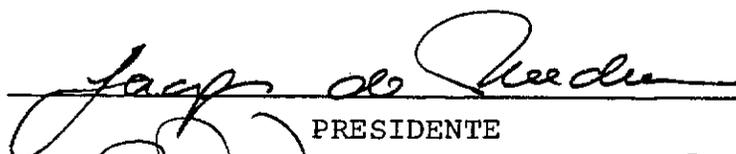
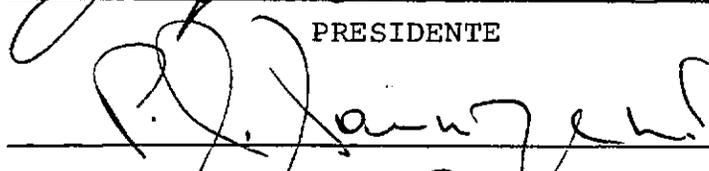


ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO LATERÍTICO FINO PELO
ÁCIDO FOSFÓRICO

HUGO NICODEMO GUIDA

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.).

APROVADO POR:


PRESIDENTE



RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
JULHO DE 1971

A MEUS PAIS, ESPÔSA
E FILHAS.

À G R A D E C I M E N T O S

Agradeço ao ilustre Professor Jacques de Medina a orientação que calcada em seu notório saber e peculiar dedicação, possibilitou o desenvolvimento desta tese.

Injusto seria se aqui não fôsse lembrado o tecnologista e futuro colega Antonio Jorge Dellê, cuja boa vontade e espírito de sacrifício tornaram mais amenas as tarefas desenvolvidas no laboratório.

S U M Á R I O

O objetivo d'êste trabalho de pesquisa foi o de estudar, em laboratório, a adequação do ácido fosfórico à estabilização de um solo laterítico fino.

O solo estudado foi uma "terra roxa legítima", oriunda da Cidade de Campinas, Estado de São Paulo. Êste é um solo laterítico, proveniente da alteração de diabásio, contendo 20% de Fe_2O_3 livre, tendo 100% passando na peneira nº 20 (0,84 mm) e 74,1% na nº 200 (0,076 mm).

Utilizando-se o ensaio de compressão simples, principalmente, investigaram-se as variáveis seguintes:

- I - Percentagem de ácido fosfórico (em relação ao pêsô do solo sêco)
- II - Quantidade de solução empregada na compactação.
- III - Tempo de cura
- IV - Energia de compactação.
- V - Temperatura de cura.

Além das investigações acima citadas, que constituem o objeto principal do trabalho, realizaram-se também dois pequenos estudos:

- a) determinação da resistênciã à tração pelo método da compressão diametral;
- b) determinação da resistênciã à compressão simples de corpos de prova de solo tratado pelo cimento Portland, para comparação com um aditivo estabilizador comum.

Os resultados mostram que o solo em questão, que era inadequado para uso como camada de um pavimento, após o tratamento com ácido fosfórico poderá vir a ter esta utilização.

A B S T R A C T

A laboratory research work was performed in order to verify the possibilities of stabilizing a fine lateritic soil with phosphoric acid.

A sample of "terra roxa legítima" from Campinas, São Paulo, was studied. This is a lateritic soil resulting from the weathering of a diabase, and presenting 20% of free Fe_2O_3 ; it has 100% passing n° 20 sieve and 74.1% passing n° 200 sieve.

The experimental work was carried out mainly through unconfined compression tests in order to observe the influence on strength of the following variables.

- I - Percentage of phosphoric acid (on a dry soil weight basis).
- II - Amount of solution used in compacting the soil.
- III - Curing time.
- IV - Compaction energy.
- V - Curing temperature.

A few other secondary studies were also performed:

- a) tensile strength from diameter compression tests;
- b) unconfined compression tests of soil treated with Portland cement, to compare with a common stabilizing agent.

According to the results obtained, the soil that was inadequate to be used in a pavement layer, became strong enough for that purpose when treated with phosphoric acid.

I N D I C E

PÁG.

1	-	INTRODUÇÃO:.....	1
2	-	REVISÃO DA LITERATURA:.....	4
3	-	MATERIAIS E MÉTODOS:.....	7
		3.1 - Materiais	
		3.1.1 - Solo	
		3.1.2 - Ácido Fosfórico	
		3.2 - Métodos	
		3.2.1 - Soluções de Ácido Fosfórico	
		3.2.2 - Mistura dos Materiais	
		3.2.3 - Moldagem dos Corpos de Prova	
		3.2.4 - Cura dos Corpos de Prova	
		3.2.5 - Ensaios de Compressão Simples	
		3.2.6 - Estudo do Efeito da Variação da Temperatura de Cura	
		3.2.7 - Estudo do Solo Tratado para Cimento Portland	
		3.2.8 - Estudo da Resistência à Tra ção pelo Ensaio de Compressão Diametral	
		3.2.9 - Determinação do Grau de Petri ficação	
		3.2.10 - Outros Ensaios	
		3.3 - Observações Adicionais	

4	-	RESULTADOS:.....	24
5	-	DISCUSSÃO:.....	61
		5.1 - Determinação da Umidade de Moldagem	
		5.2 - Determinação dos Pêsos Específicos Aparentes Sêcos dos Corpos de Prova no Momento da Rutura	
		5.3 - Influência do Ácido Fosfórico no Pêso Específico Aparente Sêco da Mistura	
		5.4 - Análise da Influência da Percentagem de Ácido sôbre a Resistência	
		5.5 - Influência do Tempo de Cura sôbre a Resistência	
		5.6 - Efeito da Energia de Compactação sôbre a Resistência	
		5.7 - Influência da Umidade de Moldagem sôbre a Resistência	
		5.8 - Influência da Temperatura de Cura sôbre a Resistência	
		5.9 - Resistência à Tração	
		5.10- Resistência à Compressão Simples de Corpos de Prova Moldados com Cimento - Portland	
		5.11- Observações Adicionais	
6	-	CONCLUSÕES:.....	74
		APÊNDICE I:.....	77
		BIBLIOGRAFIA:.....	82

1 - INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

Estabilizar um solo significa alterar uma ou mais de suas propriedades, de forma a torná-lo utilizável para fins de engenharia.

Desde milhares de anos que o homem se utiliza da estabilização dos solos em suas construções, pois sabe-se que já no Neolítico conhecia os efeitos da compactação.

Diversos são os tipos de estabilização de solos, sendo sua classificação baseada no tratamento dado ao solo, processo envolvido, ou aditivos empregados.

Os solos finos, contendo apreciáveis quantidades de argila, são tipicamente coesivos e, embora resistentes quando secos, têm sua estrutura desfeita em presença de água, perdendo sua capacidade de suporte. Este comportamento faz com que, de um modo geral, não possam ser usados nas camadas dos pavimentos.

Uma solução para o problema é sua remoção e substituição por materiais que apresentem boas características de suporte, solução esta nem sempre economicamente viável, pois a distância de transporte tem influência marcante sobre o preço dos pavimentos. Uma alternativa consiste no uso de alguma forma de estabilização.

Como os solos finos, com apreciáveis quantidades de argilas, de um modo geral não respondem bem a uma simples compactação, torna-se necessário o uso de algum aditivo.

Ultimamente tem sido dado muita atenção aos tratamentos químicos para melhorar a capacidade de suporte deste tipo de solo, o que torna possível o seu uso em pavimentação,

até mesmo na camada de base.

O tratamento dos solos finos, argilosos, pelo ácido fosfórico, tem como resultado a formação de compostos de fósforo e ferro ou alumínio, que são duros, insolúveis e cristalinos. Também o Fe_2O_3 livre propicia a formação destes compostos. Estes compostos fazem com que a capacidade de suporte do solo argiloso, assim tratado, seja grandemente aumentada.

Típicos das regiões quentes e úmidas, os solos lateríticos têm como característica essencial de sua formação, a solubilização da sílica coloidal, com aumento das percentagens de sesquióxidos de ferro e alumínio. Depreende-se, então, que há uma probabilidade bastante grande de que o ácido fosfórico tenha sucesso na estabilização dos solos lateríticos.

Esta probabilidade, aliada às grandes quantidades destes solos existentes no Brasil, nos fizeram julgar interessantes investigações a respeito.

A verificação da estabilização foi feita em laboratório, principalmente através da resistência à compressão simples de corpos de prova compactados segundo técnica especialmente desenvolvida para o estudo de solos finos estabilizados. Foi considerada a influência das seguintes variáveis na resistência à compressão simples:

- a) percentagem de ácido fosfórico em relação ao solo seco;
- b) quantidade de solução empregada na compactação;
- c) tempo de cura;
- d) energia de compactação;
- e) temperatura de cura;

Dois pequenos estudos foram também realizados:

- a) determinação da resistência à tração, para diferentes teores de ácido fosfórico, pelo método do ensaio de compressão diametral;
- b) determinação das resistências à compressão simples de corpos de prova tratados com cimento Portland, ao invés de ácido fosfórico, com a finalidade de, pela comparação, tornar mais palpáveis os resultados obtidos com o ácido fosfórico. Adicionou-se o cimento em diversas proporções, em relação ao solo sêco, tendo sido a compactação feita a diferentes umidades, em relação à mistura sêca.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Hemwall (5), há muito se sabia que sõmente 10 a 30% do fósforo, usado como fertilizante, era aproveitado pelas plantas. Os restantes 70 a 90% eram considerados como sendo consumidos por micro-organismos ou afetados por outros fenômenos.

Hoje, sabe-se que a maior parte do fósforo que se pensava consumido pelos micro-organismos, sofre ação da precipitação química e da sorção físico-química.

O fósforo tornado insolúvel é dito como sendo fixado pelo solo, e foi reconhecido na Europa por volta do ano de 1850. Entretanto, os fenômenos químicos envolvidos, sõmente começaram a ser estudados por volta do ano de 1930.

A responsabilidade pela fixação do fósforo, por um solo ácido, está dividida entre os compostos de ferro, alumínio e os minerais argílicos existentes no solo.

Concorda a maioria dos autores que é pouco provável que a formação de fosfatos de ferro e de alumínio (Fe PO_4 e AlPO_4), seja responsável por uma grande parte da fixação de fósforo, sendo que Swenson (1949), citado por Hemwall (5) indica que os compostos que se formam são $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3 (\text{OH})_2 \text{H}_2\text{PO}_4$ e $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3 (\text{OH})_2 \text{H}_2\text{PO}_4$ na gama dos solos ácidos.

O mesmo autor cita também os trabalhos de Haseman (1950) que mostram que o mecanismo de fixação do fósforo pela montmorilonita, illita, caolinita, gibsitita e geotita, era idêntico e estava dividido em duas partes distintas: a primeira, rápida, devida à reação do fosfato com

o ferro e o alumínio disponíveis de imediato; e a segunda ,
lenta, devida à reação com o alumínio e ferro liberados pela
decomposição do próprio mineral argílico.

As argílas fixam o fósforo lentamente e duran
te longos períodos de tempo.

Os solos alcalinos e calcáreos também fixam
o fósforo, sendo essa fixação, atribuída, principalmente, à
formação de fosfatos de cálcio, ainda pouco conhecidos. En-
tretanto, também o alumínio e o ferro têm alguma participa-
ção na fixação do fósforo por êsses solos.

Lyons e Mc Evan (9) estudaram a estabilização
pelo ácido fosfórico de dez solos dos Estados Unidos, não
tendo conseguido, com dois dêles, resultados satisfatórios .
O primeiro dêles era alcalino e o segundo, siltoso. Expli -
cam os autores que quando um solo é alcalino, necessita de
uma grande quantidade de ácido para que se obtenha uma esta-
bilização pouco importante, devendo-se êste resultado ao fa-
to de o ácido ser neutralizado antes do ataque à argila. No
caso do solo siltoso, deve-se o insucesso ao fato de que o
ácido fosfórico ataca muito pouco a sílica.

Nos climas tropicais, a ação da hidrólise sô-
bre os silicatos das rochas é intensa, liberando vários com-
postos, estando entre êles os de alumínio, os de ferro, ba-
ses solúveis e sílica coloidal. A solubilização da sílica ,
que é carregada pelas águas das chuvas, juntamente com as ba-
ses, vai tornando ácido o produto da decomposição, bem como
rico em ferro e alumínio, originando-se os solos lateríti-
cos.

Verifica-se, então, face ao anteriormente ex-
posto, que há uma provável adequação do ácido fosfórico à
estabilização dos solos lateríticos. Medina (11), em suas no

tas de aula sôbre estabilização pelo ácido fosfórico, apresenta-nos: "Parece existir possibilidades muito interessantes com os solos lateríticos".

O índice de grupo, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e a expansão, são de um modo geral reduzidos pelo tratamento com o ácido fosfórico, segundo resultados achados por Lyons e Mc Evan (9) no estudo de alguns solos.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais

3.1.1 - Solo

Procurou-se para os estudos de um solo laterítico que fôsse abundante, conhecido, e que apresentasse uma elevada percentagem de óxido de ferro livre.

A primeira idéia foi experimentar a estabilização de um solo residual da Ilha do Governador, Guanabara, que vinha servindo a outros estudos no Laboratório de Mecânica dos Solos da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Entretanto, ensaios químicos não indicaram teor substancial de óxido de ferro livre.

Recaiu, então, a escolha sôbre uma "terra Roxa" , solo muito comum no Estado de São Paulo. A amostra de terra roxa foi colhida em Campinas, Estado de São Paulo e está catalogada no Instituto Agronômico de Campinas sob o nº 866.

Transcrevemos do trabalho Moniz e Jackson (14) as seguintes características dêsse material:

- a) Rocha matriz - Diabásio com alguma contribuição de sedimentos glaciais.
- b) Propriedades químicas: (ver quadro)
- c) Análise mineralógica. (ver quadro)

Horizon	Depth, cm	PH 1:1	meq/100 g						Ratio	Percentage		
			Exchangeable Cations							Base Sat.	Organic Carbon	Nitrogen
			Ca	Mg	Na	K	Al	H				
<u>Soil 866 - Campinas City</u>												
Alp	0- 13	6.0	3.21	1.49	0.06	0.04	Tr	15.1	14.7	24.1	2.36	0.16
A3	13- 43	5.7	2.35	0.40	0.06	0.02	Tr	12.5	12.8	18.5	1.67	0.13
B21	43- 70	5.9	1.35	0.40	0.06	0.01	Tr	11.8	14.0	13.4	0.98	0.07
B22	70-105	6.2	1.39	0.36	0.08	0.01	Tr	7.0	13.0	20.8	0.52	0.04
BC	105-180	6.2	1.37	0.35	0.06	0.01	Tr	9.9	15.6	15.3	0.78	0.05
C1	180-230	6.2	1.11	0.27	0.04	0.01	Tr	5.3	16.0	21.2	0.48	0.03
C2	230-280	6.4	1.09	0.27	0.06	Tr	Tr	6.9	-	17.0	0.38	-
C3	280-330	6.4	0.90	0.44	0.04	Tr	Tr	6.4	-	17.7	0.34	-
C4	330-380	6.3	0.73	0.84	0.06	Tr	Tr	7.5	-	17.8	0.32	-
C5	380-405	6.1	0.70	0.84	0.06	Tr	Tr	8.0	-	16.7	0.22	-
C6	405-430	6.1	0.84	0.64	0.08	Tr	Tr	8.6	-	15.3	0.26	-

P R O P R I E D A D E S Q U Í M I C A S

FROM CAMPINAS CITY

Soil number	866a	866b	866c	866d	866e	866f	866g	866h	866i	866j	866k
Horizon	Alp	A3	B21	B22	BC	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Fe ₂ O ₃	<u>17.4</u>	<u>19.4</u>	<u>19.6</u>	<u>20.7</u>	<u>19.9</u>	<u>19.8</u>	<u>21.5</u>	<u>20.8</u>	<u>20.9</u>	<u>21.4</u>	<u>21.5</u>
Gibbsite	43.0	43.5	47.3	45.0	49.0	35.0	51.5	43.5	47.5	48.5	46.5
Kaolinite	39.5	38.9	31.7	38.4	38.3	42.2	35.7	37.7	37.1	37.5	39.9
Allophane	12.2	11.1	0.0	10.3	0.0	16.6	0.0	15.4	0.0	0.0	0.0
Opal	0.0	0.0	8.4	0.0	8.1	0.0	7.1	0.0	9.6	7.7	10.6
Vermiculite	4.7	4.9	3.4	5.2	3.1	5.2	2.7	2.7	4.3	2.5	5.9
Mica	1.1	1.3	1.5	1.3	1.1	1.8	1.6	1.3	1.8	0.6	1.0
Montmorill	<u>0.0</u>										
Total	100.5	99.7	92.3	100.2	99.6	100.8	98.6	100.6	100.3	96.8	103.9

ANÁLISE MINERALÓGICA

A amostra foi retirada de uma profundidade entre 1,50 m e 2,00 m, em viagem que fizemos a Campinas, em Outubro de 1970.

Revelou a análise granulométrica tratar-se de um material que passa totalmente na peneira nº 20 e que tem 25,9% retido na peneira nº 200.

A determinação dos limites de Atterberg nos conduziu aos seguintes resultados:

LL = 43,3 %

LP = 28,0 %

IP = 15,3 %

LC = 30,1 %

Em consequência, está classificado como:

ML - Classificação Unificada

A-7-6- Classificação do HRB

e o Índice de grupo é 11.

