente seca do corpo-de-prova (kg/m ³)
			Cáps.	Massa bruta úmida (g)	Massa bruta seca (g)	Tara da cápsula (g)	Massa da água (g)	Massa do solo seco (g)	Teor de umidade (%)		
Nº	(g)	(g)	Nº	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(kg/m ³)
1	4,160	1786	128	109,80	106,15	27,71	3,65	78,44	4,7	1706	1713
2	4,255	1881	141	115,84	109,43	26,89	6,41	82,54	7,8	1745	1752
3	4,355	1981	124	117,87	108,67	26,20	9,20	82,47	11,2	1781	1788
4	4,380	2006	110	133,53	120,25	28,20	13,28	92,05	14,4	1753	1760
5	4,340	1966	25	113,00	96,80	15,65	16,20	81,15	20,0	1638	1645
6											
7											



RESULTADOS	
γ_{max} =	1790 kg/m ³
H_{ot} =	11,5 %

Data inicial 14/março de 1973

Data final 15/março de 1973

Operador _____

Calculista Celso

Revisor Paulo Eugênio

Paulo Eugênio

FIGURA 8

EXEMPLO

Dados:

- umidade ótica do solo-cimento (h_o) = 14%
- umidade de evaporação (h_e) = 1%
- umidade higroscópica do solo (h) = 10%
- teor de cimento em volume (c_v) = 10%
- massa específica aparente seca do solo-cimento (γ_{sc}) = 1800 kg/m³
- massa específica aparente solta do cimento (γ_c) = 1430 kg/m³
- espessura compactada do solo-cimento . (e) = 0,15 m
- área a ser executada (S) = 1440 m²
- comprimento da faixa de trabalho (C) = 200 m
- largura da faixa de trabalho (L_f) = 2,4 m
- número de faixas (f) = 3
- velocidade da irrigadeira (v) = 60 m/min
- vazão da irrigadeira (Q) = 321 ℓ/min

Pedido:

Litros de água para o subtrecho total, e número de passadas da irrigadeira (por faixa).

Procedimento:

- a) A quantidade de água, por metro quadrado, será:

$$Q_a = P_{sc} (h_o + h_e) - P_s \cdot h \quad [8]$$

sendo:

$$V_{sc} = 1,0 \times 1,0 \times 0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$P_{sc} = V_{sc} \cdot \gamma_{sc}$$

$$P_{sc} = 0,15 \times 1800 = 270,00 \text{ kg/m}^2$$

$$P_c = V_c \cdot \gamma_c = c_v \cdot V_{sc} \cdot \gamma_c$$

$$P_c = 0,10 \times 0,15 \times 1430 = 21,45 \text{ kg/m}^2$$

$$P_s = P_{sc} - P_c$$

$$P_s = 270,00 - 21,45 = 248,55 \text{ kg/m}^2$$

temos:

$$Q_a = 270,00 (0,14 + 0,01) - 248,55 \times 0,10$$

$$Q_a = 15,65 \text{ l/m}^2 \text{ (tendo em vista que } \gamma_{\text{água}} = 1)$$

b) O volume total de água necessário é:

$$Q'_a = Q_a \times S \quad [9]$$

$$Q'_a = 15,65 \times 1440$$

$$Q'_a \cong 22500 \text{ l}$$

c) O número de passadas da irrigadeira, por faixa, para distribuir a água necessária será:

- quantidade de água por faixa:

$$Q_f = \frac{Q'_a}{f} = \frac{22500}{3} = 7500 \text{ l} \quad [10]$$

- tempo gasto pela irrigadeira para percorrer a faixa:

$$t = \frac{C}{v} = \frac{200}{60} = \frac{10}{3} \text{ minutos} \quad [11]$$

- quantidade de água lançada em uma passada da irrigadeira:

$$Q_p = Q \times t = 321 \times \frac{10}{3} = 1070 \ell \quad [12]$$

- número de passadas, por faixa, para distribuir a água necessária:

$$n = \frac{Q_f}{Q_p} = \frac{7500}{1070} = 7 \text{ passadas / faixa} \quad [13]$$

- o cálculo pode ser sintetizado pela fórmula:

$$n = \frac{Q'_a \times v}{f \times Q \times C} \quad [14]$$

7.3 Cálculo da Quantidade de Água para Construção com Mistura Centralizada

EXEMPLO - Usina Central

Dados:

- teor de cimento, em massa (c_m) = 6%
- umidade ótima do solo-cimento (h_o) = 10%
- umidade higroscópica do solo (h) = 5%

- velocidade da correia transportadora = 91,5 m/min
- massa do solo (na umidade higroscópica)
em 1 m da correia transportadora = 47 kg
- umidade de evaporação = 2%

Pedido:

Número *aproximado* de litros de água por minuto (vazão requerida).

