



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO
NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS

São Paulo
agosto de 2004

1ª edição - 1980

2ª edição - 1983

F

691.91 Associação Brasileira de Cimento Portland
A849d Dosagem das misturas de solo-cimento;
Normas de dosagem e métodos de ensaios.
3.ed.atual.revisada pelo Eng. Márcio Rocha
Pitta. São Paulo, 1986
57p. ilus. 30cm. (ET-35)

Solo-cimento - Dosagem

Solo-cimento - Ensaios

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

Associação Brasileira de bimento Portland (ABCP). *Dosagem das misturas de solo-cimento; normas de dosagem e métodos de ensaios.* 3.ed.atual.revisada pelo Eng. Márcio Rocha Pitta.

São Paulo, 1986. 57p. (ET-35)

Este estudo técnico traz a completa descrição das normas de dosagem de solo-cimento propostas pela “Portland Cement Association (PCA)”, dos Estados Unidos da América, desenvolvidas em duas etapas de trabalho ao longo de duas décadas (1932-1952); seus resultados têm comprovação em um sem-número de serviços executados, com solos de origem as mais diferentes, nas mais diferentes regiões do mundo – inclusive no Brasil, desde 1939.

Por isso, embora estejam disponíveis outros procedimentos que, de uma forma ou de outra, permitem fixar os teores de cimento necessários a esse tipo de estabilização de solos, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) optou por adotar e recomendar as diretrizes da PCA para essa finalidade, excluída a medida da durabilidade por congelamento e degelo.

Os métodos de ensaio que fazem parte das normas de dosagem são aqui também expostos, sob a forma de especificações e, paralelamente, abundantemente exemplificados, assim como o são as próprias normas de dosagem, divididas em “Geral”, que se aplica a qualquer tipo de solo (à exceção dos orgânicos), e “Simplificada”, para solos de textura predominantemente granular.

Palavras-chave: Solo-cimento – Dosagem;
Solo-cimento - Ensaios

LISTA DAS FIGURAS

1 Ensaio de compactação de solo-cimento (ABCP – SC – 1)	19
2 Moldagem de corpos de prova de solo-cimento (ABCP – SC – 2)	23
3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP – SC – 3)	26
4 Ábaco para transformação do teor de cimento em massa em teor de cimento em volume	31
5 Método A – Massa específica aparente seca máxima estimada	35
6 Método A – Teor de cimento em massa indicado	36
7 Método A – Resistência à compressão mínima admissível dos corpos de prova, aos 7 dias	37
8 Método B – Massa específica aparente seca máxima estimada	35
9 Método B – Teor de cimento em massa indicado	40
10 Método B – Resistência à compressão mínima admissível dos corpos de prova, aos 7 dias	41
11 Dimensões do molde e do soquete metálico	47
12 Curva de compactação	50

SUMÁRIO

RESUMO

LISTA DAS FIGURAS

1	NORMAS DE DOSAGEM DE SOLO-CIMENTO	9
1.1	Introdução	9
1.2	Norma Geral de Dosagem do Solo-Cimento	12
1.2.1	Identificação e classificação dos solos	13
1.2.2	Escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação	14
1.2.3	Ensaio de compactação de solo-cimento	16
1.2.4	Escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade	18
1.2.5	Moldagem de corpos de prova	18
1.2.6	Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem	25
1.2.7	Interpretação dos resultados e fixação do teor de cimento	27
1.3	Norma Simplificada de Dosagem do Solo-Cimento	30
1.3.1	Ensaio preliminar	33
1.3.2	Descrição da dosagem pelo <i>Método A</i>	33
1.3.3	Descrição da dosagem pelo <i>Método B</i>	38
2	MÉTODOS DE ENSAIO	44
2.1	Ensaio de Compactação de Solo-Cimento (<i>Método SC-1</i>)	45
2.1.1	Objetivo	45
2.1.2	Aparelhagem	46
2.1.3	<i>Método A</i>	46
2.1.4	<i>Método B</i>	49
2.1.5	Cálculos	52
2.1.6	Resultados	53
2.2	Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento (<i>Método SC-2</i>)	53
2.2.1	Objetivo	53
2.2.2	Aparelhagem	54

2.2.3 Método A	54
2.2.4 Método B	55
2.2.5 Verificação	57
2.3 Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem (Método SC-3)	57
2.3.1 Objetivo	57
2.3.2 Aparelhagem	57
2.3.3 Corpos de prova	58
2.3.4 Ensaio	58
2.3.5 Cálculos	58
2.4 Ensaio à Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento (Método SC-4)	60
2.4.1 Objetivo	60
2.4.2 Aparelhagem	60
2.4.3 Corpos de prova	60
2.4.4 Ensaio	60
2.4.5 Resultado	61
<i>BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA</i>	62

1 NORMAS DE DOSAGEM DE SOLO-CIMENTO

1.1 Introdução

Solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo.

As especificações para execução de camadas de solo-cimento apresentam os cuidados especiais a serem obedecidos para garantia de que seja obtido um produto acabado resistente e durável. Muitos destes requisitos são genéricos e aplicam-se a qualquer caso; três deles, entretanto, dependem estreitamente das características do solo com que se está trabalhando:

- *a quantidade de cimento;*
- *a quantidade de água;*
- *a massa específica aparente seca a ser alcançada pós-compactação*

Dosagem de solo-cimento é a seqüência de ensaios realizados com uma determinada mistura de solo, cimento e água, seguida da interpretação dos resultados por meio de critérios preestabelecidos; o resultado final é a fixação das três variáveis citadas. Entretanto, a quantidade de água e a massa específica aparente indicadas para uma determinada misturas sofrem pequenas oscilações, dadas as variações de campo que ocorrem nas características do solo. Assim sendo, a quantidade de água a ser adicionada à mistura e a massa específica aparente seca da mistura compactada passaram a ser tomadas exclusivamente como elemento de controle do serviço e, com isso, o objetivo da dosagem passou a ser somente a fixação da quantidade adequada de cimento, embora forneça, apenas como dados indicativos básicos, a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima da amostra ensaiada.

A experiência brasileira baseia-se, principalmente, nos métodos

de dosagem da *Portland Cement Association (PCA)*, não obstante outros países haverem desenvolvido procedimentos diferentes: falta-lhes, entretanto, o que é justamente a maior recomendação dos métodos da PCA: a comprovação de seus resultados em um grande número de obras executadas e em uso, com enorme variedade de solos, das mais diversas origens e regiões – no Brasil, desde 1939.

A PCA dispõe de uma Norma Geral e de uma Norma Simplificada de Dosagem, aqui descritas e recomendadas.

Os métodos de ensaio que fazem parte das normas de dosagem constam do Cap.2 deste texto; sua elaboração fundamentou-se nas seguintes normas da *American Society for Testing and Materials (ASTM)* e da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*:

- *Test for Moisture-Density Relations of Soil-cement Mixtures (ASTM D 558 e AASHTO T 134)*;
- *Wetting-and-Drying Test of Compacted Soil-cement Mixtures (ASTM D 599 e AASHTO T 135)*.

A descrição das normas e dos métodos de dosagem e ensaios é acompanhada de exemplos elucidativos. A partir de 1962 foram introduzidas algumas alterações no processo, com base na experiência adquirida no Brasil, visando sua simplificação; são elas:

- a) Designação da quantidade de cimento pelo teor em massa. A quantidade de cimento incorporada ao solo era, em geral, expressa pelo *teor de cimento em volume*, definido como a relação entre o volume de cimento solto e o volume de solo-cimento compactado; a expressão é de aplicação prática, pois permite, conhecidas a massa específica aparente seca e as dimensões de um trecho de solo-cimento a ser executado com mistura na pista, calcular o volume de cimento solto necessário e, conseqüentemente, o número necessário de sacos, conhecida a massa específica aparente solta do cimento. Nos ensaios de laboratório não é fácil nem prática a

composição de misturas em volume; o teor de cimento, para cada ensaio, necessita ser transformado em teor de cimento em massa.

A designação da quantidade de cimento pelo *teor de cimento em massa*, que é a relação entre a massa de cimento e a massa do solo seco, simplifica sobremaneira os trabalhos de laboratório, em nada alterando os resultados.

No campo, o fato de ser conhecido por simples cubação o volume de um serviço a executar e só indiretamente a sua massa, indica que se continue empregando, no campo, o teor de cimento em volume. A correlação entre os dois teores é expressa por uma fórmula simples, mostrada nesta publicação no devido tempo.

b) Simplificação dos ensaios de durabilidade

Executava-se o ensaio de durabilidade em dois corpos de prova, um dos quais se escovava e se pesava três vezes em cada ciclo. Verificado ser supérflua a determinação da variação de volume para a maioria dos solos, um só corpo de prova passou a ser ensaiado, tornando o resultado função das pesagens feitas no final do 12º ciclo, desde que se leve em conta a água retida no solo, por hidratação, durante o ensaio (usando-se dados tabelados).

O ensaio de durabilidade por congelamento e degelo deixou de ser executado, posto que não há região brasileira onde esse efeito ambiental tenha peso considerável. De acordo com o *Highway Research Board (HRB)*, para fins de pavimentação em geral podem ser empregados *normalmente*, na execução do solo-cimento, os solos com as características seguintes:

- diâmetro máximo = 75 mm;
- passando na peneira nº4 (4,8 mm) \geq 50%;
- passando na peneira nº40 (0,42 mm), de 15% a 100%
- passando na peneira nº200 (0,075 mm) \leq 50%;

- limite de liquidez $\leq 40\%$;
- índice de plasticidade $\leq 18\%$.

1.2 Norma Geral de Dosagem do Solo-cimento

A determinação do adequado teor de cimento baseia-se no fato de que os solos misturados com pequenas quantidades de cimento, quando devidamente compactados e curados, melhoram sensivelmente as suas características originais de resistência mecânica, tornando-as muito superiores às de outros materiais utilizados normalmente como camadas de pavimentos. A ação de cargas e a variação das condições climáticas poderiam, depois de certo tempo, desagregar a mistura endurecida, o que faria com que esta perdesse o grau de estabilização alcançado, para se transformar em uma simples mistura compactada de solo com cimento, de qualidade baixa e indefinida. Em vista disso, a Norma Geral de Dosagem procura determinar o teor de cimento capaz de garantir à mistura a permanência de suas características melhoradas. Com este objetivo, foram idealizados os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (e por congelamento e degelo, na versão original da norma).

A dosagem faz-se experimentalmente: diferentes teores de cimento são empregados nos ensaios e a análise dos resultados indica o menor deles capaz de estabilizar o solo sob a forma de solo-cimento.

A Norma Geral de Dosagem de Solo-cimento pode ser resumida nas seguintes operações:

- a) identificação e classificação do solo;
- b) escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação;
- c) execução do ensaio de compactação do solo-cimento;
- d) escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade;
- e) moldagem de corpos de prova para ensaio de durabilidade;
- f) execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem;

- g) escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

1.2.1 Identificação e classificação dos solos

Com respeito à identificação e classificação dos solos, são realizados os seguintes ensaios brasileiros, padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER):

- a) Determinação da massa específica dos grãos de solos (NBR 6508 ou DNER DPT 93-64);
- b) Determinação da absorção dos grãos de pedregulho (NBR 6458);
- c) Determinação do limite de liquidez dos solos (NBR 6459);
- d) Determinação do limite de plasticidade dos solos (NBR 7180);
- e) Análise granulométrica dos solos (NBR 7181).