A determinação do Grau de Petrificação, feita de acôrdo com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa (15), deu como resultado:

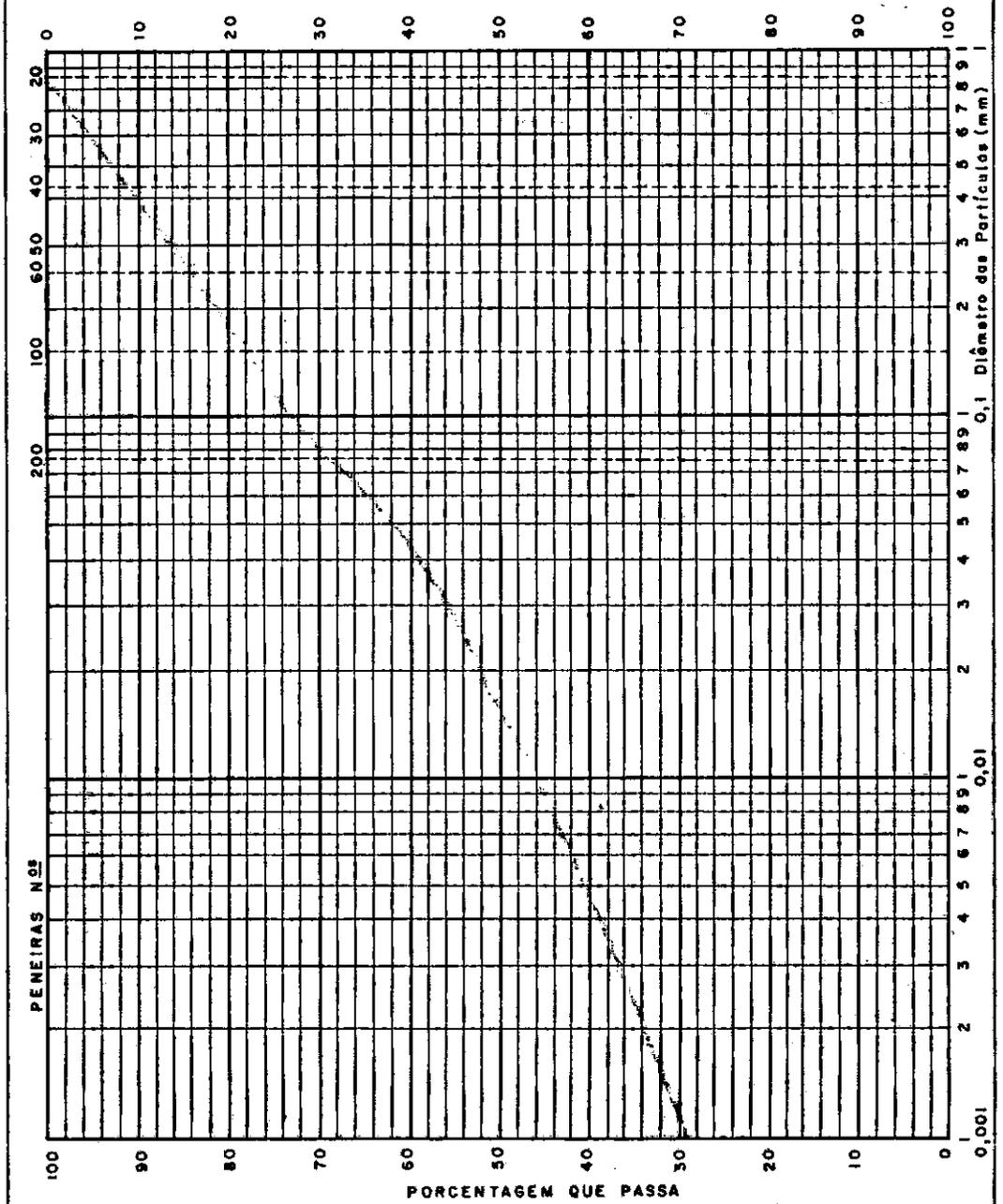
GP = 1,0

Este último resultado significa que as pastilhas de solo do ensaio de contração, colocadas em contato com a água durante 24 horas, ficam com um teor de umidade, proveniente da absorção de água, igual ao seu limite de contração, ou seja: não mudam de volume ao absorverem água por capilaridade, podendo haver uma estabilização natural ao fim de alguns períodos de chuvas.

3.1.2 - Ácido Fosfórico

O ácido fosfórico utilizado foi o "Baker - Analysed", cuja análise do lote apresentou o seguinte resulta

CURVA GRANULOMÉTRICA



do:

Dosagem (H_3PO_4)	85,4%
Cloreto (Cl)	0,0002%
Nitrato (NO_3)	0,0002%
Sulfato (SO_4)	0,001 %
Ácidos Voláteis (Como $CH_3 COCH$)	0,0010%
Álcalis e outros fosfatos	0,20 %
Cálcio, Magnésio e outros fosfatos	0,001 %
Arsênico (As)	0,00002%
Metais Pesados (Como Pb)	0,0005%
Ferro (Fe)	0,001%
Potássio (k)	0,003%
Sódio (Na)	0,003%
Substâncias Redutoras	Passa o Teste.

A densidade determinada foi de 1,678.

3.2 - Métodos.

3.2.1 - Soluções de Ácido Fosfórico

Imediatamente após a determinação da densidade do ácido fosfórico, surgiu o problema de como considerar as umidades de moldagem, já que usaríamos soluções em que os componentes tinham densidades bastante diferentes. Havia duas hipóteses: uma seria adotar percentagens de solução, em peso, em relação ao solo seco e a outra, seria usar volumes de solução calculados como se estivéssemos usando somente água nas moldagens. Optamos pela segunda hipótese, pois assim teríamos, pelo menos, os volumes de líquidos iguais aos que seriam usados quando fôssem moldados os corpos de prova para o traçado da curva de referência, sem adição de ácido.

Assim, ao dizermos que um determinado corpo de prova foi moldado com 25% de umidade, isto significa que foi empregado um volume de solução igual ao volume de água destilada que seria usado na moldagem do mesmo corpo de prova com 25% de umidade em relação ao solo sêco.

Conforme revelou a análise do ácido fosfórico utilizado, sua concentração era de 85,4% de H_3PO_4 , o que tornou necessária uma correção para a concentração. Então, o cálculo para o preparo das diferentes soluções foi feito da seguinte forma:

$$Ps = \frac{Po}{100+ho} \qquad pf = \frac{Hf \times Ps}{C}$$

$$PA = \left(\frac{Ht}{\gamma_a} - \frac{Hf}{\gamma_f \times C} \right) Ps \times \gamma_a \qquad Pw = PA - ho Ps$$

Ps = pêsco do solo sêco

ho = umidade higroscópica

pf = pêsco do ácido fosfórico a ser usado

Hf = percentagem de ácido fosfórico correspondente ao ponto a ser estudado

C = concentração do ácido fosfórico

PA = pêsco de água a ser usado

Ht = unidade de moldagem do ponto a ser estudado

γ_f = pêsco específico do ácido fosfórico na concentração disponível

γ_a = pêsco específico da água (1,00)

Pw = pêsco de água em que seria diluído pf.

As soluções eram preparadas da seguinte forma:

- a) determinava-se a umidade do material a ser usado (ho).
- b) Pesava-se 180 g de solo na umidade ho para cada corpo de prova, e calculava-se o Ps correspondente.

- c) Com a percentagem de ácido em relação ao solo seco escolhida (H_f) e o peso do solo seco (P_s), determinava-se o peso do ácido (P_f), corrigido para a concentração (C), determinada pela análise.
- d) Calculava-se o peso de água (P_a) correspondente à umidade de moldagem desejada, fazendo-se o cálculo do volume de água que seria usado, por hipótese, e subtraía-se o volume do ácido. O volume restante multiplicado pelo peso específico da água (γ_a), nos dava o peso de água a ser usado na moldagem.
- e) Como o material já estivesse úmido, era calculado o peso de água a ser adicionado (P_w).
- f) Após a pesagem do ácido e da água, eram os mesmos colocados em um recipiente de vidro, com boca larga, com capacidade para 500 cc, e agitados com um bastão de vidro.

3.2.2 - Mistura dos Materiais

Sempre que se fôsse proceder a ensaios, o material necessário era destorroado com 48 horas de antecedência, passado na peneira nº 20, para retirada dos torrões ainda existentes, misturado para homogeneização e depositado em recipientes fechados, com capacidade superior a 4 kg, de onde eram retiradas três cápsulas para verificação da umidade.

Como as maiores resistências do solo estabilizado com ácido fosfórico não coincidem, obrigatoriamente, com as maiores densidades, foi necessário o preparo de soluções contendo cinco diferentes percentagens de ácido, em relação ao solo seco, cada uma delas em cinco diluições também diferentes, o que nos deu vinte e cinco tipos de solução.

Para termos um ponto de partida, foi feito um

ensaio de compactação com o equipamento a ser usado durante todos os demais ensaios, ficando caracterizada a umidade ótima do material, que é de 24,5%, para a energia de cinco golpes por face do corpo de prova. Com base neste valor, adotamos para nossas moldagens as umidades de 22%; 23,5%; 24,5%; 25,5% e 27%.

A adição da solução ao solo foi feita usando-se um almofariz de porcelana, sendo a mistura executada manualmente, com auxílio de uma espátula de aço inoxidável e uso de luvas de borracha. O tempo de mistura variou entre 4 a 5 minutos, até que a massa fôsse considerada suficientemente homogeneizada.

Terminada a operação de homogeneização, o almofariz era coberto por um pano úmido, a fim de se evitar a perda da umidade da massa.

Normalmente era preparada uma quantidade de mistura necessária à moldagem de seis corpos de prova, embora cada série constasse de nove. Isto era feito para evitar um intervalo de tempo muito grande entre a moldagem do primeiro corpo de prova e do último. Como havia uma perda de corpos relativamente grande, cêrca de 30% no início das moldagens e 20% depois, cada série foi moldada em duas etapas aproximadamente iguais. Esta perda deveu-se a três fatos : exigências rígid^{as} da compactação; variação das condições de compactação de mistura para mistura; variação destas mesmas condições em função do tempo decorrido após a adição da solução ao solo.

3.2.3 - Moldagem dos Corpos de Prova

Entre diversos tipos de equipamento de compactação, o que melhor se adaptou às condições dos ensaios foi o

preconizado pelo Eng^o Carlos de Souza Pinto (18), do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, para estudos em que estejam envolvidos solos finos e aditivos estabilizados.

O processo é muito semelhante ao sugerido pela Portland Cement Association para a determinação da resistência à compressão de solo-cimento, quando o solo não contenha partículas superiores a 4,8 mm, e foi desenvolvido pelo Iowa State University Engineering Experiment Station Soil Research Laboratory (4)

Trata-se de um equipamento de compactação do tipo de duplo êmbolo, cilindro flutuante, cuja energia de compactação é aplicada por um pêso de 2250 g que cai de uma altura de 305 mm, permitindo moldar corpos de prova cilíndricos, de 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura. No apêndice I encontra-se a descrição detalhada do equipamento.

A vantagem deste processo é que permite a moldagem de corpos de prova em tempo relativamente curto, muito homogêneos e com grande economia, tanto de aditivo quanto de solo.

A moldagem dos corpos de prova com 50 mm \pm 1 mm de altura foi feita da seguinte maneira:

- a) Preparava-se a mistura com a solução específica para cada série.
- b) Era pesada uma quantidade de mistura igual ao pêso que o corpo de prova teria, com 50 mm \pm 1 mm de altura, após compactação.
- c) A mistura era colocada no cilindro, estando este apoiado em um suporte temporário.
- d) Após a aplicação do primeiro golpe com o soquete, o suporte temporário era retirado, ficando o cilindro flutuante, preso somente pelo atrito da mistura contra suas paredes,

e eram aplicados os golpes restantes para aquela face.

- e) O cilindro era invertido sôbre a base, após a retirada do respectivo colar, e aplicava-se o mesmo número de golpes na outra face,
- f) Retirava-se o corpo de prova do molde com o extrator.
- g) A altura do corpo de prova era verificada, e feita sua pesagem, com precisão de 0,01 g.

Foram adotadas três energias de compactação. A primeira de 5 golpes por face, a segunda de 12 golpes por face e a terceira de 20 golpes por face, correspondendo, respectivamente, às energias de 70500, 169000 e 282000 kgm/m^3 .

Souza Pinto (18), fazendo ensaios de equivalência de compactação, estudou dois solos com 5% de cal e verificou que, usando-se o equipamento acima descrito e as primeira e segunda energias adotadas, chegava-se a resultados semelhantes aos obtidos com o uso do cilindro de Proctor e as energias correspondentes às dos ensaios Normal e Intermediário, bastante menores que as aqui adotadas, respectivamente. A terceira energia, embora semelhante à do ensaio Modificado produziu resultados inferiores aos obtidos com esta energia e o cilindro de Proctor.

Não foram feitos estudos de equivalência para mistura de solo com ácido fosfórico, porém, adotaram-se as energias determinadas com as misturas de solo cal, para que se tivesse, pelo menos, uma idéia com relação aos ensaios de compactação mais comumente usados.

Como foram usados vinte e cinco soluções diferentes e três energias de compactação, empregou-se o método das tentativas dirigidas para a obtenção dos pesos necessários à moldagem de corpos de prova com altura de 50 mm \pm 1 mm. Normalmente chegávamos ao peso correto na moldagem do

terceiro corpo de prova. A medida que o número de moldagens feitas foi crescendo, as perdas foram diminuindo, conforme já foi dito.

Terminadas as moldagens, era pesado o material restante, com aproximação de um grama e retiradas duas cápsulas que eram postas a secar em estufas, cuja temperatura variou entre 106°C a 110°C .

3.2.4 - Cura dos Corpos de Prova

Para a cura, cada corpo de prova foi embrulhado em material plástico, com comprimento suficiente para um envolvimento duplo, sendo que suas pontas dobradas e presas por um elástico, de modo a não haver perda de umidade. Em seguida, os corpos de prova eram postos a curar em câmara úmida, à temperatura de $29^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$.

Nesta situação ficaram durante 6,13 ou 27 dias, depois eram imersos em água, durante 24 horas ± 1 hora, à temperatura ambiente.

Ao serem retirados da imersão, os corpos de prova eram postos para escorrer durante alguns minutos e enxugados com papel absorvente.

Era, então, novamente medida a altura, e feita nova pesagem.

3.2.5 - Ensaios de Compressão Simples

Após a pesagem, os corpos de prova eram levados para a prensa, onde seriam rompidos por compressão simples. Tratava-se de uma prensa Wikehãm-Farrance, modelo T-56, equipado com anel dinamométrico com capacidade para 1000 kg, devidamente calibrada para a velocidade de 0,0366-cm/min. No momento da ruptura eram anotadas suas deformações e as do anel dinamométrico.

3.2.6 - Estudo do Efeito da Variação da Temperatura de Cura

Verificou-se o efeito da variação da temperatura usando-se a primeira energia, 2% de ácido e umidade de moldagem de 23,5%.

Exatamente o mesmo procedimento foi seguido em todas as fases, sendo que a cura foi feita em estufa a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e em geladeira, à temperatura constante de 5°C .

A fim de manter o ambiente saturado foram colocados dentro da estufa vasilhas cheias de água à temperatura igual à da estufa, tendo sido, após, colocados os corpos de prova, embrulhados, por um tempo de permanência de 6 dias, findos os quais foram retirados e imersos em água durante 24 horas \pm 1 hora, à temperatura ambiente.

3.2.7 - Estudo do Solo Tratado pelo Cimento Portland

Para os ensaios com cimento Portland, foi adotada a primeira energia, cura de 27 dias em câmara úmida, 24 horas \pm 1 hora em imersão, umidade de moldagem de 23,5%; 24,5% e 25,5%; em relação ao peso da mistura seca, e 1%, 3% e 5% de cimento, em relação ao peso do solo seco.

Todo o procedimento foi exatamente igual aos ensaios com o ácido fosfórico, exceto a mistura que foi feita em duas etapas: a primeira, a seco e a segunda, após a adição da água.

3.2.8 - Estudo da Resistência à Tração pelo Ensaio de Compressão Diametral.

Para os ensaios de tração foram escolhidas a terceira energia, duas percentagens de ácido, 2% e 5%, 27 dias de cura, em câmara úmida, 24 horas \pm 1 hora de imersão em água e 23,5% de umidade de moldagem, tendo sido idênticos todos os procedimentos nas diversas fases, até o momento da rutura.

Foi usado, pelas inúmeras vantagens que apresenta, o método indireto de determinação da resistência à

tração por compressão diametral. Este método foi desenvolvido pelo Prof. Fernando Luiz Lobo B. Carneiro, no Brasil, e é bastante usado para ensaiar concreto de cimento, de acordo com o MB-212 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

O ensaio consiste em se colocar o corpo de prova entre os pratos de uma prensa equipada com anel dinamométrico, prêsso entre dois pedaços de madeira que o comprimem por duas geratrizes opostas.

Ao ser posta a prensa em funcionamento, o corpo de prova é comprimido; vão surgindo tensões de tração, horizontais, cuja distribuição é constante ao longo do diâmetro vertical, e cuja intensidade é dada pela expressão:

$$\sigma_{ti} = \frac{2P}{\pi dL}$$

onde:

σ_{ti} = resistência à tração indireta em kg/cm^2

P = carga máxima indicada pela máquina de ensaio, em quilogramas

d = diâmetro do corpo de prova em centímetros

L = comprimento do corpo de prova em centímetros.

Kennedy e Hudson (7), da Universidade do Texas, estudaram a aplicação deste método a solos estabilizados, com pleno sucesso, concluindo ser o melhor método corrente para determinar a resistência à tração dos materiais empregados nas rodovias.

Terminado o tempo de imersão, feito o escorrimento e pesados os corpos de prova, estes foram levados a uma prensa Wykeham - Farrance, modelo T-57, equipada com um anel dinamométrico com capacidade para 1000 kg, e regulada para uma velocidade de 0,015 cm/min.

Para apoio das geratrizes diametralmente opostas, foram usados, entre os pratos da prensa e o corpo de prova

va, dois paralelepípedos de madeira, com 8 cm de comprimento, 2 cm de largura e 1 cm de espessura. A madeira usada foi o jequitibá, e a temperatura de 25° C.

Posta a prensa a funcionar, levaram-se os corpos de prova à rutura, tendo sido anotada a deformação do anel nesse momento.

3.2.9 - Determinação do Grau de Petrificação.

Foi determinado o grau de petrificação do solo, sem adição de ácido fosfórico, usando-se pastilhas de solo provenientes dos ensaios para determinação do limite de contração, moldadas sem que as cápsulas fôssem untadas com vaselina.

Conforme preconiza o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa (15) moldaram-se 6 pastilhas, da maneira acima descrita. Estas pastilhas foram postas a secar ao ar durante 18 horas, findas as quais foram levadas à estufa com temperatura entre 106° C e 110° C, retiradas após 48 horas.

Após a retirada das pastilhas das respectivas cápsulas, procedeu-se às determinações de volume das pastilhas pelo processo da cuba de mercúrio e pesou-se com precisão de 0,01 g.

Foi previamente preparada uma cuba contendo seis pedras porosas e água até o nível da face superior das pedras. Após as pesagens acima referidas, as pastilhas foram depositadas sobre as pedras porosas para absorção de água por capilaridade.

Passadas 24 horas, foram pesadas, com precisão de 0,01 g, e calculados os limites de absorção (LA), que são as umidades absorvidas pelas pastilhas de solo.

O grau de petrificação (GP), é dado pela rela-

ção:

$$GP = \frac{LC}{LA}$$

3.2.10 - Outros Ensaios

As determinações do limite de liquidez, limite de plasticidade, limite de contração e granulometria, inclusive com sedimentação, foram feitas, respectivamente, de acordo com os métodos: DPT-M-44-64, DPT-M-82-63, DPT-M-87-64 e DPT-M-51-64 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

3.3 - Observações Adicionais

Para a obtenção dos valores de cada ponto, tanto nos ensaios de compressão simples, como no ensaio de tração por compressão diametral, foram rompidos corpos de prova em triplicata, sendo adotada a média dos valores obtidos com os três corpos de prova. Se um dos valores de resistência diferia da média de $\pm 10\%$, era eliminado e tomava-se a média dos dois restantes. Caso dois valores se afastassem de $\pm 10\%$, abandonavam-se os três resultados e procedia-se à moldagem de três novos corpos de prova, com as características necessárias.

