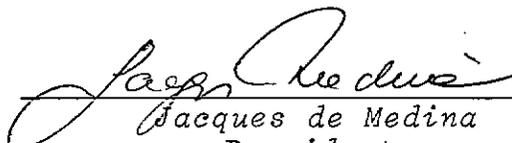


ESTABILIZAÇÃO DE AREIA COM CINZA VOLANTE E CAL;  
EFEITO DO CIMENTO COMO ADITIVO E DE BRITA NA MISTURA

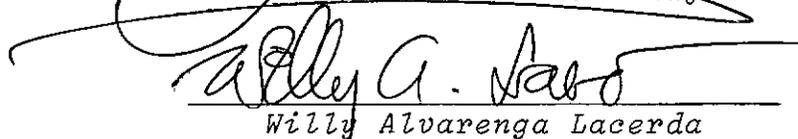
JOSÉ VIDAL NARDI

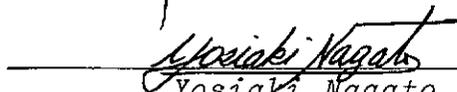
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS  
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Jacques de Medina  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Galileo Antenor de Araujo

  
\_\_\_\_\_  
Willy Alvarenga Lacerda

  
\_\_\_\_\_  
Yosiaki Nagato

RIO DE JANEIRO  
ESTADO DO RIO DE JANEIRO - BRASIL  
DEZEMBRO DE 1975

Palavras não expressariam, jamais,  
o suor e as lágrimas que por mim  
verteram e a felicidade que me  
proporcionam.

Germano Schwartz Filho

João Nardi

Iris Emília Schwartz

Lígia Haidêe Nardi

Dayse Costa de Abreu

Eduard Wolfgang Von Eschenbach Nardi

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Professor Jacques de Medina, orientador desta tese, os meus sinceros agradecimentos pela sua atenção, incentivo e colaboração que recebi durante a elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Ivan Paes Leme e Galileo Antenor de Araujo, respectivamente Diretor e Vice-Diretor do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), pelo interesse que têm demonstrado por esta pesquisa.

Ao Dr. Rui Barbosa da Silva, Chefe da Divisão de Pesquisas e ao Dr. Salomão Pinto, pelas facilidades de trabalho nas dependências da referida Divisão.

Ao Dr. Geraldo Monteiro Vieira e Dr. Francisco de Assis Menescal Fabrício, por terem sido sensíveis às minhas pretensões junto à Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE).

Ao Dr. Mário Kabalem Reston, pela sua compreensão e interesse pelo referido trabalho.

Aos Professores da Área de Mecânica dos Solos, pelos conhecimentos adquiridos.

A todos os colegas, amigos e funcionários, que de uma forma direta ou indireta, participaram na realização deste trabalho.

em relação à soma dos outros três componentes, procurando - se determinar o efeito da brita na mistura.

Todas as misturas foram compactadas com duas energias de compactação: a do Proctor intermediário e a do modificado. Os corpos de prova cilíndricos têm 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro. Três idades de cura foram adotadas: 7, 14 e 28 dias. Ensaios realizados: compressão axial simples e compressão diametral. Obtiveram-se valores de resistência à compressão axial simples variando de 2,1 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> até 94 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, e à compressão diametral variando de 2,2 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> até 10,4 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, conforme a dosagem, umidade de moldagem, energia de compactação e tempo de cura.

A experiência de laboratório comprova as possibilidades deste tipo de estabilização de solos, em dosagens que atenderão a uma gama bastante ampla de utilização em sub-bases e bases de pavimentos.

S U M Á R I O

O objetivo deste trabalho é o estudo, em laboratório, da estabilização de um solo arenoso misturado à cinza volante e cal hidratada cálcica e a verificação do efeito de adições de cimento portland e de brita na resistência da mistura.

A fim de destacar a atuação da cinza volante escolheu-se um solo não coesivo — areia uniforme de duna costeira — que geralmente não é dos mais indicados à estabilização com cimento e muito menos com cal. A estabilização é desenvolvida pela cimentação dos grãos de areia, resultante da reação pozolânica entre a cal e a cinza, quando umedecidas. Foram estudadas três misturas diferentes. A primeira com 4% de cal, 13% de cinza volante e 83% de areia de dunas foi considerada como mistura básica. A segunda com 4% de cal, 13% de cinza volante e 83% de areia de dunas, acrescida de 1% de cimento portland de alta resistência inicial, em relação à soma dos outros três componentes, para verificar o efeito do cimento como aditivo. A terceira com 4% de cal, 13% de cinza volante, 53% de areia de dunas e 30% de pedra britada, acrescida de 1% de cimento portland de alta resistência inicial,

A B S T R A C T

A laboratory study on the stabilization of sand with fly ash and hidrated calcitic lime, and the effects of admixing portland cement and crushed stone on the compressive strength of the mix.

In order to enhance fly ash role the soil chosen was a non-cohesive one — a uniform dune sand — which is not quite suitable for stabilization with cement and not at all with lime. Stabilization effect results from cementation of sand grains by the product from pozzolanic reaction of lime with fly ash in wet condition. Three different mixtures were studied.

First mixture: lime 4%, fly ash 13%, sand 83%, considered the basic one. Second mixture: same with 1% portland cement of high early strength to study its effect as additive. Third mixture: lime 4%, fly ash 13%, sand 53%, crushed stone 30%, added 1% portland cement of high early strength; studied effect of adding crushed stone to the mix.

All mixes were compacted using two energies: intermediate and modified compactive efforts. Cylindrical specimens, height 20 cm, diameter 10 cm. Curing ages: 7, 14 and 28 days. Testing: axial compression and diammetrical (split tensile) compression. Unconfined compressive strengths varied from 2,1 to 94  $\text{kg}_f / \text{cm}^2$ , and tensile strength from 2,2 to 10,4  $\text{kg}_f / \text{cm}^2$ , depending on mix composition, compaction effort, and curing time.

Laboratory experiments confirm possibilities of this kind of soil stabilization suitable for many applications in sub-base and base pavement courses.

I N D I C E

	pg.
<u>C A P Í T U L O I</u> .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	2
<u>C A P Í T U L O I I</u> .....	6
2. COMENTÁRIOS PRELIMINARES .....	7
2.1 - Histórico do Uso das Cinzas .....	7
2.2 - Situação Atual Quanto ao Uso de Cinzas Volantes .....	11
<u>C A P Í T U L O I I I</u> .....	15
3. REAÇÕES POZOLÂNICAS .....	16
<u>C A P Í T U L O I V</u> .....	19
4. MATERIAIS USADOS NA ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA .....	20
4.1 - Cinza Volante .....	20
4.1.1 - Obtenção do Carvão Mineral .....	20
4.1.2 - Termelétricidade na Região Sul.....	24
4.1.3 - Processo de Obtenção das Cinzas Volantes .....	27

	pg.
4.1.3.1 - Classificação do carvão mine- ral .....	28
4.1.3.2 - Obtenção das cinzas volantes.	28
4.1.4 - Enquadramento do Material em Função de Algumas Normas Existentes.....	30
4.1.4.1 - Requisitos químicos.....	30
4.1.4.2 - Requisitos físicos.....	38
4.1.5 - Capacidade de Produção, Atual e Futura, de Cinzas Volantes.....	39
4.2 - Cal Hidratada.....	42
4.2.1 - Origem da Cal.....	42
4.2.2 - Tipos de Cales Hidratadas.....	43
<u>C A P Í T U L O V</u> .....	46
5. REVISÃO DA LITERATURA .....	47
5.1 - Propriedades Físicas para a Engenharia .....	47
5.1.1 - Resistência à Compressão.....	47
5.1.2 - Módulo de Elasticidade.....	48
5.1.3 - Coeficiente de Poisson.....	49
5.1.4 - C B R .....	50
5.1.5 - Ensaio Triaxial.....	51
5.1.6 - Auto-cimentação.....	51
5.1.7 - Fadiga.....	52

	pg.
5.1.8 - Durabilidade.....	53
5.2 - Fatores que Influenciam a Reação Pozolânica ...	53
5.2.1 - Materiais.....	54
5.2.2 - Proporções.....	58
5.2.3 - Processos de Execução.....	58
5.2.4 - Cura.....	59
<u>C A P Í T U L O V I</u> .....	61
6. PROGRAMA DE PESQUISA .....	62
<u>C A P Í T U L O V I I</u> .....	70
7. MATERIAIS UTILIZADOS.....	71
7.1 - Cinza Volante.....	71
7.2 - Cal Hidratada.....	71
7.3 - Aditivo.....	76
7.4 - Agregado .....	76
7.5 - Solo .....	76

	pg.
<u>C A P Í T U L O   V I I I</u> .....	86
8. MÉTODO DE ENSAIOS.....	87
8.1 - Mistura.....	87
8.2 - Moldagem.....	87
8.3 - Cura.....	89
8.4 - Imersão.....	89
8.5 - Rompimento.....	89
 <u>C A P Í T U L O   I X</u> .....	 90
9. RESULTADOS.....	91
9.1 - Mistura 1 (Para Ensaio de Resistência à Com- pressão Simples).....	91
9.2 - Mistura 2 (para Ensaio de Resistência à Com- pressão Simples).....	98
9.3 - Mistura 3.....	104
9.3.1 - Mistura 3 (para Ensaio de Resistência à Compressão Simples).....	104
9.3.2 - Mistura 3 (para Ensaio de Resistência à Compressão Diametral).....	111
9.3.3 - Mistura 3 (Relação entre a Resistência à Compressão Simples e a Resistência à Compressão Diametral) .....	117

	pg.
9.3.3.1 - Mistura 3 (para o esforço intermediário) .....	118
9.3.3.2 - Mistura 3 (para o esforço modificado) .....	122

## C A P Í T U L O X

10. DISCUSSÕES .....	127
10.1 - Análise dos Resultados das Misturas .....	127
10.2 - Relação Peso Específico Aparente Seco "Versus" Teor de Umidade ( $\gamma_s \times h$ ) .....	135
10.3 - Relação Resistência "Versus" Umidade ( $R \times h$ ) ..	136

## C A P Í T U L O X I

11.1 - Conclusões da Pesquisa .....	142
11.2 - Recomendações de Estudos Futuros .....	145

## A P Ê N D I C E I

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MISTURAS DE SOLO ESTABILIZADO COM CINZA VOLANTE E CAL HIDRATADA - MÉTODO DE ENSAIO .....	148
--	-----

<u>B I B L I O G R A F I A</u> .....	163
--------------------------------------	-----

## *CAPÍTULO I*

C A P Í T U L O I

## 1. INTRODUÇÃO

A tentativa do uso crescente e diversificado dos rejeitos industriais é, atualmente, uma preocupação constante em vários países, e para isto procura-se desenvolver novas técnicas de aproveitamento dos referidos materiais.

Ocorre com frequência a existência de solos que não apresentam características adequadas para constituírem camadas de pavimento. Buscam-se, então, outros materiais, que não os locais, para a execução do pavimento. Estas soluções, em relação ao emprego do solo local, podem ser demasiadamente onerosas.

Procura-se, atualmente, tanto quanto possível, a melhoria destes solos com o emprego, entre outras soluções, de cinza volante e cal. Portanto, o objetivo é desenvolver técnicas que possibilitem o aproveitamento dos solos locais após um tratamento apropriado, tornando sua utilização economicamente viável por caminhos práticos e objetivos.

A cinza volante tem sido um dos rejeitos industriais mais largamente utilizados em vários países, com diversas aplicações na engenharia rodoviária e aeroportuária.

A estabilização pozolânica provém da reação entre a cinza volante e a cal, formando um composto que possui propriedades cimentantes.

Os processos clássicos de estabilização são, geralmente, de difícil aplicação em solos mal graduados, totalmente desprovidos de finos.

Exemplo típico de um caso de solo totalmente inerte e mal graduado é o utilizado nesse trabalho: uma areia pura e uniforme. Logo, aborda-se um dos casos mais significativos para a constatação do comportamento deste tipo de estabilização, isto porque a uniformidade das partículas do solo dificulta a cimentação, devido ao maior volume de vazios e o menor número de contatos entre os grãos do solo.

São de dois tipos as misturas de material granular-cal-cinzas mais utilizadas: LFA\* (cal, cinza volante e agregado) e LCFA\* (cal, cimento, cinza volante e agregado). Nos E.U.A. tem havido substancial acréscimo no uso destas misturas para a construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários e aeroportuários.

---

\* De "lime-flyash-aggregate" e "lime-cement-flyash-aggregate".

rios. O exemplo mais significativo é o da construção das pistas do aeroporto de Newark, projetado para aeronaves do porte do Galaxy (Lockheed C-5 Galaxy) e Jumbo (Boeing 747). [1].

A experiência estrangeira, e a norte americana em particular, tem mostrado que as misturas LFA e LCFA têm propriedades inusitadas, o que exige certa familiarização para que se não descreditem suas possibilidades face às primeiras dificuldades encontradas. O termo — pavimento pozolânico — começa, por isso mesmo, a ser utilizado para designar pavimentos que apresentam bases de misturas contendo cinza volante e cal.

No Brasil, o emprego da cinza volante em pavimento permanece latente devido à insuficiência de pesquisas e de conhecimentos práticos sobre as particularidades de seu comportamento. Algumas tentativas práticas começam a ser registradas no Rio Grande do Sul, porém em solo diferente do que aqui estudamos. Atualmente a produção brasileira de cinza volante é cerca de meio milhão de toneladas anuais, sendo seu principal aproveitamento na fabricação de cimento pozolânico. Pode-se prever a ampliação da gama de aplicações deste material, graças ao emprego em estabilização de solos arenosos. Seja, com as vantagens decorrentes do uso de um solo local e mais as conveniências econômica e ecológica de consumir um rejeito industrial.

Esta pesquisa teve como finalidade principal investigar o comportamento de uma mistura pozolânica do tipo LFA, considerada

como básica, a fim de estabilizar areia de dunas costeiras, solo este encontrado em vastas extensões da Região Sul.

Também foram pesquisados os efeitos de pequeno teor de cimento portland de alta resistência inicial, e de pedra britada, acrescidos àquela mistura básica, a exemplo do que foi feito no aeroporto de Newark.

Esta pesquisa, tal como a anterior de Salomão Pinto, estuda uma mistura básica LFA, utilizando areia de duna costeira, porém agora com cal cálcica hidratada e cinza volante de Capivari - Santa Catarina, ao invés de cal dolomítica hidratada e cinza volante de Charqueadas, RS, utilizada por aquele Autor.

Trata-se do prosseguimento de uma linha de pesquisa estabelecida na COPPE/UFRJ em 1969, e que se desenvolve presentemente no Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER.



C A P Í T U L O   I I

## 2. COMENTÁRIOS PRELIMINARES

## 2.1 - Histórico do Uso das Cinzas

Um dos primeiros materiais de construção na engenharia, do qual se tem notícia, foi a cal. Seu uso remonta às mais antigas civilizações. Os chineses usaram cal extinta e argila para construir a Grande Muralha há dois mil anos atrás.

Os romanos, séculos antes da era cristã, usavam a cal pozolânica em suas construções (1,2). Aliás, o nome pozolana vem da terra vulcânica de Pozzuoli, cidade situada no sopé do Vesúvio.

Em 312 A.C., cinzas vulcânicas localizadas perto de Nápoli e Roma foram misturadas com cal viva (CaO) para fazer uma argamassa hidráulica que ligasse as pedras usadas na construção da Via Appia e dos primeiros aquedutos. A Via Appia era uma magnífica estrada que ia de Roma a Brindes e foi começada por Cláudio Appio. Esta Via era ladeada de suntuosos túmulos cujos restos se vêem ainda hoje. Este concreto pozolânico era também utilizado, naquela época, em construções de canalização de esgotos (3). As

primeiras citações sobre o emprego deste concreto foram feitas pelo arquiteto Pollio Vitruvius, entre 10 A.C. a 54 D.C. Vitruvius expressou-se a respeito daquelas cinzas do seguinte modo: "É uma espécie de pó que efetua, naturalmente, coisas admiráveis; encontra-se no país de Baye e no território de cidades privilegiadas, situadas em torno do Monte Vesúvio. Misturada com cal e cascalho, contribuem não só para a solidez de edifícios comuns, mas fazem endurecer os molhes sob a água". Ainda hoje, depois de dois mil anos, os molhes construídos nos portos de Anzio, de Civitá-Vecchia e de Cartago, estão perfeitamente conservados porque a liga, sob a ação do mar, sofreu uma transformação química que a estabilizou. Os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, inicialmente foram, aos poucos, transformados em sílico-aluminatos alcalinos, análogamente às zeólitas que se formam pela ação das águas sobre produtos vulcânicos no fundo do mar (4).

Os romanos ao construírem abóbadas e arcos usavam inicialmente pedras cortadas, o que consistia numa boa técnica porém muito dispendiosa quando usada em grande escala. Por esta razão o concreto de cinza vulcânica foi facilmente aceito como substituto. O "concreto romano" assumia relevo na arquitetura na metade do segundo século, embora o uso da pozolana como material de concreto leve e resistente, já tivesse sido dominado pelos romanos desde a metade do primeiro século. Em 80 D.C., as cinzas vulcânicas foram utilizadas na construção do Coliseu Romano e em 120 D.C. no Panteon (Templo dos Deuses) (3).

Depois dos romanos, até os trabalhos de Vicat sobre as cales hidráulicas, em 1812, as argamassas pozolânicas foram praticamente as únicas empregadas de modo regular nos trabalhos hidráulicos.

No século XX, com a proliferação das termelétricas em todo o mundo, a quantidade de cinzas provenientes da queima do carvão pulverizado tornou-se assustadora em volume e como agente poluidor. As cinzas tiveram utilização de início na Europa, U.R.S.S. e, a seguir, nos Estados Unidos (5).

Nos E.U.A. o primeiro uso das cinzas volantes como agente cimentante no concreto foi em 1936, pela "Chicago District Electric Generating Corporation", que colocou alguns quilômetros de parede de retenção ao redor do lago Michigan. Na Universidade da Califórnia, em 1937, o Dr. Raymond E. Davis expôs para o Instituto Americano de Concreto os resultados de ensaios de cinzas volantes de 15 fontes diferentes com cimentos de 7 composições. Em 1938 apareceu pela primeira vez a sua utilização em pavimentos. A "Chicago Sanitary District" usou 20 a 50% de cinzas volantes como substituto do cimento em pavimento numa extensão de meia milha. Também, neste mesmo ano, o Túnel Muir, na "Santa Fe Railroad", foi revestido com concreto feito de cinzas volantes.

Em 1947, começaram as primeiras tentativas, da parte de comerciantes de cinzas e da "American Society for Testing and Materials" (ASTM), de preparo das especificações de cinzas volantes

para uso na indústria do cimento. Também nesse ano o "Wisconsin Highway Commission" construiu uma pista experimental para o estudo dessa aplicação (1948) (3).

Na França, em 1951, apareceram no mercado os cimentos pozolano-metalúrgicos, após as pesquisas de M.P. Foulloux, sobre as misturas ternárias: clínquer-escória-cinza volante.

Em 1956 aparece definitivamente o cimento pozolânico contendo de 12 a 20% de cinzas ajustadas ao clínquer no momento da moagem e, em 1957, o cimento artificial de alta resistência, com adição de 10% de cinzas volantes. Normatizou-se a adição das cinzas volantes ao cimento portland em 1959, na França. Em 1960, pela primeira vez, um "stand" referente à utilização de cinzas volantes aparece na Exposição Internacional de Materiais de Construção Civil (Salon International de la Construction) (6).

No período de 1948 a 1953 dois grandes projetos com cinzas volantes foram realizados, na construção das barragens de Hungry Horse e Canyon Ferry em Montana, E.U.A. Mesmo antes da elaboração de especificações sobre cinzas, pela ASTM e pelo "Corps of Engineers", a "American Electric Service Corporation", em 1949, utilizava concreto de cinzas volantes em todas as suas construções de grandes termelétricas.

Em 1950 o "Corps of Engineers" fundou o seu primeiro laboratório para investigação da pozolana, resultando deste traba-

lho, 7 anos mais tarde, o "Corps of Engineers Specification" e, pela primeira vez, em 1958, as cinzas volantes foram usadas pelo Corps na barragem de Sutton no Rio Elk, Virgínia.

Em 1953, a ASTM criou um método de amostragem e ensaio de cinzas volantes a serem utilizadas como aditivo no concreto de cimento portland, tendo sido estas especificações sucessivamente modificadas em 1957, 1960, 1964, 1965 e 1966 (3).

## 2.2 - Situação Atual Quanto ao Uso de Cinzas Volantes

A partir do uso de cinza no cimento, novas utilizações têm sido pesquisadas, motivado pelo problema difícil e oneroso de colocação desse rejeito industrial. As estatísticas mundiais são bem reveladoras das proporções do problema (5). Ver Tabela 1.

Pesquisas realizadas em todo o mundo, tornaram as cinzas volantes um material de utilização totalmente diversificada. Resumindo sua utilização atual temos:

### A - CINZA VOLANTE NO CONCRETO E NO CIMENTO (7,8).

o Como um constituinte do concreto é introduzido na mistura da mesma forma que o cimento e o agregado.

TABELA 1

ESTATÍSTICA REFERENTE A PRODUÇÃO MUNDIAL DE  
CINZA VOLANTE, EM MILHÕES DE TONELADAS

P A Í S E S	P R O D U Ç Ã O		U T I L I Z A Ç Ã O	
	1965	1975	1965	% DA PRODUÇÃO UTILIZADA
U.S.A.	20	40	1,3	6
U.R.S.S.	20	40	0,5	3
INGLATERRA	9	20	3,5	40
ALEMANHA ORIENTAL	10	15	2,7	27
FRANÇA	4	5	2	50

(Fonte: Gambs, Gerald C. - "Marketing Flyash... U.S. and European Programs", Coal Age, Nov. - 1966).

- o Como um componente de cimento; a cinza pode ser pulverizada juntamente com o clínquer ou misturada ao cimento, ou, para finalidades especiais, com o cimento e outros materiais.
- o Como matéria prima na fabricação do cimento portland, no estágio antes do forno (pré-forno).

#### B - APLICAÇÃO DA CINZA VOLANTE NO CONCRETO AERADO (8)

Produzido pela introdução de ar ou outros gases dentro da massa fluida (argamassa) composta de cimento ou cal e um "filler" silícico como a cinza volante, de modo que a mistura ao endurecer, forme uma estrutura celular.

#### C - COMO ARGAMASSAS PARA INJEÇÕES (8)

O processo de "Grouting" envolve a injeção de mistura sob a forma de suspensão, gel ou solução química dentro dos vazios ou fissuras. Os objetivos das injeções são: reduzir a permeabilidade do terreno, melhorar suas propriedades mecânicas e preencher vazios.

São vários os tipos de argamassas que incorporam as cinzas: argamassa contendo apenas cinzas, argamassa de cinza-cal, argamassa de cinza-cimento portland-argila e argamassa de cinza-areia.

D - COMO AGREGADO LEVE, SOB FORMA PELOTIZADA (8, 9, 10)

E - NA CERÂMICA, TIJOLOS E LAJOTAS (8, 11).

F - NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS (12).

G - COMO "FILLER" (ENCHIMENTO DE VAZIOS) (13, 14).

H - COMO TRATAMENTO E CULTIVO DE SUPERFÍCIES NA AGRICULTURA (8).

Atualmente, o grande surto de aplicação das cinzas é na pavimentação de aeroportos e rodovias. Desde 1961 que pesquisadores da Universidade de Illinois vêm estudando as misturas pozolânicas em laboratório e em pista circular experimental (12).

A utilização do maior projeto foi a construção das pistas de pouso do aeroporto de Newark, E.U.A., em 1967-69, com aproveitamento da areia dragada do mar e utilizada no aterro; foram utilizadas 730 mil toneladas de cinza. A solução proposta por Yang, então Eng<sup>o</sup> Chefe do "New York Port Authority", foi testada previamente em pista experimental instrumentada. Já sob tráfego a 5 anos, os custos de manutenção das pistas têm sido bem menores que nos "runways" típicos. Mais recentemente registra-se a construção do terminal de "containers" do Port of Portland (Oregon, E.U.A.). O estado de West Virginia utilizou cinzas numa obra de alargamento de 48 km de extensão (15).

*CAPÍTULO III*

C A P Í T U L O   I I I

## 3. REAÇÕES POZOLÂNICAS

A Pozolana, segundo a ASTM Designation: C 340-58T é definida como: um material silícico ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouco ou não possui nenhum valor cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente, formando compostos de propriedades cimentantes.

Neste relato os termos pozolana e cinza volante são usados como sinônimos.

Cinza volante é uma mistura heterogênea, sendo que as propriedades físicas e químicas variam com a composição do carvão, temperatura de combustão, e método de retirada da cinza (12). Suas partículas ou são sólidas e amorfas, ou ocas e esféricas.

As reações que ocorrem em uma mistura de pozolana e hidróxido de cálcio são muito complexas e ainda não definidas completamente. Esta complexidade das reações é realçada pela heterogeneidade das composições físicas e químicas da cinza. Prova-

velmente, a reação mais importante é a que resulta num gel cimentante, ligando as partículas de agregado mineral. Aparentemente, a reação crítica é entre o hidróxido de cálcio e os minerais de alumínio e sílica presentes na cinza volante, produzindo silicatos e aluminatos de cálcio.

As reações pozolânicas não se verificam, caso não haja quantidade de água suficiente na mistura. Muitas cinzas não são reativas e outras o são extremamente. Deve-se procurar usar cinza de boa reatividade para produzir uma mistura de boa qualidade(12,16).

Existem muitas divergências sobre a exatidão dessas reações químicas, que são apresentadas sob os mais diversos aspectos.

Minnick, em seu trabalho (17) nos dá uma comparação entre algumas reações que ocorrem no caso do cimento portland e na cinza volante.

Observações feitas com microscópio eletrônico (electron probe) juntamente com estudos de difração de raio x, tem claramente identificado alguns produtos da reação da cinza volante com os formados na hidratação do cimento (17). Também na tese de S. Pinto fotografias de microscopia eletrônica de varredura mostram cristais que lembram a tobermorita produzida na hidratação do cimento(18).

Caso a cal em pó utilizada seja o óxido de cálcio(cal viva), este reagirá com a água anteriormente à reação pozolânica

e na forma:



## *CAPÍTULO IV*

## C A P Í T U L O   I V

### 4. MATERIAIS USADOS NA ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA

#### 4.1 - Cinza Volante

Cinza volante é um resíduo fino que resulta da combustão do carvão pulverizado ou moído, sendo transportado da caldeira por um conduto de gases. Sendo um resíduo, diversos fatores influem nas suas propriedades. Neste estudo, é feita uma revisão geral desses fatores englobando problemas desde a obtenção do carvão mineral até a produção de cinza volante, na geração de termelétricidade.

##### 4.1.1 - Obtenção do Carvão Mineral

As reservas carboníferas brasileiras conhecidas estão localizadas na Região Sul; são geralmente de má qualidade, mas já estão representando um papel importante no panorama energético do país.

