

TRATAMENTO PRÉVIO DO SOLO COM ADITIVOS QUÍMICOS E SEU EFEITO SOBRE A QUALIDADE DO SOLO-CIMENTO

WESLEY JORGE FREIRE

Professor Assistente, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: JUSTO MORETTI FILHO

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Julho, 1976

À MINHA ESPOSA,

SUZEL,

OFEREÇO.

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

Ao Dr. Justo Moretti Filho, orientador e particular amigo, pela valiosa e irrestrita colaboração;

ao Dr. Humberto de Campos, da ESALQ/USP, e aos colegas do Departamento de Matemática da Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, pela orientação nas análises estatísticas;

aos colegas e funcionários dos Departamentos de Engenharia Rural e Ciências do Solo, da Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu;

aos demais elementos que, de uma ou de outra forma, colaboraram para a concretização deste trabalho,

o autor consigna os seus agradecimentos.

Wesley Jorge Freire

C O N T E Ú D O

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Componentes do solo-cimento	4
2.1.1. Solo	4
2.1.2. Cimento	7
2.1.3. Água	11
2.2. Características e propriedades do solo-ci mento	12
2.2.1. Compactação	12
2.2.2. Resistência	15
2.2.3. Durabilidade	17
2.2.4. Custo	19
2.3. Propriedades do solo que afetam o solo-ci mento	20
2.3.1. Índices físicos do solo	21
2.3.2. Plasticidade e consistência dos so los	22
2.3.3. Estabilidade estrutural do solo ...	23
2.3.4. Classificação dos solos	24
2.4. Aditivos químicos e solo-cimento	26
2.4.1. Aditivos químicos e seu efeito sobre o solo	26
2.4.1.1. Efeito da carboximetilcelulose	29
2.4.1.2. Efeito do silicato de sódio ..	31
2.4.2. Aditivos químicos e seu efeito sobre o solo-cimento	34
2.4.2.1. Efeito da carboximetilcelulose	35
2.4.2.2. Efeito do silicato de sódio ..	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1. Materiais	38

	Página
3.1.1. Solos	38
3.1.1.1. Solo argiloso	38
3.1.1.2. Solo arenoso	40
3.1.2. Aditivos químicos	41
3.1.2.1. Carboximetilcelulose	41
3.1.2.2. Silicato de sódio	41
3.1.3. Cimento	42
3.1.4. Equipamentos	42
3.1.4.1. Prensa	42
3.1.4.2. Outros equipamentos	42
3.2. Métodos	42
3.2.1. Peneiramento a seco	43
3.2.2. Aplicação dos tratamentos	44
3.2.3. Análise granulométrica	45
3.2.4. Limites de consistência	46
3.2.5. Índices físicos	46
3.2.6. Compactação	47
3.2.6.1. Compactação do solo	47
3.2.6.2. Compactação do solo-cimento ..	47
3.2.7. Dosagem do solo-cimento	47
3.2.8. Moldagem de corpos de prova de solo -cimento	48
3.2.9. Ensaio à compressão de corpos de prova de solo-cimento	48
3.2.10. Absorção de água	49
3.2.11. Análise estatística	50
3.2.11.1. Análise não paramétrica	50
3.2.11.1.1. Teste de Kruskal-Wallis	51
3.2.11.1.2. Teste de Friedman	52
3.2.11.1.3. Comparações múltiplas ..	53
4. RESULTADOS	57
5. ANÁLISE e DISCUSSÃO	88
6. CONCLUSÕES	124

	Página
6.1. Com relação ao solo	124
6.2. Com relação ao solo-cimento	126
RESUMO	128
SUMMARY	131
BIBLIOGRAFIA CITADA	134

1. INTRODUÇÃO

O solo-cimento, definido como uma mistura íntima de solo pulverizado, cimento Portland e água, que, sob compactação a um teor de umidade ótimo e máxima densidade, forma um material estruturalmente resistente e durável, é um dos tipos de estabilização de solos, comumente utilizados.

O termo "estabilização do solo" corresponde, conforme SILVEIRA e SILVEIRA (1964), a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente, à deformação e ao deslocamento, do que o solo primitivo.