Nos ensaios de solo-cimento, as diversas frações do solo, em função dos seus diâmetros, são denominadas como segue:

- a) *pedregulho grosso*: partículas com diâmetro de 4,8 mm a 76 mm;
- b) *pedregulho fino*: partículas com diâmetro de 2,0 mm a 4,8 mm;
- c) *areia grossa*: partículas com diâmetro de 0,42 mm a 2,0 mm;
- d) *areia fina*: partículas com diâmetro de 0,05 mm a 0,42 mm,
- e) *silte*: partículas com diâmetro equivalente* de 0,005 mm a 0,05mm;

(*)Entende-se como o diâmetro de partículas esféricas, de massa específica igual à do solo em suspensão, que cairiam nesse meio com a mesma velocidade que as partículas do solo natural.

- f) *argila*: partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm.

Conhecidas as características físicas do solo, passa-se à sua classificação. Nos ensaios de solo-cimento é empregada a classificação a AASHTO (M 145), completada com a determinação do Índice de Grupo.

Exemplo de dosagem pela Norma Geral

- a) Considerar um solo com os seguintes resultados prévios de ensaios de laboratório:

- Granulometria

* pedregulho grosso.....	= 10%
* pedregulho fino	= 5%
* areia grossa	= 23%
* areia fina	= 33%
* silte	= 6%
* argila	= 23%
* parcela que passa na peneira de 0,075 m ...	= 32%
* limite de liquidez	= 25%
* limite de plasticidade	= 19%
* índice de plasticidade	= 6%

- Características do pedregulho grosso

* massa específica	= 2630 kg/m ³
* absorção	= 1,2%

- b) De acordo com a classificação da AASHTO, este solo pertence ao grupo dos A2-4 (0); o número entre parênteses indica o Índice de Grupo.

1.2.2 Escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação

A determinação da quantidade adequada de cimento fundamenta-se na análise do comportamento de corpos de prova com diferentes conteúdos de cimento. Em geral, são ensaiados três teores, diferindo do teor médio de 2 pontos porcentual.

Tendo-se observado que os resultados do ensaio de compactação variam muito pouco para pequenas diferenças na quantidade de cimento, um único ensaio de compactação pode ser realizado, com o teor médio entre os previstos; adotam-se os resultados da compactação como válidos para os três teores escolhidos*.

A melhor maneira de fixar os teores de cimento para os ensaios é a comparação do solo em estudo com outros já ensaiados, levando-se em consideração a granulometria, os índices de consistência, a origem geológica, a coloração, a região de onde provêm e a profundidade da amostra.

Para solos com os quais não se tenha experiência anterior, a *Tabela 1* da Norma Geral de dosagem de Solo-cimento, elaborada pela PCA, indica o teor a ser adotado no ensaio de compactação.

TABELA 1- Teor de cimento para o ensaio de compactação

Classificação do solo segundo a AASHTO (M 145)	Teor de cimento em massa (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

** Esta prática não se aplica aos estudos mais profundos sobre estabilização de solos com cimento, como pesquisas, nem aos solos com características anômalas de compactação.*

Exemplo:

Para o solo A2-4 (0) em estudo, fazer o ensaio de compactação com um teor de cimento em massa de 7%, obtido na *Tabela 1* da Norma Geral de Dosagem de Solo-cimento.

1.2.3 Ensaio de compactação de solo-cimento

O método SC-1 (*Ensaio de Compactação de Solo-cimento*)* é análogo ao método de Ensaio de Compactação de Solos da ABNT, mais certas peculiaridades do solo-cimento e incluindo a fração de solo que fica retida na peneira de 4,8 mm. Neste caso, para a preparação da amostra, segue-se o mesmo processo do Ensaio de Compactação da AASHTO (T-99), substituindo-se a parte do solo retida na peneira de 19 mm por igual massa de material retida na peneira de 4,8 mm, mas passando na de 19 mm.

Exemplo:

O solo em estudo possui 23% de argila; portanto, deve ser ensaiado pela Norma Geral de Dosagem.

a) Dados do ensaio

- solo graúdo = 10,0%
- absorção do solo graúdo = 1,2%
- umidade do solo miúdo = 3,0%
- teor de cimento = 7,0%

b) Dados dos aparelhos

- soquete nº3
- cilindro nº2

* Todos os métodos de ensaio mencionados na Cap. 1 constam, integralmente, do Cap. 2.

- volume do cilindro = 995 cm³

- massa do cilindro = 2150 g

c. Composição da mistura

- massa total do solo seco = 5000 g

- solo graúdo

$$* \text{ massa seca} = \frac{10 \times 5000}{100} = 500 \text{ g}$$

$$* \text{ massa úmida} = 500 \times (1 + 0,012) = 506 \text{ g}$$

- solo miúdo

$$* \text{ massa seca} = 5000 - 500 = 4500 \text{ g}$$

$$* \text{ massa úmida} = 4500 \times (1 + 0,03) = 4635 \text{ g}$$

$$* \text{ massa de cimento} = \frac{7 \times 5000}{100} = 350 \text{ g}$$

Com 506 g de solo graúdo saturado e superficialmente seco, 4635 g de solo miúdo na umidade natural e 350 g de cimento, obtém-se a mistura para o ensaio, na qual estão garantidos a percentagem de graúdo e o teor de cimento desejado. Realizado o ensaio, verifiquem-se, como exemplo, os cálculos referentes a um dos pontos da curva de compactação:

- ponto nº1
- massa do corpo de prova úmido mais o cilindro = 3955 g
- massa do corpo de prova úmido = 3955 - 2150 = 1805 g
- teor de umidade = 8,6% (determinado)

- massa do corpo de prova seco = $\frac{1805}{1 + 0,086} = 1662 \text{ g}$
- massa específica aparente seca = $\frac{1662}{0,995} = 1670 \text{ kg/m}^3$

Obtidos os 5 pontos, colocados os resultados no gráfico e traçada a curva de compactação, determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, conforme mostrado na folha de Ensaio de Compactação de Solo-cimento (*Figura 1*).

1.2.4 Escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade

O ensaio de durabilidade é executado com três teores de cimento. Os teores podem ser fixados baseados na experiência anterior ou nas *Tabelas 2 e 3* das Normas de Dosagem de Solo-cimento. O ensaio de durabilidade poderá ser realizado com o teor aí indicado e com teores 2 pontos percentuais acima e 2 pontos percentuais abaixo dele. Notar que os valores dessas tabelas, sendo funções das características físicas do solo, não se aplicam a solos superficiais, que possuam matéria orgânica potencialmente prejudicial à hidratação do cimento; para estes, pode-se prever um acréscimo de 2 a 4 pontos percentuais no teor do cimento (ou um aditivo adequado) para neutralizar os efeitos da matéria orgânica, se deletéria à hidratação do cimento.

Exemplo:

Sendo o solo de natureza arenosa, usar neste caso a *Tabela 2* da Norma Geral e, em função da porcentagem de pedregulho grosso (10%), da porcentagem de silte mais argila (29%) e da massa específica aparente seca máxima (1880 kg/m³), encontra-se o teor de 7%; realizar o ensaio de durabilidade com os teores de cimento de 5%, 7% e 9%.

1.2.5 Moldagem de corpos de prova

O método SC-2 (*Moldagem de Corpos de Prova de Solo-cimento*) descreve a técnica de moldagem de corpos de prova de solo-cimento.

F.1 - ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

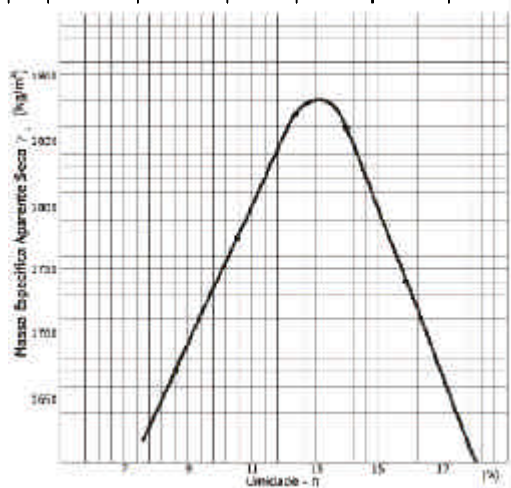
TRABALHO Nº: 8604/33

AMOSTRA Nº: 20819

DADOS DO ENSAIO		DADOS DOS APARELHOS	
% de solo retido # n° 4	10	Soquete n°	3
Absorção do solo retido # n° 4 (%)	1,2	Cilindro n°	2
Umidade do solo passando # n° 4 (%)	3,0	Volume do cilindro (dm ³)	0,995
Massa de cimento (%)	7	Massa do cilindro (g)	2150
Camadas	3	Golpes	25

COMPOSIÇÃO DA MISTURA			
Massa total do solo (g)	Solo retido # n° 4	Solo passado # n° 4	Massa do cimento (g)
5000	Massa seca (g): 500 Massa úmida (g): 506	Massa seca (g): 4500 Massa úmida (g): 4635	350

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 espec. aparente do corpo de prova seco (g/dm ³)
			Cáps.	Massa bruta úmida (g)	Massa bruta seca (g)	Tara da capsula (g)	Massa da água (g)	Massa do solo seco (g)	Teor de umidade (%)		
N°	(g)	(g)	N°	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g/dm ³)
1	3955	1805	13	503,42	465,70	27,05	37,72	438,65	8,6	1662	1670
2	4103	1953	14	474,70	432,10	30,18	42,18	401,92	10,6	1766	1775
3	4241	2091	15	497,08	445,16	26,47	51,92	418,69	12,4	1861	1870
4	4260	2110	16	522,77	461,90	27,10	60,87	434,80	14,0	1851	1860
5	4155	2005	17	481,98	420,10	28,48	61,62	391,62	15,8	1731	1740
6											
7											



RESULTADOS	
g_{max} = 1880	kg/m ³
w_{ot} = 13,2	%

Data Inicial
 3.4.86
 Data Final
 4.4.86
 Operador
 Ricardo K.
 Calculista
 Paulo A.
 Revisor
 René B.

TABELA 2 – Teor de cimento médio requerido por solos arenosos não orgânicos

Pedregulho grosso (%)	Silte + Argila	Massa específica aparente seca máxima (kg/m ³)					
		1680 a 1759	1760 a 1839	1840 a 1919	1920 a 1999	2000 a 2079	2080 ou mais
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	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	10	10	9	8	6

A moldagem de corpos de prova é simplesmente a compactação de uma mistura na umidade ótima obtida do ensaio de compactação. Sendo a energia de compactação a mesma do Método SC-1, os corpos de prova deverão atingir a massa específica aparente seca máxima.