Procedimento:

- a) Converter a massa úmida de solo (em 1 m de correia, neste exemplo) em massa de solo seco:

$$\frac{47,0}{100+5} \times 100 = 44,76 \text{ kg}$$

- b) Calcular a quantidade de cimento requerida:

$$0,06 \times 44,76 = 2,69 \text{ kg}$$

- c) Calcular a massa de solo e cimento em 1 m de correia:

$$44,76 + 2,69 = 47,45 \text{ kg}$$

- d) Calcular a quantidade de mistura solo-cimento por minuto:

$$\frac{47,45 \times 91,5}{1} = 4341,67 \text{ kg/minuto}$$

- e) Calcular o número de litros necessários por minuto, para 1,0% de umidade:

$$\frac{0,01 \times 4341,67}{1} = 43,4 \text{ l/minuto}$$

- f) Calcular a vazão *aproximada* (litros por minuto) necessária para levar a mistura até a umidade ótima:

$$(10 - 5 + 2) \times 43,4 = 303,8 \text{ ℓ/minuto}$$

7.4 Cálculo da Quantidade de Água para Construção com Mistura em Usina Tipo Argamassadeira

Os cálculos são os mesmos mostrados no **Exemplo** da seção 6.2.2.

7.5 Controle do Teor de Umidade na Pista

O controle da umidade do solo-cimento antes da compactação pode ser feito por métodos diversos. Os mais empregados são:

- umidímetro (*speedy*);
- frigideira;
- densidade úmida;
- álcool.

A seguir apresentamos a descrição de cada um deles.

7.5.1 Umidímetro (*speedy*)

O umidímetro — mais conhecido por *speedy* — é um aparelho constituído por uma câmara e um manômetro ligado a ela. Dentro da câmara coloca-se o solo (ou solo-cimento) úmido e uma certa quantidade de carbureto de cálcio. Após o fechamento da câmara, providencia-se a mistura íntima dos dois materiais, o que provocará a reação da água do solo com o carbureto, produzindo gás acetileno. O gás aciona o manômetro, o qual indica a percentagem relativa de água quanto à massa de solo seco utilizada — por leitura direta ou com o auxílio de tabelas apropriadas.

O *speedy* é de rápida utilização devendo ser calibrado para cada tipo de solo que se utilizar na obra, por meio de uma correlação entre a umidade fornecida por ele e a fornecida pela estufa elétrica.

7.5.2 Frigideira

O método de determinação da umidade pela secagem do solo dentro de uma frigideira apresenta o inconveniente do julgamento parcial do operador, que acarreta erros não sistemáticos.

Além deste, tem a desvantagem de exigir um fogareiro aceso no campo.

7.5.3 Massa específica aparente úmida

O processo que a utiliza é também expedito. Molda-se, no cilindro de compactação, um corpo-de-prova seguindo as mesmas condições do ensaio de compactação. Determina-se a massa específica aparente úmida, que, estando próxima da massa específica aparente úmida máxima, garante estar a umidade também próxima da ótima de compactação. Exige grande prática e discernimento do operador.

7.5.4 Álcool

O processo do álcool consiste em tomar uma pequena amostra (em torno de 40 g) e colocá-la num recipiente de alumínio crivado de pequenos furos na parte do fundo (diâmetro de 1 mm, no máximo) ; este recipiente repousa, por meio de três pernas, num pratinho também de alumínio. Certa quantidade de álcool é distribuída na amostra e o seu calor de combustão faz evaporar a água nela contida. O teor de umidade será:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - T} \times 100, \text{ em (\%)}$$

em que:

P_1 = massa da amostra úmida mais o aparelho, g;

P_2 = massa da amostra seca mais o aparelho, g; e,

T = tara do aparelho, g.

Este método de ensaio não dará resultado satisfatório se o teor de matéria orgânica no solo for relativamente alto; com efeito, o resultado ficará alterado devido à combustão de partículas de matéria orgânica.

8 GRAU DE COMPACTAÇÃO

A durabilidade de uma mistura de solo-cimento, bem como a sua resistência à compressão simples, dependem intensamente da compactação que a camada do material recebe ao ser executada.

O controle de compactação faz-se através da verificação da massa específica aparente seca da camada pronta, quer dizer, logo após terminada a operação de compactação. No entanto, a critério da fiscalização, é possível ampliar esse prazo.

Os métodos mais empregados na determinação dessa densidade são:

- ensaio do frasco de areia;
- ensaio de óleo;
- barrilete amostrador.

8.1 Ensaio do Frasco de Areia

É o mais conhecido e difundido, na prática. As *Figuras 9a* e *9b* mostram pormenores do equipamento e do ensaio.



FIGURA 9a - Equipamento para o ensaio do frasco de areia



FIGURA 9b - Equipamento para o ensaio do frasco de areia

Utiliza-se um frasco contendo areia limpa, seca, com granulometria entre as peneiras nº 20 (0,85 mm) e nº 30 (0,50 mm); quanto mais uniforme a areia, menor será a dispersão dos resultados.

