

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO PRELIMINAR COMPARATIVO ENTRE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO  
COMPACTADO E SOLO-CIMENTO PLÁSTICO PARA REVESTIMENTO DE CANAIS

Mauro Araújo BEZERRA

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

MARÇO - 1983

ESTUDO PRELIMINAR COMPARATIVO ENTRE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO  
COMPACTADO E SOLO-CIMENTO PLÁSTICO PARA REVESTIMENTO DE CANAIS



B574e

Bezerra, Mauro Araujo

Estudo preliminar comparativo entre misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plastico para revestimento de canais / Mauro Araujo Bezerra. - Campina Grande, 1983.

227 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Solo-Cimento Compactado 2. Solo-Cimento Plastico 3. Revestimento de Canais 4. Composicoes Otimas - 5. Ensaio de Durabilidade - 6. Ensaio de Resistencia - 7. Recursos Hidricos 8. Engenharia Civil 9. Dissertacao I. Ferreira, Heber Carlos II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 666.972.2(043)

MAURO ARAÚJO BEZERRA  
(Engenheiro Agrônomo)

ESTUDO PRELIMINAR COMPARATIVO ENTRE  
MISTURAS DE SOLO-CIMENTO COMPACTADO E  
SOLO-CIMENTO PLÁSTICO PARA REVESTIMEN  
TO DE CANAIS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA  
CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍ  
BA, EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS  
(M. Sc.)

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS (IRRIGAÇÃO)

ORIENTADOR: HEBER CARLOS FERREIRA

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

MARÇO - 1983

DEDICATÓRIA

A Memória de

Berenice Bezerra Araújo, a querida irmã, que não  
poupava esforços em prol de minha educação.

HOMENAGEM

A todos aqueles que se preocupam com os problemas ecológicos e procuram, direta ou indiretamente, preservar a natureza renunciando ao egoísmo em benefício dos "DIREITOS HUMANOS".

Campina Grande, 19 de janeiro de 1983.

Mauro Araújo Bezerra

## AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta pesquisa o autor, sinceramente, agradece.

A Deus, seu amigo inseparável quer nos dias de cumeadas quer nos dias de depressões.

Ao prezado José Farias Nóbrega, M. Sc., professor de dinâmica inteligência e profícua atuação no meio intelectual, pelos magnânicos conselhos.

Aos Professores Heber Carlos Ferreira, Dr., e Francisco Barbosa de Lucena, M. Sc., seus Orientadores, por suas contribuições inestimáveis na planificação e correção deste trabalho.

A seus pais que, com sua vida exemplar, traçaram o roteiro de sua conduta, educando-o no caminho da honestidade, do bem e da verdade.

A sua esposa, Professora Méllia Delabianca Araújo, M. Sc., que com o carinho e com a compreensão, arquitetou a sua felicidade e forjou o seu ânimo em têmpera forte bastante para enfrentar os árduos embates da vida.

Ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (CCT/UFPb), de modo especial ao Departamento de Engenharia Civil (DEC), pelo apoio básico oferecido.

Aos Professores, cuja dedicação e interesse pelas coi

sas científicas e culturais, foram para ele um exemplo a se  
guir.

Aos colegas de mestrado, pela convivência harmoniosa  
e constante solidariedade, germinando-se sinceras e proveito  
sas amizades.

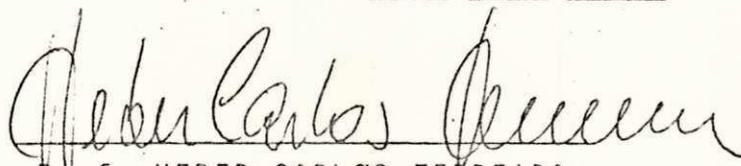
Aos funcionários e a todos os que, em menor ou maior  
grau, contribuíram para essa conquista.

ESTUDO PRELIMINAR COMPARATIVO ENTRE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO  
COMPACTADO E SOLO-CIMENTO PLÁSTICO PARA REVESTIMENTO DE CANAIS

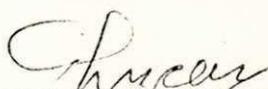
por

MAURO ARAÚJO BEZERRA

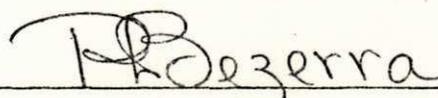
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04 / 03 / 1983

  
Prof. HEBER CARLOS FERREIRA

ORIENTADOR

  
Prof. FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA

EXAMINADOR

  
Prof. RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA

EXAMINADOR

CAMPINA GRANDE

ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

MARÇO - 1983

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (CCT/UFPb), em Campina Grande, Estado da Paraíba, Brasil.

Os objetivos deste foram estudar tecnicamente a estabilização de um solo arenoso com cimento, e determinar sua composição ótima em relação as misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico para revestimento de canais. Os parâmetros usados para se determinar a composição ótima das misturas supracitadas foram as porcentagens de cimento e água, onde se estudou 54 combinações desses teores. Utilizou-se um solo coletado no próprio CCT/UFPb, que ao ser classificado pelo Highway Research Board (HRB), revelou-se como sendo do Grupo A2 - 4. Usou-se a metodologia empregada na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), para ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (Método SC-3), e de resistência a compressão simples (Método SC-4), nos vários tipos de corpos de prova ensaiados. Realizou-se também o ensaio brasileiro de tensão indireta (EBTI), completando-se assim, o estudo das influências que as porcentagens de cimento e água causam na estabilização do referido solo.

Dentro das limitações desta pesquisa, e levando-se em consideração a estabilização do solo arenoso A2 - 4 (0) com cimento para uso em revestimento de canais, a análise dos re

sultados indica que a composição ótima das misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico deve conter, respectivamente, 10,0% e 12,0% de umidade de moldagem em relação a massa do material seco. Quanto ao conteúdo de cimento, de imediato aconselha-se usar para ambas as misturas teores a partir de 8,0% já que estes satisfazem plenamente as especificações da ABCP. Levando-se em consideração os resultados do estudo desenvolvido nesta pesquisa, pode-se afirmar que as misturas em foco apresentaram resistências e durabilidade por molhagem e secagem tecnicamente aconselháveis como materiais de construção, devendo portanto, serem ensaiadas em revestimento de canais para apreciação dos efeitos provocados pelo meio ambiente e, conseqüentemente, para que se possa determinar com exatidão seus gastos com manutenção e conservação, sua vida útil, assim como, os demais parâmetros necessários a uma completa análise econômica.

Palavras-chaves: estudo comparativo, estabilização solo-cimento compactado e solo-cimento plástico, composições ótimas, ensaios de durabilidade e resistências, revestimento de canais.

### ABSTRACT

The present work was carried out at the Center of Science and Technology of the Federal University of Paraíba (CCT/UFPb), in Campina Grande, State of Paraíba, Brazil.

The main objectives were to study the stabilization of a sandy soil with cement, in order to determine its bulky composition in regard to mixture compacted soil-cement and plastic soil-cement for revestment of ducts. The parameters used to determine the bulky composition of the mixture named, were the percentages of cement and water, where studied itself 54 combinations of these substances. It was utilized a soil collected in the own CCT/UFPb, that it was classified by Highway Research Board (HRB) and revealed oneself as being of group A2 - 4. It used oneself the methodology engaged in "Associação Brasileira de Cimento Portland" (ABCP), for essays of durability for wetting-drying (Method SC-3), and resistance to simple compression (Method SC-4), in several kinds of attempted stuffs. It was take place, also the Brazilian essay of indirect strain (EBTI), finishing in this way, the study of the influences that the percentages of cement and water cause in the stabilization of the above mentioned soil.

Inside of the restrictions of this research, and taking itself in consideration the stabilization of the sandy

soil A2 - 4 (0) with cement to use in revestment of ducts, the results of the analysis that indicate the bully composition of the mixture compacted soil-cement and plastic soil-cement owe to contain, respectively, 10,0% and 12,0% of mois- ture of molding in relation the mass of the material dry. As to contents of cement, to immediate advise itself to use to any mixture the tenores at to leave to go of 8,0% now what these satisfy plenarily ABCP's specifications. Thus, accor- ding to the experimental results obtained in this research, can assert that the mixture in focus presented resistances and durability for wetting-drying, advisable as materials of building, owing, therefore, be attempted in revestment of ducts for apreciation of the effects challenged by environ- ment and, consequently, to determine with exactness its was- te with maintenance and upkeep, besides the necessary parame- ters to a complete economic analysis.

Key words: comparative study, stabilization compacted soil- cement and plastic soil-cement, bully composi- tions, esseys of durability and resistances, re- vestment of ducts.

SUMÁRIO

	Página
DEDICATÓRIA	III
HOMENAGEM	IV
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VIII
ABSTRACT	X
SUMÁRIO	XII
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Objetivo da pesquisa	03
1.2. Localização da pesquisa	04
2. REVISÃO DA LITERATURA	06
2.1. Introdução	06
2.2. Estabilização do solo	06
2.2.1. Estabilização do solo com cimento	09
2.2.1.1. Conceito	09
2.2.1.2. Histórico	09
2.2.1.2.1. No exterior	09
2.2.1.2.2. No Brasil	(11) 100
2.2.1.3. Química e hidratação do cimento	12
2.2.1.4. Mecanismo de estabilização	14
2.2.1.4.1. Reação primária	15
2.2.1.4.2. Reação secundária	15

2.2.1.5.	Estrutura do solo-cimento	16
2.2.1.5.1.	Solo granular-cimen <u>to</u>	17
2.2.1.5.2.	Solo de grãos <u>fi</u> nos-cimento	17
2.2.2.	Fatores que influenciam as propriedades do solo-cimento	18
2.2.2.1.	Natureza e tipo de solo	18
2.2.2.2.	Quantidade e tipo de cimento	20
2.2.2.2.1.	Loess arenoso	20
2.2.2.2.2.	Loess friável	20
2.2.2.2.3.	Kansan till	21
2.2.2.2.4.	Conclusão	21
2.2.2.3.	Umidade contida na mistura	22
2.2.2.4.	Mistura	24
2.2.2.5.	Compactação	24
2.2.2.6.	Condições de cura	25
2.2.2.7.	Aditivos químicos	26
2.2.3.	Modos de falhas	27
2.2.3.1.	Causas de fraturas	27
2.2.3.1.1.	Carregamento do <u>trá</u> fego	28
2.2.3.1.2.	Tensões originadas por temperatura	28
2.2.3.1.3.	Contração	28
2.2.3.2.	Estudo da contração	28
2.2.3.2.1.	Contração autógena	28

2.2.3.2.2. Contração por <u>seca</u> gem	29
2.2.3.3. Mecanismo de contração	29
2.2.3.3.1. Tensão de <u>capilari</u> dade	29
2.2.3.3.2. Fenômeno de <u>adsor</u> ção líquida	29
2.2.3.3.3. Contração "interior"	29
2.2.3.4. Fatores que influenciam a <u>quan</u> tidade e taxa de contração	30
2.2.3.4.1. Quantidade de <u>cimen</u> to	30
2.2.3.4.2. Quantidade e tipo de argilo-mineral	30
2.2.3.4.3. Umidade de moldagem	30
2.2.3.4.4. Massa <u>específica</u> aparente seca	30
2.2.3.4.5. Demora entre a <u>mis</u> tura e compactação	31
2.2.3.4.6. Cura	31
2.2.3.5. Controle da contração	31
2.2.3.5.1. Quantidade de <u>cimen</u> to	31
2.2.3.5.2. Quantidade de argila	32
2.2.3.5.3. Quantidade de <u>umida</u> de	32
2.2.3.5.4. Massa <u>específica</u> de	

	Página
compactação	32
2.2.3.5.5. Uso de aditivos	32
2.2.3.6. Métodos de controle de fraturas	33
2.2.3.6.1. Contração diferen <u>cial</u>	33
2.2.3.6.2. Limitação do sublei <u>to</u>	34
2.2.3.6.3. Concentração de ten <u>sões</u>	34
2.2.3.6.4. Fraturas por carre <u>gamento</u> externo	34
2.2.3.6.5. Reflexão de fratu <u>ras</u>	34
2.3. Solo-cimento ✓	35
2.3.1. Conceito	35
2.3.2. Características	35
2.3.3. Generalidades	35
2.3.4. Tipos de estabilização solo-cimento	37
2.3.4.1. Solo-cimento compactado	37
2.3.4.2. Solo-cimento plástico	39
2.3.4.3. Solo-cimento modificado	40
2.4. Revestimento de canais	40
2.4.1. Generalidades	40
2.4.2. Tipos	41
2.4.3. Revestimento de canais com misturas de solo-cimento	43
2.4.3.1. Generalidades	43

	Página
2.4.3.2. Solo-cimento compactado (padrão)	45
2.4.3.3. Solo-cimento plástico	46
2.4.3.4. Instalações experimentais	47
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1. Introdução	53
3.2. Materiais	53
3.2.1. Solo	53
3.2.1.1. Jazida	54
3.2.1.2. Coleta da amostra	56
3.2.1.3. Procedimento no laboratório	56
3.2.1.3.1. Preparação do solo	57
3.2.1.3.2. Acondicionamento do solo	58
3.2.2. Cimento	58
3.2.3. Aparelhagem	60
3.3. Métodos	60
3.3.1. Ensaio de caracterização e sequência metodológica	62
3.3.1.1. Análise granulométrica	62
3.3.1.2. Massa específica real	62
3.3.1.3. Limites de Atterberg	63
3.3.1.3.1. Limite de liquidez	63
3.3.1.3.2. Limite de plasticidade	63
3.3.1.4. Compactação (Proctor normal)	63
3.3.1.5. Permeabilidade do solo	64
3.3.1.6. Ensaio de compactação de solo-	

cimento - Método SC-1	64
3.3.1.7. Moldagem de corpos de prova de solo-cimento - Método SC-2	65
3.3.2. Ensaio tecnológico	65
3.3.2.1. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método SC-3	66
3.3.2.2. Ensaio a compressão de corpos de prova de solo-cimento - Método SC-4	68
3.3.2.3. Ensaio brasileiro de tensão indireta (EBTI)	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1. Introdução	72
4.2. Métodos	72
4.2.1. Ensaio de caracterização e sequência metodológica	72
4.2.1.1. Análise granulométrica	72
4.2.1.2. Massa específica real	73
4.2.1.3. Limites de Atterberg	73
4.2.1.3.1. Limite de liquidez	76
4.2.1.3.2. Limite de plasticidade	76
4.2.1.4. Compactação (Proctor normal)	76
4.2.1.5. Permeabilidade do solo	78
4.2.1.6. Ensaio de compactação de solo-cimento - Método SC-1	81
4.2.1.7. Moldagem de corpos de prova de	



## 1. INTRODUÇÃO

Analisando-se a problemática inerente aos projetos de irrigação implantados na região Nordeste do Brasil, no que se refere ao setor da Economia em Projetos de Recursos Hidráulicos, conclui-se que existe uma falha técnica gritante à espera de uma solução que, indubitavelmente, não poderá continuar sendo desprezada ou adiada já que se reporta à redução do elevado custo inicial desses projetos.

Ao eleger-se o tema em foco para dissertação desta pesquisa, não se teve pretensões de apresentar uma fórmula mágica que pudesse reduzir imediatamente esses custos. Apenas, procurou-se executar uma pequena parcela de um trabalho que ao ser concluído, apresente um incremento expressivo na taxa benefício-custo (B/C) dos projetos que utilizam o sistema de irrigação superficial.

A importância desta pesquisa não pode ser avaliada separadamente porque ela faz parte de um todo. Outras pesquisas virão e, num futuro próximo, elas farão parte do contexto geral de um tratado sobre revestimento de canais.

Num dossiê de centenas de volumes vê-se que vários assuntos são estudados sobre os mais variados aspectos, contudo, nota-se claramente que existe uma tendência para a sofisticação ocorrendo um déficit no setor econômico que é prioritário, não somente ao que tange as exegeses da irrigação, co

mo em todo e qualquer empreendimento socio-econômico.

Assim, urge que se procure uma maneira de minimizar esses custos para que a irrigação superficial se torne acessível aos pequenos e médios agricultores, já que o desenvolvimento pleno da agropecuária nordestina está, intrinsecamente, ligado à tecnologia da irrigação.

Sabe-se que mesmo na área da Engenharia de Irrigação muito pouco se tem realizado em prol da simplificação desta promissora tecnologia, transportando-a ao plano da viabilidade econômica para que se utilize meios compatíveis com a realidade nacional e, mais precisamente, com a realidade econômica da combalida infra-estrutura nordestina.

Levando-se em consideração a área irrigada e a tecnologia atualmente utilizada, deduziu-se que a irrigação ainda dá os primeiros passos na região do polígono das secas. Todavia, com a crescente densidade populacional, cada vez mais fica patente que a redenção do povo nordestino está diretamente relacionada com a irrigação que assegura mais de uma colheita ao ano, com uma pequena margem de riscos.

Sentindo-se que as técnicas tradicionalmente usadas estão pendentes a uma total substituição, procurou-se desenvolver uma pesquisa pioneira no campo da estabilização de solos para revestimento de canais.

Partindo-se da premissa de que novas e econômicas técnicas deverão surgir a curto e médio prazo, como medida prioritária para incrementar a irrigação em solo nordestino, procurou-se desenvolver esta pesquisa visando um melhor conhecimento de solo-cimento plástico, tendo em vista a sua maior adequabilidade para revestimento de canais em contraposição

com o tradicional solo-cimento compactado cuja técnica de uso em canais é de mais difícil execução, exigindo equipamento sofisticado e mão-de-obra especializada.

### 1.1. Objetivo da pesquisa

Como a mistura solo-cimento compactado exige um complexo sistema motorizado para que seja colocada, moldada e compactada em forma de revestimento durante a construção do canal, além de seu elevado custo de implantação associado a um rigoroso controle de qualidade, nada mais lógico que se procure evitar esses métodos construtivos em benefício do revestimento com solo-cimento plástico, de execução e aplicação bem mais simples. Assim, torna-se fácil entender, que o objetivo primordial desta pesquisa é realizar um estudo comparativo entre estes dois tipos de revestimento de canais, tendo por fim uma futura redução no custo inicial de projetos que utilizem a irrigação superficial.

Além do exposto, também merecem destaque os seguintes fatores.

1. A escassez de dados no Brasil sobre o estudo do revestimento de canais com misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico.
2. Estudar tecnicamente a estabilização de um solo arenoso com cimento, visando a determinação de sua composição ótima em relação às misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico para revesti

mento de canais.

3. Estimular o desenvolvimento de pesquisas similares para que a médio prazo, tenha-se subsídios capazes de indicar qual o tipo de revestimento de canais possui maior viabilidade econômica em nosso meio.
4. Possibilidade de viabilizar projetos de irrigação superficial em áreas onde existem solos arenosos.

## 1.2. Localização da pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (CCT/UFPb), localizada no bairro de Bodocongó, na parte oeste da cidade de Campina Grande, Paraíba, região Nordeste do Brasil. Geograficamente, a cidade de Campina Grande está situada ao leste do estado da Paraíba, mais precisamente no Planalto da Borborema, a 7° 13' de latitude sul e 35° 35' de longitude a oeste de Greenwich, a uma altitude de 527,0 m acima do nível do mar (HARGREAVES, 1974). O clima é semi-árido ou estepe (Bs) segundo Köppen (TREWARTHA, 1954), com chuvas predominantes de outono-inverno, apresentando médias anuais da ordem de 688,0 mm, registrando-se as maiores precipitações nos meses de março a agosto. Devido a altitude, esse clima é bastante atenuado com temperatura média do ar de 22,9 °C e umidade relativa média de 76,0%. O período mais frio corresponde aos meses de junho a setembro e o mais quente vai de dezembro a março. Na área referente ao Campus do CCT/UFPb,

predomina o complexo cristalino do período pré-cambriano, sendo que as rochas do embasamento são constituídas de migmatitos e gnaisses. Os solos resultantes do intemperismo são de pequena espessura e, geralmente, se apresentam após classificação textural como sendo das classes areia, areia-franca ou franco-arenoso. A vegetação existente resume-se a uma capoeira rala de arbustos naturais com gramíneas e ervas daninhas nativas que brotam no período das chuvas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Introdução

Apesar da existência de uma bibliografia bastante vasta relacionada com a estabilização do tipo solo-cimento compactado (também conhecido como solo-cimento padrão ou ordinário), o mesmo não acontece com o solo-cimento plástico onde se verifica ainda existir uma grande lacuna no estudo deste tipo de mistura, principalmente, no que se refere a pesquisas envolvendo revestimento de canais. Deste modo, torna-se deveras necessário a realização de pesquisas em nosso país e, especialmente, na região Nordeste, enfocando o solo-cimento plástico para que se obtenha um amplo conhecimento sobre tal assunto, dando ênfase ao seu aproveitamento para uso em revestimento de canais na procura de uma nova e eficiente tecnologia, capaz de viabilizar projetos de irrigação superficial.

### 2.2. Estabilização do solo

O termo "estabilização" é melhor empregado com refe

rência aos vários procedimentos que são usados para melhorar as características do solo, especialmente a resistência. Estes métodos de estabilização podem ser agrupados em pelo menos duas categorias principais e em várias categorias secundárias. As duas principais categorias são: 1. estabilização mecânica e, 2. estabilização química. A estabilização mecânica é usada, geralmente, com o objetivo de modificar uma ou mais das seguintes características do solo: massa específica, conteúdo de umidade e qualidade da superfície. Em vários casos se obtém um grande melhoramento na estabilidade mediante apenas o uso da drenagem. Controlando-se a umidade e a compactação, o processo se torna ainda mais eficaz (HOUGH, 1957).

A estabilização do solo é um termo geral para qualquer método físico, químico ou biológico, ou qualquer combinação de tais métodos que se emprega para melhorar certas propriedades de um solo natural fazendo com que este sirva adequadamente para os interesses da engenharia. Os diferentes usos do solo apresentam vários requisitos de resistência mecânica e de resistência as forças do meio ambiente. Estabilizar o talude de um corte ou combater erosão, constitui-se um assunto bastante diferente do que estabilizar um solo para sustentar uma elevada e sucessiva solicitação de cargas sem causar uma deformação excessiva. Consequentemente, o termo "estabilização do solo" tem um significado exato, somente se a natureza do solo e os requisitos de engenharia (inclusive os do meio ambiente) são devidamente identificados (WINTERKORN, 1975).

A estabilização do solo envolve: 1) diagnóstico das

propriedades de resistência de um dado solo e suplementação requerida destas propriedades para o uso pretendido em termos físicos, físico-químicos e químicos; 2) transferência dos requerimentos suplementares em materiais e processos disponíveis, e decisão sobre o uso do método específico (ou escolha do método) nas bases da economia, viabilidade prática ou condições especiais (militares ou outras emergências); 3) construção, constituindo normalmente de desagregação, mistura com o material estabilizador e densificação; e 4) considerações econômicas relacionadas com o custo total composto do custo dos materiais, construção e manutenção para o serviço vital da estrutura (WINTERKORN, 1946) (WINTERKORN, 1975).

Segundo WINTERKORN (1975) existem inumeráveis possibilidades teóricas e práticas de estabilização de solos, porém somente os seguintes sistemas e métodos apresentam soluções práticas e econômicas.

- (1) Combinação do esqueleto granular com a capacidade de obturação dos poros e/ou cimentação natural e materiais estranhos (argila - e outros concretos e argamassas).
- (2) Solo-cimento Portland: a) SOLO-CIMENTO COMPACTADO; b) SOLO-CIMENTO PLÁSTICO; c) Solo-cimento modificado.
- (3) Solo-cal.
- (4) Solo-asfalto.
- (5) Solo-resina.
- (6) Estabilização química.
- (7) Estabilização térmica.
- (8) Estabilização eletrosmótica e eletro-química do

solo.

### 2.2.1. Estabilização do solo com cimento

2.2.1.1. Conceito - Este método consiste em se adicionar a um solo natural (puro) ou previamente tratado com algum aditivo, quantidades variadas de cimento e água com a finalidade de melhorar suas características, visando transformá-lo num material de construção com múltiplas aplicações na engenharia.

2.2.1.2. Histórico - Embora não exista uma data fixa determinando o início dos estudos da estabilização do solo com cimento, sabe-se através de registros que as primeiras aplicações foram realizadas após o meado da segunda década deste século.

2.2.1.2.1. No exterior - O conceito original de estabilização de solos com cimento parece datar de tentativas feitas por Brooke e Bradley no plano de Salisbury em 1917 (CATTON, 1959) (KEMP, 1973) (O'FLAHERTY, 1974), contudo, há poucos outros usos relatados até os primeiros trabalhos cientificamente controlados nos Estados Unidos em 1932, quando aproximadamente 17.000,0 m<sup>2</sup> de um pavimento de solo-cimento foram colocados perto de Johnsonville, Carolina do Sul (KEMP, 1973).

Entretanto, segundo PINTO (1961) citado por BEZERRA et alli (1976), foi em 1935 que a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION intensificou um programa de ensaios destinados a verificar os efeitos do cimento Portland nas propriedades dos so

los quando a estes era adicionado. A partir desta data o solo-cimento passou a ter enorme aceitabilidade e emprego. Nos EUA, por exemplo, em 1957 anunciava-se a construção de 175.000.000,0 m<sup>2</sup> de pavimentos com base de solo-cimento.

Na Inglaterra, os estudos sobre estabilização com solo-cimento foram iniciados em 1920. Com o avanço tecnolôgico, as misturas de solos tratados com cimento foram diversificadas em três tipos, surgindo assim, a multiplicidade do emprego deste material atualmente usado em base e sub-base de estradas, aeroportos e pistas de rolamento, revestimento de valores laterais, canais, barragens de terra, como material de base para fundações de grandes estruturas, etc. (O'FLAHERTY, 1974).

KROCHIN (1960) afirmou que a estabilização de solos com mais de 35,0% de argila deve ser evitada. Neste particular, pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de se tirar possíveis vantagens porventura advindas pelo uso de aditivos químicos sobre a qualidade do solo-cimento. MOH et alii (1962) observaram que um dos principais objetivos destas pesquisas consiste em se descobrir aditivos que assegurem a eficiência do cimento como estabilizante de solos "problemáticos", isto é, solos que não podem ser economicamente estabilizados apenas com cimento. Por outro lado, a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1965) concluiu que, em se tratando de um solo nestas condições, justificam-se quaisquer esforços dispendidos para encontrar um material de granulometria favorável sob o ponto de vista econômico; solos contendo um teor de silte mais argila igual ou superior a 50,0 % podem ser estabilizados com cimento desde que tenham sido granulometricamente corrigidos.

Desde que o termo "estabilização" do solo com cimento se refere, também, a resistência que o material deve oferecer aos danos causados pela água, NEUBAUER et alii (1966), instalaram um experimento que consistiu em deixar que tijolos de solo-cimento ficassem em contacto com uma camada de água de 2,5 cm de altura, durante 150 horas, após o que os autores avaliaram a resistência que os mesmos ofereceram ao tratamento com água; tijolos prensados e moldados com 12,0 % a 20,0 % de cimento se comportaram muito bem, tendo alguns absorvido menos de 5,0 % de água, enquanto que os exemplares contendo 2,0 % a 4,0 % de cimento absorveram 15,0 % de água.

JONES (1966) submeteu corpos de prova de solo-cimento a um tratamento com água e observou que a quantidade de água absorvida é, geralmente, inversamente proporcional a quantidade de cimento na mistura.

2.2.1.2.2. No Brasil - Segundo BASÍLIO (1955) a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, desde a sua fundação em 1936, vem estudando o emprego de estruturas de pavimento de solo-cimento. O primeiro pavimento usando solo-cimento executado em nosso país, foi construído no Aeroporto Santos Dumont no ano de 1940. Tratava-se de uma pequena pista de circulação com cerca de 1.600,0 m<sup>2</sup>.

As dificuldades surgidas durante a segunda guerra mundial e a posterior escassez de cimento Portland, ocasionaram que o uso de solo-cimento não fosse desenvolvido apesar dos bons resultados obtidos nas pavimentações realizadas.

Para BEZERRA et alii (1976) as vantagens da estabilização do solo com cimento são que, praticamente, qualquer solo pode ser estabilizado dando-se suficiente quantidade de

cimento; o fato da estabilização solo-cimento ter sido empregada com maior ou menor escala em todos os países onde a construção rodoviária tem sido desenvolvida, havendo portanto, bastante estudo sobre o comportamento desse tipo de estabilização. A principal desvantagem reside no fato de não se poder evitar fraturas que sempre ocorrem, o que por si só não se constitui num sério defeito, todavia poderá levar a estrutura construída ao fracasso.

2.2.1.3. Química e hidratação do cimento - Os produtos secundários formados pela reação pozolânica em misturas de argila-cimento são, provavelmente, semelhantes ao silicato hidratado de cálcio ou ao aluminato hidratado de cálcio resultantes da hidratação do cimento. Consequentemente, o conceito de Powers (POWERS et alii, 1947) sobre a estrutura física das pastas de cimento deve ser de grande valor para uma melhor compreensão da estrutura em misturas de argila-cimento. POWERS et alii (1947) calcularam que  $1,0 \text{ cm}^3$  de cimento produz  $2,2 \text{ cm}^3$  de produtos pela hidratação.

HANDY (1958) salientou que as ligações químicas desenvolvidas entre o cimento e as superfícies dos minerais, tornam-se mais importantes em misturas com grãos mais finos tal como em solo-cimento, do que em misturas de graduação grossa como no concreto. Ele tentou explicar o desenvolvimento a longo prazo da resistência em certas misturas de solo-cimento, baseando-se nas hipóteses propostas por WEYL (1953) da polarização de íons próximas da superfície da sílica (HANDY, 1956) (HANDY, 1958).

KALOUSEK (1958) indica que a proporção de  $\text{CaO/SiO}_2$  na

transição de um tipo para outro é de 1,33. Este fato é também admitido por outra investigação usando microscópio eletrônico. RICHARTZ et alii (1965) mencionam que o silicato hidratado de cálcio é do tipo placa quando a proporção de  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  é menor do que 1,3 e, frequentemente, do tipo fibroso ou do tipo agulha se essa proporção é maior do que 1,4.

CHATTERJI et alii (1966) observaram com o auxílio do microscópio eletrônico a superfície fraturada de uma pasta de cimento hidratado que apresentou uns cristais achatados parecidos com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou com um aluminato hexagonal; as fibras mais grossas poderiam ser "ettringite" e as mais finas silicato hidratado de cálcio.

INGLES (1966) concluiu que a resistência desenvolvida no solo-cal e solo-cimento, assim como em cerâmicas, foi uma função logarítmica da porosidade. Naturalmente, a porosidade em misturas solo-cal e solo-cimento depende da quantidade de gel cimentosa incluída.

NOBLE (1967) explicou o mecanismo da reação de argilas minerais com cimento Portland dando ênfase à limitação que este tipo de mistura apresenta, quanto a hidratação do cimento, devido a granulação muito fina da argila.

A similaridade estrutural entre os produtos da hidratação do cimento e argilas minerais tem sido apontada por muitos pesquisadores (GARD et alii, 1959) (ARNOULD, 1967 b).

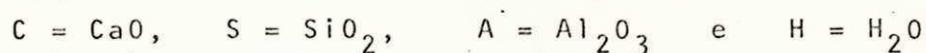
ARNOULD (1967 a) afirma que a comparação de tobermorita com argilas minerais poderia ser útil à tecnologia do cimento em pesquisas com aditivos. Em pesquisas de solo-cimento, tal similaridade pode levar à suposição de "epitaxy". Contudo, procura-se no presente uma substancial evidência que

poderia ser dada a probabilidade de epitaxy, esperando-se que tal processo favoreça o desenvolvimento da resistência (GILLOT, 1968).

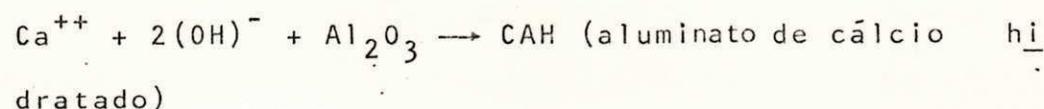
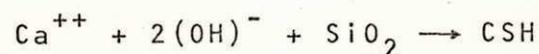
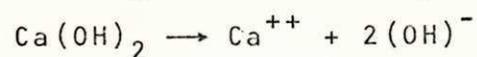
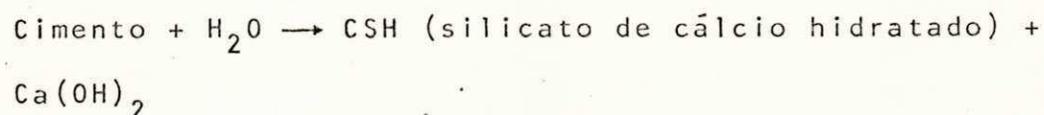
SIERRA (1968) apresentou resultados muito interessantes sobre as estruturas internas das pastas de cimento, e afirmou em seu relatório que, "provavelmente, o limo poderia ser encontrado não como uma fase separada, mas como uma fase que está intimamente incorporada dentro do gel tobermorita".

KAWAMURA (1970) relatou diversas informações sobre a química do cimento, especialmente, as relativas às pesquisas de solo-cimento envolvendo o mecanismo de hidratação do cimento e a estrutura física da pasta de cimento.

Sabe-se muito bem que os quatro componentes do cimento Portland são:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Destes, o  $C_3S$  é o mais importante porque é, usualmente, o principal constituinte do cimento Portland. Na química do cimento a composição de seus componentes é, frequentemente, representada como a soma dos óxidos cujas fórmulas abreviadas são assim representadas:



2.2.1.4. Mecanismo de estabilização - O processo de formação foi sumariado por MOH (1965) nas quatro equações seguintes.



KREBS et alii (1971) certificaram que a finalidade

principal de toda estabilização com cimento é produzir um aumento na resistência. Embora as reações químicas que levam a este aumento na resistência ainda não sejam claramente entendidas, acredita-se que ocorrem processos de hidratação primária e secundária.

2.2.1.4.1. Reação primária - Os principais compostos que formam o cimento Portland são:

silicato dicálcio :  $2CaO.SiO_2$  ( $C_2S$ )

silicato tricálcio :  $3CaO.SiO_2$  ( $C_3S$ )

aluminato tricálcio:  $3CaO.Al_2O_3$  ( $C_3A$ )

Os dois primeiros sobre hidratação produzem seus respectivos hidratos e cal hidratada ( $Ca(OH)_2$ ). Estes silicatos hidratados de cálcio são as maiores fontes de resistência no cimento e são conhecidas como gel tobermorita. O aluminato tricálcio hidrata-se rapidamente para aluminato tetracálcio hidratado e proporciona muito da resistência inicial do cimento, embora depois esta contribuição seja relativamente negligenciada.

2.2.1.4.2. Reação secundária - O segundo estágio do processo de estabilização pode ser subdividido em efeito imediato e efeito a longo prazo.

O efeito imediato é a dissociação da cal hidratada em cátions de cálcio e ânions de hidroxilas. Alguns cátions de cálcio trocam de base com alguns íons existentes ligados às partículas dos argilo-minerais, e outros, ligam-se entre si como cátions adicionais, resultando na neutralização das cargas negativas da argila.

O efeito a longo prazo resulta do incremento do valor do pH do solo pela cal. O alto pH leva à dissociação da síli

ca e alumina na argila as quais podem então combinar-se com cátions de cálcio da cal para formar silicatos e aluminatos hidratados secundários. Estes compostos secundários são cimentícios e contribuem grandemente para a longa resistência do solo-cimento.

Para O'FLAHERTY (1974) quando o cimento é misturado com um solo granular, a cimentação se dá por meio de ligações mecânicas do silicato de cálcio e hidratos de alumínio com a superfície rugosa do mineral. Entretanto, ao estabilizar-se solos de granulometria fina com cimento, a cimentação torna-se uma combinação de ligação mecânica e ligação química entre o cimento e as partículas do solo. Os incrementos de silte e argila em um solo dão mais oportunidade para as adições das reações químicas.

2.2.1.5. Estrutura do solo-cimento - BOFINGER (1964) propôs a seguinte hipótese sobre a estrutura do solo-cimento. Sua teoria diz que se um solo é composto de areia e argila, a estrutura do solo-cimento representada por uma secção transversal consiste, relativamente, de areia grossa, grãos de silte e bolsas de argila; esses componentes da estrutura são envolvidos por um esqueleto de cimentação contínua constituído, abundantemente, de compostos cimentosos e de partículas argilosas. Outrossim, Bofinger provou experimentalmente que o esqueleto contínuo era sempre formado de baixo conteúdo de cimento, embora, quanto mais baixo o conteúdo de cimento maior a fração das bolsas de argila. Sobre a estrutura do esqueleto KAWAMURA (1970) discordou parcialmente deste conceito, todavia, certificou que enquanto o solo-cimento for produzido usando-se um solo contendo areia, silte,

argila e partículas coloidais, a estrutura do solo-cimento indicada por Bofinger parece quase razoável.

Quando pesquisas com misturas de solo-cimento são efetuadas, a relação entre estruturas e propriedades mecânicas deve ser considerada como o principal tópico. O completo conhecimento de um problema tão amplo deve ser quase impossível devido a complexidade da química do cimento e das propriedades físico-químicas do solo (KAWAMURA, 1970).

2.2.1.5.1. Solo granular-cimento - Em um solo granular-cimento a cimentação é limitada à ação do produto primário, o gel tobermorita. A pasta de cimento não preencherá todos os vazios entre as partículas do solo e, portanto, uma melhor uniformidade implicará numa menor quantidade de vazios aumentando os pontos de contacto, acarretando assim, uma ação cimentante mais eficaz (HRB, 1961).

2.2.1.5.2. Solo de grãos finos-cimento - 1ª hipótese: uma matriz contínua de produtos cimentados primários e secundários é formada, a qual encaixa os grãos de solo. Esta matriz, efetivamente, fixa as partículas não permitindo o movimento de umas sobre as outras, reduzindo assim, sua plasticidade e aumentando a resistência ao cisalhamento (HRB, 1961). 2ª hipótese: o solo e o cimento formam um sistema coloidal, sendo o solo a fase contínua. Nesta hipótese o solo-cimento está composto de partículas agregadas, cada uma das quais contendo um núcleo de gel hidratado de cimento circundados por camadas de partículas argilosas. Assim, os agregados são cimentados juntos por material cimentício adicional (CATTON, 1962).

Existe divergência quanto à hipótese mais aceitável para explicar a estrutura do solo de grãos finos-cimento. CA

BRERA (1974) sugere, baseado em estudos realizados com o auxílio do microscópio eletrônico, ser a 2ª hipótese mais aceitável já que a mistura solo-cimento se apresenta heterogênea quando vista ao microscópio e não numa fase contínua como propõe a 1ª hipótese.

#### 2.2.2. Fatores que influenciam as propriedades do solo-cimento

Enumerar e discutir todos os fatores que afetam as propriedades do solo-cimento, torna-se um pouco difícil pela existência da grande quantidade de solos com características diferentes, proporcionando um número elevado de combinações nas misturas. Entretanto, serão relacionados a seguir os fatores que, primariamente, afetam o solo-cimento (O'FLAHERTY, 1974).

2.2.2.1. Natureza e tipo de solo - LEONARDS (1962) declarou que quanto maior a superfície específica de um solo, maior será a quantidade de cimento para estabilizá-lo.

A presença de argila no solo pode causar problemas na pulverização, mistura e compactação do solo-cimento.

Os íons trocáveis do solo influenciam a reação do solo tratado. O cálcio é o mais desejável íon para a estabilização com cimento.

A matéria orgânica interfere na hidratação do cimento enfraquecendo assim a mistura solo-cimento.

A natureza e o tipo de solo é, talvez, o fator mais importante que afeta as propriedades do solo-cimento. Qual

quer solo pode ser estabilizado se cimento suficiente é adicionado, porém o conteúdo de cimento para se obter uma dada estabilidade é aumentado a medida que cresce a quantidade de silte e argila, considerando-se outros fatores constantes. Isto significa não ser possível estabilizar-se economicamente com cimento solos como maciços argilosos (O'FLAHERTY, 1974).

Nos EUA pesquisas indicam que solos arenosos com cerca de 10,0% a 35,0 % de silte e argila são os que apresentam características vantajosas para estabilização com cimento.

Na Inglaterra pesquisadores indicam que o limite de liquidez não deve ser maior que 45,0 % e o índice de plasticidade não superior a 20,0 %.

A presença de sulfato de cálcio na água e no solo pode também afetar a mistura do solo-cimento.

O conteúdo de matéria orgânica no solo pode muitas vezes torná-lo impróprio para estabilização com cimento.

Na Inglaterra emprega-se um método de verificação da viabilidade do solo para estabilização com cimento, ou seja, indica se o teor de matéria orgânica naquele solo afetará ou não a mistura. Este método consiste em se adicionar 10,0% de cimento Portland e água ao solo, medindo-se o pH da mistura uma hora depois da adição. Se o mesmo for menor que 12,1 o solo será rejeitado pois o resultado indica a presença de matéria orgânica capaz de obstruir o cimento (O'FLAHERTY, 1974).

Segundo CABRERA (1975) para cada aumento no teor de argila do solo, corresponde a um incremento na resistência (considerando-se constantes os demais fatores inclusive a porcentagem de cimento); entretanto, este efeito benéfico é limitado pois,

ao ser atingido um determinado ponto que seria a porcentagem ótima de argila na mistura, inicia-se um decréscimo na resistência correspondente ao acréscimo supérfluo no conteúdo de argila.

2.2.2.2. Quantidade e tipo de cimento - A quantidade e tipo de cimento é também um fator muito importante a ser estudado quando se pesquisa as causas e efeitos que abalam as propriedades do solo-cimento.

Na Iowa State University realizou-se uma pesquisa utilizando os solos Loess arenoso, Loess friável e Kansan till, e os cimentos Portland dos Tipos I e III, cuja finalidade principal foi analisar a variação da resistência a partir da utilização destes tipos de cimento em misturas com cada um dos solos citados (HRB, 1958).

2.2.2.2.1. Loess arenoso - Os cimentos do Tipo III forneceram maiores resistências do que os cimentos do Tipo I, exceto para 4,0 % no Tipo IIIb que apresentou, aproximadamente, a mesma resistência para igual teor de cimento do Tipo Ic. O aumento na taxa de resistência em função do igual acréscimo no conteúdo de cimento, foi maior com os cimentos do Tipo III do que com os do Tipo I, com a diferença de resistência sendo mais pronunciada após os períodos de cura de 2 a 7 dias do que após 28 dias (HRB, 1958).

2.2.2.2.2. Loess friável - Nas misturas com este solo os cimentos do Tipo III forneceram resistências mais elevadas após todos os períodos de cura, apresentando também um aumento na taxa de resistência, em função do igual acréscimo no conteúdo de cimento, bem maior que o registrado em cimentos

do Tipo I. Este solo forneceu resistências inferiores às do Loess arenoso, provavelmente, em consequência de sua elevada superfície específica (HRB, 1958).

2.2.2.2.3. Kansan till - Este solo contém porcentagens aproximadamente iguais de areia, silte e partículas argilosas e, comparativamente, verifica-se ser um solo melhor graduado que o Loess friável. Isto pode justificar as maiores resistências obtidas em algumas de suas misturas. Os cimentos do Tipo III forneceram resistências superiores às dos cimentos do Tipo I (HRB, 1958).

2.2.2.2.4. Conclusão - Esta pesquisa mostrou que os cimentos do Tipo III forneceram maiores resistências que os cimentos do Tipo I para os três solos estudados, indicando possibilidades de significantes economias e vantagens estruturais com a utilização do cimento de Tipo III, cimento Portland de alta resistência, em vez do Tipo I, cimento normal (HRB, 1958).

Quanto maior a quantidade de cimento acidionada a um solo, tanto mais resistente resultará o solo-cimento. Por outro lado, o cimento com grande resistência inicial é usualmente mais efetivo do que o cimento comum. A adequada escolha do tipo de cimento para a estabilização solo-cimento pode acarretar consideráveis economias no preço total do cimento a utilizar, como têm mostrado as pesquisas neste sentido (BOFINGER, 1965).

Nos EUA o conteúdo de cimento requerido é normalmente selecionado para encontrar um critério de durabilidade já que a estabilidade será automaticamente alcançada.

Na Inglaterra é prática normal especificar a estabilização com misturas de solo-cimento em termos mínimos de re

sistências não confinadas, isto é, o cimento é adicionado tanto quanto for necessário para alcançar a resistência especificada para um estado mínimo de compactação. Ao contrário dos americanos os ingleses especificam o mínimo estado de estabilidade, en tretanto, o critério de durabilidade deverá ser alcançado. A mais recente especificação inglesa para solo-cimento a 7 dias de cura requer o mínimo valor de  $2.76 \text{ MN/m}^2$  para amostras ci líndricas de cura úmida, tendo uma razão altura/diâmetro de 2 : 1, e para amostras cúbicas  $3.45 \text{ MN/m}^2$  (O'FLAHERTY, 1974).

2.2.2.3. Umidade contida na mistura - Assim como na estabilização de solos naturais o teor de umidade no solo-cimento modifica as propriedades desta mistura.

FELT (1955) sugeriu que para solos argilosos e sito sos a mistura de solo e cimento seja compactada a uma umida de de moldagem igual ou pouco superior à ótima (cerca de 1,0% a 2,0%), enquanto que para solos arenosos a umidade de molda gem deve ser igual ou levemente inferior à ótima. Ele mos trou ainda, que a resistência a compressão simples do solo-cimento varia em função do teor de umidade de moldagem de ma neira semelhante a da curva de compactação.