TABELA 3 - Teor de cimento médio requerido por solos siltosos e argilosos

Índice de grupo de solo	Site (%)	Massa específica aparente seca máxima (kg/m ³)						
		1440 a 1519	1520 a 1599	1600 a 1679	1680 a 1759	1760 a 1839	1840 a 1919	1920 ou 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 mais	-	-	-	-	-	-	-
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 mais	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 mais	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 mais	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 mais	20	19	16	15	14	13	12

Exemplo:

O solo em estudo possui parte retida na peneira de 4,8 mm; deve-se, portanto, usar o *Método B* para a moldagem dos corpos de prova. Indicam-se, a seguir, os cálculos dos componentes da mistura e da verificação da moldagem, para os teores de 5%, 7% e 9%, na mesma ordem em que se apresentam na folha de Ensaio para Moldagem de Corpos de Prova de Solo-cimento (*Figura 2*):

a) Dados de ensaio

- massa específica aparente seca máxima= 1880 kg/m³
- umidade ótima= 13,2%
- solo graúdo= 10,0%
- absorção do solo graúdo= 1,2%
- umidade do solo miúdo= 3,0%

b) Dados dos aparelhos

- soquete nº3
- cilindro nº2
- volume do cilindro= 995 cm³
- massa do cilindro= 2150 g

c) Composição da mistura

- massa total do solo = 3000 g (arbitrada)
- solo graúdo

* massa seca = $\frac{10 \times 3000}{100} = 300 \text{ g}$

F.2- MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO (ABCP-SC-2)

TRABALHO Nº: 8604/33

AMOSTRA Nº: 20819

DADOS DO ENSAIO		DADOS DOS APARELHOS	
Massa esp. aparente máx. seca 1880 kg/m ³		Soquete nº	2
Umidade ótima 13,2%		Cilindro nº	3
% do solo retido na # nº 4 10		Volume do cilindro (dm ³)	0,995
Absorção do solo retido na # nº 4 1,2 %		Massa do cilindro (g)	2150
Umidade do solo passando na # nº 4 3,0 %			

COMPOSIÇÃO DA MISTURA		
Massa total do solo (g)	Solo retido # nº 4	Solo passado # nº 4
3000	Massa seca (g): 300 Massa úmida (g): 304	Massa seca (g): 2700 Massa úmida (g): 2781

Teor de cimento em massa	Massa de cimento	Massa total da mistura	QUANTIDADE DE ÁGUA						
			necessária	levada pelo solo graúdo	levada pelo solo miúdo	teórica a juntar	perda por evaporação		a juntar
(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(g)
5	150	3150	416	4	81	331	0,5	16	347
7	210	3210	424	4	81	339	0,5	16	355
9	270	3270	432	4	81	347	0,5	16	363

VERIFICAÇÃO DA MOLDAGEM												
C.P.	Teor de cimento em massa	Massa do corpo de prova úmido + cilíndrico	Massa do corpo de prova úmido	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE							Massa do corpo de prova seco	Massa específica aparente do C.P. seco
				Cáps.	Massa bruta úmida	Massa bruta seca	Tara da cápsula	Massa da água	Massa do solo seco	Teor de umidade		
Nº	(%)	(g)	(g)	Nº	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g/dm ³)
1	5	4242	2092	5	652,8	588,7	95,5	64,1	493,2	13,0	1851	1860
2	7	4247	2097	59	609,7	551,3	94,9	58,4	456,4	12,8	1859	1868
3	9	4257	2107	40	611,0	551,5	90,0	59,5	461,5	12,9	1866	1875
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												

Data inicial
7.4.86

Data final
8.4.86

Operador
Ricardo K.

Calculista
Paulo A.

Revisor
Renê B

$$* \text{ massa úmida} = 300 \times (1 + 0,012) = 304 \text{ g}$$

- solo miúdo

$$* \text{ massa seca} = 3000 - 300 = 2700 \text{ g}$$

$$* \text{ massa úmida} = 2700 \times (1 + 0,03) = 2781 \text{ g}$$

- teor de cimento = 7,0%

$$* \text{ massa do cimento} = \frac{7 \times 3000}{100} = 210 \text{ g}$$

- massa total da mistura = $3000 + 210 = 3210 \text{ g}$

- quantidade de água

$$* \text{ necessária} = \frac{13,2 \times 3210}{100} = 424 \text{ g}$$

$$* \text{ levada pelo solo graúdo} = 304 - 300 = 4 \text{ g}$$

$$* \text{ levada pelo solo miúdo} = 2781 - 2700 = 81 \text{ g}$$

$$* \text{ teórica a juntar} = 424 - 85 = 339 \text{ g}$$

$$* \text{ perda por evaporação (0,5\%)} = \frac{0,5 \times 3210}{100} = 16 \text{ g}$$

$$* \text{ a juntar} = 339 + 16 = 355 \text{ g}$$

Com 304 g de solo graúdo saturado e superficialmente seco, 2781g de solo miúdo na umidade natural, 210 g de cimento e 355 g de água, obtém-se a mistura para a moldagem. Durante o ensaio pesa-se o corpo de prova úmido juntamente com o cilindro de moldagem e retira-se uma amostra para a determinação da umidade; os dois dados obtidos permitem verificar as condições de moldagem, como segue:

- corpo de prova nº2

- teor de cimento em massa = 7,0%
- massa do corpo de prova úmido mais o cilindro = 4247 g
- massa do corpo de prova úmido = 4247 – 2150 = 2097 g
- teor de umidade = 12,8% (determinado)
- massa do corpo de prova seco = $\frac{2097}{1 + 0,128}$ = 1859 g
- massa específica aparente seca = $\frac{1859}{0,995}$ = 1868 kg/m³

Desde que a diferença entre a massa específica aparente seca alcançada e a pretendida seja inferior a 30 kg/m³, e a diferença entre a umidade de moldagem e a umidade ótima seja inferior a 1 ponto porcentual, o corpo de prova é aceito. Este deve ser mantido na câmara úmida até a data do ensaio.

1.2.6 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

O Método SC-3 (*Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem*) descreve a técnica do ensaio.

Exemplo:

Segundo a folha de Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem (*Figura 3*) tem-se, para o corpo de prova moldado, conforme a seção anterior, as seguintes operações:

- a) Dados dos corpos de prova
 - corpo de prova nº2
 - classificação do solo: A2-4 (0)
 - teor de cimento em massa = 7,0%

F.3- ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM (ABCP-SC-3)

ENERGIA:

AMOSTRA Nº: 20819 TRABALHO Nº: 8604/83

DADOS DOS CORPOS DE PROVA			
Corpo de prova n°	1	2	3
Classificação do solo (AASHTO)	A2-4	A2-4	A2-5
Teor de cimento em massa (%)	5	7	9
Umidade de moldagem (%)	13	12,8	12,9
Massa seca inicial calculada, E (g)	1851	1856	1866
Data de moldagem	19/03/86	19/3/86	19/3/86

DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO								
Data	Hora de remoção da estufa	Ciclo concluído	Hora de colocação em imersão	Hora de colocação na estufa	Pesagens			Observações
					CP. n° 1	CP. n° 2	CP. n° 3	
2/5	9:00	início	10:00	15:00	1518	1646	1726	
4/5	*	01	*	*	1463	1611	1709	
6/5	*	02	*	*	1457	1605	1704	
9/5	*	03	*	*	1457	1605	1704	
11/5	*	04	*	*	1457	1605	1704	
13/5	*	05	*	*				
16/5	*	06	*	*				
18/5	*	07	*	*				
20/5	*	08	*	*				
23/5	*	09	*	*				
25/5	*	10	*	*				
27/5	*	11	*	*				
30/5	*	12	*	*				

Observações: _____

CÁLCULOS			
Corpo de prova n°	1	2	3
Massa seca final, Ps (g)	1457	1605	1704
Água retida no c.p. A (%)	2,5	2,5	2,5
Massa seca corrida, Pf (g)	1421	1566	1662
Perda de massa corrida (%)	23	16	11

Data inicial
19.3.86

Data final
23.4.86

Operador
Ricardo K.

Calculista
Paulo A.

Revisor
Renê B

- umidade de moldagem = 12,8%

- massa seca inicial calculada = 1859 g

- data da moldagem: 19/3/86

b) Desenvolvimento do ensaio – neste quadro é anotado o desenvolvimento do ensaio, sendo recomendada a padronização dos horários; por exemplo, fazer a remoção da estufa às 9 horas e, em seguida, a escovação; às 10 horas, colocar os corpos de prova em imersão e, às 15 horas, retirá-los e colocá-los na estufa. Nas *Observações*, anotar as interrupções no ensaio (dias não trabalhados) e ocasionais quebras e separações de camadas nos corpos de prova.

c) Cálculos

- corpo de prova nº2

- massa seca final = 1605 g (determinada)

- água retida no corpo de prova = 2,5% (tabelada)

- massa seca corrigida = $\frac{1605}{1 + 0,025}$ = 1566 g

- perda de massa = $\frac{1859 - 1566}{1859}$ = 16,0%

Notar que foi adotada a porcentagem de água retida no corpo de prova indicada na tabela do Método SC-3, para os três corpos de prova.

1.2.7 Interpretação dos resultados e fixação do teor de cimento

O teor final de cimento fixado de acordo com a Norma Geral de Dosagem resulta do conhecimento dos resultados de muitos ensaios realizados com vários teores de cimento, permitindo a indicação do mínimo teor que confira à mistura as características necessárias para um adequado comportamento em serviço.

Sabe-se, na prática, que o acréscimo do teor de cimento ocasiona redução de perda de massa nos ensaios de durabilidade: para baixos teores de cimento, o acréscimo provoca uma considerável redução na perda, enquanto que, para teores elevados, o acréscimo de cimento provoca uma pequena diminuição na perda de massa.

A PCA faz, em sua publicação *Soil-cement Laboratory Handbook*, sobre o critério que escolheu para definir os limites admissíveis de perda de massa, as considerações que se transcrevem a seguir:

“O principal requisito de um solo-cimento é resistir às variações das condições climáticas. Assim, o elemento básico do solo-cimento é o teor de cimento requerido para produzir uma mistura que resista aos esforços produzidos nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem. A observação de serviços executados prova que se pode ter confiança tanto nos resultados baseados nestes ensaios, como no critério dado a seguir.

Esse critério é baseado em considerável número de resultados de laboratório, no comportamento de muitos trabalhos executados e em uso e nas informações obtidas, de diversas fontes, de vários milhares de corpos de prova. O seu emprego indicará o mínimo teor de cimento requerido para produzir um solo-cimento resistente e durável, aceitável como base de pavimento da mais alta qualidade.

Esse critério não deve ser considerado como uma recomendação irrevogável, mas como um princípio que pode ser considerado satisfatório no estado atual dos conhecimentos que se tem do solo-cimento”.

As recomendações são:

- a) Será adotado como teor de cimento em massa indicado, o menor dos teores com os quais os corpos de prova ensaiados satisfaçam o seguinte requisito: a perda de massa dos corpos de prova de solo-cimento, submetidos ao Método SC-3, não deve ser superior aos seguintes limites:

- Solos A1, A2-4, A2-5 e A3	14%
-----------------------------	-----

- Solos A2-6, A2-7, A4 e A5 10%
- Solos A6 e A7 7%

b) É admissível fazer uma interpolação dos resultados com o objetivo de determinar o menor teor de cimento que satisfaça o requisito da alínea anterior; a extrapolação não é permitida.

Exemplo:

Considerar os seguintes resultados de perda de massa, obtidos no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem:

- com 5% de cimento = 23%
- com 7% de cimento = 16%
- com 9% de cimento = 11%

Como o solo em estudo é um A2-4 (0), a perda de massa máxima admissível é de 14%. Analisando os resultados, nota-se que os teores de 5% e 7% de cimento não satisfazem esta condição, enquanto que o que tem 9% a satisfaz. Colocando os resultados em gráfico, verifica-se que o teor de cimento de 8% cumpre, com relativa segurança, o valor de 14% para a perda de massa máxima admissível; por outro lado, a resistência à compressão é crescente com o teor de cimento e com a idade. Baseados no critério da PCA, pode-se indicar o teor de 8% em massa como o adequado para a estabilização do solo em estudo.