O desenvolvimento da indústria siderúrgica necessita um consumo maior de carvão metalúrgico. Porém para cada parcela des-

te produto, obtêm-se duas outras, o carvão vapor e o rejeito piritoso, praticamente sem mercado após a modernização dos sistemas de transporte; segundo dados do Conselho Nacional da Indústria Siderúrgica (CONSIDER), de 1350 toneladas de carvão pré-lavado, obtêm-se 810 toneladas (58%) de carvão metalúrgico e 535 t (35%) de carvão-vapor. Facilmente se percebe que na obtenção do carvão metalúrgico é gerado simultaneamente o carvão-vapor e estes estoques elevam-se a 1 milhão e 700 mil toneladas sem um mercado capaz de absorvê-los. Além destes problemas, os técnicos siderúrgicos veem a utilização de maiores quantidades do carvão metalúrgico nacional, alegando a melhor qualidade e o baixo custo de aquisição do carvão estrangeiro.

As reservas nacionais de carvão natural conhecidas e exploradas atualmente, localizam-se em três estados, segundo descrição abaixo:

#### A) NO ESTADO DO PARANÁ

Reserva estimada em 36 milhões de toneladas. É extraído das minas com cerca de 30 a 35% de cinzas. Apresenta condições favoráveis ao beneficiamento, podendo, com rendimento de 80%, ser transformado num produto com as seguintes características: 20% de cinzas e poder calorífico de 6500 cal/kg. Toda a sua produção é utilizada como combustível, pois este produto não é coqueificável.

## B) NO ESTADO DE SANTA CATARINA:

Sua reserva é estimada em 1 bilhão e 200 milhões de toneladas.

O carvão catarinense não apresenta condições de ser utilizado para a produção de coque, logo após ser extraído da mina, pois possui cerca de 40 a 50% de cinzas, e poder calorífico de 4.740 cal/kg. Após beneficiamento, obtém-se o carvão metalúrgico, carvão-vapor e o rejeito piritoso.

As jazidas de carvão economicamente viáveis para a exploração se encontram em dois horizontes geológicos denominados Barro Branco, mais ou menos contínuo em toda a região carbonífera, e Irapuá, descontínua e existente apenas em bolsões, as quais são exploradas apenas em casos especiais.

A camada Barro Branco, praticamente a única explorada, não é composta unicamente de carvão, existindo duas subcamadas, o forro e o banco, separadas por outra de rochas.

Além do Barro Branco, constata-se a existência de estratificações de carvão e folhelho carbonoso. Em resumo, além do veio ser profundo, é necessário o desmonte de 1,60 metros para aproveitar 60 a 80 cm de material carbonoso. Desta parte, após passar pelo lavador, aproveita-se apenas 40% do seu peso como carvão vendável. E mais, desses 40% restantes, 75% é carvão metalúrgico e

25% carvão-vapor, com 37% de cinzas. Em relação ao material trazido do lavador, teríamos apenas 30% de carvão metalúrgico e 10% de carvão-vapor. Resumindo, em relação ao material desmontado no fundo da mina, 15% caberia ao carvão metalúrgico e somente 5% ao carvão-vapor.

C) NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL:

Reservas num total de 1 bilhão e 700 milhões de toneladas. Na extração da mina apresenta 50 a 55% de cinzas, comum poder calorífico de 3.100 cal/kg.

Possue característica de beneficiamento desfavorável, o que torna a operação inviável. Em alguns locais, como em Candiotá, é extraído a céu aberto. É utilizado somente na produção de termelétricidade e na indústria siderúrgica (redução direta do minério de ferro) - usina de Piratini.

Conclui-se que: somente o carvão catarinense é coqueificável, para utilização em usinas siderúrgicas. Fica como rejeito, o carvão-vapor em imensos estoques para as termelétricas e o rejeito piritoso para a Carboquímica Catarinense, que o utiliza na obtenção de enxofre e ácido sulfúrico, embora ainda não haja mercado capaz de absorvê-los em quantidade majoritária.

#### 4.1.2 - Termeletricidade na Região Sul

A empresa Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. (ELETROSUL), subsidiária da ELETROBRÁS, foi criada em dezembro de 1968 com o objetivo de construir e operar as centrais geradoras e os sistemas de transmissão de interesse interestadual na Região Sul do país.

Em 1973, o Sistema Eletrosul podia ser resumido segundo a Figura 1. Sua capacidade de operação e projeto é de 3.890.000 kW, conforme Tabela 2. A termeletricidade proveniente da combustão do carvão atinge o valor de 534.000 kW.

A usina de Charqueadas, situada no Rio Grande do Sul, próxima à Rodovia BR-290 e não distante de Porto Alegre, possui uma capacidade geradora de 72.000 kW. Consome o carvão local, com um poder calorífico de 3.100 cal/kg. Não existem dados corretos sobre sua produção de cinzas.

A usina Jorge Lacerda - SOTELCA, o maior conjunto termelétrico a carvão da América do Sul, está situada no Bairro Industrial de Capivari de Baixo, em Tubarão, no Estado de Santa Catarina, e localiza-se à margem da BR-101. O embarque marítimo faz-se pelo Porto de Imbituba, ligado por rodovia e ferrovia, distando de, aproximadamente, 50 km da usina.

# Sistema Eletrosul

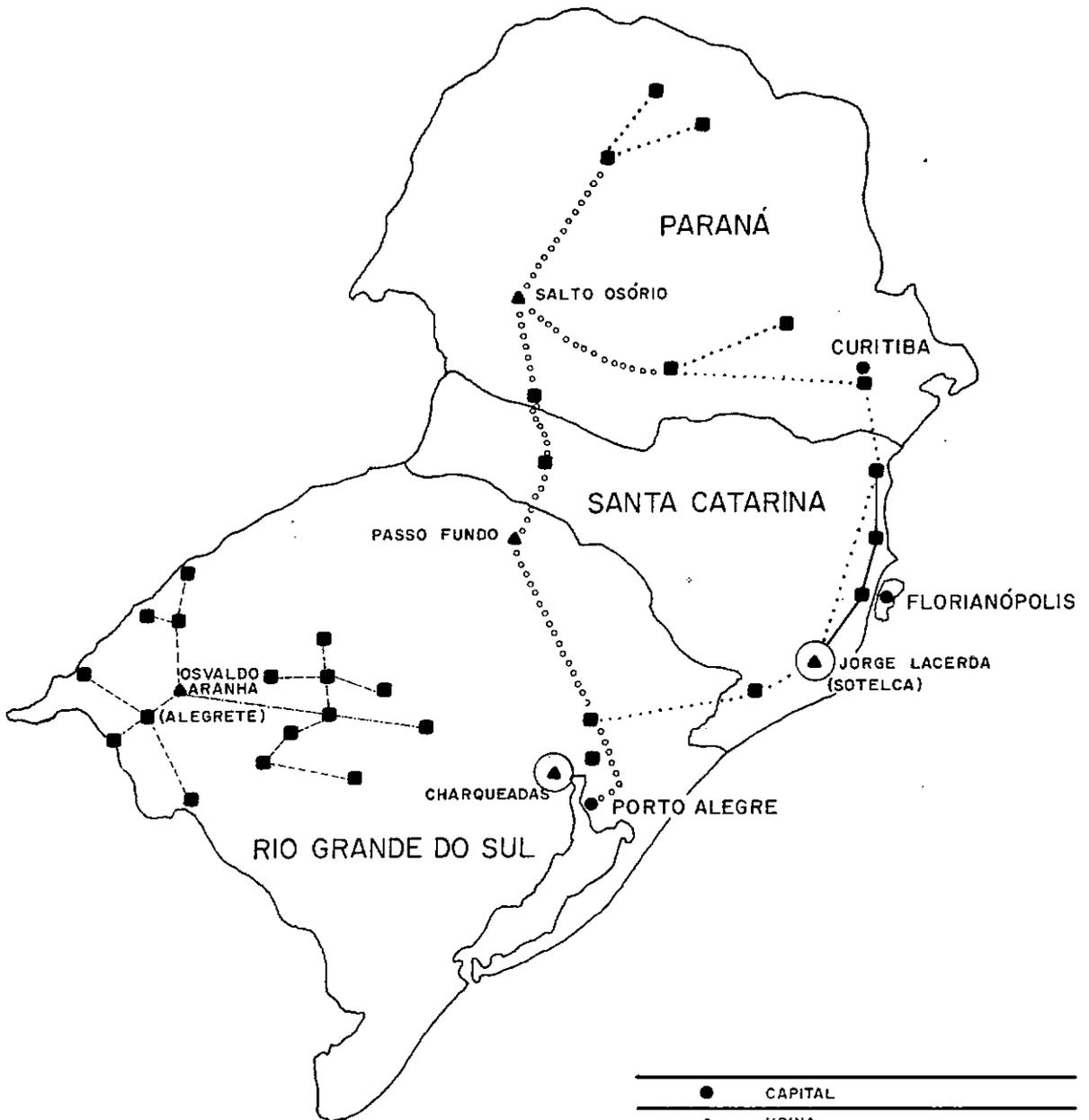


FIGURA 1 - Localização do " SISTEMA ELETROSUL " em 1973 na região Sul, sendo as termelétricas salientadas por círculos.

●	CAPITAL
▲	USINA
■	SUBESTAÇÃO
.....	LINHA DE TRANSM. 230kV 2 CIRCUITOS
-----	LINHA DE TRANSM. 230kV C. SIMPLES
————	LINHA DE TRANSM. 138kV C. DUPLO
-----	LINHA DE TRANSM. 138kV C. SIMPLES
-----	LINHA DE TRANSM. 69kV C. SIMPLES

T A B E L A 2

CAPACIDADE DE GERAÇÃO ELÉTRICA DO "SISTEMA ELETROSUL", EM OPERAÇÃO E PROJETO

U S I N A	T I P O	CAPACIDADE GERADORA (MW)	PREVISÃO DE TÉRMINO	LOCALIZAÇÃO (ESTADO)
Alegrete	termelétrica (Óleo Buncher C)	66	concluída	Rio Grande do Sul
Charqueadas	termelétrica (carvão)	72	concluída	Rio Grande do Sul
Passo Fundo	hidroelétrica	220	concluída	Rio Grande do Sul
Sotelca	Termelétrica (carvão)	482	ampliação	Santa Catarina
Salto Osório	hidroelétrica	1.052	1979	Paraná
Salto Santiago	hidroelétrica	2.000	1981	Paraná

A 1.<sup>a</sup> etapa desta termelétrica é composta de duas unidades (1.<sup>o</sup> e 2.<sup>o</sup> grupos) com 50.000 kW cada, e a 2.<sup>a</sup> etapa de outras duas unidades (3.<sup>o</sup> e 4.<sup>o</sup> grupos) com 66.000 kW cada. A terceira etapa será composta de outras duas unidades (( 5.<sup>o</sup> e 6.<sup>o</sup> grupos) com 125.000 kW cada, sendo que as negociações para aquisição dos equipamentos já se encontram em andamento.

A termelétrica gerada a carvão, pela ELETROSUL, será num total de 554.000 kW sendo 87% da responsabilidade do carvão catarinense e 13% do riograndense.

Constata-se a existência de duas outras termelétricas: Figueira, no Norte do Paraná e Candiota no Rio Grande do Sul. Sabe-se que a capacidade gerada por ambas é inferior a de Charqueadas, embora não se tenha conseguido dados precisos.

#### 4.1.3 - Processos de Obtenção das Cinzas Volantes

A produção das cinzas volantes obedece a duas fases distintas:

- o Classificação do carvão mineral
- o Obtenção das cinzas volantes.

#### 4.1.3.1 - Classificação do carvão mineral

A classificação do carvão mineral é o processo pelo qual se torna possível a obtenção do carvão metalúrgico. Este é exportado para outros estados devido à sua melhor qualidade e possibilidade de utilização na indústria siderúrgica.

O processo de classificação desenvolve-se nas etapas seguintes:

- o Extração do carvão na mina;
- o Classificação manual, na saída da mina;
- o Separação, no chamado "lavador mecânico" (diferença de densidade, centrifugação, etc.), em Capivari de Baixo, do carvão, trazido por trem, nas frações:
  - a) Carvão metalúrgico, para a Siderurgia.
  - b) Carvão-vapor, para a termelétrica.
  - c) Rejeito piritoso, para a indústria carboquímica.

#### 4.1.3.2 - Obtenção de cinzas volantes

O carvão-vapor após a seleção manual e mecânica é conduzido para a termelétrica, onde sofre uma moagem em moinhos de bolas especiais. Estes moinhos possuem dispositivos de regulação

e um classificador de aletas, que por centrifugação devolve ao moinho de bolas as partículas de dimensões maiores do que as especificadas. As partículas menores, tendo geralmente, 80% passando na peneira de malha ASTM nº 200, de abertura igual a 0,074 mm, são queimadas na câmara de combustão a temperatura variável de 1000°C a 1500°C. Logo, o combustível utilizado na obtenção de energia térmica para produção de vapor d'água é o carvão-vapor pulverizado. Este vapor movimenta as turbinas, as quais, acopladas aos alternadores permitem a geração da eletricidade.

O resíduo finamente dividido resultante da combustão e arrastado pelos gases de exaustão é denominado de cinza volante ou segundo a ASTM-C-618-74, de Pozolana classe F, de "Fly Ash" pelos norte americanos e "Pulverized Fuel Ash" (PFA) pelos ingleses.

A cinza que se aglomera, caindo no fundo da câmara de combustão se denomina cinza de fundo ou "bottom ash". Nesta queda, submerge em água onde é resfriada e umedecida, sendo a remoção feita por arraste hidráulico.

Flutuando em direção à chaminé, a cinza volante é coletada mecanicamente por ciclones e precipitadores eletrostáticos. Dos coletores onde já sofre um processo de resfriamento, é retirada por intermédio de parafusos transportadores, até o equipamento pneumático que a conduzirá ao silo de armazenagem. Em função de resultados de análise, passa para o classificador que separa a fração mais grossa da fina. Nesta operação é separado o material

que não se enquadra nas especificações. Após a classificação a cinza é conduzida para o silo de armazenagem de material classificado, onde será ensacada ou embarcada em "containers" ou veículos especiais.

#### 4.1.4 - Enquadramento do Material em Função de Algumas Normas Existentes

Com a finalidade de determinar os parâmetros de variação das propriedades químicas e físicas foram realizados desde o início da operação da termelétrica de Capivari, em 1965, análises químicas e físicas da referida cinza volante. Estes resultados poderão ser vistos nas Tabelas 3, 4 e 5.

A fim de se obter um certo sentimento da qualidade desta cinza, faz-se uma comparação em função dos requisitos químicos e físicos, de normas e especificações de várias entidades. Verificar Tabelas 6, 7 e 8 e tipos de cinzas volantes existentes na Tabela 9.

##### 4.1.4.1 - Requisitos químicos

Conforme a Tabela 6, quase todas as normas mundiais requerem para a soma de óxidos de silício, de alumínio e de ferro, um mínimo de 70% à 75%. O produto em questão apresenta valores

TABELA 3  
CINZA VOLANTE  
 (SOTELCA - TUBARÃO - S.C. - BRASIL)  
 Resultados dos ensaios químicos da  
 cinza volante (intervalo de variação)

REQUISITOS QUÍMICOS PARA CINZA VOLANTE	UNIDADE	FLY ASH "IN NATURA" ANÁLISES DIVERSAS ENTRE 1965 e 1972	FLY ASH CLASSIFICADO VALORES ESTIMADOS A PARTIR DE SETEMBRO 1972
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	%	87,65 a 95,90	87,65 a 95,90
$SiO_2$	%	50,50 a 64,40	50,50 a 64,40
$Al_2O_3$	%	27,20 a 31,67	27,20 a 31,67
MgO	%	0,38 a 1,33	0,38 a 1,33
$SO_3$	%	0,22 a 0,95	0,22 a 0,95
ALCALIS EQUIVALENTE $Na_2O$	%	0,26 a 3,33	0,26 a 1,50
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	$g/cm^3$	2,10 a 2,24	2,10 a 2,26
UMIDADE	%	0,11 a 0,44	0,11 a 0,44
pH (1 parte FLY ASH + 1 parte água em peso)	%	6,75 a 7,70	6,75 a 7,70
PERDA AO FOGO	%	1,25 a 8,60	1,00 a 5,00

## TABELA 4

## CINZA VOLANTE

(SOTELCA - TUBARÃO - S.C. - BRASIL)

Resultados dos ensaios físicos da  
cinza volante (intervalo de variação)

REQUISITOS FÍSICOS PARA CINZA VOLANTE	UNIDADE	FLY ASH "IN NATURA" ANÁLISES DIVERSAS ENTRE 1965 e 1972	FLY ASH CLASSIFICADO VALORES ESTIMADOS A PARTIR DE SETEMBRO 1972
Superfície específica Blaine	cm <sup>2</sup> /g	1.743 a 4.928	3.100 a 6.000
Superfície específica	cm <sup>2</sup> / cm <sup>3</sup>	3.877 a 10.980	6.500 a 13.440
Retido na peneira malha 325-44 micron	%	9,70 a 38,50	5,00 a 15,00
Índice de atividade Pozo lânica com argamassa de cimento - Pozolana aos 28 dias - Percentagem do controle	%	66,30 a 87,20	75 a 100
Resistência à compressão argamassa Cal - Pozolana aos 7 dias (PSI)	%	476 a 854	> 800
Variação de retr. de se- cagem de barras de arga- massa aos 28 dias	%	0,001 a 0,015	< 0,030
Expansão ou contração em Autoclave	%	0,025 a 0,070	< 0,050

T A B E L A 5  
C I N Z A V O L A N T E

(SOTELCA - TUBARÃO - S.C. - BRASIL)

Resultados dos ensaios físicos da  
cinza volante (intervalo de variação)

REQUISITOS FÍSICOS PARA CINZA VOLANTE	UNIDADE	FLY ASH "IN NATURA" ANÁLISES DIVERSAS ENTRE 1965 e 1972	FLY ASH CLASSIFICADO VALORES ESTIMADOS A PARTIR DE SETEMBRO 1972
Água requerida Máx. Per- centagem do cont.	%	113 a 98	< 105
Superfície específica Máx. variação da média	%	-	< 15
Massa Específica Máx. variação da média	%	-	< 5
Variação da quant. de agente incorporador de ar p/produzir 18% do volume da argamassa, em relação aos 10 testes anteriores	%	-	< 20
Reatividade com os alcal- is do cimento: Redução de exp. da argamassa aos 14 dias	%	78,00 a 98,80	< 75
Expansão de argamassa aos 14 dias	%	0,004 a 0,012	> 0,020
Water Requirement increase in flow	%	-	-
Max. permitido de Pozola- na (barragens) para con- creto massa interior	%	-	-

TABELA 6  
CINZA VOLANTE

REQUISITOS QUÍMICOS DAS ESPECIFICAÇÕES DE VÁRIAS ENTIDADES INTERNACIONAIS  
E VALORES DA CINZA VOLANTE DA SOTELCA - S.C. - BRASIL

REQUISITOS QUÍMICOS PARA CINZA VOLANTE	UNIDADE	A	B	C	D	E	F	G	H
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	Min. %	70	75	70	-	-	-	87,65 a 95,90	87,65 a 95,90
$SiO_2$	Min. %	-	-	-	45	40	-	50,50 a 64,40	50,50 a 64,40
$Al_2O_3$	Min. %	-	-	-	-	15	-	27,20 a 31,67	27,20 a 31,67
MgO	Max. %	-	5,00	5,00	-	5,00	4,00	0,38 a 1,33	0,38 a 1,33
$SO_3$	Max. %	3,00	4,00	4,00	-	-	2,50	0,22 a 0,95	0,22 a 0,95
ALCALIS EQUIVALENTE $Na_2O$	Max. %	1,50	2,00	1,50	-	1,50	-	0,26 a 3,33	0,26 a 1,50
MASSA ESPECÍFICA EM GRÃOS	Min. g/cm <sup>3</sup>	-	-	-	1,95	-	-	2,10 a 2,24	2,10 a 2,26
UMIDADE	Max. %	3,00	3,00	3,00	-	-	1,50	0,11 a 0,44	0,11 a 0,44
pH (1 parte FLY ASH + 1 parte água em peso)	Min. %	-	-	-	-	7,00	-	6,75 a 7,70	6,75 a 7,70
PERDA AO FOGO	Max. %	12,00	5,00	6,00	5,00	6,00	7,00	1,25 a 8,80	1,00 a 5,00

TABELA 7

CINZA VOLANTE

REQUISITOS FÍSICOS DAS ESPECIFICAÇÕES DE VÁRIAS ENTIDADES INTERNACIONAIS  
E VALORES DA CINZA VOLANTE DA SOTELCA - S.C. - BRASIL

REQUISITOS FÍSICOS PARA CINZA VOLANTE	UNIDADE	A	B	C	D	E	F	G	H
Superfície específica Blaine	Min. cm <sup>2</sup> /g	-	3.000	-	2.700	-	A } 1.250 a 2750 B } 2750 a 4250 C } >4250	1.743 a 4.928	3.100 a 6.000
Superfície específica	Min. cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>	6.500	-	6.500	-	-	-	3.877 a 10.980	6.500 a 13.440
Retido na peneira malha 325-44 micron	Max. %	12	15	-	25	25	-	9,70 a 38,50	5,00 a 15,00
Índice de atividade Pozolânica com argamassa de <u>cimento - Pozolana</u> aos 28 dias - Percentagem de controle	Min. %	85	85	75	-	-	-	66,30 a 87,20	75 a 100
Resistência à compressão argamassa <u>Cal-Pozolana</u> aos 7 dias (PSI)	Min. %	800	900	900	-	-	-	476 a 854	> 800
Varição de retr. de secagem de barras de argamassa aos 28 dias	Max. %	+0,030	0,040	-	-	-	-	0,001 a 0,015	< 0,030
Expansão ou contração em Autoclave	Max. %	0,050	-	0,050	-	0,090	-	0,025 a 0,070	< 0,050

TABELA 8  
CINZA VOLANTE

REQUISITOS FÍSICOS DAS ESPECIFICAÇÕES DE VÁRIAS ENTIDADES INTERNACIONAIS  
E VALORES DA CINZA VOLANTE DA SOTELCA - S.C. - BRASIL

REQUISITOS FÍSICOS PARA CINZA VOLANTE	UNIDADE	A	B	C	D	E	F	G	H
Água requerida Max. Percentagem do cont.	Max. %	105	103	-	-	-	-	113 a 98	< 105
Superfície Específica Max. variação da média	Max. %	±15	-	-	-	-	± 10	-	< 15
Massa Específica Max. variação da média	Max. %	±5	±3	-	-	-	-	-	< 5
Variação da Quant. de agente incorporador de ar p/produzir 18% do v̄o lume da argamassa, em relação aos 10 testes anteriores	Max. %	20	-	-	-	-	-	-	< 20
Reatividade com os alcalis do cimento: Redução de exp. da argamassa aos 14 dias	Min. %	-	-	75	-	-	-	78,00 a 98,80	< 75
Expansão de argamassa aos 14 dias	Max. %	0,020	-	-	-	-	-	-0,004 a 0,012	> 0,020
Water Requirement increase in flow	Min. %	-	-	0	-	-	-	-	-
Max. permitido de Pozzolana (barragens) para concreto massa interior	Max. %	-	40	35	-	-	-	-	-

TABELA 9

## COMPARAÇÃO DE ANÁLISES QUÍMICAS DE CINZAS VOLANTES DE ALGUNS PAÍSES

ELEMENTOS	UNIDADE	CINZAS VULCÂ- NICAS ITALIANAS	B R A S I L		E. U. A.	FRANCESAS
			SOTELCA (S.C.)	CHARQUEADAS (R.S.)		
SiO <sub>2</sub>	%	43 a 53	50,50 a 64,40	63 a 64	28 a 52	42 a 50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	17 a 20	27,20 a 31,67	25 a 26	15 a 34	16 a 30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5 a 10	-	3 a 5	3 a 26	5 a 10
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	87,65 a 96,90	-	-	-
CaO	%	4 a 11	-	1 a 2	1 a 10	2 a 4
MgO	%	1 a 3	0,38 a 1,33	1 a 2	0 a 2	1 a 2
Na <sub>2</sub> O	%	-	-	-	1 a 2	-
K <sub>2</sub> O	%	-	-	-	1 a 5	-
ALCALIS EQUIVALENTE	%	5 a 8	0,26 a 3,33	1 a 2	-	5
SO <sub>3</sub>	%	-	0,22 a 0,95	-	0 a 4	-
PERDA AO FOGO	%	7 a 9	1,00 a 8,60	1,5	1 a 30	-

- A = A S T M, C-618-68T POZZOLAN CLASS F
- B = BUREAU OF RECLAMATION
- C = CORPS OF ENGINEERS U.S.A. CRD-C-262-61 POZZOLAN CLASS F
- D = JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD 6201-58
- E = ALABAMA HIGHWAY DEPARTMENT SECTION 806.01
- F = BRITISH STANDARD INSTITUTION BS.3892-65
- G = FLY ASH "IN NATURA" ANÁLISES DIVERSAS ENTRE 1965 E 1972  
(SOTELCA)
- H = FLY ASH CLASSIFICADO VALORES ESTIMADOS A PARTIR DE SE-  
TEMBRO - 1972 (SOTELCA)

mais elevados, entre 87,65% à 95,90%. Quanto aos demais elementos, também estão totalmente enquadrados.

#### 4.1.4.2 - Requisitos físicos

Para uma pozolana de determinada composição química, se variar apenas a superfície específica Blaine, pode-se obter diversos resultados físicos. Logo, um dos requisitos mais importantes é o da Superfície Específica Blaine. Fácil notar, que a norma inglesa (BS-3892-65) adota para o "Pulverized Fuel Ash" como requisito físico apenas a superfície específica Blaine e a norma japonesa adiciona apenas a finura ao valor Blaine.

Na Sotelca o material "in natura" varia segundo as condições de operação, que podem produzir um material inferior ao especificado, ou que satisfaça as especificações, e, ainda outro muito superior ao especificado. Para isto é necessário conhecer a finura antes do ensacamento, a fim de verificar se o produto está ou não atendendo às especificações. Em relação à cinza classificada, está poderá ser regulada para o Blaine desejado, dentro do intervalo de variação fornecido pela termelétrica. Os requisitos físicos encontram-se na Tabela 6 e 7.

#### 4.1.5 - Capacidade de Produção, Atual e Futura, de Cinzas Volantes

A potência atual instalada é composta de 4 grupos geradores, os 1º e 2º grupos de 50.000 kW cada e os 3º e 4º grupos de 66.000 kW cada.

Os 3º e 4º grupos, além dos ciclones mecânicos, estão ligados a um sistema de precipitadores eletrostáticos, o qual melhora a qualidade das cinzas volantes, bem como o rendimento na sua produção, obtendo-se 75% de cinzas volantes do total produzido. Os 5º e 6º grupos serão instalados com uma potência de 125.000 kW cada, estando a construção das usinas em fase de projeto.

Na queima do carvão, 40% em peso corresponde à fração de cinzas, sendo desta fração, 60% de cinza volante e 40% de cinza de fundo. Supondo que a termelétrica trabalhe segundo um fator de carga de 0,6, obtém-se a produção de cinzas indicada na Tabela 10.

No momento, dispõe-se de 457,64 t de cinza volante por dia e 305,10 t de cinza úmida por dia.

O fornecimento pode ser feito de três formas: sacos de papel valvulados, containers e a granel.