O mesmo se fez quando foram obtidos resultados inesperados.

Considerando: que todos os pontos representam a média dos resultados obtidos pela ruptura de corpos de prova moldados em triplicata; os corpos de prova perdidos pelas razões já expostas; os moldados para obtenção da curva inicial de compactação, sem adição de ácido; a série moldada sem uso do ácido, para referência; os corpos de prova necessários à determinação da velocidade adequada da prensa e estudo de uma metodologia que permitisse uma melhor utilização do equipamento disponível, foram moldados cerca de 500 corpos de pro

va cilíndricos de 50mm de diâmetro e 50 mm + 1 mm de altura, além dos necessários ensaios de caracterização do solo estudado.

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 1%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
22%	σ (kg/cm ²)	4,72	4,61	4,70
	γ_s (kg/cm ³)	1,48	1,47	1,46
23,5%	σ	4,34	4,98	4,94
	γ_s	1,51	1,51	1,52
24,5%	σ	4,93	4,68	5,11
	γ_s	1,54	1,53	1,55
25,5%	σ	4,94	4,64	5,36
	γ	1,58	1,57	1,60
27%	σ	4,83	4,51	5,69
	γ_s	1,59	1,59	1,60

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 2%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
22 %	σ (kg/cm ²)	6,82	6,49	7,18
	γ_s (kg/cm ³)	1,47	1,44	1,46
23,5%	σ	6,25	6,53	6,89
	γ_s	1,47	1,47	1,48
24,5%	σ	7,00	6,84	8,01
	γ_s	1,51	1,50	1,50
25,5%	σ	6,98	6,62	7,96
	γ	1,53	1,52	1,53
26,5%	σ	6,18	6,62	6,64
	γ_s	1,56	1,56	1,56

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 3%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
22 %	σ (kg/cm ²)	8,53	8,31	9,69
	δ_s (kg/cm ³)	1,44	1,44	1,44
23,5%	σ	9,47	9,39	11,78
	δ_s	1,49	1,47	1,48
24,5%	σ	10,87	11,09	12,60
	δ_s	1,52	1,49	1,51
25,5%	σ	11,42	10,21	14,12
	δ	1,54	1,52	1,53
26,5%	σ	12,26	10,11	13,62
	δ_s	1,57	1,56	1,57

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 4%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
22 %	σ (kg/cm ²)	10,98	11,13	11,29
	γ_s (kg/cm ³)	1,45	1,44	1,43
23,5%	σ	11,18	13,10	15,84
	γ_s	1,48	1,48	1,49
24,5%	σ	13,70	13,71	16,02
	γ_s	1,52	1,50	1,52
25,5%	σ	15,12	14,40	19,04
	γ	1,55	1,53	1,54
26,5%	σ	13,91	13,38	21,6
	γ_s	1,58	1,56	1,59

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 5%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
22 %	σ (kg/cm ²)	12,83	12,66	14,35
	γ_s (kg/cm ³)	1,47	1,46	1,45
23,5%	σ	16,30	15,27	18,55
	γ_s	1,50	1,50	1,48
24,5%	σ	17,86	17,06	23,85
	γ_s	1,53	1,50	1,54
25,5%	σ	17,01	16,49	25,10
	γ	1,55	1,53	1,56
26,5%	σ	16,51	15,46	23,80
	γ_s	1,58	1,54	1,58

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO →

ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 2%

ENERGIA → 2 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)	11,26	11,64	14,79
	γ_s (kg/cm ³)	1,60	1,60	1,60
24,5%	σ	12,88	12,10	13,81
	γ_s	1,64	1,62	1,64
25,5%	σ	11,61	11,67	12,30
	γ_s	1,65	1,64	1,65
26,5%	σ	8,10	9,31	9,2
	γ	1,63	1,64	1,63
	σ			
	γ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 5%

ENERGIA → 2E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)	27,46	35,50	31,30
	γ_s (kg/cm ³)	1,62	1,64	1,60
24,5%	σ	24,59	34,46	30,30
	γ_s	1,63	1,67	1,63
25,5%	σ	27,08	31,15	35,30
	γ_s	1,70	1,67	1,70
26,5%	σ	16,18	27,7	24,97
	γ	1,69	1,68	1,70
	σ			
	γ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO →

ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 2%

ENERGIA → 3E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	δ (kg/cm ²)	16,02	17,70	18,14
	δ_s (kg/cm ³)	1,67	1,67	1,67
24,5%	δ	11,6	14,89	16,13
	δ_s	1,69	1,69	1,69
	δ			
	δ_s			
	δ			
	δ			
	δ			
	δ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 5%

ENERGIA → 3E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)	49,00	37,6	38,4
	γ_s (kg/cm ³)	1,72	1,72	1,71
24,5%	σ	44,20	38,57	38,26
	γ_s	1,75	1,74	1,75
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO →

ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 5%

ENERGIA → 3E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	δ (kg/cm ²)	35,54	34,06	←
	δ_s (kg/cm ³)	1,73	1,69	←
24,5%	δ	31,53	36,13	←
	δ_s	1,75	1,73	←
	δ			
	δ_s			
	δ			
	δ			
	δ			
	δ_s			

RENOLDAGEM

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 2%

ENERGIA → 3 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)		TRAÇÃO →	1,19
	γ_s (kg/cm ³)		TRAÇÃO →	1,68
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO →

ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 5%

ENERGIA → 3 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	23
23,5%	σ (kg/cm ²)		TRAÇÃO →	4,49
	δ_s (kg/cm ³)		TRAÇÃO →	1,72
	σ			
	δ_s			
	σ			
	δ_s			
	σ			
	δ			
	σ			
	δ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO →

ÁCIDO FOSFÓRICO

% DE ADITIVO → 2%

ENERGIA → 3 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	δ (kg/cm ²)	13,73	13,38	GELADEI- ← RA
	δ_s (kg/cm ³)	1,68	1,67	GELADEI- ← RA
23,5%	δ	18,38	-	ESTUFA ←
	δ_s	1,67	-	ESTUFA ←
	δ			
	δ_s			
	δ			
	δ			
	δ			
	δ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO → CIMENTO PORTLAND

% DE ADITIVO → 1%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)	-	-	2,87
	γ_s (kg/cm ³)	-	-	-
24,5%	σ	-	-	3,08
	γ_s	-	-	-
25,5%	σ	-	-	3,01
	γ_s	-	-	-
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

ADITIVO →

CIMENTO PORTLAND

% DE ADITIVO → 3%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)	-	-	3,66
	γ_s (kg/cm ³)	-	-	-
24,5%	σ	-	-	3,42
	γ_s	-	-	-
25,5%	σ	-	-	3,07
	γ_s	-	-	-
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			

RESISTÊNCIA E DENSIDADE MÉDIAS

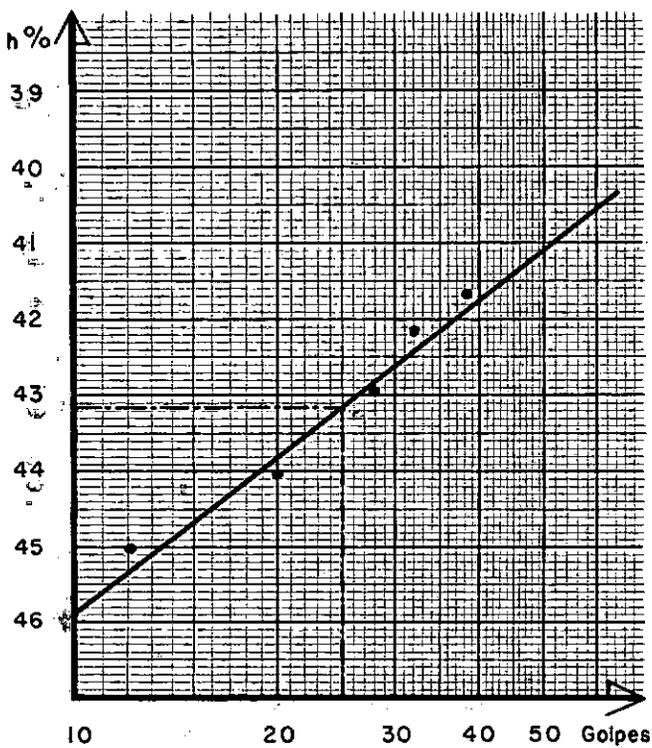
ADITIVO → CIMENTO PORTLAND

% DE ADITIVO → 5%

ENERGIA → 1 E

UMIDADE DE MOLDAGEM (%)	TEMPO DE CURA (dias)	7	14	28
23,5%	σ (kg/cm ²)	-	-	6,66
	γ_s (kg/cm ³)	-	-	-
24,5%	σ	-	-	6,36
	γ_s	-	-	-
25,5%	σ	-	-	5,32
	γ_s	-	-	-
	σ			
	γ_s			
	σ			
	γ_s			

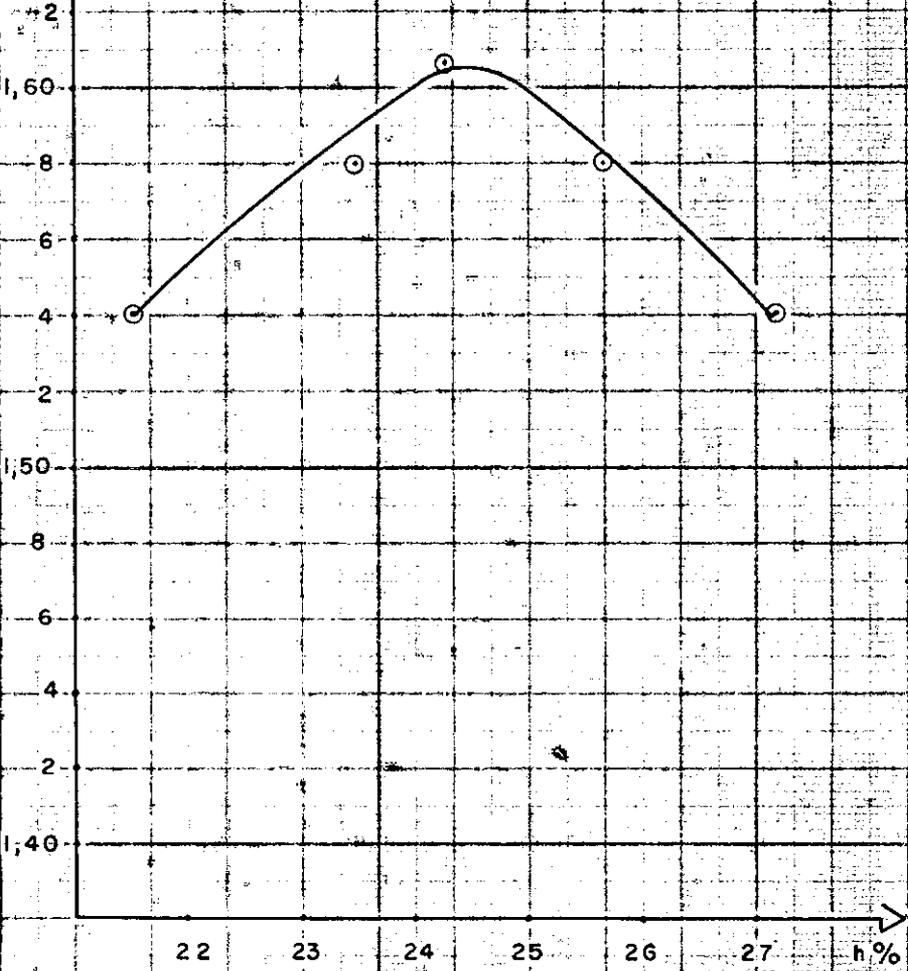
LIMITE DE LIQUIDEZ



COMPACTAÇÃO

1ª. ENERGIA
SEM ADIÇÃO DE ÁCIDO

γ_s
g/cm³



PÊSO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO

1a. ENERGIA
1% DE ÁCIDO

γ_s (RUTURA)

g/cm^3

1,60

8

6

4

2

1,50

8

6

4

2

1,40

22

23

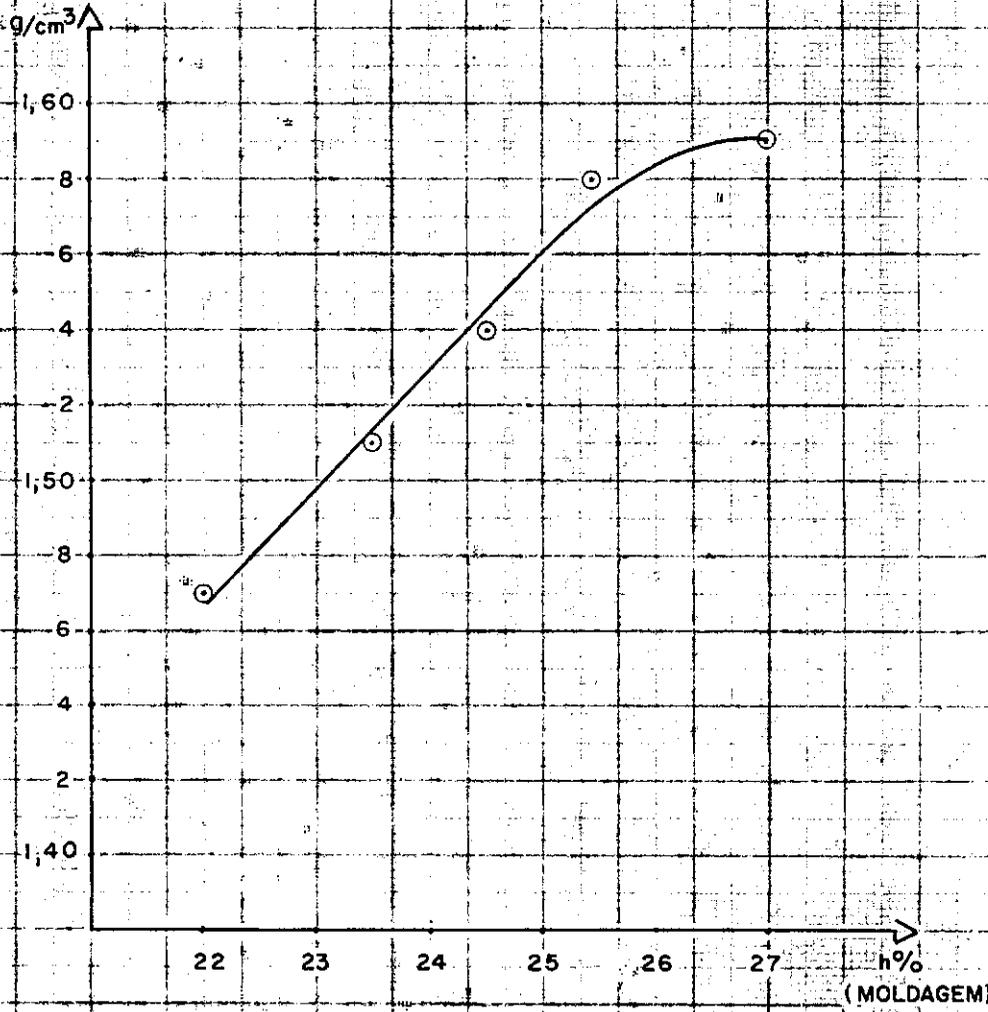
24

25

26

27

h%
(MOLDAGEM)



PÊSO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO

1a. ENERGIA
2% DE ÁCIDO γ_s (RUTURA) g/cm^3

1,60

8

6

4

2

1,50

8

6

4

2

1,40

22

23

24

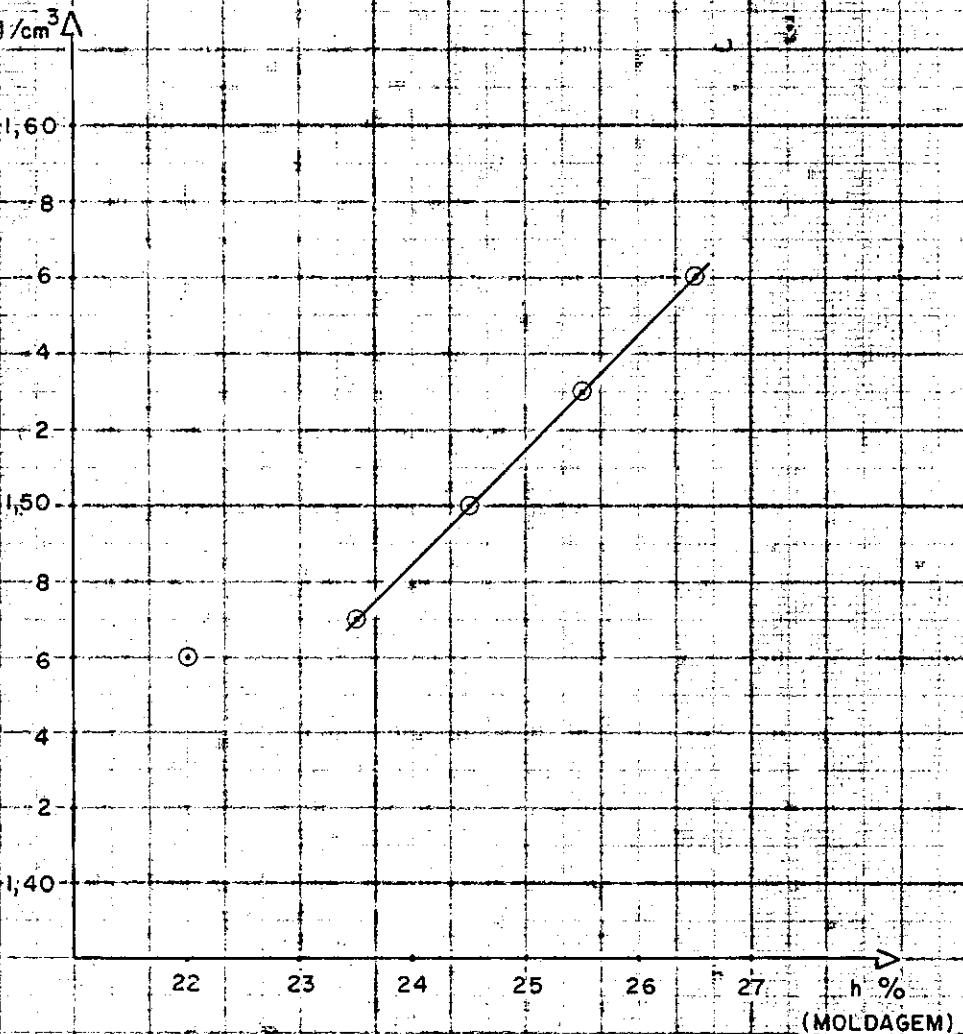
25

26

27

h %

(MOLDAGEM)