8.1.1 Calibração do frasco de areia

- a) determinar a massa do frasco completo (com o funil), vazio;
- b) encher o frasco com a areia adequada, colocando-a através do funil, sem vibrar ou balançar o conjunto. Pesá-lo;
- c) determinar o volume do frasco, enchendo-o com água. Pesá-lo, e calcular a massa de água empregada.

EXEMPLO

(1) Massa do conjunto, cheio de areia = 8,000 kg

(2) Massa do conjunto vazio = 3,500 kg

(3) Massa da areia = (1) - (2) = 4,500 kg

(4) Massa do conjunto, cheio de água = 6,310 kg

(5) Massa da água = (4) - (2) = 2,810 kg

(6) Volume do frasco = (5) ÷ 1,000 kg/m³ = 2,810 m³

(7) Massa unitária da areia (3) ÷ (6) = 1600 kg/m³

8.1.2 Calibração do funil

Basta colocar o conjunto (com o frasco cheio de areia) sobre uma bandeja, abrindo a válvula, de modo que a areia escoe sem ser forçada por vibração ou sacudidelas; fechar a válvula ao notar que a areia parou de fluir. Supondo:

- a) massa inicial do conjunto cheio;
- b) massa final do conjunto mais areia restante;
- c) massa da areia do funil = (1) - (2).

O ensaio tem a seguinte descrição:

- a) abre-se um buraco na camada pronta, com o auxílio da bandeja perfurada como guia, cuidando-se de recolher o material retirado, sem perda. Com a pesagem desse material, obtém-se a massa do solo-cimento úmido (P_h). Retiram-se 2 cápsulas para determinação de umidade. O buraco deve ter 10 cm de diâmetro por uma profundidade igual à profundidade da camada em estudo.
- b) A seguir, o conjunto do frasco de areia é colocado sobre o buraco feito anteriormente e abre-se a válvula controladora da saída da areia. Deve-se cuidar que o fluxo de areia seja contínuo, e ocorra sem vibração do conjunto e na ausência de passagem de equipamento pesado na região do ensaio. Vai-se obter, desse modo, o volume do furo, como se mostra nos cálculos a seguir.

c) se o solo for de alta incidência de pedregulho, determinar a percentagem de material retido na peneira nº 4 (4,8 mm), no material retirado do furo;

d) cálculos:

- umidade do material retirado: *Fórmula [7]*

- massa seca do material retirado: *Fórmula [5]*

- percentagem retirada na peneira nº 4 (4,8 mm):

$$\% \text{ retida (4,8 mm)} = \frac{\text{massa retida (4,8 mm)}}{\text{massa total da amostra}} \times 100 \quad [15]$$

- volume do furo:

$$V_f = \frac{\text{massa da areia usada para encher o furo, em dm}^3}{\text{massa unitária da areia}} \quad [16]$$

- massa específica aparente seca do solo-cimento, *in situ*:

$$\gamma_s = \frac{\text{massa seca do material retirado}}{\text{volume do furo}}, \text{ em g/dm}^3 \quad [17]$$

EXEMPLO 1

Dados:

- massa inicial do conjunto (P_{ic}) = 8,000 kg
- massa final do conjunto (P_{fc}) = 4,415 kg
- massa da areia no funil (P_{af}) = 1,660 kg
- massa úmida média das cápsulas de umidade (P_h) = 0,753 kg
- massa seca média das cápsulas de umidade (P_s) = 0,685 kg

- massa unitária da areia (γ_{areia}) = 1600 kg /m³
- massa úmida do material retirado (P_{hsc}) = 2,483 kg

Pedido:

Massa específica aparente seca do solo-cimento.

Procedimento:

- a) Teor de umidade do solo-cimento:

$$h = \frac{0,753 - 0,685}{0,685} \times 100 = 9,93\%$$

- b) Massa seca do solo-cimento retirado do furo:

$$P_{ssc} = \frac{2,483}{100 + 9,93} \times 100 = 2,259 \text{ kg}$$

- c) Massa da areia gasta no enchimento do furo:

$$P_{ag} = 8,000 - 4,415 - 1,660 = 1,925 \text{ kg}$$

- d) Volume do furo:

$$V_f = \frac{1,925}{1600} = 0,001203 \text{ m}^3$$

- e) Massa específica aparente seca do solo-cimento, *in situ*:

$$\gamma_s = \frac{2,259}{0,001203} = 1878 \text{ kg/m}^3$$

- f) No caso de um solo altamente pedregulhoso é interessante e aconselhável proceder-se a uma correção da massa específica aparente encontrada no campo, já que, em geral, ocorrem diferenças sensíveis, entre esta e aquela de laboratório, por causa da natureza do material. A *Figura 10* mostra como efetuar essa correção.