Concluídos os trabalhos de dosagem, o teor de cimento determinado como adequado para o solo em estudo poderá ser convertido em teor de cimento em volume (no caso de obras que usem a mistura no local), pela seguinte expressão:

$$C_v = \frac{100 \times C_m}{100 + C_m} \times \frac{g_{sc}}{g_c}$$

em que:

C_v = teor de cimento em volume (relação entre o volume de cimento solto e o volume do solo-cimento compactado), %;

C_m = teor de cimento em massa (relação entre a massa de cimento e a massa do solo seco), %;

g_{sc} = massa específica aparente seca máxima do solo-cimento compactado, kg/m³;

g_c = massa específica do cimento solto, admitida com igual a 1430 kg/m³.

A conversão pode ser feita graficamente, com o emprego da *Figura 4*.

Exemplo:

Considerando os dados do exemplo anterior, obtêm-se:

$$C_v = \frac{100 \times 8}{100 + 8} \times \frac{1880}{1430}$$

$$C_v = 9,75$$

Igual valor é obtido no ábaco. Sugere-se adotar para a obra o teor de 10% em volume.

1.3 Norma Simplificada de Dosagem do Solo-cimento

A dosagem de solo-cimento, de acordo com a marcha de ensaios já apresentada – a chamada Norma Geral de Dosagem – apresenta uma desvantagem prática – o tempo de duração dos ensaios, principalmente dos ensaios de durabilidade – o que sugeriu procurar correlacionar os resultados desse ensaio com outro de mais rápida execução, simplificando e encurtando o tempo gasto na dosagem.

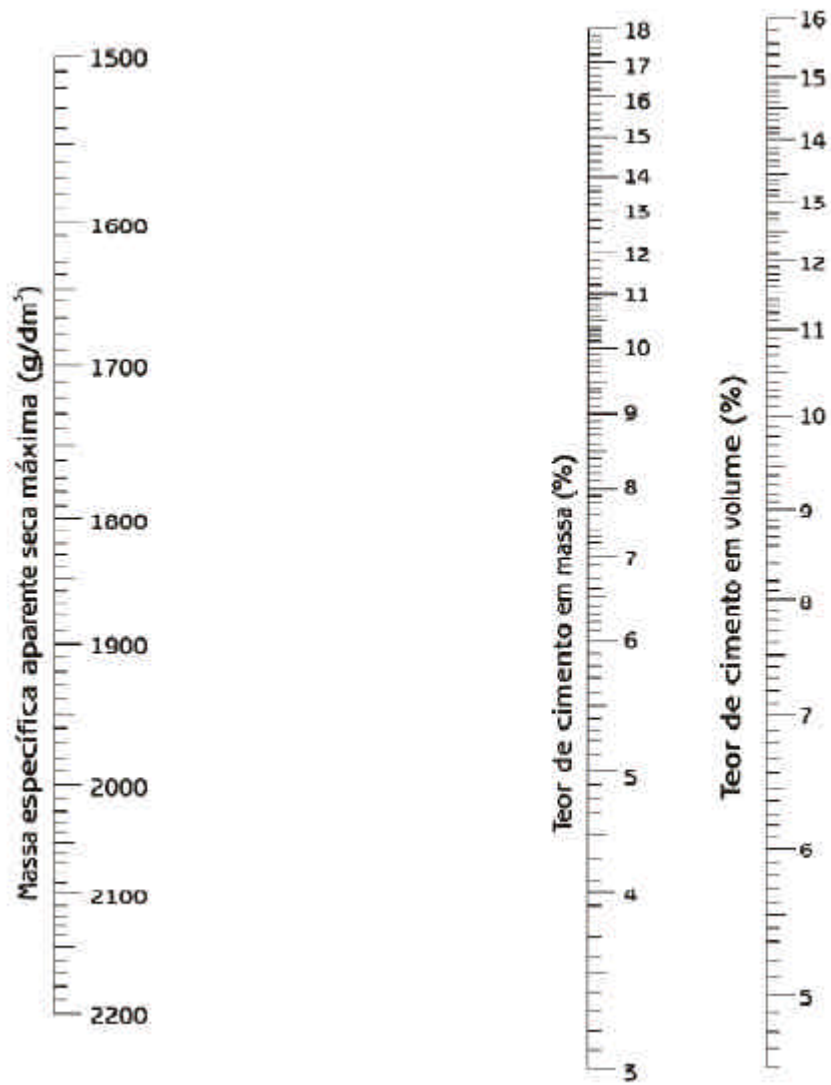


FIGURA 4 - Ábaco para transformação do teor de cimento em massa em teor de cimento em volume

A PCA, baseada na correlação estatística obtida nos resultados de ensaios de durabilidade e de resistência à compressão simples aos 7 dias com 2438 solos arenosos, apresentou um método simplificado para a dosagem de solo-cimento. O fundamento desse método, comprovado pelos ensaios realizados, é a constatação de que um solo arenoso, com determinada granulometria e massa específica aparente seca máxima, requererá, de acordo com o critério de perda de massa no ensaio de durabilidade, o mesmo teor de cimento por este indicado, desde que alcance resistência à compressão, aos 7 dias, superior a um certo valor mínimo estabelecido estatisticamente na série de ensaios de comparação realizada. O procedimento daí resultante foi materializado em ábacos de fácil e direta utilização.

O uso do método restringe-se a solos que contenham no máximo 50% de partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,05 mm (silte mais argila) e no máximo 20% de partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm (argila).

A Norma Simplificada de Dosagem divide-se em dois métodos distintos: caso o solo, atendidas concomitantemente as exigências quanto aos teores da argila e de silte mais argila, não contenha partículas com tamanho superior a 4,8 mm, usar-se-á o *Método A* (ou *Norma Simplificada A*); se contiver material de tamanho superior a 4,8 mm (ou seja, se houver parcela retida na peneira ABNT nº4), o procedimento a ser seguido é o *Método B* (ou *Norma Simplificada B*).

Em resumo:

- a) Norma Simplificada de Dosagem de Solo-cimento fixa o modo pelo qual se determina o teor de cimento adequado para a estabilização do solo, ensaiado sob a forma de solo-cimento, em função das características físicas do solo e do resultado do ensaio à compressão axial aos 7 dias;
- b) só é aplicável a solos que satisfaçam ao mesmo tempo às seguintes condições:
 - possuir no máximo 50% de material com diâmetro equivalente inferior a 0,05 mm (silte mais argila);

- possuir no máximo 20% de material com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm (argila);

- c) dependendo da granulometria do solo, dois métodos são empregados:

- *Método A* – usando material que passa na peneira de 4,8 mm – este método será usado quando toda amostra original de solo passar na peneira de 4,8 mm;

- *Método B* – usando material que passa na peneira de 19 mm – este método será usado quando parte da amostra original de solo ficar retida na peneira de 4,8 mm.

Independentemente do método em que se enquadre o solo, a seqüência de dosagem consta de:

- a) ensaios preliminares do solo;
- b) ensaio de compactação do solo-cimento;
- c) determinação da resistência à compressão simples aos 7 dias;
- d) comparação entre a resistência média à compressão simples obtida nos corpos de prova e a resistência à compressão simples mínima admissível para o solo em estudo.

1.3.1 Ensaios preliminares

São necessários os ensaios previstos na seção 1.2.1 das Normas.

1.3.2 Descrição da dosagem pelo *Método A*

- a) Determinar, de acordo com o *Método SC-1*, a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima da mistura de solo e cimento. O ensaio será realizado com um teor de cimento obtido do seguinte modo:

- estimar a massa específica aparente seca máxima da mistura por meio da *Figura 5*, em função das porcentagens e silte mais argila e de pedregulho fino mais areia grossa;

- estimar o teor de cimento por meio da *Figura 6*, em função da porcentagem de silte mais argila e da massa específica aparente seca máxima, obtida da *Figura 5*.

- b) Obter o teor de cimento indicado, usando a *Figura 6*, em função da porcentagem de silte mais argila e da massa específica aparente seca máxima, obtida no ensaio de compactação.
- c) Com o teor de cimento em massa indicado, moldar três corpos de prova, de acordo com o Método SC-2.
- d) Determinar a resistência à compressão dos corpos de prova, após 7 dias de cura, de acordo com o Método SC-4.
- e) Verificar na *Figura 7*, em função da porcentagem de silte mais argila do solo, a resistência média à compressão mínima admissível para a mistura endurecida (aos 7 dias).

Se a média das resistências obtidas for superior a este mínimo, o teor indicado será adotado; porém, sendo a resistência média obtida inferior à mínima indicada pela *Figura 7*, o teor de cimento é, provavelmente, menor do que o conveniente para o solo. São necessários, então, novos ensaios, moldando-se dois corpos de prova, um com o teor indicado anteriormente na *Figura 6* e outro com um teor de cimento 2 pontos percentuais acima dele.

Estes corpos de prova serão submetidos ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (SC-3); as perdas de massa por eles sofridas permitirão determinar o teor de cimento adequado, conforme os critérios já descritos na Norma Geral de Dosagem.

O teor de cimento adequado é finalmente convertido em teor de cimento em volume, com indicação para as operações de campo.