PESO ESPECÍFICO APARENTE SÉCO

3 % ÁCIDO

1ª ENERGIA

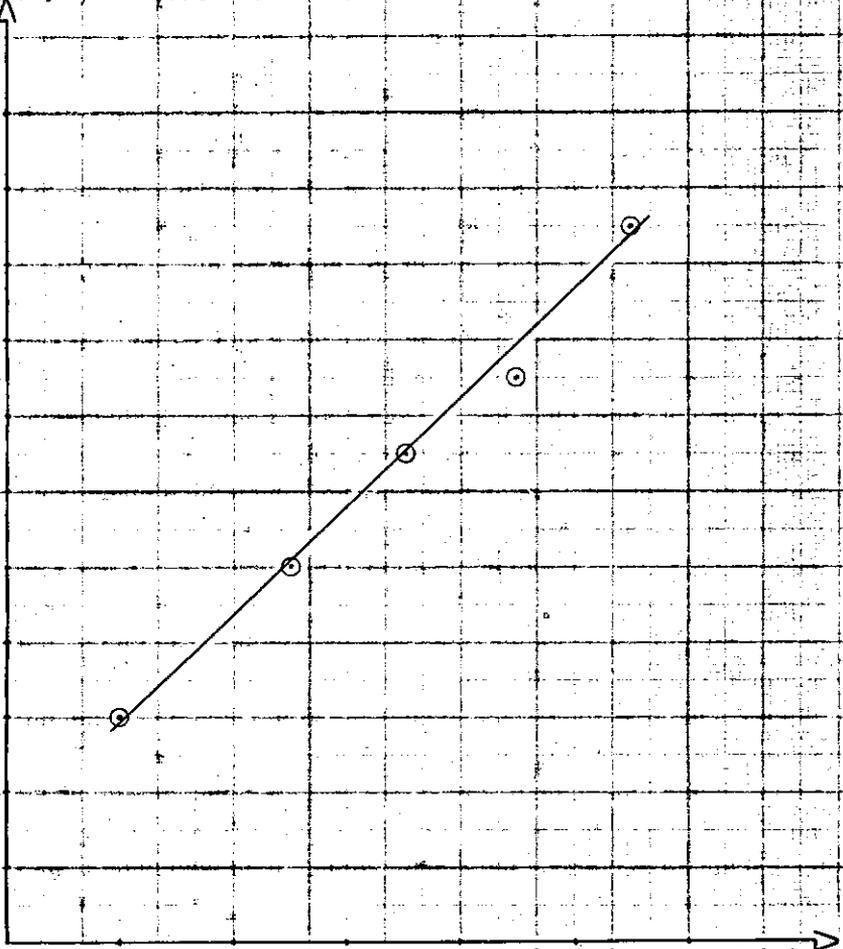
γ_s (RUTURA)
g/cm³

1,60
8
6
4
2
1,50
8
6
4
2
1,40

22 23 24 25 26 27

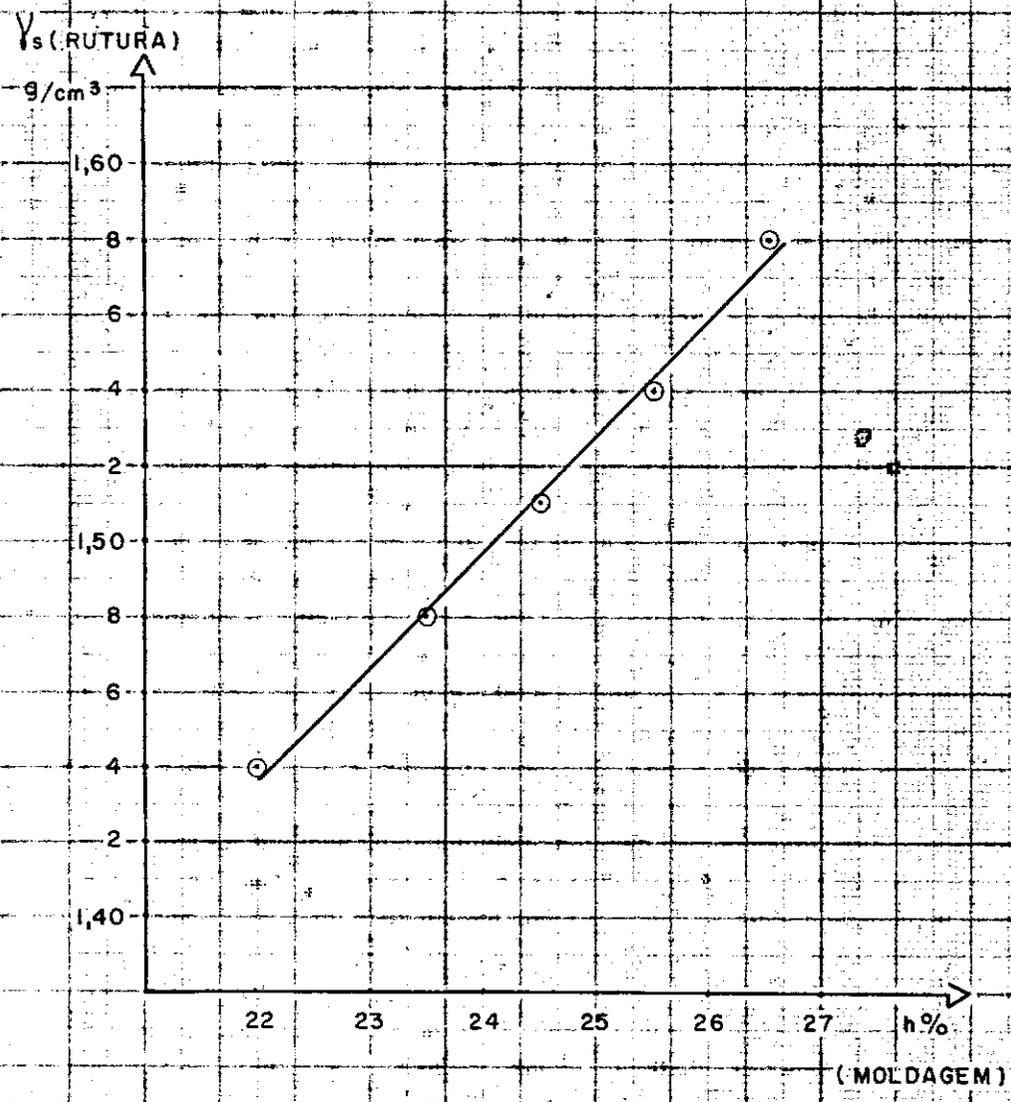
h%

(MOLDAGEM)



PESO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO

4 % ÁCIDO
1.ª ENERGIA



PÊSO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO

5% ÁCIDO
1ª ENERGIA

V_s (ROTURA)
g/cm³

1,60

8

6

4

2

1,50

8

6

4

2

1,40

22

23

24

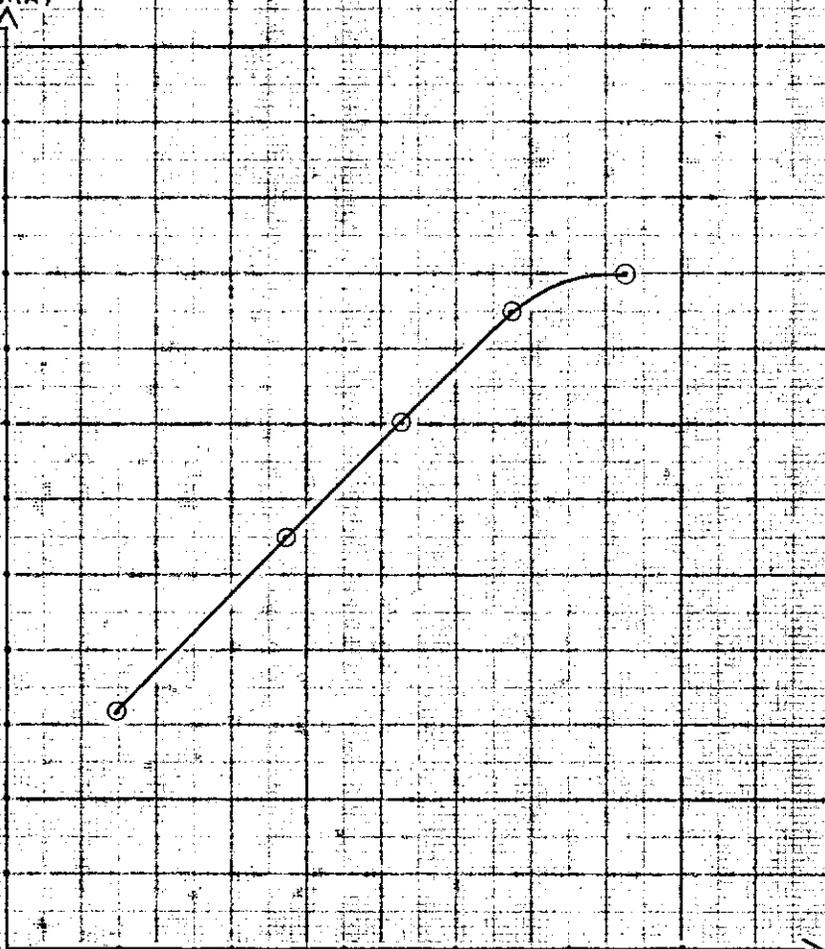
25

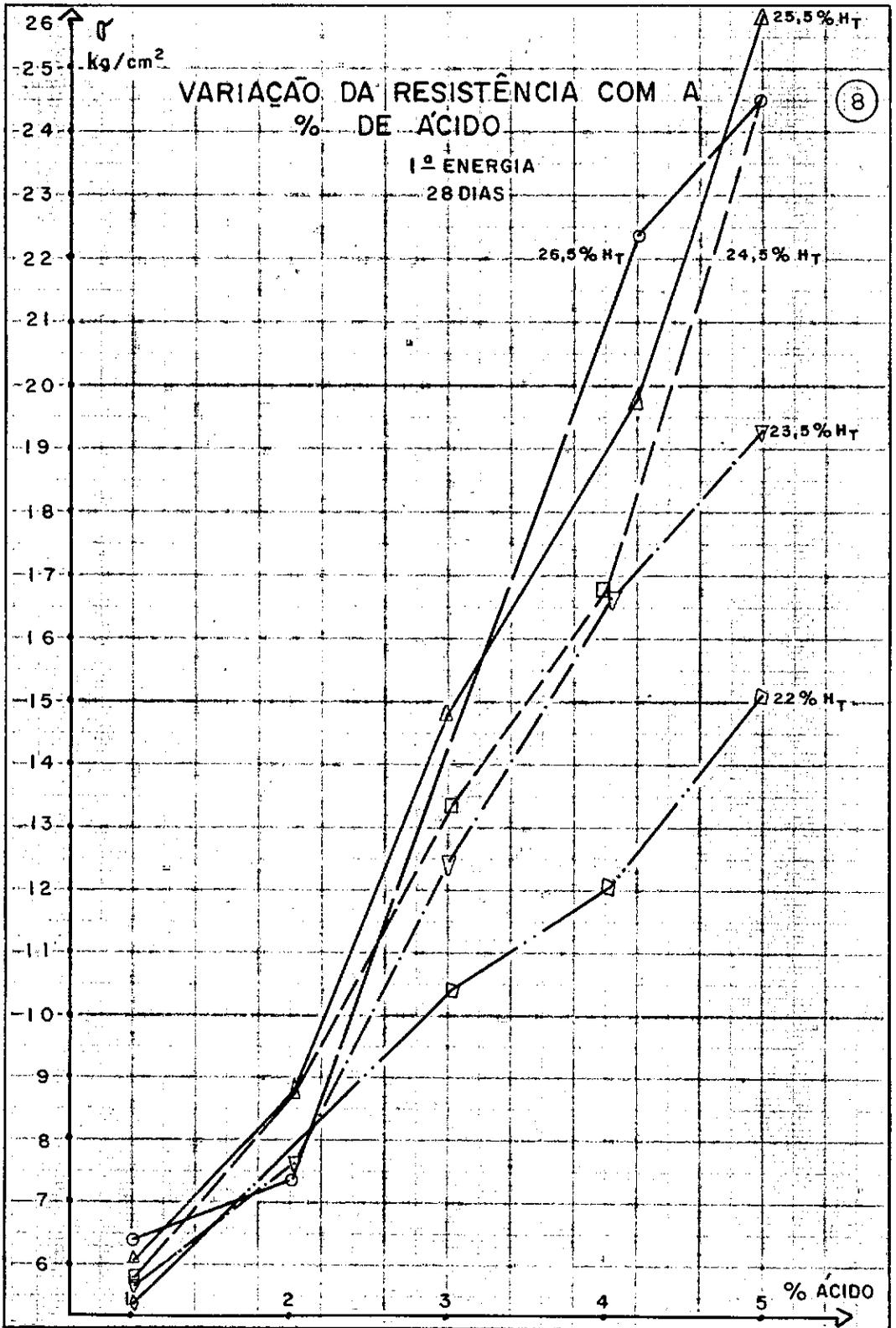
26

27

h%

(MOLDAGEM)





VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM O TEMPO DE CURA

3% DE ÁCIDO
1ª ENERGIA

σ
kg/cm²

15
14
13
12
11
10
9
8

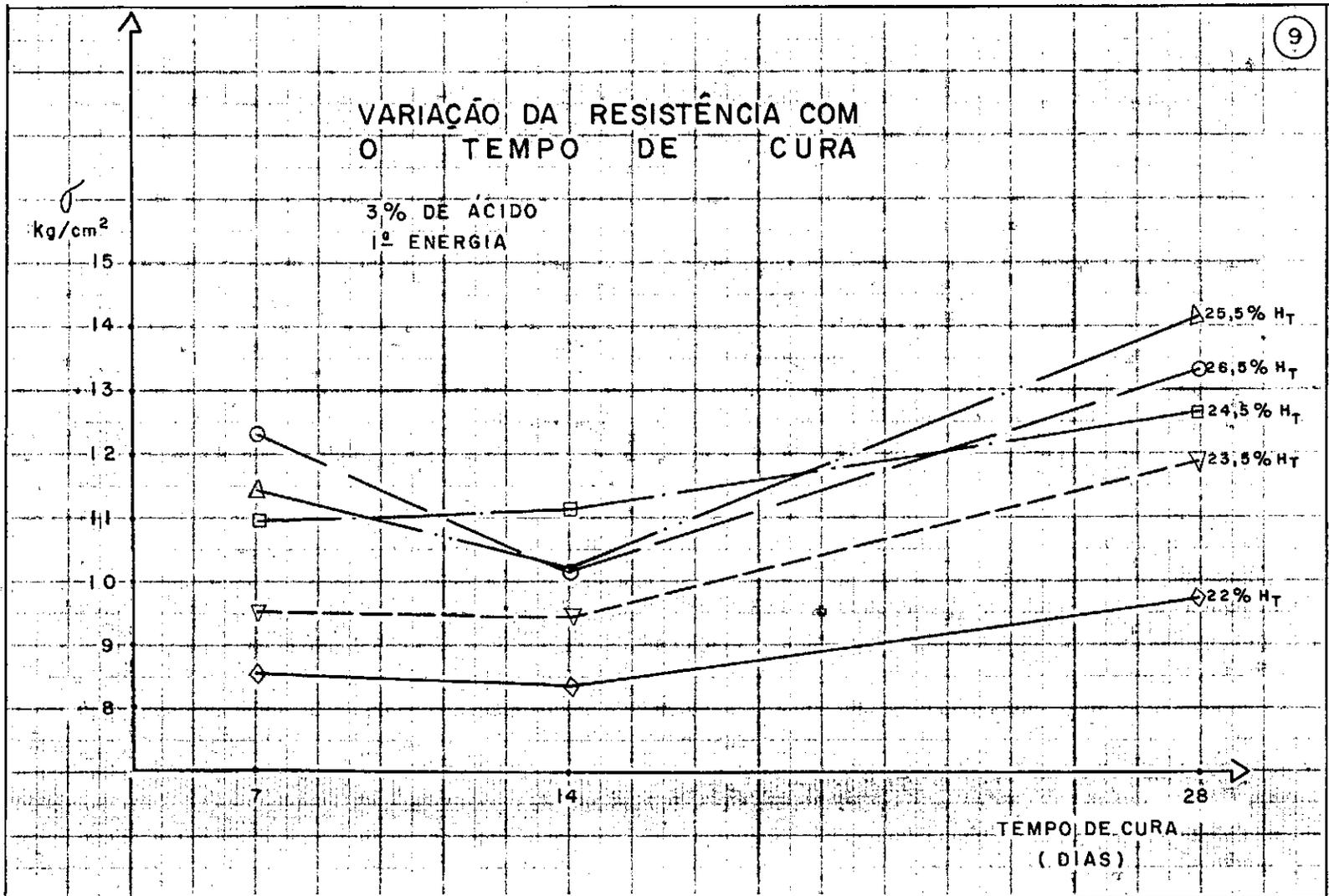
7

14

28

TEMPO DE CURA
(DIAS)