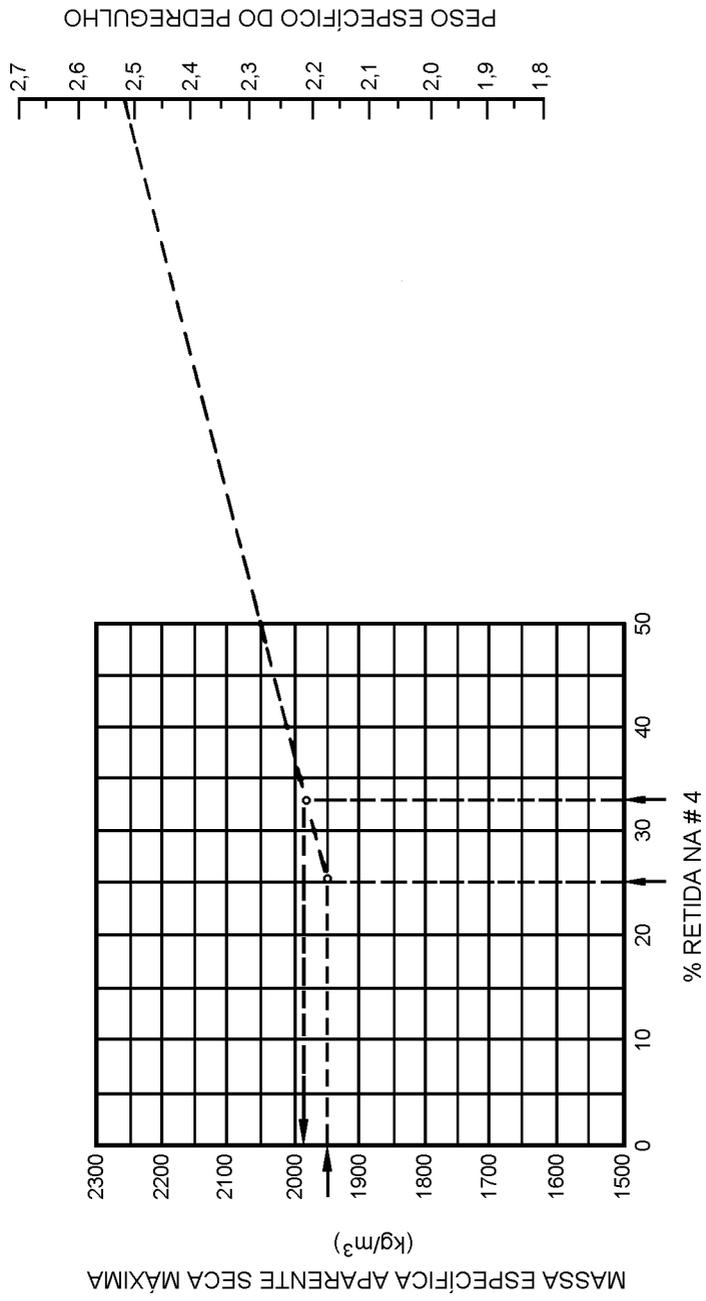


FIGURA 10 - Ábaco para correção da massa específica aparente seca máxima devido a variação no teor de pedregulho

EXEMPLO 2

Dados:

- percentagem de pedregulho graúdo no ensaio de compactação de campo ($> 4,8 \text{ mm}$) = 25%
- percentagem de pedregulho graúdo no material retirado do furo ($> 4,8 \text{ mm}$) = 33%
- massa específica do pedregulho = 2,52
- massa específica aparente seca máxima, no ensaio de compactação de campo = 1950 kg/m^3

Pedido:

Massa específica aparente seca corrigida, na amostra contendo 33% de pedregulho.

Procedimento:

Na *Figura 10*, marcar a interseção de 1950 kg/m^3 com 25% de pedregulho graúdo; o ponto encontrado é ligado linearmente com o peso específico 2,52; onde essa linha reta cortar a vertical tirada por 33% de pedregulho, traçar uma horizontal para a esquerda e determinar a massa específica aparente seca corrigida. No presente exemplo, $\gamma_s \text{ corrigida} = 1983 \text{ kg/m}^3$.

Esta é a massa específica aparente seca, corrigida teoricamente, no ensaio de compactação de campo, para uma amostra contendo 33% de pedregulho graúdo (ao invés de 25%). A massa específica aparente seca *in situ* deve, então, ser comparada com esta, e não com a anterior.

8.2 Ensaio de Óleo

Empregado raramente, nos dias de hoje. É, praticamente, de execução igual ao ensaio de areia, mudando o material de enchimento do

furo. Tem a desvantagem de ser menos precisa a determinação do volume do furo, devido ao fato de que o óleo carrega bolhas de ar e, ainda, pode ser parcialmente absorvido pelas paredes do furo ensaiado.

8.3 Barrilete Amostrador

O ensaio consiste na cravação de um recipiente metálico, de volume conhecido, na camada de solo-cimento compactado. Por pesagem e eliminação da tara, seguida da determinação da umidade do material, é possível conhecer a sua massa específica aparente seca. Um dos inconvenientes do método é o amolgamento do solo-cimento ao ser penetrado pelo barrilete, o que tende a aumentar a quantidade de material amostrado e, em conseqüência, aumentar a massa específica aparente; logo, é contra a segurança. Uma outra impropriedade é a obrigatoriedade de executar o ensaio logo após o término das operações de compactação da camada, pois, após algum tempo de endurecimento, é virtualmente impossível a cravação do amostrador.