A água é responsável pela hidratação e cristalização do cimento. Para KROCHIN (1960) a adoção de uma quan tidade de água pode ter maior importância que o próprio teor de cimento, pois, embora a resistência do solo-cimento aumen te com o aumento do teor de cimento na mistura, este efeito pode ser anulado pela adição de uma quantidade inadequada de água. Ainda sobre este aspecto, EL-RAWI et alii (1967) relataram a importância da relação água/cimento quanto ao seu efeito

sobre a resistência do material formado.

No processo de compactação do solo-cimento o teor de umidade do solo influencia o valor da massa específica aparente obtida. MATEOS et alii (1963) concluíram que o mesmo teor de umidade que produz a massa específica aparente máxima em misturas de solo-cimento, contendo aditivos químicos não produz, necessariamente, a máxima resistência.

No caso de bases de solo-cimento construídas com solos muito argilosos, GEORGE (1968) atribuiu ao elevado teor de umidade de moldagem a maior incidência do fenômeno de contração no solo-cimento, provocado pela perda de água por evaporação e resultando em trincas que, se não seladas, permitirão a infiltração da água de chuva até o sub-leito, comprometendo a própria durabilidade do material.

A presença de água numa mistura solo-cimento é necessária para hidratar o cimento, melhorar a trabalhabilidade e facilitar a compactação. A quantidade de umidade presente na mistura tem um efeito considerável sobre a resistência e a massa específica aparente obtidas. Para uma dada energia de compactação há uma quantidade de umidade que produzirá uma massa específica aparente seca máxima. É importante frisar que a umidade ótima para massa específica aparente seca máxima não é, necessariamente, a mesma para se obter a máxima resistência. Para solos arenosos a umidade ótima para a resistência máxima, geralmente, tende estar sobre o lado seco do valor ótimo para a massa específica aparente seca máxima, e sobre o lado úmido para solos argilosos. Para os solos argilosos o valor ótimo para a máxima resistência depende não somente da quantidade de argila presente no solo, mas também

do tipo de argilo-mineral. Para finalidades práticas de projeto, a umidade usada é aquela que resultará numa massa específica aparente seca máxima (O'FLAHERTY, 1974).

2.2.2.4. Mistura - LEONARDS (1962) ressaltou que, geralmente, quanto mais íntima a mistura solo-cimento-água, maior será a resistência e durabilidade do solo-cimento resultante.

De muita importância para o solo-cimento é o fato da mistura após a hidratação do cimento causar efeitos prejudiciais ao solo-cimento resultante. Esta rutura do solo cimentado por mistura continuada é o motivo das especificações, usualmente limitar o tempo gasto entre a adição do cimento e a complementação da compactação.

A mistura envolve dois fatores importantes: o grau e o tempo.

O grau da mistura, também denominado uniformidade da mistura ou eficiência da mistura, diz respeito a distribuição uniforme do cimento durante a preparação da mistura solo-cimento-água. A medida que o grau da mistura tende à uniformidade, vai ocorrendo um incremento gradual na resistência e durabilidade do solo-cimento.

O tempo de mistura úmida tem influência marcante sobre a compactação, podendo modificar completamente a massa específica aparente seca máxima de moldagem, a umidade ótima, além de afetar a resistência e a durabilidade do solo-cimento (CABRERA, 1975).

2.2.2.5. Compactação - STANTON et alii (1943) mostraram que um decréscimo de 5,0 % na massa específica aparente ocasio

nou, para o solo ensaiado, uma diminuição de resistência igual a provocada por redução de 10,0 % a 15,0 % na quantidade de cimento. Semelhantemente, FELT (1955) relatou que, de modo geral, a cada 20,0 g/dm<sup>3</sup> de diferença abaixo da massa específica aparente máxima, resulta uma diminuição de 1,1 kg/cm<sup>2</sup> a 1,8 kg/cm<sup>2</sup> no valor da resistência a compressão, embora o Método SC-2 da ABCP (1977) que fixa o modo pelo qual se moldam corpos de prova de solo-cimento, admita uma tolerância de até 30,0 g/dm<sup>3</sup> para o valor da massa específica aparente máxima.

Segundo TERZAGHI et alii (1955) a maioria dos métodos em uso para determinar o conteúdo ótimo de umidade do solo são idênticos ou derivados do procedimento conhecido como "Método de Proctor".

O trabalho de R. R. Proctor no ano de 1934, citado por HOUGH (1957), contribuiu para despertar a atenção sobre a influência que a umidade do solo exerce na massa específica aparente, e que se pode perceber mediante a compactação.

Proctor estudou-o para os caso práticos da época. Atualmente, devido o maior peso dos equipamentos de compactação, tornou-se necessário alterar as condições do ensaio para manter a indispensável correlação com o esforço de compactação no campo. Assim, surgiu o Ensaio Modificado de Proctor ou AASHO Modificado (CAPUTO, 1976).

2.2.2.6. Condições de cura - O tempo de cura, assim como as condições de cura, são fatores decisivos para o sucesso das construções que utilizam a mistura solo-cimento.

A resistência da mistura solo-cimento aumenta com a

idade. O solo-cimento deve permanecer em período de cura durante os estágios iniciais de sua vida, a fim de que a hidratação do cimento se processe totalmente.

A temperatura tem um efeito marcante: quanto maior a temperatura, mais rápido se processará a cura. (O'FLAHERTY, 1974).

Segundo CABRERA (1975) a resistência a compressão aos 7 dias de cura cresce com o aumento da temperatura num intervalo de 2,0 % a 21,52% por grau, quando a temperatura está aproximadamente em 25,0 °C (77,0 °F). Por causa das diferenças nas temperaturas ambientais, o solo-cimento construído em climas quentes deverá ser 50,0 % a 100,0 % mais forte do que uma construção semelhante durante o clima frio, pelo menos nos três primeiros meses de vida.

2.2.2.7. Aditivos químicos - Pesquisas sobre a aplicação de aditivos químicos em misturas de solo-cimento têm sido executadas desde muitos anos, e dependendo da finalidade para os quais são usados, vários aditivos já foram descobertos.

LAWS (1950) relatou que a incorporação de uma solução de silicato de sódio a um solo que exibía características de materiais montmoriloníticos fez com que este aumentasse sua friabilidade e diminuísse sua capacidade de contração e expansão.

Para uma acentuada estabilidade estrutural a carboximetilcelulose tem se revelado um eficiente agente agregativo de argilas, fato este comprovado por GEOGHEGAN (1950), DOYLE (1952), TAYLOR et alii (1954) e MARTIN et alii (1955).

Segundo MOH et alii (1962) os aditivos sódicos aumen

tam consideravelmente a resistência de todos os tipos de solo-cimento ao ataque de sulfatos, sais comumente presentes na água, os quais de acordo com MEHRA et alii (1955), SHERWOOD (1957) e UPPAL et alii (1957) reagem com o aluminato tricálcio do cimento hidratado provocando aumento de volume e, conseqüentemente, desagregação do solo-cimento.

Estudando os efeitos de aditivos químicos sobre a resistência de misturas de solo-cimento, MATEOS, et alii (1963) chamaram a atenção para o fato de que, em condições normais, o uso de aditivos químicos em solo-cimento pode ser anti-econômico.

Quando o objetivo principal não é uma alta resistência inicial uma significativa redução na quantidade de cimento pode ser obtida pela adição de "fly ash" na mistura solo-cimento (O'FLAHERTY, 1974).

### 2.2.3. Modos de falhas

As bases de solo-cimento das rodovias deterioram-se de três principais maneiras: por fratura, por deformação ou por desintegração do material numa massa instável solta. Um quarto tipo comum de falha, o descascamento de finas camadas superficiais betuminosas sob a ação do tráfego, é um caso especial de desintegração onde apenas o capeamento da camada estabilizada é afetada (KEMP, 1973).

2.2.3.1. Causas de fraturas - Tanto fatores externos com internos são causadores de fraturas em pavimentos com base de

solo-cimento.

2.2.3.1.1. Carregamento do tráfego - O repetido ciclo de carga aplicado a um pavimento de base solo-cimento por rodas passando, causa fratura devido a fadiga do pavimento. Entretanto, como a resistência à tensão do solo-cimento é muito menor que a resistência a compressão, são as cargas de tensão que geralmente causam falhas (KEMP, 1973).

2.2.3.1.2. Tensões originadas por temperatura - Para LISTER (1972) os efeitos da temperatura causam um regime de tensão que é induzido pela limitação da sub-base quando a base tenta aumentar de volume em resposta à mudança neste meio da temperatura. Forças compressivas são desenvolvidas sobre aquecimento e forças de tensão sobre esfriamento.

2.2.3.1.3. Contração - A hidratação do cimento é a causa principal da contração em solos arenosos enquanto a perda de umidade é de maior significação em solos argilosos (NAKAYAMA et alii, 1965).

A contração está associada com a hidratação do cimento e com a perda de umidade para o ambiente externo do solo-cimento compactado (KEMP, 1973).

2.2.3.2. Estudo da contração - Contração é uma causa da redução não elástica do comprimento. Os dois tipos de contração que ocorrem no solo-cimento são conhecidos como contração autógena e contração por secagem.

2.2.3.2.1. Contração autógena - Este tipo de contração ocorre sem que haja qualquer perda de água no sistema, e é devido a hidratação e assentamento da pasta de cimento (HOLT, 1959).

2.2.3.2.2. Contração por secagem - Ocorre quando a umidade é perdida do sistema solo-cimento, ou para a atmosfera ou para o solo do subleito; usualmente, é várias vezes a contração autógena e tende a ser mais rigorosa em solos finos (BEZERRA et alii, 1976).

2.2.3.3. Mecanismo de contração - A perda de umidade é a principal causa de contração e é necessário considerar os mecanismos pelos quais evaporação e contração estão ligados.

2.2.3.3.1. Tensão de capilaridade - GEORGE (1968) afirma que a contração está relacionada à evaporação, mas o volume de água perdida sob secagem é sempre muito maior do que a contração volumétrica do solo-cimento em si. Tal relação é usualmente tomada para indicar que a tensão de capilaridade está atuando. Portanto, a contração está associada com o aumento da tensão no menisco da água quando a evaporação continua.

2.2.3.3.2. Fenômeno de adsorção líquida - A hipótese de adsorção líquida explica a outra forma de mecanismo de controle existente, uma vez que a quantidade de umidade foi reduzida para um valor baixo que a teoria de capilaridade não pode ser aplicada. Uma camada fina de água adsorvida é mantida por forças superficiais associadas com as partículas finas de argila e o gel de cimento (KEMP, 1973).

2.2.3.3.3. Contração "interior" - Segundo YONG et alii (1962) camadas de água podem formar-se entre os blocos triplos das argilas do tipo montmorilonítica, resultando no aumento do espaçamento interior de cada mineral e, conseqüentemente, na sua expansão total; reciprocamente, é esperado contração se

o espaçamento interior for reduzido pela perda de água.

2.2.3.4. Fatores que influenciam a quantidade e taxa de contração - A quantidade total de contração dita as larguras de qualquer fratura por contração que possa ocorrer. Portanto, como apenas as fraturas estreitas são aceitáveis, necessário se faz examinar as variáveis que afetam a contração total de um solo-cimento.

2.2.3.4.1. Quantidade de cimento - Aumentando-se a quantidade de cimento leva-se automaticamente a um aumento na contração. Entretanto, o efeito da quantidade de cimento sobre a contração total depende muito das proporções das contrações autógenas e por secagem que são ditadas pelo tipo de solo (BLAKE, 1956).

2.2.3.4.2. Quantidade e tipo de argilo-mineral - A contração do solo-cimento depende da quantidade de cimento e da quantidade de argilo-mineral, com o último exercendo uma influencia bem maior em todos os solos, principalmente, nos solos arenosos em virtude do maior impacto da contração por secagem. A contração aumenta com o aumento de argilo-mineral (WANG et alii, 1970).

2.2.3.4.3. Umidade de moldagem - O aumento de contração provocado pela quantidade de umidade é considerado um efeito estrutural. A umidade adicional permite que partículas de argila formem uma estrutura dispersa que sobre evaporação ocorre uma maior contração devido à partículas mais fracas retidas na estrutura dispersa (WANG et alii, 1970).

2.2.3.4.4. Massa específica aparente seca - Há uma grande deficiência de trabalhos sobre o efeito que a massa específica

aparente seca exerce sobre a contração. Portanto, qualquer conclusão deve ser tentativa, embora já esteja claro que o efeito da massa específica aparente seca é pequeno quando comparado com aquele exercido pela quantidade de umidade e argilo-mineral (KEMP, 1973).

2.2.3.4.5. Demora entre a mistura e compactação - Talvez o mais sério problema com a demora de compactação é que o solo-cimento é frequentemente exposto ao efeito adverso de uma alta taxa de evaporação durante a "demora", resultando em contrações diferenciais, levando zonas de fraqueza ao pavimento (BEZERRA et alii, 1976).

2.2.3.4.6. Cura - A cura inadequada resulta em perda de resistência e contrações diferenciais nas camadas de revestimento. Ela não reduz a contração total, exceto nas circunstâncias de solos com alta quantidade de argila, a não ser que a técnica usada evite a ocorrência de secagem por evaporação ou sucção do solo através da vida do pavimento de solo-cimento (BEZERRA et alii, 1976).

2.2.3.5. Controle da contração - Por mais que medidas de controle de contração sejam empregadas alguma contração toma lugar e, portanto, fraturas podem ocorrer.

2.2.3.5.1. Quantidade de cimento - A quantidade de cimento na mistura solo-cimento afeta a contração total e o espaçamento de fraturas (KREBS et alii, 1971) (WILLIAMS, 1972).

O princípio empregado consiste na adição de cerca de 3,0 % a 5,0 % como limite da quantidade de cimento na mistura. Desta forma, a resistência do pavimento será reduzida e ele terá um baixo limite à fadiga. Portanto, não será durá

vel sobre severas condições de ambiente e tráfego. Conseqüentemente, o controle de cimento não é recomendado (BONNOT, 1972).

2.2.3.5.2. Quantidade de argila - Mistura em usina pode permitir um controle direto da quantidade de argila, já que o solo original altamente argiloso pode ser misturado com areia antes da adição do cimento para produzir uma mistura que apresente, não somente, uma reduzida capacidade para contrair mas também um melhoramento na sua granulometria (HOLT, 1959).

2.2.3.5.3. Quantidade de umidade - A contração é altamente sensível à umidade acima do ótimo e, portanto, a umidade do solo deve ser rigorosamente controlada naquele nível. A exceção para esta regra é o caso em que ocorra uma considerável demora antes que a compactação do pavimento seja completada (GEORGE, 1968).

2.2.3.5.4. Massa específica de compactação - Se a compactação é continuada para se obter uma massa específica maior com a quantidade de umidade existente tendendo para um solo saturado, a estrutura do solo-cimento será enfraquecida aumentando a contração e decrescendo a resistência (GEORGE, 1968).

2.2.3.5.5. Uso de aditivos - Os aditivos podem ser agrupados de acordo com o mecanismo principal que é responsável por suas efetividades.

- 1) Melhoradores da trabalhabilidade. Melhora a trabalhabilidade da mistura aumentando a massa específica ou decrescendo a quantidade ótima de umidade, resultando na redução da contração total.

- Cloreto de cálcio
  - Fly ash.
  - "Sulphonated lignin".
  - Cal.
- 2) Agentes expansivos. Estes agentes expandem a estrutura do solo-cimento sobre hidratação e podem por este meio compensar, totalmente ou parcialmente, a contração.
- Sulfato de cálcio.
  - Sulfato de sódio.
  - Sulfato de magnésio.
- 3) Melhoradores da viscosidade. Estes têm sido sugeridos como um meio de reduzir fraturas em solos estabilizados com cimento.
- 4) Retentor de umidade. O aditivo químico retém a umidade de moldagem do solo-cimento evitando parcialmente a contração da mistura (BEZERRA et alii, 1976).

2.2.3.6. Métodos de controle de fraturas - O controle de fraturas apresenta-se como um problema crítico na estabilização solo-cimento. Por mais que medidas de controle da contração sejam empregadas alguma contração toma lugar e, portanto, fraturas podem ocorrer. O importante é conseguir que as fraturas tomem a forma de uma malha estreitamente espaçada com estreitas fraturas (BEZERRA et alii, 1976).

2.2.3.6.1. Contração diferencial - Se a placa de solo-cimento é deixada secar em lugar de cobri-la para evitar perda de umidade, rápida secagem do topo da camada levará à contra

ções diferenciais que produzirá um modelo de fraturas mais estreitamente espaçado do que se fosse curada normalmente. Entretanto, a rápida secagem evitaria a adequada hidratação do cimento no topo da camada que então exibiria pobre durabilidade sobre pesadas cargas de rodas. Portanto, esta técnica deve ser considerada insatisfatória (KEMP, 1973).

2.2.3.6.2. Limitação do subleito - O espaçamento das fraturas é ditado pelo balanceamento entre a resistência a tensão do material e a limitação devido ao subleito desenvolvido sobre contração. Se o atrito com o subleito for aumentado o espaçamento das fraturas deverá ser reduzido. A evidência para isto é a observação geral que misturas no local tendem a exibir uma malha de fraturas mais estreitas do que misturas em usina (GEORGE, 1971).

2.2.3.6.3. Concentração de tensões - A teoria elástica considera uma distribuição uniforme de tensões devido a contração limitada. Entretanto, as falhas na matriz do solo-cimento e as variações da espessura tendem a causar concentrações de tensões a partir da qual as fraturas se iniciarão. Se as falhas e as variações da espessura pudessem ser deliberadamente introduzidas, então, seria possível induzir um modelo satisfatório de fraturas (KEMP, 1973).

2.2.3.6.4. Fraturas por carregamento externo - A resistência a tensão do solo-cimento aumenta uniformemente durante o período normal de 7 dias de cura e, portanto, dependendo do tempo de aplicação da carga de roda o espaçamento das fraturas pode ser variado; espaçamentos mais estreitos serão obtidos com aplicações no período inicial (KEMP, 1973).

2.2.3.6.5. Reflexão de fraturas - Para JOHNSTON (1961) o con

trole de tal problema tem sido feito retardando-se a coloca  
ção do revestimento até que o modelo de fraturas tenha sido  
totalmente desenvolvido.

A reflexão de fraturas tem sido reduzida na Austrália  
interpondo-se uma fina camada de pedra entre o solo - cimento  
e o revestimento (LILLEY, 1972).

### 2.3. Solo-cimento

#### 2.3.1. Conceito

Solo-cimento é o produto da reação íntima na mistura  
de solo pulverizado e quantidades medidas de cimento Por  
tland e água, compactada em alta densidade (WINTERKORN, 1975).

#### 2.3.2. Características

Segundo WINTERKORN (1975) assim que o cimento hidra  
ta, a mistura solo-cimento se torna um material duro e de es  
trutura durável. Quando bem feito, ele não amolece mesmo sen  
do exposto a ciclos de molhagem e secagem ou congelação e de  
gêlo.

#### 2.3.3. Generalidades

O solo-cimento é usado como material de construção não somente para pavimentação a baixo custo, mas também para estruturas hidráulicas como o revestimento de canais, reservatórios, diques e para proteção de barragens de terra. (SHIDE LER, 1969) (KAWAMURA, 1970).

Pesquisas neste sentido devem ser desenvolvidas para ajudar, não somente no melhoramento das propriedades de uso na engenharia, como também na escolha racional das proporções da mistura para um material de baixo custo.

Geralmente, os fatores que devem ser controlados neste material para se atingir com sucesso uma mistura de solo-cimento, são: conteúdo de umidade, massa específica aparente e conteúdo de cimento. Os fatores requeridos para o solo são as propriedades físicas associadas com o conteúdo de umidade. Além disso, tanto nas pesquisas como na prática, deverá ser mais importante entender as interações entre solos e cimento Portland. Portanto, uma melhor compreensão das propriedades físico-químicas do solo e da química do cimento Portland, deveria ser essencial para a investigação das propriedades físico-químicas das misturas solo-cimento.

Cada tópico mencionado acima tem sido estudado, e muitos desses estudos têm sido completados. Contudo, com o intuito positivo de melhorar as propriedades da engenharia do solo-cimento como um novo material de construção, deve-se prosseguir com este estudo chamado, "a delineação do material", cujo termo é frequentemente usado na ciência de materiais (KAWAMURA, 1970).

#### 2.3.4. Tipos de estabilização solo-cimento

Toda e qualquer mistura de solo tratado com cimento é, muitas vezes, erroneamente chamada de solo-cimento. Na verdade há três tipos de misturas de solo tratado com cimento, já que em cada um deles ocorre um comportamento físico diferente com algumas restrições na aplicação.

Para CABRERA (1974) a Fig. 2.1 representa o fluxograma evolutivo das misturas solo-cimento a partir de um solo natural.

Três tipos gerais de solo-cimento são reconhecidos pela indústria americana de rodovias: solo-cimento compactado, solo-cimento plástico e solo-cimento modificado (WINTERKORN, 1975).

2.3.4.1. Solo-cimento compactado - Para O'FLAHERTY (1974) este é um material rígido, formado pela compactação e cura da mistura íntima de solo pulverizado, cimento Portland e água. Em outras palavras, é necessário que se forneça conteúdos adequados de cimento e água para a compactação e hidratação do cimento, com o fim de se obter uma mistura solo-cimento capaz de encontrar um critério de estabilidade e durabilidade.

O solo-cimento compactado tem um número elevado de aplicações na construção civil entre as quais a mais importante é como material de base e/ou sub-base nas estradas, áreas de estacionamento, aeroportos, pistas de rolamento e como base para fundações de grandes estruturas. O solo-cimento compactado não é usado em superfícies de rodovias devido



Fig. 2.1 - Fluxograma evolutivo das misturas solo-cimento a partir de um solo natural (CABRERA, 1974)

a sua fraca resistência ao desgaste, o que torna necessário sobrepor outro material de revestimento, como por exemplo, pavimento de concreto ou superfícies betuminosas para protegê-lo da ação do tráfego.

Segundo WINTERKORN (1975) o solo-cimento compactado é uma mistura que contém cimento suficiente para produzir um material de construção duro e durável e, somente, umidade bastante para satisfazer as necessidades de hidratação do cimento e solo, e para prover uma lubrificação adequada na compactação para uma elevada massa específica aparente. O material resultante tem uma resistência bem definida às mudanças climáticas e as forças mecânicas. Testes "standard" têm sido desenvolvidos na prática com o fim de verificar se o comportamento do solo-cimento está de acordo com os resultados obtidos nos testes de laboratório.

2.3.4.2. Solo-cimento plástico - Para O'FLAHERTY (1974) o solo-cimento plástico é um material sólido, formado pela cura íntima de solo pulverizado, cimento Portland e bastante água para produzir uma argamassa consistente no tempo de mistura e colocação.

O solo-cimento compactado e o solo-cimento plástico são semelhantes porque são capazes de alcançar um critério especificado de estabilização e durabilidade. Pela comparação, o solo-cimento compactado é misturado e colocado com umidade apenas suficiente para compactação e para a completa hidratação do cimento.

O solo-cimento plástico tem também várias aplicações na construção civil, entre as quais destacam-se: revestimen

to de valores laterais, complementação de barragens de terra onde o solo-cimento compactado apresentaria dificuldades na construção e em revestimento de canais.

WINTERKORN (1975) afirmou que o solo-cimento plástico também resulta num produto endurecido, mas contém na hora de estabelecimento, água suficiente para produzir uma consistência plástica similar àquela da argamassa. Isto permite que ele seja colocado em áreas inclinadas ou irregulares, onde é difícil senão impossível usar equipamento para construção de rodovias. Este material pode ser comparado ao solo-cimento compactado (ordinário), assim como ao concreto plástico.

2.3.4.3. Solo-cimento modificado - É uma mistura de solo e cimento não endurecida ou semi-endurecida. Relativamente, pequenas quantidades de cimento Portland são adicionadas a um solo granular ou silte-argiloso para alterar as propriedades químicas e físicas de um solo virgem. Adiciona-se cimento suficiente para reagir com as frações de silte e argila, e para diminuir as suas afinidades pela água, mas não suficiente cimento para ligar todas as partículas do solo num sistema coeso. O resultado é um solo melhorado ao invés de um novo material de construção com propriedades padronizadas, tal como o solo-cimento compactado (WINTERKORN, 1975).

## 2.4. Revestimento de canais

### 2.4.1. Generalidades

O revestimento é o meio efetivo para controlar as perdas por infiltração em canais e tanques. Segundo LAURITZEN (1955) o requerimento básico do revestimento é que se constitua numa barreira eficiente para a transmissão da água. Ademais, deve ser econômica, vale dizer, o custo anual que inclui o custo inicial dividido proporcionalmente pelos anos de duração do revestimento e os custos de manutenção, não devem ser superiores aos benefícios.

O LABORATÓRIO DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS DOS ESTADOS UNIDOS (USDI, 1962) expressa que a justificação econômica para decidir um revestimento é, a miúdo, muito complicada devido ao grande número de fatores que devem ser considerados. Estas considerações dizem respeito a relação de infiltração com e sem revestimento, ao valor da água economizada, custos de operação e manutenção, custos de drenagem ou valor do terreno anulado agricolamente pelo excesso de infiltração, tamanho do canal, vida útil, velocidades permissíveis, custos da estrutura e custos dos diferentes tipos de revestimento correlacionados com as outras condições. O valor de cada item varia com as condições locais, por isto, requer um cuidadoso estudo de cada caso em particular.

#### 2.4.2. Tipos

LAURITZEN (1956) assinala que a única razão para que se use outros revestimentos de canais, é o custo elevado do revestimento de concreto. Os revestimentos de concreto possuem excelentes propriedades hidráulicas, são resistentes e di

minuem os problemas de conservação e manutenção. Considerando a longa duração destes revestimentos e os baixos custos de manutenção, ele concluiu que o seu emprego se torna mais barato do que aqueles considerados de baixo custo.

LAURITZEN et alii (1956) asseguram que os revestimentos com cimento Portland, dada a sua maior resistência de superfície, permitem esboçar canais para maiores velocidades, o que possibilita uma redução em grande porcentagem no perímetro dos mesmos, diminuindo assim, a quantidade de material necessário para o revestimento e, conseqüentemente, os custos de escavação. Este aspecto, juntamente com uma maior duração e resistência a agentes químicos, físicos e climáticos, constituem antecedentes de relevante importância na análise econômica ao ser selecionado o revestimento.

De acordo com o LABORATÓRIO DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS DOS ESTADOS UNIDOS (USDI, 1962) os diferentes tipos de revestimento de canais são classificados da seguinte forma.

1. Superfície resistente. Concreto, concreto asfáltico, asfalto pré-fabricado, pedras, SOLO-CIMENTO e blocos.
2. Membrana enterrada. Asfalto espalhado, asfalto pré-fabricado, plástico e bentonita.
3. Revestimento de terra. Terra solta, terra compactada e terra com processos de sedimentação.

ISRAELSEN et alii (1965) afirmam que o revestimento com mistura de cimento e areia, embora possua um custo inicial elevado, apresenta múltiplas vantagens já que é muito durável, os custos de conservação são mínimos e sua capacidade aumenta devido a superfície ser relativamente lisa.

### 2.4.3. Revestimento de canais com misturas de solo-cimento

2.4.3.1. Generalidades - Dentro da série de revestimentos com cimento Portland, o LABORATÓRIO DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS DOS ESTADOS UNIDOS (USDI, 1962) menciona o denominado solo-cimento.

Em climas moderados, grandes vantagens têm sido obtidas em revestimento de canais construídos com a mistura de cimento Portland e solo arenoso natural disponível na região, às vezes, com notável economia quando comparado com o concreto de cimento Portland (USDI, 1963) (DECAN, 1964).

Segundo DECAN (1964) os revestimentos com solo-cimento podem ser construídos por dois métodos gerais. 1) Misturando-se próximo ao local e compactando-se a mistura na umidade ótima. 2) Por máquinas misturadoras com água próxima da consistência do concreto, e construindo-se com equipamento modelador do tipo móvel deslizante tirado com um trator (slip-form). O primeiro tipo é chamado solo-cimento padrão (standard) ou solo-cimento misturado à seco. O segundo, que é preferível, é chamado solo-cimento plástico.

Ambos os tipos de revestimento com solo-cimento devem permanecer úmidos por quase uma semana, com o fim de permitir uma cura adequada. Testes experimentais têm mostrado que ambos os tipos são eficazes na redução das perdas por infiltração e nos custos de manutenção. Estes revestimentos sendo corretamente construídos, impedem o crescimento de ervas daninhas e suportam o pisoteio dos animais. Eles são bastante resistentes à erosão, permitindo velocidades mais altas do que em perímetros desforrados, e possuem coeficientes de

atrito inferiores aos outros tipos de revestimento com solo. Os custos de instalação são um pouco mais altos (DECAN, 1964).

DECAN (1964) afirma que os solos usados em misturas de solo-cimento não devem conter mais que 35,0 % de partículas de silte e argila. Provavelmente, o conteúdo de cimento deve ser de 15,0 % a 20,0 % por volume, o que é bastante alto para produzir um revestimento durável e resistente ao tempo, mas não suficiente alto para causar graves rechaduras. As propriedades dos solos utilizáveis e as proporções exatas de cimento devem ser determinadas por testes.

Para (USDI, 1963) (DECAN, 1964) (ICID, 1967) a mistura solo-cimento oferece grandes possibilidades para ser usada em revestimento de canais, necessitando-se apenas que no local das obras ou em suas adjacências haja solos arenosos e não seja possível contar, economicamente, com outros materiais de boas condições para o revestimento. Como o nome sugere, o revestimento de canais com solo-cimento é construído, inteiramente, com uma mistura de cimento Portland e solo natural.

Embora outros solos possam ser utilizados em revestimento de canais, testes de laboratório indicam que para se obter melhores resultados com esta finalidade, o solo deve ser bem classificado apresentando partículas grossas com um tamanho máximo de 3/4 de polegadas (19,1 mm) e contendo entre 10,0 % e 35,0% de partículas finas passando na peneira de Nº 200 (0,075 mm). O solo-cimento deve ser curado por 7 dias, todavia, quando construído em tempo frio necessita ser protegido do congelamento por um período razoável após a co

locação. Recomenda-se a aplicação de uma camada betuminosa durante a secagem (USDI, 1963) (DECAN, 1964) (ICID, 1967).

ISRAELSEN et alii (1965) declaram que o método mais utilizado para se estabilizar solos visando emprego em revestimento de canais, consiste em se misturar aproximadamente 10,0 % de cimento Portland com uma terra úmida e traçar a mistura, cuja homogeneidade embora seja difícil de estabelecer na prática é fundamental para garantir um revestimento duradouro.

ZIMMERMAN (1974) atesta que o solo-cimento é uma mistura de cimento com o solo da sub-rasante do canal e água. O canal deve ser revestido por uma camada de solo-cimento com 4,0" a 6,0" de espessura na relação de 1 : 4 a 1 : 6. A construção do revestimento de solo-cimento além de ter um custo bastante elevado, raramente produz um revestimento satisfatório quando não se utiliza solos arenosos. Necessita-se de um amplo trabalho em laboratório, tanto para preparar o revestimento como durante sua construção. Geralmente, isto eleva muito seu custo e com frequência não é economicamente viável para obras pequenas. O revestimento de solo-cimento só deve ser utilizado em regiões onde não se pode obter com um custo razoável os agregados grossos para o concreto e onde a sub-rasante do canal esteja formada por solo arenoso, e de preferência por um solo de areia grossa.

2.4.3.2. Solo-cimento compactado (padrão) - O solo-cimento padrão é compactado com o teor ótimo de umidade da mistura como determinado em laboratório por testes de compactação, ou por pouco acima deste. Testes para determinar e controlar

o conteúdo ótimo de cimento a ser usado em rodovias estão descritos na ASTM Standards D-558-57, D-559-57, D-560-57 e D-806-57\*. Estes métodos são geralmente aplicados para trabalhos de revestimento de canais, à excessão do teor de cimento que é, arbitrariamente, aumentado no mínimo em 2,0 % com o objetivo de assegurar uma resistência adequada para o fluxo da água (USDI, 1963) (DECAN, 1964) (ICID, 1967).

2.4.3.3. Solo-cimento plástico - Os revestimentos de solo-cimento plástico não requerem compactação e podem ser indicados para pequenas secções onde os materiais são apropriados. Eles são mais fáceis de se instalar do que os revestimentos com solo-cimento compactado (padrão), e mais satisfatórios durante a construção. Contudo, o uso de tal revestimento está limitado ao período experimental (DECAN, 1964).

O solo-cimento plástico tem volumes de água e cimento mais altos que no solo-cimento compactado (padrão), e uma consistência comparável àquela do concreto de cimento Portland. Estas propriedades permitem a colocação do revestimento de solo-cimento plástico por meio de um equipamento modelador do tipo móvel deslizante tirado com um trator (slip-form), semelhante aquele usado na colocação do revestimento de concreto com cimento Portland e, por essa razão, num cus

---

\* "Standard Methods of Test for Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures", ASTM D-558-57; "Standard Method for Wetting and Drying Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures", ASTM D-559-57; "Standard Method for Freezing and Thawing Test of Compacted Soil-Mixtures", ASTM D-560-57; and "Standard Methods of Test for Cement Content of Soil-Cement Mixtures", ASTM D-806-57 - ASTM Standards 1961, part 4, pp. 1316, 1343, 1349, and 1356, respectively (USDI, 1963).

to de instalação frequentemente mais baixo do que para o revestimento de solo-cimento compactado (padrão) (USDI, 1963) (DECAN, 1964) (ICID, 1967).

2.4.3.4. Instalações experimentais - Em 1945 algumas secções muito pequenas do Canal de Main no Projeto de W. C. Austin, Oklahoma, foram estabilizadas com solo-cimento compactado (padrão), e uma secção foi revestida com solo-cimento plástico. Uma maquinaria de mistura contendo um misturador de concreto com duas jardas cúbicas, embora não inteiramente satisfatória, foi utilizada em ambos os casos. O solo usado na mistura tinha uma granulometria de 100,0 % passando na peneira de Nº 04 e 60,0 % passando na de Nº 200. 16,0 % de cimento (por volume) foi usado no solo-cimento plástico e 10,0 % a 12,0 % de cimento (por volume) foi usado na mistura solo-cimento compactado (padrão). A espessura do revestimento ou altura estabilizada tinha entre 4,0" e 6,0". Em 1957 o solo-cimento plástico estava em condição regular à boa. O solo-cimento compactado (padrão) estava em condição inferior nos taludes; a base não pôde ser examinada.

Em 1947 em cooperação com a Portland Cement Association, um canal com 4.480,0 pés de extensão com revestimento de solo-cimento plástico foi construído no mencionado projeto, visando-se averiguar o custo e a possibilidade de colocação deste novo tipo de mistura. Os solos naturais foram classificados como arenosos dos tipos SP e SM, mais precisamente, areia grossa e areia siltosa, baseado na Unified Soil Classification System. O canal foi escavado por draga e concluído com um cavador manual para moldar a base de 4,0 pés

de largura, com taludes de 1,5 para 1,0 e declividade de 5,41 pés. Um misturador com equipamento modelador do tipo móvel deslizante tirado por um trator (slip-form) e guiado no leito do canal, tornaram a operação de revestimento completamente mecanizada. Com este equipamento foi alcançado um progresso no revestimento de 300,0 pés por hora.

Um revestimento com 3,0" de espessura foi colocado em diferentes secções contendo 3,0, 3,9, 4,5 e 6,0 sacos de cimento por jarda cúbica, ou 11,1, 14,5, 16,7 e 22,2 % por volume, respectivamente, para se determinar as variações no rendimento dos revestimentos atribuíveis de cimento. O custo médio do revestimento de solo-cimento plástico foi de US\$ 0,76 por jarda quadrada incluindo-se a mão-de-obra, equipamento de aluguel e todos os materiais. Com os custos de manutenção, estima-se que o revestimento teria o custo em volta de US\$ 1,10 por jarda quadrada. Vários métodos de secagem foram também experimentados, incluindo-se a utilização de solo úmido, composto para vedação de pigmento branco com 30,0% de cera de parafina e 70,0 % de combustível diesel, e composto betuminoso RC-2. Quando examinado minuciosamente no final de 1957, era evidente que quanto maior o volume de cimento da mistura plástica, mais durável o revestimento. Os dois primeiros métodos de secagem apresentaram resultados semelhantes quanto à qualidade do revestimento, particularmente, com as misturas mais pobres. O composto betuminoso RC-2 por causar uma maior secagem, produziu um revestimento mais durável no que diz respeito ao rachamento. A desintegração da superfície ou rachamento foi mais grave abaixo da linha de água no canal. Todos os revestimentos, exceto a secção na qual se

usava a mistura de 11,1 % de cimento, ainda permaneciam úteis após seis períodos de irrigação. A secção que utilizava a mistura de 11,1 % estava com 3,4 % abaixo do volume de cimento normalmente recomendado, e encontrava-se muito deteriorada. As secções restantes contendo maiores volumes de cimento estavam em condições de regulares para boas. A infiltração média verificada em 1950 foi somente de 0,12 pé cúbico por pé quadrado de área molhada por 24:00 h, indicando que o revestimento era contudo eficiente por reduzir as perdas por infiltração. Os revestimentos com os volumes de cimento mais altos continuam sendo eficientes por reduzirem a infiltração e a erosão, e podem ser utilizados por vários anos com manutenção.

Os revestimentos dos tipos solo-cimento compactado (padrão) e solo-cimento plástico foram empregados para determinações experimentais em 1947 e 1948 na divisão Yuma Mesa do Projeto Gila, Arizona, e na região East Mesa no Imperial Valley da California. Os revestimentos de solo-cimento plástico foram colocados por um equipamento modelador do tipo móvel deslizante tirado com um trator e guiado no leito do canal (slip-form), pelo método do pneumático e manualmente. Após o início das rachaduras e deterioração da superfície que ocorreu logo depois da colocação, o desgaste do revestimento de solo-cimento compactado não tinha sido excessivo. Com uma manutenção total razoável o revestimento seria útil por vários anos em clima moderado. O solo-cimento plástico colocado com o "slip-form" foi construído, especialmente, para ser melhor que o revestimento de solo-cimento compactado, ou o tipo plástico aplicado a ar comprimido com 1/2" e 3/4"

de espessura. O revestimento de solo-cimento plástico colocado a ar comprimido apresentou rachaduras transversais e axiais, e fissurações. O revestimento de solo-cimento plástico colocado manualmente, tinha-se deteriorado muito pouco e estava em condição muito boa.

Uma secção experimental com revestimento de solo - cimento plástico foi colocada durante 1948 num canal do Projeto Boise, Idaho. Esse canal foi construído com 300,0 pés de extensão, gastando-se 4,7 sacos de cimento por jarda cúbica ou 14,3 % de cimento por volume por jarda cúbica. Examinado em 1958 o revestimento encontrava-se em ótimas condições, apesar de haver alguma evidência de desgaste superficial com um número reduzido de bolsas de erosão e algumas rachaduras. Contudo, o revestimento ainda era muito útil e eficiente no controle das perdas por infiltração. Uma investigação realizada em 1962 indicou que o revestimento tinha-se deteriorado pouco ou quase nada em relação ao exame anterior realizado em 1958 (USDI, 1963) (DECAN, 1964).

FUENTES (1964) estudou em Chile os métodos, eficiências e custos de doze tipos de revestimento de canais, entre eles, o solo-cimento plástico. Este tipo de revestimento foi construído com uma mistura de cimento e solo arenoso contendo menos de 35,0 % de partículas de limo e argila, mais uma quantidade de água suficiente para alcançar a consistência do concreto (21,0 l por saco de cimento). A mistura continha 17,0 % de cimento em volume e o revestimento foi construído manualmente com uma espessura de 7,5 cm.

Analizando-o juntamente com os demais tipos de revestimento, FUENTES (1964) concluiu que com estes teores o so

lo-cimento plástico embora tenha uma alta eficiência inicial é pouco durável com respeito a seu elevado custo (E\$ 1,96/m<sup>2</sup>). Assim sendo, seu emprego só é aconselhável em localidades com solos arenosos quando não se pode encontrar cascalho e areia a baixo custo.

As características hidráulicas são inferiores às do concreto. Os fatores climáticos e de pressões externas o afetam também, mais seriamente, que ao concreto. Isto, o limita em regiões com climas de temperatura extremas e com problemas de drenagem.

DELABIANCA et alii (1976) realizaram em Campina Grande, Pb, um estudo econômico simplificado de cinco diferentes tipos de revestimento de canais de irrigação, no qual também foi inserido o solo-cimento plástico. O revestimento foi construído com uma mistura de cimento Portland (Zebú) e um solo arenoso contendo menos de 20,0 % de partículas de limo e argila.

A mistura foi preparada numa betoneira com a quantidade de água suficiente para que alcançasse a consistência da mistura de concreto (21,0 l para 45,0 kg de cimento) e 17,0% de cimento em volume (FUENTES, 1964).

Construiu-se um canal estático sem declividade de seção trapezoidal para se determinar a infiltração. A espessura do revestimento foi de 0,05 m ficando o canal após revestido com uma profundidade 0,20 m, base 0,10 m, talude 2:1 e 5,0 m de comprimento. Foi construído também um canal dinâmico com seção trapezoidal com o intuito de se verificar o desgaste provocado pela água (erosão). A espessura do revestimento foi de 0,05 m, porém a seção foi aumentada para su

portar uma maior vazão. Portanto, após revestido, o canal ficou com as seguintes dimensões: declividade 1,0 : 1.000,0 m, profundidade 0,30 m, base 0,20 m, talude 2 : 1 e 9,0 m de comprimento. Com o objetivo de determinar a viabilidade econômica dos revestimentos testados, foi empregado o método usado por G. P. South of Bureau of Reclamation, Salt Lake City, Utah, USA, e apresentado no III Congresso de Irrigação e Drenagem realizado na Índia em 1957 (ICID, 1957).

Segundo DELABIANCA et alii (1976) o solo-cimento plástico demonstrou elevada impermeabilidade (infiltração média de apenas 0,37 cm/dia ou 1,35 m/ano), resistência às intempéries ambientais, à erosão provocada pelo movimento da água e pouca incidência de ervas daninhas, o que minimiza os custos de manutenção. O seu estudo econômico indicou ser ele o mais viável e seu uso é recomendado com solos arenosos, embora seja necessário um estudo mais demorado a fim de testar a vida útil do solo-cimento plástico.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Introdução

Os diversos ensaios que compuseram esta pesquisa foram desenvolvidos nos Laboratórios de Solos do Departamento de Engenharia Civil - DEC, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba - CCT/UFPb, em Campina Grande, Pb.

#### 3.2. Materiais

Em se tratando dos materiais utilizados, merecem destaque o solo e o cimento que juntamente com a água, representam os três elementos básicos desta pesquisa.

##### 3.2.1. Solo

Estudos envolvendo a química e hidratação do cimento, o mecanismo de estabilização e a estrutura do solo-cimento, indicaram que a mistura de solo arenoso com cimento é a que

melhores resultados tem apresentado quando de sua aplicação nos mais variados usos da construção civil. Mediante o exposto, e na impossibilidade de se executar uma pesquisa que envolvesse mais de um tipo de solo, o que a prolongaria demasiadamente, é que optou-se por um material arenoso de êxito já comprovado no processo de estabilização, e de interesse na Engenharia Civil.

3.2.1.1. Jazida - Para o presente estudo foi selecionada uma ocorrência de solo arenoso, denominada jazida MAB, situada em terreno do próprio CCT/UFPb, mais precisamente à margem esquerda do riacho Bodocongô, à montante da barragem Poli, nas imediações da estação meteorológica e da rodovia de acesso ao Campus, cuja capacidade não foi estimada por se tratar do horizonte A comumente encontrado nesta região.

Após a identificação da jazida com placa de madeira, realizou-se o corte da vegetação rala (gramíneas e ervas daninhas nativas) e a imediata retirada da parte mais superficial do solo agrícola, aproximadamente 0,05 m, para assegurar uma coleta de material do horizonte A, solo a ser ensaiado no decorrer desta pesquisa, com o menor teor possível de matéria orgânica.

A Fig. 3.1 mostra esquematicamente o perfil da jazida MAB no local onde foi coletada a amostra.

Através do perfil pôde-se observar a homogeneidade deste "topsoil", vendo-se nitidamente o horizonte A de material bastante uniforme no que diz respeito às características físicas, tais como: cor, textura, estrutura e consistência.