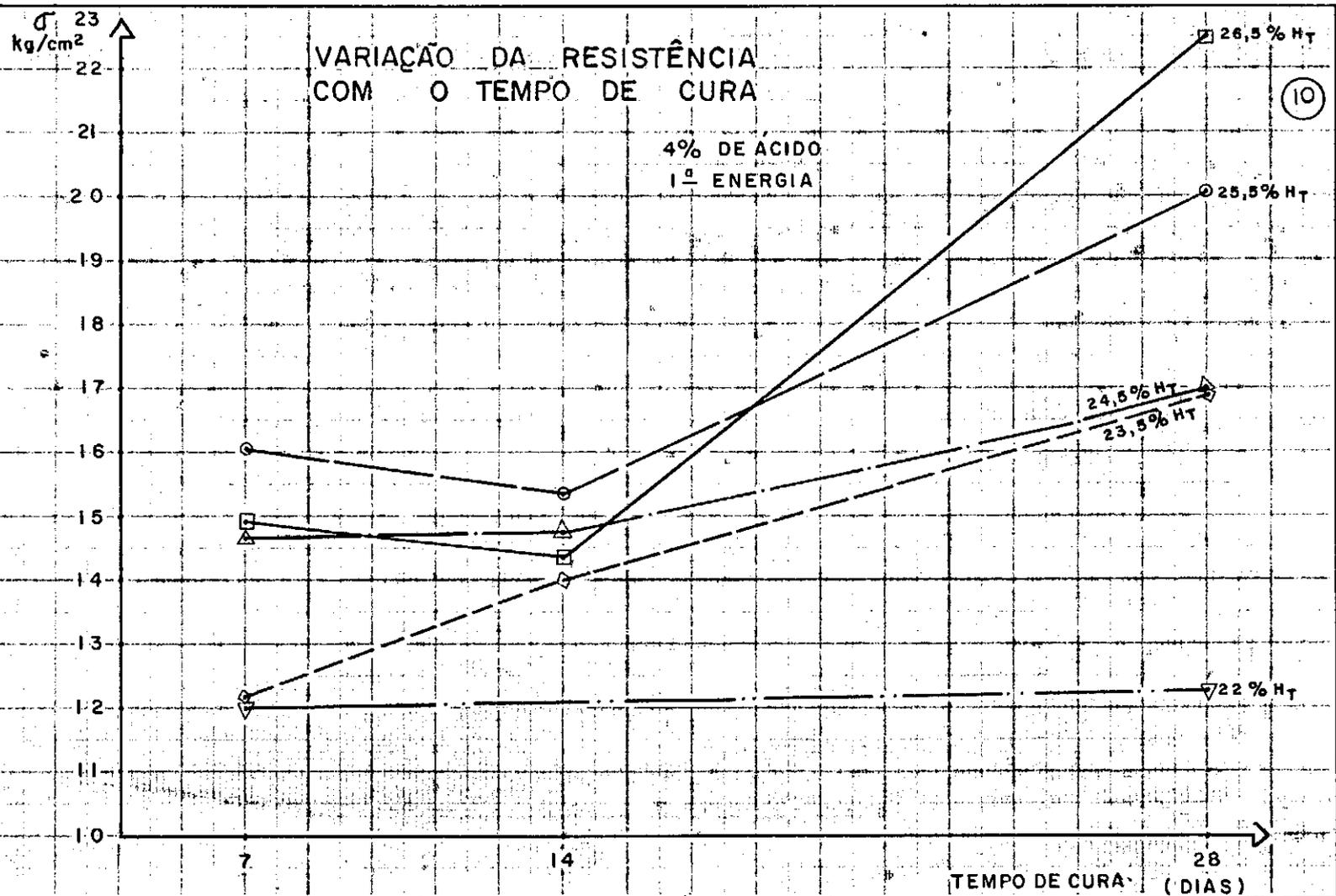
△ 25,5% H_T
○ 26,5% H_T
□ 24,5% H_T
▽ 23,5% H_T
◇ 22% H_T



VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM O TEMPO DE CURA

4% DE ÁCIDO
1ª ENERGIA

(10)



VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM TEMPO DE CURA

5% DE ACIDO
3^a ENERGIA

σ
kg/cm²

39
38
37
36
35
34
33
32
31

7

14

21

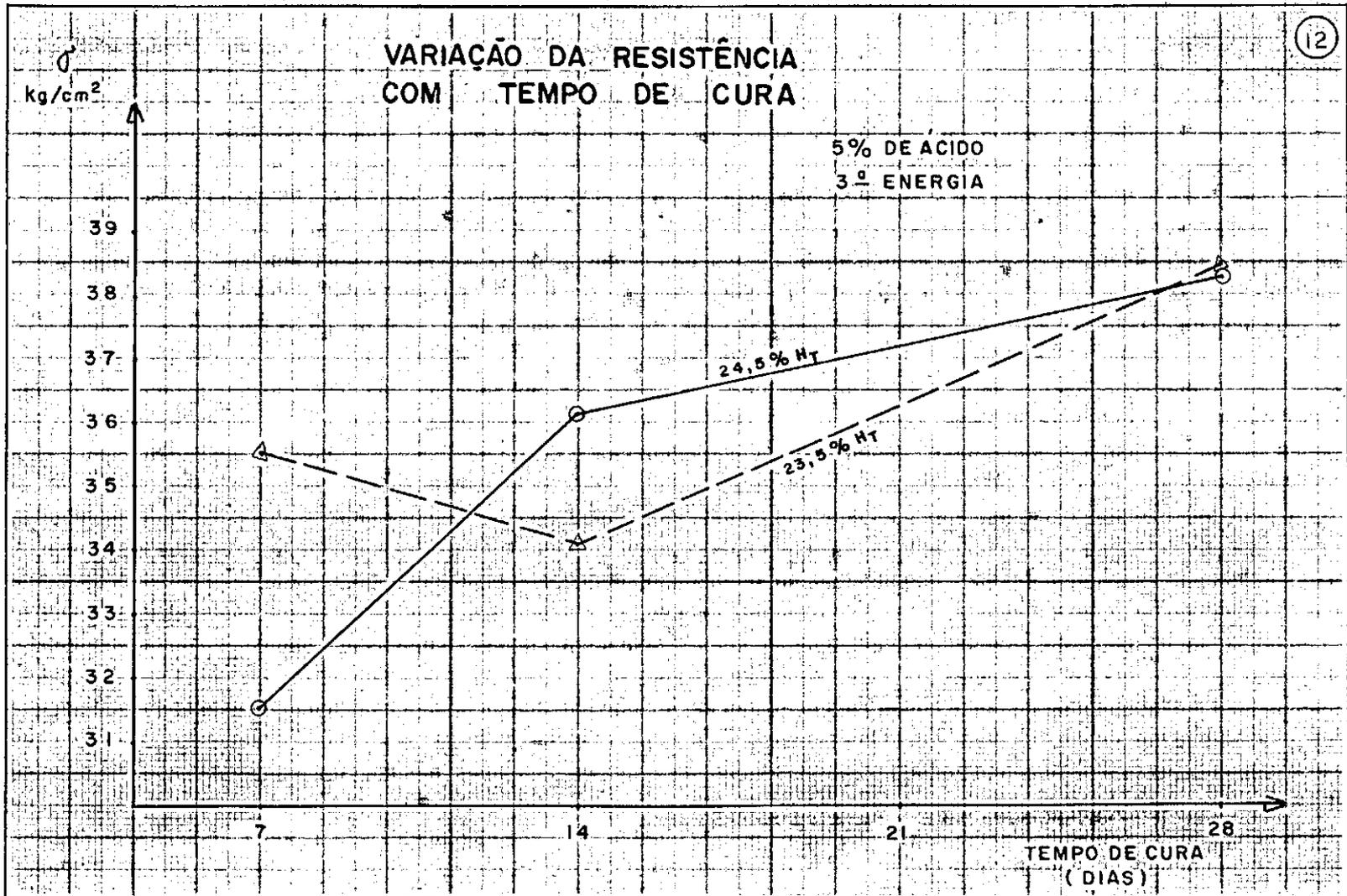
28

TEMPO DE CURA
(DIAS)

24,5% HT

23,5% HT

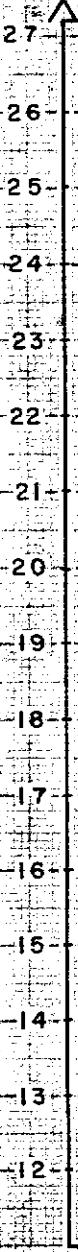
- 51 -



VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM O TEMPO DE CURA

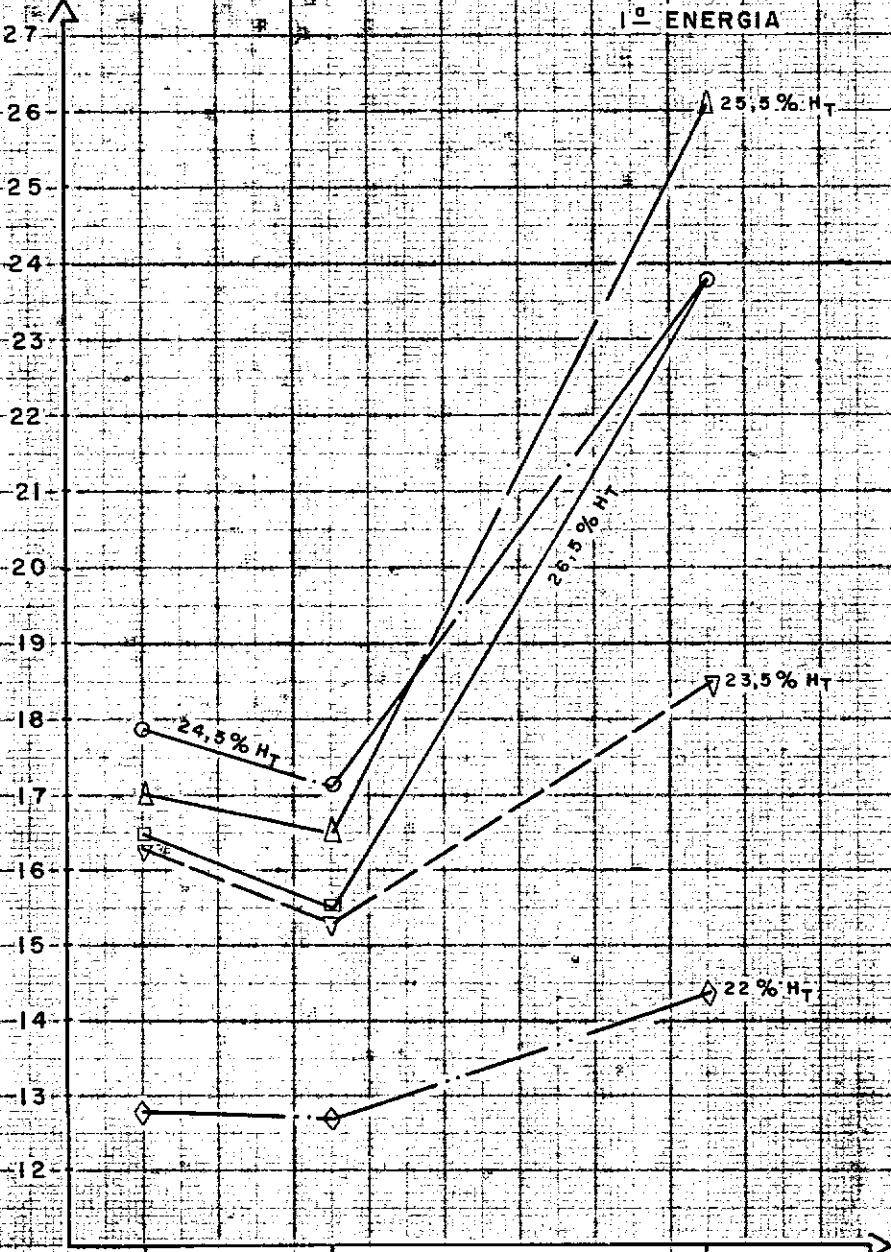
5% ACIDO
1ª ENERGIA

σ
kg/cm²



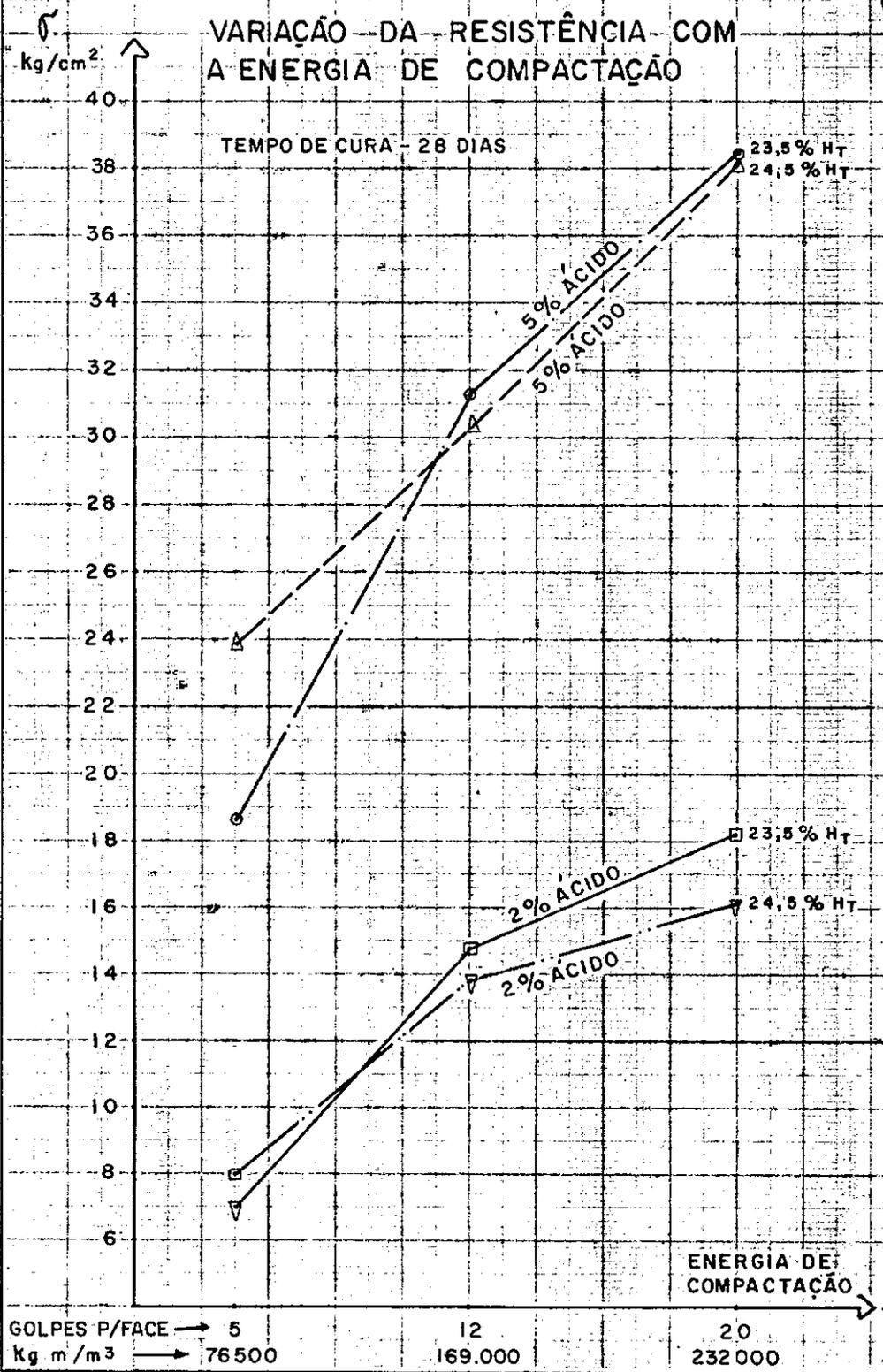
7 14 28

TEMPO DE CURA
(DIAS)