O grau de compactação (G_c) é calculado a partir dos dados encontrados no ensaio de compactação de campo (seção 7.1.1 e Figuras 7a e 7b) e em um dos ensaios de verificação de massa específica aparente *in situ*, descritos anteriormente.

Chamando a massa específica aparente seca máxima encontrada no ensaio de campo de γ_{sc} , e a massa específica aparente seca *in situ* de γ_s , o grau de compactação (G_c) será:

$$G_c = \frac{\gamma_s}{\gamma_{sc}} \times 100, \text{ em } \% \quad [18]$$

EXEMPLO

Dados:

- massa específica aparente seca máxima do solo-cimento (γ_{sc}) = 2000 kg/m³

- massa específica aparente *in situ*: método do frasco de areia
(γ_s) = 1920 kg/m³

Pedido:

Grau de compactação da camada de solo-cimento.

Procedimento:

$$G_c = \frac{1920}{2000} \times 100 \quad \therefore \quad G_c = 96,0\%$$

O grau de compactação a ser atingido varia com as especificações particulares de cada organismo rodoviário; a ABCP recomenda um mínimo de 95% da massa específica aparente máxima obtida no ensaio de compactação de campo (energia normal).

9 ESPESSURA

É necessário verificar a espessura da camada do solo-cimento em duas oportunidades:

- imediatamente após a mistura (construção com a mistura na pista) ou após o espalhamento (mistura em usina) — é a chamada espessura do colchão fofo;
- após o término das operações de acabamento — verificação da espessura compactada ou da camada acabada.

O usual é fazer essas verificações do seguinte modo:

- a) *Espessura do colchão fofo*: nos locais onde se retirou amostra para ensaio de grau de pulverização, introduzir régua metálica, graduada em milímetros, e proceder à leitura, tendo o cuidado óbvio de tomar como referências as extremidades da camada de solo-cimento (ou seja, o topo da base e o início da sub-base);

- b) *Espessura compactada*: nos furos onde se efetuou o ensaio do frasco de areia, para determinação da densidade *in situ*, com o mesmo processo e cuidados descritos acima.

Costuma-se, ainda, verificar a espessura por meio de gabaritos e pelo nivelamento, ou, mais modernamente, pela medida de deformações.

A ABCP recomenda as seguintes tolerâncias para a espessura compactada:

- para furos individuais:

$$(1 - 0,12) \times e \leq e_i \leq (1 + 0,12) \times e$$

- para a média dos furos:

$$(1 - 0,08) \times e \leq e_i \leq (1 + 0,08) \times e$$

EXEMPLO

Num trecho com 7,2 m x 200,0 m foram efetuadas as seguintes medidas de espessura final (em cm):

$$e_1 = 16,2$$

$$e_6 = 15,2$$

$$e_2 = 14,7$$

$$e_7 = 13,0$$

$$e_3 = 13,4$$

$$e_8 = 13,6$$

$$e_4 = 16,2$$

$$e_9 = 15,0$$

$$e_5 = 15,1$$

$$e_{10} = 14,8$$

Sabendo-se que a espessura de projeto é $e = 15,0$ m, calcular a tolerância e comentar o resultado.

Procedimento:

a) Média dos furos:

$$\bar{e} = \frac{\sum e_i}{n}$$

$$\bar{e} = \frac{147,2}{10}$$

$$\bar{e} = 14,72 \text{ cm}$$

b) Tolerância:

■ sobre a média:

$$e \times (1 \pm 0,08) \quad \left| \begin{array}{l} 15,0 \times 1,08 = 16,20 \text{ cm} \\ 15,0 \times 0,92 = 13,80 \text{ cm} \end{array} \right.$$

$$16,20 \geq e \geq 13,80$$

$$16,20 \geq 14,72 \geq 13,80$$

aceitar, quanto à média.

■ sobre os furos individuais:

$$e \times (1 \pm 0,12) \quad \left| \begin{array}{l} 15,0 \times 1,2 = 16,80 \text{ cm} \\ 15,0 \times 0,88 = 13,20 \text{ cm} \end{array} \right.$$

$$13,20 \leq e_i \leq 16,80$$

Portanto: Proceder a nova amostragem na zona do ponto nº 7 ($e_7 < 13,20 \text{ cm}$) para delimitar a área sob suspeita, confirmando ou não a falta de espessura, antes de aceitar ou rejeitar o subtrecho correspondente.