T A B E L A 1 0

PRODUÇÃO TOTAL DE CINZA VOLANTE E CINZA DE FUNDO, DA TERMELETRICA DE CAPIVARI(SOTELCA),  
COM TODOS OS GRUPOS EM FUNCIONAMENTO E COM UM FATOR DE CARGA DE 0,6

UNIDADES GERADORAS	PRODUÇÃO ANUAL DE CINZA (t)	CINZA VOLANTE (t/ANO)	CINZA DE FUNDO (t / ANO)
1º E 2º GRUPOS	120.000	72.000	48.000
3º E 4º GRUPOS	158.000	95.040	63.360
5º E 6º GRUPOS	180.000	108.000	72.000

## 4.2 - Cal Hidratada

Face à confusão de designações de cal no comércio, que diferem do que prevê a normatização desse produto de uso versátil e milenar, convém estabelecer os nomes seguintes:

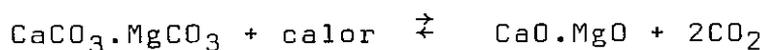
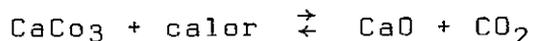
**Calcáreo:** usado para designar todas as rochas carbonatadas com proporções variáveis de cálcio e magnésio, puras ou impuras, e não composta apenas por carbonato de cálcio.

**Cal:** é o óxido de cálcio ou a mistura de óxido de cálcio e óxido de magnésio, representado pelas fórmulas moleculares CaO ou CaO.MgO.

**Cal hidratada:** definida como o pó obtido pelo tratamento da cal virgem (CaO) pela água, em quantidade bastante para satisfazer a sua afinidade química.

### 4.2.1 - Origem da Cal

A cal é produzida pela calcinação de pedra calcárea (cálcica ou dolomítica).



A estrutura física e a composição química dos diferentes tipos de calcários variam consideravelmente, e devido a este fato, efeitos no produto final deverão ser esperados. Assim, os defeitos ou qualidades da cal já têm origem nas características de sua matriz.

A redução do carbonato para a forma de óxido é feita através de aquecimento produzido pelos gases quentes fornecidos pela combustão de óleo, carvão ou madeira.

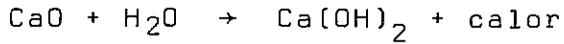
Devemos estar atentos para a temperatura de calcinação e o tempo em que o material é exposto a este aquecimento, porque em função destas variáveis, efeitos prejudiciais na qualidade da cal poderão resultar.

Quando o processo de calcinação é adequadamente controlado, resultará uma cal queimada fofa. Esta cal tende a manter o mesmo volume do material original e uma estrutura muito porosa (12, 20).

#### 4.2.2 - Tipos de Cales Hidratadas

O hidróxido de cálcio é obtido pela hidratação da cal (óxido de cálcio). Tal como a cal virgem, a hidratada poderá ser cálcica ou dolomítica.

Na hidratação de uma cal cálcica teremos uma cal hidratada cálcica, segundo a reação abaixo:



Na hidratação de uma cal dolomítica, a pressão normal, obtemos a cal mono-hidratada dolomítica, do tipo  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$ , e, a pressão mais elevada, a cal di-hidratada dolomítica do tipo  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$ .

Valores típicos de ensaios químicos para cales estão expostos na Tabela 11 (12,20).

T A B E L A 1 1

VALORES TÍPICOS DE ENSAIOS QUÍMICOS PARA CALES CÁLCICA E DOLOMÍTICA

CONSTITUINTES	UNIDADE	CAL CÁLCICA (CaO)	CAL DOLOMÍTICA (CaOMgO)
CaO	%	92,25 a 98,00	55,50 a 57,50
MgO	%	0,30 a 2,50	37,60 a 40,80
CO <sub>2</sub>	%	0,40 a 1,50	0,40 a 1,50
SiO <sub>2</sub>	%	0,20 a 1,50	0,10 a 1,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,10 a 0,40	0,05 a 0,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,10 a 0,50	0,05 a 0,50
H <sub>2</sub> O	%	0,10 a 0,90	0,10 a 0,90

*CAPÍTULO V*

C A P Í T U L O   V

## 5. REVISÃO DA LITERATURA

## 5.1 - Propriedades Físicas para a Engenharia

## 5.1.1 - Resistência à Compressão

As misturas pozolânicas apresentam a propriedade pouco comum do aumento da resistência a longo prazo, o que se deve levar em conta quando são as mesmas avaliadas em função da resistência à compressão simples.

Estas misturas quando bem dosadas, compactadas e curadas em laboratório, podem atingir resistências de até mais de 100 kgf/cm<sup>2</sup> a 28 dias (16, 24).

Tem-se verificado em pavimentos pozolânicos um rápido desenvolvimento da resistência em seu primeiro ano, embora as reações pozolânicas permaneçam praticamente latentes no período de inverno rigoroso (temperaturas abaixo de  $7^{\circ}\text{C}$ ). Resistências de até  $175 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  poderão ser atingidas ao fim de um ano, embora valores entre 53 a  $175 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  sejam considerados os mais típicos. Foram assinalados valores de até  $280 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  (8 a 10 anos), mas estes resultados devem ser considerados como excepcionais (21).

### 5.1.2 - Módulo de Elasticidade

A rigidez de um material para pavimento é usualmente expressa em termos de módulo de elasticidade. Para materiais estabilizados pozolânicamente, a relação tensão - deformação não é linear, logo não será possível atribuir um valor explícito para o módulo de elasticidade. Usamos geralmente o valor do módulo secante para materiais deste tipo.

Materiais estabilizados pozolânicamente possuem diferentes módulos de elasticidade na compressão e na tração.

Valores típicos do módulo de elasticidade (tangente e secante), estão entre 35.000 a 175.000  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ .

São muitos os fatores que influenciam na rigidez deste tipo de material. Em geral, misturas com agregados finos como areia terão módulos baixos e com agregados grossos como brita terão módulos altos. Agregados não porosos e densidade relativamente alta da mistura também aumentarão a rigidez. Logo, o valor do módulo depende das características do agregado (dureza da partícula e graduação) esforço de compactação e tempo de cura. É importante frisar que valores mais significativos da rigidez poderão ser expressos depois de um razoável tempo de cura (12, 16, 21).

### 5.1.3 - Coeficiente de Poisson

Todo o material submetido a um carregamento numa dada direção deforma-se também na direção perpendicular ao carregamento. A relação entre a deformação perpendicular e a paralela à direção do carregamento é conhecida como coeficiente de Poisson.

Este coeficiente geralmente permanece constante num nível de tensão abaixo de 70% da tensão de ruptura. Para materiais pozolânicos, o valor do coeficiente de Poisson permanece relativamente constante ao redor de 0,08, num nível de tensão aproximadamente abaixo de 60% da tensão de ruptura, e com o aumento do nível de tensão, até o valor de 0,3 no rompimento. Este tipo de análise não é muito sensível para pequenas variações no coeficiente de Poisson. Caso as tensões sejam maiores que 60% da tensão de ruptura, ainda assim, a variação no módulo de elasticidade tem uma maior influência do que a variação no coeficiente de Poisson. Logo, para este coeficiente poderemos tomar o valor de 0,1 sem apreciáveis erros (12, 16,21).

#### 5.1.4 - CBR

O CBR é usado como medida comparativa da resistência de solos. Devido à alta resistência de materiais estabilizados pozolanicamente, será difícil obter valores significativos que poderão ser usados com propósitos comparativos. Este ensaio será mais significativo para avaliar os benefícios do simples tratamento de solo com cinza volante e cal. Miller e McNichol descrevem os resultados de ensaios de CBR mostrando o efeito do tratamento com cinza volante e cal em 4 tipos de solos, dois do tipo A-4 e dois do tipo A-2-4 (12).

### 5.1.5 - Ensaio Triaxial

Descreve Barenberg (12), um programa de ensaios triaxiais em mistura de cinza volante, cal e agregados. Três misturas diferentes foram submetidas a ensaios não drenados e não consolidados. Os corpos de prova eram compactados próximos à umidade ótima e curados por 4 dias, com ciclos alternados de molhagem e secagem. Foi encontrado o ângulo de resistência ao cisalhamento variando de  $49^\circ$  a  $53^\circ$  e a coesão aparente de 4 a 9 kgf/cm<sup>2</sup>. Miller e Menichol também reportam em seu trabalho, ensaios triaxiais realizados com misturas de cinza volante, cal e solo siltoso do tipo A-4 (22).

### 5.1.6 - Auto-cimentação

A auto-cimentação ("autogeneous healing"), diz respeito ao fenômeno pelo qual um corpo fissurado cicatriza-se ou recimenta-se por si só, devido a um mecanismo auto-regenerador. Este mecanismo depende do prosseguimento das reações entre a cinza e a cal, as quais provêm condições necessárias para a auto-cimentação. Este fenômeno, peculiar a materiais estabilizados pozolanicamente, foi bem observado no campo em alguns casos.

Devido a esta propriedade, as misturas de LFA, são menos susceptíveis à deterioração sob a ação de cargas repetidas do que por exemplo, o solo-cimento. O quanto de auto-cimentação que

pode ocorrer, depende de muitos fatores, incluindo: o tempo decorrido desde a fissuração da mistura; o grau de contato das superfícies fissuradas; a condição de cura; a quantidade existente dos produtos reagentes (cinza volante e cal); e condições de umidade.

Concluindo, o fenômeno de cicatrização melhora consideravelmente as propriedades de durabilidade e fadiga do referido material (12, 21).

#### 5.1.7 - Fadiga

Todos os materiais de engenharia estão sujeitos à ruptura causada por um progressivo fissuramento provocado por repetições de cargas num nível de tensão abaixo da tensão máxima de ruptura. E este progressivo fissuramento sob as repetições de carga é conhecido como fadiga.

Por causa da característica de auto-cimentação, misturas de LFA seriam menos susceptíveis ao rompimento por fadiga do que outros materiais para pavimentos; se a magnitude da carga aplicada não ultrapassar o máximo estipulado, materiais estabilizados pozolanicamente que não romperam muito cedo na sua história de carregamento, provavelmente resistirão indefinidamente à fadiga (21).

### 5.1.8 - Durabilidade

Durabilidade é a capacidade de um material manter a integridade de sua estrutura, sob as condições a que está exposto. As principais forças que destroem esta integridade estrutural são as trocas de umidade, temperatura e as tensões devidas ao carregamento repetido.

Muitos métodos de avaliação da durabilidade de materiais estabilizados pozolanicamente têm sido estudados. Entre esses, a perda de peso, absorção, velocidade de propagação de vibrações (frequência de ressonância), variação de volume e medida de resistência. A dificuldade maior está na falta de correlação satisfatória com o campo.

Misturas mal dosadas poderão desintegrar-se completamente nas condições severas de ensaio de laboratório, que não ocorrerem no campo. Para melhores resultados, o pavimento pozolânico deverá ser protegido da excessiva infiltração de água e da ação abrasiva do tráfego, por um revestimento betuminoso - tratamento superficial ou concreto betuminoso (12, 21).

## 5.2 - Fatores que Influenciam a Reação Pozolânica

As propriedades dos materiais estabilizados pozolanicamente dependem de diversos fatores, entre os quais estão a natu-

reza dos próprios materiais utilizados, suas proporções, e processo de execução e cura. A figura 2 apresenta esquematicamente algumas das variáveis relevantes (12, 16, 19, 21).

### 5.2.1 - Materiais

O efeito da cal ou do hidróxido de cálcio depende particularmente da pozolana utilizada. Inúmeras pesquisas foram realizadas na determinação da escolha de um tipo de hidróxido de cálcio; mas não se obteve conclusão alguma que informasse corretamente sobre a escolha do tipo.

Comumente, a cal dolomítica produz resistências superiores à cal cálcica; mas com certas cinzas volantes o efeito é oposto. Logo, tem-se obtido resultados contraditórios considerando efeitos relativos de cal cálcica e dolomítica. Recomenda-se ensaiar as cales "a priori" com a cinza disponível na região, permitindo assim a determinação do tipo de cal mais adequado.

Os tipos mais utilizados são a cal hidratada tipo cálcica e a dolomítica.

O óxido de cálcio (CaO) geralmente produz melhores resistências, mas quase não é utilizado devido a sua causticidade e, portanto, periculosidade no manuseio.

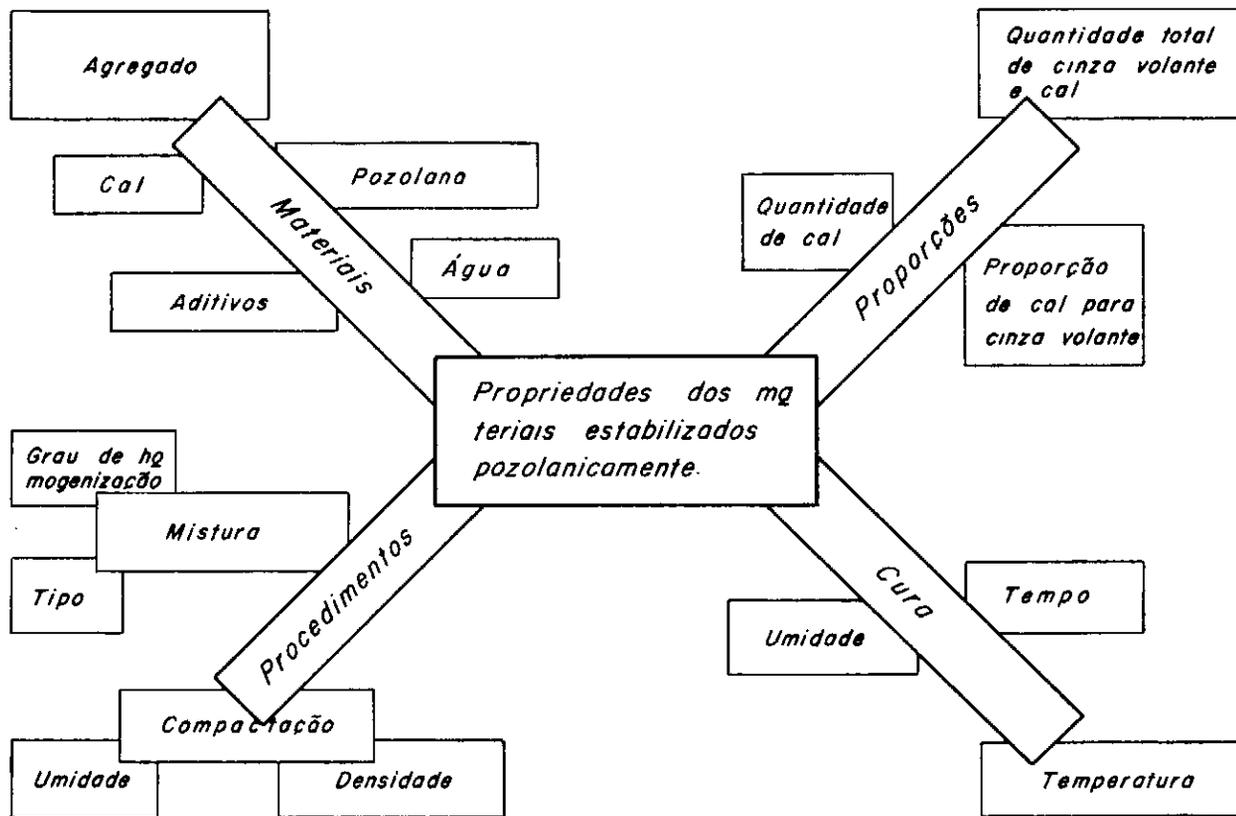


FIGURA 2 – Fatores que influenciam nas propriedades dos materiais estabilizados pozolanicamente.

Todas as propriedades dos materiais estabilizados pozolanicamente são influenciadas pela qualidade da pozolana, mas consideráveis dificuldades têm sido encontradas em estabelecer correlações entre as propriedades da cinza volante e as propriedades do material estabilizado pozolanicamente.

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas com o intuito de determinar as características das cinzas de boa qualidade. Sabe-se que a concentração do óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) mais óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mais óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) possui relação direta com a resistência, não existindo relações significativas entre a composição química ou física das cinzas e sua reatividade com a cal. Percentagens elevadas de carbono nas cinzas acarretam decréscimos da resistência e da durabilidade do material. Podemos considerar como bom critério de qualidade, valores elevados de superfície específica da cinza volante, sendo um critério de avaliação rápida a percentagem de cinza que passa na peneira nº 325 (0,044 mm).

A Especificação provisória de cinza volante e outras pozolanas para uso com cal (ASTM Designation: C593-66T) (23) e de cinza volante para uso como material pozolânico com cal (C-379) (12) poderão ser utilizados para avaliar a cinza; entretanto, será sempre conveniente uma avaliação por intermédio da resistência e das características da durabilidade da mistura que se pretende usar.

A variedade dos agregados utilizados nessas misturas têm abrangido uma gama bem variada.

Se o agregado contiver argila, quantidade adicional de cal hidratada deverá ser usada para satisfazer a capacidade de troca de base da referida argila.

Se o agregado for bem graduado, ele requererá quantidade total mínima de cinza e cal para efetuar a estabilização. Caso o agregado for mal graduado, maior quantidade de argamassa ligante será necessária para produzir a mistura. No caso de agregados angulares, usualmente requer-se um pouco mais de cinza volante e cal para rodearem as partículas de agregado.

Em relação a solos, foi observado por Mateos (24), que os arenosos são os que mais se beneficiam com a adição de argamassa pozolânica (cinza volante mais cal).

A presença de matéria orgânica influencia negativamente a reação, e a água utilizada deverá estar livre de impurezas como óleo, ácidos e matéria orgânica.

Diversos tipos de aditivos causam o aumento da resistência, parecendo ser o mais promissor o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (25,26).

### 5.2.2 - Proporções

As misturas poderão ser preparadas com um baixo teor de cal (2%) e cinza volante (8%), ou com um alto teor de cal (9%) e cinza volante (36%). Nestes dois intervalos, uma série de combinações será possível, variando a cal desde 2 a 9% e a cinza volante de 8 a 36%. Quando o cimento for adicionado à mistura, a proporção de cal para o cimento deverá estar entre 3:1 a 4:1 e para finalidades especiais na razão de 2:1.

A percentagem ótima de argamassa para cada tipo de mistura é a quantidade requerida para atingir a densidade máxima na mistura compactada, isto é, encher os vazios do agregado.

### 5.2.3 - Processos de Execução

Os fatores que mais influenciam os processos de obtenção deste tipo de material são a mistura e a compactação.

Na mistura deve-se observar sempre o tempo de homogeneização e o modo pelo qual ela é feita; na compactação, a umidade e a densidade.

A mistura deverá ser efetuada de tal forma que o material final esteja uniformizado em sua totalidade, permitindo assim o melhor contato entre as substâncias reagentes. É fato que um

tempo não otimizado para a mistura e insuficiente compactação em materiais pozolânicos, resultarão em prejuízo da sua resistência e durabilidade. A maneira pela qual se mistura estas substâncias em laboratório pode divergir bastante do que se obtém no campo, devido às diferentes condições das duas situações. Isto poderá ocasionar dispersões nos resultados, quando os propósitos são comparativos. Logo, sugere-se variar o tempo de mistura deste material e então medir sua resistência à compressão simples.

Uma das características mais favoráveis deste material é o tempo que pode decorrer, sem prejuízo de sua qualidade, entre a mistura e a compactação.

A densidade afeta a resistência e a durabilidade sendo que esta é influenciada negativamente pela falta ou excesso de umidade. Logo, a densidade é fator preponderante e deverá ser bem controlada em campo [12].

#### 5.2.4 - Cura

A cura é influenciada diretamente pelo tempo, umidade e temperatura.

A maior porção da resistência potencial em materiais pozolânicos, desenvolve-se dentro de um ano, mas tem sido notado o crescimento desta resistência mesmo após vários anos. Logo, é fa-

tor importante a determinação deste tempo na avaliação da qualidade do material.

A reação pozolânica requerida para a formação dos compostos cimentícios não se realizará sem que a quantidade suficiente de umidade esteja presente. A falta ou o excesso de umidade causarão prejuízo à resistência e a durabilidade.

Variações de temperatura aceleram ou retardam a reação pozolânica. A reação cessa a temperaturas de 7°C ou menos. Hollin e Mark (12) asseguram que uma cura a 70°C aos 7 dias, equivale à resistência desenvolvida após um ano a 21°C. Logo, poder-se-ia usar a cura de alta temperatura para verificar a resistência potencial dos materiais pozolânicos curados sob condições de campo.

Portanto, as condições de cura são extremamente importantes e exercem um pronunciado efeito na resistência e durabilidade do material estabilizado.



C A P Í T U L O   V I

## 6. PROGRAMA DE PESQUISA

Serviram como base de informações para esta pesquisa alguns trabalhos estrangeiros, entre os quais se destaca o da construção das pistas do aeroporto de Newark, a cargo do New York Port Authority e sob a direção do Eng<sup>o</sup> Yang.

Esta tese de Mestrado compreende o estudo de três misturas pozolânicas cujas composições se baseiam nas do referido aeroporto. Esta pesquisa passou a ter, desde fins de 1974, o patrocínio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER.

Um programa mais amplo foi encetado pelo IPR, cuja primeira etapa é a tese propriamente dita. A segunda etapa, em andamento, aborda a variação da percentagem de cal em torno da mistura básica da 1<sup>a</sup> etapa, e outros estudos de laboratório. A terceira etapa compreenderá a construção de uma pista experimental como variante da rodovia federal em Santa Catarina, próximo da termelétrica da SOTELCA, Tubarão, produtora da maior quantidade de cinzas da América do Sul. No local encontram-se, também, dunas de areia litorâneas.

São três os tipos de misturas, as quais estão representadas qualitativamente no esquema I. O esquema II corresponde às misturas com suas proporções definidas. Observa-se que o aditivo não faz parte das proporções da mistura e sua percentagem é sempre tomada em relação ao peso da mistura total seca básica: agregado, cal e cinzas, cuja soma de percentagens deverá totalizar 100%.

A mistura I é considerada básica e termo de referência para comparação das subseqüentes.

Na mistura II o aditivo é acrescido com a finalidade de aumentar a resistência inicial do produto.

A mistura III conta ainda com a adição de pedra britada, onde uma parcela de areia é substituída por igual peso de brita.

Os ensaios realizados com estas misturas estão descritos nos esquemas III e IV.

Na Tabela nº 12 resume-se o escopo desta pesquisa.

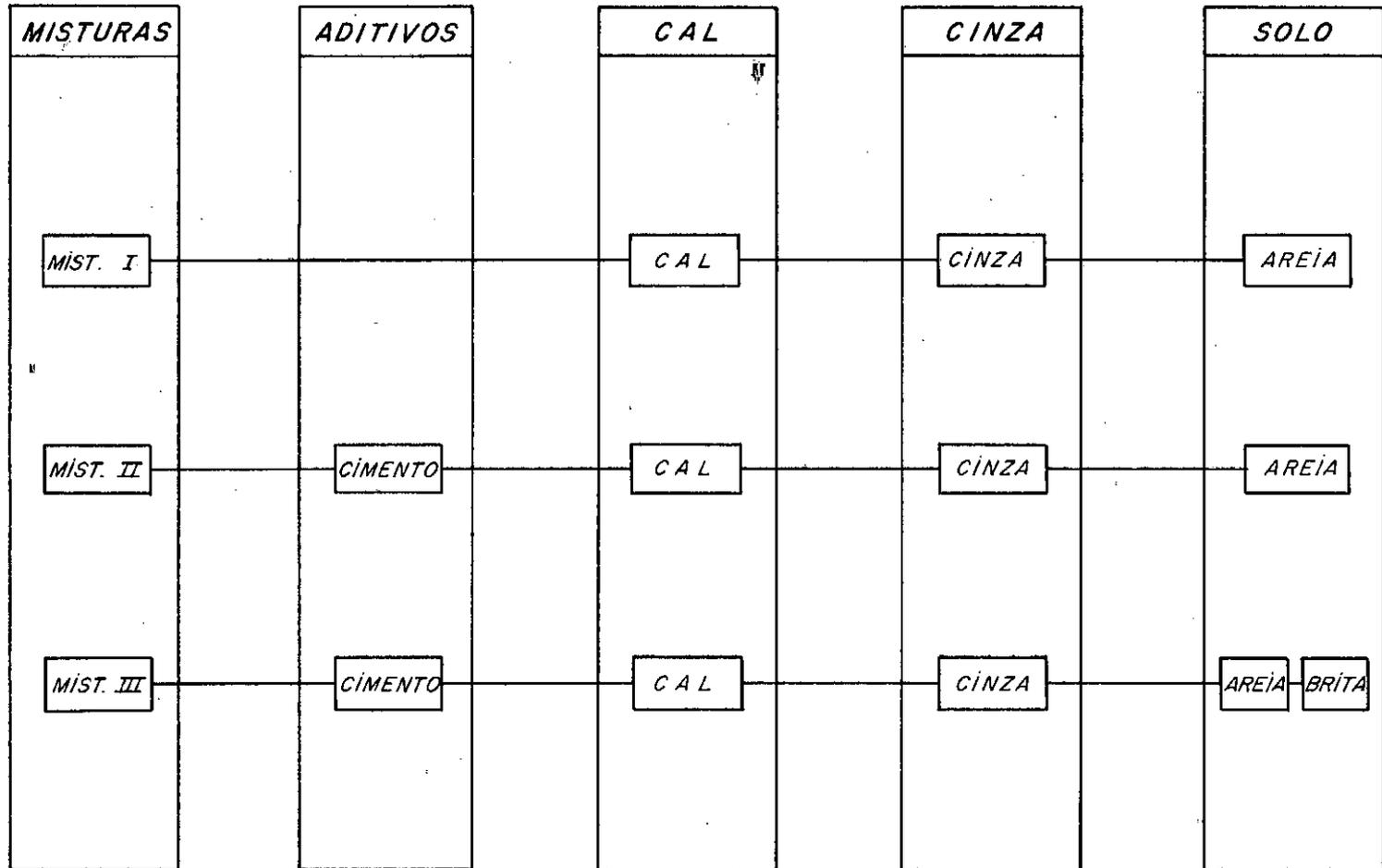
Grandezas a serem observadas:

1 - Peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ).