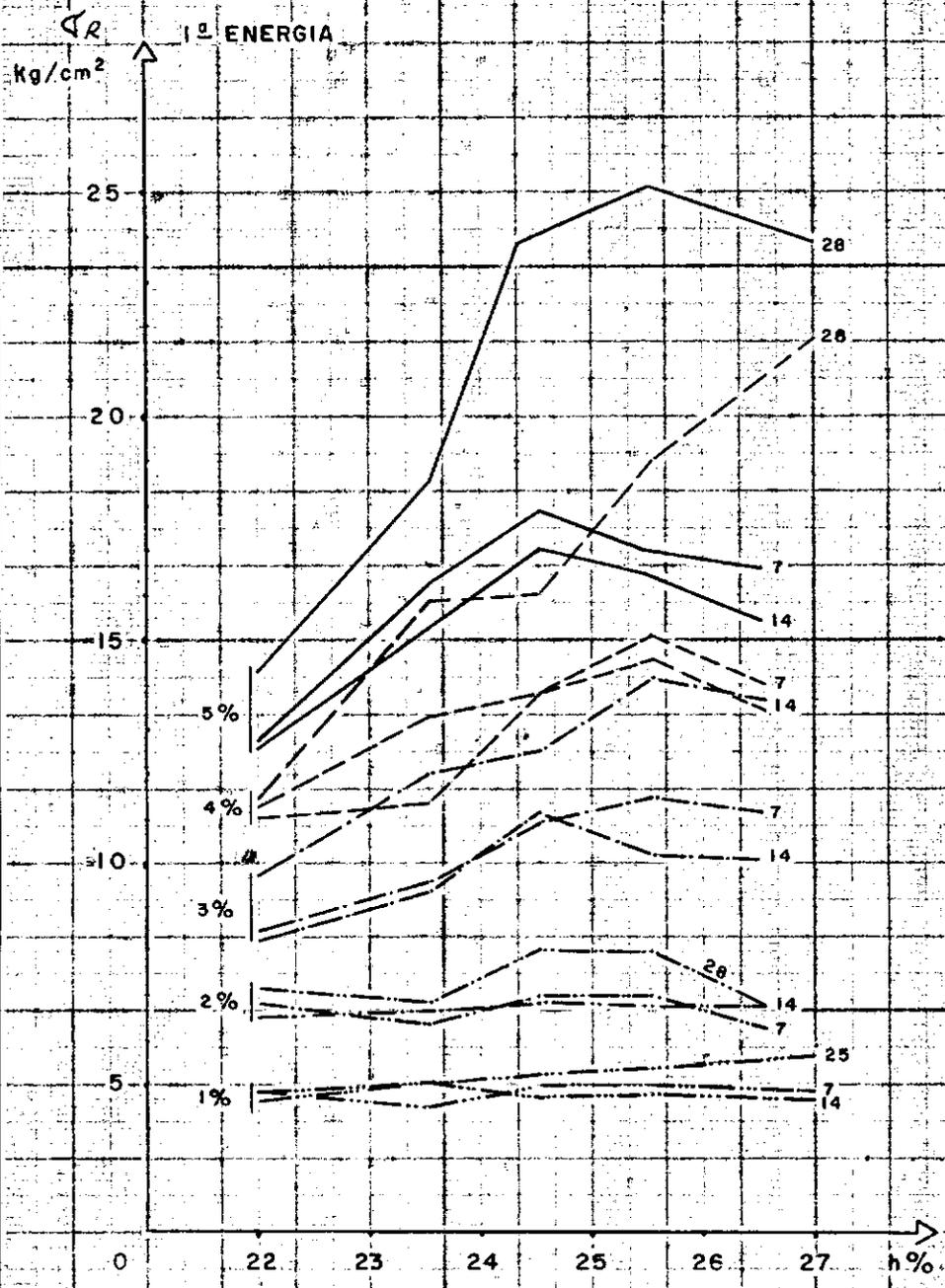


VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

TEMPO DE CURA - 28 DIAS

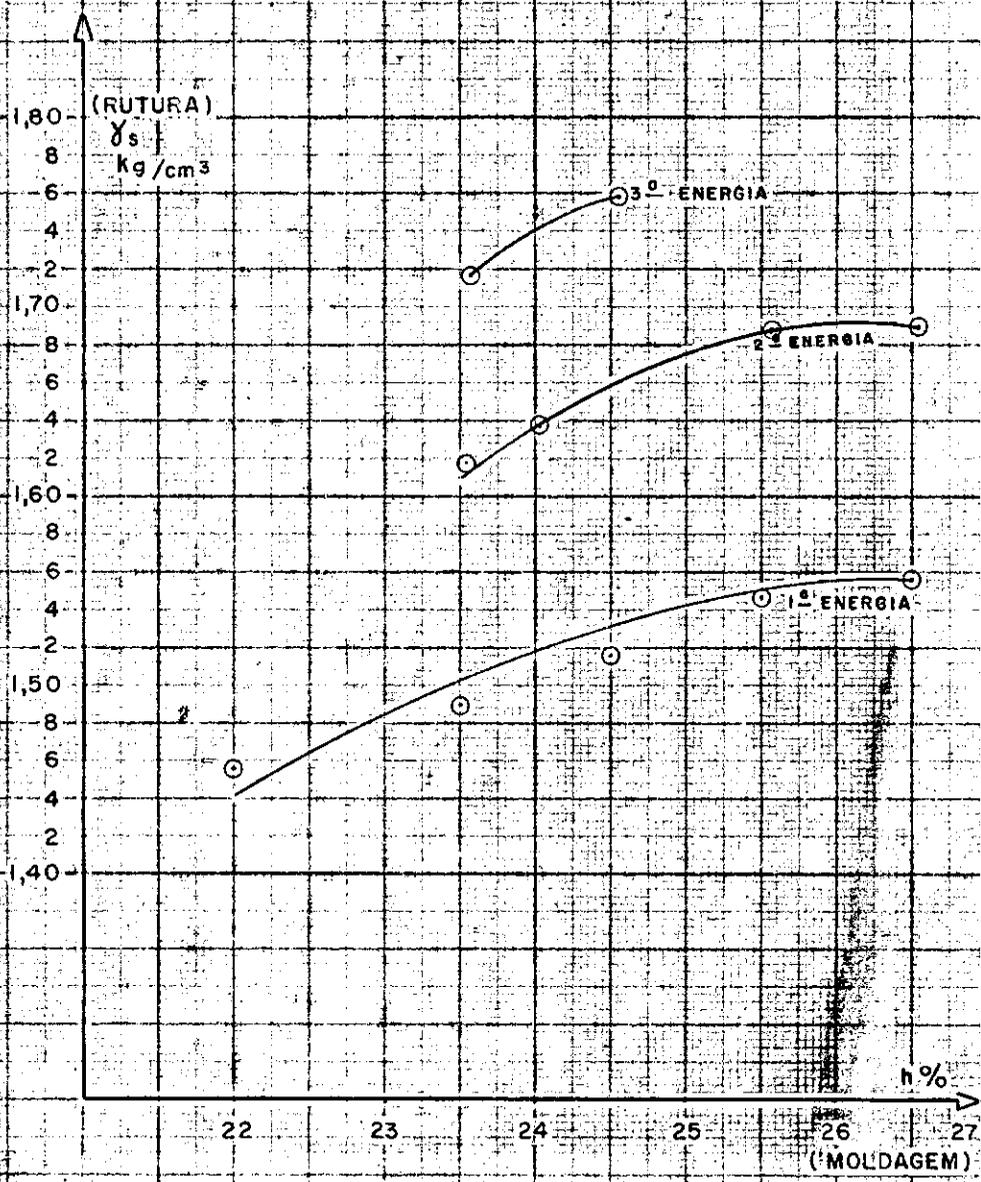


VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A % DE ÁCIDO FOSFÓRICO, UNIDADE DE MOLDAGEM E TEMPO DE CURA.



CURVAS DE COMPACTAÇÃO

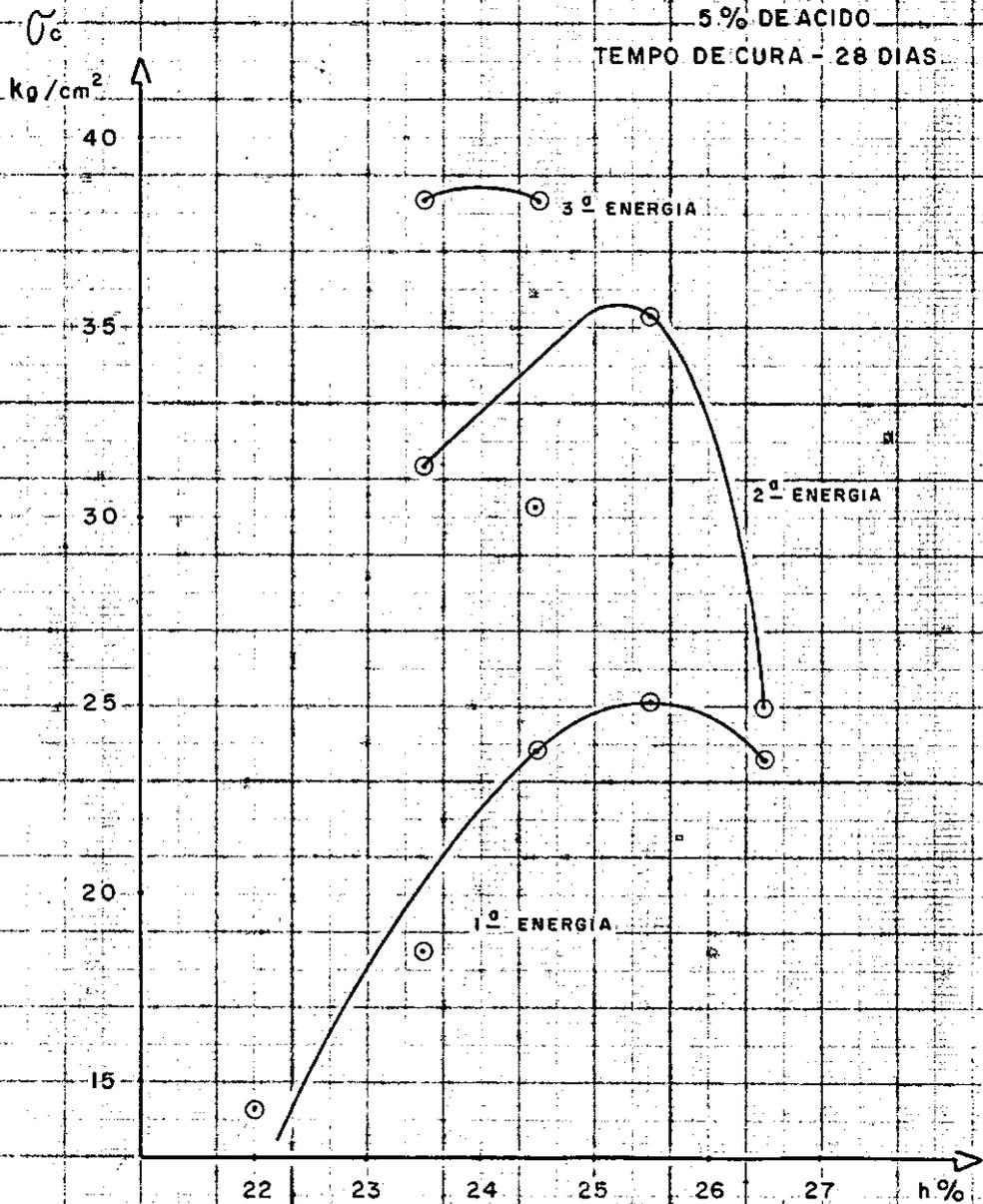
5% DE ÁCIDO
MÉDIA DE 9 CORPOS DE PROVA POR PONTO



VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM FUNÇÃO DA UNIDADE DE MOLDAGEM E ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

5% DE ACIDO

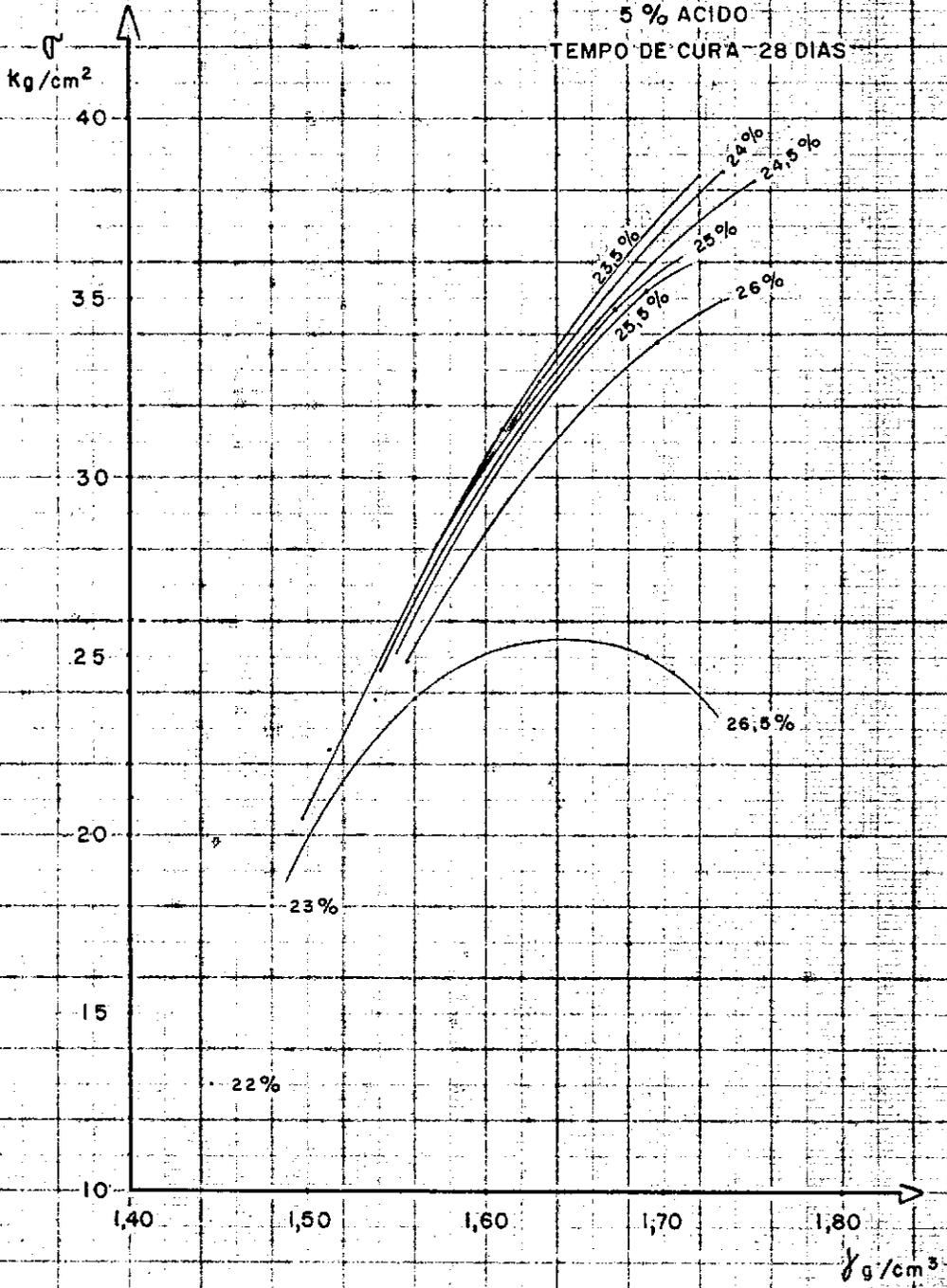
TEMPO DE CURA - 28 DIAS



VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A DENSIDADE E UNIDADE DE MOLDAGEM

5 % ACIDO

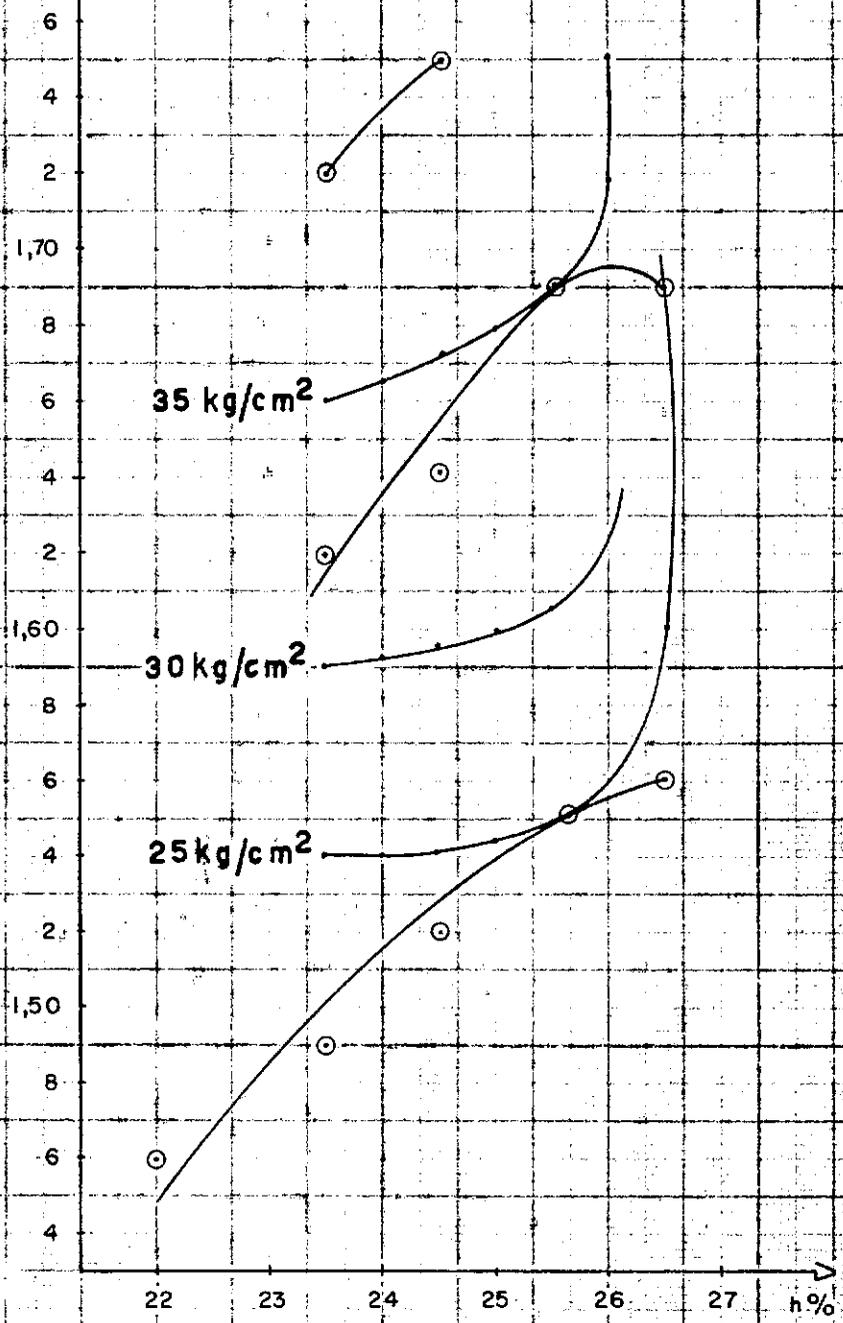
TEMPO DE CURA 28 DIAS



CURVAS DE ISO - RESISTÊNCIA

5% ÁCIDO
TEMPO DE CURA - 28 DIAS

γ_s
kg/cm²



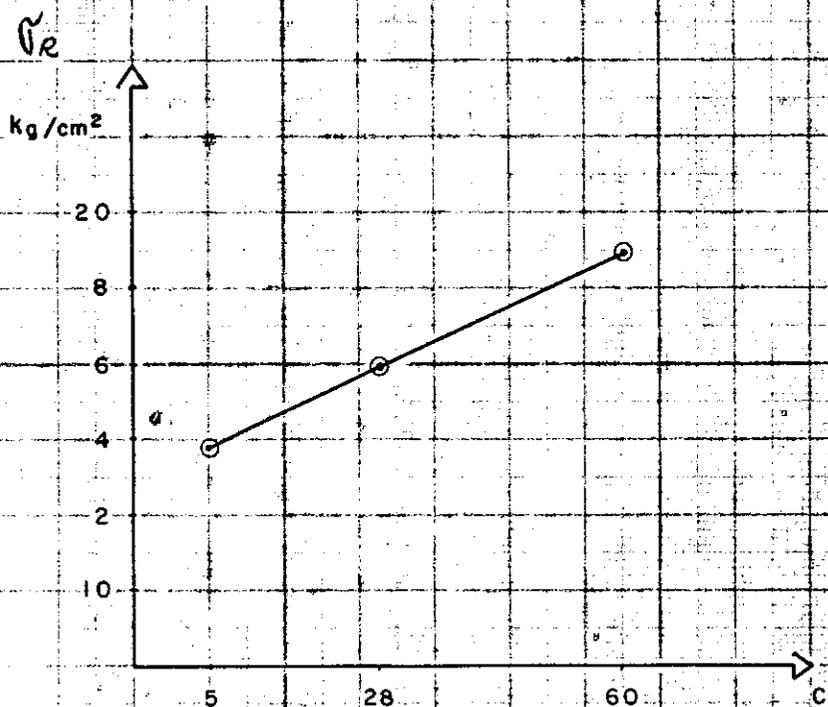
VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA