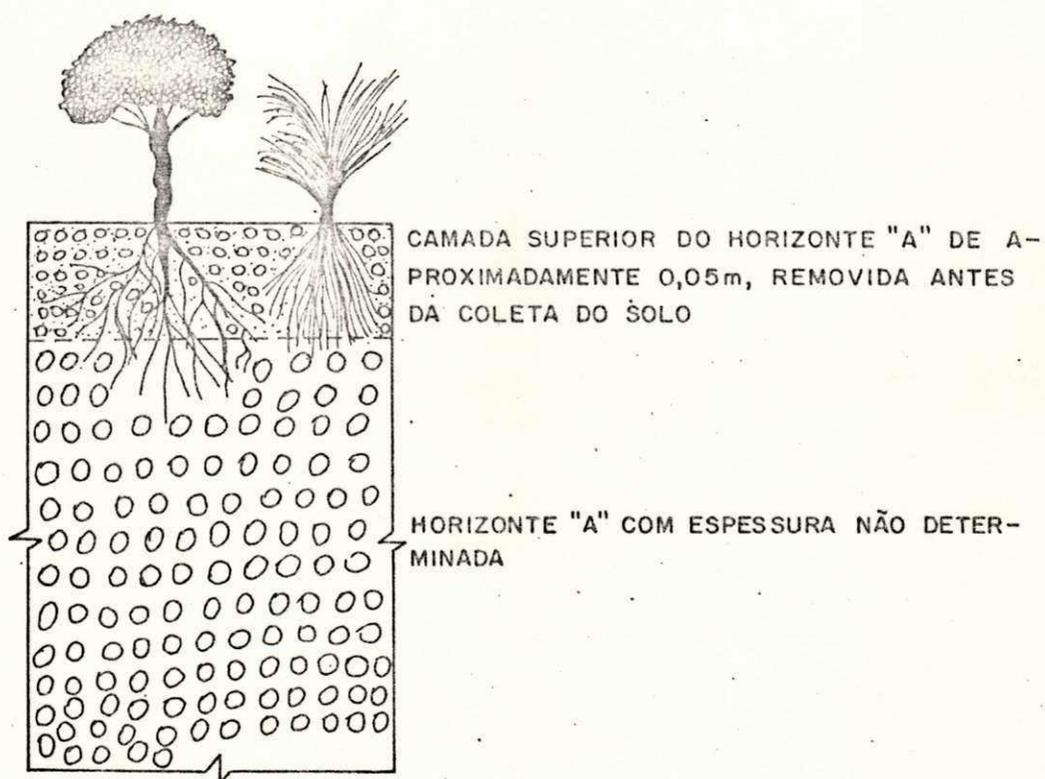


Fig. 3.1 - Perfil esquemático do "topsoil" da jazida MAB

3.2.1.2. Coleta da amostra - Utilizou-se na coleta da amostra de solo ferramentas manuais e de uso corrente em nosso meio, como a enxada, o enxadeco, a chibanca, a picareta e a pá.

Baseando-se em cálculos do plano da pesquisa, resolveu-se coletar de uma só vez todo o material necessário à demanda dos ensaios, o que totalizou em cifras arredondadas, 1.500,0 kg de solo.

Como praticamente toda a matéria orgânica, inclusive a quase totalidade das raízes vegetais já havia sido retirada através da severa remoção da parte mais superficial do horizonte A, tornou-se bastante fácil a coleta da amostra realizada numa profundidade compreendida entre 0,05 m e 0,25 m, aproximadamente, desde a superfície do solo. Preferiu-se estender o corte do solo no sentido horizontal pela facilidade de operação e controle do trabalho evitando-se uma possível contaminação da amostra retirada com materiais indesejáveis. À medida que a escavação prosseguia, o solo era acondicionado em sacos de lona grossa, para não permitir a perda do material fino durante a remoção até o laboratório. Cada saco recebeu entre 55,0 kg e 60,0 kg de solo e foi identificado com uma plaqueta de papelão contendo os principais dados sobre sua procedência. Em seguida, transportou-se os 26 sacos de material para o Laboratório de Solos. Esta coleta foi realizada no início do mês de novembro, época do ano em que o solo da região já pode ser encontrado bastante seco.

3.2.1.3. Procedimento no laboratório - Logo após a chegada do solo no laboratório, colocou-se 20 sacos no depósito de

amostras iniciando-se os trabalhos de preparação do material contido nos sacos restantes.

3.2.1.3.1. Preparação do solo - Distribuiu-se o conteúdo de 02 sacos em 06 bandejas de zinco, pondo-se para secar ao natural durante o dia e à noite sob a luz artificial do secador elétrico. De momento em momento o solo era totalmente revolvido com o intuito de acelerar a secagem. Duas vezes ao dia o solo era destorroado na própria bandeja com o auxílio de um rolo de madeira, visando-se reduzir esta operação já que com o almofariz e mão recoberta de borracha levaria mais tempo e daria muito mais trabalho.

Iniciou-se no terceiro dia de secagem a determinação da umidade higroscópica para cada quantidade de solo contida numa das bandejas, até que esta apresentasse uma média próxima de 0,30 %.

Concluído o destorroamento, retirou-se 4,0 kg de solo para a realização da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação.

Em seguida, efetuou-se o peneiramento do solo restante utilizando-se a peneira de Nº 04 (4,8 mm), uma vez que na execução dos vários ensaios que compuseram esta pesquisa o solo a ser utilizado deve passar, anteriormente, por esta malha. Com este procedimento concluiu-se a preparação do solo. Procurando-se evitar possíveis interrupções no decorrer desta pesquisa é que tomou-se a precaução de se preparar, inicialmente, todo o solo coletado.

A preparação do solo foi realizada de acordo com a técnica descrita no Método Brasileiro MB-27 (Preparação de Amostras de Solos para Ensaio Normal de Compactação e Ensaio

de Caracterização), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1969).

3.2.1.3.2. Acondicionamento do solo - A proporção que o solo ia sendo peneirado ocorria o seu acondicionamento em sacos plásticos, os quais eram em seguida amarrados com barbante. No final desta operação contava-se com 97 sacos, contendo em cada um deles cerca de 15,0 kg a 16,0 kg de solo já devidamente preparado e pronto para uso. Todos estes sacos foram colocados nos compartimentos dos balcões do Laboratório de Solos, de onde eram retirados e usados de acordo com a necessidade de cada ensaio.

### 3.2.2. Cimento

Foram utilizados aproximadamente 180,0 kg de cimento Portland comum - 320, marca Zebú\*, cuja análise química é mostrada na Tab. 3.1.

Usou-se um cimento comprovadamente novo, a fim de que as suas propriedades originais não estivessem alteradas. Por este motivo, o cimento foi comprado parceladamente, ou seja, um saco de cada vez, em local onde o estoque é constantemente renovado. Acondicionou-se o cimento em 06 sacos de plástico contendo em cada um 10,0 kg, sendo em seguida lacrados por uma forte amarração de barbante com a finalidade de evi

---

\*Cimento Portland Zebú  
Companhia Paraíba de Cimento Portland - CIMEPAR  
Cx. Postal 15. Telegrama "CIMEPAR". João Pessoa - Pb

Tab. 3.1 - Composição Química do Cimento Portland Zebú - 320 Utilizado Nesta Pesquisa.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND ZEBÚ - 320	
COMPONENTES	%
Perda ao fogo	1,40
Resíduo insolúvel	0,35
Sílica (em $\text{SiO}_2$ )	18,69
Óxido fêrrico (em $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	4,20
Óxido de alumínio (em $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	6,14
Óxido de cálcio total (em $\text{CaO}$ )	62,50
Óxido de magnésio (em $\text{MgO}$ )	3,61
Anidrido sulfúrico (em $\text{SO}_3$ )	2,55
Óxido e hidróxido de cálcio livre (em $\text{CaO}$ )	1,25
Óxido de sódio (em $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,09
Óxido de potássio (em $\text{K}_2\text{O}$ )	0,77
Óxido de sódio solúvel em água (em $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,09
Óxido de potássio solúvel em água (em $\text{K}_2\text{O}$ )	0,75

FONTE: A Durabilidade de Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento e Aditivos (BEZERRA et alii, 1976)

tar a hidratação do cimento devido o contacto com a umidade do ar. O cimento apresentou ótima conservação o que comprovou a eficiência desta medida, pois os sacos eram abertos apenas no momento em que se utilizava seu conteúdo nos ensaios.

### 3.2.3. Aparelhagem

Achou-se por demais desnecessário mencionar os inúmeros aparelhos de laboratório, desde os mais simples aos mais sofisticados que foram utilizados no decorrer dos ensaios. Alguns destes aparelhos foram citados nas descrições dos métodos de ensaios, conforme se pode ver através do Apêndice. Os restantes estão relacionados nos Métodos Brasileiros da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, apenas citados neste capítulo.

### 3.3. Métodos

O processo de preparação do solo no laboratório e os ensaios executados durante a pesquisa são mostrados esquematicamente no fluxograma da Fig. 3.2.

Para a maioria desses ensaios foram feitas como mínimo três determinações, aceitando-se como verdadeiras quando se encontravam dentro das variações que cada método especifica, elegendo-se uma média para representar os valores quanti

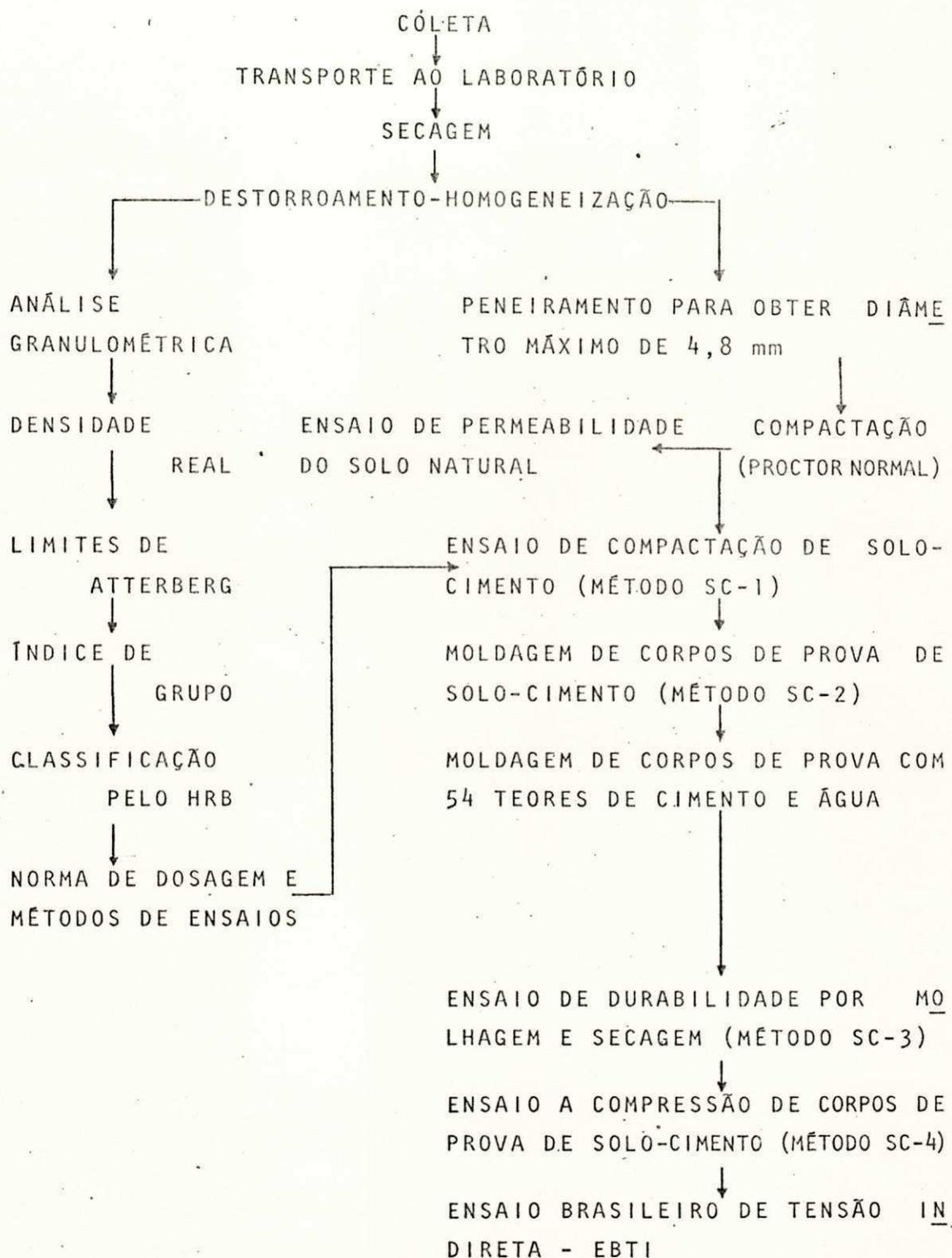


Fig. 3.2 - Fluxograma e seqüência metodológica dos ensaios realizados com o solo em estudo durante a pesquisa

tativos correspondentes aos respectivos ensaios.

### 3.3.1. Ensaio de caracterização e sequência metodológica

Esses ensaios foram assim denominados por serem responsáveis pela caracterização física do solo, além de serem pré-requisitos para que se possa determinar o teor de cimento e os métodos de ensaios de acordo com as Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento, segundo especificações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1977), apresentadas parcialmente no final deste trabalho como parte inicial do Apêndice.

Por intermédio deles definiu-se a metodologia de pesquisa final a ser utilizada, já que serviram de base para a montagem conclusiva deste estudo. Com os seus resultados pôde-se conhecer ainda, o comportamento do solo ensaiado, suas exigências mínimas e sua utilidade prática, para comprovação técnica de certas premissas.

3.3.1.1. Análise granulométrica - Para se determinar a distribuição granulométrica das partículas do solo em estudo, seguiu-se o Método Brasileiro MB-32, Análise Granulométrica de Solos (ABNT, 1968).

3.3.1.2. Massa específica real - Para este ensaio que está inserido na análise granulométrica com sedimentação, procedeu-se de acordo com as recomendações do Método Brasileiro MB-28, Determinação da Massa Específica de Grãos de Solo

(ABNT, 1969).

3.3.1.3. Limites de Atterberg. - A preparação de amostras para os ensaios de consistência foi realizada pelo Método Brasileiro MB-27 (ABNT, 1969), sendo comum os itens a) e b) com os ensaios de granulometria.

3.3.1.3.1. Limite de liquidez (LL) - Usou-se o Método Brasileiro MB-30, Determinação do Limite de Liquidez dos Solos (ABNT, 1969).

3.3.1.3.2. Limite de plasticidade (LP) - Seguiu-se o Método Brasileiro MB-31, Determinação do Limite de Plasticidade de Solos (ABNT, 1969).

3.3.1.4. Compactação (Proctor normal) - Procedeu-se de acordo com as recomendações do Método Brasileiro MB-33, Ensaio Normal de Compactação de Solos (ABNT, 1968). Este ensaio fixa o modo pelo qual se determina a correlação entre o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente, utilizando-se a fração do solo que passa na peneira de Nº 04 (4,8 mm).

Basicamente, o procedimento na preparação do solo para o ensaio de compactação, consistiu da seguinte sequência.

- 1 - Homogeneização em misturador elétrico de eixo vertical durante 01 minuto.
- 2 - Adição lenta do teor de água com o misturador em funcionamento, e homogeneização por mais 02 minutos.
- 3 - Remoção com o auxílio de uma espátula do material aderente às paredes e hélices do misturador.
- 4 - Mistura adicional do material por 01 minuto.

## 5 - Compactação dos espécimes.

Para as porcentagens de umidade, ou melhor, para cada teor crescente de água que origina um ponto de compactação, preparou-se 03 espécies utilizando-se para cada ponto uma nova amostra de solo, visto que, recompactação de uma mesma amostra poderia levar a mudanças de granulometria (CABRERA, 1974).

3.3.1.5. Permeabilidade do solo - Na determinação da permeabilidade do solo natural (puro) foram moldados 03 corpos de prova, seguindo-se também as especificações do Método Brasileiro MB-33, Ensaio Normal de Compactação de Solos (ABNT, 1968).

Após o ajustamento dos moldes às suas bases metálicas os corpos de prova foram levados para o saturador de amostras onde permaneceram sob uma pressão manométrica de 1,5 kg/cm<sup>2</sup>, por um tempo suficiente para que cada amostra ficasse saturada, ou seja, até que a água passasse a fluir satisfatoriamente pela base inferior do cilindro. Depois da saturação os corpos de prova foram colocados em imersão por um tempo de 24:00 h para que ocorresse a expulsão de possíveis bolhas de ar ainda retidas no interior da amostra. Em seguida, levou-se individualmente cada corpo de prova ao permeâmetro de carga variável onde foram realizadas 51 leituras para cada corpo de prova. Os cálculos foram efetuados por intermêdio da fórmula simplificada  $K = z [(ln h_1/h_2) / dt]$ , determinando-se a média desses resultados.

3.3.1.6. Ensaio de compactação de solo-cimento - Método SC-1

(ABCP, 1977) - A descrição parcial deste ensaio, segundo padrões estabelecidos em Normas de Dosagem e Métodos de Ensa<sup>u</sup>os de Solo-Cimento (ABCP, 1977), pode ser vista através do Apêndice B.

3.3.1.7. Moldagem de corpos de prova de solo-cimento - Método SC-2 (ABCP, 1977) - A sequência para execução deste ensaio, consoante apresentação em Normas de Dosagem e Métodos de Ensa<sup>u</sup>ios de Solo-Cimento (ABCP, 1977), aparece de forma parcial no Apêndice C.

Convém frisar, que entre os ensaios de caracterização, este merece destaque especial porque define com exatidão a escol<sup>h</sup>a da Norma de Dosagem a ser utilizada para o solo ensaiado.

Além disso, deve-se salientar que através deste ensa<sup>u</sup>io foram moldados todos os corpos de prova ensaiados durante a realização dos ensaios tecnológicos, descritos a seguir.

### 3.3.2. Ensa<sup>u</sup>ios tecnológicos

Com esses ensaios encerrou-se a parte prática e obt<sup>e</sup>ve-se os resultados que definiram as conclusões e recomendações desta pesquisa. Eles representam a etapa mais importante porque forneceram subsídios capazes de confirmar as premissas que justificaram a sua execução, além de determinarem as recomendações que deverão ser observadas na continuação deste estudo, em futuras investigações.

3.3.2.1. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método SC-3 (ABCP, 1977) - A exposição detalhada sobre este ensaio, de acordo com as Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977), pode ser vista através do Apêndice D.

Na realização do presente ensaio foram moldados 02 corpos de prova para cada tratamento em estudo, seguindo-se as especificações descritas no Método SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento, e apresentadas no Apêndice C.

Quando a mistura passou a ser preparada com 12,0 % de umidade, tornou-se necessário manter cada corpo de prova moldado em seu respectivo molde ou cilindro de compactação por um tempo de 12:00 h, evitando-se assim, deformações no espécime uma vez que a superfície externa do mesmo deve apresentar-se em perfeito estado, de modo que o atrito com os fios da escova durante a escovação, seja o mais íntimo e completo possível. Para facilitar a saída do corpo de prova passava-se óleo diesel nas paredes internas do molde de compactação.

Terminada a moldagem, cada corpo de prova era colocado num saco plástico, já devidamente etiquetado em sua parte interna, sendo depois lacrado por uma forte e cuidadosa amarração com barbante e levado para a câmara úmida onde permanecia em cura por um período de 07 dias. Após a cura, eles recebiam uma nova identificação através de uma plaqueta de alumínio numerada que era presa em redor do espécime com o auxílio de um arame fino (veja Fig. 3.3). Idealizou-se este tipo de identificação como medida de segurança, já que os corpos de prova passariam por períodos de molhagem e secagem, ne

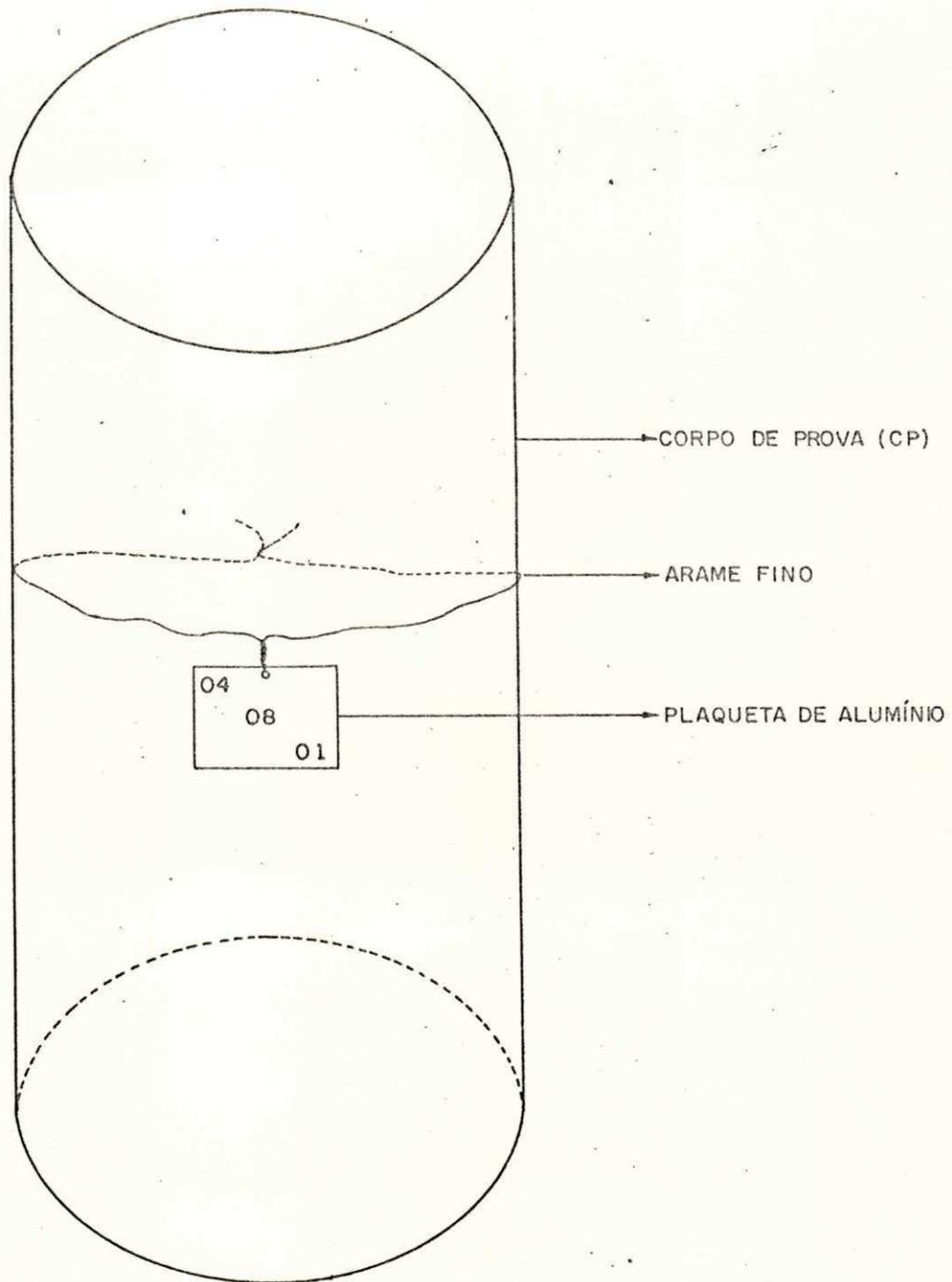


Fig. 3.3 - Corpo de prova (CP) identificado por plaqueta de alumínio com a numeração 04-08-01, significando 04 % de cimento, 08 % de água e CP Nº 01

cessitando de etiquetas resistentes para evitar uma possível mixórdia entre eles.

Com esta segura identificação os corpos de prova ficaram prontos para iniciarem a série de 12 ciclos de molhagem e secagem que compõem este ensaio.

As escovações foram feitas no menor espaço de tempo possível para que os corpos de prova absorvessem apenas um mínimo de umidade do ar, uma vez que eles eram pesados antes e após cada escovação em todos os ciclos. Para suportar a temperatura do corpo de prova e antecipar a escovação utilizou-se luvas de amianto. Usou-se também um óculos apropriado para proteger os olhos do escovador contra os fragmentos desprendidos do espécime durante a escovação. Aplicou-se 04 escovações para cada base e 20 escovações na superfície lateral circular, cobrindo totalmente toda a parte externa de cada corpo de prova. Levava-se aproximadamente 10 minutos para que a operação pesar-escovar-pesar fosse realizada, porém, quando o escovador adquiriu prática pôde executá-la, eficientemente, em menor espaço de tempo tornando-a mais precisa porque o espécime absorvia menos a umidade do ar. Utilizou-se uma balança do tipo comum, onde o espécime ficava num dos pratos e a força de 1,5 kg correspondente a cada escovação era comprovada quando o lado que continha o corpo de prova tocava num dispositivo de borracha, colocado de tal maneira, que correspondia exatamente ao ponto de equilíbrio entre os dois pratos.

3.3.2.2. Ensaio a compressão de corpos de prova de solo-cimento - Método SC-4 (ABCP, 1977) - Qualquer detalhe técnico

acerca deste ensaio, conforme apresentação feita em Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977), pode ser observado através da reprodução apresentada no final deste trabalho, inserida no Apêndice E.

Para o ensaio em foco moldou-se 03 corpos de prova para cada combinação das misturas em estudo, seguindo-se também as regas citadas no Método SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento, e mostradas no Apêndice C.

Quando a mistura passou a ser preparada com 12,0 % de umidade, tornou-se necessário manter cada corpo de prova moldado em seu respectivo molde ou cilindro de compactação por um tempo de 12:00 h, evitando-se assim, deformações no espêcime uma vez que a superfície externa do mesmo deve apresentar-se em perfeito estado, de modo que o contato de suas bases com os pratos da prensa durante a compressão, seja o mais íntimo e completo possível. Apesar disto, quando necessãrio, fazia-se o capeamento com enxofre das bases do corpo de prova. Para facilitar a saída do espécime passava-se óleo diesel nas paredes internas do molde de compactação.

Terminada a moldagem, cada corpo de prova era colocado num saco plástico, já devidamente etiquetado em sua parte interna, sendo depois lacrado por uma forte e cuidadosa amarração com barbante e levado para a câmara úmida onde permenecia em cura por um período de 07 dias. Após a cura, eles recebiam uma nova identificação através de uma plaqueta de alumínio numerada que era presa à volta do espécime com o auxílio de um arame fino.

Em seguida, colocava-se os corpos de prova na câmara de imersão durante 4:00 h. Terminado este tempo, eles eram

retirados, enxutos superficialmente numa toalha de tecido fe  
l  
pudo e rompidos a compressão simples pela elevação pro  
gressi  
v da carga. Para a velocidade de rompimento que é de apro  
ximadamente 1,5 kg/cm<sup>2</sup> por minuto, elaborou-se uma tabela pa  
ra facilitar o controle das leituras no painel da máquina\*.

3.3.2.3. Ensaio brasileiro de tensão indireta (EBTI) - O en  
saio de tensão indireta, conhecido comumente como ensaio de  
tensão brasileiro, foi proposto por Lôbo Carneiro e adaptado  
para solo-cimento compactado e plástico de acordo com a meto  
dologia usada na pesquisa em tela. Os pormenores quanto a no  
va apresentação deste ensaio se encontram no Apêndice F.

A adaptação teve por base o antigo princípio do Ensa  
io de Tensão Indireta (que consiste na aplicação de cargas  
de compressão a um espécime circular e cuja falha ocorre por  
fratura na direção de seu diâmetro vertical), associado aos  
Métodos SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento, e  
SC-4, Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento,  
Apêndice C e E, respectivamente.

Para a sua realização foram moldados 03 corpos de pro  
va para cada tratamento em estudo, seguindo-se o mesmo proce  
dimento dispensado ao ensaio de compressão simples mudando,  
evidentemente, apenas a posição do espécime em relação à car  
ga aplicada pela máquina\*\*.

Como a velocidade de rompimento foi também de aproxi

---

\* Para romper os espécimes, usou-se uma máquina LOSENHAUSEN -  
LOS, Maschinenbau Ag. Düsseldorf, Alemanha.

\*\* Para romper os espécimes, usou-se uma máquina LOSENHAUSEN de  
fabricação alemã, especialmente adaptada para este ensaio.

madamente 1,5 kg/cm<sup>2</sup> por minuto, usou-se a mesma tabela para facilitar o controle das leituras no painel da máquina, ela borada para o Método SC-4.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Introdução

Neste capítulo foram analisados todos os resultados obtidos dando-se ênfase aos dados dos ensaios tecnológicos, porque a partir deles originou-se as conclusões e, consequentemente, as recomendações que representam a finalidade técnica desta pesquisa.

### 4.2. Métodos

Conforme explicação realizada no capítulo anterior, o presente estudo foi dividido em duas etapas de ensaios cujos resultados serão agora apresentados, analisados e discutidos em seus mínimos detalhes.

#### 4.2.1. Ensaio de caracterização e sequência metodológica

4.2.1.1. Análise granulométrica - Foram realizados três ensaios completos de análise granulométrica por peneiramento e

sedimentação, fazendo-se depois a média dos dados obtidos cujos resultados deram origem a curva de análise granulométrica mecânica mostrada na Fig. 4.1. Pela distribuição dos diversos tamanhos de partículas da amostra analisada, concluiu-se que o solo é bem graduado (granulometria contínua) com curvatura côncava para cima e grande aproximação da curva de Talbot.

Retirou-se dessa curva os valores quantitativos da composição granulométrica, tal como indicados na Tab. 4.1, necessários para a determinação da Norma de Dosagem e dos Métodos de Ensaios a serem usados no decorrer desta pesquisa.

4.2.1.2. Massa específica real - Para a massa específica real realizou-se também três determinações, obtendo-se dados bastante aproximados que foram representados pela média mostrada na Tab. 4.1.

Esta média pode ser considerada plenamente satisfatória porque o seu valor se encontra dentro dos padrões estabelecidos, ou seja, entre os limites  $2,3 \text{ g/cm}^3$  e  $2,9 \text{ g/cm}^3$ . Afirma ainda KIEHL (1979), que a massa específica real média dos solos pode ser considerada como sendo  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Isto, porque os constituintes minerais predominantes nos solos são o quartzo, os feldspatos e os silicatos de alumínio coloidais, cujas massas específicas reais estão em torno deste valor.

4.2.1.3. Limites de Atterberg - Os limites de consistência como já era de se esperar, por se tratar de um solo altamente arenoso, não apresentaram plasticidade. Assim sendo, eles



Tab. 4.1 - Características do solo da jazida MAB

PROPRIEDADES FÍSICAS	
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (ABCP)	(%)
Pedregulho graúdo (4,800 mm a 76,000 mm)	0,00
Pedregulho fino (2,000 mm a 4,800 mm)	5,00
Areia grossa (0,420 mm a 2,000 mm)	35,00
Areia fina (0,050 mm a 0,420 mm)	45,00
Silte (0,005 mm a 0,050 mm)	5,00
Argila (menor que 0,005 mm)	10,00
passando na peneira de N <sup>o</sup> 10 (2,000 mm)	95,00
passando na peneira de N <sup>o</sup> 40 (0,420 mm)	60,00
passando na peneira de N <sup>o</sup> 200 (0,074 mm)	17,00
	(g/cm <sup>3</sup> )
MASSA ESPECÍFICA REAL	2,61
	(%)
LIMITE DE LIQUIDEZ - LL	N P
LIMITE DE PLASTICIDADE - LP	N P
ÍNDICE DE PLASTICIDADE - IP	N P
	-
ÍNDICE DE GRUPO - IG	(0)
	CLASSIFICAÇÃO
HRB	A2 - 4

apareceram na Tab. 4.1 como índices nulos (zero), cuja representação individual é feita por NP (não plástico).

4.2.1.3.1. Limite de liquidez (LL) - O solo em análise não apresentou limite líquido porque não tem coesão própria. Uma pequena quantidade de água é capaz de lubrificar a superfície das partículas, fazendo com que elas fluam sob a ação de poucos golpes mostrando que não existem características de plasticidade.

4.2.1.3.2. Limite de plasticidade (LP) - Como o solo é arenoso não existe coesão total, pois a atração molecular (coesão verdadeira) é nula, só existindo coesão por contato ou capilar. Portanto, uma pequena quantidade de água é suficiente para anular a coesão capilar fazendo com que o solo não apresenta plasticidade.

4.2.1.4. Compactação (Proctor normal) - O solo utilizado já havia sido previamente preparado, conforme explicação realizada na subdivisão 3.2.1.3.1. (capítulo anterior), e sua umidade higroscópica média era de aproximadamente 0,30 %.

Para caracterizar cada uma das 03 curvas de compactação foram necessários apenas 05 pontos cujos teores crescentes de umidade em relação ao peso do solo (3,0 kg), foram: 4,0 % (120,0 ml), 6,5 % (195,0 ml), 9,0 % (270,0 ml), 11,5 % (345,0 ml), e 14,0 % (420,0 ml), respectivamente, do 1º ao 5º ponto de compactação.

Preenchidas as fichas, desenhou-se as 03 curvas de compactação, plotando-se depois os 15 pontos num único gráfico com o objetivo de encontrar uma curva mais representativa, tal como se pode ver na Fig. 4.2.

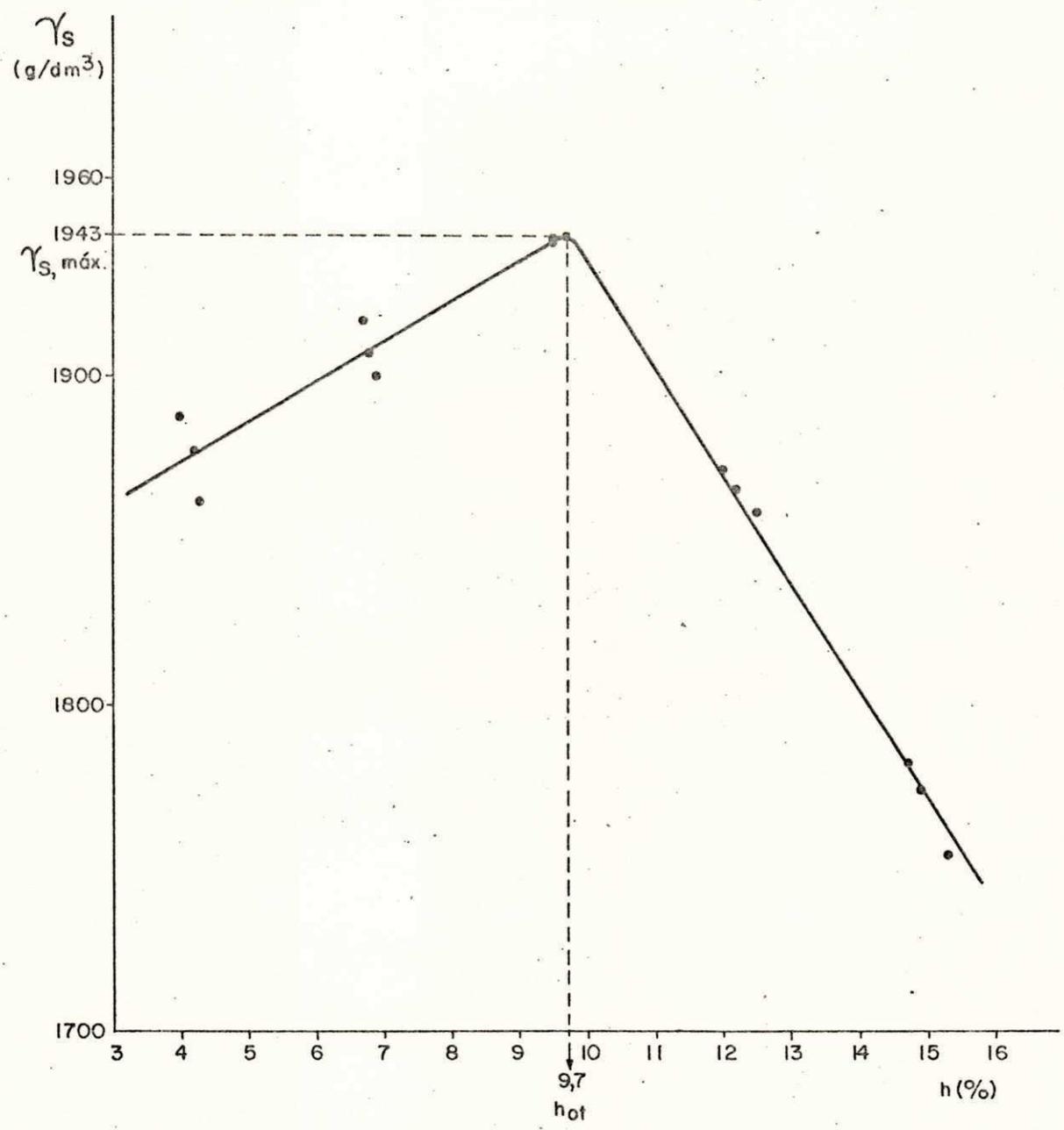


Fig. 4.2 - Relação entre a massa específica aparente seca e a umidade de compactação para o solo natural (puro)

Obteve-se como resultados um teor ótimo de umidade ( $h_{ot}$ ) de 9,7 %, correspondente a massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s, \text{m}\acute{a}\text{x}.$ ) de 1943,0 g/dm<sup>3</sup>. Para estes dados admitiu-se uma faixa de variação de  $\pm 1,0$  % para  $h_{ot}$ , e  $\pm 30,0$  g/dm<sup>3</sup> para  $\gamma_s, \text{m}\acute{a}\text{x}.$ , conforme especificações da ABCP (1977). Portanto, para os corpos de prova moldados por este ensaio usando-se o mesmo solo natural, isto é, o solo puro, tomou-se como base a umidade ótima de moldagem 9,7 % (291,0 ml), desprezando-se logicamente os 0,30 % de umidade hidrocópica devido as perdas por evaporação, nas paredes e hélices do misturador, na espátula, na base metálica, no molde, no cilindro complementar, no soquete e na proveta, em condições ambientais favoráveis. Assim, cada CP deverá apresentar para  $h_{ot}$  8,7 % a 10,7 % e para  $\gamma_s, \text{m}\acute{a}\text{x}.$  1913,0 g/dm<sup>3</sup> a 1973,0 g/dm<sup>3</sup>.

4.2.1.5. Permeabilidade do solo - Utilizou-se na compactação dos corpos de prova a umidade de moldagem 9,7 % (291,0 ml) determinada anteriormente no ensaio de compactação (Proctor Normal).

Comprovando as determinações preestabelecidas, após moldagem, cada corpo de prova apresentou para  $h_{ot}$  e  $\gamma_s, \text{m}\acute{a}\text{x}.$  valores dentro das faixas de tolerância admitidas no final do ensaio anterior.

Quanto ao resultado final, encontrou-se para o solo natural (puro) um coeficiente de permeabilidade médio ou condutividade hidráulica média ( $\bar{K}$ ) de  $2,575 \cdot 10^{-5}$  cm/s.

Analisando-se os dados gerais deste ensaio contidos na Tab. 4.2, e comparando-os com os da análise granulométrica

Tab. 4.2 - Resultados do ensaio de permeabilidade para corpos de prova de solo natural (puro)

(continua)

h (cm)	t (s)	dt (s)	z (cm)	h1/h2 (cm)	K (cm/s)
123,4	0	0	-	0,0	0,0
121,4	19	19	0,038	1,0165	0,00003273
119,4	38	19	"	1,0167	0,00003312
117,4	58	20	"	1,0170	0,00003203
115,4	77	19	"	1,0173	0,00003430
113,4	99	22	"	1,0176	0,00003014
111,4	122	23	"	1,0179	0,00002931
109,4	145	23	"	1,0183	0,00002996
107,4	169	24	"	1,0186	0,00002918
105,4	193	24	"	1,0190	0,00002980
103,4	219	26	"	1,0193	0,00002794
101,4	243	24	"	1,0197	0,00003089
99,4	269	26	"	1,0201	0,00002909
97,4	296	27	"	1,0205	0,00002856
95,4	324	28	"	1,0210	0,00002820
93,4	353	29	"	1,0214	0,00002775
91,4	382	29	"	1,0219	0,00002839
89,4	411	29	"	1,0224	0,00002903
87,4	442	31	"	1,0229	0,00002775
85,4	473	31	"	1,0234	0,00002835
83,4	506	33	"	1,0240	0,00002731
81,4	540	34	"	1,0246	0,00002716
79,4	573	33	"	1,0252	0,00002866
77,4	610	37	"	1,0258	0,00002616
75,4	647	37	"	1,0265	0,00002686

(conclusão)

h (cm)	t (s)	dt (s)	z (cm)	h1/h2 (cm)	K (cm/s)
73,4	685	38	0,038	1,0272	0,00002684
71,4	727	42	"	1,0280	0,00002499
69,4	767	40	"	1,0288	0,00002697
67,4	810	43	"	1,0297	0,00002586
65,4	856	46	"	1,0306	0,00002490
63,4	902	46	"	1,0315	0,00002562
61,4	950	48	"	1,0326	0,00002540
59,4	1002	52	"	1,0337	0,00002422
57,4	1055	53	"	1,0348	0,00002453
55,4	1112	57	"	1,0361	0,00002364
53,4	1170	58	"	1,0374	0,00002406
51,4	1232	62	"	1,0389	0,00002339
49,4	1297	65	"	1,0405	0,00002321
47,4	1365	68	"	1,0422	0,00002310
45,4	1440	75	"	1,0440	0,00002182
43,4	1519	79	"	1,0461	0,00002168
41,4	1602	83	"	1,0483	0,00002160
39,4	1692	90	"	1,0508	0,00002092
37,4	1787	95	"	1,0535	0,00002085
35,4	1886	99	"	1,0565	0,00002110
33,4	2004	118	"	1,0599	0,00001873
31,4	2125	121	"	1,0637	0,00001939
29,4	2258	133	"	1,0680	0,00001880
27,4	2402	144	"	1,0730	0,00001859
25,4	2566	164	"	1,0787	0,00001755
23,4	2748	182	"	1,0855	0,00001713
$\Sigma K$					0,0000128756
$\bar{K}$					0,00002575
$\bar{K}$					$2,575 \cdot 10^{-5}$

ca, conclui-se facilmente que eles estão em perfeita harmo  
nia já que a condutividade hidráulica encontrada está condi  
zente com as propriedades físicas das partículas do solo em  
destaque. Esta afirmação é facilmente comprovada pela observa  
ção dos intervalos de variação de K para os diferentes ti  
pos de solos, segundo apresentação de CASAGRANDE, A. & FADUM, R. E., citados por CAPUTO (1976).

4.2.1.6. Ensaio de compactação de solo-cimento - Método SC-1  
(ABCP, 1977) - Conforme determinação realizada pela sequência  
metodológica da ABCP, usou-se neste ensaio um teor de  
cimento estimado de 6,0 % (veja o Apêndice A, Norma Simplificada  
de Dosagem do Solo-Cimento).

Como já foi explicado no início do capítulo anterior,  
o solo para este método se encontrava preparado e apresentando  
uma umidade higroscópica média de aproximadamente 0,30 %.  
A exemplo do que ocorreu no Ensaio de Compactação com o solo  
natural (puro), subdivisão 4.2.1.4. deste capítulo, para este  
método também desprezou-se a umidade higroscópica do so  
lo. Pelos mesmos motivos técnicos, desprezou-se a umidade higro  
scópica do cimento. Assim sendo, o cálculo do conteúdo de  
cimento e dos teores crescentes de umidade a adicionar, fo  
ram realizados para uma umidade higroscópica total da mistura  
solo-cimento igual a 0,0 %..

Para se obter uma completa caracterização de cada uma  
das 03 curvas de compactação foram realizados 06 pontos com  
os seguintes teores crescentes de umidade em relação ao peso  
total da mistura seca (3,18 kg) de solo-cimento: 2,5 % (79,5  
ml), 5,0 % (159,0 ml), 7,5 % (238,5 ml), 10,0 % (318,0 ml),

12,5 % (397,5 ml), e 15,0 % (477,0 ml), respectivamente, do 1º ao 6º ponto da compactação.

Preenchidas as fichas, desenhou-se as 03 curvas de compactação, plotando-se depois os 18 pontos num único gráfico com o objetivo de caracterizar com grande precisão a curva de compactação, obtendo-se assim dados mais representativos como se pode ver através da Fig. 4.3.

Os dados obtidos neste ensaio, ou melhor, umidade ótima ( $h_{ot}$ ) de 8,8 % e massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s, \text{m}\acute{a}\text{x.}$ ) de 1987,0 g/dm<sup>3</sup>, serviram de base para a moldagem de corpos de prova pelo Método SC-2, já que segundo especificações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1977), quando o teor de umidade do corpo de prova (CP) diferir da umidade ótima de moldagem em mais de 1,0 % ou quando a massa específica aparente seca do CP diferir da massa específica aparente seca máxima em mais de 30,0 g/dm<sup>3</sup>, o CP deve ser rejeitado. Isto significa que qualquer CP moldado pelo Método SC-2, observando os teores da mistura determinados no Método SC-1, deverá apresentar uma umidade de moldagem entre 7,8 % e 9,8 % e uma massa específica aparente seca entre 1957,0 g/dm<sup>3</sup> e 2017,0 g/dm<sup>3</sup>.