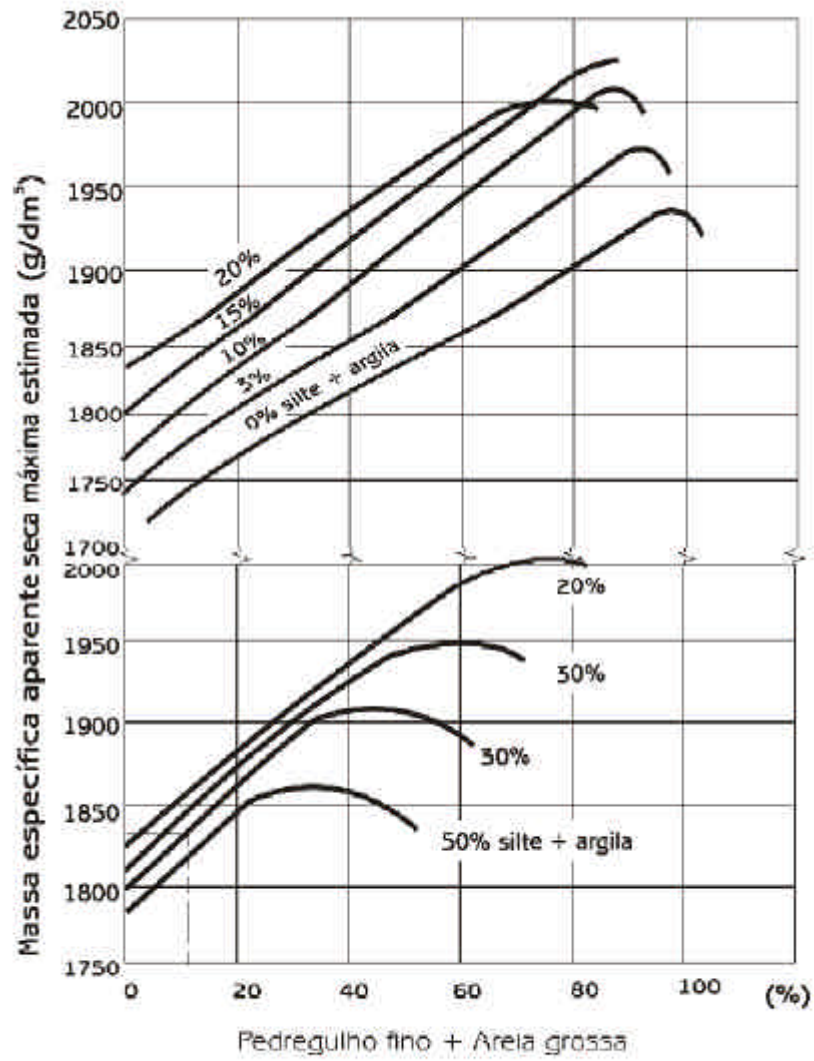


FIGURA 5 - MÉTODO A - Massa específica aparente seca máxima estimada

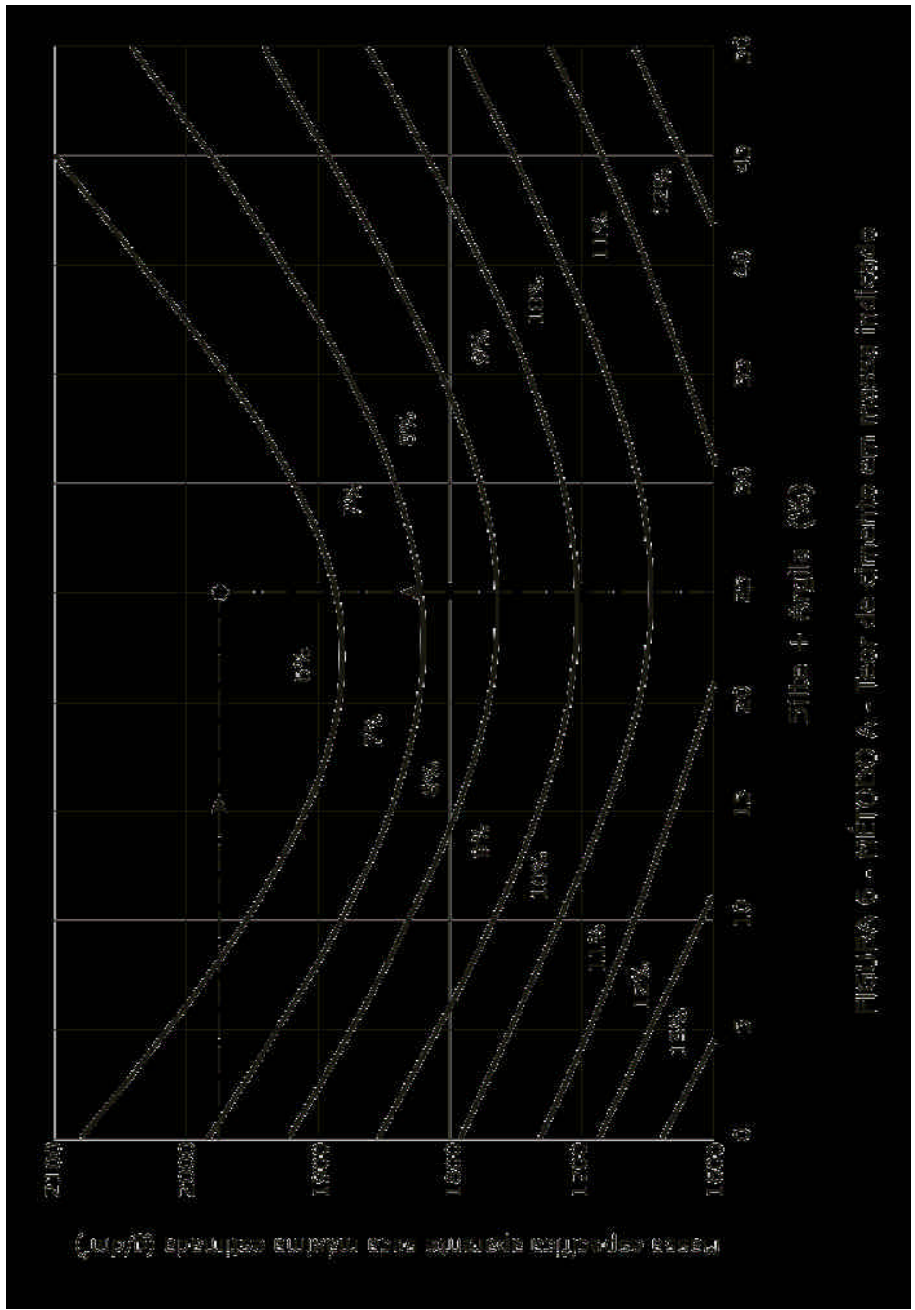


Fig. 4. N_{max} vs. R

Fig. 4. N_{max} vs. R - the number of particles in the maximum

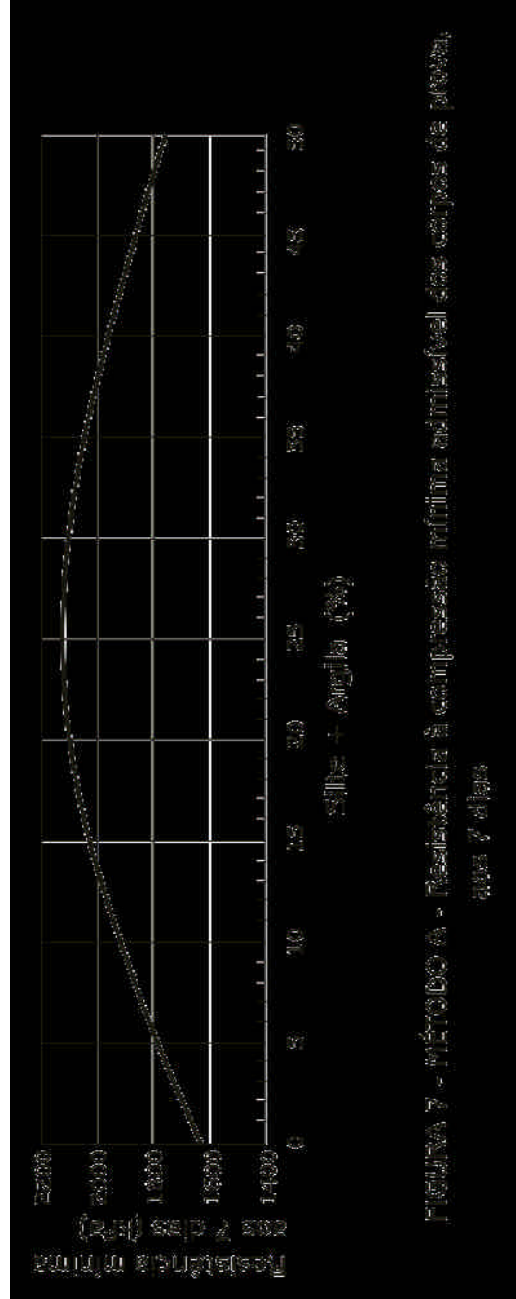


FIGURA 7 - VÍCIO DO A - Residência à compressão mínima admissível das juntas de dilatação
dia 7 dias

1.3.3 Descrição da dosagem pelo *Método B*

- a) Determinar, de acordo com o Método SC-1, a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima so solo-cimento.
Este ensaio será realizado com o teor de cimento obtido do seguinte modo:
 - estimar a massa específica aparente seca máxima da mistura por meio da *Figura 8*, em função das porcentagens de silte mais argila e de pedregulhos fino e grosso;
 - estimar o teor de cimento por meio da *Figura 9*, em função das porcentagens de pedregulho grosso, de silte mais argila e da massa específica aparente seca máxima obtida da *Figura 8*.
- b) Obter o teor de cimento indicado, usando a *Figura 9*, em função das porcentagens de pedregulho grosso, de silte mais argila e da massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação.
- c) Com o teor de cimento indicado, molda três corpos de prova, de acordo com o Método SC-2.
- d) Determinar a resistência média à compressão dos corpos de prova, de acordo com o Método SC-4.
- e) Determinar na *Figura 10*, em função das porcentagens de pedregulho grosso e de silte mais argila, a resistência média à compressão mínima admissível para a mistura endurecida (aos 7 dias). Se a média das resistências obtidas for superior a este mínimo, o teor indicado será adotado; se tal não ocorrer, proceder conforme a seção 1.3.2, alínea e.

1º Exemplo:

Seja um solo com a seguinte granulometria:

- pedregulho fino = 3%
- areia grossa = 12%
- areia fina = 60%
- silte = 7%
- argila = 18%