Em seu sentido mais restrito, a "estabilização do solo" consiste no tratamento artificial do mesmo pela adição de um material, denominado estabilizante, que, segundo SILVEIRA (1967), deve atender a uma ou mais das seguintes finalidades: (1) reduzir a compressibilidade; (2) aumentar a resistência, inclusive a resistência à deformação, sob efeito de carregamento contínuo ou repetido; (3) reduzir a sensibilidade à ação de variações externas, principalmente a umidade; (4) aumentar ou reduzir a permeabilidade; (5) reduzir a sensibilidade à ação do congelamento e (6) garantir a permanência dessas propriedades no decorrer do tempo (durabilidade).

Quantitativamente, a estabilização está associada a valores numéricos de resistência e durabilidade, expressos em termos de resistência à compressão, resistência ao ci-

salhamento, módulo de deformação, capacidade de carga, absorção de água, rigidez, compacidade e consistência, inchamento, resistência ao umedecimento e secagem, resistência ao congelamento e degelo, resistência ao desgaste, resistência à erosão e redução dessas propriedades com o tempo.

De um modo geral, SILVEIRA (1967) observou que a estabilização do solo tem por finalidade uma ou mais das seguintes funções: (1) corrigir a granulometria do solo, (2) desativar a fração argila, (3) aglutinar as partículas entre si e (4) impermeabilizar as partículas ou grupos de partículas; todavia, o grau de estabilização alcançado varia de acordo com o tipo de estabilizante empregado, método de aplicação e, dentro de cada método, de solo para solo.

Quase todos os ramos da engenharia de solos têm se utilizado da estabilização como um meio de aproveitar o solo local, embora artificialmente tratado, com muito maior vantagem econômica.

A utilização do cimento, como agente estabilizador de solos, teve início nos Estados Unidos da América do Norte, em 1916, quando o mesmo foi empregado, pela primeira vez, para solucionar problemas causados pelo tráfego de veículos de roda não pneumática. Desde então, o solo-cimento teve grande aceitação, passando a ser utilizado na construção e pavimentação de estradas de rodagem e ruas urbanas, construção de aeroportos e acostamentos, revestimento de barragens de terra e de canais de irrigação, fabricação de tijolos, melhoria de fundações, pavimentação de pátios industriais e de áreas destinadas ao estacionamento de veículos, construção de silos aéreos e subterrâneos, construção de casas e pavimentação de estúbulos, além de muitas outras aplicações onde o mesmo tem sido experimentado com sucesso.

No Brasil, o interesse pelo assunto começou em 1936 com a fundação da Associação Brasileira de Cimento Portland que regulamentou, fomentou e pesquisou a aplicação do so

lo-cimento, levando, em 1941, à pavimentação do aeroporto de Petrolina; em 1970, a rede pavimentada de solo-cimento, no Brasil, alcançava a casa dos 7500 quilômetros.

A espiral inflacionária dos custos de construção bem como a exigência cada vez maior que se faz dos pavimentos rodoviários, têm levado os pesquisadores a buscarem novos meios de tornar o solo-cimento mais econômico e, ao mesmo tempo, mais resistente.

Já há muitos anos se pesquisa, intensivamente, os melhoramentos porventura advindos pelo uso de aditivos químicos sobre a qualidade do solo-cimento. Dois dos principais objetivos destas pesquisas são, de acordo com MOH et alii (1962), (1) o aumento da eficiência do cimento Portland como estabilizante do solo, juntamente com a redução da quantidade de cimento necessária para tratar solos de alta resposta, e (2) a descoberta de aditivos que assegurem a eficiência do cimento como estabilizante para solos "problemas", isto é, solos que não podem ser economicamente estabilizados com cimento, apenas.

No presente trabalho objetivou-se pesquisar o efeito do tratamento prévio do solo com aditivos químicos sobre a qualidade do solo-cimento formado com esse material.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O solo-cimento, sendo uma mistura de solo, cimento e água, em quantidades definidas, compactada a uma densidade de máxima, depende, evidentemente, das características de cada um desses componentes e das condições em que os mesmos são processados.

2.1. Componentes do solo-cimento

Os tres componentes básicos do solo-cimento têm implicações diversas, passando a ser estudados separadamente.

2.1.1. Solo

O solo constitui 85% dos componentes do solo-cimento e quase todos eles podem ser utilizados para tal fim, em bora os solos economicamente empregáveis se restrinjam àqueles que necessitem de teores de cimento relativamente baixos e cuja execução, em grande escala, seja bastante facilitada.

A PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969) considerou que, para efeito de execução, os solos arenosos e pedregulhosos, contendo cerca de 65% de areia e um teor de silte mais argila variando de 10 a 35%, constituem-se em excelentes materiais para a obtenção de um solo-cimento econômico e de boa qualidade; solos arenosos deficientes em finos dão, também, bons resultados, embora exigindo maior quantidade de cimento

do que os anteriores; solos siltosos e argilosos prestam-se satisfatoriamente à execução do solo-cimento, reclamando, entretanto, teores elevados de cimento para se estabilizarem.

Para fins rodoviários e para a construção de aeroportos, a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972) prescreveu que, para a execução do solo-cimento, podem ser empregados, normalmente, solos com as características seguintes: diâmetro máximo: 3" (7,5 cm); passando na peneira nº 4: > 50%; - passando na peneira nº 40: 15 a 100%; passando na peneira nº 200: < 50%; limite de liquidez: < 40%; índice de plasticidade: < 18%.

KROCHIN (1960) afirmou que os solos com mais de 35% de argila devem ser evitados. Por outro lado, a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1965) observou que, quando se tratar de um solo nestas condições, justificam-se, sob o ponto de vista econômico, quaisquer esforços dispendidos para encontrar um material de granulometria favorável; solos contendo um teor de silte mais argila igual ou superior a 50% podem ser estabilizados com cimento desde que tenham sido granulometricamente corrigidos.

As propriedades das misturas de solo-cimento dependem, conforme FELT (1955), dos tipos de solos envolvidos, de maneira que certas diferenças nas propriedades e na reação do cimento são provocadas por variações na composição química dos solos; continuou este autor relatando que, argilas lateríticas de baixa relação sílica-sesquióxidos (colóides com baixo teor de sílica e alto teor de sesquióxidos de ferro e alumínio), são pulverizadas mais facilmente e reagem mais favoravelmente com o cimento que alguns solos podzólicos ou chernozens que apresentam altas relações sílica-sesquióxidos.

Com referência à granulometria, PINTO (1960) considerou os solos arenosos, bem graduados e com razoável quantidade de silte e argila, os mais indicados, por exigirem reduzida quantidade de cimento; lembrou o autor que o acréscimo dos

teores de silte e argila, ou a uniformidade de granulometria da areia, acarretam uma elevação no teor de cimento.

Os solos arenosos podem reagir de maneira diversa, com o cimento, dependendo da sua composição e propriedades químicas particulares; a matéria orgânica, presente no horizonte A (camada arável) de muitos podzóis ou solos podzólicos, com promete, segundo FELT (1955), a eficiência do cimento como estabilizante de tais solos, o mesmo não acontecendo quando se tratar de horizontes mais profundos do mesmo perfil.

Solos contendo impurezas orgânicas não são indicados, pois inibem a hidratação do cimento, tolerando-se, no entanto, um teor máximo de 2% de matéria orgânica.

Todas as areias são prontamente estabilizadas com cimento, porém, as areias uniformes não se mostraram inteiramente satisfatórias na prática; por esta razão, SHARP (1969) recomendou que, para fins rodoviários, as areias finas uniformes fossem empregadas apenas em sub-bases.

Para os solos arenosos que requerem teores excepcionalmente altos de cimento, a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969) recomendou duas medidas alternativas para o seu aproveitamento: (1) a substituição do solo local por um outro importado, de características favoráveis, ou (2) a adição ao solo arenoso de uma pequena porcentagem de cloreto de cálcio, solo argiloso friável ou material calcárico, além de aditivos químicos comprovadamente eficientes.

A característica da ruptura dos materiais empregados na construção dos pavimentos rodoviários é um fator que, segundo BASÍLIO (1973a), deve ser levado em conta; um solo-cimento feito somente com areia não é solo-cimento e sim argamassa, material de ruptura frágil; quanto ao solo-cimento, as características de ruptura frágil são abrandadas em função do conteúdo de silte mais argila.

Segundo este mesmo autor, os solos sílico-argilosos (silte mais argila igual ou superior a 10%), próprios para

solo-cimento, apresentam ruptura semi-plástica, isto é, permitem deformações sem ruptura, sob a ação de cargas bastante elevadas, embora as deformações sejam muito menores do que as que normalmente podem suportar as bases estabilizadas granulometricamente.