10 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O controle de obras de solo-cimento pela resistência à compressão simples é bastante difundido no País, apesar de ser a referida resistência apenas um elemento parcial de verificação da qualidade de um solo-cimento. Na realidade, o ensaio de resistência à compressão simples como controlador de solo-cimento é bastante precário, pois mostram as investigações a respeito que ela é altamente influenciável pelo grau de compactação obtido, bem como pelo tempo de repouso da mistura umedecida, antes da compactação pelo tipo e duração da cura, etc.

Uma outra restrição que se pode fazer quanto a adoção desse ensaio como padrão de controle é a inexistência de estudos estatísticos que possibilitem o conhecimento perfeito das dispersões que se verificam em ensaios desse tipo.

Sua grande vantagem é o fato de ser um ensaio universal, de fácil execução.

Uma outra observação é que não existe uma diretriz fixa quanto aos valores limites de aceitação e rejeição. Alguns órgãos rodoviários estipulam uma resistência mínima igual a 80% da resistência obtida em corpos-de-prova moldados no laboratório de campo, antes da execução; outros, fixam um mínimo de 60% nas mesmas condições, e assim por diante. O único ponto de concordância tem sido a idade do ensaio: 7 dias.

No **Apêndice III**, apresenta-se uma sugestão para o controle estatístico da resistência à compressão simples em misturas solo-cimento.

A moldagem de campo deve ser executada com material colhido imediatamente após umidificação e homogeneização, antes da compactação, não se deixando a mistura coletada em repouso por muito tempo. A moldagem é executada na energia normal, ou seja:

- a) cilindro:
- diâmetro = 10,16 cm
 - altura livre = 12,70 cm
 - volume (aparente) \cong 1000 cm³
- b) soquete
- altura de queda livre = 30,5 cm
 - massa = 2,496 kg
- c) condições
- camadas = 3
 - golpes por camada = 25

Após moldados, os corpos-de-prova são envolvidos em material úmido e mantidos à sombra, até serem levados para a câmara úmida. O tempo de cura será de 7 dias. Antes da ruptura, os corpos-de-prova devem ser imersos em água, por um tempo que varia com as especificações de cada órgão; a ABCP recomenda 4 horas de imersão.

É por demais sabido que influem sobremaneira na resistência de corpos-de-prova de campo os fatores descritos a seguir:

- a) *mistura do solo, do cimento e da água no campo* — nunca é totalmente uniforme, por melhor que seja a qualidade de serviço;
- b) *acabamento dos corpos-de-prova* — o ensaio de compressão exige contato íntimo entre as cabeças da prensa e as bases do corpo-de-prova; esse contato é função do acabamento do corpo-de-prova;
- c) *cura dos corpos-de-prova* — é necessária proteção contra a evaporação rápida da umidade nele contida;

- d) *umidade da mistura* — a umidade é o elemento preponderante na obtenção da densidade, que influi seriamente na obtenção da resistência.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão feitos com os corpos-de-prova moldados com mistura de campo levam a resultados inferiores aos de laboratório. As causas fundamentais desses resultados inferiores prendem-se às condições de execução, como: dosagem volumétrica, má pulverização, mistura heterogênea e tempo de processamento da mistura.

APÊNDICE I - Relação de Equipamentos de Laboratório de Campo

Equipamento	Quantidade
Cilindro, base e colar	3
Soquete normal	3
Extrator de amostra	1
Cápsulas de alumínio com tampa, para determinação de umidade higroscópica (grandes)	50
Estufa para 105°C - 110°C	1
Balança para 10 kg, sensível a 5 g	1
Balança <i>tríplice escala</i> para 200 g, sensível a 0,01 g	1
Prensa hidráulica para 100.000 N (\cong 10.000 kg)	1
Proveta, graduada em cm ³ , para 1000 cm ³	3
Peneiras (jogo completo)	1
Frasco de areia	1
Espátula	várias
Colher de pedreiro	várias
Tacho, bandeja	vários
Material de escritório	-

APÊNDICE II - Número Mínimo Recomendado de Ensaio Relativos à Inspeção de Área com Cerca de 1400 m² (7 m x 200 m)

Compactação (Energia Normal)

2 ensaios por trecho de 200 m de extensão x 7 a 7,2 m de largura (ou de 100 m em 100 m).

Pulverização

4 ensaios por trecho (ou de 50 m em 50 m).

Verificação do colchão fofo

4 verificações por trecho (aleatoriamente).

Porcentagem de graúdo/miúdo

6 ensaios por trecho (aleatoriamente).

Consumo de cimento

- a) mistura em pista: 1 verificação
- b) mistura em usina: 2 calibrações por semana
4 titulações por dia

Umidade

- a) controle inicial: 10 determinações
- b) controle final: 10 determinações

Resistência à compressão simples

9 corpos-de-prova por trecho (cada 20 m).

Verificação de espessura

5 a 10 vezes por trecho (cada 40 m - 20 m).

Grau de compactação

5 a 10 ensaios por trecho (cada 40 m - 20 m).

APÊNDICE III - Resumo das Exigências de Controle para Aceitação do Trecho

Massa específica aparente de campo

Igual ou maior que 95% da massa específica aparente máxima do ensaio normal de compactação.