4.2.1.7. Moldagem de corpos de prova de solo-cimento - Método SC-2 (ABCP, 1977) - Como o principal objetivo desta pesquisa é fazer um estudo comparativo entre misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico para revestimento de canais, utilizando-se um solo arenoso do grupo A2 - 4 (0), tomou-se por base os dados da umidade ótima de moldagem ( $h_{ot}$ ) = 8,8 %, da massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s, \text{m}\acute{a}\text{x.}$ ) =

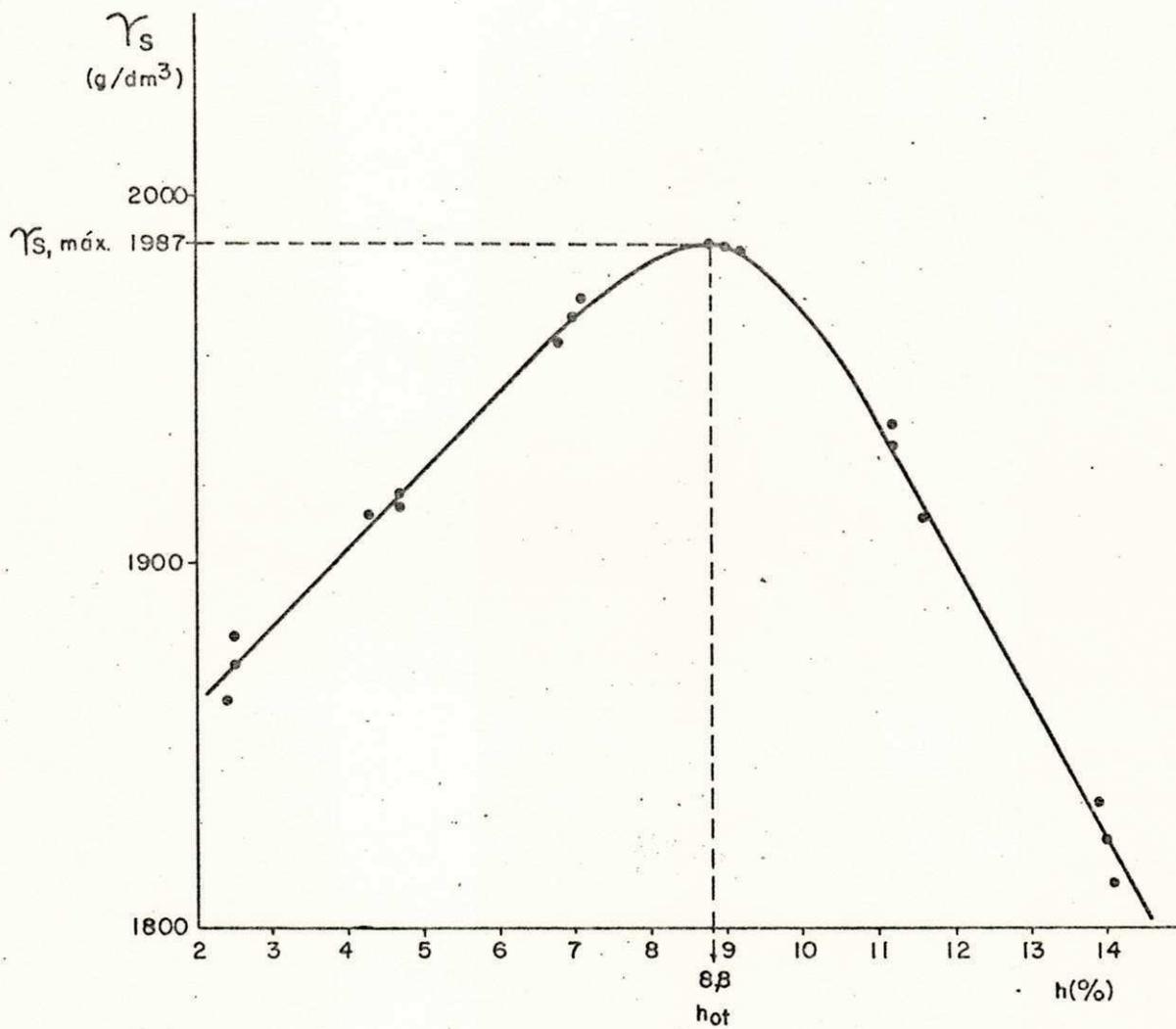


Fig. 4.3 - Relação entre a massa específica aparente seca e a umidade de compactação para a mistura padrão de solo-cimento

1987,0 g/dm<sup>3</sup>, e do teor de cimento (Tc) = 6,0 %, para estabelecer as variações na composição das referidas misturas. Desse dados apenas a umidade ótima de moldagem ( $h_{ot}$ ) sofreu uma pequena modificação sendo arredondada para 9,0 %, sem que implicasse numa falha técnica já que este aumento somado a umidade total dos componentes da mistura (Htm) que foi desprezada, não chega a 0,6 %, valor que em condições favoráveis é sempre acrescentado para suprir as várias perdas citadas anteriormente no final da subdivisão 4.2.1.4., Proctor Normal, neste capítulo.

Inegavelmente, os dados supracitados representam a essência dos ensaios de caracterização porque, partindo-se deles, estabeleceu-se a montagem conclusiva desta pesquisa.

Desta maneira, elaborou-se a Tab. 4.3 contendo 54 combinações envolvendo os teores de cimento e as umidades de moldagem ensaiadas nas misturas em estudo. Vê-se, nesta tabela, que o teor de cimento (Tc) cresceu sempre em 2,0 % trabalhando-se com 09 teores, inclusive 6,0 %, que segundo normas da ABCP deverá ser adotado na estabilização padrão do solo em foco. Com respeito a umidade de moldagem (hm) a variação foi de apenas 1,0 % em torno da umidade ótima de moldagem ( $h_{ot} = 9,0 \%$ ), passando depois para 2,0 %. Baseando-se nestes teores, calculou-se as quantidades de cimento e água a adicionar ao solo com pequenos arredondamentos, efetuando-se os cálculos através das fórmulas apresentadas no Apêndice B, Ensaio de Compactação de Solo-Cimento - Método SC-1 (ABCP, 1977).

Assim sendo, reuniu-se na Tab. 4.4 os dados relativos as quantidades de cimento e água a adicionar aos 3,0 kg de

Tab. 4.3 - Combinações dos teores de cimento e água utilizadas na moldagem dos corpos de prova submetidos aos Ensaios Tecnológicos

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	hm (%)					
4,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
6,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
8,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
10,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
12,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
14,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
16,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
18,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0
20,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 4.4 - Controle das quantidades de cimento e água a serem adicionados ao solo na moldagem dos corpos de prova submetidos aos Ensaio Tecnológicos.

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	Qc (g)	hm (%)	Qa (ml)		Tc (%)	Qc (g)	hm (%)	Qa (ml)
4,0	120,0	8,0	250,0		4,0	120,0	12,0	374,0
6,0	180,0	8,0	254,0		6,0	180,0	12,0	382,0
8,0	240,0	8,0	259,0		8,0	240,0	12,0	389,0
10,0	300,0	8,0	264,0		10,0	300,0	12,0	396,0
12,0	360,0	8,0	269,0		12,0	360,0	12,0	403,0
14,0	420,0	8,0	274,0		14,0	420,0	12,0	410,0
16,0	480,0	8,0	278,0		16,0	480,0	12,0	418,0
18,0	540,0	8,0	283,0		18,0	540,0	12,0	425,0
20,0	600,0	8,0	288,0		20,0	600,0	12,0	432,0
4,0	120,0	9,0	281,0		4,0	120,0	14,0	437,0
6,0	180,0	9,0	286,0		6,0	180,0	14,0	445,0
8,0	240,0	9,0	292,0		8,0	240,0	14,0	454,0
10,0	300,0	9,0	297,0		10,0	300,0	14,0	462,0
12,0	360,0	9,0	302,0		12,0	360,0	14,0	470,0
14,0	420,0	9,0	308,0		14,0	420,0	14,0	479,0
16,0	480,0	9,0	313,0		16,0	480,0	14,0	487,0
18,0	540,0	9,0	319,0		18,0	540,0	14,0	496,0
20,0	600,0	9,0	324,0		20,0	600,0	14,0	504,0
4,0	120,0	10,0	312,0		4,0	120,0	16,0	499,0
6,0	180,0	10,0	318,0		6,0	180,0	16,0	509,0
8,0	240,0	10,0	324,0		8,0	240,0	16,0	518,0
10,0	300,0	10,0	330,0		10,0	300,0	16,0	528,0
12,0	360,0	10,0	336,0		12,0	360,0	16,0	538,0
14,0	420,0	10,0	342,0		14,0	420,0	16,0	547,0
16,0	480,0	10,0	348,0		16,0	480,0	16,0	557,0
18,0	540,0	10,0	354,0		18,0	540,0	16,0	566,0
20,0	600,0	10,0	360,0		20,0	600,0	16,0	576,0

Tc. teor de cimento ensaiado

Qc. quantidade de cimento a ser adicionada à mistura

hm. umidade de moldagem ensaiada

Qa. quantidade de água a ser adicionada à mistura

solo na moldagem dos 432 corpos de prova destinados aos Ensaio Tecnológicos, dos quais 108 foram submetidos ao Método SC-3 (Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem), 162 ao Método SC-4 (Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento), e os 162 restantes ao EBTI (Ensaio Brasileiro de Tensão Indireta).

Os dados referentes a este ensaio se encontram no Apêndice G, sendo que as Tabelas 1 e 2 correspondem aos corpos de prova submetidos ao Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem - Método SC-3, as Tabelas 3 e 4 aos espécimes submetidos ao Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento - Método SC-4 e as Tabelas 5 e 6 àqueles submetidos ao Ensaio de Tensão Indireta - EBTI.

Como em cada um dos ensaios supracitados haviam dados de compactação, resolveu-se apresentá-los em conjunto num único gráfico, evitando-se assim, a apresentação de gráficos similares. Então, efetuou-se uma nova média dos dados relativos às massas específicas aparentes secas médias e das umidades médias de moldagem para os Métodos SC-3, SC-4 e EBTI, envolvendo as Tabelas 1 a 6 do Apêndice G. Destarte, formou-se as Tabelas 4.5 e 4.6 que são mostradas a seguir. Nestas condições, originou-se a Fig. 4.4 contendo na ordenada a massa específica aparente seca média, fator físico de maior importância no solo-cimento compactado e plástico e, na abscissa, a umidade média de moldagem ensaiada em função dos vários teores de cimento. Cada curva desta figura obedece a sua peculiar natureza, cuja característica própria só foi alterada pelas duas interceptações ocorridas devido a um pequeno erro de moldagem, responsável direto pelas discrepâncias

Tab. 4.5 - Valores médios das unidades médias contidas nos corpos de prova submetidos aos Ensaios Tecnológicos, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{h}_{CP}$ (%)					
4,0	8,5	9,2	10,2	12,3	14,7	16,5
6,0	8,3	9,4	10,3	12,6	14,4	16,4
8,0	8,6	9,2	10,4	12,6	14,4	16,3
10,0	8,3	9,6	10,3	12,6	14,4	16,2
12,0	8,6	9,4	10,5	12,4	14,4	16,2
14,0	8,3	9,5	10,7	12,5	14,3	16,1
16,0	8,4	9,6	10,7	12,3	14,4	16,3
18,0	8,3	9,6	10,4	12,5	14,4	16,2
20,0	8,3	9,5	10,6	12,3	14,3	16,1
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{h}_{CP}$ . unidade média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 4.6 - Valores médios das massas específicas aparentes secas médias dos corpos de prova submetidos aos Ensaio Tecnológicos, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{\gamma}_s, CP$ (g/dm <sup>3</sup> )					
4,0	1918,9	1931,7	1945,9	1882,7	1790,4	1755,4
6,0	1927,1	1946,5	1951,0	1888,5	1803,4	1762,5
8,0	1934,2	1952,8	1958,5	1897,6	1807,2	1773,8
10,0	1944,7	1959,3	1965,8	1905,6	1818,1	1781,0
12,0	1951,2	1966,0	1973,2	1919,4	1826,1	1788,5
14,0	1959,6	1970,8	1979,0	1924,3	1835,5	1793,4
16,0	1967,5	1977,8	1985,1	1932,0	1839,2	1802,6
18,0	1975,1	1988,5	1994,0	1936,1	1845,8	1808,7
20,0	1987,4	1996,1	1999,7	1942,9	1851,4	1817,4
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{\gamma}_s, CP.$  massa específica aparente seca média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

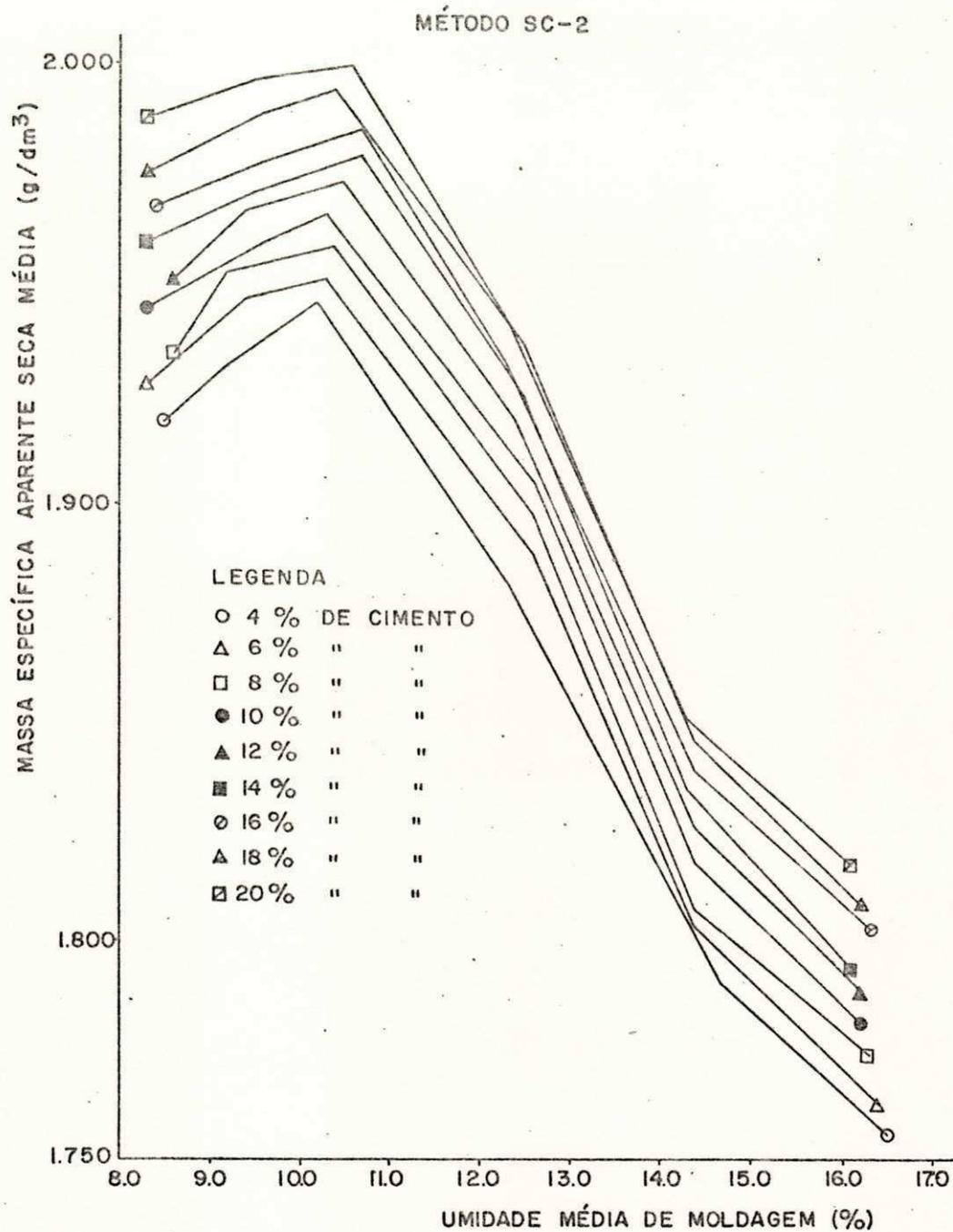


Fig. 4.4 - Relação entre a massa específica aparente seca média e a umidade média de moldagem ensaiada com vários teores de cimento, para os corpos de prova submetidos aos Ensaio Tecnológicos

registradas nos dados de umidade.

Reportando-se ao que foi dito anteriormente, vê-se que os corpos de prova moldados pelo Método SC-2 e submetidos aos Ensaio Tecnológicos, tiveram por base a determinação da considerada mistura padrão para uso corrente com o solo ensaiado, segundo especificações das Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977), que apresentou os seguintes resultados:  $T_c = 6,0 \%$ ,  $h_{ot} = 9,0 \%$  e  $\gamma_s, \text{máx.} = 1987,0 \text{ g/dm}^3$ . Mencionou-se também que os dados acima influenciaram a montagem do esquema de 54 combinações, envolvendo teores de cimento e umidade, utilizadas na moldagem dos corpos de prova ensaiados.

Entretanto, convém frisar que as variações efetuadas tanto no teor de cimento como na umidade ótima de moldagem, doravante denominada umidade de moldagem, não provocaram anormalidades nas respectivas massas específicas aparentes secas, conforme se pode ver através das Tabelas 2, 4 e 6 do Apêndice G, se se considerar cada teor de umidade de moldagem ensaiado. As pequenas discrepâncias registradas nestes dados são plenamente justificáveis tendo-se em vista a ocorrência inevitável de falhas técnicas durante a moldagem, principalmente, na energia de compactação aplicada pelo laboratorista.

Quanto a umidade de moldagem, pode-se observar nas Tabelas 1, 3 e 5 do Apêndice G, que a variação de suas respectivas umidades médias dos corpos de prova ( $\bar{h}_{CP}$ ) atingiu um acréscimo de  $0,9 \%$  para um mesmo teor de cimento, assim como, para teores diferentes de cimento talvez devido a homogeneização no misturador elétrico embora o tempo de funcionamento

deste aparelho fosse constante para todas as misturas.

Devido aos problemas citados nos dois parágrafos anteriores, nota-se facilmente nas Tabelas 1 a 6 do Apêndice G, que para uma umidade média do CP maior, obteve-se uma massa específica aparente seca menor e vice-versa. Vê-se ainda, que para uma mesma umidade média do CP, ora a massa específica aparente seca crescia, ora decrescia.

Durante a moldagem, observou-se que a partir de 12,0% de umidade tornou-se mais fácil a aproximação dos dados referentes às massas específicas aparentes secas, diminuindo bastante a perda de corpos de prova.

A propósito, convém afirmar que tanto as massas específicas aparentes secas como as umidades médias de moldagem, ou mais precisamente, as umidades médias dos corpos de prova estão condizentes com as especificações encontradas em Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977). Segundo esta publicação, quando a umidade de moldagem diferir da umidade ótima em mais de 1,0%, ou quando a massa específica aparente seca do CP diferir da massa específica aparente seca máxima de mais de 30,0 g/dm<sup>3</sup>, o CP deve ser rejeitado. Para que estas regras fossem observadas, teve-se que rejeitar dezenas de corpos de prova numa operação bastante arrogada, honesta e meticulosa.

Em face do exposto, pode-se concluir que a apresentação conjunta dos resultados do presente ensaio (Método SC-2) através da Fig. 4.4, serviu para resumir a análise do mesmo já que eles representam de modo global a moldagem dos corpos de prova de solo-cimento compactado e plástico, submetidos aos Ensaio Tecnológicos.

4.2.1.8. Análise global dos ensaios de caracterização - Como se pode observar, os resultados dos ensaios anteriores discutidos e analisados, primeira etapa desta pesquisa, serviram para caracterizar o solo em estudo fornecendo a base necessária à execução da etapa seguinte.

Vê-se, nesta altura, que os dados mais importantes desta série foram retirados da Fig. 4.1, Curva de Análise Granulométrica Mecânica, para serem empregados na classificação do solo e, principalmente, na determinação da Norma de Dosagem onde se conheceu o teor de cimento em peso indicado para uso na estabilização provisória do solo em análise.

Além desses valores, merecem destaque os Limites de Atterberg que além de serem usados na classificação do solo, ainda definem a execução do Ensaio Brasileiro de Tensão Indireta (EBTI) já que este não é aplicável a materiais que falham plasticamente.

Com a determinação da Norma Simplificada de Dosagem do Solo-Cimento através de seu Método A e, por conseguinte, a aprovação definitiva do teor de cimento em peso indicado, conheceu-se também a massa específica aparente seca máxima, fator físico de maior importância no solo-cimento compactado e plástico, além da respectiva umidade ótima de moldagem para o primeiro tipo de mistura que é considerado padrão para emprego corrente com o solo ensaiado. Obteve-se os seguintes valores para o solo-cimento padrão.

Teor de cimento ( $T_c$ ) = 6,0 %.

Umidade ótima de moldagem ( $h_{ot}$ ) = 9,0 %, e

Massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s$ , máx.) =  
1987,0 g/dm<sup>3</sup>.

A propósito, convém salientar que estes resultados só foram obtidos após realização dos Métodos SC-1, SC-2 e SC-4, indispensáveis à complementação da Norma Simplificada de Do sagem do Solo-Cimento (ABCP, 1977), no que se refere a de f*ini*ção de seu emprego.

Inegavelmente, os dados supracitados representam a essência dos Ensaio de Caracterização porque, partindo-se deles, estabeleceu-se as 54 combinações (ver Tabelas 4.3 e 4.4) envolvendo as porcentagens de cimento e umidade utilizadas nas misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico, ensaiadas através dos Ensaio Tecnológicos, representando a montagem conclusiva deste trabalho.

Por último, convém frisar que o Método SC-2 se constitui no ensaio de maior destaque desta etapa porque, através dele, foram moldados todos os corpos de prova ensaiados na fase final desta pesquisa, ou seja, nos Ensaio Tecnológicos analisados em seguida.

#### 4.2.2. Ensaio tecnológicos

4.2.2.1. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Método SC-3 (ABCP, 1977) - Antes de qualquer comentário, achou-se por bem salientar que os dados referentes a este ensaio se encontram no Apêndice H, mais precisamente, nas Tabelas 1 a 7. Com estes resultados elaborou-se as Figuras 4.5 a 4.12 que serão apresentadas no decorrer das discussões deste ensaio.

Indiscutivelmente, este foi o ensaio que apresentou

mais problemas durante a execução além de ser também considerado o mais trabalhoso de toda a pesquisa. Um dos maiores problemas enfrentados foi o ganho de massa por parte do corpo de prova, ocorrido desde o momento em que este era retirado da estufa para escovação. O espécime ao sair de uma temperatura de 71,0 °C ficava em contato com o meio ambiente começando a perder calor e a absorver, gradativamente, umidade do ar. Em assim sendo, logo se concluiu que a operação pesagem-escovação-pesagem deveria ser realizada no menor espaço de tempo possível. Este foi o motivo pelo qual se discordou do tempo determinado pela ABCP para o cumprimento desta operação. Em primeiro lugar, eliminou-se o tempo de esfriamento do corpo de prova utilizando luvas térmicas que protegiam o operador, proporcionando-lhe condições de trabalho com temperaturas elevadas. No momento da operação, retirava-se individualmente cada corpo de prova da estufa, sendo imediatamente pesado, escovado e pesado. Repetia-se o procedimento até o último espécime da série. Em seguida, levava-se todos os corpos de prova para a câmara de imersão. Mesmo assim, o ganho de umidade era tão expressivo em relação ao desgaste que a maioria dos corpos de prova apresentaram dados negativos, isto é, na segunda pesagem eles estavam com massa superior à primeira, embora tivessem sido desgastados durante a escovação. Com este procedimento obteve-se dados uniforme e mais lógicos já que o tempo de exposição de cada CP foi praticamente o mesmo, variando apenas a absorção de umidade do ar cuja intensidade passou a depender da combinação dos componentes da mistura.

A partir de agora, passa-se a analisar as perdas de

massa parciais médias versus o número de ciclos, em função dos vários teores de cimento e unidades médias de moldagem para os corpos de prova ensaiados após 07 dias de cura.

Os resultados que se encontram nas Tabelas 1 a 6 do Apêndice H originaram as Fig. 4.5 a 4.10, ou melhor, com os dados da Tab. 1 plotou-se os gráficos da Fig. 4.5 e assim, sucessivamente. Essas figuras de formas bem simples; mostram o comportamento do mecanismo das misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico com as anomalias e influências provocadas por cada componente da mistura, ou pela combinação deles.

A solidariedade dos teores no campo das misturas des dobra-se em dois aspectos:

1. aumento de durabilidade, e
2. aumento de resistência.

Acontece, entretanto, que este método está voltado apenas para a durabilidade, embora os fatores responsáveis pelo aumento desta sejam os mesmos que contribuem para o incremento da resistência.

Feita esta ressalva, volta-se ao cerne do ensaio, ou seja, a discussão e análise de seus resultados, destacando-se em primeiro plano a mistura solo-cimento compactado e, em segundo, o solo-cimento plástico, sem que isto signifique superioridade da primeira sobre a segunda.

Observando-se as Fig. 4.5, 4.6 e 4.7, que representam os resultados da estabilização com solo-cimento compactado, conclui-se que a ação conjunta do binômio umidade - cimento é que determina o comportamento deste tipo de mistura. Fazendo-se uma observação mais apurada pode-se dizer que, na

verdade, a umidade de moldagem modifica bem mais o ambiente físico-químico da mistura que o próprio teor de cimento. Pelo menos, esta foi a conclusão a que se chegou tendo-se como base o comportamento dos gráficos destas figuras. É bem mais simples, seguro e científico, a comprovação de dados reais que a credibilidade de teorias ainda não comprovadas. E, em se tratando de dados, vê-se que a Fig. 4.5 demonstra nitidamente este efeito, onde conclui-se que uma umidade deficiente, no caso 8,0 %, por não satisfazer completamente as necessidades de hidratação do cimento e solo, reduz a ação e eficiência de todos os teores de cimento ensaiados provocando, logicamente, as maiores perdas de massa parciais para todos os ciclos. Sabe-se que a água é responsável pela hidratação e cristalização do cimento. Ora, sendo a umidade um fator de vital importância nas propriedades físico-químicas do cimento e solo, principalmente, no que diz respeito à coesão de suas partículas, deduz-se que sua deficiência limita em parte as ligações químicas entre seus componentes que vão ficando cada vez mais enfraquecidas a medida que os corpos de prova são submetidos aos ciclos de molhagem e secagem, provocando evidentemente, um maior e progressivo desgaste durante as escovações e, em especial, para os espécimes moldados com menores teores de cimento. Como a umidade não foi suficiente para satisfazer as necessidades de hidratação e cristalização das partículas solo-cimento, a mistura resistiu menos aos ciclos de molhagem e secagem. Não está, pois, fora de cogitação admitir que moldando-se um CP com deficiência de umidade altera-se o processo de cura que, por sua vez, provoca uma maior absorção e, conseqüentemente, uma maior perda

de umidade quando este é submetido aos ciclos de molhagem e secagem, enfraquecendo a coesão da mistura e desintegrando as ligações químicas incompletas da periferia do espécime, tornando-o mais vulnerável ao desgaste pelo escovamento. Nestas condições, achou-se por bem desprezar a Fig. 4.5 e passar a analisar as duas restantes onde o teor de umidade foi bastante para que a mistura solo-cimento compactado encontrasse um critério de estabilidade e durabilidade.

Então, comparando-se as Figs. 4.6 e 4.7, torna-se mais fácil ainda se entender o porquê do efeito da umidade neste tipo de mistura. Como se pode ver, com uma pequena alteração na umidade de moldagem que sofreu um acréscimo progressivo de 1,0 %, obteve-se uma completa modificação no comportamento das curvas destas figuras. Sente-se que a umidade de moldagem para ambos os casos foi bastante para satisfazer as necessidades de hidratação do cimento e solo, fazendo com que a mistura encontrasse um critério de estabilidade e durabilidade desejado, não somente por ter apresentado uma redução expressiva no desgaste dos corpos de prova mas, principalmente, pelo posicionamento das curvas que representam os espécimes moldados a partir de 10,0 % de cimento, demonstrando uma configuração semelhante devido a uma oscilação quase uniforme, e comprovando através dos dados negativos que o desgaste foi sempre tão pequeno que não conseguiu superar o ganho de massa provocado pela absorção da umidade do ar.

O que interessa, agora, é saber qual o teor de umidade deve ser considerado como ótimo para a mistura solo-cimento compactado. Embora esta decisão só seja definitiva após a análise das perdas de massa finais, conclui-se pela pró

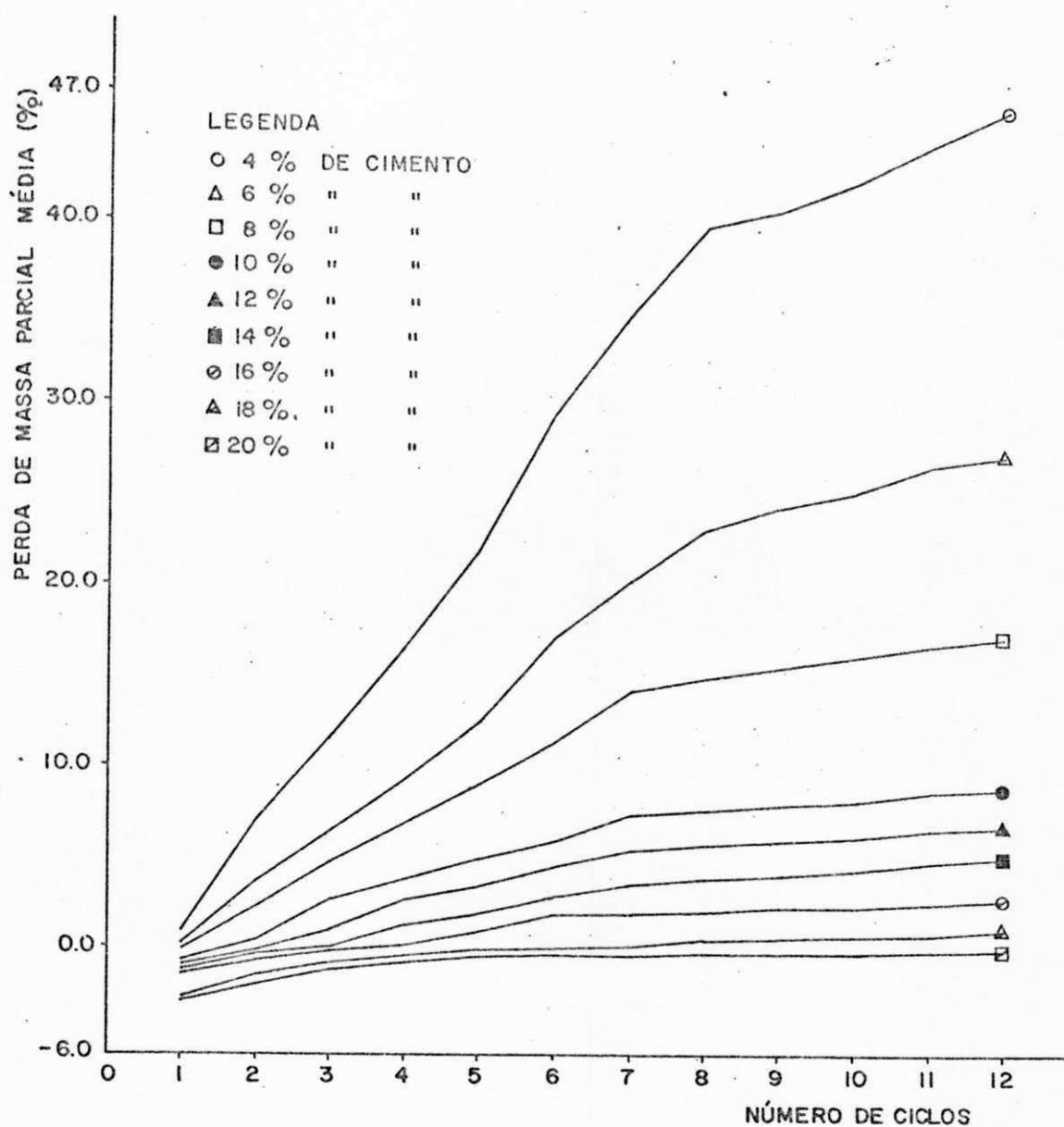


Fig. 4.5 - Relação entre a perda de massa parcial média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o número de ciclos, em função de vários teores de cimento e umidade média de moldagem variando de 8,0 % a 9,0 %

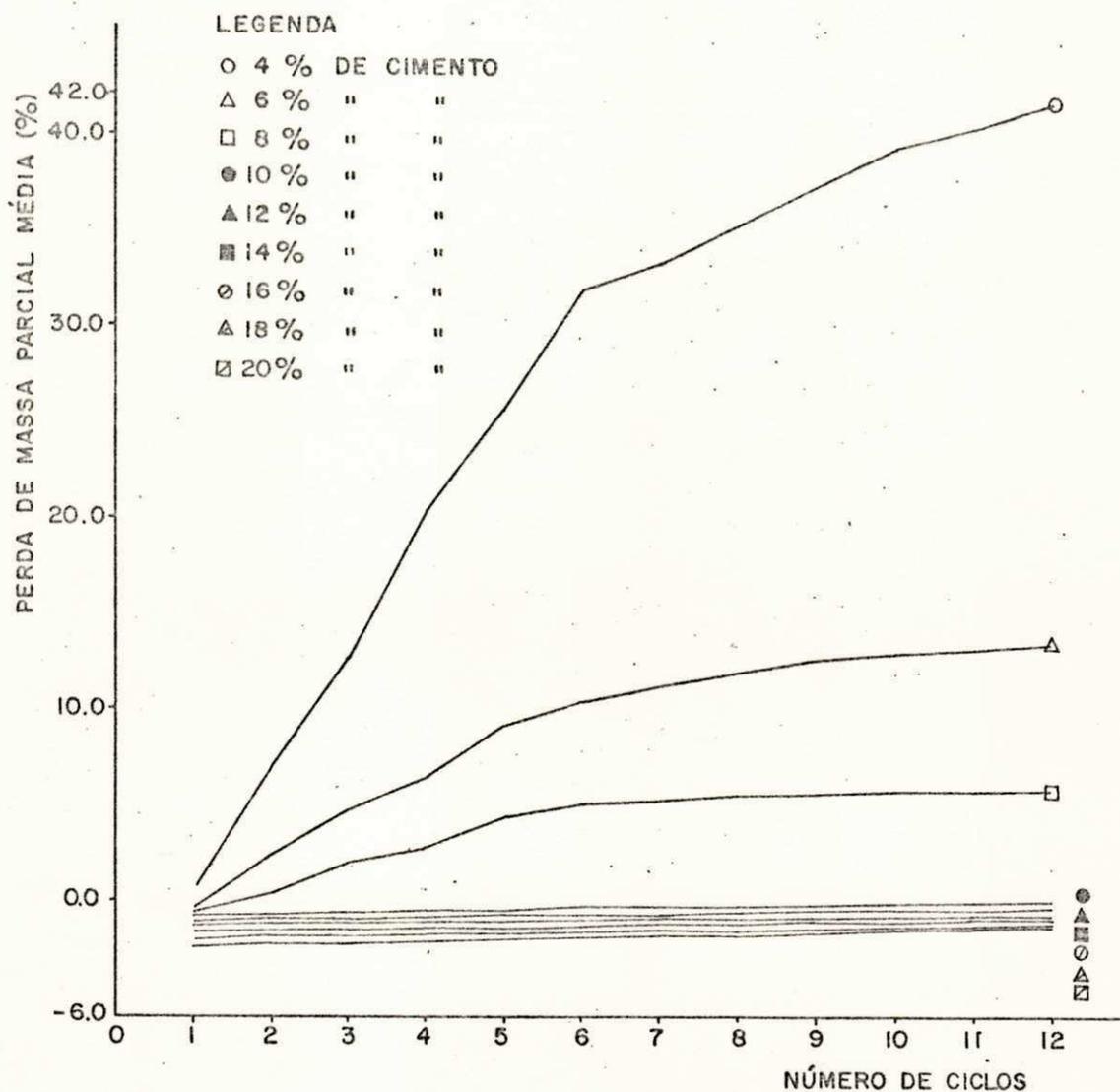


Fig. 4.6 - Relação entre a perda de massa parcial média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o número de ciclos, em função de vários teores de cimento e umidade média de moldagem variando de 9,0 % a 10,0 %

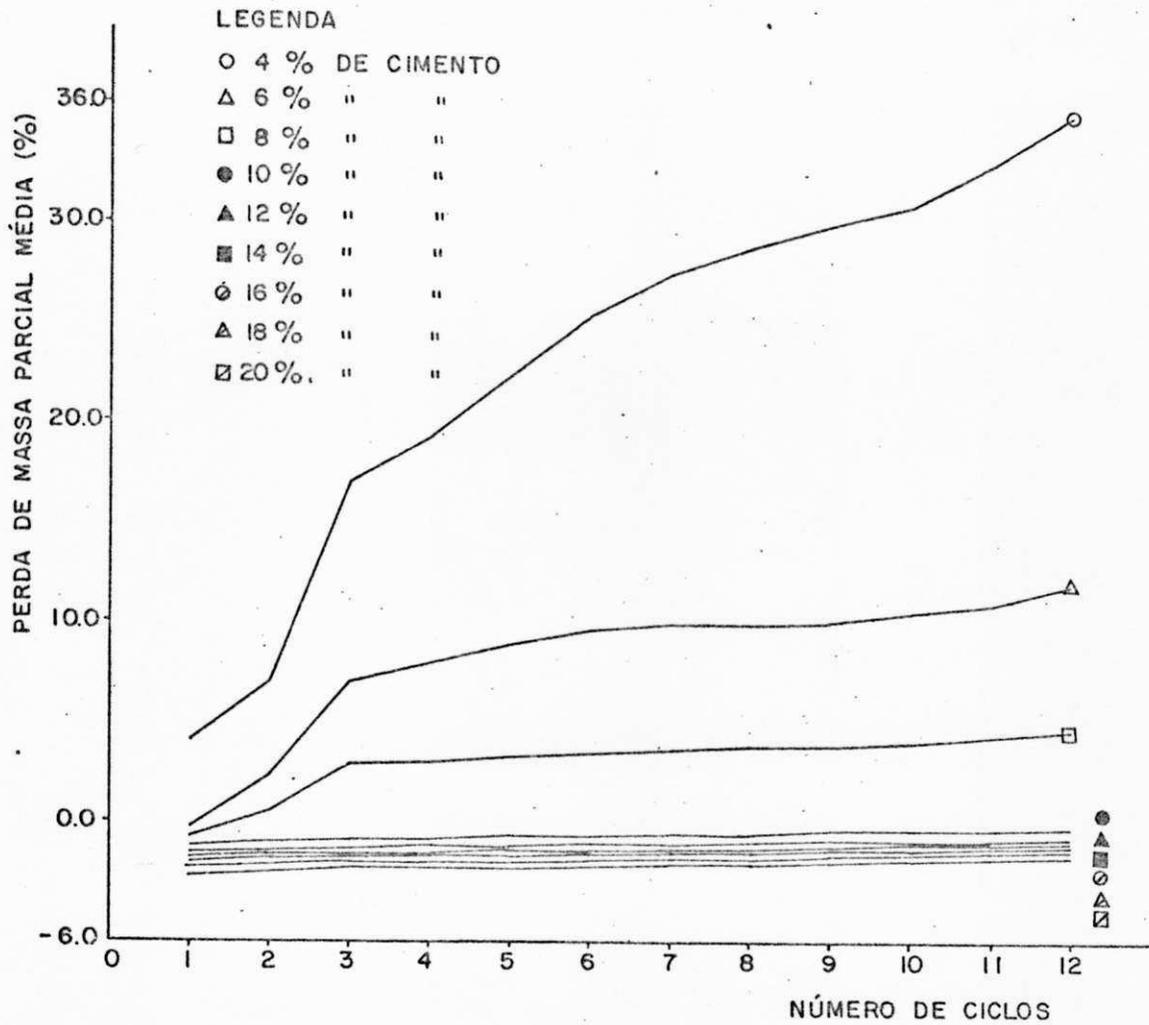


Fig. 4.7 - Relação entre a perda de massa parcial média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o número de ciclos, em função de vários teores de cimento e umidade média de moldagem variando de 10,0 % a 11,0 %

pria demonstração da Fig. 4.7 que o teor ótimo de umidade para a mistura solo-cimento compactado é 10,0 %, pois, foi com ele que os corpos de prova apresentaram os menores desgastes para qualquer teor de cimento ensaiado. Este assunto será novamente focalizado e melhor discutivo na análise das perdas de massa finais.

Passando-se a debater a eficiência dos teores de cimento no campo da mistura, a primeira conclusão a se chegar, é que o aumento progressivo da quantidade de cimento provoca uma redução na perda de massa de qualquer espécime para cada ciclo, podendo atingir um ponto de equilíbrio em que qualquer incremento deste componente não mais influenciará na durabilidade dos corpos de prova, pelo menos durante os ciclos. Esta tendência é facilmente observada pela análise de qualquer uma das figuras em destaque.

Logicamente, não se deve estudar teores acima de 20,0% de cimento já que, segundo alguns autores com experiências em outros usos na construção civil, teores muito elevados se tornam antieconômicos porque elevam muito os custos da obra.

Quanto a Fig. 4.5, pouco se pode falar sobre a ação dos teores de cimento pois, como já se comentou, a umidade de moldagem não foi suficiente para hidratar o cimento e o solo e proporcionar à mistura a intimidade necessária entre seus componentes para que esta encontrasse o critério de estabilidade e durabilidade desejado. Pode-se dizer com segurança, que foi verificado apenas o efeito do aumento do teor de cimento na redução das perdas de massa dos espécimes ensaiados, embora a mistura se mostrasse incapaz de resistir satisfatoriamente ao desgaste provocado através dos 12 ci

culos de molhagem e secagem. Comparando-se esta figura com as demais, observa-se que a eficácia dos teores de cimento foi bastante prejudicada pela deficiência de umidade.

Por sua vez, o mesmo não ocorreu com as Figs. 4.6 e 4.7, onde as respectivas umidades de moldagem foram suficientes para satisfazerem as necessidades de hidratação do cimento e solo, fornecendo à mistura uma maior e mais completa intimidade entre as ligações químicas de seus componentes, definindo claramente a ação e a eficiência de cada teor de cimento. Os gráficos destas figuras mostram que os três primeiros teores, ou sejam, 4,0 %, 6,0 % e 8,0 % apresentaram as maiores perdas de massa por ciclo porque a quantidade de cimento, embora crescente, ainda é insuficiente para atingir os padrões técnicos adequados à estabilização do solo em estudo. Na verdade, somente a partir de 10,0 % de cimento é que a mistura passou a apresentar um comportamento satisfatório com a redução significativa da perda de massa dos corpos de prova para cada ciclo. De fato, as curvas passaram a crescer de forma lenta e gradual apresentando uma pequena acensão ao longo dos 12 ciclos, com dados muitas vezes repetidos provocando em alguns setores um ligeiro paralelismo. O aparecimento de dados negativos atestam que a perda de massa dos corpos de prova foi sempre tão reduzida que em nenhum ciclo superou o ganho de massa causado pela absorção da umidade do ar. A aproximação destas curvas reforçam ainda mais a conclusão de que somente a partir de 10,0 % de cimento a mistura foi tecnicamente estabilizada porque, após esta marca, cada incremento de cimento não mais provocou reduções significativas nas perdas de massa para cada ciclo em relação ao seu an

tecessor. Acontece, entretanto, que, embora de maneira reduzida as perdas de massa continuaram diminuindo à medida que o teor de cimento era aumentado. Em face do exposto, pode-se concluir que a composição da mistura solo-cimento compactado deve apresentar qualquer teor a partir de 10,0 % de cimento porque, de acordo com os objetivos e limitações deste ensaio, foi com esta percentagem que os esécimes apresentaram uniformidade nos resultados de durabilidade por molhagem e secagem.

Nesta altura, convém salientar, que a porcentagem deste elemento na composição da mistura solo-cimento compactado para emprego em revestimento de canais só poderá ser determinada após uma análise econômica detalhada deste material envolvendo, evidentemente, os teores de cimento a partir de 10,0 % por terem apresentado resultados satisfatórios de durabilidade.

Para as Figs. 4.8, 4.9 e 4.10, que representam os resultados da estabilização com solo-cimento plástico, prevalece também a influência do binômio umidade-cimento no comportamento deste tipo de mistura.

A exemplo do que ocorreu com a mistura solo-cimento compactado, resolveu-se iniciar a análise e discussão do comportamento dos gráficos destas figuras pela ação e influência da umidade de moldagem. Levando-se em conta as considerações feitas para a mistura solo-cimento compactado, pode-se afirmar que embora de maneira inversa, a umidade de moldagem também se constitui no fator que mais modifica o ambiente físico-químico deste novo tipo de mistura. Através das figuras mencionadas acima, conclui-se, que o aumento progressivo do

teor de umidade após ser atingido o seu ponto ótimo reduz a eficiência da mistura solo-cimento plástico. Assim, à medida que se aumenta a umidade de moldagem além de seu ponto ótimo ocorre um incremento nas perdas de massa dos corpos de prova para cada ciclo, principalmente, naqueles moldados com menores teores de cimento. Este desgaste se deve, em primeiro lugar, ao excesso de umidade utilizado na moldagem dos corpos de prova que provoca alterações na cimentação e coesão das partículas do cimento e solo diminuindo a resistência entre as ligações químicas destes componentes durante a cura e, em segundo, como consequência dos ciclos de molhagem e secagem que tornam os espécimes cada vez mais vulneráveis às escovações. Logo, tanto a deficiência como o excesso de umidade de moldagem provocam aumento nas perdas de massa dos corpos de prova para qualquer teor de cimento ensaiado.