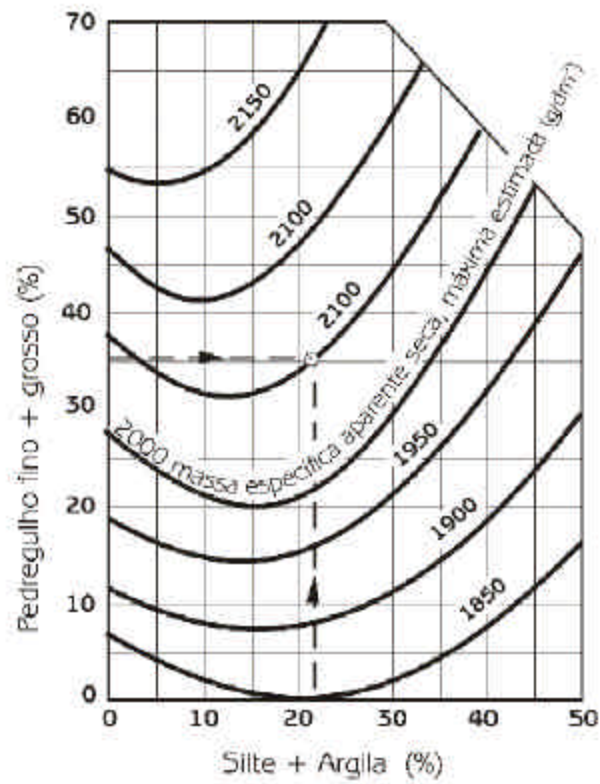


FIGURA 8 - MÉTODO B - Massa específica aparente seca máxima estimada

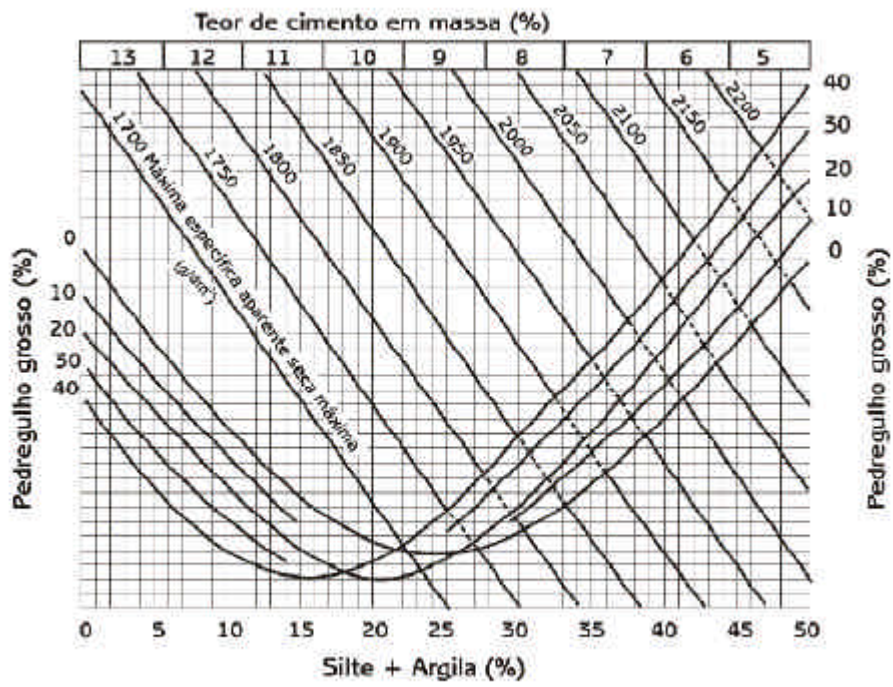


FIGURA 9 - MÉTODO B - Teor de cimento em massa indicado

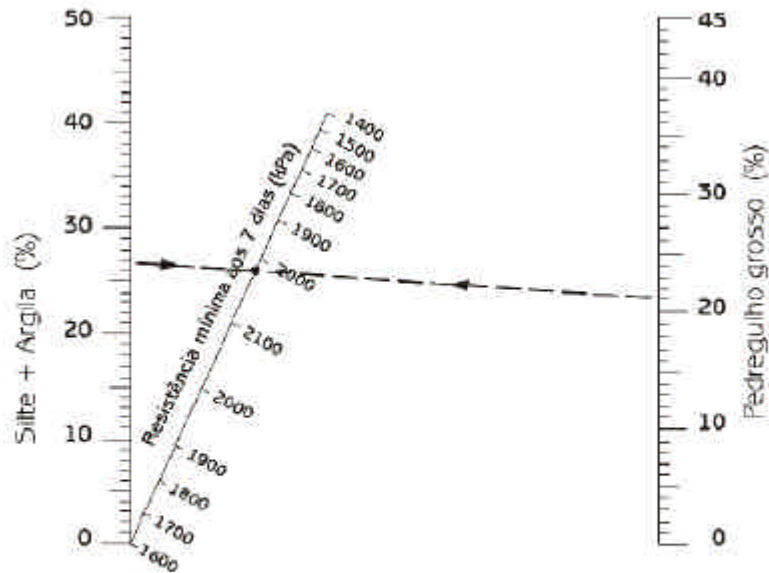


FIGURA 10 - MÉTODO B - Resistência à compressão mínima admissível dos corpos de prova, aos 7 dias

Este solo possui menos de 20% de argila e menos de 50% de silte mais argila, podendo, portanto, ser ensaiado pela Norma Simplificada. Por outro lado, todo o solo passa na peneira de 4,8 mm; será ensaiado, em consequência, pelo *Método A*:

- a) A *Figura 5* indica que a massa específica aparente seca máxima pode ser estimada em 1870 kg/m^3 , pois o solo possui 25% de silte mais argila e 15% de pedregulho fino mais areia grossa.

A *Figura 6* indica o teor de cimento para o Ensaio de Compactação. Desde que o solo tenha 25% de silte mais argila e a massa específica aparente seca máxima foi estimada em 1870 kg/m^3 , 7% em massa é o teor de cimento indicado.

Realiza-se o Ensaio de Compactação, de acordo com o

Método SC-1. Neste exemplo, considere-se que a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio seja de 1930 kg/m^3 e a umidade ótima de 11,2%.

- b) A *Figura 6* indica o teor de cimento de 6% para a massa específica aparente seca máxima obtida (1930 kg/m^3).
- c) Moldar três corpos de prova com o teor de cimento de 6%.
- d) Determinar a resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias.

Suponha-se, neste exemplo, que a resistência média seja de 2355 kPa (24 kgf/cm^2).

- e) Na *Figura 7*, desde que o solo tenha 25% de silte mais argila, verifica-se que a resistência deve ser superior a 2090 kPa ($21,3 \text{ kgf/cm}^2$); tendo isto ocorrido, o teor indicado é o adequado.

Por meio da *Figura 4*, verifica-se que 8% em volume é o teor indicado para o campo.

2º Exemplo:

Seja um solo com as seguintes características:

- a) Granulometria
 - pedregulho grosso = 20%
 - pedregulho fino = 3%
 - areia grossa = 19%
 - areia fina = 31%
 - silte = 12%
 - argila = 15%

- b) Massa específica do pedregulho grosso = 2600 kg/m^3

O solo possui menos de 20% de argila e menos de 50% de silte mais argila; pode, portanto, ser usada a norma Simplificada de Dosagem. Por outro lado, parte do solo fica retida na peneira de 4,8 mm (há pedregulho grosso), devendo ser ensaiado, pois, pelo *Método B*.

- a) A *Figura 8* indica que a massa específica aparente seca máxima pode ser estimada em 1975 kg/m^3 , tendo o solo 27% de silte mais argila e 23% de pedregulhos fino e grosso.

A *Figura 9* indica o teor de cimento para o ensaio de compactação. Com 27% de silte mais argila, 20% de pedregulho grosso e a massa específica aparente seca máxima sendo estimada em 1975 kg/m^3 , 5% em massa é o teor de cimento indicado para o ensaio. Realizar o ensaio de compactação. Neste exemplo, considere-se que a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio seja 2000 kg/m^3 e a umidade ótima 8,7%.

- b) A *Figura 9* indica o teor de cimento de 5% para a massa específica aparente seca máxima obtida (2000 kg/m^3).
- c) Moldar três corpos de prova com o teor de cimento de 5%.
- d) Determinar a resistência média à compressão dos corpos de prova, aos 7 dias.
Supor, neste exemplo, que a resistência média seja de 1865 kPa (19 kgf/cm^2).
- e) Na *Figura 10*, desde que o solo possui 27% de silte mais argila e 20% de pedregulho grosso, verifica-se que a resistência média deveria ser superior à 1982 kPa ($20,2 \text{ kgf/cm}^2$); como não foi, ensaios adicionais devem ser realizados.
Moldar, então, dois corpos de prova, um com 5% de cimento e outro com 7%, que serão submetidos ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

Suponha-se, neste exemplo, que os corpos de prova com 5% e

7% de cimento apresentem no ensaio de durabilidade as perdas de massa de 11% e 7%, respectivamente. Sendo o solo um A2-4 (0) e de acordo com o critério exposto na Norma Geral de Dosagem, o teor de 5% é o adequado, embora com ele a resistência à compressão não tenha sido superior à indicada pela Norma Simplificada.

Se as perdas de massa no ensaio de durabilidade tivessem sido de 18% e de 12%, respectivamente, o teor conveniente seria o de 7%.

Por meio da *Figura 4*, o teor de cimento em massa (de 5%) é transformado em teor de cimento em volume. Sendo 6,7% de cimento em volume o teor encontrado no ábaco, indicar para o campo o teor de 7% em volume.

2. MÉTODOS DE ENSAIO

Neste Capítulo descrevem-se os métodos de ensaio diretamente ligados às normas de dosagem de solo-cimento, relativos à compactação (Método SC-1), à moldagem de corpos de prova cilíndricos (SC-2), à determinação da perda de massa por molhagem e secagem (SC-3) e da resistência à compressão simples (SC-4).

Outros métodos, usados nas normas de dosagem mas não específicos do solo-cimento, são os seguintes:

- Determinação da massa específica dos grãos de solos (NBR 6508 ou DNER DPT M 93-64);
- Determinação da absorção dos grãos de pedregulho (NBR 6458);
- Determinação do limite de plasticidade dos solos (NBR 7180);
- Análise granulométrica dos solos (NBR 7181).

Leve-se em conta que, para os fins de dosagem de solo-cimento, as diversas frações dos solos são classificadas em escala própria, como segue:

- *pedregulho grosso*: partículas com diâmetro de 4,8 mm a 76 mm;
- *pedregulho fino*: partículas com diâmetro de 2,0 mm a 4,8 mm;
- *areia grossa*: partículas com diâmetro de 0,42 mm a 2,0 mm;
- *areia fina*: partículas com diâmetro de 0,05 mm a 0,42 mm;
- *silte*: partículas com diâmetro equivalente de 0,005 mm a 0,05 mm;
- *argila*: partículas com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm.

Passa-se a transcrever os quatro métodos mencionados, ainda não normalizados pela ABNT.

2.1 Ensaio de compactação de Solo-cimento (Método SC-1)

2.1.1 Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual se determina a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de uma mistura de solo e cimento, com um teor de cimento determinado, quando compactada conforme o processo especificado.

Dependendo da granulometria do solo, dois métodos são empregados, como segue:

- a) *Método A* – usando material que passe na peneira de 4,8 mm – este método será usado quando toda a amostra original de solo passar na peneira de 4,8 mm.
- b) *Método B* – usando material que passe na peneira de 19 mm – este método será usado quando parte da amostra original de solo ficar retida na peneira de 4,8 mm.

2.1.2 Aparelhagem

Para a execução do ensaio é necessário dispor de:

- a) repartidor de mostras;
- b) balança que permita pesar nominalmente 10 kg, com precisão de 1 g;
- c) balança que permita pesar nominalmente 210 g, com precisão de 0,01 g;
- d) peneiras de 4,8 e 19 mm, de acordo com a NBR 5734;
- e) recipientes de material adequado, que permitam guardar pequenas amostras sem perda de umidade;
- f) estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C;
- g) bandejas de folha de 750 mm x 500 mm x 50 mm;
- h) régua de aço biselada de 300 mm de comprimento;
- i) espátulas;
- j) molde cilíndrico metálico com base e dispositivo complementar de mesmo diâmetro – colarinho (as dimensões a serem respeitadas estão indicadas na *Figura 11*);
- k) soquete cilíndrico metálico de 50 mm de diâmetro, de face inferior plana e massa de 2500 g, equipado com dispositivo para controle de altura de queda de 305 mm.

2.1.3 Método A

2.1.3.1 Amostra

- a) Preparar a amostra de solo pulverizando-a e passando-a na

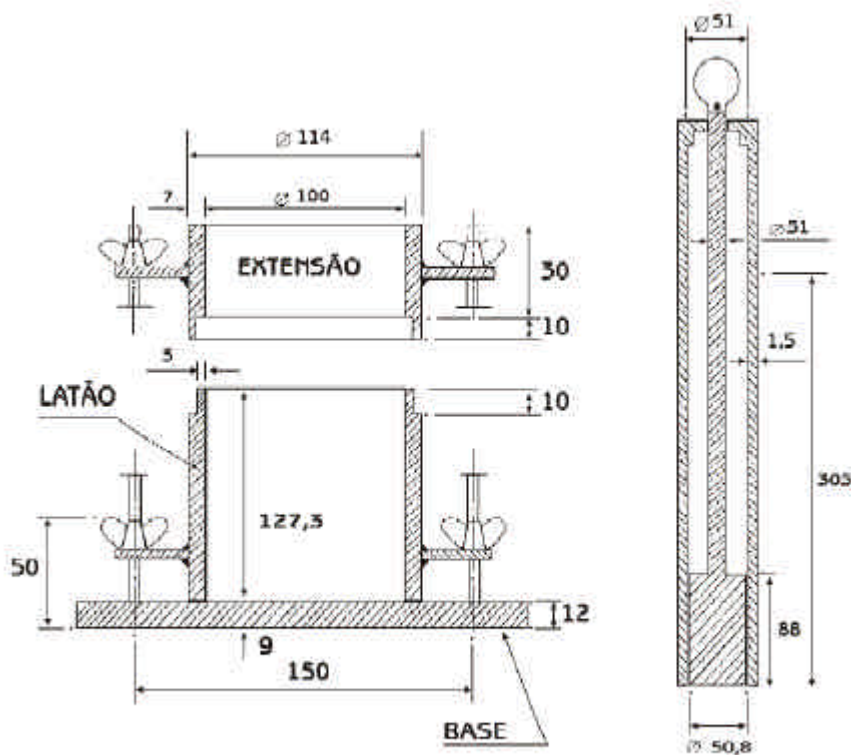


FIGURA 11 - Dimensões do molde e do soquete metálico

peneira de 4,8 mm. Quando necessário, pode-se secar a amostra ao ar, até que se torne destorroável no almofariz sob a ação de mão-de-gral recoberta de borracha.