Pulverização

Antes da adição do cimento, deve ser igual ou maior que 80%, excluído o material graúdo.

Espessura

Furos isolados: $\pm 12\%$ da espessura de projeto

Média dos furos: $\pm 8\%$ da espessura de projeto

Umidade

Solos arenosos: $\pm 10\%$ sobre umidade ótima

Solos argilosos: $h_o \pm 1\%$

Solos lateríticos: $h_o - 3\%$
 $h_o + 1\%$

Resistência à compressão simples

$$\bar{R} - \frac{1,29 \times s}{N} \geq 0,80 \times R_{\text{mín. esp.}}$$

\bar{R} = resistência média de corpos-de-prova;

s = desvio padrão das resistências;

N = nº de valores individuais na amostra ($9 \leq N \leq 30$);

$R_{\text{mín. esp.}}$ = resistência mínima especificada no projeto.

APÊNDICE IV - Projeto de Método para Determinação do Teor de Cimento em Mistura Fresca de Solo-Cimento

1 OBJETIVO

1.1 Este método fixa o procedimento para a determinação do teor de cimento em mistura de solo-cimento.

1.2 Para evitar a ajustagem trabalhosa das soluções, recomenda-se a construção de uma curva de calibração (seção 6), onde já são levados em conta os fatores que podem influir nos resultados: solo, cimento, soluções e água.

1.3 A partir da curva, e desde que não sejam modificadas as condições, o teor do cimento é obtido por interpolação no gráfico.

2 APARELHOS E MATERIAL

- Balanças com capacidade de 200 g, sensibilidade 0,5 g
- Balão volumétrico de 1000 cm³
- Balão volumétrico de 200 cm³
- Copos de vidro de 250 cm³
- Cápsulas de porcelana de 10 cm de diâmetro
- Proveta graduada de 50 cm³
- Proveta graduada de 100 cm³
- Proveta graduada de 1000 cm³
- Pipeta volumétrica de 20 cm³
- Pipeta volumétrica de 50 cm³

- Bastão de vidro
- Bureta de 100 ou 50 cm³
- Vidro escuro de 100 cm³ com conta-gotas
- *Erlenmeyer* de 200 cm³
- Funil de ϕ 6 cm
- *Titriplex III* (100 g)
- *Negro de Eriocromo T* (25 g)
- Cloreto de amônio (1 kg)
- Hidróxido de amônio (5 ℓ)
- Ácido clorídrico (2 ℓ)
- Folha de ensaio

3 PREPARO DAS SOLUÇÕES

3.1 Solução de Ácido Clorídrico

- a) com a proveta graduada, medir 75 cm³ de HCl puro, passando em seguida para um balão volumétrico de 1000 cm³;
- b) completar o volume com água destilada; e,
- c) transferir a solução para um recipiente de vidro escuro e colocar etiqueta.

3.2 Solução de *Titriplex III*

Pesar 10 g de *titriplex* e dissolver em 1000 cm³ de água destilada. Passar imediatamente a solução para vidro escuro. Colocar etiqueta.

3.3 Solução Tampão (*Büffer*) PM-11

Pesar em um copo de 250 cm³ 67,5 g de cloreto de amônio (NH₄Cl), dissolver com água destilada e transferir para um balão volumétrico de 1000 cm³. Juntar 570 cm³ de hidróxido de amônio (NH₄OH) e completar o volume até a marca de 1000 cm³. Passar a solução para vidro escuro. Colocar etiqueta.

3.4 Solução de *Negro de Eriocromo T* (Indicador)

Pesar 2 g de *negro de eriocromo T* e dissolver em 100 cm³ de água destilada. Passar a solução para vidro escuro provido de conta-gotas. Colocar etiqueta.

4 PREPARO DA AMOSTRA - AMOSTRAGEM

4.1 Quando a mistura a ensaiar é constituída por material de granulometria fina (100% passando na peneira de 2 mm), a umidade da mistura é suficiente para evitar a segregação dos materiais — motivo pelo qual não se recomenda trabalhar com misturas secas.

4.2 Quando a mistura a ensaiar é constituída por material de granulometria grossa, deverá ser passada na peneira de 2 mm e somente o material fino será utilizado no ensaio. Neste caso, para a construção da curva de calibração ou para o ensaio, recomenda-se o seguinte procedimento:

- a) tomar uma amostra de 500 g da mistura úmida;
- b) passar na peneira de 2 mm; e,
- c) quartear o material peneirado para tomar as 5 g que serão utilizadas no ensaio ou na construção da curva de calibragem.

5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CIMENTO

5.1 Pesar 5 g da mistura de solo-cimento já umedecida e com teor de umidade próximo da ótima. Passar para um copo de vidro.

5.2 Adicionar cerca de 40 cm³ da solução de ácido clorídrico, mexendo bem durante uns 5 minutos.

5.3 Passar o material para um balão volumétrico de 200 cm³ usando-se um funil, lavando bem o copo com auxílio de um jato de água destilada (piceta em sifão).