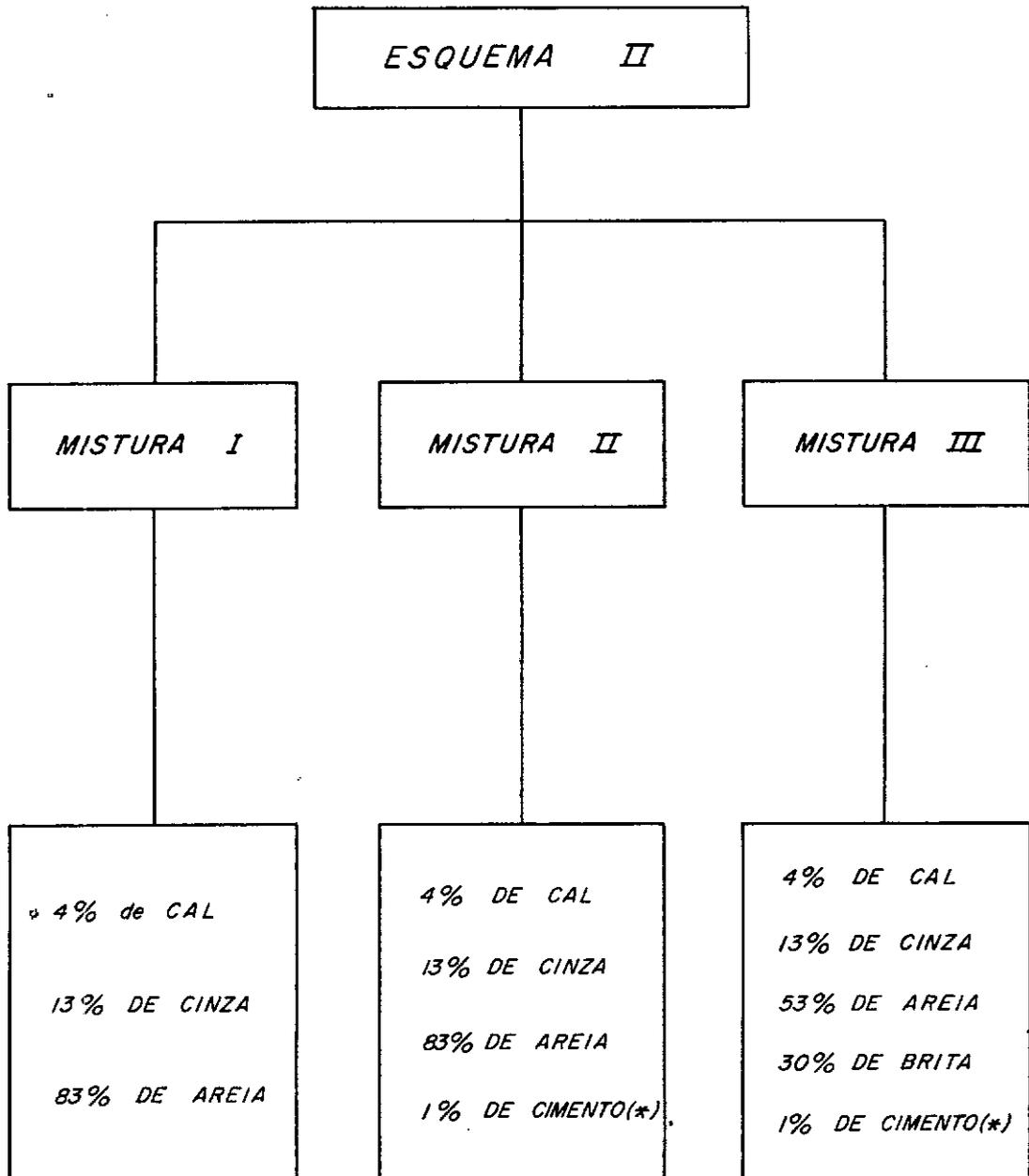
$$\gamma_s = F_1 (A, P, B, E, h)$$

# TIPOS DE MISTURAS

ESQUEMA I

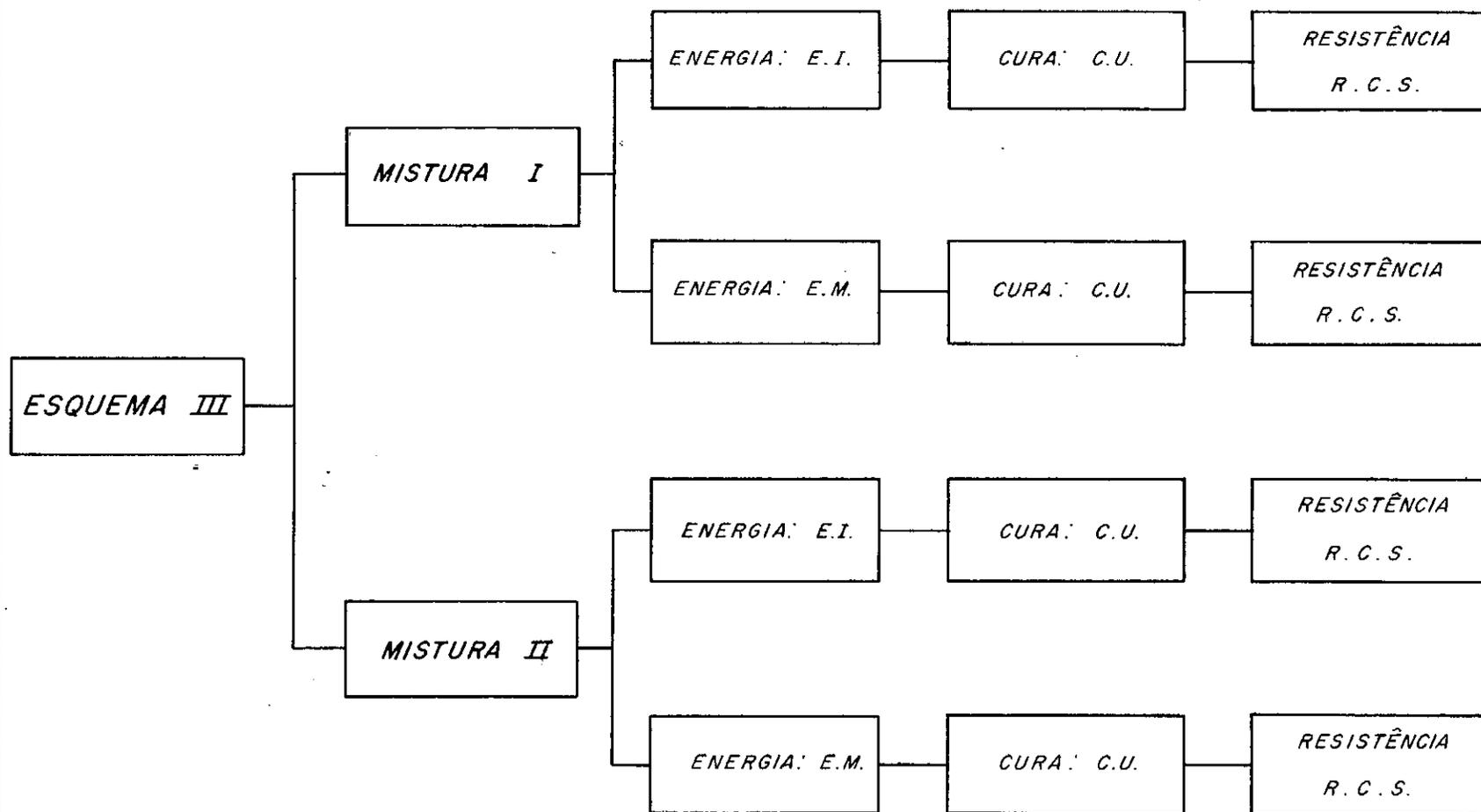


## PROPORÇÕES DA MISTURA

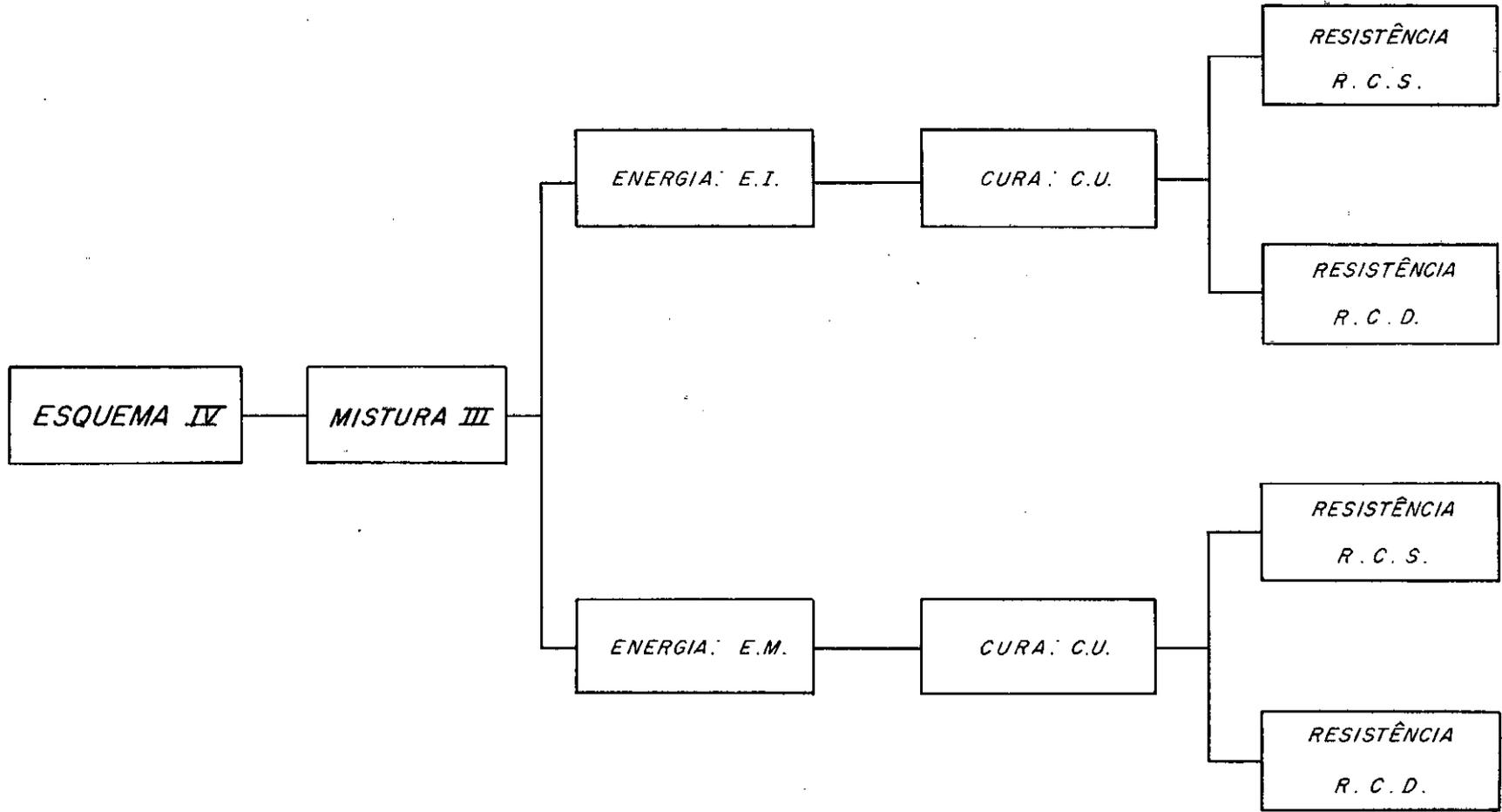


(\*) Em relação ao peso seco da mistura:  
Agregado, cal, e cinza.

## ENSAIOS REALIZADOS



ENSAIOS REALIZADOS



T A B E L A 1 2ESCOPO DA PESQUISA

PARÂMETRO ESTUDADO	Nº DE VALORES	OBSERVAÇÕES
Areia (A)	2	83 e 53% (Misturas I, II e III)
Cimento portland (P)	1	1% (Misturas II e III)
Brita (B)	1	30% (mistura III)
Energia de compactação (E)	2	Intermediária e modificada
Idade de cura (t)	3	7, 14 e 28 dias
Umidades na curva de compactação (h)	6	Nº de pontos na curva de compactação
Temperatura de cura (T)	1	24 ± 2°C

2 - Resistência à compressão simples ( $R_{cs}$ ).

$$R_{cs} = F_2 (\gamma_s, t, T)$$

3 - Resistência à compressão diametral ( $R_{cd}$ ).

(Subentende-se resistência à tração simples, determinada por meio do ensaio de compressão diametral).

$$R_{cd} = F_3 (\gamma_s, t, T)$$

*CAPÍTULO VII*

C A P Í T U L O   V I I

## 7. MATERIAIS UTILIZADOS

## 7.1 - Cinza Volante

De Capivari de Baixo (Tubarão), Estado de Santa Catarina, distribuída pela companhia Pozolana Comércio Ltda., São Paulo.

Nas Tabelas 13 e 14 se apresentam os resultados das análises químicas e físicas.

## 7.2 - Cal Hidratada

Cal hidratada cálcica,  $\text{Ca(OH)}_2$ , tipo comercial da Companhia Cimento Portland Itaú, São Paulo. Nas Tabelas 15, 16, segundo as análises, estão as características químicas e físicas da referida cal hidratada, produzida na Fábrica Itaú de Arcos - MG.

T A B E L A 1 3ANÁLISE QUÍMICA DA CINZA VOLANTE

Perda a 800°C	4,01 %
Anidrido silícico (SiO <sub>2</sub> )	53,60 %
Óxidos de ferro (em Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8,33 %
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	28,60 %
Óxido de cálcio (CaO)	1,35 %
Óxido de magnésio (MgO)	0,91 %
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,10 %
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	2,32 %
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	0,82 %

T A B E L A 1 4ANÁLISE FÍSICA DA CINZA VOLANTE

FINURA	
Superfície específica (ASTM-C 204-73), em $\text{cm}^2/\text{g}$	3.437
Área superficial (ASTM-C 618-73), em $\text{cm}^2/\text{cm}^3$	7.373
Diâmetro médio das partículas (ASTM-C 402-65 T), em $\mu\text{m}$	8,10
Material retido na peneira n° 325 (ASTM-C 430-73) em %	10,70
MASSA ESPECÍFICA (ASTM-C 188-72), em $\text{g}/\text{cm}^3$	2,15
ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA:	
Com cimento portland (ASTM-C 618-73), em porcentagem do controle	89
Com cal (ASTM-C 595-73), em $\text{kg}_f/\text{cm}^2$	57
ÁGUA REQUERIDA (ASTM-C 618-73), em porcentagem do controle	101

T A B E L A 1 5ANÁLISE QUÍMICA DA CAL HIDRATADA CÁLCICA

Resíduo insolúvel	0,38 %
Perda ao fogo	28,20 %
Óxido de alumínio + Óxido de ferro ( $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ )	traços
Óxido de cálcio (CaO)	71,40 %
Óxido de magnésio (MgO)	traços
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	traços

T A B E L A 1 6ANÁLISE FÍSICA DA CAL HIDRATADA UTILIZADA

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,23
Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	12.480
Área específica volumétrica (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	27.830
Resíduo na peneira nº 325 (%)	4,10
Diâmetro médio das partículas (µm)	2,16

### 7.3 - Aditivo

Cimento portland do tipo Irajá - Ducor, de alta resistência inicial, da Companhia de Cimento Irajá S.A., Rio de Janeiro. Usa-se como aditivo para aumento da resistência inicial. Ensaios químicos e físicos segundo as Tabelas 17 e 18.

### 7.4 - Agregado

Brita corrida (lavada), proveniente de gnaisse; descrição da granulometria na Tabela 19 e curva granulométrica na Figura 3.

### 7.5 - Solo

Areia de quartzo, não reativa com a cal e a água em temperatura ambiente, retirada das dunas da Barra da Tijuca, na rodovia Rio-Santos, km 8, na Baixada de Jacarepaguá - Rio de Janeiro. Descrição da granulometria, propriedades químicas e físicas nas Tabelas 20 e 21 e curva granulométrica na Figura 4.

T A B E L A 17ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO UTILIZADO

Perda ao fogo	3,97 %
Insolúveis	0,87 %
Anidrido silícico (SiO <sub>2</sub> )	19,80 %
Óxido de ferro (em Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,72 %
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6,92 %
Óxido de cálcio (CaO)	58,00 %
Óxido de magnésio (MgO)	3,68 %
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,35 %
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,77 %
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	2,03 %

T A B E L A 1 8ANÁLISE FÍSICA DO CIMENTO UTILIZADO

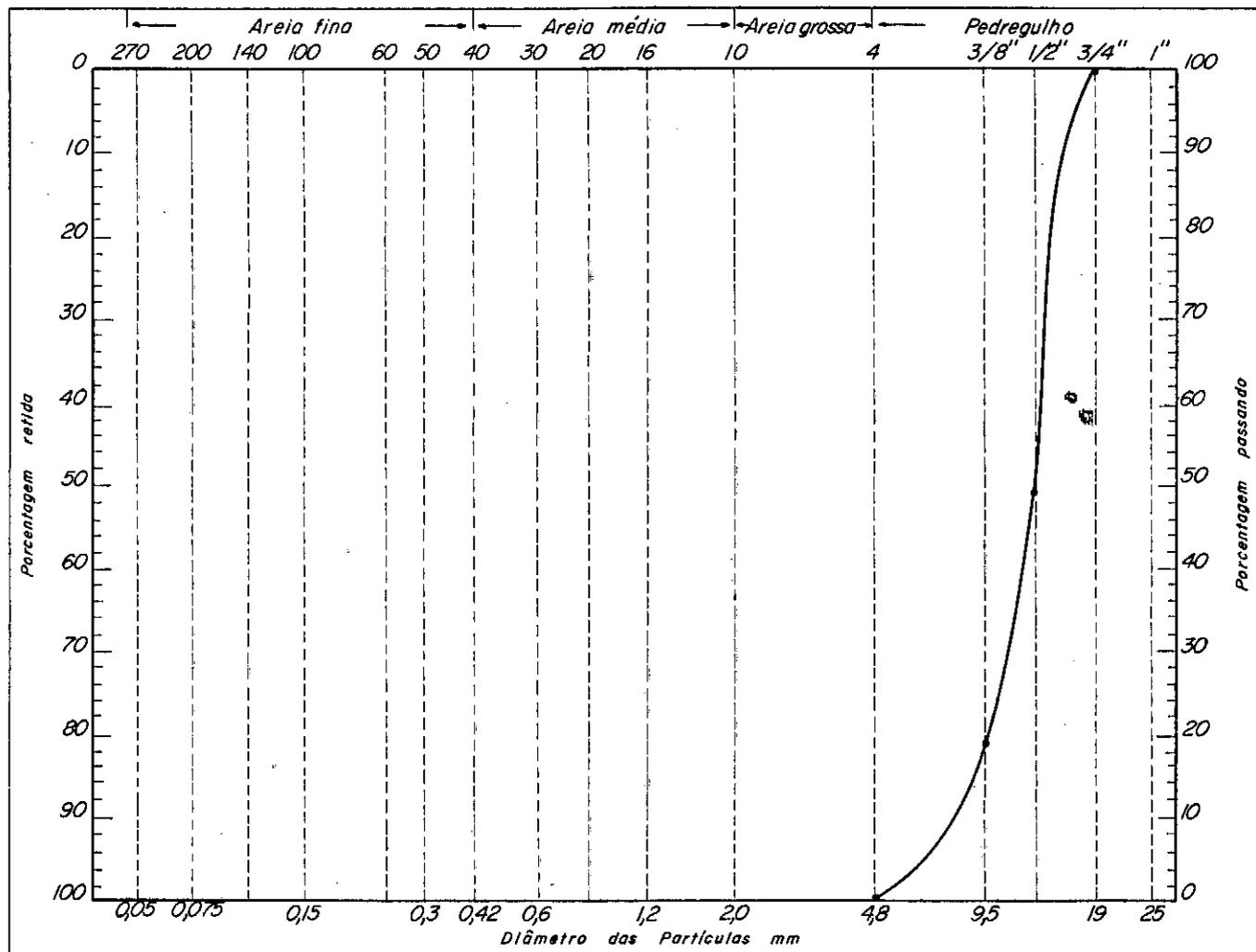
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,06
Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3.065
Área específica volumétrica (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	9.380
Resíduo na peneira nº 325 (%)	12,20
Diâmetro médio das partículas (µm)	6,39

T A B E L A 1 9

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO, DA BRITA UTILIZADA

PENEIRA	MATERIAL RETIDO		% QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL	PENEIRA ( mm )
	% AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA		
1 pol	0,00	0,00	100,00	25,4
3/4 pol	0,61	0,61	99,39	19,0
1/2 pol	51,06	51,67	48,33	12,7
3/8 pol	30,19	81,86	18,14	9,5
nº 4	18,14	100,00	0,00	4,8

**FIGURA 3 - Curva de distribuição granulométrica da brita utilizada.**



T A B E L A 2 0ANÁLISE QUÍMICA DA AREIA UTILIZADA

pH da água	6,0
pH da amostra em água	6,0
pH do KCl (N)	4,6
pH da amostra em KCl (N)	4,7
NaCl	0,03 %
Matéria orgânica	0,17 %
Carbonatos	ausência

TABELA 21

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO E  
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO UTILIZADO

PENEIRA	MATERIAL RETIDO		% QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL	PENEIRA (mm)
	% DE AMOSTRA TOTAL	% ACUMULADA		
nº 4	-	-	-	4,8
nº 8	-	-	-	2,4
nº 10	-	-	-	2,0
nº 16	0,00	0,00	100,00	1,2
nº 30	20,90	20,90	79,10	0,6
nº 40	41,91	62,81	37,19	0,42
nº 50	32,17	94,98	5,02	0,30
nº 80	-	-	-	0,18
nº 100	4,91	99,89	0,11	0,15
nº 200	0,11	100,00	0,00	0,074

Pedregulho (acima de 2 mm) 0,00 %

Areia grossa (2,00 à 0,42 mm) 62,81 %

Areia fina (0,42 à 0,074 mm) 37,19 %

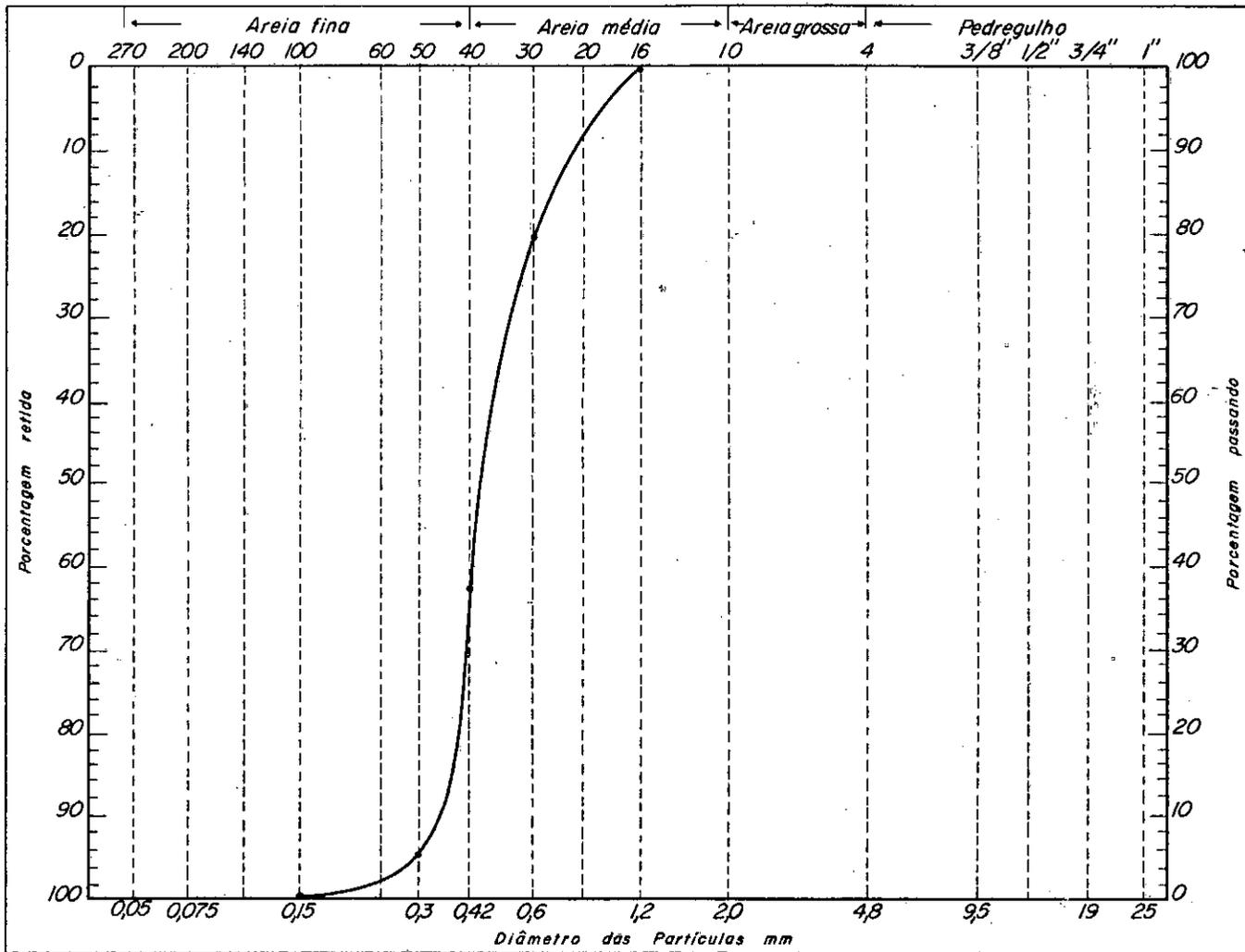
Índice de plasticidade não plástica

Densidade real do grão 2,66

Classificação unificada SP

Classificação do TRB A - 3

**FIGURA 4 - Curva de distribuição granulométrica do solo utilizado.**



Obs.: a) Métodos de ensaios empregados:

a.1) massa específica ( $\rho$ ): ASTM Designation: C 311-68 e C 188-72 para as amostras de cinzas volantes; MB-346/1966 da ABNT para a amostra de cimento Portland; e ASTM Designation: C 188-72 para a amostra de cal hidratada, empregando 40 g de material, e querosene como líquido deslocável;

a.2) área específica "Blaine" (S): ASTM Designation C 311-68 e C 204-73 (empregando a equação 8 do item 5.1) para as amostras de cinzas volantes; MB-348/1966 da ABNT para a amostra de cimento Portland, e ASTM Designation: C 204-73 (empregando a equação 8 do item 5.1) para a amostra de cal hidratada;

a.3) resíduo na peneira nº 325: ASTM Designation: C 618 e C 430-73 para as amostras de cinzas volantes; ASTM Designation: C 430-73 para a amostra de cimento Portland; e ASTM Designation: C 430-73 para a amostra de cal hidratada.

a.4) A área específica volumétrica de cada amostra foi calculada a partir da expressão:  $S_v = s.\rho$ , conforme consta do item 5.1.2 da ASTM Designation: C 618-72.

a.5) O diâmetro médio das partículas ( $\phi_m$ ), em micro-metros, foi determinado a partir da expressão:

$$\phi_m = \frac{60.000}{s.\rho}, \text{ admitidas as partículas esféricas.}$$

*CAPÍTULO VIII*

C A P Í T U L O   V I I I

## 8. MÉTODOS ADOTADOS NOS ENSAIOS

## 8.1 - Mistura

A mistura foi trabalhada a seco, manualmente, e em seguida mecanicamente, numa misturadora Hobart, Tipo BA-200, a baixa velocidade durante 5 minutos. Adicionada, a seguir, água destilada, para a obtenção da umidade desejada, o trabalho de mistura prosseguindo, então, por mais 5 minutos.

## 8.2 - Moldagem

Para otimização de resultados fizemos corresponder cada mistura a uma compactação iniciando a moldagem do corpo de prova imediatamente após a mistura. A compactação foi feita mecanicamente por equipamento Soiltest, modelo CN-4230-68, com soquete de sapata cilíndrica, compactando-se o material em 5 camadas iguais, cada camada recebendo, conforme a energia de correspondente, 20 ou 41 golpes, de um soquete de peso 4,54 kg caindo de uma altura de 45,7 cm, sendo esta energia distribuída uniformemente em toda

a camada, em molde cilíndrico, de paredes laterais tripartidas, 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A compactação foi realizada com os esforços Proctor intermediário (132.084 kg<sub>f</sub>.m/m<sup>3</sup>, DNER-DPT M 48-64) e Proctor modificado (270.773 kg<sub>f</sub>.m/m<sup>3</sup>) (27), sendo o número de golpes calculado pela fórmula da energia de compactação por unidade de volume de material compactado:

$$E = \frac{Ng.Nc.Ps.hq}{Vc}$$

E = Energia de compactação por unidade de volume.