O comportamento das Figs. 4.8, 4.9 e 4.10, onde a umidade de moldagem sofreu um acréscimo progressivo de 2,0 %, serviu para definir o teor ótimo de umidade para a mistura solo-cimento plástico. Deste modo, ficou mais fácil verificar que a umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento plástico é 12,0 %, pois, observando-se a Fig. 4.8 nota-se claramente que os corpos de prova moldados com esta porcentagem de umidade apresentaram as menores perdas de massa por ciclo para todos os teores de cimento ensaiados. Falando-se ainda sobre a influência da umidade de moldagem, observa-se nesta sequência de figuras que o aumento desta não provoca grandes alterações nas perdas de massa para os corpos de prova moldados a partir de 10,0 % de cimento, todavia com teores menores as perdas de massa crescem assustado

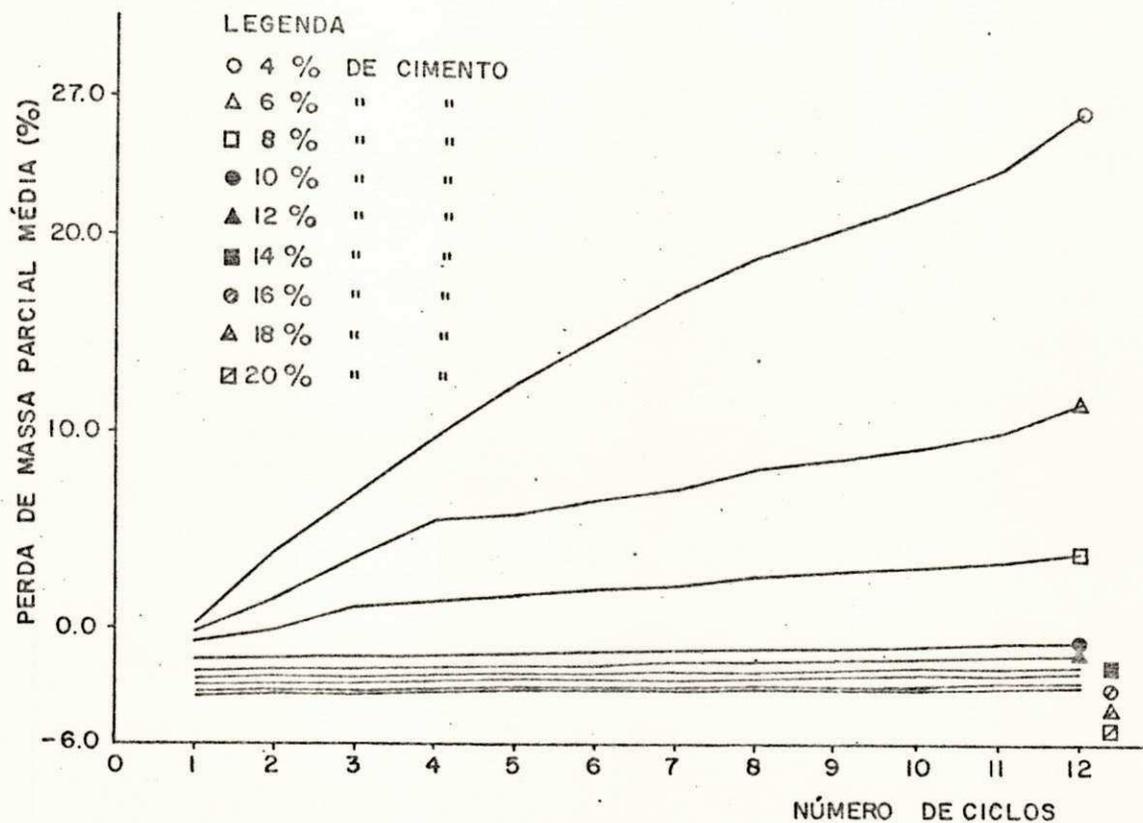


Fig. 4.8 - Relação entre a perda de massa parcial média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o número de ciclos, em função de vários teóres de cimento e umidade média de moldagem variando de 12,0 % a 13,0 %

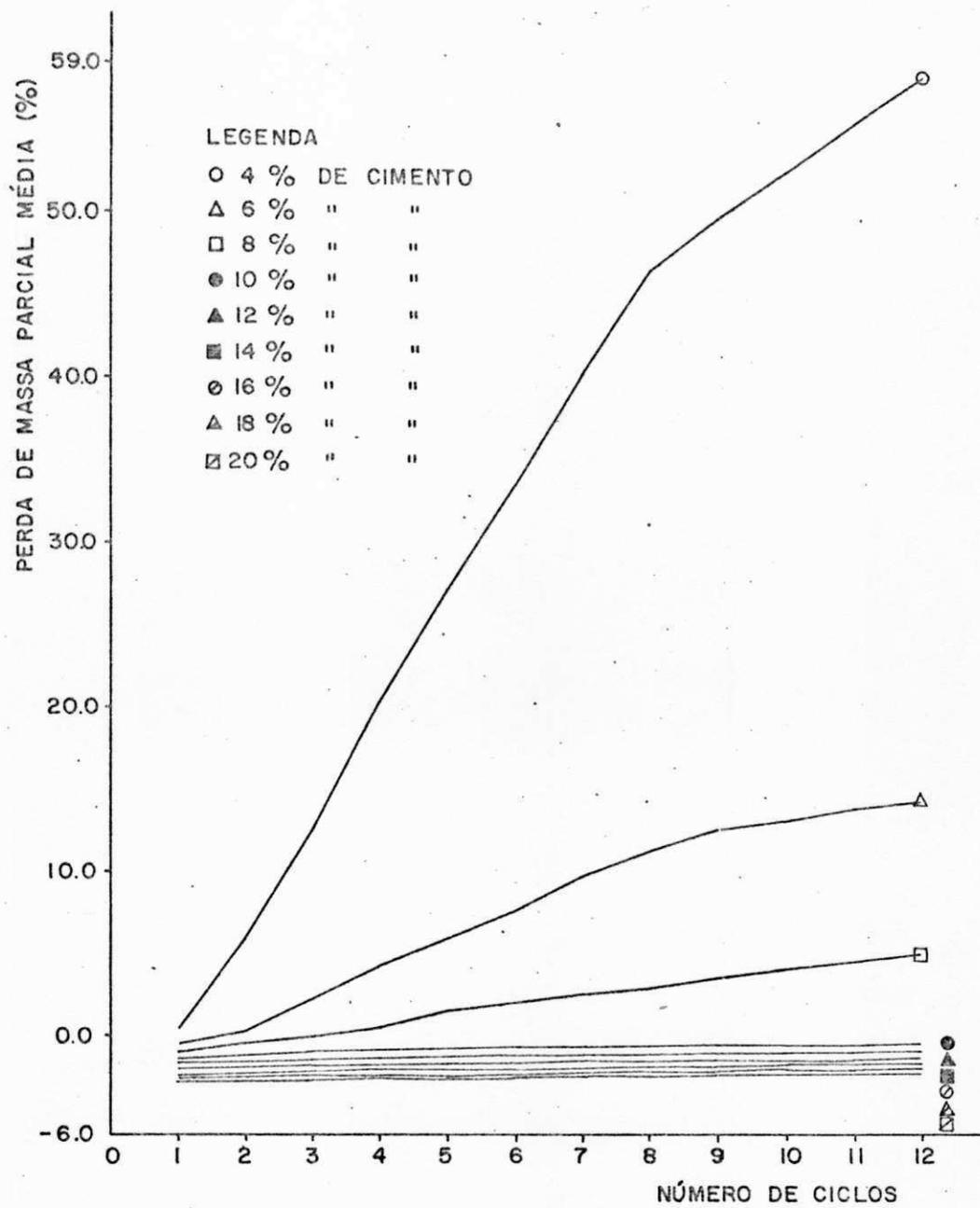


Fig. 4.9 - Relação entre a perda de massa parcial média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o número de ciclos, em função de vários teores de cimento e umidade média de moldagem variando de 14,0 % a 15,0 %

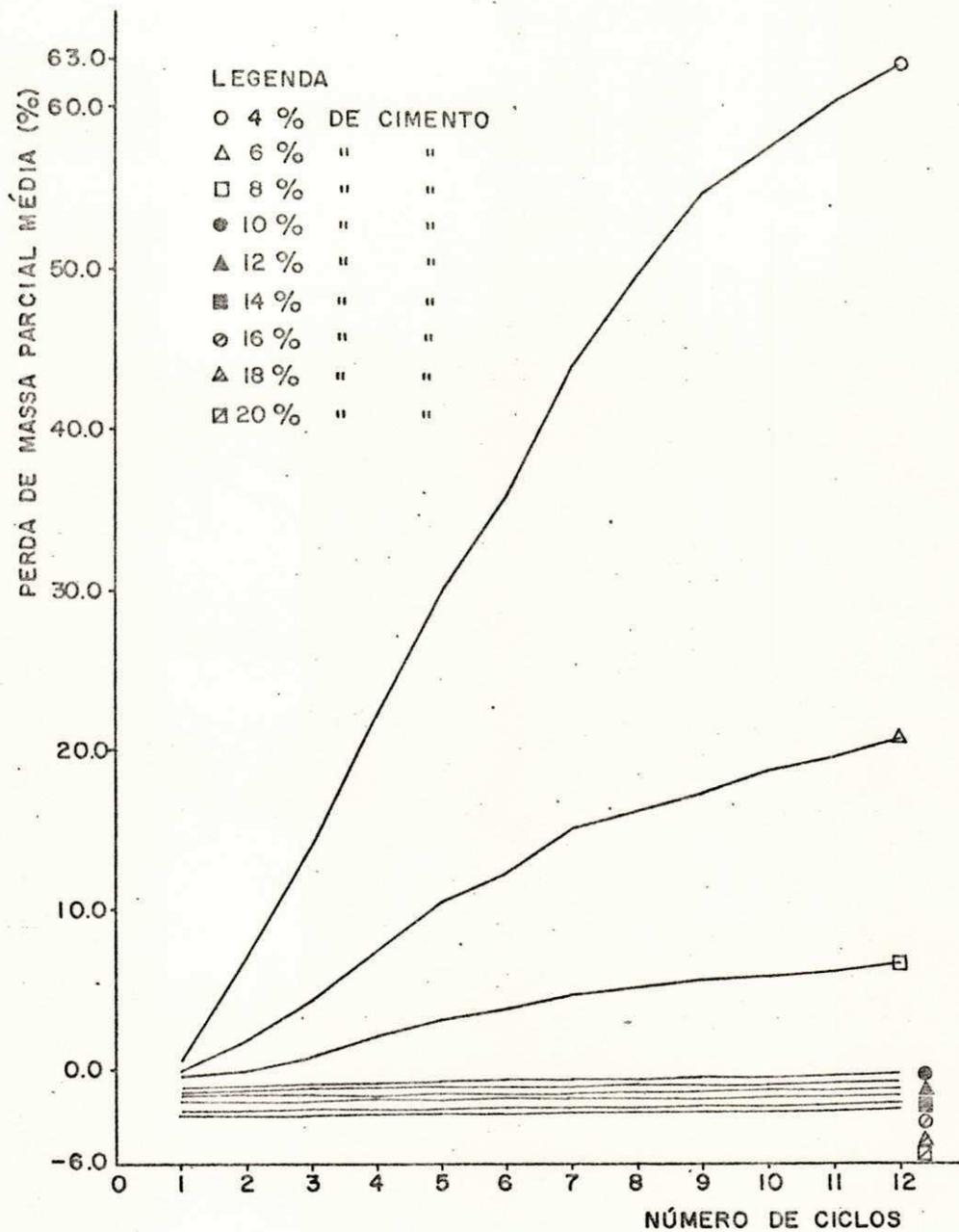


Fig. 4.10 - Relação entre a perda de massa parcial média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o número de ciclos, em função de vários teores de cimento e umidade média de moldagem variando de 16,0 % a 17,0 %

ramente. A propósito deste assunto, convém salientar que a deficiência de umidade na mistura solo-cimento compactado provocou uma completa alteração no comportamento de todas as curvas, demonstrando uma influência marcante no bloqueio da ação de qualquer teor de cimento. Por sua vez, o excesso de umidade na mistura solo-cimento plástico só apresentou alteração significativa no comportamento dos três primeiros teores de cimento, mostrando que sua influência é decisiva quando a quantidade de cimento não é suficiente para estabilizar o solo.

Quanto à ação e eficiência dos teores de cimento, deve-se frisar, que nada de novo foi observado no comportamento da mistura solo-cimento plástico em relação ao que já se comentou quando da discussão sobre a mistura solo-cimento compactado. Entretanto, deve ficar claro que todos os efeitos provocados pela ação dos teores de cimento foram comuns aos dois tipos de misturas.

Ficou patente, que para qualquer umidade de moldagem, à medida que se aumenta o teor de cimento ocorre uma redução nas perdas de massa dos corpos de prova para cada ciclo.

Mais uma vez ficou provado que os três primeiros teores de cimento, ou sejam, 4,0 %, 6,0 % e 8,0 %, por apresentarem as maiores perdas de massa por ciclo não foram suficientes para estabilizar convenientemente o solo ensaiado. Para os demais teores o comportamento foi considerado bom apesar da influência negativa por parte do sucessivo aumento da umidade de moldagem.

Comprovou-se também que a perda de massa do corpo de prova para qualquer teor de cimento, tende sempre a crescer

na ordem direta à execução das escovações. Acontece, porém, que para os espécimes moldados a partir de 10,0 % de cimento este acréscimo continuou sendo bastante reduzido atestando que nem mesmo o excesso de umidade pôde modificar tal comportamento. Assim sendo, fica confirmado que só a partir de 10,0 % de cimento a mistura foi tecnicamente estabilizada, ou seja, atingiu um grau de estabilização independente do teor de umidade capaz de suportar as duras provas deste ensaio. Diante disso, ficou fácil entender que a composição da mistura solo-cimento plástico deve também apresentar qualquer teor a partir de 10,0 % de cimento pois, de acordo com os objetivos e limitações deste ensaio, foi com esta porcentagem que os espécimes apresentaram uniformidade nos resultados de durabilidade por molhagem e secagem.

É evidente que, até aqui, foi realizada apenas a análise do comportamento de ambas as misturas no que diz respeito às perdas de massa parciais dos corpos de prova obtidas após cada escovação. Falta, portanto, a análise final destas perdas que, como se sabe, só podem ser calculadas após a realização do 12º ciclo uma vez que dependem da massa seca corrigida de cada corpo de prova.

Apresenta-se, a seguir, a Fig. 4.11 representando a perda de massa final média versus o teor de cimento em função dos vários teores de umidade de moldagem ensaiados, elaborada através dos resultados existentes na Tab. 7 do Apêndice H. Esta figura mostra o comportamento final das misturas ensaiadas ao serem submetidas ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

O que de melhor apresenta esta figura é a confirma

ção da influência da umidade de moldagem na estanilização de um solo arenoso com cimento. De fato, à medida que se aumenta a umidade de moldagem vai ocorrendo uma redução nas perdas de massa finais dos corpos de prova moldados com qualquer teor de cimento até que seja atingido um ponto ótimo, isto é, uma umidade de moldagem que seja considerada ideal porque corresponde aos menores desgastes assegurando, assim, uma maior durabilidade a mistura. A partir deste ponto ótimo, para cada incremento de umidade ocorre um aumento nas perdas de massa finais. Logo, tendo-se como base este ponto ótimo, observa-se que tanto a deficiência como o excesso de umidade de moldagem provocam aumento nas perdas de massa finais dos corpos de prova, se se considerar como um todo a estabilização de um solo arenoso com cimento.

Para o caso em foco, a umidade ótima de moldagem foi 12,0 %. Fica, portanto, estabelecido, que os melhores resultados de durabilidade por molhagem e secagem só poderão ser conseguidos com a mistura solo-cimento plástico, já que, com todos os teores de cimento e 12,0 % de umidade foram obtidas as menores perdas de massa parciais e finais. Então, pode-se afirmar com segurança que o solo-cimento compactado por apresentar maiores perdas de massa deve ser desprezado, principalmente, para uso em revestimento de canais onde o objetivo básico é utilizar a mistura que apresente maior durabilidade.

Reportando-se ao que foi dito anteriormente na parte referente a umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento compactado, observa-se que a demonstração simultânea dos gráficos da Fig. 4.11 deixa uma dúvida quanto a escolha

de 10,0 % para umidade ótima deste tipo de mistura, uma vez que a posição desta curva em relação às demais deixa uma margem de insegurança podendo ser incorretamente considerada como solo-cimento plástico ou como um ponto de transição entre estes dois tipos de misturas ensaiados. Nota-se ainda, que essa aproximação foi definida a partir de 10,0 % de cimento, primeiro teor considerado como suficiente para estabilizar satisfatoriamente o solo ensaiado. Esta dúvida será esclarecida com a análise detalhada dos motivos pelos quais se escolheu este teor de umidade.

Segundo os estudiosos do assunto, a diferença básica existente entre as misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico está no teor de umidade empregado na preparação de cada uma dessas misturas.

Para WINTERKORN (1975) o solo-cimento compactado é uma mistura que contém cimento suficiente para produzir um material de construção duro e durável e, somente, umidade bastante para satisfazer as necessidades de hidratação do cimento e solo, e para prover uma lubrificação adequada na compactação para uma elevada massa específica.

Concorda-se parcialmente com esta definição, e aproveita-se o ensejo causado pelo exemplo desta pesquisa para esclarecer melhor sobre o papel da massa específica aparente seca máxima como fator limitante entre as misturas solo-cimento compactado e plástico.

Olhando-se as Tabelas 2, 4 e 6 do Apêndice G, ou os dados médios encontrados na Tab. 4.6 deste capítulo, descobre-se que a massa específica aparente seca para a mistura solo-cimento compactado vai crescendo com a umidade de molda

gem e chega a um ponto máximo quando esta umidade atinge 10,0 %. A partir de 12,0 % de umidade de moldagem o valor quantitativo da massa específica aparente seca cai para todos os teores de cimento e a mistura já é considerada como solo-cimento plástico, e apresenta como principal característica uma consistência plástica similar àquela da argamassa.

De fato, vê-se na Tab. 4.6 que para 8,0 % de umidade de moldagem a mistura já apresenta uma elevada massa específica, porém observou-se através da Fig. 4.5 que esta umidade não foi suficiente para atender completamente as necessidades de hidratação do cimento e solo, uma vez que a mistura não atingiu o mesmo critério de estabilidade e durabilidade demonstrado pelo uso dos outros dois teores de umidade e apresentou perdas de massa parciais excessivas. O mesmo ocorreu com as perdas de massa finais mostradas na Fig. 4.11. Continuando-se o raciocínio, nota-se na citada tabela que com 9,0 % de umidade a massa específica aparente seca cresceu bastante para todos os teores de cimento ensaiados, em relação a umidade anterior. Quanto às perdas de massa parciais mostradas na Fig. 4.6, pode-se dizer que a mistura encontrou o critério de estabilidade e durabilidade desejado porque apresentou um comportamento satisfatório nas curvas que representam os corpos de prova moldados a partir de 10,0 % de cimento. Isto quer dizer que 10,0 % de cimento é o teor mínimo capaz de alcançar um critério especificado de estabilização e durabilidade para a mistura ensaiada, conforme ficou provado pela própria trajetória de sua curva cuja ascendência denota apenas um pequeno aumento nas perdas de massa dos corpos de prova para cada ciclo, mostrando que a coesão en

tre as partículas solo-cimento, embora ainda não possa ser considerada ideal já apresenta um padrão satisfatório mostrando uma resistência bem definida às mudanças climáticas e as forças mecânicas. Por sua vez, a curva de 9,0 % de umidade da Fig. 4.11 demonstra também uma grande redução nas perdas de massa finais em relação à curva de 8,0 % além de uma menor diferença, isto é, uma menor queda entre os intervalos a partir de 10,0 % de cimento. Tal comportamento comprova o que foi dito sobre as perdas de massa parciais. Voltando-se à Tab. 4.6, observa-se que para 10,0 % de umidade de moldagem foram registradas as massas específicas aparentes secas máximas para a mistura solo-cimento compactado, já que a partir de 12,0 % de umidade o valor quantitativo da massa específica aparente seca cai para todos os teores de cimento e a mistura passa a ser considerada como solo-cimento plástico. Como se pode ver na Fig. 4.7, os corpos de prova moldados com 10,0 % de umidade e, conseqüentemente, com massas específicas aparentes secas máximas, apresentaram as menores perdas de massa parciais para todos os teores de cimento ensaiados. Conforme se esperava, o mesmo ocorreu com as perdas de massa finais encontradas na Fig. 4.11. Chega-se, assim, ao ponto culminante desta discussão que visa esclarecer o papel da massa específica aparente seca máxima na mistura solo-cimento compactado. Mediante o exposto, pode-se afirmar com segurança que pela massa específica aparente seca determina-se a umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento compactado, necessitando-se apenas moldar uma pequena série de corpos de prova com aumento progressivo de 1,0 % na umidade de moldagem, até que o valor quantitativo da massa

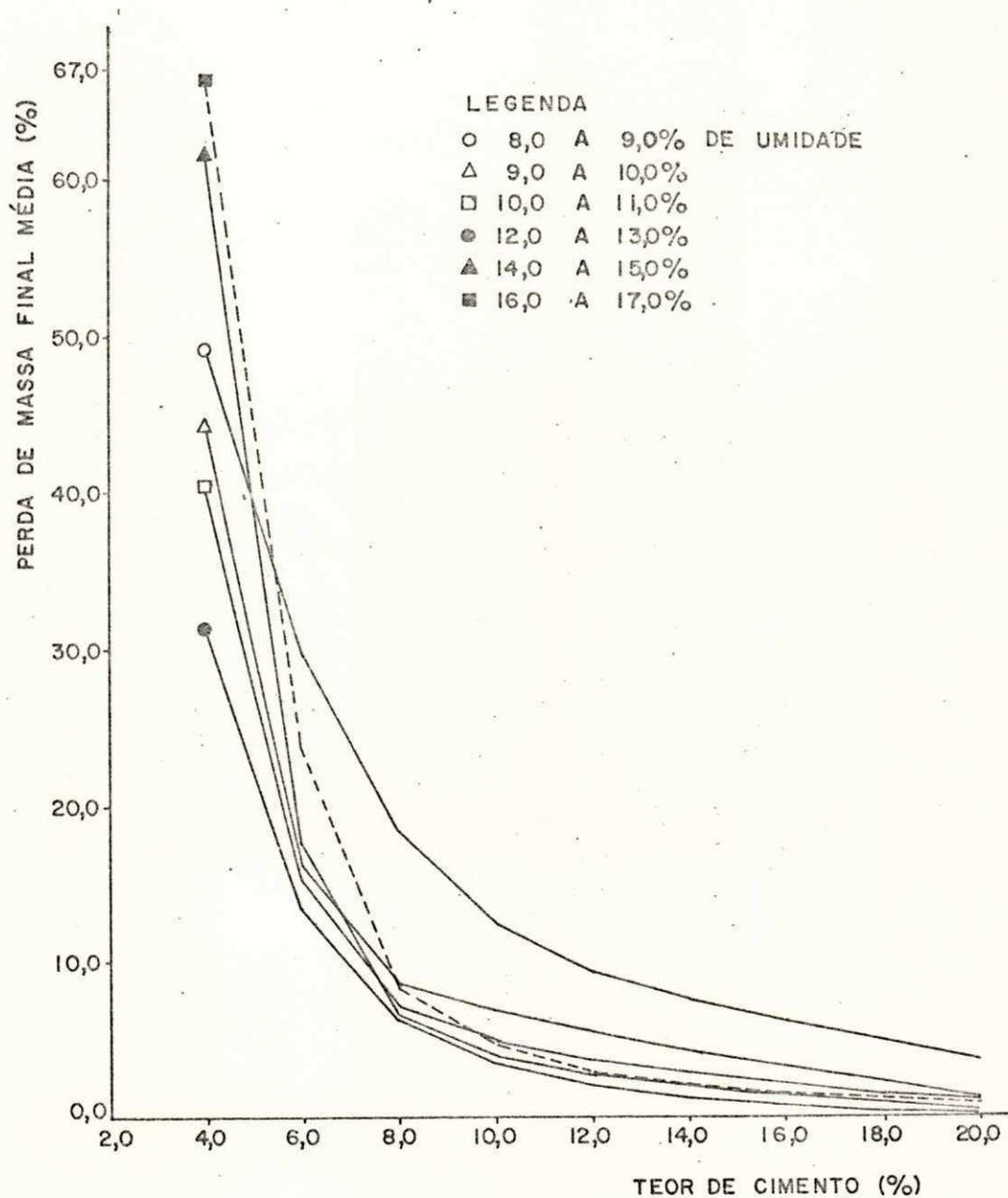


Fig. 4.11 - Relação entre a perda de massa final média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o teor de cimento, em função de vários teores de umidade de moldagem ensaiados

específica aparente seca seja reduzido, demonstrando que a mistura passou ao estado plástico. Então, a umidade ótima para o solo-cimento compactado é aquela que corresponde a massa específica aparente seca máxima, porque, segundo os resultados apresentados no exemplo em foco, entre os espécimes compactados apenas os de massas específicas aparentes secas máximas mostraram as menores perdas de massa parciais e finais para qualquer teor de cimento ensaiado. Em resumo, escolheu-se 10,0 % como umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento compactado porque os corpos de prova além de terem apresentado os melhores resultados de durabilidade por molhagem e secagem, demonstraram através das massas específicas aparentes secas máximas que ainda pertencem ao campo deste tipo de mistura.

A exemplo do que ocorre com a mistura solo-cimento compactado, a massa específica aparente seca também define a umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento plástico. Aproveitando-se os mesmos dados da Tab. 4.6, observa-se que houve uma redução em cada valor quantitativo da massa específica aparente seca quando se usou 12,0 % como umidade de moldagem para os vários teores de cimento ensaiados. Embora tenha havido esta redução na massa específica aparente seca, pode-se ver na Fig. 4.8 que foram obtidas as menores perdas de massa parciais para todos os teores de cimento ensaiados. Com o aumento progressivo da umidade de moldagem os valores quantitativos das respectivas massas específicas aparentes secas continuaram caindo, ao passo que as perdas de massa parciais mostradas nas Figs. 4.9 e 4.10 passaram a crescer numa demonstração evidente do efeito negativo provo

cado pelo citado incremento. Logicamente, o mesmo aconteceu com as perdas de massa finais mostradas na Fig. 4.11. Em face do exposto, ficou claro que pela massa específica aparente seca também se determina a umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento plástico. Precisa-se apenas, moldar uma pequena série de corpos de prova com aumento progressivo de 1,0 % na umidade de moldagem, até que o valor quantitativo da massa específica aparente seca sofra uma redução indicando que a mistura passou ao estado plástico. Portanto, baseado nos dados deste exemplo, conclui-se que o teor de umidade responsável pela primeira redução na massa específica aparente seca é a própria umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento plástico, porque os espécimes moldados nestas condições apresentaram as menores perdas de massa parciais e finais para qualquer teor de cimento ensaiado, superando inclusive os resultados da mistura solo-cimento compactado. Destarte, pode-se afirmar que em se tratando de estabilização de um solo arenoso com cimento, os melhores resultados de durabilidade por molhagem e secagem só poderão ser conseguidos se for utilizada a umidade ótima de moldagem padrão que, por sinal, pertence ao campo da mistura solo-cimento plástico. Para o caso estudado essa umidade é 12,0 %. Esta declaração é verdadeira, pois, embora não tenha sido ensaiado nesta pesquisa, sabe-se que o outro tipo conhecido de estabilização de um solo com cimento, ou seja, o solo-cimento modificado não seria capaz de suportar as duras provas deste ensaio, já que sua característica principal é conter uma quantidade de cimento apenas suficiente para alterar as propriedades químicas e físicas de um solo virgem, dando co

mo resultado um solo melhorado ao invés de um novo material de construção com propriedades padronizadas, tal como acontece com o solo-cimento compactado e com o solo-cimento plástico.

Em outras palavras, pode-se dizer, que para o solo-cimento compactado a massa específica aparente seca é ascendente e seu mais alto valor corresponde a sua umidade ótima de moldagem, enquanto que, para o solo-cimento plástico a massa específica aparente seca é descendente e sua umidade ótima de moldagem corresponde a mais alta massa específica aparente seca, ou seja, ao primeiro ponto de redução no campo deste novo tipo de mistura.

Em linhas gerais, sabe-se que o assunto ficará sujeito a controvérsias, contudo, esta foi a conclusão prática a que se chegou, pelo menos para o estudo em tela.

Dando prosseguimento a análise do comportamento do solo ensaiado, elaborou-se a Fig. 4.12, última da série deste ensaio, com o objetivo único de observar melhor a influência dos teores de cimento na estabilização e durabilidade das misturas ensaiadas. Na verdade, essa figura é apenas uma modificação estrutural de sua antecessora, onde se posicionou de tal maneira os dados que se obteve uma nova versão para as perdas de massa finais dos corpos de prova.

Em primeiro lugar, pode-se observar a influência que os teores de cimento apresentam na durabilidade dos espécimes, confirmando o que já se discutiu sobre as perdas de massa parciais.

A intercepção entre as curvas de 8,0 % e 10,0 % de cimento foi causada exclusivamente pelas respectivas umidades

de moldagem e não se constitui em obstáculos à interpretação do comportamento das misturas. Para melhor esclarecimento, aconselha-se a consulta da Tab. 1 do Apêndice G e da Tab. 7 do Apêndice H. Portanto, continua-se com o mesmo raciocínio, ou seja, à medida que se aumenta o teor de cimento ocorre uma redução na perda de massa do corpo de prova independentemente da unidade de moldagem ensaiada.

Quanto aos três primeiros teores de cimento, pode-se dizer que o comportamento de suas respectivas curvas apresentam as mesmas características de durabilidade apresentadas e já discutidas para as perdas de massa parciais. Entretanto, observa-se uma certa aproximação da curva de 8,0 % para a de 10,0 %, assim como, um pequeno afastamento da curva de 10,0 % em relação à de 12,0 % de cimento. Este fato se deve ao fenômeno da perda de massa por parte dos corpos de prova quando mantidos em estufa até constância de massa. Todavia, comparando-se os dados da Tab. 7 do Apêndice H, vê-se que a partir de 10,0 % de cimento as perdas de massa finais dos corpos de prova mostram uma redução mais aproximada atestando que para estabilizar o solo em foco, visando a obtenção de resultados satisfatórios de durabilidade, deve-se usar um teor igual ou superior a este.

A ocorrência de maior destaque na Fig. 4.12 é a própria trajetória de suas curvas, cuja demonstração traduz, no lado esquerdo a mistura solo-cimento compactado, e no lado direito a mistura solo-cimento plástico, com o vértice de cada curva correspondendo simultaneamente as menores perdas de massa finais para cada teor de cimento ensaiado e a umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento plástico que,

por sinal, foi considerada como umidade de moldagem padrão porque corresponde aos melhores resultados de durabilidade para a estabilização global de um solo arenoso com cimento. É inegável a função da umidade de moldagem no comportamento destas misturas. Tanto isto é verdade, que levando-se em consideração as observações feitas com respeito às figuras anteriores, e em especial sobre a figura em destaque conclui-se que, em se tratando de um solo arenoso com cimento deve-se desprezar a mistura solo-cimento compactado e utilizar a mistura solo-cimento plástico em sua umidade ótima, já que, em assim procedendo obtêm-se os melhores resultados de durabilidade por molhagem e secagem para qualquer teor de cimento ensaiado.

Conforme ocorreu com as perdas de massa parciais, a Fig. 4.12 demonstra também a tendência que o aumento progressivo dos teores de cimento apresenta no sentido de eliminar as perdas de massa finais dos corpos de prova. Vê-se, nesta altura, que se o teor de cimento continuasse sendo aumentado, talvez, antes mesmo de atingir 30,0 % todas as perdas de massa finais caíssem para zero (0,0 %). Na verdade, a eliminação das perdas de massa parciais ou finais dos corpos de prova só pode ser evidenciada teoricamente através de gráficos devido a fenômenos técnicos ocorridos durante a determinação destas perdas, pois, no campo prático sempre haverá pequenas perdas, principalmente, nos espécimes moldados com deficiência ou excesso de umidade.

Levando-se em conta as considerações feitas até aqui pode-se dizer que, em princípio, a composição ótima de cada mistura estudada sob o ponto de vista da Engenharia Civil só

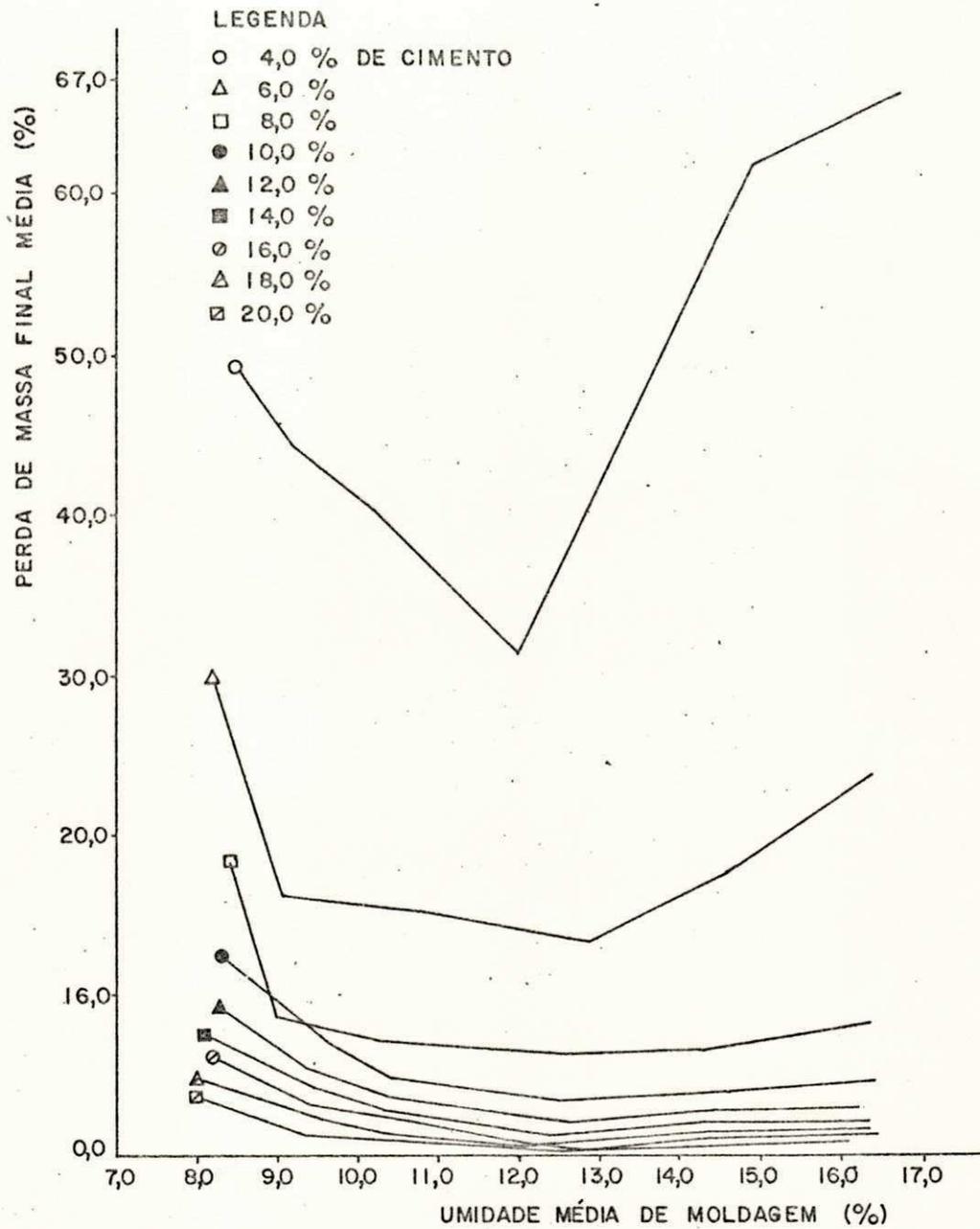


Fig. 4.12 - Relação entre a perda de massa final média de corpos de prova, após 07 dias de cura, e a umidade média de moldagem, para vários teores de cimento ensaiados

poderã ser determinada se os teores de umidade e cimento forem empregados na dosagem certa, isto é, quando for utilizada uma umidade ótima de moldagem para um teor de cimento também ótimo obtendo-se, por conseguinte, os melhores resultados de durabilidade por molhagem e secagem entre as respectivas séries de combinações ensaiadas.

Nesta ordem de idéias, surge então a pergunta decisiva com respeito a conclusão deste ensaio, ou seja: qual a composição ótima para cada tipo de mistura ensaiado?

Importa fazer aqui um esclarecimento, aliás repetir mutatis mutandis, o que se afirmou anteriormente para ambos os tipos de mistura. Dentro das limitações deste ensaio, conclui-se que a composição ótima para a mistura solo-cimento compactado deve conter como teores ótimos 10,0 % de umidade para teores a partir de 10,0 % de cimento, e para a mistura solo-cimento plástico 12,0 % de umidade para teores a partir de 10,0 % de cimento, tendo-se em vista que os corpos de prova moldados com estas combinações apresentaram perdas de massa parciais e finais uniformes para as respectivas misturas, atestando a estabilização técnica do referido solo. Porém, comparando-se os resultados destas misturas, chega-se a conclusão de que o solo-cimento plástico por apresentar melhores resultados deve ser o preferido para uso em revestimento de canais. Ainda mais, o seu emprego requer menos mão-de-obra especializada podendo ser aplicado em forma de reboco.

Por outro lado, quando esta determinação depender também de uma análise econômica, deduz-se que os teores de umidade serão logicamente mantidos para as respectivas misturas variando apenas o teor de cimento, pois, deverá ser escolhido

do aquele que preencha os requisitos básicos de estabilidade e durabilidade e seja ao mesmo tempo, o mais econômico. Desta rte, pode-se afirmar que para as misturas estudadas, a análise econômica pode indicar como teor ótimo de cimento qualquer porcentagem a partir de 10,0 %. Entretanto, convém salientar que nada se pode adiantar sobre a viabilidade econômica desses teores, já que este assunto foge dos objetivos visados por esta pesquisa.

Por último, convém frisar, que a partir de 10,0 % de cimento, para todos os teores de cimento, nenhum corpo de prova apresentou desgaste excessivo, o que atesta o êxito destas combinações tanto no campo da mistura solo-cimento compactado como no da mistura solo-cimento plástico, já que segundo Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977), para o solo A2 - 4 a perda de massa total máxima permissível nos 12 ciclos é de 14,0 %.

4.2.2.2. Ensaio a compressão de corpos de prova de solo-cimento - Método SC-4 (ABCP, 1977) - O resumo dos dados referentes a este ensaio se encontram na Tab. 1 do Apêndice I.

Durante a execução deste método surgiram apenas dois pequenos problemas que foram facilmente contornados. O primeiro deles, ocorreu com as bases dos corpos de prova que apesar dos cuidados especiais dispensados durante a moldagem e na extração destes dos seus respectivos moldes de compactação, sempre apresentavam pequenas irregularidades não permitindo um perfeito contato, principalmente, com o prato superior da máquina compressora. Esta situação foi plenamente contornada pelo capeamento com enxofre de ambas as bases

dos corpos de prova. O segundo problema, apareceu quando a umidade de moldagem atingiu os 12,0 %, já que a mistura solo-cimento plástica por ainda não apresentar consistência provocava deformações nos espécimes quando extraídos de seus respectivos cilindros. A solução foi manter cada corpo de prova em seu molde por 12:00 h, tempo suficiente para que o mesmo adquirisse firmeza e pudesse ser extraído com perfeição.

Afora desses problemas, pode-se citar ainda a fadiga provocada no operador durante a compressão pois, como se sabe, para se imprimir uma velocidade de rompimento de 1,5 kg/cm<sup>2</sup> por minuto o que, segundo alguns cálculos, equivale a uma força de aproximadamente 125,0 kg/min a ser mantida no mostrador da máquina, necessita-se de muito controle, precisão e experiência no rompimento de corpos de prova. Esta operação se torna bem mais cansativa quando o espécime a ser rompido é moldado com teor igual ou superior a 10,0 % de cimento. Dependendo do teor de umidade um corpo de prova moldado com 10,0 % de cimento, para chegar à ruptura, pode demorar entre 16 e 32 minutos, aproximadamente. Por sua vez, os espécimes moldados com 20,0 % de cimento e 8,0 % de umidade atingiram a elevada média de 76 minutos. Vê-se, nesta altura, que o rompimento dos 162 corpos de prova se constitui na etapa mais difícil e trabalhosa deste ensaio.

Com os dados da Tab. 1 do Apêndice I, elaborou-se a Fig. 4.13 que representa a resistência média a compressão simples versus o teor de cimento em função dos vários teores de umidade de moldagem para os espécimes ensaiados após 07 dias de cura.

A exemplo do que ocorreu para o ensaio de durabilidade, observa-se através da Fig. 4.13 que a ação conjunta do binômio umidade-cimento é que determina o comportamento de ambos os tipos estudados de mistura. À primeira vista, nota-se pelas curvas desta figura a influência marcante que a umidade de moldagem exerce no aumento da resistência a compressão simples para os corpos de prova moldados com o mesmo teor de cimento. Como se pode observar, os espécimes moldados com 8,0 % de umidade apresentaram as maiores resistências para todos os teores de cimento ensaiados. Por outro lado, à medida que se aumenta o teor de umidade ocorre uma redução geral nas resistências para os corpos de prova moldados com o mesmo teor de cimento. Portanto, conclui-se, que para um mesmo teor de cimento a umidade de moldagem é quem determina a resistência que o espécime poderá suportar quando submetido a uma compressão. Assim, não há dúvida em se afirmar que para as misturas ensaiadas a umidade de moldagem tem mais influência na resistência a compressão do que o próprio teor de cimento.

Nota-se ainda, que tanto para a mistura solo-cimento compactado como para a mistura solo-cimento plástico, a redução da umidade de moldagem provoca um aumento nas resistências apresentadas pelos corpos de prova moldados com qualquer teor de cimento ensaiado.

Em face do exposto, chega-se a conclusão de que o aumento da umidade de moldagem provoca um enfraquecimento entre as ligações químicas das partículas solo-cimento durante a cura diminuindo, conseqüentemente, a resistência de cada mistura. Logo, a máxima resistência está diretamente relacio

nada com a mínima umidade que, por sua vez, corresponde ao ponto inicial de cada um dos tipos estudados de mistura.

O'FLAHERTY (1974) assinala que a umidade ótima para massa específica aparente seca máxima não é, necessariamente, a mesma para se obter a máxima resistência. Para solos arenosos a umidade ótima para a resistência máxima, geralmente, tende estar do lado seco do valor ótimo para a massa específica aparente seca máxima, e do lado úmido para solos argilosos.

Tendo-se como base o exemplo desta pesquisa, pode-se dizer, que a afirmação de O'Flaherty para solos arenosos é verdadeira, embora esteja restrita a mistura solo-cimento compactado. De fato, analisando-se os dados da Tab. 4.6, além dos resultados contidos na Tab. 1 do Apêndice I e apresentados em forma de gráficos através da Fig. 4.13, conclui-se, que para 10,0 % de umidade foram registradas as massas específicas aparentes secas máximas para a mistura solo-cimento compactado, porém, foi com 8,0 % de umidade e massas específicas aparentes secas bem menores que ocorreram as maiores resistências a compressão para todos os corpos de prova ensaiados. Assim sendo, fica comprovado por meio deste exemplo que a umidade ótima para a máxima resistência, quando a mistura solo-cimento compactado envolver um solo arenoso, tende sempre a estar no ramo seco do valor ótimo para massa específica aparente seca máxima.

Levando-se em consideração que a partir de 7,0 % de umidade ocorre uma queda nas resistências para todos os testes de cimento ensaiados, pode-se concluir, que para a mistura solo-cimento compactado a umidade ótima de moldagem é

8,0 %, porque de acordo com os objetivos e limitações deste ensaio esta foi a porcentagem que apresentou as maiores resistências para os corpos de prova submetidos a compressão simples.

A propósito deste assunto, convém salientar que, em se tratando da mistura solo-cimento compactado para solo arenoso, em alguns casos, dependendo das exigências e objetivos do projeto, a umidade ótima para a máxima resistência pode ser desprezada em benefício da umidade ótima para massa específica aparente seca máxima, que apesar de apresentar uma resistência um pouco menor, tem a capacidade de conciliar de modo global todos os resultados considerados satisfatórios para o bom desempenho do material ensaiado. Evidentemente, esta decisão só poderá ser tomada quando o sucesso do material de construção depender de mais de um parâmetro, como por exemplo: durabilidade, resistência e economia. Esta pesquisa, cujo objetivo principal é fazer um estudo preliminar comparativo entre misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico para revestimento de canais, envolvendo apenas o solo arenoso do grupo A2-4, é um exemplo claro da afirmação anterior. De fato, tudo o que foi dito pode ser comprovado através de uma análise mais apurada dos resultados destes dois últimos ensaios. Reportando-se a subdivisão 4.2.2.1., ou seja, ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, vê-se que para 10,0 % de umidade de moldagem foram registradas as menores perdas de massa parciais e finais para os corpos de prova moldados com qualquer teor de cimento. Logo, esta foi a porcentagem considerada como umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento compactado. Por sua vez, os re

sultados do ensaio a compressão de corpos de prova de solo-cimento apresentados nas tabelas anteriormente citadas, demonstram que se os 10,0 % não correspondeu a umidade ótima de moldagem para se obter as máximas resistências, pelo menos, apresentou resultados suficientes para manter o critério de estabilidade desejado para a mistura solo-cimento compactado. Assim sendo, conclui-se, que a composição da mistura solo-cimento compactado envolvendo um solo arenoso para emprego em revestimento de canais, deve conter 10,0% como umidade ótima de moldagem porque este teor é capaz de conciliar resultados satisfatórios de durabilidade e resistência. Realmente, é de vital importância a função de cada um dos parâmetros supracitados, todavia no estudo de revestimento de canais o ideal é se obter a componente lógica dos mesmos. Portanto, não é racional empregar em revestimento de canais uma mistura qualquer cuja umidade de moldagem corresponde, simultaneamente, ao máximo desgaste e a máxima resistência. Muito mais simples, seguro e científico é evidenciar que, dentro da técnica, os parâmetros devem estar em perfeita harmonia para que a mistura seja aprovada como material de construção. Feita esta ressalva, e levando-se em consideração os resultados como um todo, pode-se dizer, que em se tratando do emprego de um solo arenoso como componente da mistura solo-cimento compactado para revestimento de canais, sua umidade ótima é a mesma para se obter massa específica aparente seca máxima.