- b) Separar, com o repartidor de amostras ou pelo quarteamento, cerca de 3 kg de material, cuja massa é determinada com precisão de 1 g. Desta massa é descontada a massa de água levada pela amostra, por determinação prévia do teor de umidade.
- c) Pesar, com precisão de 1 g, uma quantidade de cimento Portland que, em relação à massa do solo separado, mantenha o teor de cimento em massa desejado (*).

(*) o teor de cimento em massa é expresso, em porcentagem, pela relação entre a massa de cimento e a massa de solo seco.

2.1.3.2 Ensaio

- a) Adicionar o cimento ao solo e misturar até obter uma coloração uniforme. Quando necessário, adicionar água em quantidade suficiente para elevar o teor de umidade a, aproximadamente, 4 ou 6 pontos percentuais abaixo da umidade ótima prevista.
- b) Compactar a mistura no molde fixado na sua base metálica e com a extensão ajustada de modo a se ter uma altura total de cerca de 13 cm. A compactação deve ser feita em três camadas iguais, recebendo cada uma 25 golpes do soquete, caindo livremente de 305 mm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Durante a compactação o molde deve estar apoiado numa base plana e firme.
- c) Remover a extensão, tendo antes o cuidado de destacar, com o auxílio de uma faca, o material a ela aderente. Com uma régua rígida, rasar o material na altura exata do molde.
- d) Determinar a massa do conjunto, com precisão de 1 g e subtrair a massa do molde anteriormente determinada. A massa assim obtida será anotada como *massa do corpo de prova úmido* (M_h).
- e) O material compactado é removido do molde e cortado verticalmente. Do seu interior é retirada a amostra de cerca de 80 g para determinação da umidade. Determinar sua massa e secar em estufa, à temperatura entre 105°C – 110°C, até constância de massa; as determinações são feitas com precisão de 0,05 g.
- f) Destorroar o corpo de prova de modo que todo o material possa passar na peneira de 4,8 mm e misturá-lo com o remanescente da amostra. Adicionar água em quantidade suficiente para aumentar o teor de umidade de 1 a 2 pontos percentuais e homogeneizar a mistura.

- g) Repetir as operações descritas nas alíneas *b* a *f* para cada incremento de água (*). Essas operações deverão ser repetidas, com teores crescentes de umidade, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação (*Figura 12*).

2.1.4 Método B

2.1.4.1 Amostra

- a) Preparar a amostra do solo, separando os agregados retidos na peneira de 4,8 mm e pulverizando o material que passa nesta peneira. Quando necessário, pode-se secar a amostra ao ar, até que se torne destorroável no almofariz sob a ação da mão-de-gral recoberta de borracha.
- b) Passar a amostra nas peneiras de 76 mm, 19 mm e 4,8 mm. Abandonar o material retido na peneira de 76 mm (**).

Determinar as porcentagens de material retido nas peneiras de 19 mm e 4,8 mm, quando não for conhecida a granulometria da amostra. Saturar o agregado que passa na peneira de 19 mm e fica retido na peneira de 4,8 mm, colocando-o em imersão durante 24 horas.

- c) Determinar a massa e manter separadas amostras representativas do solo que passa na peneira de 4,8 mm e de agregados saturados e superficialmente secos, que passam na peneira de 19 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm, de maneira que a massa total das duas amostras seja de cerca de 5 kg. A porcentagem de agregados que passa na peneira de 19 mm e fica retido na de 4,8 mm deve ser igual à

(*) Este método tem-se mostrado satisfatório na maioria dos casos; entretanto, quando o solo é frágil e tem seus grãos reduzidos significativamente de tamanho em virtude da repetida compactação, deve-se usar uma mistura com amostra não trabalhada para cada ponto de curva de compactação.

(**) A maioria das especificações para construção de solo-cimento limita o tamanho máximo característico do material de 76 mm.

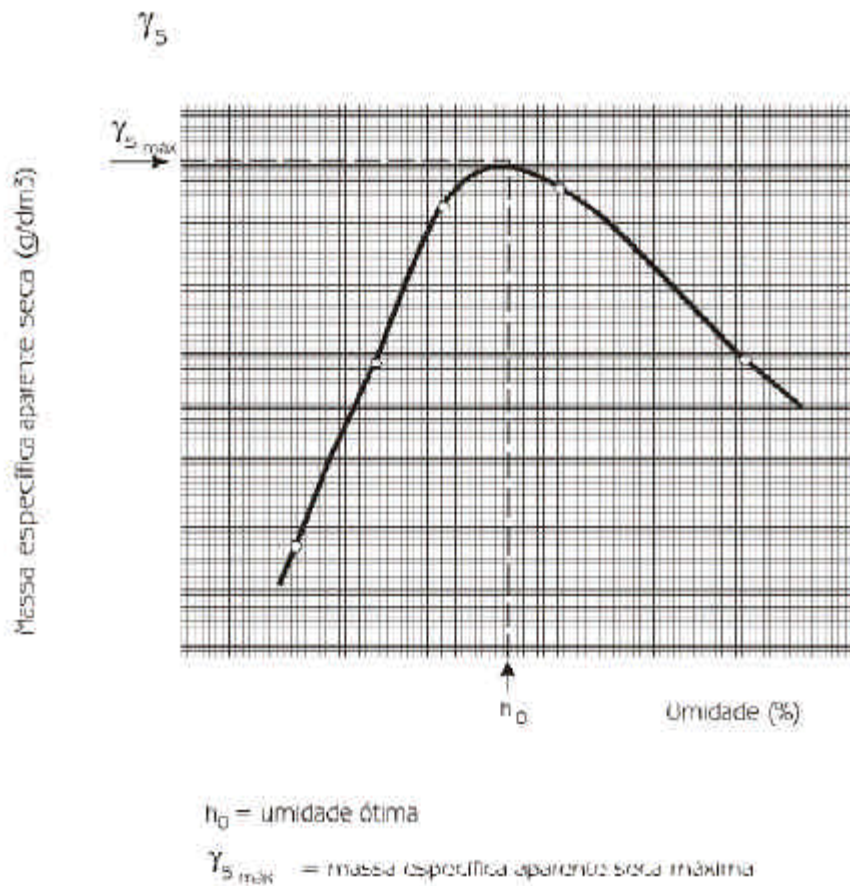


FIGURA 12 - Curva de compactação

porcentagem do material que passa na peneira de 76 mm e fica retido na de 4,8 mm na amostra original. Na determinação das massas deve-se levar em consideração a umidade do solo e a absorção do pedregulho.

- d) Pesar uma quantidade de cimento Portland, de maneira a ter-se, em relação à massa seca da amostra do solo, o teor de cimento em massa desejado.

2.1.4.2 Ensaio

- a) Adicionar o cimento na porção do solo que passa na peneira de 4,8 mm e misturar até obter uma coloração uniforme. Quando necessário, adicionar água em quantidade suficiente para elevar o teor de umidade aproximadamente 4 ou 6 pontos percentuais abaixo da umidade ótima prevista. Adicionar, a seguir, o agregado saturado e superficialmente seco e misturar até homogeneização.
- b) Compactar a mistura conforme o descrito na seção 2.1.3.2.
- c) Ao remover a extensão, retirar todas as partículas que ficarem acima da superfície superior do molde, corrigindo-se as irregularidades desta com material fino, de modo a obtê-la lisa e nivelada.
- d) Pesquisar o conjunto e anotar a *massa do corpo de prova úmido* (M_h).
- e) Remover o material do molde conforme descrito na seção 2.1.3.2, coletando em recipiente apropriado cerca de 500 g de material para determinação da umidade.
- f) Destorroar o corpo de prova de modo que todo o material passe na peneira de 19 mm, e que pelo menos 90% das partículas menores que 4,8 mm passem nesta peneira. Misturar o material destorroado com o remanescente da mistura, adicionar água em quantidade suficiente para aumentar o teor de umidade de 1 a 2 pontos percentuais e homogeneizá-la.
- g) Repetir as operações descritas nas alíneas *b* a *f*, para cada incremento de água. Essas operações deverão ser repetidas, com teores crescentes de umidade, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação (*Figura 12*).

2.1.5 Cálculos

- a) O teor de umidade de cada corpo de prova moldado é obtido pela fórmula:

$$h = \frac{M_{bh} - M_{bs}}{M_{bs} - M_c} \times 100$$

onde:

h = teor de umidade;

M_{bh} = massa da amostra úmida e da cápsula que a contém;

M_{bs} = massa da amostra seca em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C e da cápsula que a contém;

M_c = massa da cápsula

- b) A massa seca de cada corpo de prova moldado é obtida pela fórmula:

$$M_s = \frac{M_h}{100 + h} \times 100$$

onde:

M_s = massa seca do corpo de prova;

M_h = massa úmida do corpo de prova.

- c) A massa específica aparente seca do material, para cada unidade de compactação, é obtida pela fórmula:

$$g_s = \frac{M_s}{V}$$

onde:

g_s = massa específica aparente seca do corpo de prova;

V = volume do corpo de prova compactado (volume do molde).

2.1.6 Resultados

- a) Calculados o teor de umidade e a massa específica aparente seca de cada corpo de provas moldado, marcar os resultados num gráfico, os teores de umidade em abscissas e as massas específicas aparentes secas em ordenadas. À curva determinada pelos diversos pontos dá-se o nome de *curva de compactação* (Figura 12).
- b) Ao teor de umidade correspondente ao ponto de máximo da curva de compactação, dá-se o nome de *umidade ótima*.
- c) À massa específica aparente seca correspondente à umidade ótima, dá-se o nome de *massa específica aparente seca máxima*.

2.2 Moldagem de Corpos de Prova de Solo-cimento (Método SC-2)

2.2.1 Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual moldam-se os corpos de prova de solo-cimento a serem submetidos aos Métodos SC-3 e SC-4. Dependendo da granulometria do solo, dois métodos são empregados, como segue:

- a) *Método A* – com material que passe totalmente na peneira de 4,8 mm – este método será usado quando toda a amostra original do solo passar na peneira de 4,8 mm.
- b) *Método B* – com material que passe totalmente na peneira de 19 mm – este método será usado quando parte da amostra original do solo ficar retida na peneira de 4,8 mm.

2.2.2 Aparelhagem

É empregada a mesma aparelhagem indicada na seção 2.1.2.