Ng = Número de golpes por camada.

Nc = Número de camadas.

Ps = Peso do soquete.

hq = Altura de queda do soquete.

Vc = Volume da amostra compactada.

Cada curva de compactação é constituída de 6 pontos, sendo que cada ponto corresponde à média de 9 corpos de prova feitos em um só lote, divididos em grupos de 3 para serem rompidos a idades diferentes. Nesta moldagem o teor de umidade de cada corpo de prova não podia diferir de mais de ± 0,3, em porcentos, da média do lote, e o peso específico aparente seco de mais de ± 0,030 g<sub>f</sub>/cm<sup>3</sup> da referida média deste mesmo lote.

### 8.3 - Cura

Realizada em câmara Úmida à temperatura de  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , com os corpos de prova envoltos em cilindros plásticos e recobertos por três sacos plásticos especiais; evitando assim um fator sem controle, oriundo da perda ou acréscimo de umidade ou da carbonatação devido ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do ar. Idades de cura: 7, 14 e 28 dias. A câmara úmida era mantida numa umidade relativa de  $90 \pm 5\%$ .

### 8.4 - Imersão

Todos os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas, após o período de cura e antes do rompimento.

### 8.5 - Rompimento

Todos os rompimentos foram feitos em triplicatas (ASTM C-109-58), e tomadas as médias com tensões calculadas em  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ . O intervalo de variação em torno da média foi admitido de  $\pm 10\%$ . Caso um corpo de prova se afastasse deste intervalo, procedia-se nova moldagem do mesmo. Prensas utilizadas: Wykeham - Farrance de 10 toneladas mod. 1251, e Finius Olsem de 30 toneladas, n° 76600-6, com velocidade constante de 1,5 mm/min. O ensaio de compressão diametral obedeceu ao método ABNT - MB-212.



C A P Í T U L O    I X

## 9. RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados todos os resultados referentes aos ensaios de compactação, resistência à compressão simples e resistência à compressão diametral.

### 9.1 - Mistura 1 (para Ensaio de Resistência à Compressão Simples).

As tabelas 22 e 23 representam os valores do peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h) e resistência a compressão simples ( $R_{cs}$ ), para três períodos de cura (7, 14 e 28 dias) "versus" teor de umidade (h), para os esforços intermediário e modificado.

A Figura 5 representa as curvas de resistência à compressão simples ( $R_{cs}$ , após 24 horas de imersão) "versus" teor de umidade (h), e de peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h). A mistura contendo 13% de cinza volante, 4% de cal e 83% de areia de duná é compactada nos esforços intermediário e modificado.

A Figura 6 representa a influência do período de cura (t) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão simples ( $R_{cs\ max}$ ) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado. A Figura 7 representa a influência do período de cura (sob a forma  $\log t$ ) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão simples ( $R_{cs\ max}$ ) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado.

T A B E L A 2 2

MISTURA 1, COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO

(Resistências em  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ )

h (%)	$\gamma_s$ ( $\text{g}_f/\text{cm}^3$ )	Rcs7	Rcs14	Rcs28
4,19	1,846	1,08	4,25	11,07
6,17	1,869	1,70	4,52	18,03
8,15	1,898	1,36	5,78	22,34
9,12	1,920	0,59	4,25	21,78
10,15	1,920	0,52	3,44	15,73
12,17	1,851	-	-	-
hot (%)	$\gamma_{s\text{max}}$ ( $\text{g}_f/\text{cm}^3$ )	Rcs7 max	Rcs14 max	Rcs28 max
9,80	1,926	1,80	6,00	23,00

T A B E L A 2 3

MISTURA 1, COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO

(Resistências em  $\text{kgf/cm}^2$ )

h (%)	$\gamma_s$ ( $\text{g}_f/\text{cm}^3$ )	Rcs7	Rcs14	Rcs28
4,14	1,952	2,75	9,64	21,12
6,20	1,960	3,13	12,63	35,60
8,10	1,961	1,95	9,12	26,80
9,08	1,965	1,81	6,47	25,13
10,12	1,961	1,50	5,53	20,39
12,14	1,886	-	-	-
hot (%)	$\gamma_s$ max ( $\text{g}_f/\text{cm}^3$ )	Rcs7 max	Rcs14 max	Rcs28 max
9,20	1,968	3,30	12,70	35,60

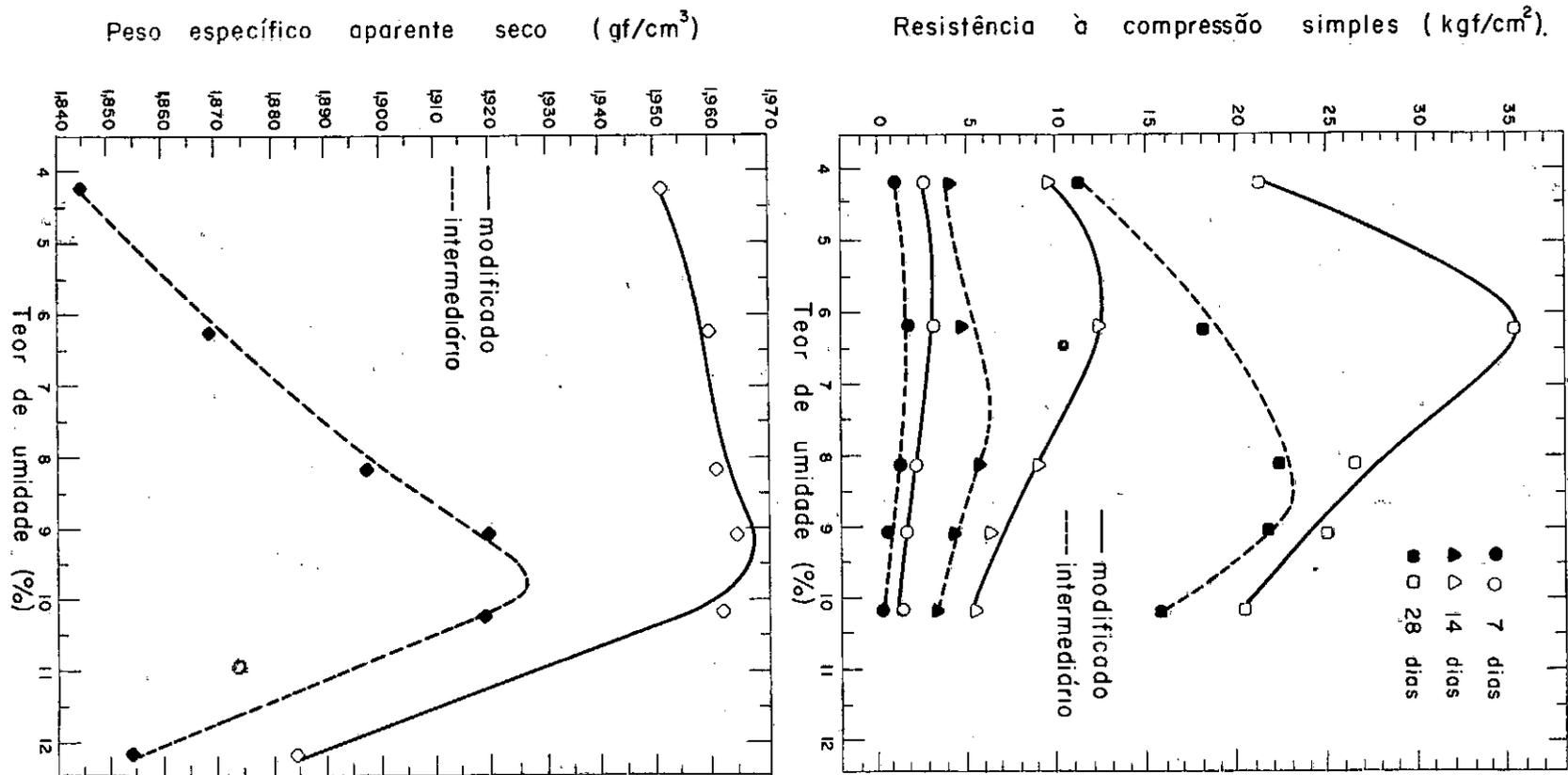


FIGURA 5 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES ( APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO ) " VERSUS " TEOR DE UMIDADE, E DE PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO "VER-SUS" TEOR DE UMIDADE. MISTURA 1 ( 13% DE CINZA VOLANTE, 4% DE CAL E 83% DE AREIA DE DUNA ) COMPACTADA NOS ESFORÇOS INTERMEDIÁRIO E MO-DIFICADO.

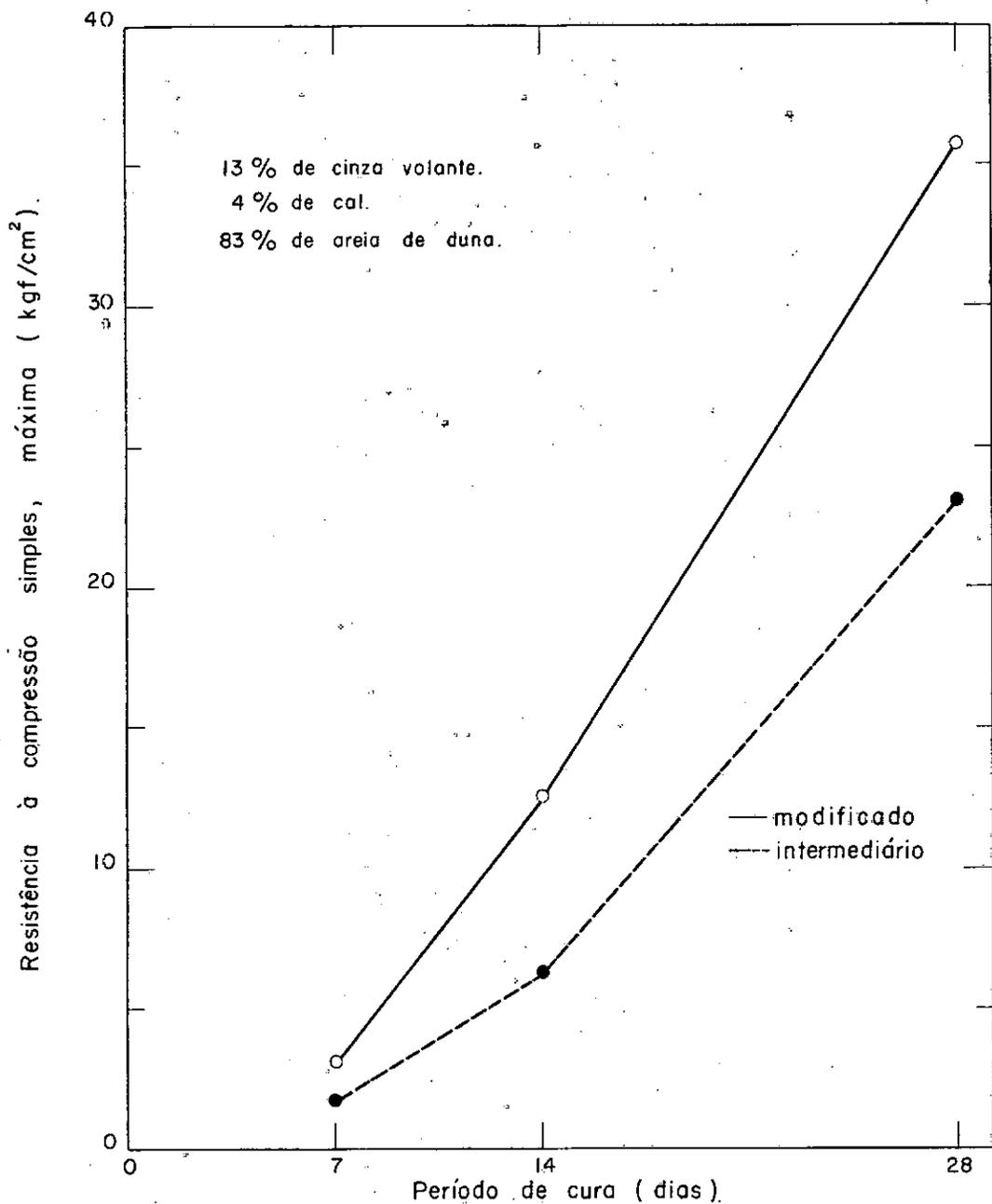


FIGURA 6 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA (7,14,e 28 DIAS) NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 1 COMPACTADA NOS ES FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

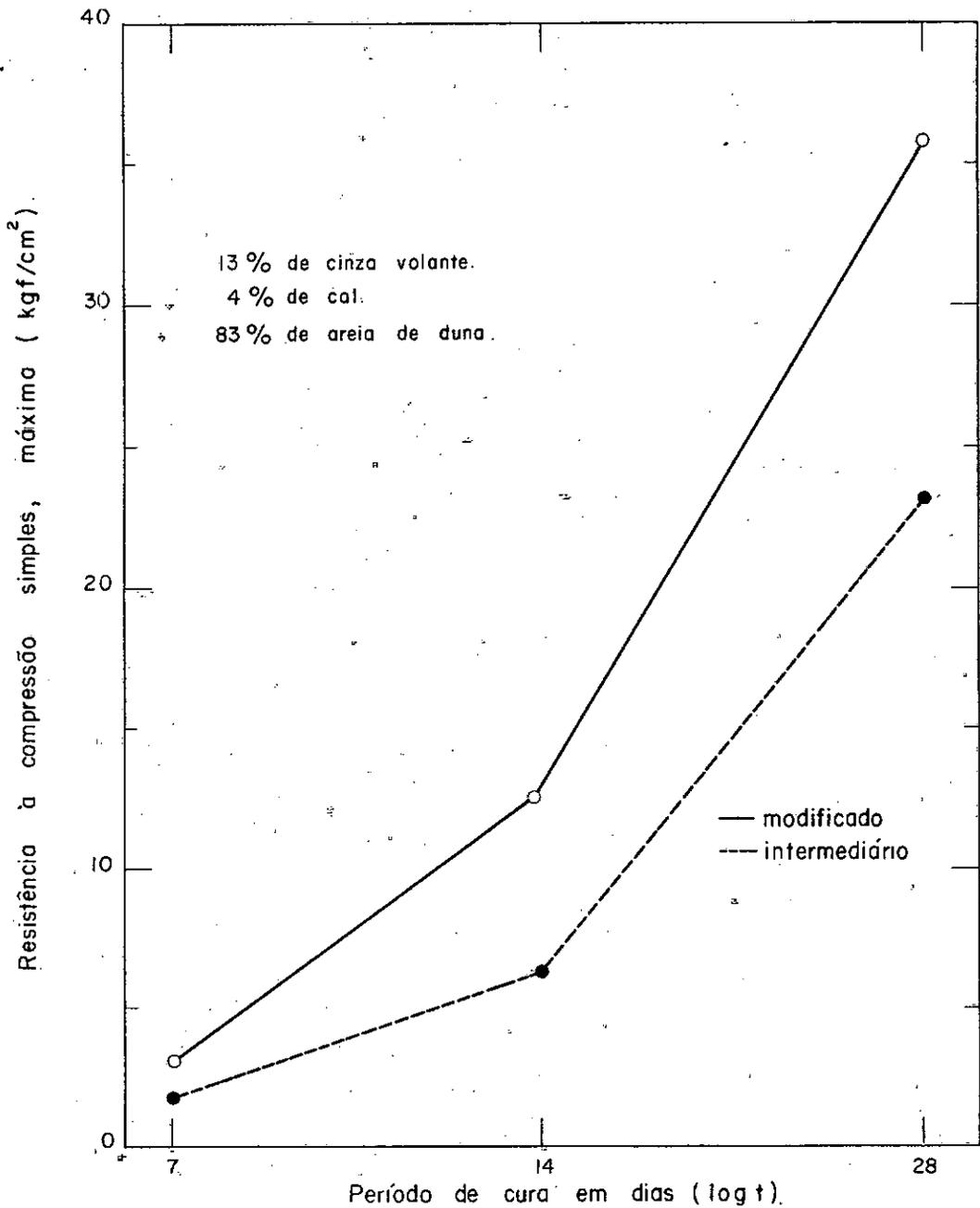


FIGURA 7 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA (7,14,e 28 DIAS) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 1 COMPACTADA NOS ES FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

## 9.2 - Mistura 2 (para Ensaio de Resistência à Compressão Simples)

As Tabelas 24 e 25 representam os valores do peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h) e resistência à compressão simples (Rcs), para três períodos de cura (7, 14 e 28 dias) "versus" teor de umidade (h), para os esforços intermediário e modificado.

A Figura 8 representa as curvas de resistência à compressão simples (Rcs, após 24 horas de imersão) "versus" teor de umidade (h) e de peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h). A mistura contendo 13% de cinza volante, 4% de cal, 83% de areia de duna e 1% de cimento portland em relação ao peso total da mistura seca, é compactada nos esforços intermediário e modificado.

A Figura 9 representa a influência do período de cura (t) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão simples (Rcs max) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado.

A Figura 10 representa a influência do período de cura (sob a forma  $\log t$ ) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão simples (Rcs max) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado.

T A B E L A 2 4

MISTURA 2, COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO  
(Resistências em  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ )

h (%)	$\gamma_s(\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7	Rcs14	Rcs28
4,16	1,853	5,46	10,30	17,16
6,03	1,863	7,48	15,73	30,28
8,05	1,902	5,78	16,08	40,03
8,92	1,923	4,31	12,21	32,02
9,90	1,926	3,27	8,70	27,18
11,74	1,872	-	-	-
hot (%)	$\gamma_{s\text{max}}(\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7 max	Rcs14 max	Rcs28 max
9,60	1,928	7,50	17,00	40,03

T A B E L A 2 5

MISTURA 2, COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO  
(Resistências em  $\text{kgf/cm}^2$ )

h (%)	$\gamma_s (\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7	Rcs14	Rcs28
4,13	1,961	9,36	18,65	29,57
6,08	1,967	12,70	28,40	49,97
7,99	1,969	7,20	20,81	47,75
8,98	1,979	5,05	16,84	40,47
9,88	1,973	3,76	13,01	30,52
11,87	1,902	-	-	-
hot (%)	$\gamma_{smax} (\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7 max	Rcs14 max	Rcs 28 max
8,90	1,982	12,70	28,40	51,00

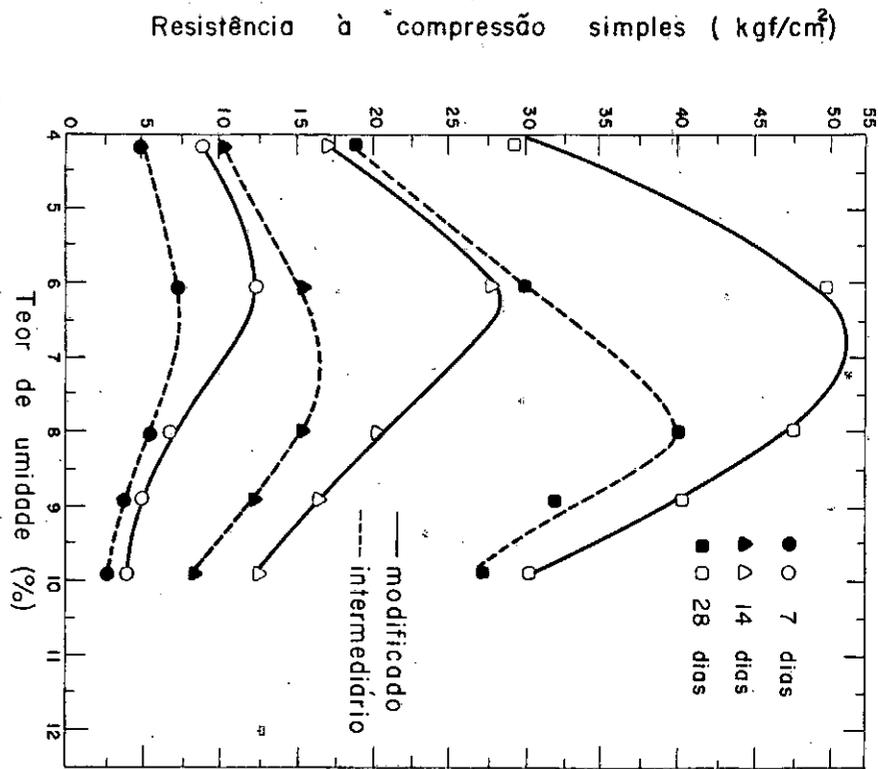
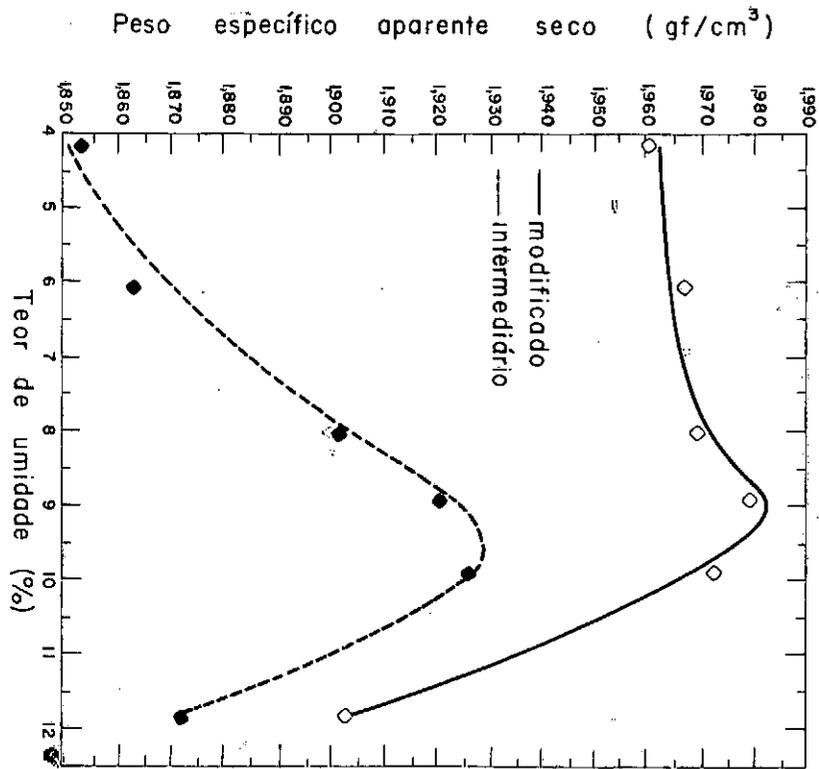


FIGURA 8 - CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES ( APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO )  
 " VERSUS " TEOR DE UMIDADE, E DE PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO " VERSUS "  
 TEOR DE UMIDADE: MISTURA 2 ( 13% DE CINZA VOLANTE, 4% DE CAL, 83% DE AREIA  
 DE DUNA, E 1% DE CIMENTO PORTLAND EM RELAÇÃO AO PESO TOTAL DA MISTURA  
 SECA ) COMPACTADA NOS ESFORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

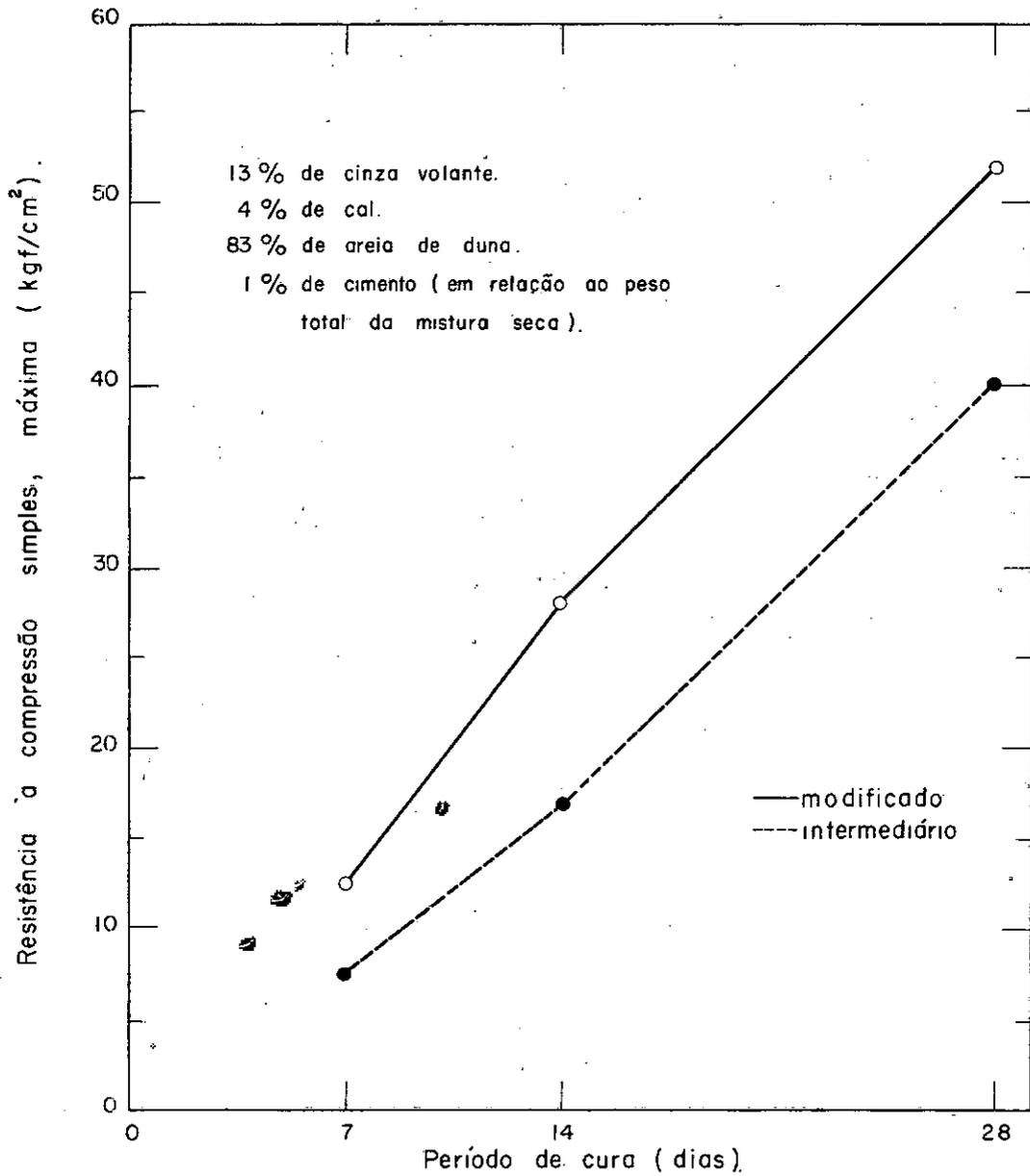


FIGURA 9 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA (7, 14, e 28 DIAS) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 2 COMPACTADA NOS ESFORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

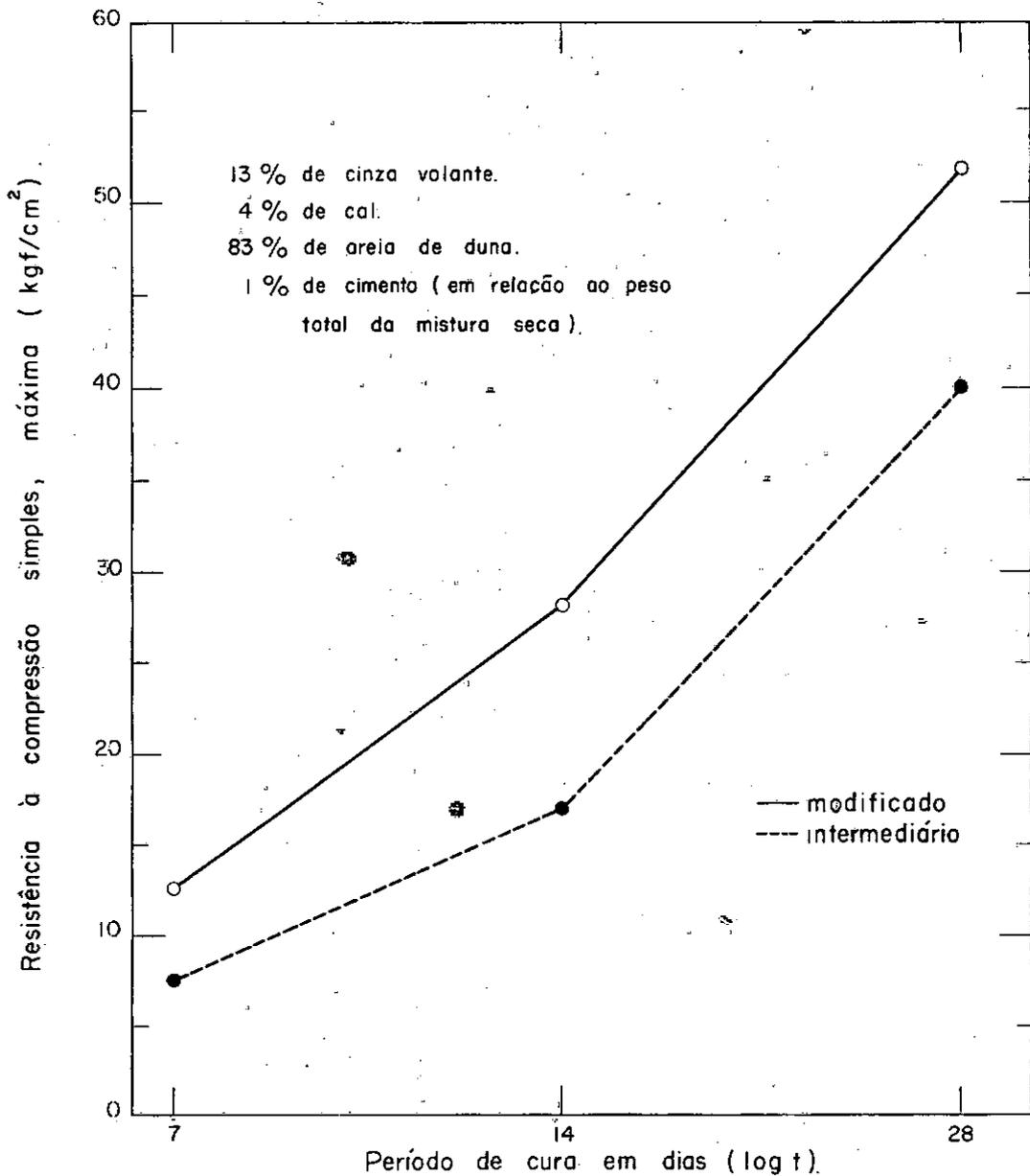


FIGURA 10 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA (7,14, e 28 DIAS) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSION SIMPLES APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 2 COMPACTADA NOS ES FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

### 9.3 - Mistura 3

Para este tipo de mistura, os corpos de prova foram ensaiados quanto à sua resistência à compressão simples e à compressão diametral.