Analisando-se agora, a mistura solo-cimento plástico como solo arenoso, observa-se através da Fig. 4.13 que o aumento da umidade de moldagem também provoca um efeito negativo na estabilização deste material, reduzindo a resistência

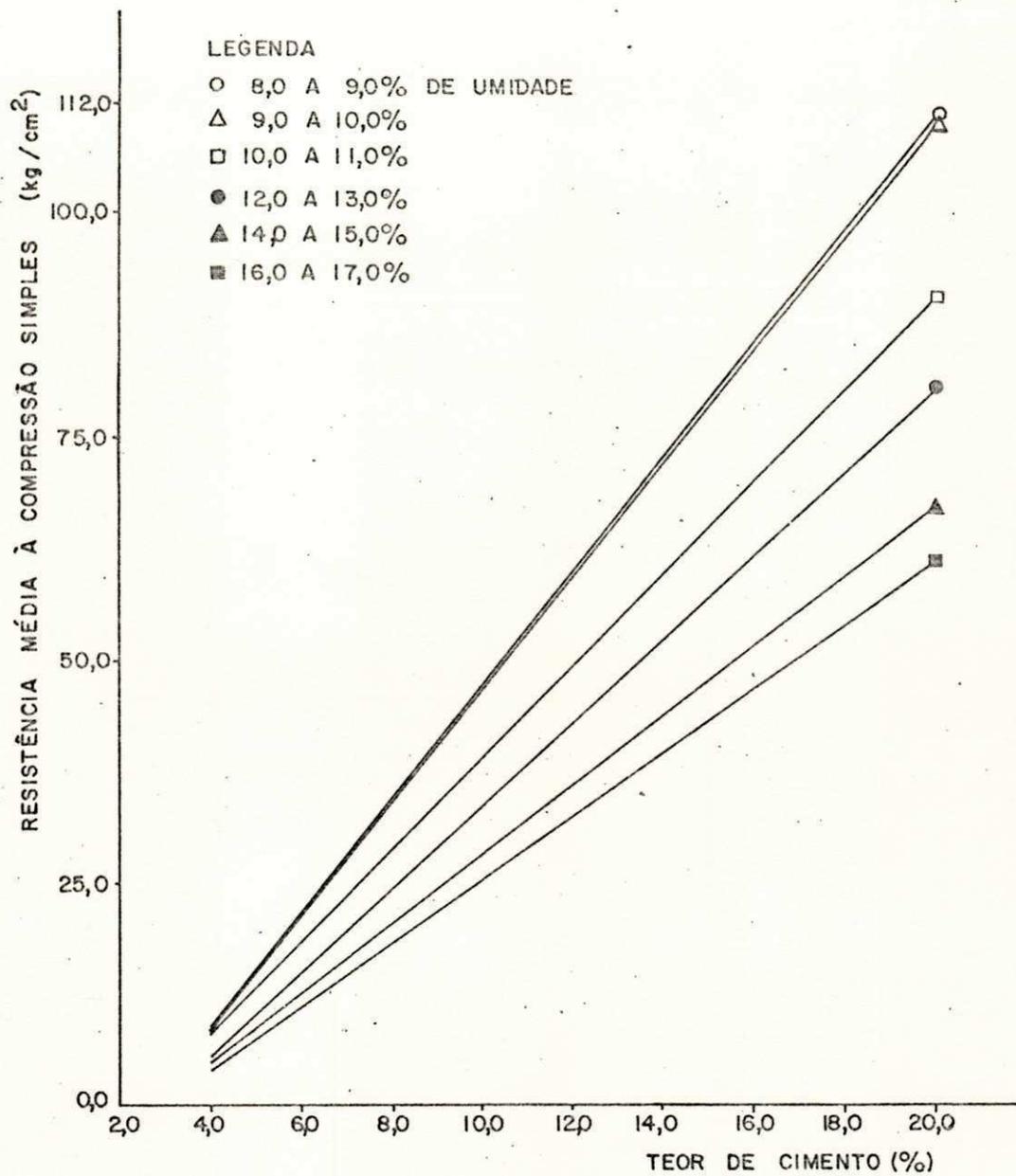


Fig. 4.13 - Relação entre a resistência média a compressão simples de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o teor de cimento, em função de vários teores de umidade média de moldagem ensaiados

de todos os corpos de prova ensaiados. Nota-se ainda, que 12,0 % é a umidade ótima de moldagem para este tipo de mistura porque apresentou os melhores resultados de compressão simples para qualquer combinação ensaiada. É claro, que estas resistências também atingem o critério de estabilidade desejado para que este tipo de mistura seja considerado como material de construção com emprego assegurado no revestimento de canais. Todavia, o fato mais curioso deste assunto diz respeito a constatação de que o comportamento geral deste tipo de mistura permanece inalterado em relação a umidade ótima de moldagem. Isto quer dizer que com a mesma umidade de moldagem, obtêm-se as menores perdas de massa e as maiores resistências para qualquer teor de cimento ensaiado. Tanto isto é verdade, que baseando-se nos resultados desta pesquisa, pode-se afirmar, que se a mistura solo-cimento plástico envolver um solo arenoso a umidade ótima de moldagem para massa específica aparente seca máxima é a mesma para se obter a máxima resistência e a máxima durabilidade. Na verdade, esta afirmação pode ser facilmente comprovada pelos resultados destes dois últimos ensaios. Assim, voltando-se ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, observa-se que foi com 12,0 % de umidade que se obteve as menores perdas de massa parciais e finais para os corpos de prova moldados com qualquer teor de cimento ensaiado. Aliás, é bom frisar, que este teor de umidade é o recordista desse ensaio, superando inclusive, os melhores resultados da mistura solo-cimento compactado. Por outro lado, com os dados da Tab. 4.6 e pelos resultados de compressão simples contidos na Tab. 1 do Apêndice I, vê-se, que para 12,0 % de umidade de moldagem regis

trou-se a massa específica aparente seca máxima, assim como, a máxima resistência para cada teor de cimento ensaiado. Logo, levando-se em consideração os resultados como um todo, pode-se dizer, que em se tratando do emprego de um solo arenoso como componente da mistura solo-cimento plástico para revestimento de canais, sua umidade ótima é a mesma para se obter massa específica aparente seca máxima.

Quanto a ação e eficiência dos teores de cimento, pode-se concluir através da Fig. 4.13 que para uma mesma umidade de moldagem, à medida que se aumenta a porcentagem deste componente, ocorre um incremento na resistência a compressão simples.

Encerrando este ensaio apresenta-se a Fig. 4.14 representando a resistência média a compressão simples versus a umidade média de moldagem em função dos teores de cimento ensaiados. Esta figura apesar de ter sido elaborada com os mesmos dados de sua antecessora, tem por objetivo mostrar a influência dos teores de cimento na resistência dos corpos de prova para ambos os tipos de mistura ensaiados. Esta demonstração traduz em relação a abscissa, no lado esquerdo a mistura solo-cimento compactado e no lado direito a mistura solo-cimento plástico, facilitando sobremaneira, a análise dos resultados. Como se vê, o principal destaque desta figura é o incremento quase constante na resistência provocado pelo aumento progressivo dos teores de cimento nos espécimes moldados com o mesmo teor de umidade. Observa-se ainda, que o crescimento da resistência para o mesmo teor de cimento, em ambos os tipos de mistura ocorre no mesmo sentido, isto é; da umidade de moldagem maior para a menor. Acontece, porém,

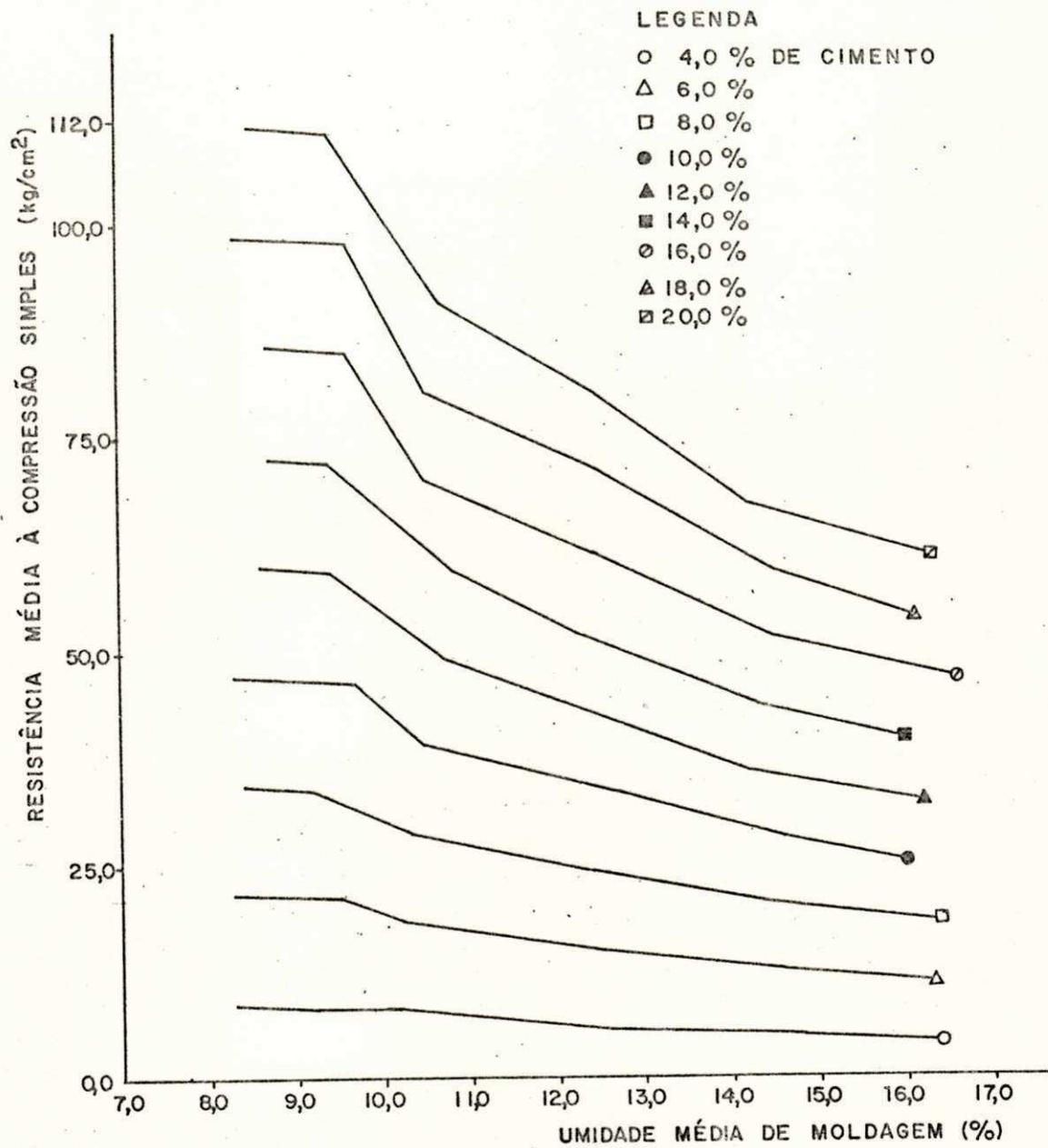


Fig. 4.14 - Relação entre a resistência média a compressão simples de corpos de prova, após 07 dias de cura, e a umidade média de moldagem, em função de vários teores de cimento ensaiados

que este crescimento vai se tornando cada vez mais reduzido quando a umidade de moldagem tende ao seu ponto mínimo na mistura solo-cimento compactado, ou ao seu ponto máximo na mistura solo-cimento plástico. Logo, comprova-se mais uma vez, que a resistência apresentada por cada teor de cimento sofre a influência direta das umidades de moldagem. Nota-se também, que tanto a composição da mistura solo-cimento compactado como a do solo-cimento plástico deve apresentar qualquer teor a partir de 10,0 % de cimento, já que de acordo com os objetivos e limitações deste ensaio, foi com esta porcentagem que os espécimes apresentaram resistências superiores a 20,2 kg/cm<sup>2</sup> para todos os teores de umidade de ambas as misturas em estudo, satisfazendo as exigências das Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977). No entanto, é bom frisar que a porcentagem deste elemento na composição de cada um dos citados tipos de mistura para emprego em revestimento de canais, só poderá ser determinada após uma análise econômica detalhada envolvendo, logicamente, os teores de cimento a partir de 10,0 % por terem apresentado resultados satisfatórios de resistência. Como os teores a partir de 10,0 % de cimento já atingem um critério de estabilidade e durabilidade suficiente para que cada mistura possa ser usada como material de revestimento de canais, deduz-se que os objetivos desta pesquisa foram plenamente alcançados.

4.2.2.3. Ensaio brasileiro de tensão indireta (EBTI) - Conforme vem ocorrendo com os demais ensaios, inicia-se também este, por sinal o último desta pesquisa, informando que o re

sumo dos seus resultados se encontra na Tab. 1 do Apêndice J.

Durante a realização deste ensaio o único problema surgiu com a mistura solo-cimento plástico, quando a partir de 12,0 % de umidade os espécimes apresentaram deformações ao serem extraídos de seus moldes logo após a moldagem. Para tal caso, a solução foi manter cada corpo de prova em seu molde por 12:00 h, tempo suficiente para que o mesmo adquirisse firmeza e pudesse ser extraído com perfeição.

Como se sabe, o EBTI foi especialmente adaptado pelos autores desta pesquisa para que se assemelhasse ao máximo com o Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento, da ABCP. De fato, a única diferença ficou por conta da característica básica do EBTI, que diz respeito a posição do espécime e as novas áreas a receberem compressão durante o rompimento.

Com os dados da Tab. 1 do Apêndice J elaborou-se a Fig. 4.15, que representa a resistência média a tensão indireta versus o teor de cimento em função dos vários teores de umidade de moldagem para os espécimes ensaiados após 07 dias de cura. À primeira vista, observa-se, que o comportamento das curvas desta figura é semelhante ao das curvas da Fig. 4.13 que representam as resistências a compressão simples. Esta ocorrência já era esperada porque os espécimes ensaiados em ambos os métodos foram submetidos as mesmas condições de moldagem e cura. Acontece, porém, que em se tratando de resultados, é claro, que o EBTI sempre apresentará pequenas resistências, o que é plenamente justificado pelo fato de que neste ensaio além da tensão ser no sentido indireto a

compactação, tanto a espessura como a área a serem submetidas a compressão apresentam dimensões bem mais reduzidas.

Quanto a influência e ação conjunta do binômio umidade-cimento, praticamente, nada se tem a acrescentar em relação ao que já foi analisado e discutido na subdivisão 4.2.2.2., isto é, no Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento. Apenas afirmar, que de acordo com os objetivos e limitações deste ensaio, observa-se pela Fig. 4.15 que a umidade ótima para a mistura solo-cimento compactado continuou sendo 8,0 %, ao passo que a mistura solo-cimento plástico também apresentou 12,0 % como umidade ótima de moldagem. Entretanto, convém salientar, que pelos mesmos motivos discutidos anteriormente a composição da mistura solo-cimento compactado envolvendo um solo arenoso para revestimento de canais, deve conter 10,0 % como umidade ótima de moldagem porque este teor é capaz de conciliar resultados satisfatórios de durabilidade e de resistência a compressão simples e a tensão indireta. Por outro lado, a composição da mistura solo-cimento plástico com solo arenoso para uso em revestimento de canais deve continuar apresentando 12,0 % como umidade ótima de moldagem, porque este teor demonstrou grande regularidade ao registrar os melhores resultados de durabilidade e de resistência a compressão simples e a tensão indireta.

Fianlizando este ensaio, apresenta-se a Fig. 4.16 representando a resistência média a tensão indireta versus a umidade média de moldagem em função dos teores de cimento ensaiados. Esta figura apesar de ter sido elaborada com os mesmos dados de sua antecessora, tem por finalidade demonstrar a influência dos teores de cimento na resistência dos corpos

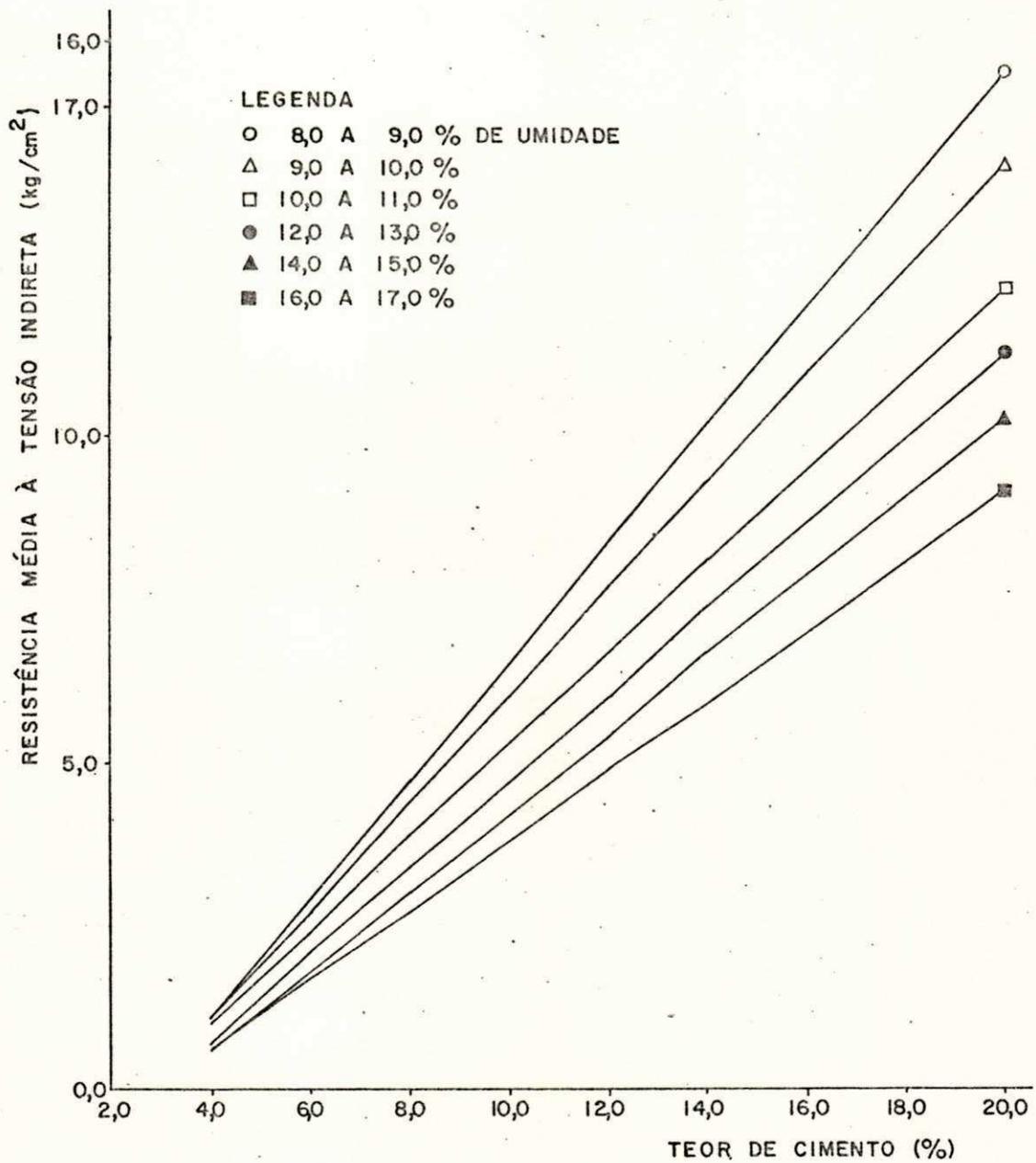


Fig. 4.15 - Relação entre a resistência média a tensão indireta de corpos de prova, após 07 dias de cura, e o teor de cimento, em função de vários teores de umidade média de moldagem ensaiados

de prova para ambos os tipos estudados de mistura. De maneira geral, pode-se dizer que o comportamento das curvas desta figura é semelhante as das curvas da Fig. 4.14. Existe apenas, uma pequena diferença no traçado das curvas com relação aos valores de resistência para os teores mínimos de umidade na mistura solo-cimento compactado, e para os teores máximos de umidade na mistura solo-cimento plástico. De fato, na Fig. 4.14 à medida que os teores de umidade tendiam a esses pontos extremos, as curvas de resistências passavam a apresentar uma inclinação cada vez menor. Esta ocorrência pode ser parcialmente justificada pela grande diferença de escala existente na ordenada da Fig. 4.16.

Quanto aos teores de cimento, nota-se que de acordo com os objetivos e limitações deste ensaio, tanto a mistura solo-cimento compactado como a mistura solo-cimento plástico deve apresentar também qualquer teor a partir de 10,0 % de cimento, ou seja, seguindo-se o mesmo raciocínio dos ensaios anteriores já que para este método não existe especificação sobre resistência mínima para os corpos de prova rompidos após 07 dias de cura.

4.2.2.4. Análise global dos ensaios tecnológicos - Os ensaios tecnológicos, segunda e última etapa prática realizada em laboratório, apresentaram os resultados de maior relevância desta pesquisa.

De fato, tudo o que foi planejado teve como objetivo principal a análise técnica do comportamento do solo em foco quando ensaiado como elemento constituinte em misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico.

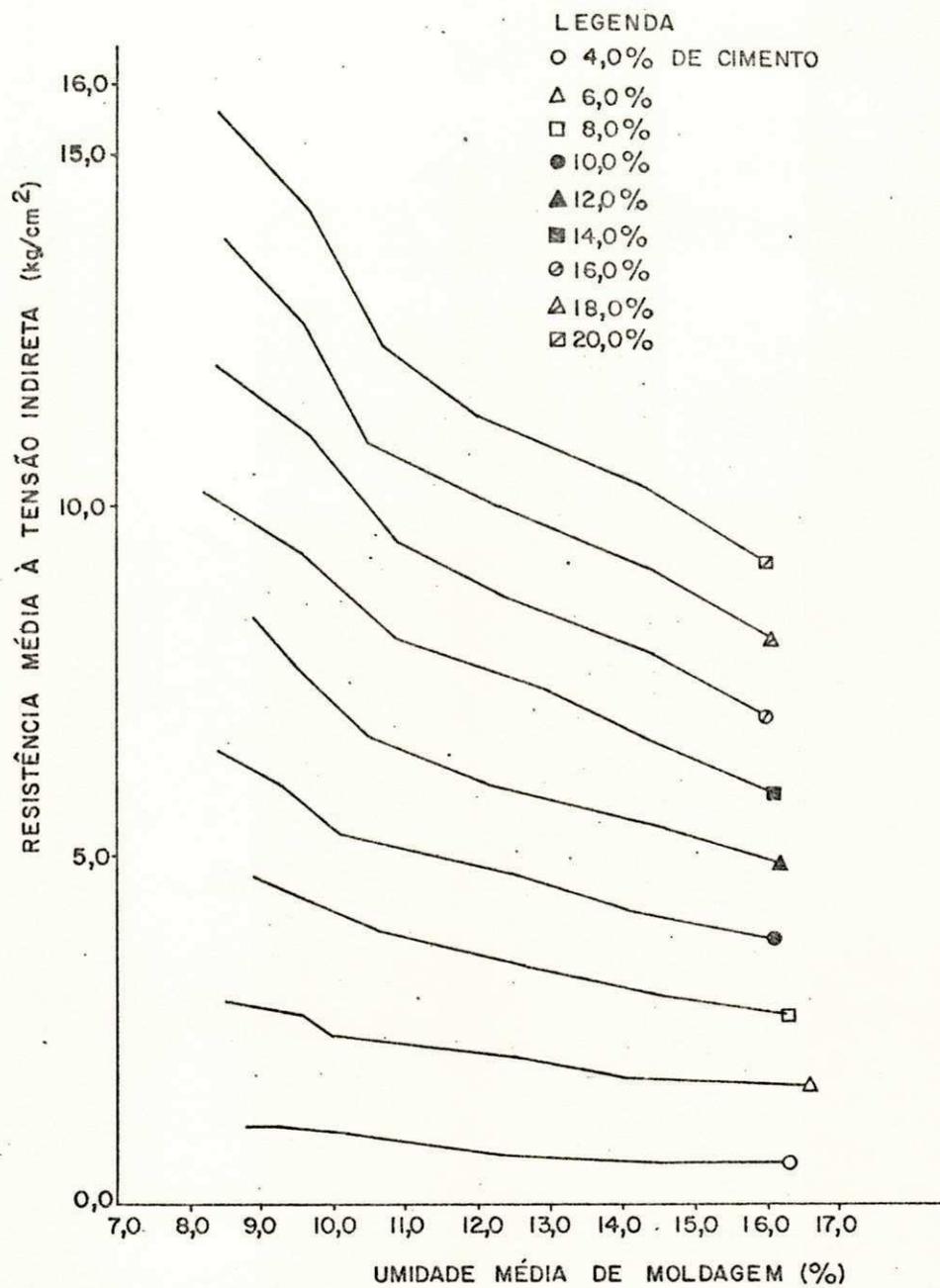


Fig. 4.16 - Relação entre a resistência média a tensão indireta de corpos de prova, após 07 dias de cura, e a umidade média de moldagem, em função de vários teores de cimento ensaiados

Acontece, porém, que para esta pesquisa interessa somente os resultados de durabilidade e resistências, já que realizou-se apenas um estudo preliminar comparativo entre as misturas ensaiadas, visando-se determinar a eficácia que cada tipo poderá apresentar quando empregado em revestimento de canais, de drenos, de valores laterais ou em outros usos na Engenharia Civil.

Evidentemente, a aprovação do emprego das misturas ensaiadas para uso em revestimento de canais está diretamente relacionada tanto com os valores quantitativos apresentados neste capítulo, quanto com os seus custos de projeto fixados depois de uma análise econômica em conjunto com outros tipos de materiais de construção.

Este item tem como finalidade única mostrar a relação entre os resultados finais dos três ensaios anteriores, proporcionando uma nova versão para o comportamento de ambos os tipos estudados de mistura. Assim, cruzando-se entre si os resultados desses ensaios, elaborou-se as três figuras que serão analisadas agora. Os dados plotados nestas figuras se encontram na Tab. 7 do Apêndice H, na Tab. 1 do Apêndice I e na Tab. 1 do Apêndice J.

A Fig. 4.17 mostra na ordenada a perda de massa final média e na abscissa a resistência média a compressão simples em função de vários teores de umidade média de moldagem e teores de cimento ensaiados. Através desta figura pode-se observar que na estabilização de um solo arenoso com cimento, realmente, existe uma umidade ótima de moldagem que é capaz de conciliar resultados satisfatórios de durabilidade por molhagem e secagem e de resistência a compressão simples. É

claro, que esta conciliação também se estende em relação a tensão indireta, conforme será visto na próxima figura. Para um melhor entendimento, deve-se desprezar por um instante os tipos de mistura em análise, e apenas considerar o estudo da estabilização de um solo arenoso como um todo, onde foram ensaiados vários teores de umidade e cimento. Então, nota-se, que para uma determinada umidade, os espécimes moldados com qualquer teor de cimento registram as menores perdas de massa e valores de resistência a compressão simples que, embora não sendo os melhores, atingem os padrões desejáveis para que o respectivo tipo de mistura seja considerado como material de construção. A Fig. 4.17 demonstra que para o caso em destaque este teor de umidade é 12,0 %. Voltando-se agora, aos tipos de mistura estudados, conclui-se, que esta umidade ótima corresponde a mistura solo-cimento plástico. Logo, pode-se evidenciar que numa estabilização de um solo arenoso com cimento, a umidade ótima para menor desgaste se encontra no campo da mistura solo-cimento plástico. Por outro lado, quando houver necessidade de conciliar estes resultados com os de resistência a compressão simples e de tensão indireta, como no caso do revestimento de canais ora estudado nesta pesquisa, pode-se afirmar que este teor passa a ser a umidade ótima geral de moldagem. Isto é fácil de entender, se se considerar que uma vez satisfeita as necessidades de resistência deve-se voltar para as perdas de massa mínimas, fator de vital importância na qualidade do material a ser usado como revestimento de canais. Todavia, quando uma determinada pesquisa visar apenas a resistência a compressão simples e a tensão indireta do material ensaiado, é claro, que a umida

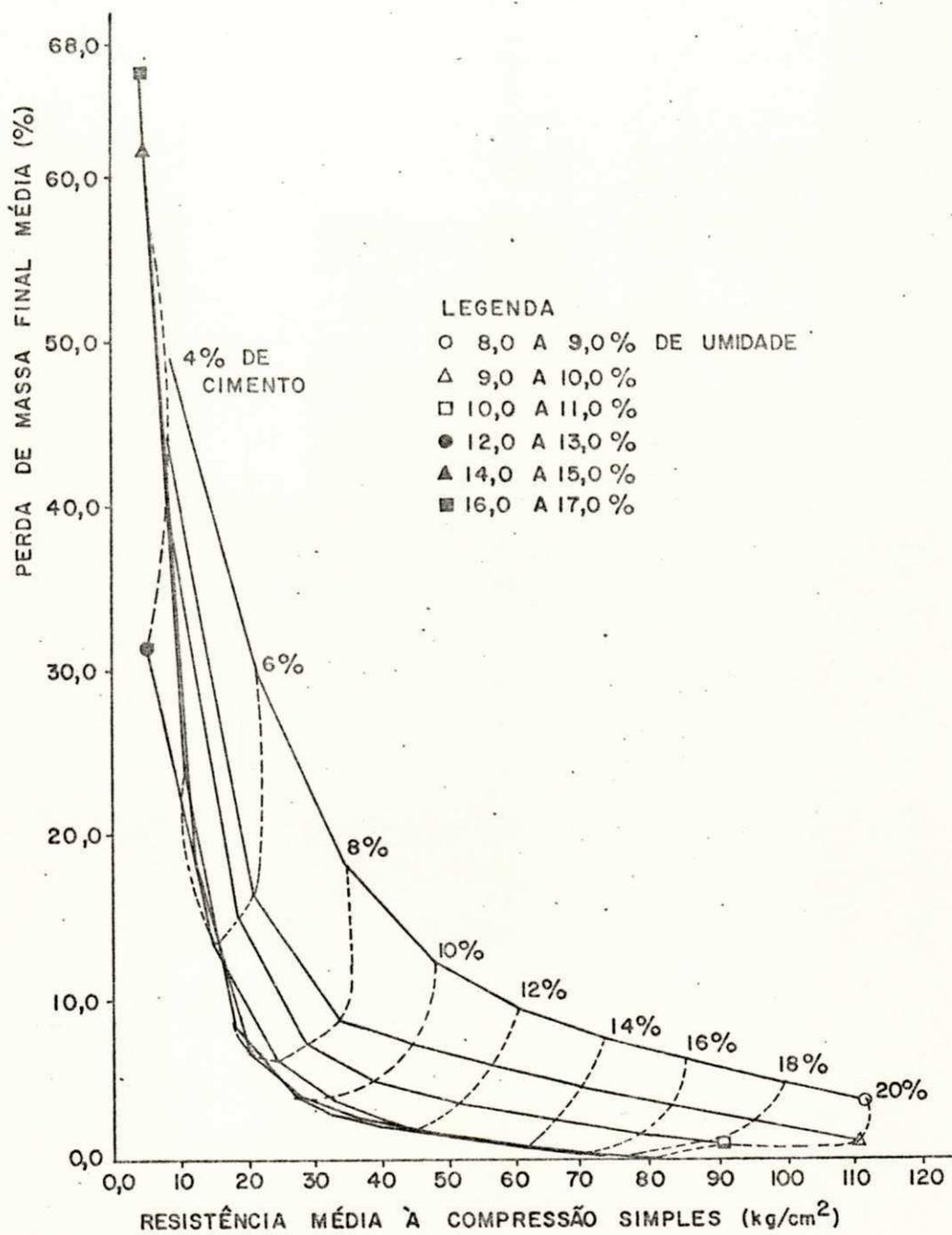


Fig. 4.17 - Relação entre a perda de massa final média e a resistência média a compressão simples de corpos de prova, após 07 dias de cura, em função de vários teores de umidade média de moldagem e teores de cimento ensaiados

de ótima de moldagem será aquela que proporcionar maior resistência. De acordo com o exemplo em foco, esta umidade pertence ao campo da mistura solo-cimento compactado. Em resumo, conclui-se, que para o emprego em revestimento de canais, tanto a mistura solo-cimento compactado como a mistura solo-cimento plástico deve conter como umidade ótima de moldagem aquele teor que apresente as menores perdas de massa e, ao mesmo tempo, resistências a compressão simples que atinjam propriedades padronizadas, encontrando assim, o critério de estabilidade e durabilidade desejado para que cada tipo de mistura seja considerado como um novo material de construção.

As curvas que passam por pontos de igual teor de cimento servem para comprovar a influência destes quer na mistura solo-cimento compactado quer na solo-cimento plástico. Além de se observar que os valores quantitativos das perdas de massa finais decrescem à medida que se incrementa os teores de cimento e que as resistências a compressão simples crescem juntamente com estes teores, nota-se também a influência negativa provocada pela umidade de moldagem quando esta tende para a deficiência ou para o excesso em relação ao seu ponto ótimo, através das discrepâncias apresentadas nas coordenadas da figura em tela para os pontos de igual teor de cimento.

A Fig. 4.18 representa a perda de massa final média versus a resistência média a tensão indireta em função de vários teores de umidade média de moldagem e teores de cimento ensaiados. Como se pode ver, esta figura possui as mesmas características de sua antecessora, o que é perfeitamente nor

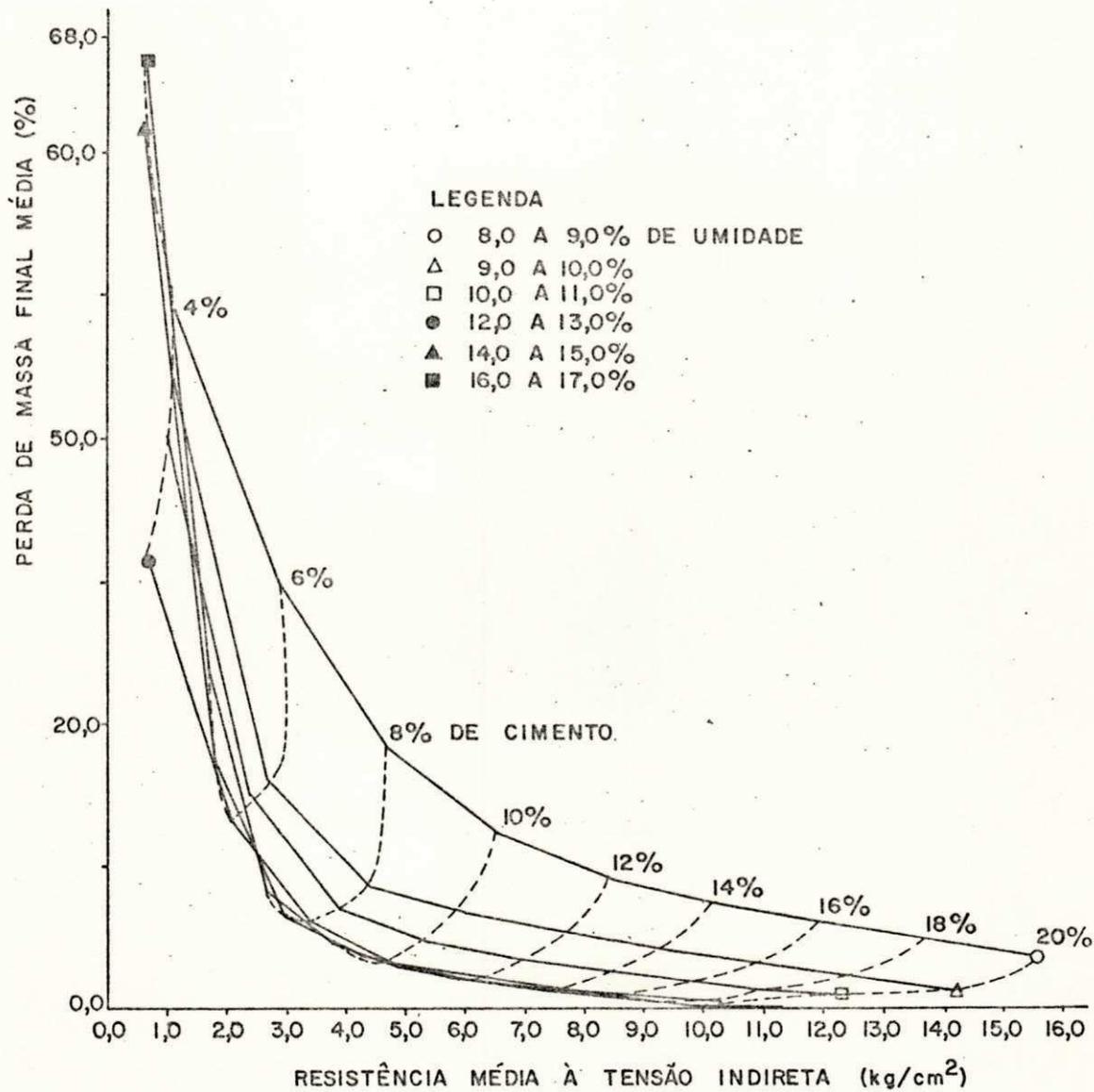


Fig. 4.18 - Relação entre a perda de massa final média e a resistência média a tensão indireta de corpos de prova, após 07 dias de cura, em função de vários teores de umidade média de moldagem e teores de cimento ensaiados

mal por se tratar de resultados correlatos. Conforme se comentou anteriormente, observa-se pela demonstração desta figura que também existe conciliação entre os resultados de perdas de massa e de resistência a tensão indireta. Comprova-se ainda, que a umidade ótima de moldagem na estabilização de um solo arenoso com cimento para fins de revestimento de canais, é aquela que apresenta as menores perdas de massa e valores suficientes de resistência a tensão indireta para atenderem as necessidades da obra. De fato, um material para revestimento de canais deve apresentar durabilidade e resistência compatíveis com as necessidades do projeto. Logo, não se deve usar um material que apresente excelente durabilidade e péssima resistência, e vice-versa. Por meio deste exemplo, nota-se que esta umidade é 12,0 %, e pertence a mistura solo-cimento plástico. Em resumo, conclui-se, que para o emprego em revestimento de canais, tanto a mistura solo-cimento compactado como a mistura solo-cimento plástico deve conter como umidade ótima de moldagem aquele teor que apresente as menores perdas de massa e, ao mesmo tempo, resistências a tensão indireta que atinjam propriedades padronizadas, encontrando assim, o critério de estabilidade desejado para que cada tipo de mistura seja considerado como um novo material de construção.

Quanto as curvas que passam por pontos de igual teor de cimento, trata-se de um caso semelhante ao que foi discutido na figura anterior.

Passando-se a analisar a Fig. 4.19, última deste capítulo, representando a resistência média a tensão indireta e a resistência média a compressão simples em função de vários

teores de umidade média de moldagem e teores de cimento ensaiados, conclui-se indiscutivelmente, que as maiores resistências pertencem ao campo da mistura solo-cimento compactado. Entretanto, sabe-se, que em se tratando do estudo de revestimento de canais não se pode analisar esta figura separadamente pois, como já foi ventilado antes, o que interessa mesmo é a avaliação do comportamento de cada mistura no sentido global. Entretanto, pode-se dizer, que a elaboração desta figura é válida porque mostra o comportamento das misturas quanto aos ensaios de resistências sob a influência da umidade, parâmetro de maior destaque na estabilização de um solo arenoso com cimento se se considerar constante a porcentagem de cimento na mistura. Destarte, pode-se verificar se os valores de resistência apresentados por cada tipo de mistura em seus níveis de umidade ensaiados, estão condizentes com os padrões mínimos exigidos para que os respectivos materiais sejam considerados aptos para emprego em revestimento de canais. Na verdade, o comportamento dos gráficos da Fig. 4.19 serve também para provar as considerações e afirmações feitas nos itens anteriores sobre a escolha da umidade ótima de moldagem para cada tipo de mistura estudado. Antes de mais nada, fica provado que não foi precipitadamente que se fez a escolha de 10,0 % como umidade ótima de moldagem para a mistura solo-cimento compactado e de 12,0 % para a mistura solo-cimento plástico que, por sua vez, também foi escolhida como a umidade ótima geral do material ensaiado para emprego em revestimento de canais. Trata-se, em última análise, de umidades que apresentaram as menores perdas de massa nos respectivos tipos de mistura e que, conforme se pode observar

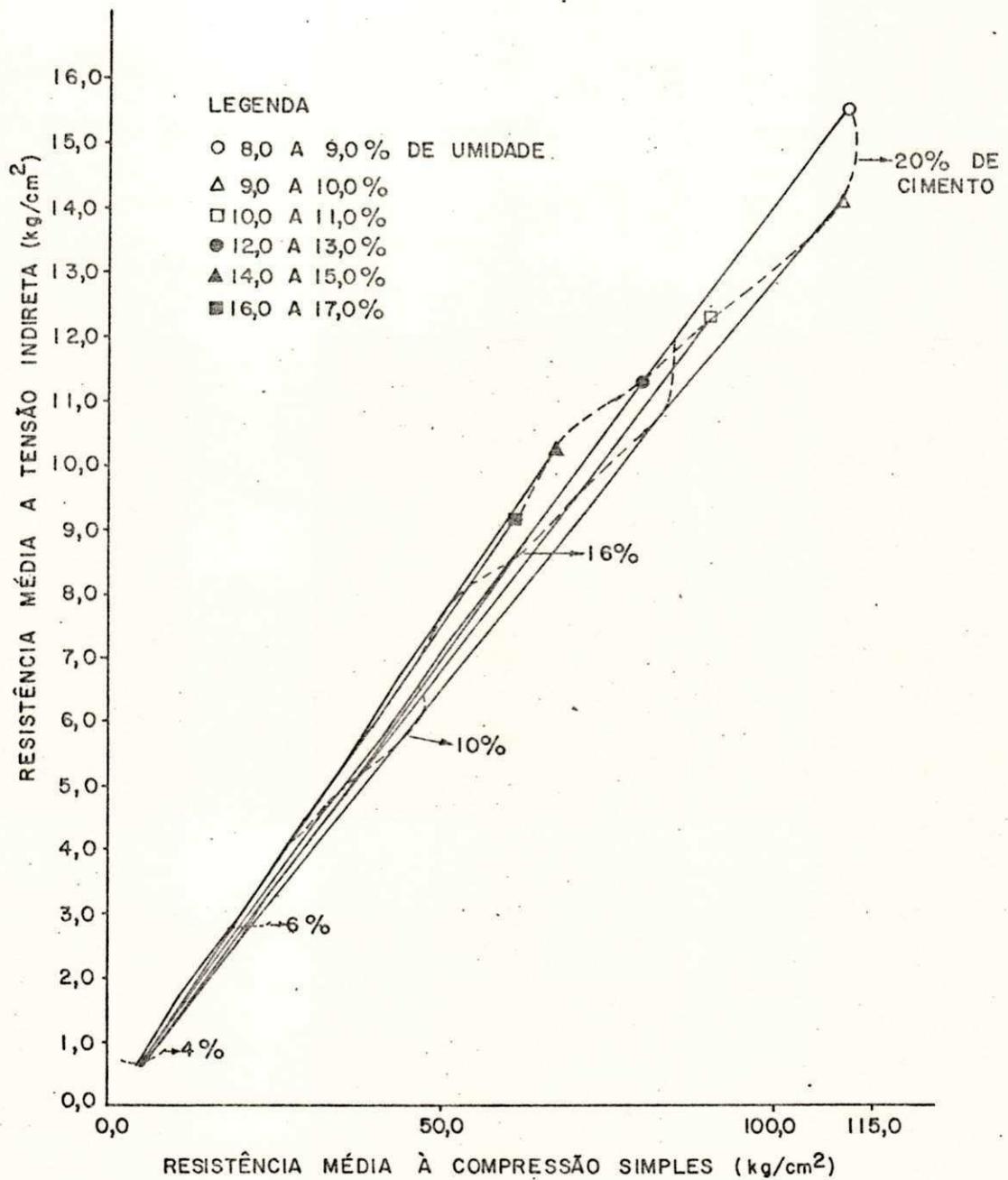


Fig. 4.19 - Relação entre a resistência média a tensão indireta e a resistência média a compressão simples de corpos de prova, após 07 dias de cura, em função de vários teores de umidade média de moldagem e teores de cimento ensaiados

na citada figura, também mostraram resistências compatíveis com as exigências do projeto, isto é, alcançaram um critério especificado de estabilidade e durabilidade. Quanto à escolha de 12,0 % para umidade ótima geral, se deve ao fato de que os corpos de prova moldados com esta porcentagem apresentaram, isoladamente, as menores perdas de massa além de resistências consideradas ótimas para assegurar o emprego deste material como revestimento de canais. Portanto, por meio deste exemplo, pode-se notar o quanto é importante a combinação dos resultados destes ensaios quando se tratar do estudo de revestimento de canais.

Observando-se as curvas que passam pelos pontos de igual teor de cimento, nota-se claramente, a influência exercida pelo aumento destes na elevação das resistências dos espécimes ensaiados. Por outro lado, pode-se ver que o teor de umidade é quem determina, prioritariamente, a elevação ou redução de resistências para o mesmo teor de cimento. Esta afirmação se deve ao fato de que para um mesmo teor de cimento e umidade de moldagem diferente, sempre ocorreu variação nos valores de resistências que passa a ser cada vez mais expressiva com o aumento do teor de cimento. Para o exemplo em foco, a discrepância máxima foi registrada entre os corpos de prova moldados com 20,0 % de cimento e 8,0 % de umidade e aqueles com 20,0 % de cimento e 16,0 % de umidade de moldagem.

Através desta figura concluiu-se também que a relação entre a resistência a compressão simples (RCS) e a resistência a tensão indireta (RTI), é a seguinte:  $RCS \approx 7 \cdot RTI$ .

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Introdução

Partindo-se das premissas que originaram esta pesquisa, ou melhor, este estudo preliminar comparativo entre misturas de solo-cimento compactado e solo-cimento plástico para revestimento de canais, e tendo-se como base a análise global de seus resultados, pode-se deduzir as seguintes conclusões e recomendações.