2% DE ACIDO

3ª ENERGIA

TEMPO DE CURA - 7 DIAS

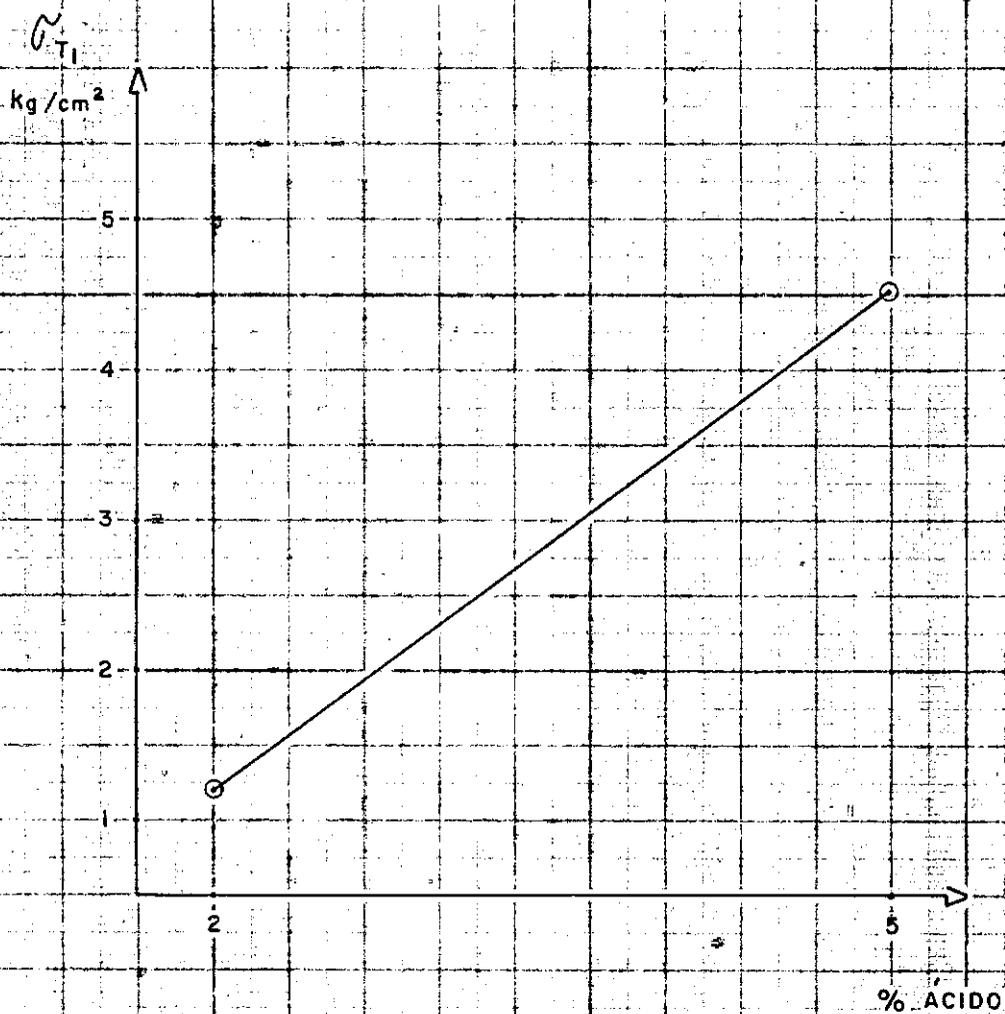
UMIDADE DE MOLDAGEM - 23,5%



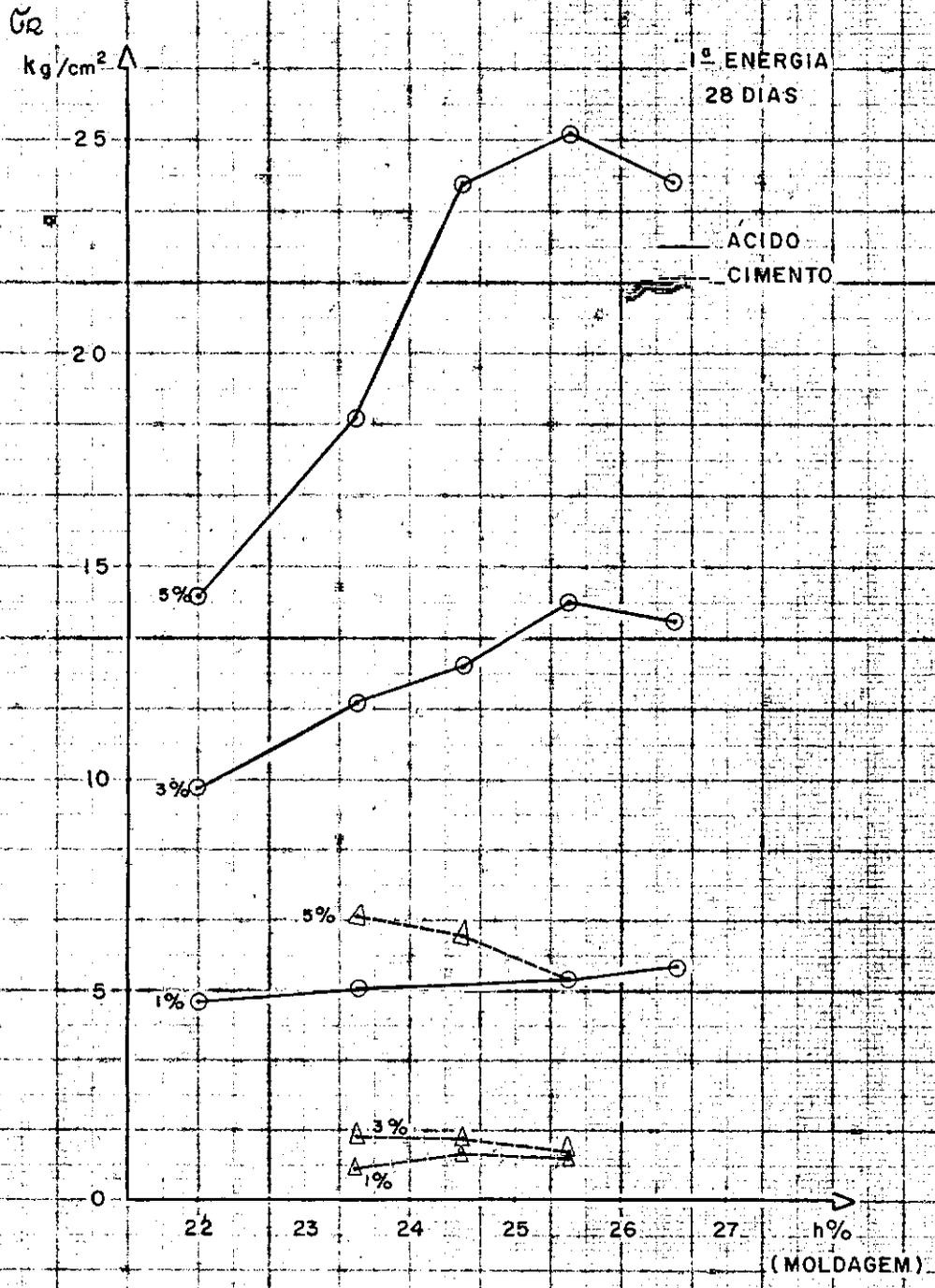
RESISTÊNCIA A TRACÃO

TEMPO DE CURA - 28 DIAS

UNIDADE DE MOLDAGEM - 23,5%



COMPARAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS CONSEGUI- DAS COM O USO DE CIMENTO PORTLAND E ÁCIDO FOSFÓRICO.



5 - DISCUSSÃO

Incluimos aqui, além da interpretação dos resultados experimentais, considerações sobre os métodos de ensaio, dado que pouca experiência existe no uso de aditivos químicos, principalmente entre nós.

5.1 - Determinação da Umidade de Moldagem

Ao serem iniciadas as moldagens, uma preocupação era a perda de umidade durante os processos de mistura e moldagem. Por isto, foi tomada como norma a retirada de amostras para a determinação da umidade após o preparo de uma série de corpos de prova.

Quando as primeiras amostras foram retiradas da estufa, foram pesadas e calculadas as umidades; verificou-se que a perda de peso era maior do que a quantidade de água que havia na mistura. Adotou-se, então, o procedimento de se pesar o material restante após as moldagens de uma série de corpos de prova, além de serem retiradas amostras para secagem em estufa.

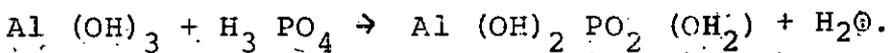
A média de perda total, água mais solo, foi inferior a 0,6%, incluindo-se nessa perda o material que ficara preso ao molde após a extração do corpo de prova, material perdido ao ser colocado na balança, perdido durante a moldagem, etc.

É evidente que a quantidade de solo perdido durante essas operações é muito maior que a de água. Entretanto, embora fossem tomados cuidados especiais para evitar a perda d'água, esta sempre existiu e, como era difícil sua determinação, consideramos a metade das perdas como sendo de água.

As perdas na estufa logo fizeram com que se pensasse na formação de compostos gasosos a temperaturas inferiores à da estufa, que era da ordem de 105° C, sendo provavelmente água.

Buscando uma explicação, encontramos no trabalho de Michaels, Williams e Randolph, do Massachusetts Institute of Technology (13), a observação do mesmo fenômeno. Neste trabalho, os autores explicam que o volátil em questão é, certamente, a água formada pela reação do ácido fosfórico com a alumina.

É a seguinte a reação:



Os resultados obtidos das amostras secas em estufa foram um tanto dispersos, entretanto, tiradas as médias e abandonados os resultados que se afastassem mais de 20% destas, ficou clara uma certa proporcionalidade entre a formação de água e as percentagens de ácido.

5.2 - Determinação dos pesos específicos aparentes secos dos corpos de prova no momento da ruptura.

Para o cálculo da densidade dos corpos de prova no momento da ruptura, não bastava considerar a quantidade de água usada para a moldagem, era necessário considerar, também, a água que se formava em consequência das reações químicas.

Embora o resultado das medições de formação de água apresentassem a já citada dispersão, tomando-se as médias arredondadas, chegou-se aos seguintes resultados:

Ácido (%)	Formação de água (%)
1	0,1
2	0,2

3	0,3
4	0,5
5	0,7

Calcularam-se as vinte e cinco diferentes percentagens de água no momento da moldagem, às quais foi acrescentada a respectiva percentagem oriunda das reações e subtraídos 0,3% correspondentes à perda de umidade durante a moldagem. Resultou a seguinte tabela:

QUANTIDADE DE ÁCIDO (%)	QUANTIDADE TOTAL DE FLUÍDOS (%)	QUANTIDADE DE ÁGUA NA RUTURA (%)
1	22,0	21,2
1	23,5	22,7
1	24,5	23,7
1	25,5	24,7
1	27,0	26,2
2	22,0	20,8
2	23,5	22,3
2	24,5	23,3
2	25,5	24,3
2	26,5	25,3
3	22,0	20,2
3	23,5	21,7
3	24,5	22,7
3	25,5	23,7
3	26,5	24,7
4	22,0	19,8
4	23,5	21,3
4	24,5	22,3
4	25,5	23,3
4	26,5	24,3
5	22,0	19,4

QUANTIDADE DE ÁCIDO (%)	QUANTIDADE TOTAL DE FLUÍDOS (%)	QUANTIDADE DE ÁGUA NA RUTURA (%)
5	23,5	20,9
5	24,5	21,9
5	25,5	22,9
5	26,5	23,9

Como tínhamos o pêso úmido de cada corpo de prova e o respectivo volume, medidos imediatamente após a moldagem, com o critério acima calculamos os pêsos específicos aparentes sêcos no momento da rutura.

5.3 - Influência do Ácido Fosfórico no Pêso Específico Aparente Sêco da Mistura.

Verificou-se uma enorme diferença entre a curva de compactação padrão, em cuja determinação usou-se somente água destilada, e as curvas referentes às moldagens com ácido, para cuja construção usaram-se os pêsos específicos aparentes sêcos no momento da rutura.

Enquanto sem adição de ácido temos uma curva de compactação bem definida (gráfico nº 2), com a adição de ácido temos somente um dos ramos da curva, não ficando, ao menos, definida uma unidade ótima para cada percentagem de ácido (gráficos nºs. 3,4,5,6 e 7).

Nota-se também que os pêsos específicos aparentes sêcos diminuíram, trazendo a curva para baixo.

A diminuição da densidade de um modo geral, deve-se ao fato de a reação ter início assim que se adiciona o ácido fosfórico, inclusive com despreendimento de calor, sensível através das luvas de borracha que usávamos. À medida

que os minutos se passavam, a compactação dos corpos de prova, provenientes de uma mesma mistura, tornava-se cada vez mais difícil, o que acarretava uma diminuição da quantidade de material colocado no molde, para se obter a altura desejada após compactação. Estes fenômenos ocasionou a perda de inúmeros corpos de prova a que já nos referimos.

O fato de o ácido fosfórico ter densidade bem maior que a da água ($\gamma = 1,68 \text{ g/cm}^3$), fez com que tivéssemos de optar entre manter o mesmo peso de solução que o correspondente de água, em relação ao solo seco, ou manter o mesmo volume de solução, que seria o que usaríamos se estivéssemos moldando com água somente.

Evidentemente, embora tenha sido adotado o critério mais favorável, a quantidade de água diminuiu à medida que foi crescendo a percentagem de ácido em relação ao solo seco, bem como variou a molaridade da solução, quando variaram as umidades de moldagem, mantidas as percentagens de ácido.

As características de compactação, dadas à mistura pelas soluções usadas, são bastante diferentes das que se apresentam com o uso da água destilada, e nos restringiram ao ramo seco da curva de compactação.

Não foi possível um estudo a maiores umidades de moldagem pois, além das estudadas, os corpos de prova racharam completamente durante a compactação, não podendo ser aproveitados. Para posteriores estudos, é aconselhável o uso de um equipamento de compactação estática.

Comparando-se os gráficos n^{os}. 3,4,5,6 e 7, nota-se a coincidência aproximada das curvas ($\gamma \text{ s } \times \text{ h}$) para diferentes percentagens de ácido, ou seja: a densidade quase que independe da percentagem de ácido, variando somente com a umidade de moldagem. Isto se deve, provavelmente, ao fato de que ao se aumentar a quantidade de ácido, pioravam as condições de com -

pactação, o que nos deveria dar densidade menores no momento da rutura, porém, quando a quantidade de ácido aumentava, - aumentava também a quantidade de sólidos formada na reação. Estes fenômenos praticamente se compensam, segundo os resultados encontrados.

5.4 - Análise da Influência da Percentagem de Ácido sobre a Resistência.

Antes do início da rutura dos corpos de prova moldados com ácido fosfórico, foi moldada uma série com somente água destilada, para servir de ponto de referência. Todos os corpos de prova dessa série se desmancharam quando em imersão, exceto um, moldado com 23,5% de umidade, e que, levado à prensa, rompeu com 2 kg/cm^2 .

Tal fato não se repetiu com a adição de ácido fosfórico, mesmo em pequenas quantidades.

O gráfico nº 8 indica que a resistência é diretamente proporcional à percentagem de ácido, qualquer que seja a umidade de moldagem, pelo menos para as percentagens estudadas.

Lyons e Mc Evan (9) também notaram em seus estudos a variação linear da resistência da Keyport Clay Loam, A-7-6, com relação à variação da percentagem de ácido fosfórico até 5%. A partir dos 5%, a influência da percentagem de ácido vai gradativamente diminuindo até que, acima de 10%, o material torna-se insensível à quantidade de ácido usado. As amostras neste caso foram curadas durante 30 dias, embrulhadas, curadas à temperatura ambiente, e imersas em água durante 2 dias.

Não nos preocupamos, no presente estudo, com percentagens de ácido acima de 5%, por razões de ordem prática.

Dentro do limite de 5%, o acréscimo é prática-

mente linear, porém, varia com as umidades de moldagem, sendo menor para as umidades mais baixas, aumentando para maiores - umidades, até um ponto ótimo, e caindo novamente para umida - des elevadas de moldagem, conforme demonstram os gráficos nºs 8,9,10 e 11.

5.5 - Influência do Tempo de Cura sôbre a Resistência.

Outro fator importante é o tempo de cura, sendo que tôda a bibliografia consultada nos fazia esperar um aumen to da resistência em função do tempo, mantidas constantes as demais condições, o que não se deu. Obtivemos, conforme os gráficos nºs. 9,10 e 11, sensíveis aumentos de resistência a 7 dias (6 dias de cura em câmara úmida, mais um dia em imersão), tanto mais notáveis quanto maiores as percentagens de ácido e energias de compactação, havendo variação, dentro de limites, com as umidades de moldagem. A 14 dias (13 dias de cura em câmara úmida, mais 1 dia em imersão), ao contrário do que era esperado, não houve acréscimo de resistência, chegando a haver ligeiros decréscimos.

Um exame mais ácurado demonstrou que sempre que houve um ligeiro decréscimo na resistência, de um modo geral também houve na densidade: Parece-nos evidente, então, que não há acréscimo de resistência de 7 para 14 dias.

Hemwall (5), citando Haseman, diz que a reação do ácido fosfórico se dá em duas fases distintas, sendo a primeira uma reação rápida com o alumínio e o ferro disponíveis, e a segunda, lenta,, com o alumínio e o ferro provenientes da decomposição do mineral argílico. O segundo tipo de reação se processa durante longos períodos.

Aos 28 dias (27 de cura em câmara úmida, mais 1 dia em imersão), as resistências aumentaram consideravelmente, mostrando que a reação rápida que teve início ao ser adi-

cionado o ácido fosfórico ao solo, com sensível despreendimento de calor, terminou antes dos 7 dias, e que os efeitos da reação lenta somente começaram a se manifestar depois dos 14 dias.

Nota-se, aqui, efeito semelhante ao mostrado pelo gráfico nº 8: o crescimento da resistência com o tempo de cura varia com a diluição da solução, mantidas as percentagens de ácido em relação ao solo seco.

A comparação dos gráficos nºs 9, 10 e 11 mostra que não só a resistência inicial aumentou com a percentagem de ácido, como também o crescimento da resistência é mais rápido quando essa percentagem aumenta. Os resultados obtidos com pequenas quantidades de ácido, em relação ao solo seco, mostraram que o crescimento da resistência com a idade é muito pequeno, ficando clara a insuficiência da quantidade de ácido usada, absorvida, total, ou quase totalmente, pela reação rápida.

Os resultados obtidos com maiores energias de compactação mostraram-se um tanto dispersos, entretanto, comparando-se os crescimentos da resistência em função do tempo, gráficos nºs. 9, 10, 11 e 12, vemos que são semelhantes, sendo mais importante a diferença de resistência a 7 dias, ou seja, correspondente à reação rápida.

5.6 - Efeito da Energia de Compactação sobre a Resistência.

Do gráfico nº 13 se depreende que a resistência aumenta de uma parcela ponderável quando se aumenta a energia de compactação, porém, a ação da compactação é menos efetiva que a da quantidade de ácido usada. Para se conseguir dobrar, ou pouco mais, a resistência com a compactação, foi necessário que se quadruplicasse a energia, enquanto que se conseguiu o mesmo efeito aumentando-se a quantidade de ácido aproximada-

mente à mesma relação do aumento de resistência;

A percentagem de ácido tem influência também sobre os efeitos da compactação na resistência, pois é visível que as curvas referentes ao emprêgo de 2% de ácido tendem a uma horizontalização muito mais rápida que as referentes a 5% de ácido. Isto nos faz concluir que poderemos tirar maior partido da compactação usando maiores percentagens de ácido - fosfórico.

5.7 - Influência da Umidade de Moldagem sobre a Resistência.

Nos trabalhos da bibliografia indicada verifica-se claramente, e é confirmado neste estudo, a existência de uma umidade de moldagem que nos dará a maior resistência e que poderá não coincidir com a umidade que nos conduz à maior densidade. Ao contrário, foram achadas, de um modo geral, as maiores resistências em corpos de prova moldados acima da umidade ótima. Assim, a prática corrente de se compactar corpos de prova à umidade ótima, previamente determinada, não é válida quando se quer estudar a estabilização com o ácido fosfórico.

O gráfico nº 14 mostra não só este efeito, a menos de alguma dispersão, como deixa claro o efeito das percentagens de ácido usados.

Torna patente também que o aumento do tempo de cura de 7 para 14 dias não influenciou a resistência.

Para um melhor estudo da resistência com as variáveis de compactação, foram construídos os gráficos nºs. 15 e 16, onde são vistas as variações do peso, específico aparente seco, em função da umidade de moldagem e da energia de compactação, bem como as variações da resistência em função dos mesmos parâmetros, respectivamente.