#### 9.3.1 - Mistura 3 (para Ensaios de Resistência à Compressão Simples)

As tabelas 26 e 27 representam os valores do peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h) e resistência à compressão simples ( $R_{cs}$ ), para três períodos de cura (7, 14 e 28 dias) "versus" teor de umidade (h), para os esforços intermediário e modificado.

A Figura 11 representa as curvas de resistência à compressão simples ( $R_{cs}$ , após 24 horas de imersão) "versus" teor de umidade (h) e de peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h). A mistura contendo 13% de cinza volante, 4 % de cal, 53% de areia de duna, 30% de brita e 1% de cimento portland em relação ao peso total da mistura seca, é compactada nos esforços intermediário e modificado.

A Figura 12 representa a influência do período de cura (t) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão simples ( $R_{cs}$  max) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e

modificado.

A Figura 13 representa a influência de período de cura (sob a forma  $\log t$ ) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão simples ( $R_{cs \max}$ ) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado.

T A B E L A 2 6

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO  
(Resistências em  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ )

h(%)	$\gamma_s(\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7	Rcs14	Rcs28
4,02	2,054	21,33	33,02	49,24
5,06	2,060	23,98	37,37	55,23
5,96	2,078	25,30	40,86	66,71
7,05	2,087	17,89	35,18	64,52
8,11	2,081	13,64	25,51	53,66
9,05	2,067	-	-	-
hot(%)	$\gamma_{s\text{max}}(\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7 max	Rcs14 max	Rcs28 max
7,00	2,087	25,40	41,00	68,00

T A B E L A 2 7

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO  
(Resistências em  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ )

h(%)	$\gamma_s(\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7	Rcs14	Rcs28
4,02	2,128	38,59	60,04	80,35
5,06	2,146	39,22	62,05	88,43
5,96	2,152	30,10	53,21	92,92
7,05	2,127	21,71	37,58	71,20
8,11	2,099	15,24	30,45	55,92
9,05	2,080	-	-	-
hot(%)	$\gamma_{s\text{max}}(\text{g}_f/\text{cm}^3)$	Rcs7 max	Rcs14 max	Rcs28 max
5,80	2,153	41,00	62,10	93,00

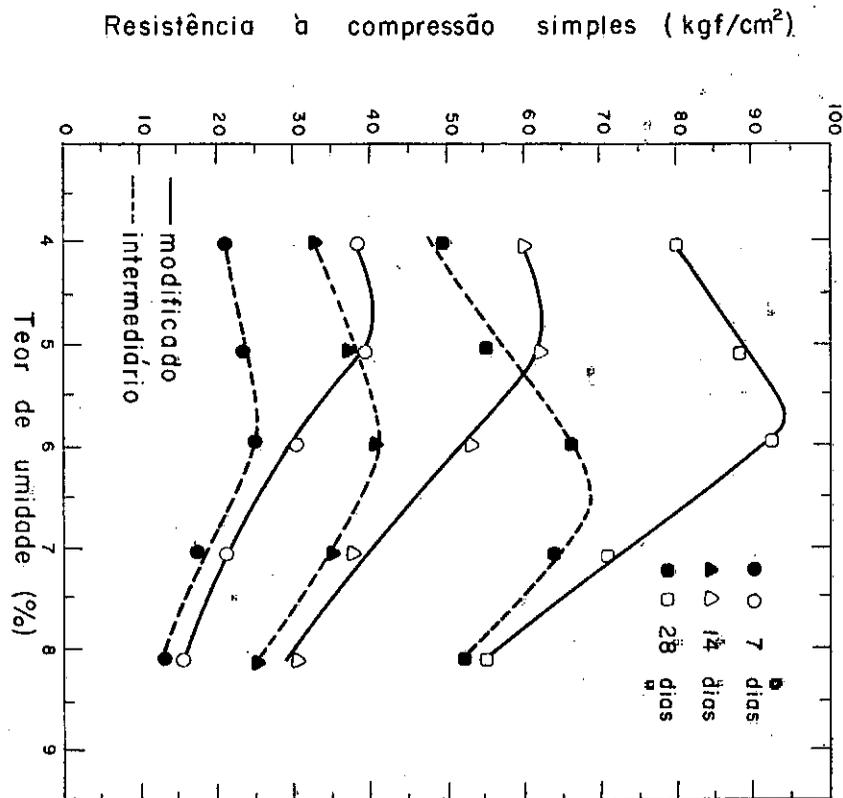
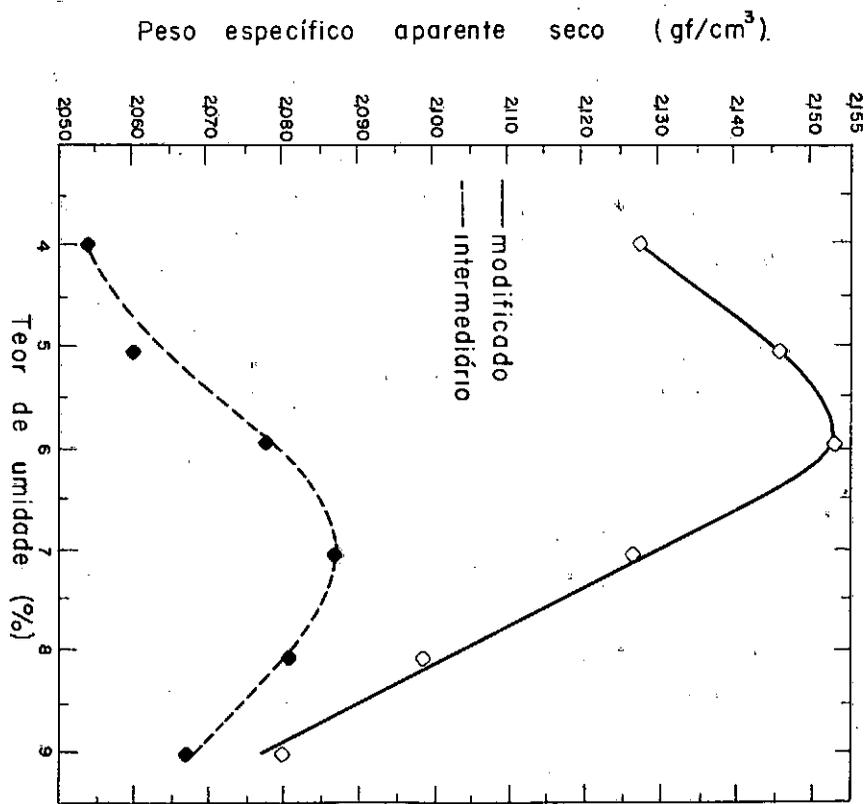


FIGURA II — CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES ( APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO ) " VERSUS " TEOR DE UMIDADE, E DE PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO "VERSUS" TEOR DE UMIDADE. MISTURA 3 ( 13% DE CINZA, 4% DE CAL, 53% DE AREIA DE DUNA, 30% DE BRITA E 1% DE CIMENTO PORTLAND EM RELAÇÃO AO PESO TOTAL DA MISTURA SÉCA ) COMPACTADA NOS ESFORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

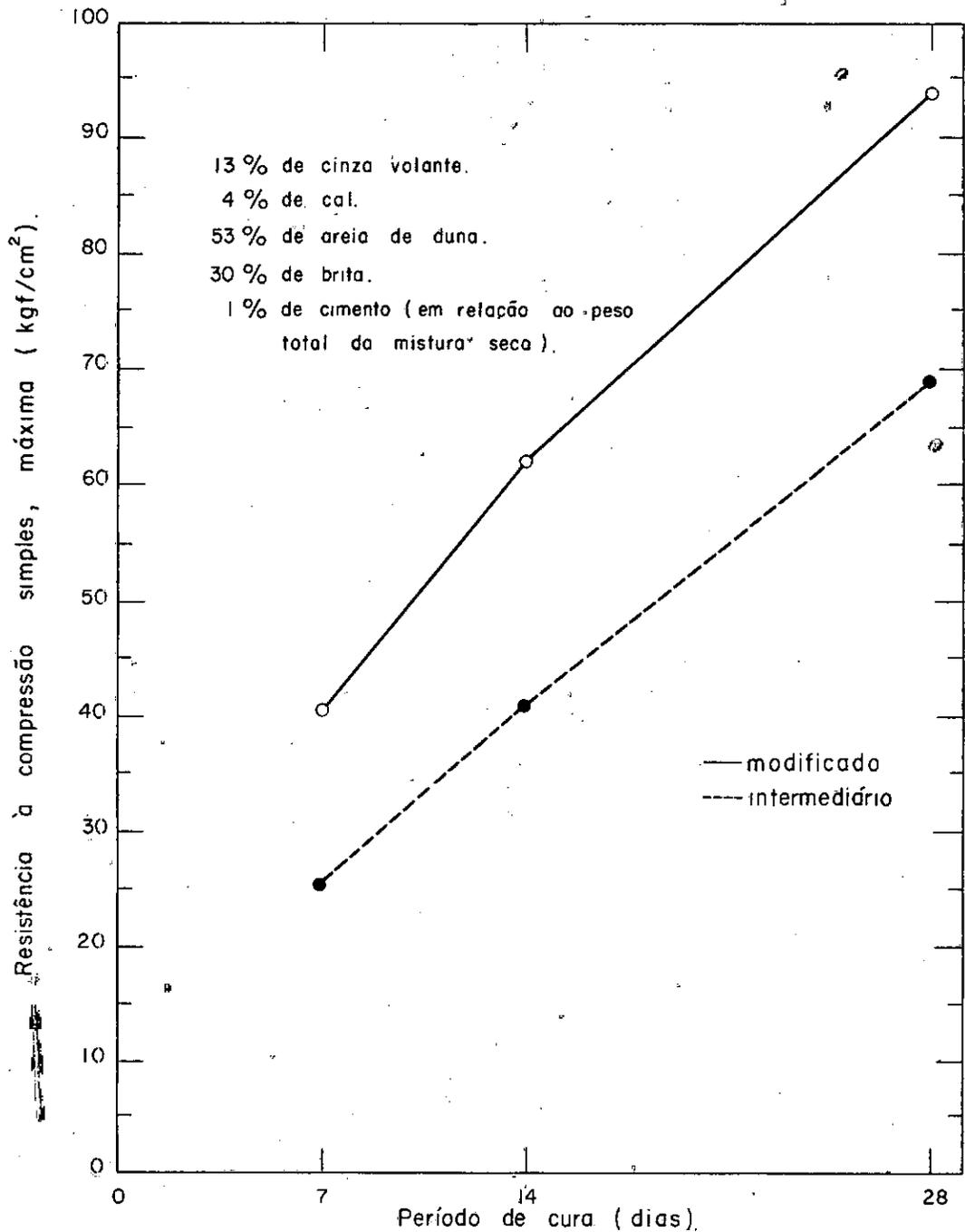


FIGURA 12 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA (7, 14, e 28 DIAS) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 3 COMPACTADA NOS ES FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

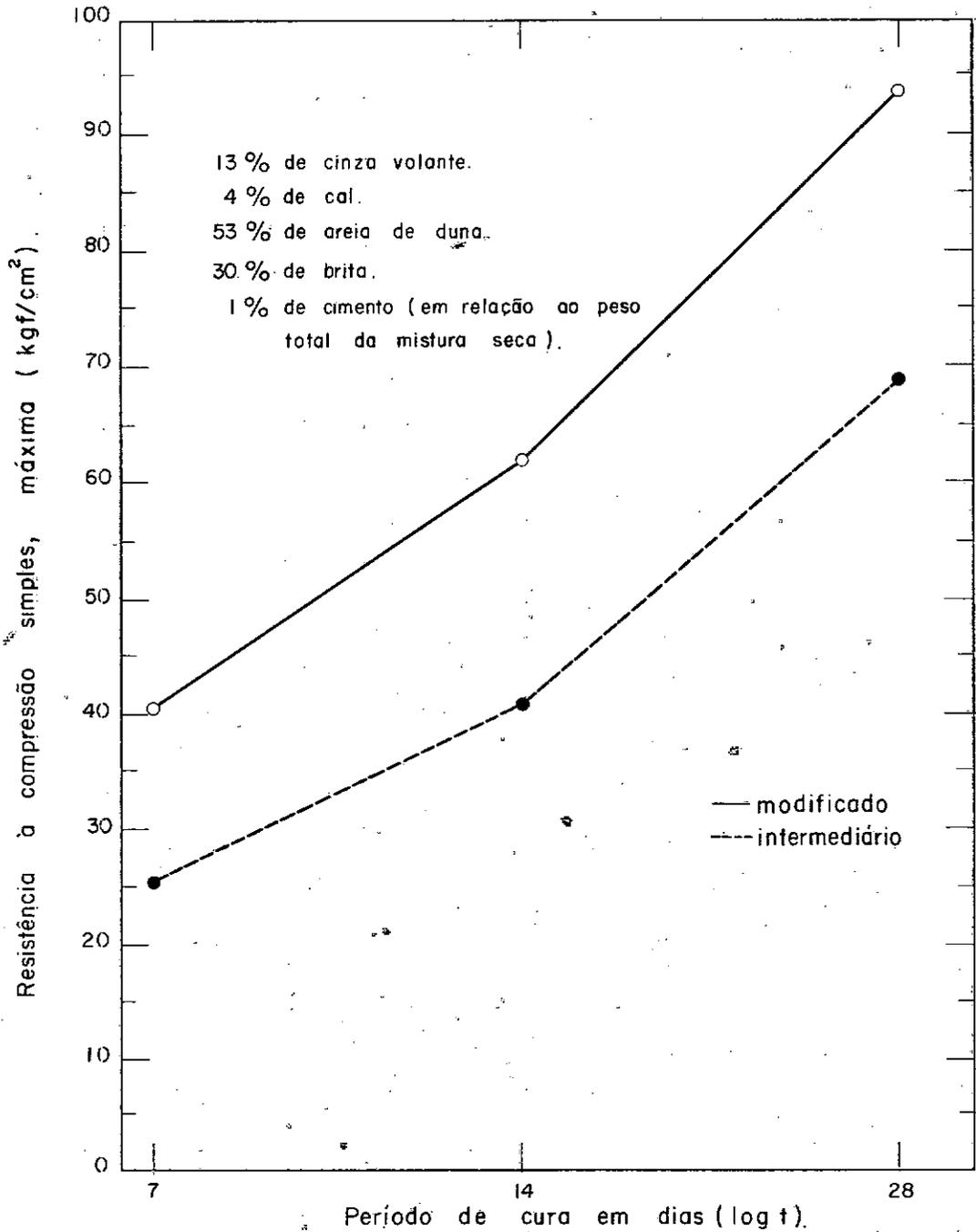


FIGURA 13 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA ( 7, 14, e 28 DIAS ) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 3 COMPACTADA NOS ES FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

### 9.3.2 - Mistura 3 (para Ensaios de Resistência à Compressão Diametral)

As Tabelas 28 e 29 representam os valores do peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) "versus" teor de umidade (h) e resistência à compressão diametral (Rcd), para três períodos de cura (7, 14 e 28 dias) "versus" teor de umidade (h), para os esforços intermediário e modificado.

A Figura 14 representa as curvas de resistência à compressão diametral (Rcd, após 24 horas de imersão) "versus" teor de umidade (h). A mistura contendo 13% de cinza volante, 4% de cal, 53% de areia de duna, 30% de brita e 1% de cimento portland em relação ao peso total da mistura seca, e compactada nos esforços intermediário e modificado.

A Figura 15 representa a influência do período de cura (t) para 7, 14 e 28 dias de cura na resistência à compressão diametral (Rcd max) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado.

A Figura 16 representa a influência do período de cura (sob a forma  $\log t$ ) para 7, 14 e 28 dias na resistência à compressão diametral (Rcd max) após 24 horas de imersão, para os esforços intermediário e modificado.

T A B E L A    2 8

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO  
(Resistências em kgf/cm<sup>2</sup>)

h(%)	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	Rcd7	Rcd14	Rcd28
4,20	2,047	1,26	2,54	4,09
5,24	2,053	1,83	3,08	5,38
6,08	2,071	2,06	3,64	6,67
7,18	2,073	2,04	4,35	8,07
8,18	2,069	0,69	2,40	6,62
9,18	2,060	-	-	-
hot(%)	$\gamma_{smax}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	Rcd7 max	Rcd14 max	Rcd28 max
7,00	2,075	2,10	4,35	8,10

T A B E L A 2 9

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO  
(Resistências em  $\text{kgf/cm}^2$ )

h(%)	$\gamma_s(\text{gf/cm}^3)$	Rcd7	Rcd14	Rcd28
4,20	2,119	2,37	3,99	7,21
5,24	2,143	2,73	4,79	8,73
6,08	2,146	3,13	5,86	10,29
7,18	2,123	2,10	4,86	9,66
8,18	2,106	0,84	2,83	7,44
9,18	2,071	-	-	-
hot(%)	$\gamma_{s\text{max}}(\text{gf/cm}^3)$	Rcd7 max	Rcd14 max	Rcd28 max
5,80	2,147	3,14	5,87	10,30

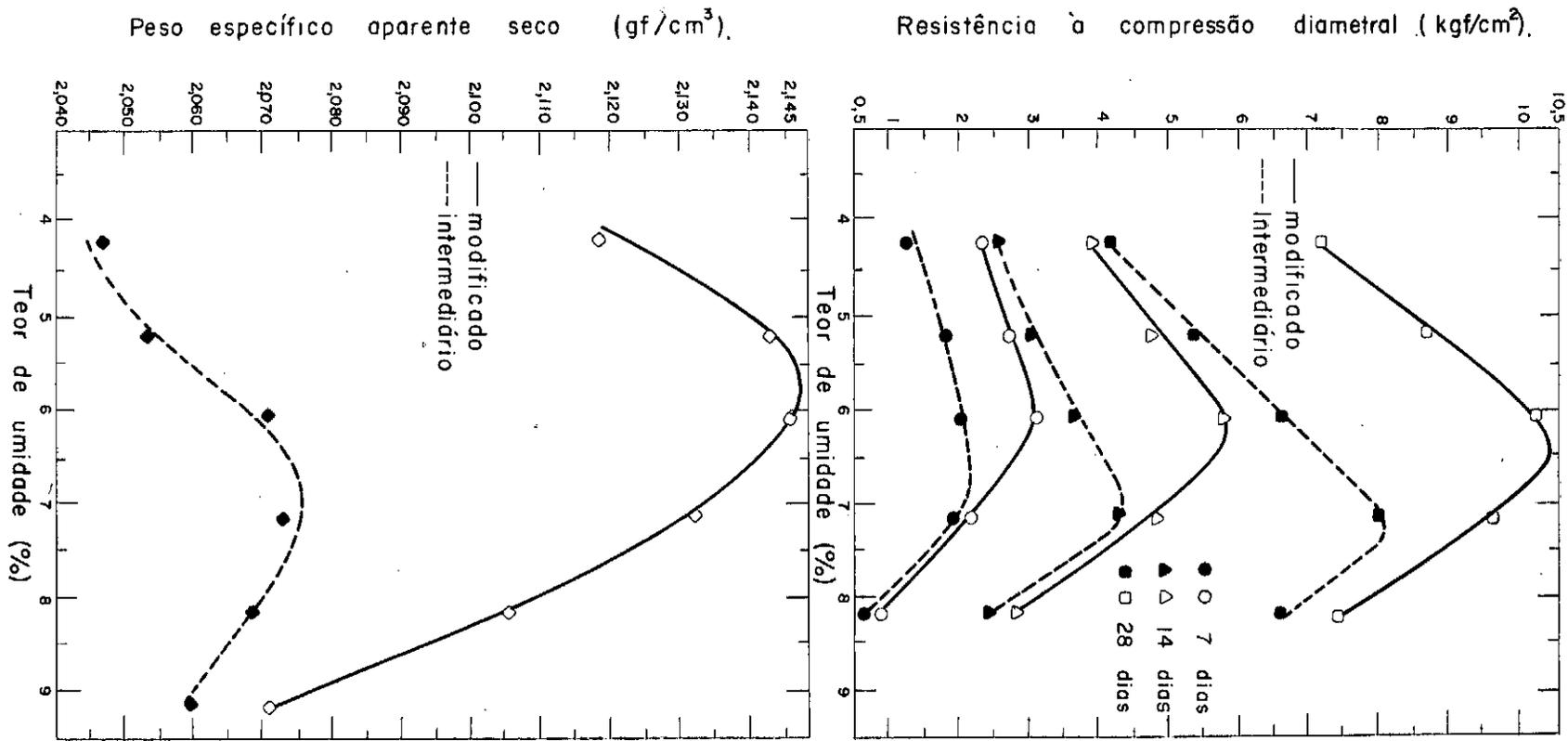


FIGURA 14 — CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL ( APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO ) "VERSUS" TEOR DE UMIDADE, E DE PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO " VERSUS " TEOR DE UMIDADE. MISTURA 3 ( 13% DE CINZA, 4% DE CAL, 53% DE AREIA DE DUNA, 30% DE BRITA E 1% DE CIMENTO PORTLAND EM RELAÇÃO AO PESO TOTAL DA MISTURA SECA ) COM PACTADA NOS ESFORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

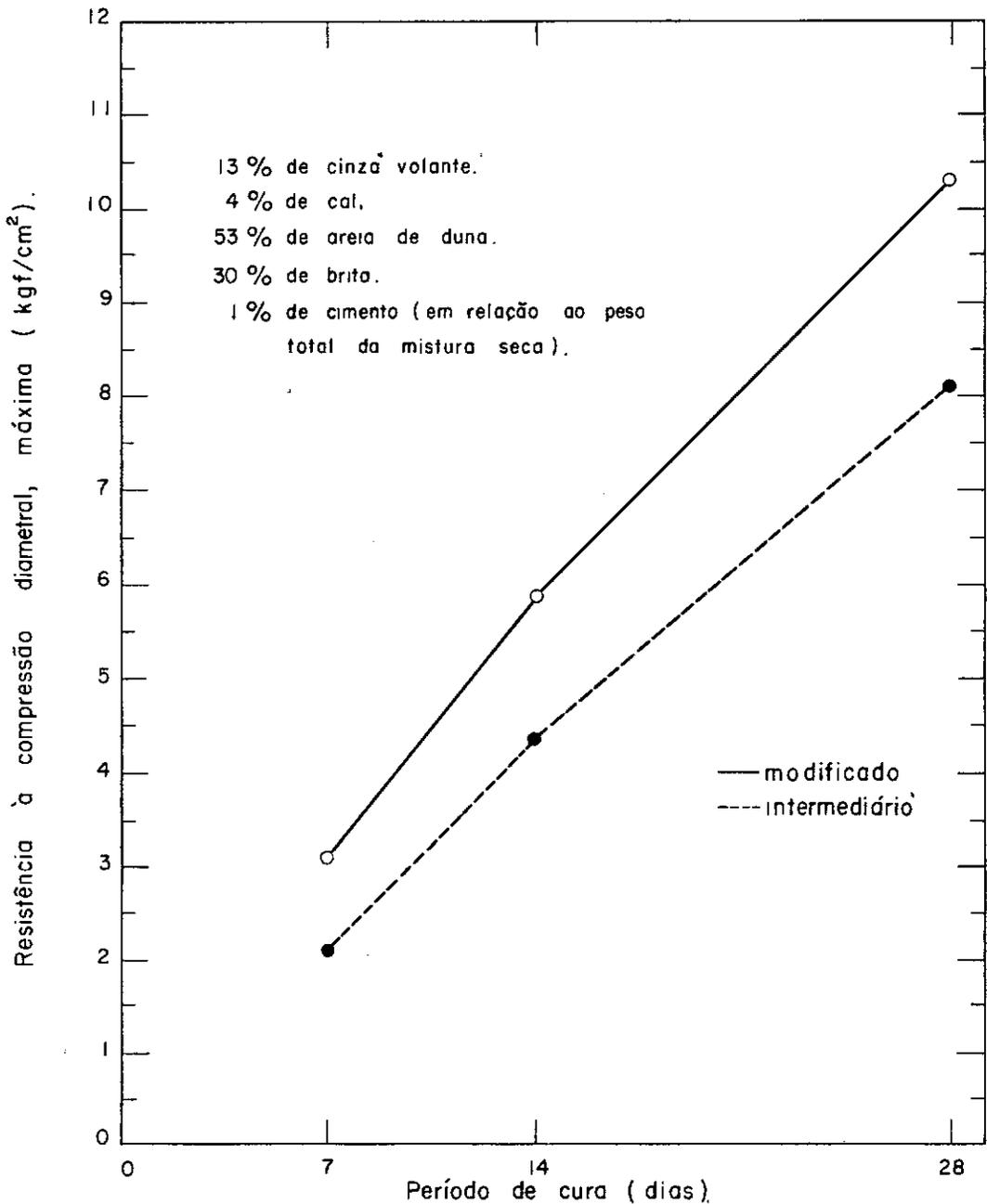


FIGURA 15 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA ( 7, 14, e 28 DIAS )  
NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL APÓS 24  
HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 3 COMPACTADA NOS ES  
FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