### 5.2. Conclusões

5.2.1. Para o solo arenoso estudado (A2 - 4), o teor de cimento que estabilizou o material atendendo a mínima resistência a compressão simples, dentro das especificações da ABCP, foi de 6,0 %, desde que o teor de umidade de moldagem se situe em torno de seu ponto ótimo. Entretanto, se levarmos em consideração a perda de massa para o mesmo teor de cimento, a umidade ótima se situa em torno de 12,0 %.

5.2.2. Acima de 8,0 % de cimento, qualquer que seja o teor de umidade no intervalo de 9,0 % a 16,0 %, os espécimes não

apresentaram desgaste superior a 14,0 % nem resistência a compressão simples inferior a 20,2 kg/cm<sup>2</sup> satisfazendo, portanto, as especificações da ABCP.

5.2.3. O aumento do teor de cimento provocou também um incremento na massa específica aparente seca da mistura para vários teores de umidade utilizados na pesquisa.

5.2.4. Para os teores de cimento adotados, o aumento de umidade a partir de 8,0 % provocou uma diminuição gradativa na resistência a compressão simples do corpo de prova.

5.2.5. No intervalo de umidade de 10,0 % a 13,0 %, as perdas de massa foram mínimas para os vários teores de cimento. Tal comportamento se faz notar, principalmente, a partir de 8,0 % de cimento.

5.2.6. O teor de umidade de moldagem tem uma influência bastante significativa nas perdas de massa do solo-cimento; principalmente, no ramo seco da curva de compactação onde para uma variação de - 1,0 % da umidade ótima, acarreta um aumento de 4,0 % de cimento para que as perdas de massa fiquem dentro dos limites estabelecidos pela ABCP.

5.2.7. A influência da umidade de moldagem também se faz sentir de maneira significativa na resistência a compressão simples do material, onde corpos de prova moldados com 8,0 % de umidade e 12,0 % de cimento apresentaram resistências maiores que aqueles preparados com 16,0 % de umidade e 18,0 % de

cimento.

5.2.8. Tanto a deficiência como o excesso de umidade de moldagem provocaram aumento nas perdas de massa parciais e finais para qualquer teor de cimento ensaiado. Enquanto o menor teor de umidade de moldagem ensaiado foi responsável por maiores perdas de massa parciais e finais com corpos de prova moldados a partir de 6,0 % de cimento, o maior teor de umidade de moldagem ensaiado provocou maiores perdas de massa parciais e finais apenas para os espécimes moldados com 4,0 % de cimento.

5.2.9. Na mistura solo-cimento compactado, à medida que se reduziu a umidade de moldagem ocorreu um aumento de resistências, porém em consequência desta redução registrou-se um incremento acentuado e desfavorável nas perdas de massa parciais e finais.

5.2.10. Com a mistura solo-cimento plástico, quando se aumentou a umidade de moldagem além de 13,0 % ocorreu uma redução nas resistências e registrou-se também um incremento negativo nas perdas de massa parciais e finais, principalmente, para os teores de cimento considerados insuficientes para estabilizar tecnicamente o solo ensaiado.

5.2.11. Para teores de cimento superiores a 8,0 % e umidades de moldagem maiores que a ótima as perdas de massa se apresentam quase que constante para os diversos ciclos de molhagem e secagem.

5.2.12. A relação entre a resistência a tensão indireta (RTI) e a resistência a compressão simples (RCS) é de:  $RTI \cong RCS/7$ .

5.2.13. Quanto ao desgaste máximo determinado pela ABCP, de duz-se que para o solo ensaiado, a composição ótima da mistu ra solo-cimento compactado pode apresentar 9,0 % ou 10,0 % de umidade de moldagem qualquer que seja o teor de cimento no intervalo de 8,0 % a 20,0 %, assim como, 8,0 %, 9,0 % e 10,0 % de umidade de moldagem para teores de cimento a par tir de 10,0 %.

Para o solo-cimento plástico, sua composição ótima deve apre sentar 12,0 % de umidade de moldagem qualquer que seja o teor de cimento no intervalo de 6,0 % a 20,0 %, ou ainda, 12,0 %, 14,0 % e 16,0 % de umidade de moldagem para teores de cimento a partir de 8,0 %.

5.2.14. Quanto a mínima resistência a compressão simples de terminada pela ABCP, nota-se que para o solo ensaiado, a com posição ótima da mistura solo-cimento compactado pode apre sentar 8,0 % ou 9,0 % de umidade de moldagem qualquer que se ja o teor de cimento no intervalo de 6,0 % a 20,0 %, ou tam bém, 8,0 %, 9,0 % e 10,0 % de umidade de moldagem para teo res de cimento a partir de 8,0 %.

Para o solo-cimento plástico, sua composição ótima pode apre sentar 12,0 % ou 14,0 % de umidade de moldagem qualquer que se ja o teor de cimento no intervalo de 8,0 % a 20,0 %, além de 12,0 %, 14,0 % e 16,0 % de umidade de moldagem para teo res de cimento a partir de 10,0 %.

5.2.15. Dentro das limitações desta pesquisa e levando-se em consideração a estabilização do solo arenoso A2 - 4 (0) com cimento para uso em revestimento de canais, pode-se afirmar, que a composição ótima das misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico deve conter, respectivamente, 10,0 % e 12,0 % de umidade de moldagem em relação a massa do material seco. Quanto ao conteúdo de cimento, de imediato aconselha-se usar para ambas as misturas teores a partir de 8,0 % já que estes satisfazem plenamente as especificações da ABCP sem serem, no entanto, considerados como intervalo econômico para tal, pois isto só poderá ser detectado após um estudo econômico detalhado.

### 5.3. Recomendações

5.3.1. Realizar pesquisa similar com outros tipos de solos, visando a comprovação dos efeitos provocados pelos teores de umidade e cimento no comportamento das misturas ensaiadas.

5.3.2. Recomenda-se implantar no campo canais revestidos com combinações de 8,0 % a 20,0 % de cimento para 10,0 % e 12,0 % de umidade de moldagem, visando-se determinar a vida útil de cada composição, custos de implantação por metro de canal, conservação e manutenção, infiltração, assim como, os demais parâmetros necessários a uma completa análise econômica.

5.3.3. Quando da implantação das combinações citadas no item anterior, ou do emprego em larga escala daquela que for con

siderada ótima após análise econômica, não se poderá desprezar a umidade do solo que ao ser retirado da jazida será logo preparado e utilizado no próprio campo.

5.3.4. Efetuar a análise econômica geral, isto é, envolvendo as combinações ótimas das misturas solo-cimento compactado e solo-cimento plástico com os demais tipos de revestimento de uso corrente em nosso meio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Divisão de Educação e Divulgação. Normas de dosagem e métodos de ensaios de solo-cimento. São Paulo, 1977. 67 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-32. Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1968. 13 p.

\_\_\_\_\_. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-30. De terminação do limite de liquidez dos solos. Rio de Janeiro, 1969. 02 p.

\_\_\_\_\_. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-31. De terminação do limite de plasticidade de solos. Rio de Janeiro, 1969. 01 p.

\_\_\_\_\_. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-28. De terminação da massa específica de grãos de solo. Rio de Janeiro, 1969. 02 p.

\_\_\_\_\_. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-33. Ensaio normal de compactação de solos. Rio de Janeiro, 1968. 02 p.

\_\_\_\_\_. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-27. Pre

paração de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1969. 01 p.

\_\_\_\_\_. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. P-NB - 66. Referências bibliográficas. Rio de Janeiro, 1978. 35 p.

ARNOULD, F. La tobermorite: partie principale de la pâte de ciment portland. Le Genie Civil, T. 144, N 1, janvier, 1967 a. p. 51-8.

\_\_\_\_\_. Questions relatives a la "tobermorite" et theorie des "pseudo-solides". Le Genie Civil, T. 144, N 6, juin, 1967 b. p. 485-95.

BAPTISTA, Cyro de F. N. Ensaio fundamentais para a pavimentação; dimensionamento dos pavimentos flexíveis. In: \_\_\_\_\_. Pavimentação. 2a. ed. Porto Alegre, Ed. Globo/MEC, 1976. Tomo I. p. 03-21; 52-61 e 84-8.

BASÍLIO, F. A. Solo-cimento-pavimento rodoviário de baixo custo. Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, Rio de Janeiro, 1955. p. 05-41.

BEZERRA, R. L. & CABRERA, J. G. A durabilidade de solos lateríticos estabilizados com cimento e aditivos. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba - CCT/UFPb, Campina Grande, Pb, fev. 1976. 96 p. (Tese de M. Sc.).

BLAKE, L. S. Laboratory design and site control for soil-cement. The Surveyor, 115(3375) :1041-45, dec. 1956.

BOFINGER, H. E. The fatigue behaviour of soil-cement. Journal of Australian Road Research, 2(4):12-20, june, 1965.

\_\_\_\_\_. The structure of soil-cement. Journal of Australian Road Research, 2(1):46-9, 1964.

BONNOT, J. Assessing the properties of materials for the structural design of pavements. Proceedings of the 3rd. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1:200-13, London, 1972.

CABRERA, J. G. Projetos de pavimentos. Notas de aula. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, CCT/UFPb, 1975, Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Civil. Inédito.

\_\_\_\_\_. Tópicos especiais em estabilização de solos. Notas de aula. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, CCT/UFPb, 1974, Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Civil. Inédito.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 3a. ed. Rio de Janeiro, Técnicos e Científicos, 1976. 2 v. il.

CATTON, M. D. Early soil-cement research and development. Portland Cement Association, Jan. 1959. p. 3. (B. Res. De

velop. Lab., D-42).

\_\_\_\_\_. Soil-cement technology. A Rêsumê. Journal of Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, January, 1962. p. 13-21.

CHATTERJI, S. & JEFFERY, J. M. Three dimensional arrangement of hydration products in set cement paste. Nature, 19:1233-4, 1966.

DECAN G., Gonzalo. Lining irrigation canals and ditches. Irrigation Department, University of California, Davis, California, Irrigation, 298:20-1; 191-6, spring, 1964.

DELABIANCA A., Mèllia & CARVALLO G., Hugo O. Estudo econômico simplificado de cinco diferentes tipos de revestimento de canais de irrigação. Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, CCT/UFPb, Campina Grande, Pb, novembro, 1976. 74.p. (Tese de M. Sc.).

DOYLE, J. J. Organo-clay relationships in soil aggregate formation. Ohio, State Univ., 1952. 84 p. (Thesis Ph. D.).

EL-RAWI, N. M.; HALIBURTON, T. A.; JANES, R. L. Effect of compaction on strength of soil-cement. J. Soil Mech. Found. Div., 93(SM6):195-208, 1967.

FELT, E. J. Factores influencing physical properties of soil-cement mixtures. Illinois, Portland Cement Associa

tion, 1955. 24 p. (B. Res. Develop. Lab., D-5).

FUENTES C., Victor. Estudio de métodos, eficiencia y costos en revestimientos de canales. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Chillán, Chile, 1964. 96 p. p. 36-7 e 84. (Tesis de Ing. Agr., mimeografiada).

CARD, J. A. et alii. Synthetic compounds related to tobermorite: an electronmicroscope, X-ray, and dehydration study. Magazine of Concrete Research, 11:151-8, 1959.

GEOGHEGAN, M. J. Aggregate formation in soil. In: INTERNATIONAL CONGRESS SOIL SCIENCE, 4<sup>o</sup>, 1950. p. 198.

GEORGE, K. P. Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures. Washington, National Academy of Sciences, National Research Council, Highway Research Board, 1968. p. 42-58. (Res. Record, 255).

\_\_\_\_\_. Shrinkage cracking of soil-cement base: theoretical and model studies. Washington, 1971. p. 115-33. (Highway Research Record, 351).

GILLOT, J. E. Clay in engineering geology. Elsevier, 1968.

HANDY, R. L. Cementation of soil minerals with portland cement or alkalis. Highway Research Board, Bull. 198:55-64, 1958.

\_\_\_\_\_. Stabilization of Iowa loess with portland cement.  
Iowa State College Library, Ames, 1956. (Thesis Ph. D.).

HARGREAVES, G. H. Potencial evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil. On-Farm Water Management Research Program. Utah State University, feb. 1974. p. 20.

HOLT, J. K. Notes on the construction of a two layer plant-mixed soil-cement pavement for western avenue, Lagos. Scott Wilson Kirkpatrick & Partners, London, 1959.

HOUGH, B. K. Basic soils engineering. The Ronald Press Company New York, 1957. p. 390-417 e 454-72.

HRB - HIGHWAY RESEARCH BOARD. Proceedings, 1945. p. 376-84.

\_\_\_\_\_. HIGHWAY RESEARCH BOARD. Soil stabilization with cement. Joint Publication, Iowa Engineering Experiment Station, 23. (Bulletin 194), 1958.

\_\_\_\_\_. HIGHWAY RESEARCH BOARD. Soil stabilization with portland cement. Committee on Soil-Portland Cement Stabilization. (Bulletin 292), 1961.

ICID - INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE. Controlling seepage losses from irrigation canals. World-Wide Survey, Central Office - 48, Nyaya Marg, Chanakyapuri, New Delhi - 21 (India), 1967. p. 61.

- \_\_\_\_\_. INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE. Transactions compte rendu. Third Congress on Irrigation and Drainage, v. 11, 104, Sunder Nagar, New Delhi, 1 (India), 1957. p. 7.15-7.16.
- INGLES, O. G. & FRYDMAN, S. The effect of cement lime on the strength of some soil minerals and its relevance to the stabilization of Australian soils. Procs. of the Third Conference of the Australian Road Res. Board, 3(2):1504-28, 1966.
- ISRAELSEN, O. W. & HANSEN, V. E. Principios y aplicaciones del riego. Editorial Reverté, Barcelona, 1965. p. 91.
- JOHNSTON, C. M. Western avenue Lagos; the design and construction of a soil-cement pavement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 20, sept. 1961. p. 107-40. (Paper 6491).
- JONES, T. N. Soil-cement for hard surfacing feed lots. Mississippi, Agric. Exper. Stat., 1966. 2 p. (Inf. Sheet, 949).
- KALOUSEK, G. L. & PREBUS, A. F. Crystal chemistry of hydrous calcium silicates: III, morphology and other properties of tobermorite and related phases. Journal of the American Ceramic Society, 41(4): 124-32, 1958.
- KAWAMURA, M. Fundamental studies on the fabric of soil-cement mixture and its mechanical properties. October, 1970. 136 p. p. 1-9 e 14-6. s. ed., s. 1.

KEMP, M. A. Shrinkage and cracking of soil-cement. A Review, University of Leeds, 1973.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia - relações solo-planta. Agronomica "CERES", São Paulo, 1979. 264 p. p. 89.

KREBS, R. D. & WALKER, R. D. Highways materials. McGRAW-HILL BOOK COMPANY INC., New York, 1971.

KROCHIN, S. Soil-cement for canal linings. International Commission on Irrigation and Drainage. New Delhi, India, 1960. p. 101-8. (Annu. B).

LAURITZEN, C. W. Canal and reservoir lining. College of Agriculture and Mechanic Arts, State College, New Mexico. 1956. 14 p. (Mimeographed).

\_\_\_\_\_. Ways to control losses from seepage. U. S. Department of Agriculture Yearbook, 1955. p. 311-20.

LAURITZEN, C.W. et alii. Plastic film for controlling seepage losses in farm reservoirs. Utah Agricultural Experiment Station, Logan, 1956. 18 p. (Bulletin 391).

LAWS, W. D. Water-soluble silicate application to a calcareous clay soil and effect on soil properties and nutrient uptake by plants. Soil Sci. Soc. Amer., Proc. 15:89-92, 1950.

LEONARDS, G. A. Foundation engineering. McGRAW-HILL BOOK COM

PANY INC., New York, 1962.

LILLEY, A. A. Current overseas practice. Journal of the Institution of Highway Engineers, 19(3): 4-11, mar. 1972.

LISTER, N. W. Design and performance of cement-bound bases. Journal of the Institution of Highway Engineers, 19(2): 21-33, feb. 1972.

MARTIN, J. P. & ALDRICH, D. G. Influence of soil exchangeable-cation ratios on the aggregating effects of natural and synthetic soil conditioners. Soil Sci. Soc. Amer., Proc. 19:50-4, 1955.

MATEOS, M. et alii. Effects of chemical additives on the strength of soil-cement mixtures. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 29, 1963. Anais, v. 1, p. 547-70.

MEHRA, S. R. et alii. Role of detrimental salts in soil stabilization with and without cement: effect of sodium sulphate. Industr. Concrete J., 29:336-7, 1955.

MOH, Z. C. et alii. Improvement of soil-cement with chemical additives. Highway Research Board, Bull., 309:57-76, 1962.

MOH, Z. C. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. Highway Research Record, Bull., 86:39-61, 1965.

NAKAYAMA, H. & HANDY, R. L. Factors influencing shrinkage of soil-cement. Highway Research Record, Bull., 86:15-27, 1965.

NEUBAUER, L. W. & QUINTERO, J. E. High pressure for strengthening and stabilizing soil-cement and adobe bricks. Trans. ASAE, 9(4):507-8 e 512, 1966.

NOBLE, D. F. Reactions and strength development in portland cement-clay mixtures. Highway Research Record, Bull., 198:39-56, 1967.

O'FLAHERTY, C. A. Highways. Edward Arnold, 2 v., London, 1974.

PCA - PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Soil-cement slope protection for earth dams. Illinois, 1965. 12 p.

POWERS, T. C. & BROWNYARD, T. L. Studies of the physical properties of hardened cement paste. Proc. ACI, 43:101-32, 249-336 e 469-504, 1947.

RICHARTZ, W. & LOCHER, F. W. Ein beitrag zur morphologie und was serbindung von calcium silicat-hydraten und zum gefüße des zement steins, zement-kalk-gips. 9:449-59, sept. 1965.

SHERWOOD, P. T. Stabilization with cement of weathered and sulphate-bearing clays. Geotechnique, London, 7(4):35-44, 1957.

SHIDELER, J. J. Soil-cement innovations. ACI Journal Pro

ceedings 66(11):N1-N2, nov. 1969.

SIERRA, R. Étude au microscope électronique de l'hydratation des silicates calciques du ciment portland. Jour. de Microscopie, 7(4):491-508, 1968.

STANTON, T. E. et alii. Progress report on California experience with cement treated bases. Proc. Highway Research Board, Washington, 23:279-95, 1943.

TAYLOR, G. S. & BALBRIDGE, P. E. The effect of sodium carboxymethylcellulose on some physical properties of Ohio soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 18(4):382-5, 1954.

TERZAGHI, Karl & PECK, Ralph B. Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. Traducción del inglés por Oreste Moretto. Librería "El Ateneo", Buenos Aires, 1955. p. 3-138 e 450-60.

TREWARTHA, G. T. An introduction to climate. Series in Geography, International Student Edition, MCGRAW-HILL BOOK COMPANY INC., Third Edition, New York, 1954. p. 217.

UPPAL, I. S. & KAPUR, B. P. Role of detrimental salts in soil stabilization with and without cement: effect of magnesium sulphate. Industr. Concrete J. 31, 1957.

USDI - UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Canals and related structures; canals and laterals. U. S. Bureau of

Reclamation, Denver, Colorado, 1962. p. 1.1-1.20 (Design Standards n. 3).

\_\_\_\_\_. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Linings for irrigation canals. U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, First Edition, 1963. p. 9 e 70-3.

WANG, J. W. H. & KREMMYDAS, A. H. Use of sodium chloride in reducing shrinkage in montmorillonitic soil-cement. Highway Research Record, Bull. 315:81-90, 1970.

WEYL, W. A Wetting of solids as influenced by the polarizability of surface ions. In: \_\_\_\_\_. Structure and properties of solid surfaces. University of Chicago Press, 1953. p. 147-81.

WILLIAMS, R. I. T. Properties of cement stabilized materials. Journal of the Institution of Highway Engineers, 19(2):5-19, february, 1972.

WINTERKORN, Hans F. & FANG, Hsai-Yang. Foundation engineering handbook. Van Nostrand Reinhold Company, New York; 1975. 751 p. p. 312 e 317-23.

WINTERKORN, Hans F. Principles and practice of soil stabilization. Colloid Chemistry (J. Alexander, Editor) VI, Reinhold Publ. Corp., New York, 1946. p. 459-92.

YONG, R. N. & WARKENTIN, B. P. Introduction to soil beha

viour. Macmillan, New York, 1966. p. 51-64.

ZIMMERMAN, J. D. El riego. Compañía Editorial Continental,  
México, Segunda impresión, mayo 1974. p. 358-9.

APENDICE

A

## NORMA SIMPLIFICADA DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO (1)

## 1. Objetivo

A Norma Simplificada de Dosagem do Solo-Cimento fixa o modo pelo qual se determina o teor de cimento adequado para o emprego do solo ensaiado, como elemento constituinte do solo-cimento, em função das características físicas do solo e do resultado do ensaio de resistência à compressão.

## 2. Metodologia

a) Esta norma só é aplicável a solos que satisfaçam as seguintes condições.

1. Possuir no máximo 50,0 % de material com diâmetro inferior a 0,05 mm (silte mais argila).

---

(1) NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO (ABCP, 1977)

2. Possuir no máximo 20,0 % de material com diâmetro inferior a 0,005 mm (argila).

b) Dependendo da granulometria do solo, emprega-se um dos dois métodos seguintes:

Método A - usando material que passa na peneira de Nº 04 (4,8 mm). Este método será usado quando 100,0 % da amostra original do solo passar na peneira supracitada.

Método B - usando material que passa na peneira de 3/4" (19,1 mm). Este método será usado quando parte da amostra original do solo ficar retida na peneira de Nº 04 (4,8 mm).

### 3. Ensaio Preliminares

a) Deverão ser realizados os seguintes ensaios com amostras do solo em estudo.

1. Análise granulométrica, de acordo com o Método Brasileiro MB-32 da ABNT.

2. Determinação da absorção dos grãos de pedregulho retidos na peneira de Nº 04 (4,8 mm), pelo Método Brasileiro MB-29 da ABNT.

3. Determinação da massa específica de grãos de solos, segundo o Método Brasileiro MB-28 da ABNT.

b) Nesta norma as diversas frações do solo em função de seus diâmetros ( $\theta$ ), são denominadas como segue:

- pedregulho graúdo: partículas com  $\theta$  de 4,8mm a 76,0mm;

- pedregulho fino: partículas com  $\phi$  de 2,0 mm a 4,8 mm;
- areia grossa : partículas com  $\phi$  de 0,42 mm a 2,0 mm;
- areia fina : partículas com  $\phi$  de 0,05 mm a 0,42mm;
- silte : partículas com  $\phi$  de 0,005 mm a 0,05mm; e
- argila : partículas com  $\phi$  inferior a 0,005mm.

#### 4. Método A

##### 4.1. Ensaio

- a) Determina-se de acordo com o Método SC-1, Ensaio de Com pactação de Solo-Cimento (ABCP, 1977), a massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s$ , máx.) e a umidade ótima ( $h_{ot}$ ) da mistura solo-cimento.
- b) Este ensaio será realizado com um teor de cimento obtido do seguinte modo.
  1. Estima-se a massa específica aparente seca máxima da mistura por meio da Fig. 1, em função das porcentagens de pedregulho fino mais areia grossa e silte mais argila.
  2. Estima-se o teor de cimento por meio da Fig. 2, em função da porcentagem de silte mais argila e da massa específica aparente seca máxima obtida também de maneira estimada através da já citada Fig. 1. Obtem-se o teor de cimento em peso indicado, usando-se a Fig. 2, em função da porcentagem de silte mais argila e da massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_s$ , máx.) obtida no

Ensaio de Compactação de Solo-Cimento, Método SC-1 (ABCP, 1977). Com o teor de cimento indicado, molda-se 03 corpos de prova de acordo com o Método SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento (ABCP, 1977). Determina-se a resistência a compressão dos 03 corpos de prova após 07 dias de cura, segundo especificações do Método SC-4, Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento (ABCP, 1977).

#### 4.2. Interpretação dos resultados

- a) Verifica-se na Fig. 3, em função da porcentagem de silte mais argila do solo, a mínima resistência a compressão dos corpos de prova a ser obtida.
- b) Se a média das resistências dos 03 corpos de prova obtidas no item 5 do Método SC-4 (Apêndice E) for superior à indicada na Fig. 3, o teor de cimento em peso indicado passará a ser definitivamente utilizado.
- c) Se a média das resistências dos 03 corpos de prova obtidas no item 5 do Método SC-4 (Apêndice E) for inferior à indicada na Fig. 3, a amostra deverá ser ensaiada pelo Método Geral de Dosagem do Solo-Cimento, moldando-se os corpos de prova para o Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem, Método SC-3 (ABCP, 1977), com o teor de cimento em peso indicado pela Fig. 2, e com o teor de 2,0 % acima dele.

## 5. Método B (2)

---

(2) Omitiu-se a descrição deste método por ser considerada desnecessária para o que se propõe nesta pesquisa

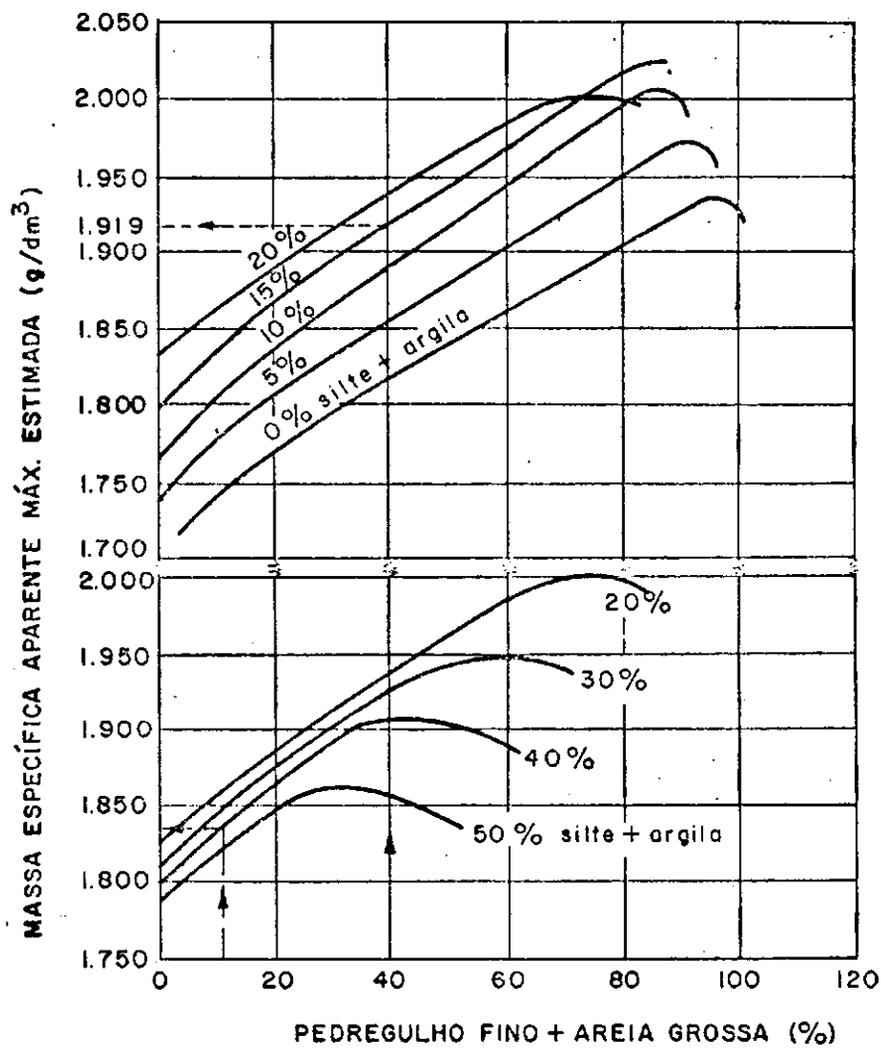


Fig. 1 - Método A - Massa específica aparente máxima estimada (3)

(3) Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977)

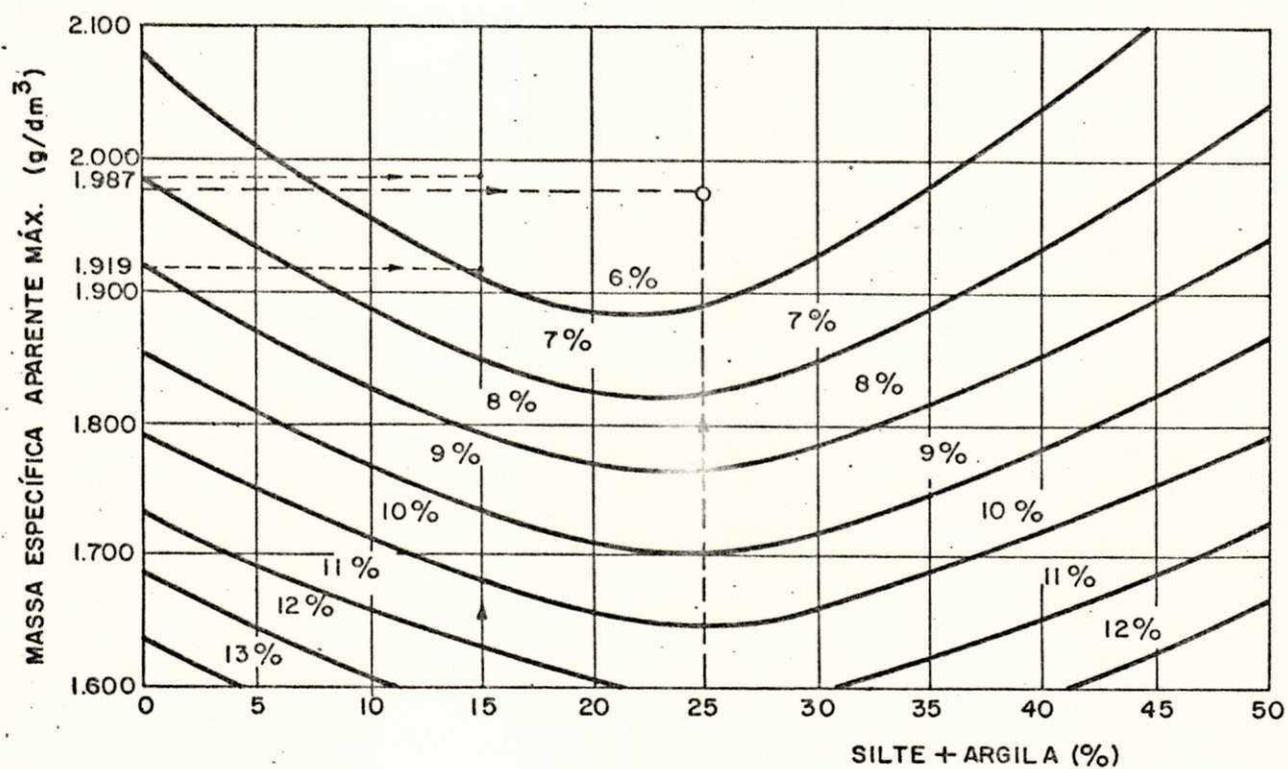


Fig. 2 - Método A - Teor de cimento em peso indicado (4)

(4) Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977)

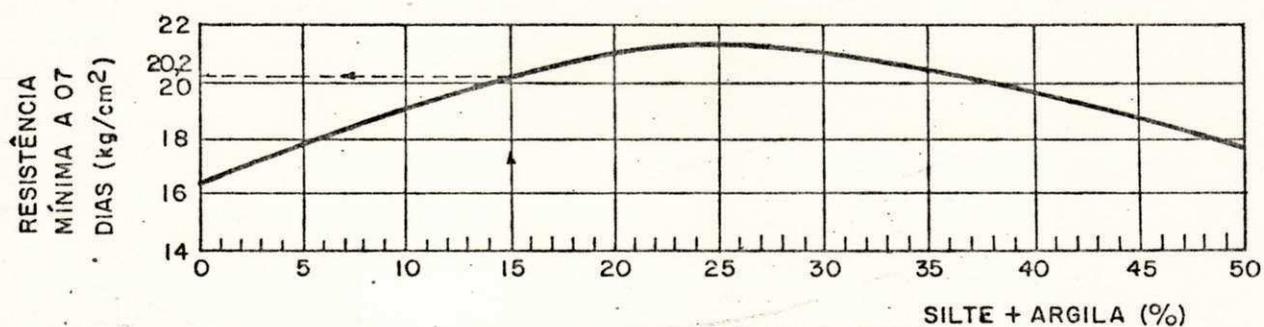


Fig. 3 - Método A - Resistência mínima a compressão de corpos de prova a 07 dias de cura (5)

(5) Normas de Dosagem e Métodos de Ensaios de Solo-Cimento (ABCP, 1977)

B

## ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DE SOLO-CIMENTO, MÉTODO SC-1 (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 solo-cimento, com um teor de cimento determinado, quando compactada conforme o processo especificado.

## 2. Aparelhagem

Emprega-se a mesma aparelhagem indicada no item 2 do Método Brasileiro MB-33, Ensaio Normal de Compactação de Solos, da ABNT.

---

(1) NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO  
(ABCP, 1977)

### 3. Metodologia

Dependendo da granulometria do solo, emprega-se um dos dois métodos abaixo.

Método A - usando material que passa na peneira de Nº 04 (4,8 mm). Este método será usado quando 100,0 % da amostra original do solo passar na peneira supracitada.

Método B - usando material que passa na peneira de 3/4" (19,1 mm). Este método será usado quando parte da amostra original do solo ficar retida na peneira de Nº 04 (4,8 mm).

### 4. Método A

#### 4.1. Amostra

- a) Prepara-se a amostra do solo pulverizando-a e fazendo-a passar na peneira de Nº 04 (4,8 mm). Quando necessário, pode-se secar a amostra ao ar até que se torne destorroável no almofariz sob a ação da mão recoberta de borracha.
- b) Separa-se, com o auxílio do repartidor de amostra ou pelo quarteamento, uma amostra de cerca de 3,0 kg, cujo peso é determinado com precisão de 1,0 g. Deste peso é descontada a umidade em que se encontra a amostra, previamente dēterminada.

terminada.

Pesa-se, com aproximação de 0,01 g, uma quantidade de cimento Portland que satisfaça qualquer das Especificações Brasileiras EB-01, EB-208 e EB-758 (ABNT), conforme o tipo de cimento a empregar, de maneira a se ter em relação ao peso seco do solo a utilizar, o teor de cimento em peso desejado. (2)

#### 4.2. Ensaio

- a) Adiciona-se o cimento ao solo e mistura-se até se obter uma coloração uniforme. Quando necessário, adiciona-se água em quantidade suficiente para elevar o teor de umidade a aproximadamente 4,0 % ou 6,0 % abaixo da umidade ótima prevista.
- b) Compacta-se a mistura no molde fixado em sua base metálica e com o cilindro complementar ajustado, de modo a se ter uma altura total de cerca de 13,0 cm. A compactação deve ser realizada em 03 camadas iguais, recebendo cada uma 25 golpes do soquete caindo livremente de uma altura igual a 305,0 mm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Durante a compactação o molde deve estar apoiado numa base plana e firme.
- c) Remove-se o cilindro complementar, tendo-se antes o cuidado de se obter uma amostra de cerca de 3,0 kg de solo compactado com precisão de 1,0 g. Deste peso

---

(2) O teor de cimento em peso é expresso em porcentagem pelo peso de cimento em relação ao peso do solo seco

do de destacar com o auxílio de uma espátula o material a ele aderente. Com uma régua rígida rasa-se o material na altura exata do molde.

- d) Pesa-se o conjunto com aproximação de 1,0 g, e subtrai-se o peso do molde anteriormente determinado. O peso assim obtido será anotado como peso do corpo de prova úmido, PCPh.
- e) O material compactado é romovido do molde e cortado verticalmente. Do seu interior é retirada uma amostra de cerca de 80,0 g para determinação da umidade. Pesa-se, seca-se em estufa a 105,0 °C a 110,0 °C até constância de peso e pesa-se novamente; faz-se as pesadas com aproximação de 0,05 g.
- f) Destorroa-se o corpo de prova de modo que todo o material possa passar na peneira de Nº 04 (4,8 mm) e mistura-se com o remanescente da amostra. Adiciona-se água em quantidade suficiente para aumentar o teor de umidade de 1,0 % a 2,0 % e homogeneiza-se a mistura.
- g) Repete-se as operações descritas anteriormente nos parágrafos b) - f) para cada incremento de água. Estas operações deverão ser repetidas com teores crescentes de umidade tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação, conforme se ver na Fig. 1. (3)

---

(3) 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 virgem para cada ponto da curva de compactação

## 5. Método B (4)

## 6. Cálculos

- a) A umidade de cada corpo de prova é obtida através da seguinte fórmula.

$$hCP = \frac{Ph - Ps}{Ps - Pc} \cdot 100, \text{ onde:}$$

$hCP$  = umidade do corpo de prova (%);

$Ph$  = peso da cápsula mais amostra úmida (g);

$Ps$  = peso da cápsula mais amostra seca em estufa (g), e

$Pc$  = peso da cápsula (g).

- b) A massa específica aparente seca de cada corpo de prova é obtida conforme explicação a seguir.

Inicialmente, determina-se a massa específica aparente do corpo de prova úmido pela fórmula abaixo.

$$DCPh = \frac{PCPh}{Vm} \cdot 1000, \text{ sendo:}$$

$DCPh$  = massa específica aparente do corpo de prova úmido (g/dm<sup>3</sup>);

$PCPh$  = peso do corpo de prova úmido (g), e

$Vm$  = volume do molde ou cilindro de compactação (cm<sup>3</sup>).

Então, tem-se que:

$$\gamma_{sCP} = \frac{DCPh}{100} + hCP \cdot 100, \text{ onde:}$$

$\gamma_{sCP}$  = massa específica aparente seca do corpo de prova (g/dm<sup>3</sup>);

---

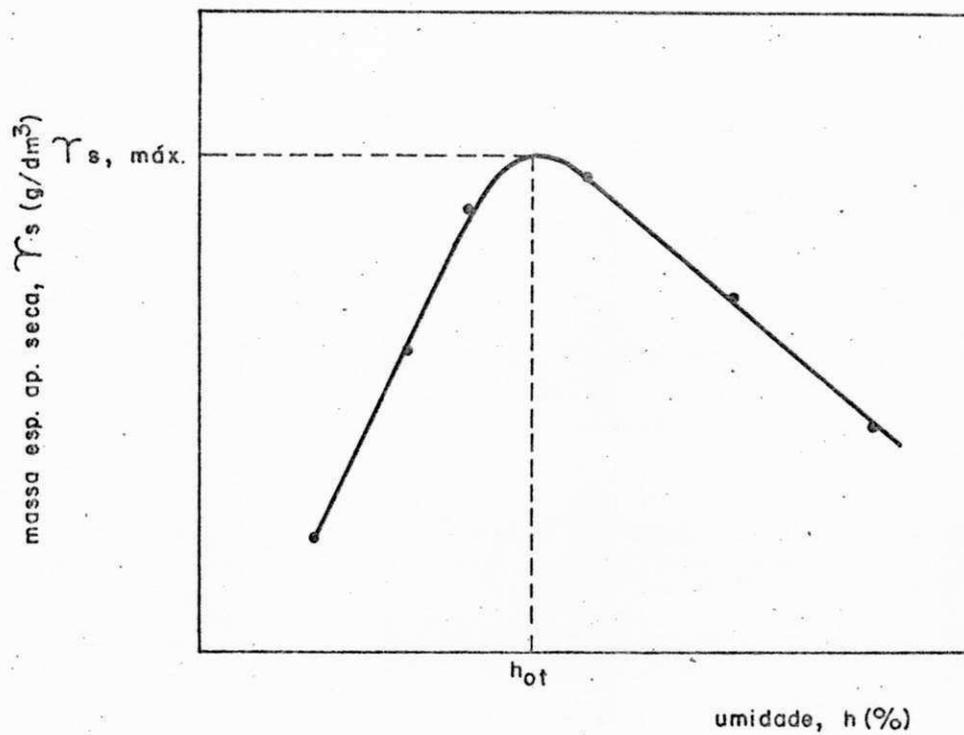
(4) Omitiu-se a descrição deste método por ser considerada desnecessária para o que se propõe nesta pesquisa

DCPh = massa específica aparente do corpo de prova úmido  
(g/dm<sup>3</sup>), e

hCP = umidade do corpo de prova (%)

## 7. Resultados

- a) Calculadas a umidade e a massa específica aparente seca de cada corpo de prova, marca-se os resultados num gráfico, ficando na abscissa os valores de umidade e na ordenada os da massa específica aparente. A curva determinada pelos diversos pontos (vide Fig. 1), dá-se o nome de "curva de compactação".
- b) A massa específica aparente correspondente à ordenada máxima da curva de compactação, dá-se o nome de "massa específica aparente seca máxima".
- c) A umidade correspondente na curva de compactação à massa específica aparente seca máxima; dá-se o nome de "umidade ótima".



$h_{ot}$  = umidade ótima

$\gamma_{s, \text{máx.}}$  = massa específica aparente seca máxima

Fig. 1 - Gráfico demonstrativo de uma curva de compactação para um determinado tipo de solo (5)

(5) Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio de Solo-Cimento (ABCP, 1977)

C

## MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO, MÉTODO SC-2 (1)

## 1. Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual se moldam os corpos de prova de solo-cimento a serem submetidos ao Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem; Método SC-3, ao Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento, Método SC-4 (ABCP, 1977), e a todos aqueles que requeram as mesmas condições de moldagem.

## 2. Aparelhagem

Emprega-se a mesma aparelhagem indicada no item 2 do Método Brasileiro MB-33, Ensaio Normal de Compactação de Solos, da ABNT.

---

(1) NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO  
(ABCP, 1977)

### 3. Metodologia

Dependendo da granulometria do solo, emprega-se um dos dois métodos abaixo.

Método A - usando material que passa na peneira de Nº 04 (4,8 mm). Este método será usado quando 100,0 % da amostra original do solo passar na peneira supracitada.

Método B - usando material que passa na peneira de 3/4" (19,1 mm). Este método será usado quando parte da amostra original do solo ficar retida na peneira de Nº 04 (4,8 mm).

### 4. Método A

#### 4.1. Preparação do material

a) Prepara-se uma amostra do solo conforme o descrito no item 4.1. a), do Ensaio de Compactação de Solo-Cimento, Método SC-1, Apêndice B.

b) Pesa-se, com aproximação de 1,0 g, uma amostra representativa do solo com um peso de cerca de 3,0 kg (3000,0 g). Na pesagem desta amostra deve-se levar em consideração a umidade do solo, previamente determinada.

Pesa-se, com aproximação de 0,01 g, uma quantidade de cimento Portland que satisfaça qualquer das Especificações

Brasileiras EB-01, EB-208 e EB-758 (ABNT), conforme o tipo de cimento a empregar, de maneira a se ter em relação ao peso seco do solo a utilizar, o teor de cimento em peso desejado.

Separa-se uma quantidade de água que somada àquela existente na amostra do solo, confira a mistura um teor de umidade igual à umidade ótima determinada no item 7. c), do Ensaio de Compactação de Solo-Cimento, Método SC-1, Apêndice B, acrescida de 0,5% a 1,0 % conforme as condições ambientais, para compensar as perdas gerais que normalmente ocorrem durante a preparação da mistura.

#### 4.2. Moldagem

- a) Adiciona-se o cimento ao solo e mistura-se até se obter uma coloração uniforme.
- b) Adiciona-se a mistura a quantidade de água determinada no item 4.1. b), deste Apêndice, e homogeneiza-se a mistura.
- c) Compacta-se a mistura no molde da maneira descrita nos parágrafos b) e c) do item 4.2., do Ensaio de Compactação de Solo-Cimento, Método SC-1, Apêndice B, com a precaução especial de escarificar as superfícies das duas primeiras camadas, antes da colocação da camada seguinte, de modo a remover os planos lisos formados pela compactação, evitando assim, que o corpo de prova apresente defeitos de moldagem.
- d) Por ocasião da colocação da segunda camada, retira-se uma amostra de cerca de 80,0 g para determinação do teor de

umidade. Pesa-se, seca-se em estufa a 105,0 °C - 110,0 °C até constância de peso, e pesa-se novamente. Faz-se as pesadas com aproximação de 0,01 g.

- e) Pesa-se o conjunto com aproximação de 1,0 g, e subtrai-se o peso do molde anteriormente determinado. O peso assim obtido será anotado como peso do corpo de prova úmido, PCPh.
- f) Remove-se o corpo de prova do molde e coloca-se uma etiqueta na sua superfície lateral de maneira a identificá-lo.
- g) Coloca-se o corpo de prova na câmara úmida onde deve permanecer, a uma temperatura próxima de 21,0 °C, até o término do tempo de cura quando o corpo de prova será submetido ao ensaio desejado.

## 5. Método B (2)

## 6. Cálculos

- a) Determina-se a umidade de cada corpo de prova moldado, aplicando-se a fórmula apresentada no parágrafo a) do item 6., do Ensaio de Compactação de Solo-Cimento, Método SC-1, Apêndice B.

---

(2) Omitiu-se a descrição deste método por ser considerada desnecessária para o que se propõe nesta pesquisa

- b) Determina-se a massa específica aparente seca de cada corpo de prova moldado de acordo com o descrito no parágrafo b) do item 6., do Ensaio de Compactação de Solo-Cimento, Método SC-1, Apêndice B.

## 7. Resultado

Quando a umidade do corpo de prova moldado diferir da umidade ótima de moldagem em mais de 1,0 %, ou quando a massa específica aparente seca do corpo de prova moldado diferir da massa específica aparente seca máxima em mais de 30,0 g/dm<sup>3</sup>, o corpo de prova deve ser rejeitado.