2.2.3 Método A

2.2.3.1 Preparação do material

- a) Preparar uma amostra de solo conforme o descrito na seção 2.1.3.1.
- b) Pesar, com precisão de 1 g, uma amostra representativa do solo, com massa aproximada de 2500 g; deve-se levar em consideração a umidade do solo, previamente determinada.
- c) Pesar, com precisão de 1 g, uma quantidade de cimento que, em relação à massa seca da amostra, mantenha o teor de cimento em massa desejado.
- d) Separar uma quantidade de água que, somada à água existente na amostra do solo, confira à mistura um teor de umidade igual à umidade ótima, determinada no Ensaio de compactação do Solo-cimento, acrescida de 0,5 a 1,0 ponto porcentual, conforme a ambiência, para a evaporação que normalmente se processa durante a mistura.

2.2.3.2 Moldagem

- a) Adicionar o cimento ao solo e misturar até obter uma coloração uniforme.
- b) Adicionar à mistura a quantidade de água determinada na seção 2.2.3.1 e homogeneizar.
- c) Compactar a mistura no molde da maneira descrita nas alíneas *b* e *c* da seção 2.1.3.2, com a precaução especial de escarificar as superfícies da primeira e da segunda camada antes da colocação das camadas seguintes, de modo a remover os planos lisos formados pela compactação.

- d) Por ocasião da colocação da segunda camada, retirar uma amostra de cerca de 80 g para determinação do teor de umidade. Pesá-la e secá-la em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C, até constância de massa; fazer as determinações com precisão de 0,01 g.
- e) Pesar o conjunto, com precisão de 1 g, e subtrair a massa do molde anteriormente determinada. A massa obtida será anotada como *massa do corpo de prova úmido* (M_h).
- f) Remover o corpo de prova do molde e colocar-lhe uma etiqueta de identificação.
- g) Colocar o corpo de prova na câmara úmida, onde deve permanecer até o dia do ensaio, a uma temperatura de 21°C \pm 2°C e umidade relativa do ar acima de 90%.

2.2.4 Método B

2.2.4.1 Preparação do material

- a) Preparar a amostra do solo conforme descrito nas alíneas a e b da seção 2.1.4.1.
- b) Pesar e manter separadas amostras representativas do solo que passem na peneira de 4,8 mm, e de pedregulhos, saturados e superficialmente secos, que passem na peneira de 19 mm e fiquem retidos na de 4,8 mm, de maneira que a massa total correspondente seja de 3000 g. A porcentagem do pedregulho seco (que passe na peneira de 19 mm e fique retido na de 4,8 mm) deve ser igual à porcentagem do material que passe na peneira de 76 mm e fique retido na de 4,8 mm, na amostra original. Na pesagem das amostras deve-se levar em consideração a umidade higroscópica do solo e a absorção do pedregulho.
- c) Pesar, com precisão de 1 g, uma quantidade de cimento Portland que em relação à massa seca da amostra, mantenha o teor de cimento em massa desejado.

- d) Separar uma quantidade de água que, somada à água existente na amostra de solo e de pedregulho, confira à mistura a umidade ótima, determinada no Ensaio de Compactação do Solo-cimento, acrescida de 0,5 a 1,0 ponto porcentual para a evaporação que normalmente se processa durante a mistura.

2.2.4.2 Moldagem

- a) Adicionar o cimento à porção do solo que passa na peneira de 4,8 mm e misturar até obter uma coloração uniforme.
- b) Adicionar à mistura a quantidade de água anteriormente determinada e homogeneizar.
- c) Adicionar o pedregulho saturado e superficialmente seco e misturar até homogeneização.
- d) Compactar a mistura no molde da maneira descrita nas alíneas *b* e *c* da seção 2.1.3.2, com a precaução especial de escarificar as superfícies da primeira e segunda camada, antes da colocação das camadas seguintes, de modo a remover os planos lisos formados pela compactação.
- e) Por ocasião da colocação da segunda camada, retirar uma amostra de cerca de 500 g para determinação do teor de umidade. Pesá-la e secá-la em estufa à temperatura entre 105°C e 110° C, até constância de massa.
- f) Pesar o conjunto, com precisão de 1 g, e subtrair a massa do molde anteriormente determinada. A massa assim obtida será anotada como *massa do corpo de prova úmido* (M_h).
- g) Remover o corpo de prova do molde e colocar-lhe uma etiqueta de identificação.
- h) Colocar o corpo de prova em uma câmara úmida, onde deve permanecer até o dia do ensaio, a uma temperatura de 21°C \pm 2°C e umidade relativa do ar acima de 90%.

2.2.5 Verificações

- a) Verificar a umidade de moldagem do corpo de prova, aplicando a fórmula da seção 2.1.5.
- b) Verificar a massa específica aparente seca do corpo de prova, de acordo com o descrito na seção 2.1.5.

Quando a umidade de moldagem diferir da umidade ótima de mais de 1 ponto porcentual, ou quando a massa específica aparente seca do corpo de prova diferir da massa específica aparente seca máxima de mais de 30 kg/m³, o corpo de prova deve ser rejeitado.

2.3 Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem (Método SC-3)

2.3.1 Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual se determina a perda de massa dos corpos de prova de solo-cimento quando submetidos a ciclos de molhagem e secagem.

2.3.2 Aparelhagem

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) estufa capaz de manter a temperatura de $71^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- b) câmara de imersão para submergir os corpos de prova em água na temperatura ambiente;
- c) escova de fios de arame chato de 50 mm de comprimento por 1,6 mm de largura e 0,5 mm de espessura, reunidos em cinqüenta grupos de dez fios cada e montados em cinco filas longitudinais e dez transversais, num bloco de madeira dura de 190 mm x 65 mm.
- d) balança que permita pesar nominalmente 5 kg, com precisão de 1 g.

2.3.3 Corpos de prova

Os corpos de prova de solo-cimento devem ser moldados de acordo com o Método SC-2 e permanecerem 7 dias em cura na câmara úmida.

2.3.4 Ensaio

- a) Após os 7 dias de cura na câmara úmida, os corpos de prova devem ser colocados na câmara de imersão, onde ficarão durante 5 horas e, a seguir, numa estufa à temperatura de $71^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde deverão permanecer durante 42 horas.
- b) Ao fim deste período, os corpos de prova devem ser escovados. A escova deve ser aplicada no sentido da geratriz do corpo de prova e paralelamente às bases, de maneira a cobrir toda a superfície do corpo de prova. Dão-se 20 escovadelas verticais na superfície lateral e 4 nas bases do corpo de prova. O esfriamento e a operação de escovação devem durar no máximo 1 hora.
- c) O procedimento descrito nas alíneas *a* e *b* constitui um ciclo (48 horas) de molhagem e secagem. Repetem-se essas operações durante 12 ciclos (*), incluindo o primeiro.
- d) Após os 12 ciclos, colocar os corpos de prova na estufa à temperatura de 105°C e 110°C até constância de massa, e determinar suas *massas secas (M)*.
- e) Os dados coletados permitirão calcular a perda de massa dos corpos de prova.

2.3.5 Cálculos

(*) Nos ensaios de pesquisa ou investigações especiais pode-se determinar a massa do corpo de prova antes e depois de escovação, em cada ciclo. Não sendo possível manter os prazos especificados por causa de dias não trabalhados, os corpos de prova devem ser mantidos na estufa durante este período. Normalmente os ensaios são conduzidos de maneira a fazer-se a escovação às segundas, quartas e sextas feiras.

- a) Corrigir o valor da massa seca do corpo de prova, descontando a massa de água que ficou retida no corpo de prova seco, como segue:

$$M_f = \frac{M}{A + 100} \times 100$$

onde:

M_f = massa seca final corrigida;

M = massa seca a 110°C

A = porcentagem de água retida no corpo de prova

A porcentagem de água retida no corpo de prova é dada pela *Tabela 4*.

TABELA 4

Classificação do solo segundo a AASHTO (M 145)	Água retida (%)
A1, A3	1,5
A2	2,5
A4, A5	3,0
A6, A7	3,5

- b) A perda de massa do corpo de prova é obtida pela seguinte fórmula:

$$P_m = \frac{M_s - M_f}{M_s} \times 100$$

onde:

P_m = perda de massa;

M_s = massa seca inicial calculada, obtida por ocasião da moldagem do corpo de prova;

M_f = massa seca final corrigida.

2.4 Ensaio à Compressão de Corpos de Prova de Solo-cimento (Método SC-4)

2.4.1 Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual devem ser ensaiados à compressão corpos de prova de solo-cimento.

2.4.2 Aparelhagem

- a) A prensa destinada à ruptura dos corpos de prova deve transmitir-lhes a carga de modo progressivo e sem choques, e ter um de seus pratos articulados.
- b) A prensa deve ser periodicamente verificada e todas as suas indicações serão corrigidas com auxílio de gráficos ou tabelas.

2.4.3 Corpos de prova

- a) Os corpos de prova devem ser moldados de acordo com o Método SC-2 e mantidos em câmara úmida por 7 dias.
- b) As superfícies dos topos superior e inferior do corpo de prova devem estar lisas e planas, de modo que o contato com os pratos da máquina seja tão completo quanto possível.

2.4.4 Ensaio

- a) No dia do ensaio, o corpo de prova é removido da câmara

úmida e imerso completamente em água.

- b) Após 4 de imersão, o corpo de prova é removido da água, enxugado superficialmente com uma toalha felpuda e colocado centrado no prato inferior da prensa.
- c) O corpo de prova é então submetido à compressão, na velocidade de carga constante de 150 kPa/segundo (1,5 kgf/cm²/segundo), aproximadamente.

2.4.5 Resultado

- a) Calcular a resistência à compressão do corpo de prova dividindo a carga de ruptura ou a máxima carga atingida, em N (kgf), pela área carregada, em mm² (cm²). A área é calculada em função do diâmetro médio, medido antes do ensaio.
- b) Serão eliminados os resultados de corpos de prova defeituosos e os que se afastarem de 10 pontos percentuais, ou mais, da resistência média; se, contudo, mais de dois corpos de prova afastarem-se além deste limite, todos os resultados da série normal devem ser desprezados.

Bibliografia Recomendada

CURTIS, W. E. & FORBES, A. J. *Determination of cement of soil-cement mixtures*. Washington, D. C., Highway Research Record, 1963. p.123-32. (Number 36).

DAVIDSON, D. T. & BRUNS, B. W. *Comparison of type I and type III portland cements for soil stabilization*. Washington, D. C., Highway Research Board, 1960. p.28-45. (Bul.267).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Freezing and thawing tests of compacted soil-cement mixtures; D 560*. In: ————. *Book of ASTM standards*. Philadelphia, 1978. v.19.

GRESILLON, Jean-Michel. *Étude de l'aptitude des sols a la stabilisation au ciment; application a la construction*. *Annales I.T.B.T.P.*, Paris, (361): 1-8, Mai 1978.

MACLEAN, D. J. & LEWIS, W. A. *British practice in the design and specification of cement-stabilized bases and subbases for roads*. Washington, D. C., Highway Research Record, 1963. p.56-76. (Number 36).

NORLING, L. T. *Standard laboratory tests for soil-cement; Development, purpose and history of use*. Washington, D. C., Highway Research Record, 1963. p.1-10. (Number 36).

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). *Soil-cement laboratory handbook*. Skokie, 1959. (SC 6-5).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Tests for moisture-density relations of soil-cement mixtures; D 558*. In: ————. *Book of ASTM standards*. Philadelphia, 1978. v.19.

_____. *Wetting and drying tests of compacted soil-cement mixtures; D 559*. In: _____. *Book os ASTM standards*. Philadelphia, 1978. v.19.

PITTA, M. R. *Características tecnológicas dos solos estabilizados com cimento*. São Paulo, ABCP. (em edição)