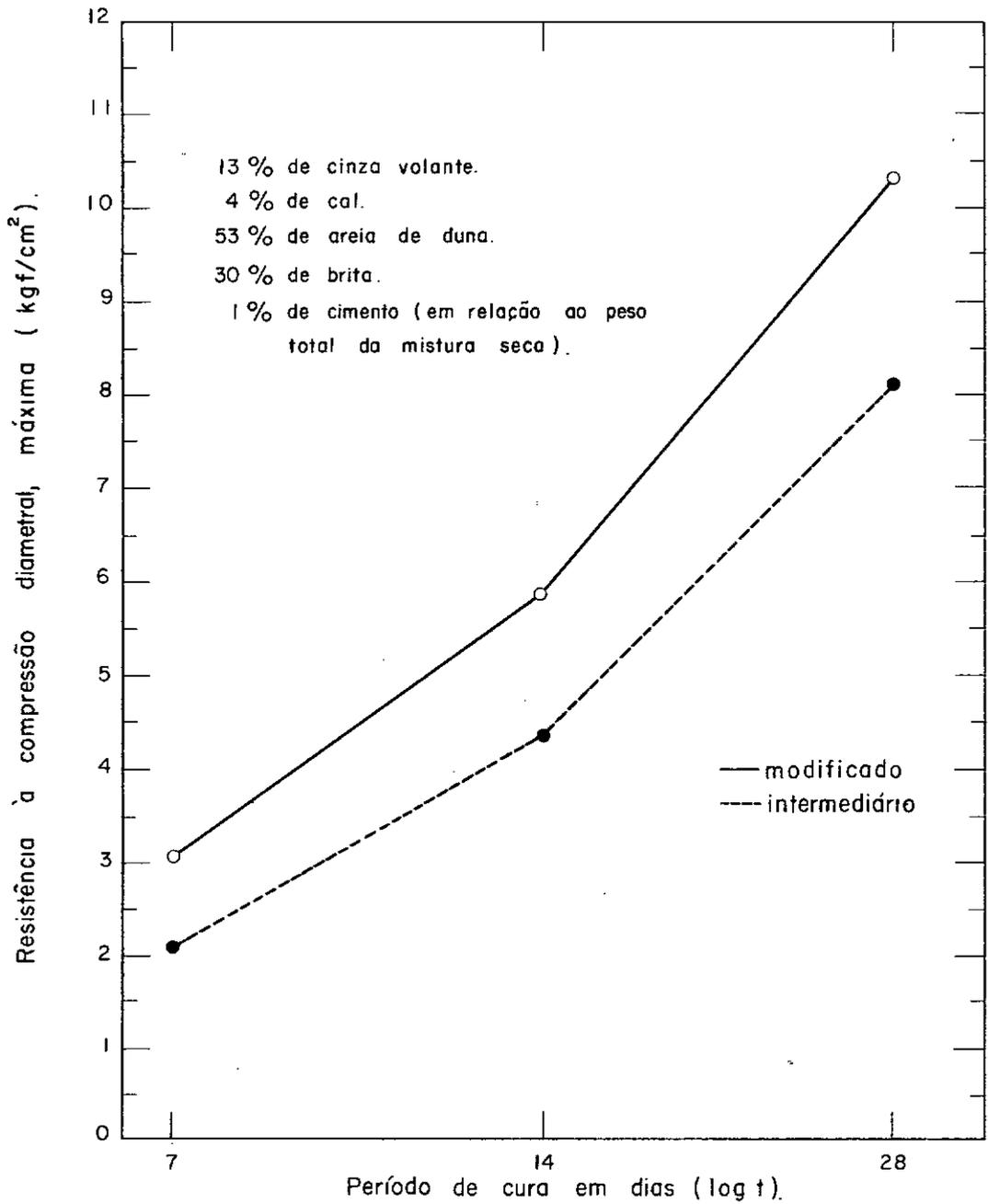


FIGURA 16 — INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE CURA (7, 14, e 28 DIAS) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO. MISTURA 3 COMPACTADA NOS ES FORÇOS INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO.

### 9.3.3 - Mistura 3 (Relação entre a Resistência à Compressão Simples e a Resistência à Compressão Diametral)

Para o traçado das curvas de correlação entre o quociente da resistência à compressão simples e a resistência à compressão diametral e o teor de umidade, nos dois esforços de compactação e três idades de cura, fez-se a interpolação gráfica dos valores das resistências para determinados valores do teor de umidade, marcando-se, também, nas Figuras (17 e 18) os pontos calculados diretamente dos ensaios. No laboratório, ao se procurar moldar corpos de prova para um e outro ensaio nos mesmos teores de umidade, verificam-se discrepâncias, embora pequenas, conforme a temperatura e a umidade relativa do ar, e são os valores médios da umidade que se consideram. Por esta razão e para uma melhor definição da curva do quociente das resistências é que se fez a interpolação gráfica.

## 9.3.3.1 - Para Esforço Intermediário

A Tabela 30 representa os valores da umidade média ( $h_{med}$ ), peso específico aparente seco médio ( $\gamma_{smed}$ ) e valores da correlação entre a resistência à compressão simples pela resistência à compressão diametral ( $k$ ), para 7, 14 e 28 dias, dos valores obtidos em laboratório, para o esforço intermediário.

A Tabela 31 representa os valores da umidade lida diretamente nos gráficos ( $h$ ) variando de um em um por cento e os valores da correlação entre a resistência à compressão e a resistência à compressão diametral ( $k$ ), para 7, 14 e 28 dias, dos valores obtidos por interpolação gráfica na mesma umidade, para esforço intermediário.

A Figura 17 representa a correlação entre o quociente da resistência à compressão simples pela resistência à compressão diametral ( $k$ ) e o teor de umidade ( $h_{med}$ ), compactada no esforço intermediário.

T A B E L A 3 0

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO  
DADOS OBTIDOS DIRETAMENTE DE LABORATÓRIO .

$h_{med}(\%)$	$\gamma_s(g_f/cm^3)$	Rcs7/Rcd7	Rcs14/Rcd14	Rcs28/Rcd28
4,11	2,050	16,91	13,00	12,04
5,15	2,056	13,12	12,14	10,27
6,02	2,074	12,27	11,23	9,99
7,11	2,080	8,79	8,09	7,99
8,15	2,075	19,85	10,62	8,10
9,11	2,063	-	-	-

T A B E L A 3 1

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO  
DADOS OBTIDOS POR INTERPOLAÇÃO GRÁFICA NA MESMA UMIDADE

h (%)	Rcs7/Rcd7	Rcs14/Rcd14	Rcs28/Rcd28
4,00	16,93	13,43	12,06
4,50	14,93	12,70	11,26
5,00	13,62	11,99	10,63
5,50	12,89	11,39	10,23
6,00	12,02	10,83	9,89
6,50	9,95	9,73	9,31
7,00	9,07	8,19	8,15
7,50	11,11	8,79	7,79
8,00	17,00	10,27	8,03

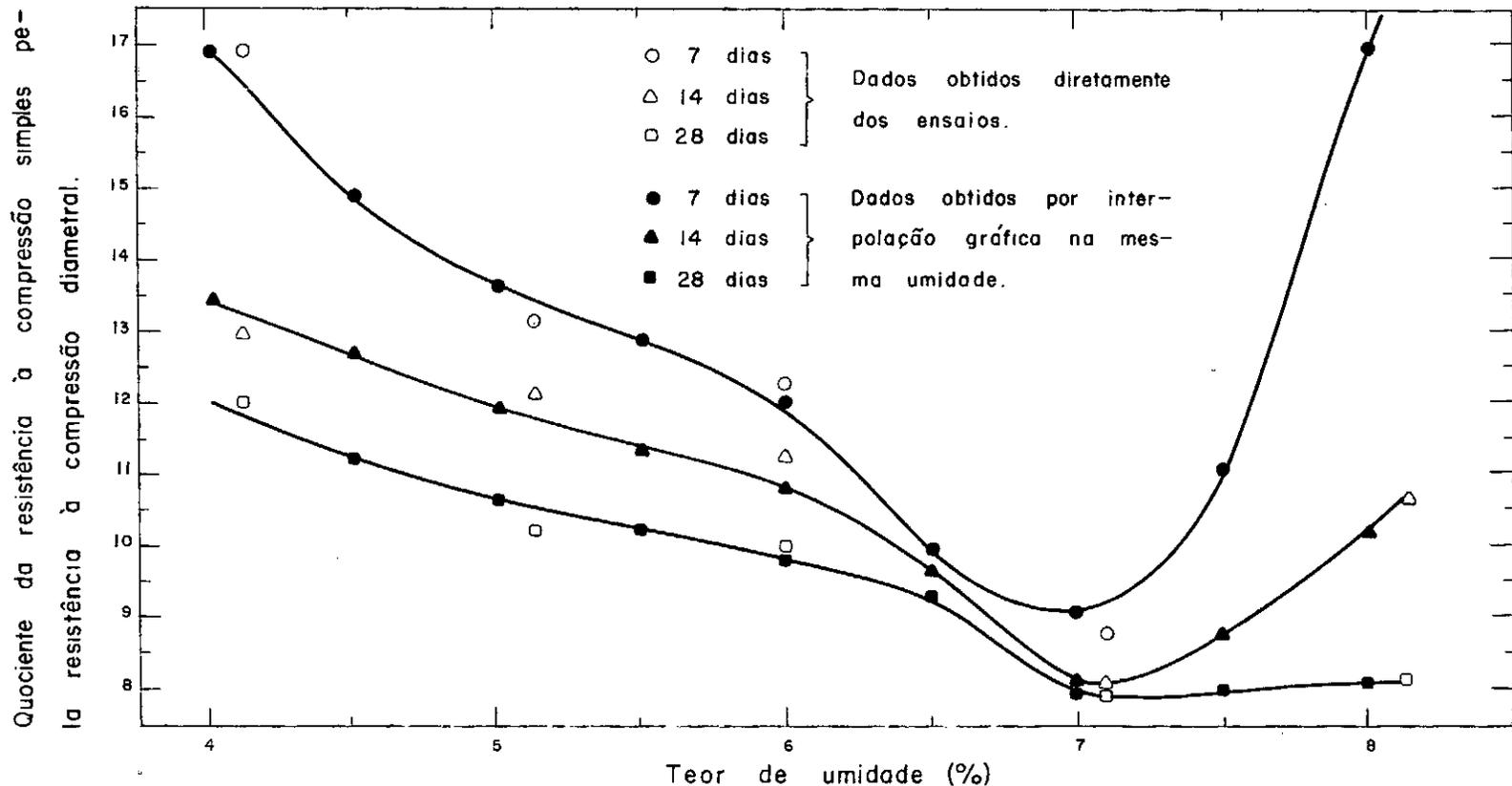


FIGURA 17 — CORRELAÇÃO ENTRE O QUOCIENTE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PELA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL E O TEOR DE UMIDADE. MISTURA 3 ( 13% DE CINZA VOLANTE, 4% DE CAL, 53% DE AREIA DE DU NA, 30% DE BRITA, E 1% DE CIMENTO PORTLAND EM RELAÇÃO AO PESO TOTAL DA MISTURA SECA ) COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO.

### 9.3.3.2 - Para o Esforço Modificado

A Tabela 32 representa os valores da unidade média (hmed), peso específico médio ( $\gamma_s$  med) e valores da correlação entre a resistência à compressão simples pela resistência à compressão diametral (k) para 7, 14 e 28 dias dos valores obtidos em laboratório, para o esforço modificado.

A Tabela 33 representa os valores da umidade lida diretamente nos gráficos (h) variando de um em um por cento e os valores da correlação entre a resistência à compressão simples e a resistência à compressão diametral (k) para 7, 14 e 28 dias, obtidos por intermédio de interpolação gráfica na mesma umidade, para o esforço modificado.

A Figura 18 representa a correlação entre o quociente da resistência à compressão simples pela resistência à compressão diametral (k) e o teor de umidade (h med). Mistura compactada no esforço modificado.

T A B E L A    3 2

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO

DADOS OBTIDOS DIRETAMENTE DE LABORATÓRIO

$h_{med}(\%)$	$\gamma_s(g_f/cm^3)$	Rcs7/Rcd7	Rcs14/Rcd14	Rcs28/Rcd28
4,11	2,123	16,31	15,04	11,14
5,15	2,144	14,36	12,94	10,13
6,02	2,149	9,61	9,07	9,02
7,11	2,125	10,31	7,73	7,37
8,15	2,102	18,06	10,77	7,52
9,11	2,075	-	-	-

T A B E L A 3 3

MISTURA 3, COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO  
DADOS OBTIDOS POR INTERPOLAÇÃO GRÁFICA NA MESMA UMIDADE

h (%)	Rcs7/Rcd7	Rcs14/Rcd14	Rcs28/Rcd28
4,00	16,66	15,65	11,66
4,50	16,34	14,29	10,95
5,00	14,70	13,11	10,26
5,50	11,82	11,21	9,62
6,00	9,43	9,11	9,01
6,50	9,57	8,15	7,92
7,00	10,50	8,24	7,52
7,50	12,23	8,79	7,45
8,00	16,53	10,07	7,49

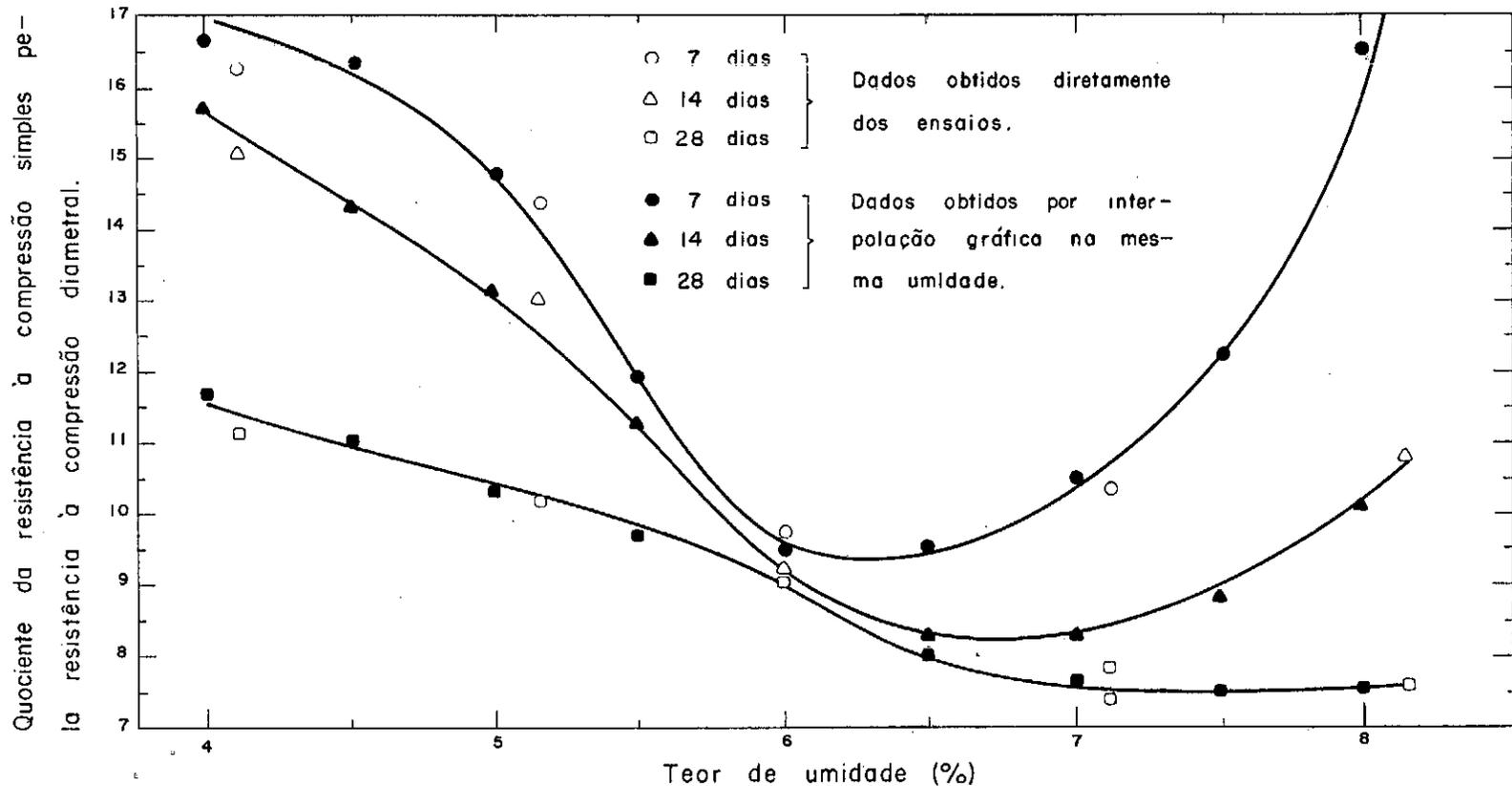


FIGURA 18 — CORRELAÇÃO ENTRE O QUOCIENTE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PELA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL E O TEOR DE UMIDADE. MISTURA 3 ( 13% DE CINZA VOLANTE, 4% DE CAL, 53% DE AREIA DE DUNA, 30% DE BRITA, E 1% DE CIMENTO PORTLAND EM RELAÇÃO AO PESO TOTAL DA MISTURA SECA ) COMPACTADA NO ESFORÇO MODIFICADO.



C A P Í T U L O X

## 10. DISCUSSÕES

## 10.1 - Análise dos Resultados das Misturas

Neste item serão expostos os resultados particulares de cada mistura, como as umidades ótimas, resistências máximas, correlações mínimas entre as resistências à compressão simples e à compressão diametral e dados que forem necessários a este capítulo, todos sob forma de tabelas.

T A B E L A 3 4

INTERVALO DE VARIAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO ( $\gamma_s$ ) DOS CORPOS DE PROVA DAS TRÊS MISTURAS E DUAS ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO, DADOS EM PERCENTAGEM DO NÚMERO DE CORPOS DE PROVA (INTERVALO DE VARIAÇÃO EM TORNO DA MÉDIA)

M I S T U R A	ESFORÇO	$\pm(0 \text{ a } 10)\text{gf}/\text{dm}^3$	$\pm(11 \text{ a } 15)\text{gf}/\text{dm}^3$	$\pm(16 \text{ a } 20)\text{gf}/\text{dm}^3$	$\pm(21 \text{ a } 30)\text{gf}/\text{dm}^3$
MISTURA 1	intermediário	93	6	1	-
	modificado	76	23	1	
MISTURA 2	intermediário	91	9	-	-
	modificado	98	1	1	-
MISTURA 3	intermediário	69	13	13	5
	modificado	73	19	4	4

T A B E L A    3 5

VALORES DA UMIDADE ÓTIMA (hot), PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO MÁXIMO ( $\gamma_{smax}$ ), E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES MÁXIMA ( $R_{csmax}$ ) PARA AS MISTURAS 1, 2 E 3, E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL MÁXIMA PARA A MISTURA 3; AOS 7, 14 E 28 DIAS DE CURA E COMPACTADA NO ESFORÇO INTERMEDIÁRIO

M I S T U R A	hot (%)	$\gamma_{smax}$ ( $g_f/cm^3$ )	$R_{7max}$ ( $kg_f/cm^2$ )	$R_{14max}$ ( $kg_f/cm^2$ )	$R_{28max}$ ( $kg_f/cm^2$ )
MISTURA 1 (Rcs)	9,80	1,926	1,80	6,00	23,00
MISTURA 2 (Rcs)	9,60	1,928	7,50	17,00	40,03
MISTURA 3 (Rcs)	7,00	2,087	25,40	41,00	68,00
MISTURA 3 (Rcd)	7,00	2,075	2,10	4,35	8,10

T A B E L A    3 6

VALORES DA UMIDADE ÓTIMA (hot), PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO MÁXIMO ( $\gamma_{smax}$ ) E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES MÁXIMA ( $R_{csmax}$ ) PARA AS MISTURAS 1, 2 E 3, E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL MÁXIMA PARA A MISTURA 3; AOS 7, 14 E 28 DIAS DE CURA E COMPACTADAS NO ESFORÇO MODIFICADO

M I S T U R A	hot (%)	$\gamma_{smax}$ ( $g_f/cm^3$ )	$R_{7max}$ ( $kg_f/cm^2$ )	$R_{14max}$ ( $kg_f/cm^2$ )	$R_{28max}$ ( $kg_f/cm^2$ )
MISTURA 1 ( $R_{cs}$ )	9,20	1,968	3,30	12,70	35,60
MISTURA 2 ( $R_{cs}$ )	8,90	1,982	12,70	28,40	51,00
MISTURA 3 ( $R_{cs}$ )	5,80	2,153	41,00	62,10	93,00
MISTURA 3 ( $R_{cd}$ )	5,80	2,147	3,14	5,87	10,30

T A B E L A 3 7

VALORES DAS UMIDADES CORRESPONDENTES ÀS RESISTÊNCIAS MÁXIMAS, COMPARADAS ÀS UMIDADES ÓTIMAS (hot), PARA TRÊS IDADES DE CURA (7, 14 E 28 DIAS) E DOIS ESFORÇOS DE COMPACTAÇÃO (INTERMEDIÁRIO E MODIFICADO).

ESFORÇO DE COMPACTAÇÃO	TEOR DE UMIDADE (%), PARA:			
	$\gamma_{max}$ (hot)	R7max	R14max	R28max
<u>MISTURA 1 (Rcs)</u>				
E. intermediário	9,80	6,50	7,25	8,40
E. modificado	9,20	5,60	5,80	6,25
<u>MISTURA 2 (Rcs)</u>				
E. intermediário	9,60	6,65	7,30	8,15
E. modificado	8,90	5,90	6,30	6,90
<u>MISTURA 3 (Rcs)</u>				
E. intermediário	7,00	5,75	6,00	6,55
E. modificado	5,80	4,65	5,00	5,70
<u>MISTURA 3 (Rcd)</u>				
E. intermediário	7,00	6,75	7,05	7,40
E. modificado	5,80	6,05	6,25	6,50

T A B E L A 3 8

RESULTADOS DA INTERPOLAÇÃO LINEAR PELO "MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS" DA FUNÇÃO  $R_{max} = f(t)$ , ATÉ 28 DIAS DE CURA, SENDO  $\alpha$  A INCLINAÇÃO DA RETA COM O EIXO DO TEMPO DE CURA E  $TG \alpha$  A TAXA DE CRESCIMENTO DA RESISTÊNCIA COM O TEMPO.

M I S T U R A	ESFORÇO DE COMPACTAÇÃO	tg $\alpha$
MISTURA 1 (Rcs)	intermediário	1,038
	modificado	1,552
MISTURA 2 (Rcs)	intermediário	1,562
	modificado	1,791
MISTURA 3 (Rcs)	intermediário	2,014
	modificado	2,438
MISTURA 3 (Rcd)	intermediário	0,283
	modificado	0,337

VALORES DA UMIDADE (hk) E OS VALORES MÍNIMOS DO QUOCIENTE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PELA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL (k<sub>min</sub>), PARA 7, 14 E 28 DIAS DE CURA, NOS DOIS ESFORÇOS DE COMPACTAÇÃO

ESFORÇO INTERMEDIÁRIO			ESFORÇO MODIFICADO		
TEMPO DE CURA (DIAS)	hk (%)	k <sub>min</sub>	TEMPO DE CURA (DIAS)	hk (%)	k <sub>min</sub>
7	6,98	9,10	7	6,30	9,40
14	7,05	8,15	14	6,75	8,30
28	7,10	7,95	28	7,30	7,60

OBS. Para termo de comparação reporta-se o teor de umidade ótima para os dois esforços:

- o Intermediário: 7,00 %
- o Modificado: 5,80 %

T A B E L A 4 0

INTERVALO DE VARIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ESPERADAS NAS PISTAS DE POUSO DO AEROPORTO DE NEWARK, PARA MISTURA COMPOSTA DE CINZA VOLANTE - CIMENTO - CAL - AREIA - BRITA

T E M P O	INTERVALO INFERIOR (kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> )	INTERVALO SUPERIOR (kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> )
três dias	insignificante	insignificante
um mês	14	21
três meses	42	56
um ano	70	84
dois anos	112	140
cinco anos	140	168

## 10.2 - Relação Peso Específico Aparente Seco "Versus" Teor de Umidade ( $\gamma_s \times h$ )

Tem-se mostrado crítica a compactação de misturas pozolânicas, com os tipos de materiais e as proporções aqui utilizadas. Atribui-se este fato à falta de coesão das referidas misturas, devido às elevadas percentagens de materiais granulares (areia e brita).

Para as curvas do tipo  $\gamma_s = f(h)$  a prática em laboratório nesta pesquisa nos permite chegar a um método de compactação, de execução relativamente fácil, no intervalo de umidade correspondente ao ramo seco. A partir da umidade ótima, fenômenos adicionais perturbadores passam a ocorrer, como a incorporação de ar, percolação d'água, perda da capacidade suporte da mistura e possível lixiviação dos finos para a parte inferior do corpo de prova. Logo, aconselha-se evitar a compactação de impacto no ramo úmido, sendo provavelmente mais indicada a aplicação de um método de moldagem idêntico ao utilizado em concreto de cimento portland, conforme tivemos ocasião de observar de modo esporádico durante o trabalho.

Verifica-se em laboratório, levando em consideração todos os cuidados já mencionados, a possibilidade de delimitação de intervalos de variação de  $h$  e  $\gamma_s$ . Para o teor de umidade, a maioria dos ensaios encontra-se dentro de um intervalo de  $\pm 0,1 \%$  em torno da média. Para o peso específico aparente seco, a variação

máxima tolerável (condição para definição de um intervalo razoável) foi de  $\pm 0,030 \text{ g}_f/\text{cm}^3$  em torno da média. Na Tabela 34 é mostrado o comportamento do intervalo de variação do peso específico aparente seco, para as três misturas. Esta variação é dada em percentagem e em relação ao número total de ensaios para cada mistura.