5.4 Adicionar cerca de 20 cm³ de hidróxido de amônio e agitar rapidamente o balão. Haverá formação de um precipitado gelatinoso de hidróxido de ferro e alumínio.

5.5 Completar o volume de 200 cm³ com água destilada. Homogeneizar o líquido, tomando cuidado para não dispersar o precipitado.

5.6 Filtrar o precipitado, recolhendo o filtrado em um copo de vidro.

5.7 Medir com uma pipeta volumétrica 20 cm³ de filtrado e passar para um *Erlenmeyer* de 200 cm³.

5.8 Medir em uma proveta cerca de 20 cm³ de solução tampão e adicionar o material da seção 5.7.

5.9 Pingar de 3 a 8 gotas de indicador (*negro de eriocromo T*) e o líquido deverá ficar rosa-avermelhado.

5.10 Encher a bureta com solução do *titriplex* (seção 3.2). Preparar previamente a torneira da bureta lubrificando-a com vaselina. Usar pequena quantidade e remover qualquer detrito que possa ter penetrado no orifício da torneira.

5.11 Titular o material da seção 5.9, até viragem do indicador para azul.

5.12 Ler o volume, em cm^3 gasto na titulação.

5.13 Ler na curva de calibração o teor correspondente ao volume de *titriplex* gasto na titulação.

6 CURVA DE CALIBRAÇÃO

6.1 A fim de se evitar ajustagens trabalhosas das soluções empregadas, deve ser construída uma curva de calibração (*Figura A*), procedendo-se da maneira indicada a seguir.

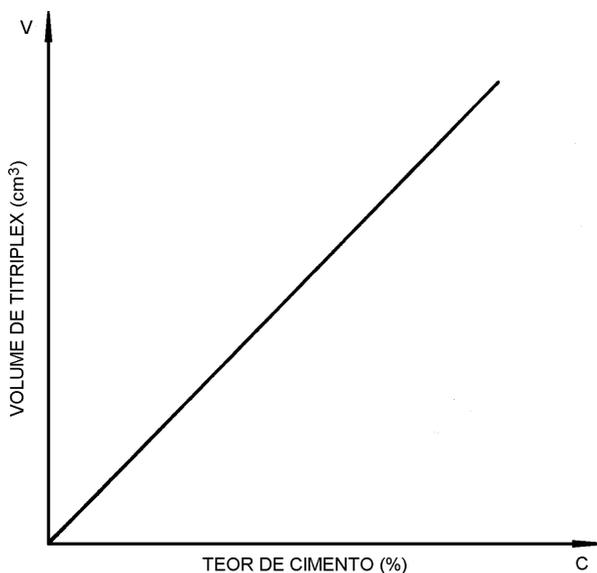


FIGURA A - Gráfico de calibração

6.2 Preparar 3 misturas de solo-cimento em teores de cimento de 2, 6 e 10% e umedecer para o teor de umidade ótica do ensaio de compactação.

6.3 O volume, em cm^3 , de *titriplex* gasto na bureta para viragem do indicador (vermelho para azul), para cada um dos teores de cimento (média de 3 titulações), é marcado em um gráfico conforme esquema anexo.

6.4 Cada curva é válida somente para as soluções preparadas com solo, cimento e água iguais aos que tenham sido empregados para as misturas de calibração. Cada vez que se mudar de solo, cimento, água ou haver necessidade de preparar novas soluções, as curvas deverão ser ajustadas e etiquetadas com as seguintes informações:

- a) data da preparação da solução;
- b) localização e identificação do solo;
- c) tipo, classe e marca comercial do cimento empregado; e,
- d) identificação da água.



Sede:

Av. Torres de Oliveira, 76 - Jaguaré - 05347-902-São Paulo/SP
Tel.: (11) 3760-5300 - Fax: (11) 3760-5320
DCC 0800-0555776 - www.abcp.org.br

Escritórios Regionais:

Pernambuco - Tel: (81) 3092-7070 - Fax: (81) 3092-7074
Distrito Federal - Tel./Fax: (61) 3327-8768 e 3328-7776
Minas Gerais - Tel./Fax: (31) 3223-0721
Rio de Janeiro - Tel: (21) 2531-1990 - Fax: (21) 2531-2729
São Paulo - Tel: (11) 3760-5374 - Fax: (11) 3760-5320
Paraná - Tel: (41) 3353-7426 - Fax: (41) 3353-4707

Representações Regionais:

Ceará: - Tel./Fax: (85) 3261-2697
Bahia - Tel./Fax: (71) 3354-6947
Santa Catarina - Tel./Fax: (48) 3322-0470
Rio Grande do Sul - Tel./Fax: (51) 3395-3444
Mato Grosso e Mato Grosso do Sul - Tel./Fax: (67) 3327-2480
Espírito Santo - Tel./Fax: (27) 3314-3601