Estes dois últimos gráficos nos indicam que, em

bora não tenhamos chegado a uma unidade que nos desse a maior densidade na rutura, esta seria conseguida com unidades de moldagem bastante superiores à unidade ótima determinada com água destilada e, também, que a máxima resistência não corresponde nem à unidade ótima nem à maior densidade no momento da rutura.

Fácilmente pode-se construir o gráfico nº 17, a partir dos gráficos anteriores, à semelhança do indicado pelo "Corps of Engineers - U.S. Army" para determinação do CBR de projeto (1). Nêle verificamos que, como ocorre com o CBR, poderemos obter resistências maiores ou menores, com o material a uma mesma densidade, tão sômente variando-se a unidade de moldagem. Esta variação torna-se exagerada fora de certos limites de umidade.

Curvas de iso-resistência, traçadas sôbre a família de curvas de compactação, gráfico nº 18, evidenciam que a certas umidades mais elevadas é inútil um aumento da energia de compactação, pois não conseguiremos aumento da resistência com o aumento do pêsso específico do material sêco.

Em nosso caso, como as curvas de iso-resistência tornam-se verticais, apenas há um limite para cada unidade de compactação, acima do qual seria inútil aumentar-se a energia. J.R. Bell, referido por Seed e Chan (17), verificou que as curvas de iso-resistência de uma argila muito plástica eram fechadas, o que significa que mantida uma certa unidade de compactação e aumentando-se a densidade gradativamente, passa-se por um máximo de resistência, a partir do qual o aumento da energia de compactação diminui a resistência. É possível que tendência semelhante venha a se manifestar com alguns materiais, estabilizados com ácido fosfórico pois, em nosso caso, estamos exatamente no limite.

5.8 - Influência da Temperatura de Cura sôbre a Resistência

A temperatura de cura também tem uma ponderável influência sôbre a resistência pois, a um aumento daquela, corresponde um aumento rápido desta. O efeito da temperatura foi estudado para uma única mistura que mostrou ser a variação da resistência proporcional à temperatura. O gráfico nº 19 ilustra a variação linear.

Foram rompidos também corpos de prova a idades de 7 e 14 dias, curados a 5°C, dando-se o mesmo fenômeno verificado quando a cura foi feita à temperatura ambiente, ou seja: a resistência a 14 dias foi ligeiramente inferior à encontrada a 7 dias, havendo, inclusive, pequena redução no pêso específico aparente sêco do material.

Em consequência, embora não tenham sido rompidos corpos de prova a idades inferiores a 7 dias, se considerarmos que foram as mesmas as resistências a 7 e 14 dias, apesar do efeito retardador das baixas temperaturas acima demonstrado; podemos, por via indireta, concluir que a reação rápida termina sensivelmente antes dos 7 dias, à temperatura ambiente.

As resistências encontradas com a ruptura dos corpos de prova curados a 5°C foram cêrca de 20% menores que as correspondentes aos curados à temperatura ambiente.

Isto se deu em ambas as idades, ou seja, com as reações rápidas já terminadas. Como sômente uma mistura foi testada, apenas registramos o ocorrido.

5.9 - Resistência à Tração

Para que se tivesse uma idéia do comportamento do solo no que diz respeito à resistência a tração, foram moldados corpos de prova com 2% e 5% de ácido, a 23,5% de umidade, terceira energia, cujos resultados são mostrados no gráfico nº 20. Vê-se que a quantidade de ácido tem influência capital.

5.10 - Resistência à Compressão Simples de Corpos de Prova Moldados com Cimento Portland

A fim de tornar mais palpáveis os resultados obtidos pela estabilização com ácido fosfóricos e melhor caracterizar o solo escolhido, foram moldados vários corpos de prova com cimento Portland, por ser este um estabilizador clássico. O cimento usado foi o Mauá, sobejamento conhecido e considerado como sendo de ótima qualidade.

Foram moldados corpos de prova com 1%, 3% e 5% de cimento, em relação ao solo seco, e a umidade de 23,5%; 24,5% e 25,5%, em relação à mistura seca.

Os resultados colocados sobre o papel formam o gráfico nº 21 cuja análise mostra um comportamento bastante melhor dos corpos de prova estabilizados com o ácido.

5.11 - Observações Adicionais

5.11.1 - Como observação adicional, alguns corpos de prova tratados por ácido fosfórico, curados sem cuidados especiais e, a seguir, deixados ao ar por tempo não controlado, foram submetidos à compressão simples sem prévia imersão em água, e apresentaram resistências muito altas, mostrando que a umidade tem efeito ponderável sobre o material estabilizado, sendo significativas para fins práticos, somente as resistências determinadas com corpos de prova que contenham elevado teor de umidade no momento da ruptura.

5.11.2 - Quando foram rompidos os primeiros corpos de prova com 5% de ácido, terceira energia, foram registradas resistências bastante elevadas (49 kg/cm^2 para 23,5% de umidade de moldagem e $44,2 \text{ kg/cm}^2$ para 24,5% de umidade de moldagem). As resistências a 14 e 28 dias não confirmaram os resultados, o que causou a moldagem de novas séries. Estas séries não confirmaram os resultados iniciais.

5.11.3 - Todos os corpos de prova tiveram sua altura medida imediatamente após a moldagem e ao serem retirados da imersão. As alturas mantiveram-se absolutamente constantes.

5.11.4 - As deformações foram anotadas e, no momento da ruptura, variaram entre 2% para menores quantidades de ácido e primeira energia, e 0,5% para maiores quantidades de ácido e terceira energia. As deformações foram também tanto maiores quanto maiores as umidades de moldagem.

6 - CONCLUSÕES

O ácido fosfórico é um aditivo químico que produz efeitos marcantes na estabilização do solo laterítico estudado, oriundo da decomposição do diabásio, conhecido como "terra roxa legítima" e que possui cêrca de 20% de Fe_2O_3 livre. Sua ação é de tal magnitude que a adição a esta "terra roxa", transforma-a de um material inadequado para fins de pavimentação, em um material que poderá constituir até mesmo a camada de base de um pavimento.

Os resultados dos ensaios, anteriormente discutidos, nos permitem as seguintes conclusões:

- a) A umidade de moldagem não pode ser determinado pelo método convencional de secagem de uma amostra em estufa, em virtude de as reações químicas entre as argilas e o ácido fosfórico produzirem água, entre outros compostos. Por ocasião da rutura, para determinação do pêsco específico aparente sêco do material estabilizado, acrescentou-se à água usada na moldagem, a quantidade de água oriunda das reações químicas e subtraiu-se a perda por evaporação, desde a mistura, até o término da moldagem.
- b) A formação de água é, pelo menos dentro de certos limites, proporcional à quantidade de ácido usado.
- c) A percentagem de ácido fosfórico usada praticamente não influenciou no pêsco específico aparente sêco da mistura, por ocasião da rutura. Isto se explica por ter sido compensado o aumento da dificuldade de compactação, causado pelas crescentes quantidades de ácido usadas, pêsco respectivos acréscimos de matéria sôlida formada.

- d) O aumento da resistência à compressão simples foi diretamente proporcional à percentagem de ácido usada, em relação ao solo seco, até o limite de 5% deste estudo.
- e) Os efeitos da reação rápida se manifestaram antes de 7 dias de cura e os da reação lenta somente após 15 dias, não havendo qualquer aumento da resistência neste inter-regno. Verificou-se que, após 15 dias de cura, quanto maior a percentagem de ácido usada, mais rápido foi o crescimento da resistência.
- f) A energia de compactação tem influência ponderável sobre a resistência, tendendo, porém, a um limite acima do qual de nada adiantará o aumento de energia. Até onde se pôde verificar (5% de ácido), quanto maior a percentagem de ácido, maior a efetividade da energia de compactação empregada.
- g) A umidade de moldagem influencia a resistência, havendo um ótimo que pode não coincidir nem com a umidade ótima do material sem aditivo, nem com a umidade que leva a mistura à maior densidade (a umidade "ótima" da mistura).
- h) O pequeno estudo, feito para verificar a influência da temperatura, mostrou que a resistência é uma função linear da temperatura, mantidos constantes as demais condições.
- i) A influência da percentagem de ácido sobre a resistência à tração mostrou ser bastante grande, embora tenham sido rompidos somente uns poucos corpos de prova.
- j) Dentro das condições estudadas (percentagem de aditivo até 5%), o solo estabilizado pelo ácido fosfórico apresentou resistências muito maiores que as conseguidas com cimento Portland.

- l) A unidade em que o solo estabilizado com ácido fosfórico se encontra no momento da rutura tem efeito muito grande sobre a resistência.
- m) A adequação teórica do uso do ácido fosfórico à estabilização dos solos lateríticos foi demonstrada praticamente, em laboratório, quando se conseguiu que uma "terra roxa legítima", que apresentava resistência nula quando imersa em água por 24 horas, chegasse a apresentar até mesmo 49 kg/cm^2 (média de três corpos de prova), nas condições expostas na metodologia seguida nestes estudos.

Embora um maior número de solos deva vir a ser estudado, julgamos ter dado um passo a frente da simples afirmação de que este é um processo promissor para a estabilização de solos finos, considerando os resultados alcançados com sua aplicação a um solo laterítico.

A P Ê N D I C E I

Aqui fazemos uma descrição detalhada do equipamento por nós usado, a fim de permitir que trabalhos posteriores, que por ventura venham a ser feitos, possam ter seus resultados comparados com o dêste estudo.

Básicamente o equipamento é o mesmo desenvolvido pelo Iowa State University Engineering Experiment Station Soil Research Laboratory (4), introduzido entre nós pelo Eng^o Carlos de Souza Pinto (18), do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, cujas palavras e figuras praticamente transcrevemos, a menos de algumas especificações por nós alteradas ou acrescentadas em virtude dos materiais que estudamos, razões de ordem prática ou custo.

O equipamento é o mostrado pelas figuras 1, e 2, podendo ser dividido em cinco partes principais, com as respectivas finalidades:

1) Cilindro e colar:

O cilindro tem 50 mm de diâmetro interno e 120 mm de altura e o colar, 50 mm de diâmetro interno, na parte inferior, com um alargamento na parte superior, sendo sua altura de 60 mm. Êste conjunto foi feito em aço inoxidável 18/8, em virtude de ficar em contato com o ácido fosfórico.

2) Base de moldagem:

A base de moldagem possui um pistão que se introduz no cilindro e apoio para a haste de um soquete, a

fim de que esta seja mantida na vertical. O pistão foi feito em aço inoxidável 18/8 por ficar em contato com o ácido fosfórico.

3) Soquete:

O soquete é composto por uma haste que guia a queda de um pêso de 2 250 g sobre um pistão fixado à extremidade desta.

O pistão, introduzido no cilindro, transmite uniformemente o esforço produzido pela queda do pêso a toda a superfície superior do corpo de prova. Também este pistão é de aço inoxidável 18/8, por ficar em contato com o ácido fosfórico.

O pêso foi feito em latão por ser mais fácil de usinar que o aço inoxidável e para evitar que enferrujasse em função do constante contato com as mãos do operador.

4) Suporte temporário:

Consiste em uma peça cuja função é apoiar o cilindro, enquanto o material estiver totalmente solto. Tem 30 mm de altura e é retirado após o primeiro golpe do soquete, quando o cilindro ficará suspenso somente pela ação do atrito do material em suas paredes.

5) Extrator:

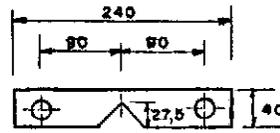
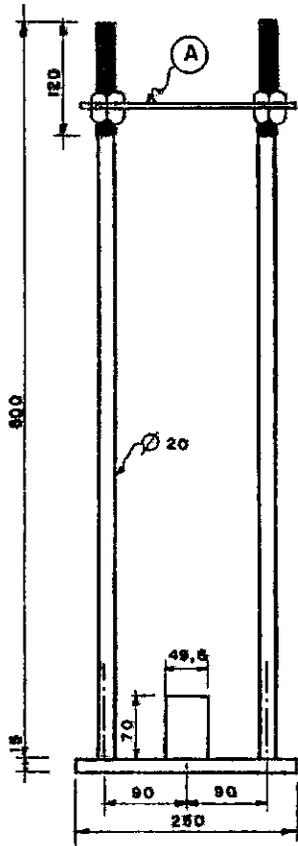
É constituído por um apoio para o cilindro e um macaco hidráulico.

Foi necessário o uso de um macaco com capacidade para 4 toneladas, em virtude de o curso máximo do êmbolo dos macacos de menor capacidade não ser suficiente.

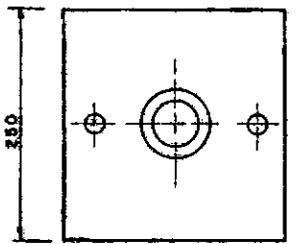
para a extração dos corpos de prova do cilindro. À extremidade do êmbolo do macaco foi adaptada uma peça com 49 mm de diâmetro, feita em aço inoxidável 18/8, pela mesma razão que os pistões e o cilindro.

O medidor de altura normal foi substituído por um paquímetro.

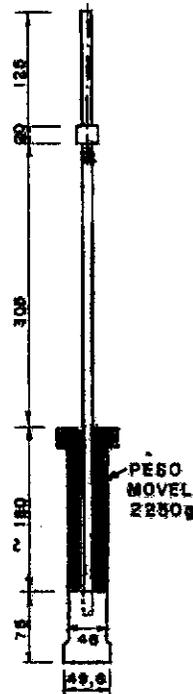
Todos os componentes do equipamento de compactação, exceto os que já especificamos, foram feitos em aço 1045 e receberam pintura ante-corrosiva, a exceção da haste do soquete, por ser mantida constantemente lubrificada.



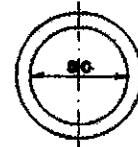
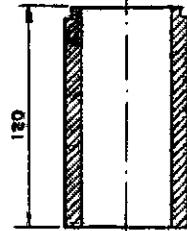
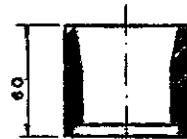
DETALHE DA PEÇA A



BASE DE MOLDAGEM
1:5



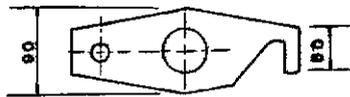
SOQUETE
1:5



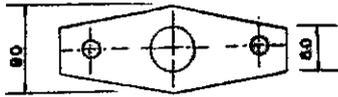
CILINDRO E COLAR 1:2,5

FIG 1 DETALHES DO EQUIPAMENTO REDUZIDO

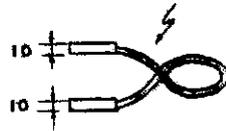
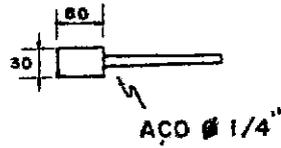
MEDIDAS EM MILÍMETROS



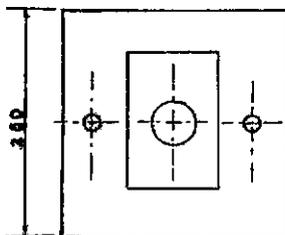
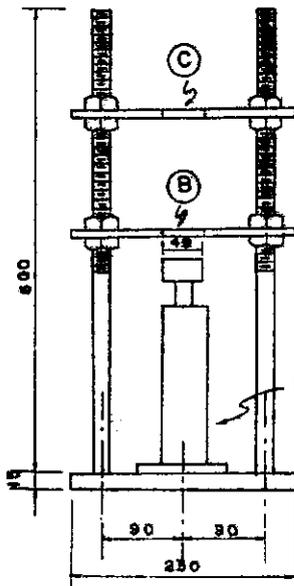
DETALHE DA PEÇA C



DETALHE DA PEÇA B



SUPORTE TEMPORÁRIO
1:5



EXTRATOR
1:5

FIG. 2 DETALHES DO EQUIPAMENTO REDUZIDO
MEDIDAS EM MILÍMETROS

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

- (1) Flexible Airfield Paviments, Corps of Engineers - U.S. - Army, EM 1110-45-302, Aug.1958.
- (2) Ensaio de Tração Indireta de Corpos Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, M.B-212, 1968.
- (3) GUINNEE, J.W. - Field Studies of Soil Stabilization with Phosphoric Acid, Highway Research Board, Bulletin 318, - Washington, D.C., 1962.
- (4) HARRISON HILT, G.; DAVIDSON, D.T. - lime Fixation in - Clayey Soils, Highway Research Board, Bulletin 262, - Washington, D.C. January, 1960.
- (5) HEMWALL, J.B., - The Fixation of Phosphorus by Soils, - Advances in Agronomy, vol. IX, 1957.
- (6) KELLEY, J.A.; KINTER, E.B. - Evaluation of Phosphoric Acid for Stabilization of Fine - grained Plastic Soils, Highway Research Board, Bulletin 318, Washington, D.C., 1962.
- (7) KENNEY, T.W.; HUDSON, W.R. - Application of the Indirect Tensile Test to Stabilized Materials, H.R. Record nº 235, 1968.
- (8) LAMBE, T.W. Soil Stabilization, Foundation Engineering, edited by LEONARDS, G., Mc.Graw - Hill, 1962.
- (9) LYONS, J.W.; Mc EWAN, G.J - Phosphoric Acid in Soil - Stabilization -I- Effect on Engineering Properties of Soils, Highway Research Board, Bulletin 318, Washington , D.C., 1962.

- (10) MEDINA, J. - As Lateritas e sua Aplicação na Pavimentação, Rio de Janeiro, 1961.
- (11) MEDINA, J. - Estabilização do Solo com Ácido Fosfórico, Notas de Aula, Coordenação dos Programas de Pós-graduação - em Engenharia, Universidade do Rio de Janeiro, junho de 1969.
- (12) Métodos de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, julho de 1964.
- (13) MICHAELS, A.S.; WILLIAMS, P.M.; RANDOLPH, K.B. - Ácidic - Phosphorus Compounds as Soil Stabilizers, Industrial and Engineering Chemistry, Vol 50, nº 6, June, 1958.
- (14) Moniz, A.C; Jackson, M.L. - Quantitative Mineralogical - Analysis of Brazilian Soils Derived From Basic Rocks and Slate, Wisconsin Soil Science Report 212, Wisconsin, 1967
- (15) Nascimento, U.; Castro, E.; Rodrigues, M. - Swelling and Petrification of Lateritic Soils, Laboratorio Nacional - de Engenharia Civil, Lisbon, 1964.
- (16) SANTANA H. - Os Solos Lateríticos e a Pavimentação, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 6º Simpósio, Rio de Janeiro, julho de 1970.
- (17) SEED; CHAN - ASCE, Symposium on Compacted Clays, 1959.
- (18) SOUZA PINTO, C - Equipamento Reduzido para Moldagem de Corpos de Prova de Solo-Aditivo, Associação Brasileira - de Pavimentação, VI Reunião Anual.