D

## ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM, MÉTODO SC-3 (1)

## 1. Objetivo

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

## 2. Aparelhagem

Necessita-se da seguinte aparelhagem.

- Plaquetas metálicas com arame fino para identificação dos corpos de prova.
- Câmara úmida, com capacidade para manter condições ambientais.

---

(1) NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO (ABCP, 1977)

tais desejáveis, onde os corpos de prova deverão permanecer durante os 07 dias de cura.

- Câmara de imersão para submergir os corpos de prova em água na temperatura ambiente.
- Estufa capaz de manter a temperatura de 71,0 °C ( $\pm 2,0$  °C).
- Balança que permite pesar 5,0 kg, sensível a 1,0 g.
- Luvas apropriadas para suportar altas temperaturas, permitindo a retirada do espécime da estufa e a execução imediata da operação pesagem-escovação-pesagem.
- Óculos apropriado para proteger os olhos do operador contra os fragmentos desprendidos do espécime durante as escovações.
- Escova de fios de arame chato Nº 26, de 50,0 mm x 1,5 mm, reunidos em 50 grupos de 10 fios cada e montados em 10 fil<sup>as</sup> longitudinais e 05 transversais, num bloco de madeira dura de 185,0 mm x 60,0 mm.

### 3. Corpos de prova

Os corpos de prova de solo-cimento devem ser moldados de acordo com o Método SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento, Apêndice C, sendo em seguida identificados com as plaquetas metálicas e colocados numa câmara úmida, a uma temperatura próxima de 21,0 °C, por um período de cura de 07 dias.

Durante a moldagem, à medida que se aumenta o teor de umidade e a mistura solo-cimento passa ao estado plástico,

deve-se deixar cada corpo de prova no seu respectivo cilindro de compactação por um tempo de 12:00 h para que a mistura endureça, evitando-se assim deformações no espécime, uma vez que a superfície externa do mesmo deve apresentar-se em perfeito estado, de modo que o atrito com os fios da escova, durante a escovação, seja o mais íntimo e completo possível. Neste caso, aconselha-se lubrificar com óleo diesel a parede interna do cilindro de compactação para facilitar a retirada do espécime.

Deve-se moldar, no mínimo, 02 corpos de prova para cada mistura ensaiada.

#### 4. Ensaio

- a) Após os 07 dias de cura na câmara úmida, os corpos de prova deverão ser identificados com as plaquetas metálicas e colocados na câmara de imersão por um tempo de 5:00 h, sendo depois levados para uma estufa com temperatura de 71,0 °C ( $\pm 2,0$  °C), onde deverão permanecer durante 42:00 h.
- b) Em seguida, cada corpo de prova deverá ser retirado da estufa, pesado e escovado em toda a sua área externa, com a escova de fios metálicos.

A escova deverá ser aplicada com seu eixo longitudinal paralelo as superfícies laterais e as bases do corpo de prova, de maneira a cobrir totalmente sua área.

Aplica-se a escova em todo o comprimento do corpo de prova.

va e em suas bases, com uma escovação firme correspondendo a 1,5 kg.

Mede-se esta pressão colócano-se um corpo de prova sobre o prato de uma balança e aplicando-se a escova com uma força necessária para acusar, aproximadamente, 1,5 kg a mais do que o peso do corpo de prova.

São requeridas 18 a 20 aplicações para cobrir toda a área lateral, além de 04 aplicações para cada uma das bases.

Quando se tratar de pesquisas com investigações especiais, deve-se pesar o corpo de prova antes e depois do término da escovação em cada ciclo. Assim sendo, a operação pesagem-escovação-pesagem deve ser realizada no menor espaço de tempo possível para que cada espécime absorva apenas um mínimo de umidade do ar.

- c) O procedimento descrito anteriormente nos parágrafos a) e b), constitui 01 ciclo (aproximadamente 47:10 h) de moldagem e secagem. Essas operações deverão ser repetidas durante 12 ciclos. (2) (3)
- d) Após os 12 ciclos, coloca-se os corpos de prova numa estuda

---

(2) A medida que se aumenta o número de espécimes a escovar, ocorre um incremento no tempo que constitui 01 ciclo para cada um deles, podendo o último da série ser retirado da estufa para escovação após 50:00 h

(3) Não sendo possível manter os prazos especificados por causa dos domingos e feriados, os corpos de prova deverão ser mantidos na estufa durante estes dias. Normalmente, o ensaio é planejado de maneira a se fazer as escovações nas segundas, quartas e sextas-feiras, durante o período matutino.

fa com temperatura de 105,0 °C a 110,0 °C até constância de peso, determinando-se assim, para cada corpo de prova o seu peso seco, PsCP.

- e) Com os dados de moldagem das fichas de compactação e os pesos secos dos corpos de prova, pode-se calcular a perda de massa dos corpos de prova, PmCP.

## 5. Cálculos

Para se calcular a perda de massa por ciclo e a perda de massa final de cada corpo de prova, deve-se seguir o roteiro abaixo.

- a) O peso seco inicial de cada corpo de prova pode ser calculado logo após o preenchimento da "Ficha de Compactação", já que depende exclusivamente do peso do corpo de prova úmido e de sua umidade. Utiliza-se a seguinte fórmula.

$$P_{siCP} = PCPh/100 + hCP \cdot 100, \text{ onde:}$$

$P_{siCP}$  = peso seco inicial do corpo de prova (g);

$PCPh$  = peso do corpo de prova úmido (g), e

$hCP$  = umidade do corpo de prova (%)

- b) Corrige-se o peso seco de cada corpo de prova obtido anteriormente segundo explicação do item 4. d), da água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e ficou retida no corpo de prova apesar da temperatura de 110,0 °C, como segue.

$$P_{scCP} = P_{sCP}/100 + A \cdot 100, \text{ sendo:}$$

$P_{scCP}$  = peso seco corrigido do corpo de prova (g);

PsCP = peso seco constante do corpo de prova após secagem em estufa (g), e

A = água retida no corpo de prova após constância de peso (%), obtida através da Tab. 1.

- c) O cálculo da perda de massa parcial do corpo de prova, ou seja, a perda de massa para cada ciclo, é efetuado pela fórmula abaixo.

$$PmpCP = \frac{PsiCP - PCPAE}{PsiCP} \cdot 100, \text{ onde:}$$

PmpCP = perda de massa parcial do corpo de prova (%);

PsiCP = peso seco inicial do corpo de prova (g), e

PCPAE = peso do corpo de prova antes de cada escovação (g).

Como os valores de perda de massa são obtidos pela média de no mínimo 02 espécimes, por condição de ensaio, tem-se:

$$\overline{PmpCP} = \frac{PmpCP_1 + PmpCP_2}{2}, (\%)$$

- d) A perda de massa final de cada corpo de prova é obtida da seguinte maneira.

$$PmfCP = \frac{PsiCP - PscCP}{PsiCP} \cdot 100, \text{ sendo:}$$

PmfCP = perda de massa final do corpo de prova (%);

PsiCP = peso seco inicial do corpo de prova (g), e

PscCP = peso seco corrigido do corpo de prova (g).

Como os valores de perda de massa final são obtidos pela média de no mínimo 02 espécimes, por condição de ensaio, tem-se que:

$$\overline{PmfCP} = \frac{PmfCP_1 + PmfCP_2}{2}, (\%)$$

## 6. Resultados

Com os dados obtidos através das fórmulas citadas no item 5, parágrafos c) e d), deve-se elaborar gráficos para facilitar a análise quanto a durabilidade por molhagem e se cagem no que tange aos teores de cimento e umidade ensaia dos.

## 7. Interpretação dos resultados

a) Será adotado como teor em peso de cimento ensaiado, o me nor dos teores com o qual os corpos de prova de solo-ci<sup>o</sup>mento compactado ou solo-cimento plástico satisfaçam o se guinte requisito.

- A perda de massa final média dos 02 corpos de prova de cada combinação das misturas submetidas ao ensaio em fo<sup>o</sup>co, não deve ser superior aos limites abaixo.

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO A AASHO (TIPOS)	PERDA DE MASSA FINAL APÓS 07 DIAS DE CURA (%)
A1, A2 - 4, A2 - 5 e A3	14
A2 - 6, A2 - 7, A4 e A5	10
A6 e A7	07

b) É admissível fazer uma interpolação dos resultados com o objetivo de determinar o menor teor de cimento que satis faça os requisitos do item anterior.

Tab. 1 - Porcentagem de água retida no corpo de prova em função da classificação do solo pela American Association of State Highway Officials - AASHO (5)

Classificação do solo segundo a AASHO	Porcentagem de água retida
GRUPO	A
A1, A3	1,5
A2,	2,5 (6)
A4, A5	3,0
A6, A7	3,5

(5) NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO (ABCP, 1977)

(6) Como o solo pesquisado é do tipo A2 - 4, tomou-se para A o valor 2,5 % correspondente aos solos do grupo A2

E

ENSAIO A COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA DE SOLO-CI  
MENTO, MÉTODO SC-4 (1)

1. Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual os corpos de prova de solo-cimento devem ser rompidos quando submetidos a uma compressão máxima.

2. Aparelhagem

Necessita-se da seguinte aparelhagem.

- Plaquetas metálicas com arame fino para identificação dos corpos de prova.
- Câmara úmida, com capacidade para manter condições ambientais desejáveis, onde os corpos de prova deverão permanere

---

(1) NORMAS DE DOSAGEM E MÉTODOS DE ENSAIOS DE SOLO-CIMENTO  
(ABCP, 1977)

cer durante 07 dias de cura.

- Câmara de imersão para submergir os corpos de prova em água na temperatura ambiente.
- Prensa destinada à ruptura dos corpos de prova, devendo transmitir-lhes a carga, preferivelmente, de modo progresivo e sem choque, e ter um de seus pratos articulado. A prensa deve ser periodicamente aferida, e todas as suas indicações devem ser corrigidas com auxílio de gráficos ou tabelas.

### 3. Corpos de prova

Os corpos de prova de solo-cimento devem ser moldados de acordo com o Método SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento, Apêndice C, sendo em seguida identificados com as plaquetas metálicas e colocados numa câmara úmida, a uma temperatura próxima de 21,0 °C, por um período de cura de 07 dias.

Durante a moldagem, à medida que se aumenta o teor de umidade e a mistura solo-cimento passa ao estado plástico, deve-se deixar cada corpo de prova no seu respectivo cilindro de compactação por um tempo de 12:00 h para que a mistura endureça, evitando-se assim deformações no espécime, uma vez que a superfície de ambas as bases do mesmo devem apresentar-se lisas e planas, de modo que o contato com os pratos da prensa seja o mais perfeito e íntimo possível. Para este caso, aconselha-se lubrificar com óleo diesel a parede inter

na do cilindro de compactação para facilitar a retirada do espécime.

Deve-se moldar, no mínimo, 03 corpos de prova para cada mistura ensaiada.

#### 4. Ensaio

- a) Ao completarem 07 dias de cura na câmara úmida, os corpos de prova devem ser colocados na câmara de imersão.
- b) Após 4:00 h em imersão, os corpos de prova podem ser removidos da água e enxutos superficialmente numa toalha de tecido felputo. Em seguida, coloca-se cuidadosamente centrado no prato inferior da prensa, um corpo de prova, e aciona-se a máquina (2)
- c) O corpo de prova é rompido a compressão pela elevação progressiva da carga. A velocidade de rompimento deve ser de 1,5 kg/cm<sup>2</sup> por minuto, aproximadamente.

#### 5. Cálculos

O passo inicial para se efetuar os cálculos é a deter

---

(2) Quando necessário, resolve-se eficientemente o problema do contato dos pratos da prensa com o espécime, fazendo-se o capeamento de ambas as bases do mesmo com uma mistura de enxofre e caulim na proporção de 3:1

minação do diâmetro médio do molde ou cilindro de compactação, cuidadosamente medido antes do ensaio, já que o cálculo da área da base do corpo de prova é realizado em função deste dado.

O procedimento para se calcular a Resistência a Compressão de cada corpo de prova, é descrito em seguida.

a) Após o cálculo da área da base do corpo de prova, efetuado pela fórmula  $A_b = \pi \cdot D^2/4$ , determina-se a compressão ou carga progressiva que cada corpo de prova deverá suportar por minuto, conforme se ver a seguir.

$$F = V \cdot A_bCP, \text{ onde:}$$

F = compressão ou carga progressiva por unidade de tempo aplicada através da prensa (kg/min);

V = velocidade de compressão ou de carga por unidade de área (1,5 kg/cm<sup>2</sup>/min), e

$A_bCP$  = área da base do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

b) Regula-se a máquina de modo que o corpo de prova receba a compressão ou carga progressiva por unidade de tempo, conforme a determinação realizada no parágrafo anterior.

c) Obtém-se a Resistência a Compressão de cada corpo de prova, dividindo-se a máxima carga suportada e registrada na máquina pela área da base do respectivo espécime, através da seguinte fórmula.

$$RCCP = P/A_bCP, \text{ sendo:}$$

RCCP = resistência a compressão do corpo de prova (kg/cm<sup>2</sup>);

P = compressão ou carga máxima suportada pelo corpo de prova e registrada na máquina (kg), e

$A_bCP$  = área da base do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

Como os valores de compressão são obtidos pela média

de no mínimo 03 espécimes, por condição de ensaio, tem-se que:

$$\bar{RCCP} = \text{RCCP}_1 + \text{RCCP}_2 + \text{RCCP}_3 / 3$$

## 6. Resultados

- a) Serão eliminados os resultados dos corpos de prova defeituosos e os que se afastarem mais de 10,0 % da média. Contudo, se mais de 02 corpos de prova ultrapassarem este limite, todos os resultados da série normal devem ser desprezados.

## 7. Interpretação dos resultados

- a) Para uma melhor interpretação dos resultados, deve-se fazer gráficos com os dados de resistência obtidos em função dos teores de cimento e umidade ensaiados.
- b) A resistência a compressão dos corpos de prova com teores de cimento satisfazendo o requisito do Método SC-3, deverá aumentar com a idade e com o acréscimo do teor de cimento.

FENSAIO BRASILEIRO DE TENSÃO INDIRETA - EBTI, PARA CORPOS DE  
PROVA DE SOLO-CIMENTO (1)

## 1. Objetivo

Este ensaio fixa o modo pelo qual os corpos de prova de solo-cimento devem ser rompidos quando submetidos a uma compressão máxíma.

Basicamente, este ensaio consiste na aplicação de cargas de compressão a um espécime circular na direção do seu diâmetro. A Fig. 1 mostra esquematicamente o princípio deste ensaio. A falha ocorre por fratura do espécime através de seu diâmetro vertical, conforme se ver na representação da Fig. 1.1.

A teoria de tensão neste ensaio é aplicável somente a materiais que fraturam de maneira quebradiça, não sendo pos

---

(1) O ensaio de tensão indireta, conhecido comumente como Ensaio Brasileiro de Tensão, foi proposto por Lôbo Carneiro e adaptado para solo-cimento segundo os Métodos SC-2 e SC-4 (ABCP, 1977)

sível aplicá-la a materiais que falham plasticamente.

Em resumo, este ensaio determina com metodologia adaptada do Ensaio a Compressão de Corpos de Prova de Solo-Cimento, Método SC-4 (ABCP, 1977), um novo procedimento pelo qual corpos de prova de solo-cimento devem ser rompidos quando submetidos a uma tensão indireta máxima.

## 2. Aparelhagem

Necessita-se da seguinte aparelhagem.

- Plaquetas metálicas com arame fino para identificação dos corpos de prova.
- Câmara úmida, com capacidade para manter condições ambientais desejáveis, onde os corpos de prova poderão permanecer durante os 07 dias de cura.
- Câmara de imersão para submergir os corpos de prova em água na temperatura ambiente.
- Prensa destinada à rotura dos corpos de prova, devendo transmitir-lhes a carga, preferivelmente, de modo progressivo e sem choque, e ter um de seus pratos articulado. A prensa deve ser periodicamente aferida, seguindo-se as instruções contidas no seu manual de conservação e manutenção.

### 2.1. Adaptação

Para que este ensaio seja realizado, necessário se faz a construção de duas peças de ferro com forma de paralelepípedo retângulo, com 1/2" quadrada (1,27 cm<sup>2</sup>) de base e altura de acordo com o comprimento do espécime, contendo em ambas uma curvatura que será aberta em função do raio do próprio corpo de prova, como se pode ver na sequência esquemática a partir da Fig. 1.2. Estas peças serão fixadas em dois pratos, também construídos especialmente para o ensaio, e que substituirão os pratos da prensa.

### 3. Corpos de prova

Os corpos de prova de solo-cimento devem ser moldados de acordo com o Método SC-2, Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Cimento, Apêndice C, sendo em seguida identificados com as plaquetas metálicas e colocados numa câmara única, a uma temperatura próxima de 21,0 °C, por um período de cura de 07 dias.

Durante a moldagem, à medida que se aumenta o teor de umidade e a mistura solo-cimento passa ao estado plástico, deve-se deixar cada corpo de prova no seu respectivo cilindro de compactação por um tempo de 12:00 h para que a mistura endureça, evitando-se assim deformações no espécime, uma vez que a superfície da periferia do mesmo deve ficar em perfeito estado, de modo que o contato com a curvatura das peças seja o mais íntimo e completo possível. Neste caso, aconselha-se lubrificar com óleo diesel a parede interna do ci

lindro de compactação para facilitar a retirada do espécime.

Deve-se moldar, no mínimo, 03 corpos de prova para cada mistura ensaiada.

#### 4. Ensaio

- a) Ao completarem 07 dias de cura na câmara úmida, os corpos de prova devem ser colocados na câmara de imersão.
- b) Após 4:00 h em imersão, os corpos de prova devem ser removidos da água e enxutos superficialmente numa toalha de tecido felpudo. Em seguida, coloca-se cuidadosamente centrado na curvatura da peça do prato inferior da prensa, um corpo de prova no sentido longitudinal, e aciona-se a máquina lentamente até que esta inicie a pressão ao corpo de prova.
- c) O corpo de prova é rompido a uma tensão máxima pela elevação progressiva da carga. A velocidade de rompimento deve ser de 1,5 kg/cm<sup>2</sup> por minuto, aproximadamente.

#### 5. Cálculos

O primeiro cálculo a ser realizado neste ensaio, é a determinação do ângulo de curvatura a ser aberto em ambas as peças que deverão ser construídas e adaptadas à máquina, para se obter a tensão indireta.

De acordo com a Fig. 1.4., determina-se que:

$\text{sen } \alpha \cong 0,635 \text{ cm/ r}$ , onde:

$r$  = raio do corpo de prova (cm).

Determinado o ângulo, que vai depender do raio do corpo de prova a ser ensaiado, constrói-se as peças que serão diametralmente fixadas em dois pratos também construídos especialmente para este ensaio. (2)

O procedimento para se calcular a Resistência a Tensão Indireta de cada corpo de prova, é apresentado a seguir.

a) Para se obter a constante  $k$  de conversão da carga para a tensão indireta, efetua-se os seguintes cálculos.

$a = 1''/2 \cong 2,54 \text{ cm}/2 = 1,27 \text{ cm}$ , sendo:

$a$  = largura de ambas as peças (cm).

Com os dados de:

$r$  = raio do corpo de prova (cm);

$d$  = diâmetro do corpo de prova (cm), e

$h$  = altura do corpo de prova (cm),

tem-se que:

$$\text{sen } \alpha = a/2 r,$$

logo:

$$\text{cos } \alpha = 1 - (\text{sen } \alpha)^2,$$

então:

$$k = \frac{(2 \text{ sen } \alpha \cdot \text{cos } \alpha - a/d)}{\pi \cdot a \cdot h} \cdot 2, \text{ onde:}$$

$k$  = constante de conversão da carga para tensão indireta (cm<sup>2</sup>).

---

(2) No cilindro de compactação utilizado no cálculo da curvatura de ambas as peças, deverão ser moldados todos os corpos de prova a serem rompidos neste ensaio

- b) Calcula-se a Resistência a Tensão Indireta de cada corpo de prova, multiplicando-se a máxima compressão ou carga registrada na máquina pela constante k de conversão da carga para a tensão indireta, ou seja:

$$RTICP = P \cdot k, \text{ sendo:}$$

RTICP = resistência a tensão indireta do corpo de prova (kg/cm<sup>2</sup>);

P = compressão ou carga máxima suportada pelo corpo de prova e registrada na máquina (Kg), e

k = constante de conversão da carga em tensão indireta (cm<sup>2</sup>).

Como os valores de tensão indireta são obtidos pela média de no mínimo 03 espécimes, por condição de ensaio, tem-se que:

$$\bar{RTICP} = RTICP_1 + RTICP_2 + RTICP_3 / 3$$

## 6. Resultados

- a) Serão eliminados os resultados dos corpos de prova defeituosos e os que se afastarem mais de 10,0% da média. Contudo, se mais de 02 corpos de prova ultrapassarem este limite, todos os resultados da série normal devem ser desprezados.

## 7. Interpretação dos resultados

- a) Para uma melhor interpretação dos resultados, deve-se fazer gráficos com os dados de resistência obtidos em função dos teores de cimento e umidade ensaiados.
- b) A resistência a tensão indireta dos corpos de prova com teores de cimento satisfazendo o requisito do Método SC-3, deverá aumentar com a idade e com o acréscimo do teor de cimento.

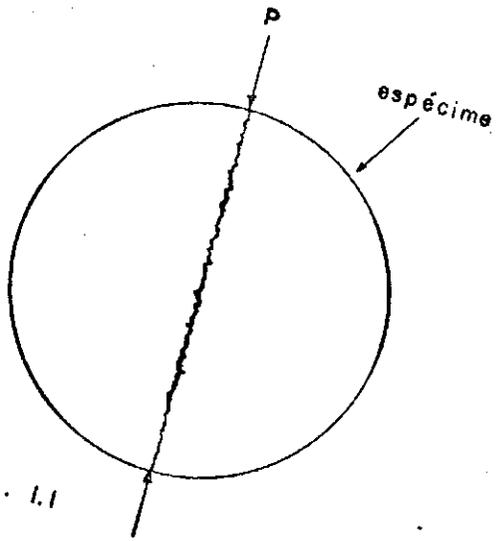


Fig. 1.1

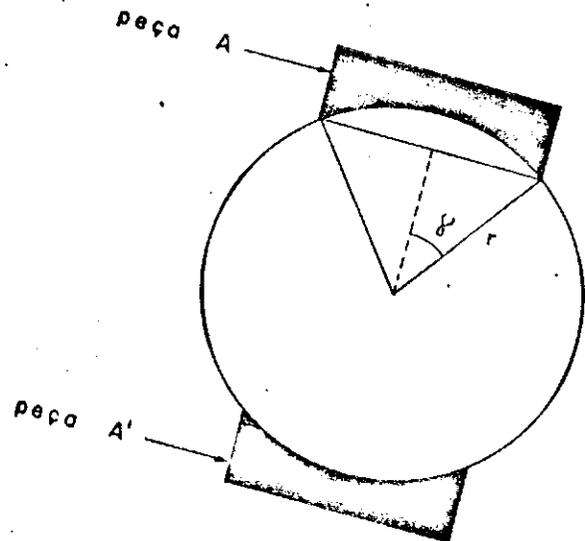


Fig. 1.2

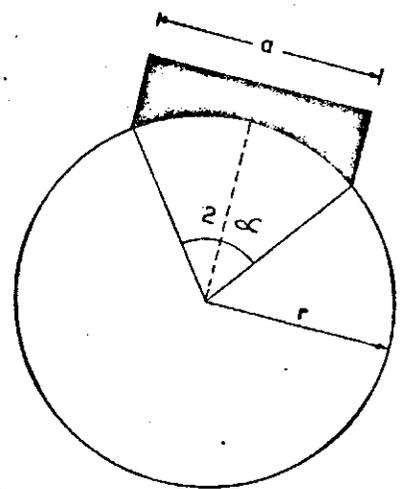


Fig. 1.3

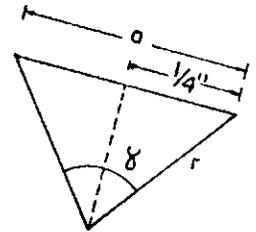


Fig. 1.4

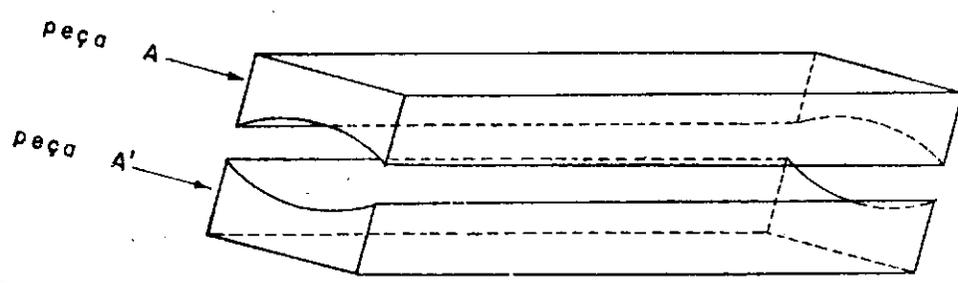


Fig. 1.5

Fig. 1

- Croquis esquemático do princípio do Ensaio de Tensão Indireta

G

RESULTADOS DO ENSAIO DE MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA DE SOLO-  
CIMENTO, MÉTODO SC-2 (ABCP, 1977)

Tab. 1 - Valores das umidades médias contidas nos corpos de prova submetidos ao Método SC-3, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{h}_{CP}$ (%)					
4,0	8,5	9,2	10,2	12,0	14,9	16,7
6,0	8,2	9,1	10,8	12,9	14,6	16,4
8,0	8,4	9,0	10,3	12,6	14,3	16,3
10,0	8,3	9,7	10,4	12,5	14,6	16,4
12,0	8,3	9,4	10,4	12,7	14,4	16,2
14,0	8,1	9,5	10,3	12,4	14,3	16,3
16,0	8,2	9,4	10,7	12,1	14,4	16,3
18,0	8,0	9,6	10,3	12,8	14,2	16,4
20,0	8,0	9,4	10,3	12,5	14,4	16,1
Hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{h}_{CP}$ . umidade média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 2 - Valores das massas específicas aparentes secas médias dos corpos de prova submetidos ao Método SC-3, em função dos teores de cimento e de umidade de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{\gamma}_s, CP$ (g/dm <sup>3</sup> )					
4,0	1925,4	1937,2	1950,0	1887,9	1780,8	1749,6
6,0	1925,9	1939,0	1942,1	1879,6	1796,4	1761,4
8,0	1934,3	1950,9	1961,2	1897,0	1798,7	1772,7
10,0	1941,2	1952,7	1969,0	1898,4	1815,1	1776,6
12,0	1954,1	1961,6	1962,3	1911,2	1832,2	1784,5
14,0	1958,8	1971,4	1970,6	1926,3	1832,1	1791,6
16,0	1958,5	1971,9	1978,3	1933,7	1840,3	1801,9
18,0	1970,9	1980,6	1985,2	1927,8	1848,2	1811,9
20,0	1977,2	1990,1	1988,9	1934,1	1850,9	1816,0
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{\gamma}_s, CP.$  massa específica aparente seca média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 3 - Valores das unidades médias contidas nos corpos de prova submetidos ao Método SC-4, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{h}_{CP}$ (%)					
4,0	8,3	9,2	10,2	12,6	14,8	16,4
6,0	8,3	9,5	10,2	12,5	14,6	16,3
8,0	8,4	9,2	10,3	12,4	14,5	16,4
10,0	8,3	9,7	10,5	12,7	14,6	16,0
12,0	8,6	9,4	10,7	12,4	14,2	16,2
14,0	8,7	9,4	10,8	12,2	14,3	16,0
16,0	8,7	9,6	10,5	12,4	14,5	16,6
18,0	8,3	9,6	10,5	12,5	14,5	16,1
20,0	8,5	9,4	10,7	12,4	14,2	16,3
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{h}_{CP}$ . unidade média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 4 - Valores das massas específicas aparentes secas médias dos corpos de prova submetidos ao Método SC-4, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{\gamma}_s, CP$ (g/dm <sup>3</sup> )					
4,0	1909,0	1930,2	1946,2	1875,7	1791,3	1755,7
6,0	1936,1	1945,9	1957,4	1889,3	1799,3	1766,5
8,0	1936,9	1944,1	1964,6	1897,6	1807,1	1777,0
10,0	1949,6	1958,1	1969,9	1903,3	1807,5	1780,2
12,0	1943,6	1963,8	1983,3	1918,1	1825,0	1792,6
14,0	1962,3	1961,7	1985,6	1937,0	1837,4	1797,9
16,0	1979,4	1978,4	1992,6	1930,0	1831,8	1798,3
18,0	1971,9	1984,2	2001,5	1930,5	1843,1	1804,0
20,0	1980,0	1995,9	2007,7	1940,2	1848,9	1811,5
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{\gamma}_s, CP$ . massa específica aparente seca média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 5 - Valores das umidades médias contidas nos corpos de prova submetidos ao EBTI, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{h}_{CP}$ (%)					
4,0	8,8	9,3	10,2	12,3	14,5	16,3
6,0	8,5	9,6	10,0	12,5	14,0	16,6
8,0	8,9	9,5	10,6	12,7	14,5	16,3
10,0	8,4	9,3	10,1	12,6	14,1	16,1
12,0	8,9	9,5	10,5	12,2	14,6	16,2
14,0	8,2	9,6	10,9	12,9	14,3	16,1
16,0	8,4	9,7	10,9	12,4	14,4	16,0
18,0	8,5	9,6	10,5	12,3	14,4	16,1
20,0	8,4	9,7	10,7	12,0	14,3	16,0
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{h}_{CP}$ . umidade média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

Tab. 6 - Valores das massas específicas aparentes secas médias dos corpos de prova submetidos ao EBTI, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-2

Tc (%)	$\bar{\gamma}_s, CP$ (g/dm <sup>3</sup> )					
4,0	1922,3	1937,4	1941,5	1884,4	1799,1	1760,8
6,0	1919,2	1954,5	1953,6	1896,7	1814,5	1759,6
8,0	1931,4	1963,4	1949,8	1898,2	1815,8	1771,7
10,0	1943,4	1967,0	1958,4	1915,0	1831,8	1786,3
12,0	1955,9	1972,5	1974,0	1928,8	1821,0	1788,4
14,0	1957,7	1979,2	1980,8	1909,6	1836,9	1790,6
16,0	1964,6	1983,1	1984,5	1932,4	1845,6	1807,7
18,0	1982,6	2000,8	1995,3	1950,0	1846,2	1810,3
20,0	2005,1	2002,3	2002,5	1954,4	1854,4	1824,7
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{\gamma}_s, CP$ : massa específica aparente seca média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

H

RESULTADOS DO ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM,  
MÉTODO SC-3 (ABCP, 1977)

Tab. 1 - Valores das perdas de massa parciais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e umidade média ensaiada variando de 8,0 % a 9,0 %

MÉTODO SC-3

Tc (%)	$\overline{PmpCP}$ (%)											
	1ºC	2ºC	3ºC	4ºC	5ºC	6ºC	7ºC	8ºC	9ºC	10ºC	11ºC	12ºC
4,0	0,8	6,9	11,5	16,5	21,9	29,4	34,9	39,6	40,5	42,1	44,2	46,1
6,0	0,1	3,5	6,3	9,2	12,4	17,1	20,2	23,0	24,2	25,1	26,5	27,1
8,0	- 0,2	2,1	4,6	6,8	8,9	11,3	14,1	14,8	15,4	16,0	16,6	17,1
10,0	- 0,8	0,3	2,5	3,7	4,8	5,8	7,2	7,5	7,8	8,0	8,5	8,7
12,0	- 1,1	- 0,3	0,9	2,5	3,3	4,4	5,3	5,6	5,8	6,0	6,4	6,6
14,0	- 1,3	- 0,5	- 0,1	1,1	1,8	2,7	3,4	3,7	3,9	4,2	4,6	4,9
16,0	- 1,5	- 0,8	- 0,3	0,0	0,8	1,7	1,8	1,9	2,1	2,1	2,3	2,5
18,0	- 2,8	- 1,6	- 0,9	- 0,5	- 0,2	- 0,1	0,0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9
20,0	- 3,0	- 2,1	- 1,3	- 0,9	- 0,6	- 0,5	- 0,5	- 0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,3	- 0,2
$\overline{hCP}$ (%)	8,0 a 9,0											

Tc. teor de cimento ensaiado

$\overline{PmpCP}$ . perda de massa parcial média dos corpos de prova

C. ciclo

$\overline{hCP}$ . umidade média do corpo de prova

Tab. 2 - Valores das perdas de massa parciais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e umidade média ensaiada variando de 9,0 % a 10,0 %

MÉTODO SC-3

Tc (%)	$\overline{PmpCP}$ (%)											
	1ºC	2ºC	3ºC	4ºC	5ºC	6ºC	7ºC	8ºC	9ºC	10ºC	11ºC	12ºC
4,0	0,6	7,0	12,6	20,3	25,7	31,8	33,2	35,2	37,2	39,2	40,3	41,7
6,0	- 0,4	2,4	4,7	6,4	9,1	10,4	11,2	11,9	12,6	12,9	13,1	13,4
8,0	- 0,6	0,4	1,9	2,7	4,3	5,0	5,2	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8
10,0	- 0,8	- 0,7	- 0,6	- 0,5	- 0,5	- 0,3	- 0,3	- 0,3	- 0,2	- 0,1	- 0,1	0,0
12,0	- 1,1	- 0,9	- 0,9	- 0,8	- 0,7	- 0,7	- 0,7	- 0,6	- 0,5	- 0,4	- 0,4	- 0,3
14,0	- 1,3	- 1,2	- 1,2	- 1,1	- 1,1	- 1,0	- 0,9	- 0,9	- 0,8	- 0,8	- 0,7	- 0,7
16,0	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,4	- 1,3	- 1,2	- 1,2	- 1,0	- 1,0	- 0,9	- 0,9
18,0	- 2,0	- 1,8	- 1,8	- 1,7	- 1,7	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,3	- 1,2	- 1,1
20,0	- 2,4	- 2,2	- 2,2	- 2,1	- 2,0	- 1,9	- 1,8	- 1,8	- 1,7	- 1,5	- 1,4	- 1,3
$\overline{hCP}$ (%)	9,0 a 10,0											

Tc. teor de cimento ensaiado

$\overline{PmpCP}$ . perda de massa parcial média dos corpos de prova

C. ciclo

$\overline{hCP}$ . umidade média do corpo de prova

Tab. 3 - Valores das perdas de massa parciais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e umidade média ensaiada variando de 10,0 % a 11,0 %

MÉTODO SC-3

T <sub>c</sub> (%)	$\overline{P_{mpCP}}$ (%)											
	1ºC	2ºC	3ºC	4ºC	5ºC	6ºC	7ºC	8ºC	9ºC	10ºC	11ºC	12ºC
4,0	4,0	7,0	16,9	19,1	22,2	25,3	27,4	28,8	29,9	30,9	33,0	35,6
6,0	- 0,3	2,3	6,9	7,9	8,8	9,5	9,8	9,8	9,9	10,4	10,8	11,8
8,0	- 0,8	0,5	2,8	2,9	3,2	3,4	3,6	3,7	3,7	3,9	4,2	4,5
10,0	- 1,2	- 1,0	- 0,9	- 0,9	- 0,7	- 0,7	- 0,6	- 0,6	- 0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,3
12,0	- 1,5	- 1,4	- 1,3	- 1,2	- 1,2	- 1,1	- 1,1	- 1,0	- 0,9	- 0,9	- 0,9	- 0,8
14,0	- 1,8	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,4	- 1,3	- 1,3	- 1,2	- 1,1	- 1,1	- 1,0
16,0	- 2,0	- 1,8	- 1,7	- 1,7	- 1,7	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,4	- 1,3	- 1,2
18,0	- 2,3	- 2,1	- 2,0	- 2,0	- 2,0	- 1,9	- 1,8	- 1,8	- 1,7	- 1,6	- 1,5	- 1,4
20,0	- 2,7	- 2,5	- 2,3	- 2,3	- 2,3	- 2,2	- 2,1	- 2,1	- 2,0	- 1,9	- 1,8	- 1,7
$\overline{h_{CP}}$ (%)	10,0 a 11,0											

T<sub>c</sub>. teor de cimento ensaiado

$\overline{P_{mpCP}}$ . perda de massa parcial média dos corpos de prova

C. ciclo

$\overline{h_{CP}}$ . umidade média do corpo de prova

Tab. 4 - Valores das perdas de massa parciais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e umidade média ensaiada variando de 12,0 % a 13,0 %

MÉTODO SC-3

Tc (%)	$\overline{PmpCP}$ (%)											
	1ºC	2ºC	3ºC	4ºC	5ºC	6ºC	7ºC	8ºC	9ºC	10ºC	11ºC	12ºC
4,0	0,1	3,8	6,7	9,6	12,3	14,6	16,9	18,8	20,2	21,7	23,4	26,3
6,0	- 0,3	1,4	3,5	5,4	5,7	6,4	7,0	8,0	8,5	9,1	9,9	11,5
8,0	- 0,8	- 0,2	1,0	1,3	1,6	1,9	2,1	2,6	2,8	3,0	3,3	3,8
10,0	- 1,7	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,3	- 1,2	- 1,1	- 1,1	- 1,0	- 0,8	- 0,7
12,0	- 2,3	- 2,2	- 2,2	- 2,1	- 2,0	- 2,0	- 1,8	- 1,8	- 1,7	- 1,6	- 1,5	- 1,4
14,0	- 2,7	- 2,6	- 2,6	- 2,5	- 2,4	- 2,4	- 2,3	- 2,3	- 2,2	- 2,1	- 2,1	- 2,0
16,0	- 3,0	- 2,9	- 2,9	- 2,8	- 2,7	- 2,7	- 2,7	- 2,6	- 2,5	- 2,4	- 2,4	- 2,3
18,0	- 3,4	- 3,3	- 3,3	- 3,2	- 3,1	- 3,1	- 3,1	- 3,0	- 3,0	- 3,0	- 2,9	- 2,8
20,0	- 3,6	- 3,5	- 3,5	- 3,4	- 3,3	- 3,3	- 3,3	- 3,2	- 3,2	- 3,2	- 3,1	- 3,0
$\overline{hCP}$ (%)	12,0 a 13,0											

Tc. teor de cimento ensaiado

$\overline{PmpCP}$ . perda de massa parcial média dos corpos de prova

C. ciclo

$\overline{hCP}$ . umidade média do corpo de prova

Tab. 5 - Valores das perdas de massa parciais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e umidade média ensaiada variando de 14,0 % a 15,0 %

MÉTODO SC-3

Tc (%)	$\overline{P_{mpCP}}$ (%)											
	19C	29C	39C	49C	59C	69C	79C	89C	99C	109C	119C	129C
4,0	0,4	5,9	12,6	20,4	27,1	33,5	40,3	46,5	49,6	52,4	55,4	58,2
6,0	- 0,5	0,3	2,2	4,2	5,9	7,6	9,7	11,2	12,5	13,1	13,8	14,3
8,0	- 1,0	- 0,5	- 0,1	0,5	1,5	2,0	2,5	2,9	3,5	4,0	4,5	5,0
10,0	- 1,4	- 1,2	- 1,0	- 0,9	- 0,8	- 0,7	- 0,7	- 0,7	- 0,6	- 0,6	- 0,6	- 0,5
12,0	- 1,7	- 1,6	- 1,5	- 1,4	- 1,3	- 1,2	- 1,2	- 1,2	- 1,1	- 1,1	- 1,1	- 1,0
14,0	- 2,1	- 2,0	- 1,9	- 1,8	- 1,7	- 1,7	- 1,6	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,5	- 1,4
16,0	- 2,4	- 2,3	- 2,2	- 2,1	- 2,1	- 2,1	- 2,0	- 1,9	- 1,9	- 1,8	- 1,8	- 1,7
18,0	- 2,6	- 2,5	- 2,4	- 2,4	- 2,4	- 2,4	- 2,3	- 2,2	- 2,2	- 2,1	- 2,1	- 2,0
20,0	- 2,8	- 2,7	- 2,7	- 2,6	- 2,6	- 2,6	- 2,5	- 2,5	- 2,4	- 2,4	- 2,4	- 2,3
$\overline{h_{CP}}$ (%)	14,0 a 15,0											

Tc. teor de cimento ensaiado

$\overline{P_{mpCP}}$ . perda de massa parcial média dos corpos de prova

$\overline{h_{CP}}$ . umidade média do corpo de prova

Tab. 6 - Valores das perdas de massa parciais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e umidade média ensaiada variando de 16,0 % a 17,0 %

MÉTODO SC-3

Tc (%)	$\overline{PmpCP}$ (%)											
	1ºC	2ºC	3ºC	4ºC	5ºC	6ºC	7ºC	8ºC	9ºC	10ºC	11ºC	12ºC
4,0	0,4	6,9	13,8	22,1	29,8	35,8	43,9	49,5	54,6	57,4	60,4	62,8
6,0	- 0,2	1,7	4,3	7,3	10,4	12,2	15,0	16,1	17,2	18,6	19,5	20,7
8,0	- 0,5	- 0,2	0,7	2,0	3,0	3,7	4,6	5,0	5,5	5,7	6,0	6,5
10,0	- 1,2	- 1,1	- 1,0	- 0,9	- 0,8	- 0,7	- 0,7	- 0,7	- 0,6	- 0,6	- 0,5	- 0,4
12,0	- 1,5	- 1,4	- 1,3	- 1,3	- 1,2	- 1,2	- 1,2	- 1,1	- 1,1	- 1,1	- 1,0	- 0,9
14,0	- 1,8	- 1,7	- 1,7	- 1,7	- 1,6	- 1,6	- 1,6	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,4	- 1,3
16,0	- 2,1	- 2,1	- 2,1	- 2,0	- 2,0	- 1,9	- 1,9	- 1,9	- 1,9	- 1,8	- 1,8	- 1,7
18,0	- 2,7	- 2,7	- 2,6	- 2,6	- 2,6	- 2,5	- 2,5	- 2,5	- 2,4	- 2,4	- 2,3	- 2,2
20,0	- 3,0	- 3,0	- 3,0	- 2,9	- 2,9	- 2,9	- 2,8	- 2,8	- 2,8	- 2,7	- 2,7	- 2,6
$\overline{hCP}$ (%)	16,0 a 17,0											

Tc. teor de cimento ensaiado

$\overline{PmpCP}$ . perda de massa parcial média dos corpos de prova

C. Ciclo

$\overline{hCP}$ . umidade média do corpo de prova

Tab. 7 - Valores das perdas de massa finais médias dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-3

Tc (%)	$\overline{\text{PmfCP}}$ (%)					
4,0	49,2	44,4	40,4	31,4	61,7	66,3
6,0	29,9	16,2	15,2	13,3	17,6	23,9
8,0	18,4	8,6	7,1	6,2	6,5	8,3
10,0	12,4	6,8	4,8	3,4	3,9	4,6
12,0	9,3	5,4	3,6	2,0	2,7	2,9
14,0	7,5	4,2	2,8	1,2	2,0	2,1
16,0	6,1	3,2	2,1	0,7	1,4	1,6
18,0	4,8	2,2	1,4	0,3	0,9	1,2
20,0	3,6	1,2	1,0	0,2	0,5	0,8
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\overline{\text{PmfCP}}$ . perda de massa final média dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

1

RESULTADOS DO ENSAIO A COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA DE SO  
LO-CIMENTO, MÉTODO SC-4 (ABCP, 1977)

Tab. 1 - Valores das resistências médias a compressão simples dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## MÉTODO SC-4

Tc (%)	$\bar{RCCP}$ (kg/cm <sup>2</sup> )					
4,0	8,6	8,2	8,0	5,4	4,8	3,9
6,0	21,5	21,0	18,4	14,9	12,5	11,0
8,0	34,4	33,8	28,7	24,3	20,4	18,2
10,0	47,2	46,4	39,1	33,6	28,3	25,3
12,0	60,0	59,4	49,4	43,0	36,0	32,5
14,0	72,7	72,0	59,8	52,4	43,9	39,7
16,0	85,7	85,0	70,2	61,8	51,7	46,9
18,0	98,5	97,8	80,5	71,2	59,6	54,1
20,0	111,3	110,5	90,7	80,6	67,4	61,2
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{RCCP}$ . resistência média a compressão simples dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada

|J

RESULTADOS DO ENSAIO BRASILEIRO DE TENSÃO INDIRETA (EBTI), PA  
RA CORPOS DE PROVA DE SOLO-CIMENTO

Tab. 1 - Valores das resistências médias a tensão indireta dos corpos de prova, após 07 dias de cura, em função dos teores de cimento e de umidades de moldagem ensaiados

## EBTI

Tc (%)	$\bar{R}TICP$ (kg/cm <sup>2</sup> )					
4,0	1,1	1,1	1,0	0,7	0,6	0,6
6,0	2,9	2,7	2,4	2,1	1,8	1,7
8,0	4,7	4,4	3,9	3,4	3,0	2,7
10,0	6,5	6,0	5,3	4,7	4,2	3,8
12,0	8,4	7,7	6,7	6,0	5,4	4,9
14,0	10,2	9,3	8,1	7,4	6,7	5,9
16,0	12,0	11,0	9,5	8,7	7,9	7,0
18,0	13,8	12,6	10,9	10,0	9,1	8,1
20,0	15,6	14,2	12,3	11,3	10,3	9,2
hm (%)	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Tc. teor de cimento ensaiado

$\bar{R}TICP$ . resistência média a tensão indireta dos corpos de prova

hm. umidade de moldagem ensaiada