Neste trabalho, as curvas de compactação para as misturas 1 e 2 têm formas similares — são achatadas e o ramo úmido é mal definido, para o esforço modificado. No caso do esforço intermediário, e também para a mistura 3, as formas são mais bem definidas assim como o ramo úmido (Figs. 5, 8, 11 e 14) a exemplo do que se verifica em trabalhos estrangeiros [24, 28]. Portanto, a energia de compactação e a proporção de agregado têm influência nas curvas.

### 10.3 - Relação Resistência "Versus" Umidade (R x h)

Tem-se verificado em lotes de corpos de prova que se enquadram dentro dos intervalos de umidade estipulados no item 10.2, que as resistências estão enquadradas num intervalo de  $\pm 10\%$  da média das resistências destes referidos lotes, quando rompidos num mesmo período de cura.

Pela prática observa-se que a perda de umidade reduz drasticamente a resistência, chegando às vezes, a comprometer as

reações pozolânicas. Readquirida a umidade perdida, estas reações têm o seu prosseguimento. Logo, aconselha-se a incorporação de água nestes casos, mas adicionada de tal forma que evite a lixiviação dos finos ativos, evitando assim uma provável danificação na estrutura do pavimento.

Pelo conhecimento atual, são fatos bastante comprovados que:

- o A resistência máxima é diretamente proporcional ao tempo de cura (Tabelas 35 e 36).
- o A umidade cresce com o tempo, na obtenção das referidas resistências máximas; isto é: quanto maior o período de cura, maior será o teor de umidade para a obtenção da resistência máxima. Este acréscimo de umidade é explicado pelo prolongamento das reações pozolânicas a longo prazo (Tabela 37).
- o Maiores esforços de compactação originam maiores resistências máximas (Tabelas 35 e 36). Não é usual obter valores de resistências máximas para umidades superiores à umidade ótima, para corpos rompidos à compressão simples até cura de 90 dias (Tabelas 35 e 36, para 3 idades de cura).
- o Inexistência de correlação determinada entre as três variáveis: umidade, peso específico aparente seco máximo e resistência máxima.

o Desconhece-se a existência de uma fórmula que represente analiticamente a curva  $R = f(h)$ .

A relação  $R_{\max} = f(t)$  (em escala aritmética, para 7, 14 e 28 dias) não é perfeitamente linear (Figuras 6, 9, 12 e 15); entretanto, interpola-se uma reta cujos parâmetros foram determinados pelo Método dos Mínimos Quadrados, obtendo-se a inclinação ( $\alpha$ ) e a taxa de crescimento médio ( $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta R_{\max}}{\Delta t}$ ) da resistência com o tempo, valores os quais estão na Tabela 38.

Fácil verificar que há realmente um crescimento progressivo da resistência com o tempo, que depende não somente do esforço de compactação, mas também das dosagens das misturas.

Ingles e Metcalf (29) comentam que em ambas as estabilizações, com cimento (ou cimento mais cinza volante) ou cal, a resistência cresce com o tempo de cura. Representando esta função  $R_{\max} = f(\log t)$  obtêm os autores uma reta. Nas Figuras 7, 10, 13 e 16 foram desenhados gráficos  $R_{\max} = f(\log t)$ , e, verificou-se a impossibilidade de interpolar uma reta, para períodos de cura entre 7, 14 e 28 dias. Fazendo uma analogia entre as funções  $R_{\max} = f(t)$  e  $R_{\max} = f(\log t)$ , as possibilidades da interpolação linear é mais favorável a primeira função, isto é, as do tipo  $R_{\max} = f(t)$ .

Devido às altas resistências alcançadas e à rigidez peculiar das misturas pozolânicas, torna-se fácil e interessante a aplicação do ensaio à compressão diametral, segundo o método ABNT

MB-212. Como na tecnologia do concreto de cimento portland, não levamos em consideração o problema de serem sensivelmente diferentes os módulos de elasticidade à compressão simples e à compressão diametral. Este método de ensaio é aplicado apenas na mistura 3 e os resultados destas resistências, para os três períodos de cura, encontram-se nas Tabelas 35 e 36.

É interessante ressaltar que a resistência à compressão diametral máxima, tende a ocorrer além do teor ótimo de umidade, o que se verifica com os dois esforços de compactação, segundo Tabela 37.

A relação entre o quociente da compressão simples pela compressão diametral ( $k$ ) e o teor de umidade ( $h$ ) é expressa graficamente por uma curva que nos permite definir um valor mínimo de  $k$  (Figuras 17 e 18). Interessante observar na Tabela 39, que para cada  $k_{\min}$  existe uma correspondente umidade ( $h_k$ ) e que o intervalo de variação de  $h_k$  é extremamente reduzido e a umidade ótima pertence a este intervalo ou está muito próxima dele. Este fato nos faz acreditar que os  $k_{\min}$ , em condições ideais de laboratório (mistura muito sensível a uma série de fatores, principalmente a umidade (vide Figura 2) ocorram numa pequena faixa em torno da umidade ótima. Nesta pesquisa o intervalo máximo foi de 1,80 % de variação no teor de umidade. Verifica-se também, nas Figuras 17 e 18 e na Tabela 39, que a relação  $k_{\min}$  para os três períodos de cura varia de 9,15 a 7,10 para o esforço intermediário e 9,40 a 7,60 para o esforço modificado. A variação de  $k$  em

todo o intervalo de variação do teor de umidade é o mesmo para os dois esforços de compactação, aos 28 dias, e seu valor está entre 7,60 e 12.

Como termo de comparação, quanto à resistência à compressão simples, são citados as resistências de projeto na construção das pistas de pouso do Aeroporto de Newark, para misturas do tipo cinza volante - cimento - cal - areia - pedra britada, na Tabela 40.



C A P Í T U L O   X I

## 11.1 - Conclusões da Pesquisa

- 1 - Comprova-se em laboratório a possibilidade de ensaiar com satisfatória repetibilidade as misturas pozolânicas compostas de areia mal graduada, cinzas volantes, e cal, com ou sem adição de cimento e brita.
- 2 - Para o tipo de material ensaiado aconselha-se a compactação por impacto somente no ramo seco, e evitando-se-a no ramo úmido.
- 3 - São considerados razoáveis os seguintes intervalos de variação:
  - a) Para o teor de umidade:  $\pm 0,2 \%$  em torno da média.
  - b) Para o peso específico aparente seco  $\pm 0,015 \text{ g}_f/\text{cm}^3$  em torno da média.
- 4 - O esforço de compactação e a proporção de agregado têm influência na forma das curvas de compactação.

- 5 - Corpos de prova trabalhados segundo o que prescreve a conclusão 3, terão suas resistências dentro de um intervalo de  $\pm 10\%$  da média destas resistências.
- 6 - Constata-se um crescimento progressivo da resistência, aproximadamente linear, com o tempo, que depende não somente do esforço de compactação, mas também das dosagens das misturas.
- 7 - A resistência à compressão diametral máxima tende a ocorrer além do teor ótimo de umidade, nesta pesquisa, para os dois esforços de compactação.
- 8 - A relação entre o quociente da compressão simples pela compressão diametral (k) e o teor de umidade, é expressa graficamente por uma curva tendo um mínimo que ocorre em torno da umidade ótima.
- 9 - A variação de k, aos 28 dias, é aproximadamente a mesma para os esforços intermediário e modificado.
- 10 - A adição de cimento portland de alta resistência inicial, 1% em relação ao peso da mistura total seca, acarretou acréscimos de resistência à compressão simples, em relação a mistura básica (mistura 1), de 3,16, 1,83 e 0,74 vezes, para o esforço intermediário, e de 2,85, 1,24 e 0,43 vezes, para o esforço modificado, às idades de, respectivamente, 7, 14 e 28 dias de cura.

- 11 - A adição de brita, acarretou acréscimos de resistência à compressão simples, em relação à mistura básica (mistura 1), de 13,11, 5,83 e 1,96 vezes, para o esforço intermediário e 11,42, 3,89 e 1,61 vezes, para o esforço modificado, às idades de respectivamente, 7, 14 e 28 dias de cura.
- 12 - O efeito do esforço modificado em relação ao intermediário, foi de produzir acréscimos de resistência à compressão simples, para a mistura 1, de 0,83, 1,11 e 0,54 vezes, às idades de respectivamente 7, 14 e 28 dias.
- 13 - O efeito do esforço modificado em relação ao intermediário, foi de produzir acréscimos de resistência à compressão simples, para a mistura 2, de 0,69, 0,67 e 0,27 vezes, às idades de respectivamente, 7, 14 e 28 dias.
- 14 - O efeito do esforço modificado em relação ao intermediário, foi de produzir acréscimos de resistência à compressão simples, para a mistura 3, de 0,61, 0,51 e 0,36 vezes, às idades de respectivamente, 7, 14 e 28 dias.
- 15 - O efeito do esforço modificado em relação ao intermediário, foi de produzir acréscimos de resistência à compressão diametral para a mistura 3, de 0,42, 0,33 e 0,27 vezes, às idades de respectivamente, 7, 14 e 28 dias.

- 16 - A resistência máxima à compressão simples, aos 28 dias, foi de  $93 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  para a mistura 3, compactada no esforço modificado.
- 17 - A resistência máxima à compressão diametral, aos 28 dias foi de  $10,3 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  para a mistura 3 compactada no esforço modificado.
- 18 - As experiências de laboratório revelam que há possibilidade de utilização, como se faz em outros países, do tipo de mistura dita pozolânica em pavimentações de pistas de aeroportos (Vide Tabela 40).
- 19 - Igualmente, indicam as experiências de laboratório, ser viável esse tipo de mistura em pavimentações nas regiões de areia do litoral, com o aproveitamento de um material (cinzas volantes) que se acumula em grandes quantidades junto às termo-elétricas do sul, sem utilização adequada.

## 11.2 - Recomendações de Estudos Futuros

- 1 - Indica-se como muito conveniente a realização de um pequeno trecho experimental de pavimento utilizando camadas de base constituídas pelas misturas estudadas em laboratório; sua localização seria próximo a fonte de cinzas volantes: SOTELCA, Capivari, Município de Tubarão, Santa Catarina. A

iniciativa seria do DNER através do Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Esta pista, em desvio ( "bypass"), compreenderia vários sub-trechos, seria instrumentada e sujeita a medições sistemáticas e a pesagem de veículos.

- 2 - A qualidade das misturas pozolânicas dependendo bastante das características das cinzas volantes e da cal, há que se atentar para a melhor caracterização desses materiais com vistas à intensidade da reação pozolânica; métodos de ensaio desses materiais, isoladamente ou misturados, devem ser investigados.
- 3 - Misturas pozolânicas com solos diferentes do estudado, devem ser pesquisadas, tendo em mente que melhores resultados se obtêm com solos granulares e que há interesse econômico no emprego da maior quantidade possível de cinzas volantes.

*APÊNDICE I*

A P E N D I C E I

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MISTURAS DE SOLO ESTABILIZADO COM CINZA VOLANTE E CAL HIDRATADA. MÉTODO DE ENSAIO.

(Definição de material pozolânico: É um material silfícico ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouco ou nenhum valor cimentante, porém em forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, formando compostos de propriedades cimentantes).

## 1. OBJETIVO

Avaliação do efeito cimentante de materiais pozolânicos na estabilização de solos, em função das correlações entre o teor de umidade da mistura e seu peso específico aparente seco e sua resistência a compressão, em uma mistura compactada e constituída de solo, cinza volante, cal hidratada sendo utilizada a fração de solo, que passa na peneira de 25,4 mm (1 pol.).

## 2. APARELHAGEM

- 2.1 - balança com capacidade de 15 kg, sensível a 1 g;
- 2.2 - balança com capacidade de 10 kg, sensível a 0,1 g;
- 2.3 - balança com capacidade de 1,2 kg, sensível a 0,01 g;
- 2.4 - compactador mecânico acionado por motor elétrico, com soquete cilíndrico de face inferior plana, e pesando 4,536 kg, equipado com dispositivo para controle de altura de queda;
- 2.5 - estufa elétrica com reostato capaz de manter a temperatura entre 105° e 110°C ou em forno de 60°C, conforme a necessidade;
- 2.6 - peneiras com aberturas de malha entre 25,4 e 0,075 mm, de acordo com a especificação "Peneiras de malhas quadradas para a análise granulométrica de solos", ABNT EB-22;
- 2.7 - molde cilíndrico metálico de 10,0 cm de diâmetro interno e 20,0 cm de altura, de paredes laterais tripartidas, com base de fixação e colarinho metálico;

- 2.8 - misturador mecânico acionado por motor elétrico de aproximadamente 15 l de capacidade;
- 2.9 - máscara de proteção à respiração;
- 2.10 - luvas de borracha;
- 2.11 - prensa permitindo ensaio a velocidade de deformação constante, de 20 t de capacidade;
- 2.12 - cápsulas de alumínio com capacidade de 500 ml e 1000 ml, taradas e numeradas;
- 2.13 - agitador de peneiras, com dispositivo para fixação desde uma peneira até seis, inclusive tampa e fundo;
- 2.14 - repartidor de amostras de 13 mm e 25 mm de abertura;
- 2.15 - almofariz com capacidade de 5 kg de solo; e mão de gral recoberta de borracha;
- 2.16 - recipiente cilíndrico, aberto, com capacidade de 5 litros, munido de bico vertedor, para desagregar por lavagem a amostra de solo;
- 2.17 - pá-de-mão de forma arredondada, com lâmina de alumínio;

- 2.18 - tabuleiro de chapa de ferro galvanizado, de 50 cm por 30 cm e 6 cm de altura;
- 2.19 - rasadores de lâmina denteada para acerto da superfície da mistura compactada quando apoiados no topo do colarinho: nº 1 (altura do colarinho mais 2 mm) para misturas com brita sempre que a superfície com pedras a sobressair estiver pouco abaixo do nível inferior do colarinho, concluída a compactação da penúltima camada; nº 0 (altura do colarinho menos 2 mm) para misturas com ou sem brita após compactação da última camada;
- 2.20 - régua de aço biselada de cerca de 30 cm de comprimento;
- 2.21 - espátula de lâmina flexível de cerca de 20 cm de comprimento e 3 cm de largura;
- 2.22 - sacos plásticos de 20 l de capacidade, com cerca de 40 cm de lado e 58 cm de altura;
- 2.23 - caçarola de porcelana ou de aço inoxidável de 0,5 l de capacidade, com cabo;
- 2.24 - chaves de boca e "allen" para desmoldagem dos cilindros;

- 2.25 - recipiente de alumínio de 6 l de capacidade;
- 2.26 - colher de madeira;
- 2.27 - recipiente esmaltado de 3 l de capacidade;
- 2.28 - flanela quadrada de 80 cm de lado;
- 2.29 - bisnaga de plástico;
- 2.30 - conta-gotas;
- 2.31 - bandejas de alumínio, diâmetro 28 cm;
- 2.32 - colher de pedreiro nº 7;
- 2.33 - cilindro plástico de 19 cm de diâmetro por 27 cm de altura;
- 2.34 - placa cerâmica vitrificada, formato quadrado de 15 cm de lado;
- 2.35 - papel toalha;
- 2.36 - vassoura de piaçava;
- 2.37 - elásticos tipo "o ring".

### 3. PREPARO DOS MATERIAIS

#### 3.1 - Cinza Volante

A amostra recebida deverá ser estocada e utilizada no seu estado natural.

#### 3.2 - Hidróxido de Cálcio

Passar a amostra na peneira nº 20 (0,84 mm), e utilizar apenas a percentagem não retida. Peneirar apenas a quantidade a ser utilizada em cada ensaio.

#### 3.3 - Solo

3.3.1 - A amostra será seca em estufa a 60°C, destorroada, homogeneizada e reduzida, com o auxílio do repartidor de amostras, ou por quarteamento, até se obter uma amostra representativa de 6.000 g para solos contendo pedregulho e 5.000 g para solos sem fração pedregulhosa.

3.3.2 - Passar esta amostra representativa nas peneiras de 25 mm e 4,8 mm; havendo material retido na primeira peneira,

procede-se à substituição do mesmo por igual quantidade em peso do material que passa na peneira de 25 mm e retido na peneira de 4,8 mm obtida de outra amostra representativa conforme a alínea 4.3.1.

#### 4. PESAGEM DOS MATERIAIS DA MISTURA

Os materiais da mistura de solo, cinza volante e cal hidratada serão pesados de acordo com suas proporções na mistura escolhida.

As pesagens abaixo discriminadas devem ser realizadas com a sensibilidade indicada:

- o Cilindro mais solo compactado: sensibilidade de 1 g.
- o Cinza volante, hidróxido de cálcio e água: sensibilidade de 0,1 g.
- o Aditivos: sensibilidade de 0,01 g.

NOTA 1: O aditivo não será considerado como componente principal da mistura, e sua percentagem ponderal referir-se-á ao peso da mistura seca de solo, cinza volante e hidróxido de cálcio.

NOTA 2 - Caso o solo utilizado for uma mistura de dois ou mais solos ou um solo-brita deve-se pesar as suas partes componentes separadamente.

NOTA 3 - Após pesagem do solo, este será peneirado na peneira de 4,8 mm. Todo o material retido será regido pela nota 4 abaixo.

## 5. MISTURA DOS MATERIAIS

### 5.1 - Mistura a Seco

A primeira homogeneização, a seco, será manual, em recipiente de alumínio e com colher de madeira, até atingir coloração uniforme e constante. Em seguida, este material será novamente misturado em misturador mecânico, durante 1 minuto.

### 5.2 - Mistura Úmida

Em seguida procede-se à molhagem do material contido no recipiente do misturador mecânico por intermédio de uma bisnaga plástica, com uma quantidade de água pré-determinada. A distribuição de água deverá ser uniforme em toda a superfície da mistura. Terminada a operação de molhagem, o misturador funcionará por mais 5 minutos, trabalhando a mistura.

NOTA 4 - No caso de solo que possua partículas retidas na peneira de 4,8 mm, procede-se separadamente ao umedecimento da fração que passa e da retida. A fração retida é umedecida com parte da água da bisnaga plástica, previamente estabelecida, num recipiente esmaltado, um minuto antes de concluída a mistura úmida da fração inferior a 4,8 mm, de modo que, concluída esta, a fração grossa, já umedecida, é juntada à fração fina. Procede-se, então, a mistura normal com a colher-de-pedreiro até completa homogeneização visual.

NOTA 5 - No caso de solo que possua partículas retidas nas peneiras de 4,8 mm, aconselha-se o procedimento exposto a seguir. De cada lote de 11 (onze) corpos de prova, determina-se, a umidade de duas misturas completas, prontas para a compactação; a mistura é colocada num tabuleiro, e fica a secar ao ar livre durante o tempo correspondente ao de uma compactação, indo, a seguir, para a estufa a 105 - 110° C até constância de peso. Faz-se as pesagens com aproximação de 1 g. Como alternativa, a determinação de umidade pode ser feita a partir de dois corpos de prova já compactados e pertencentes ao mesmo lote de 11 (onze) corpos de prova.

## 6. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MISTURA

6.1 - Do próprio panelão de mistura, retirar as amostras para o cálculo do teor de umidade. Cada amostra deverá pesar aproximadamente:

- o 1.000 g para solos de tipo A-1 e A-2.
- o 300 g para solos de tipo A-3 a A-7.

As pesagens se farão com aproximação de 0,01 g.

## 6.2 - CÁLCULOS

Os teores de umidade, são calculados pela fórmula:

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

h - teor de umidade em percentagem

Ph - peso do solo úmido

Ps - peso do solo seco em estufa a 105°-110°C, até constância de peso.

## 7. COMPACTAÇÃO DA MISTURA

Fixa-se o molde completo no compactador mecânico. O material é compactado em 5 camadas iguais. Cada camada receberá o número de golpes calculado pela fórmula, em função da energia de compactação escolhida.

$$n = \frac{E.V.}{P.H.N.}$$

Sendo: N = nº de camadas

n = nº de golpes por camada

E = "energia de compactação" (trabalho por unidade volume).

V = volume do material compactado

P = peso do soquete

H = altura de queda do soquete.

Ao findar a quarta camada e existindo material (pedras) pouco abaixo do nível inferior do colarinho é rasado com o rasador nº 1, e no final da quinta camada com o rasador nº 0, ficando o material compactado à altura de 20,2 cm. Destaca-se lentamente o colarinho, e retira-se o excesso de altura de 0,2 cm com ajuda

inicial de uma espátula que rasa a parte periférica, e depois com uma régua biselada que rasa o material na altura exata do molde. Determina-se o peso do material úmido compactado mais o molde a menos de 1 g. Por dedução do peso do molde determina-se o peso do material úmido compactado.

## 8. CURA

### 8.1 - Cura Preliminar

Após compactação, a amostra, ainda no molde é envolta em saco plástico, e curada em câmara úmida a  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  durante  $18 \pm 2\text{h}$ .

### 8.2 - Cura Final

Após a cura preliminar procede-se a desmoldagem. O corpo de prova é inserido num cilindro de plástico e este por sua vez, é recoberto por 3 sacos plásticos, evitando assim um fator sem controle qual seja a perda de umidade e a carbonatação do hidróxido de cálcio pelo gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) contido no ar.

Sugere-se, no mínimo, três tempos de cura total (cura preliminar mais cura final), aos 7, 14, 28 dias após compactação.

## 9. IMERSÃO EM ÁGUA

Decorrido o tempo de cura total, o corpo de prova será imerso em água destilada durante 24 horas.

## 10. RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA

### 10.1 - Resistência a Compressão Simples

Rompimento a velocidade de deformação constante. Sugere-se a velocidade de 1,5 mm/min e a média aritmética de amostras em triplicata para cada ponto de cura, com variação de 10% em torno da resistência média.

### 10.2 - Resistência à Compressão Diametral

Segundo o método da ABNT-MB-212. Sugere-se a velocidade de deformação constante de 1,5 mm/min. e, a média aritmética de amostras em triplicata para cada ponto da curva, com variação de 10%, em torno da resistência média.

## 11. RESULTADOS

### 11.1 - Curva de Compactação

Marca-se nas ordenadas os pesos específicos aparentes secos ( $\gamma_s$ ) e, em abscissas, os teores de umidade (h) correspondentes.

#### 11.1.1 - Peso Específico Aparente Seco, Máximo

É o valor da ordenada máxima da curva de compactação.

#### 11.1.2 - Umidade Ótima

É o valor da abscissa correspondente, na curva de compactação, ao ponto de peso específico aparente seco máximo.

### 11.2 - Curvas de Resistência para 7, 14 e 28 Dias de Cura

Marca-se nas ordenadas as resistências ( $R_{cs}$  ou  $R_{cd}$ ) e, em abscissas, os teores de umidade (h) correspondentes.

### 11.2.1 - Resistência Máxima para 7, 14 e 28 Dias de Cura

Correspondem aos valores das ordenadas máximas das curvas de resistência para 7, 14 e 28 dias de cura.

*BIBLIOGRAFIA*

B I B L I O G R A F I A

- 1 - Newark Airport Redevelopment. The Pavement Story. The Port of New York Authority.
- 2 - Yang, Nai. C. - "New Paving Concept for Newark Airport", Civil Engineering - ASCE, set. 1970.
- 3 - Morrison, Ronald E. - "A Review of Ash Specifications", Ash Utilization - National Ash Assn. - 1970.
- 4 - Jarrige, A.-"Algumas Informações Gerais Sobre as Cinzas Volantes", Traduzido de Revue de l'Industrie Minérale, out. 1960.
- 5 - Gambs, Gerald C. - "Marketing Fly Ash... U.S. and European Programs", Coal Age, nov. 1966.
- 6 - Lafuma, H. - "A Adição de Cinzas aos Cimentos Portland", traduzido de Revue de l'Industrie Minerale, mar. - 1963.
- 7 - Minnick, L. J.; Webster, W.C. and Purdy, E. J. Jr. - "Predictions of the Effect of Fly Ash in Portland Cement Mortar and Concrete", Journal of Materials, JMLSA, Vol. 6, n° 1, mar - 1971.

- 8 - Barber, E. G, Jones, G. T, Knight, P.G.K, and Miles, M.H. - "PFA Utilization". Central Electricity Generating Board - 1972.
- 9 - Pearson, A.S." - Lightweight Aggregate from Fly Ash", Civil Engineering - ASCE, set - 1964.
- 10 - Minnick, L. J., Corson, W. H. - "Lightweight Concrete Aggregate from Sintered Fly Ash", Highway Research Record n° 307, 1970.
- 11 - Shafer, H. E. - "Fly Ash Brick Could Cut Fuel Costs 20 million BTU", Electrical World, jan. - 1967.
- 12 - Ahlberg, H. L., and Barenberg, E. J. - "Pozzolanic Pavements". University of Illinois - Engineering Experiment Station, Bulletin 473, fev. 1965.
- 13 - DiGivlia, A. M., and Nuzzo, W. L. - "Fly Ash as a Structural Fill", N.A.A. - 1970.
- 14 - Gray, H. D., and Lin, Yen - Kuang. - "Engineering Properties of Compacted Fly Ash", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, abr. - 1972.
- 15 - Virginia Fairweather. "Fly Ash Pavements, Runway to Take Off?", Civil Engineering - ASCE, ago. - 1975.

- 16 - Barenberg, E. J. "Utilization of Ash in Stabilized Base Construction", Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Ash Utilization Symposium, Pittsburgh, Pa, USA - 1973.
- 17 - Minnick, L. J. "The New Fly Ash", Proceedings, 2<sup>nd</sup> Ash Utilization Symposium - Bureau of Mines, Pittsburgh, Pa, mar-1970.
- 18 - Pinto, Salomão - "Estabilização de Areia com Adição de Cal e Cinza Volante", Tese M. Sc., COPPE-UFRJ, jan - 1971.
- 19 - Yang, Nai. C. "Design of Functional Pavements" - Edit. McGraw-Hill Book - New York - 1972.
- 20 - "Chemical Lime Facts", National Lime Association - Bulletin 214 - 1973.
- 21 - Barenberg, E. J. "Lime - Fly Ash - Aggregate Mixtures in Pavement Construction", NAA - Ash at Work, Process & Technical Data.
- 22 - Miller, R. H. and McNichol, W. J. - "Structural Properties of Lime - Fly Ash - Aggregate Composition", Highway Research Board Bulletin n° 193 - 1958.

- 23 - National Ash Association, INC "Tentative Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime", ASTM Designation C 593-66T.
- 24 - Mateos, Manuel. "Physical and Mineralogical Factors in Stabilization of Iowa Soils With Lime and Fly Ash", Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, tese Ph.D., 1961.
- 25 - Davidson, D.T., Mateos, M. and Katti, R.K. "Activation of the Lime - Fly Ash Reaction By Trace Chemicals", Highway Research Board, Bulletin 231 - 1959.
- 26 - Nardi, José Vidal. "Estudo do Efeito de Aditivos na Estabilização de Solo Arenoso com Cal e Cinza Volante", Anais, 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Brasil - 1974.
- 27 - Lambe, T. W. "Soil Testing for Engineers", John Wiley, 1951.
- 28 - Mateos, Manuel and Davidson, D.T. "Compactation Characteristics of Soil - Lime - Fly Ash Mixtures", Highway Research Board, Record nº 29 - 1963.
- 29 - Ingles, O. G. and Metcalf, J. B. "Soil Stabilization", Butterworths - Sydney - 1972.