PINTO (1960) descreveu o solo ideal como sendo aquele que contém 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho.

De qualquer forma, o solo não deve conter material retido na peneira de 76,0 mm e nem mais de 40% de material retido na peneira de 4,8 mm, sendo desejável, ainda, que o mesmo apresente baixo limite de liquidez, baixo índice de plasticidade, elevada densidade e elevada capacidade de suporte.

2.1.2. Cimento

O cimento Portland é uma substância alcalina, composta, em sua maior parte, de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrólise, dão origem a compostos cristalinos hidratados e gel.

Discorrendo sobre o assunto, BASÍLIO (1973b) relatou que os principais compostos, silicatos e aluminatos, liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais que se formam apresentam formas alongadas, prismáticas, ou forma de agulhas de monosilicatos de cálcio hidratados e de aluminatos hidratados; esses cristais aciculares acabam se entrelaçando, à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos.

Munger, citado por HANDY (1958), sugeriu que o gel do cimento desenvolve-se espontaneamente sobre a superfície mineral, ligando-se aos oxigênios expostos, crescendo por polimerização dos grupos SiO_4 e incorporando íons de cálcio livres à superestrutura formada pelos grupamentos de SiO_4 .

Ao se formularem quaisquer mecanismos de reação

do solo-cimento provocando agregação, CHADDA (1970) observou que o efeito do cálcio livre, liberado durante o processo de endurecimento do cimento, deve ser levado em conta. Para este autor, uma das mais importantes características do cimento é que suas partículas comportam-se como partículas eletricamente carregadas, aumentando a condutibilidade elétrica da mistura de solo-cimento; a presença de cargas elétricas nas partículas de cimento provoca uma atração entre o cimento e as partículas de argila, produzindo agregação. A aglomeração de partículas de argila é, posteriormente, incrementada pela reação com o cálcio livre liberado durante o processo de hidratação do cimento.

HANDY (1958) admitiu que a cimentação resultante da adição de cimento Portland ao solo úmido, pode ser atribuída à combinação de (1) ligações mecânicas do cimento com as superfícies minerais imperfeitas e (2) ligações químicas estabelecidas entre o cimento e as superfícies minerais, sendo este processo o mais importante no caso dos solos finamente divididos, por causa da maior superfície específica envolvida. Este autor verificou, também, que, na formação do solo-cimento, as argilas participam intimamente dos fenômenos químicos.

As partículas de cimento envolvem, fisicamente, os grânulos do solo formando agregados que aumentam de tamanho à medida que se processam a hidratação e cristalização do cimento. CHADDA (1970) verificou que o teor de argila de dois solos argilosos ensaiados decresceu com o aumento do teor de cimento, no que é corroborado por FELT (1955).

A escolha do teor de cimento mínimo, capaz de assegurar a estabilidade necessária e de garantir à mistura a permanência de suas características, é, antes de tudo, uma imposição do critério de economia.

Solos misturados com pequenas quantidades de cimento apresentam características de suporte muito superiores a de outros materiais empregados como base de pavimentos flexí

veis; de acordo com PINTO (1960), isto se deve à coesão quimicamente criada pelo cimento, coesão esta que deixa de existir se o material for desagregado. Deste modo, na escolha do teor de cimento, o autor afirmou que os estudos foram dirigidos, não na verificação das características de suporte da mistura, mas na observação da permanência da coesão quando o solo-cimento fosse solicitado, tanto pela ação do tráfego como pelos esforços provenientes das variações de temperatura e de umidade.

BASÍLIO (1973a) relatou que, se não se levar em conta as diferenças características, quanto ao tipo de ruptura (frágil ou plástica), pode-se ser induzido a erro, se se considerar apenas os resultados de ensaios de CBR^(*), pois, em solos arenosos, não é difícil obterem-se valores de resistência à compressão da ordem de 45 ou 60 kg/cm², aos 7 dias, e valores de CBR muito acima de 80%, com 2 a 3% de cimento; como tais misturas têm ruptura frágil, quando empregadas na construção de bases sob revestimento asfáltico de pequena espessura, a durabilidade desses pavimentos não é comparável com a durabilidade das bases de solo-cimento.

Solos da mesma série e horizonte e de textura similar, requerem a mesma quantidade de cimento para se estabilizarem, onde quer que eles se encontrem.

Os solos finos necessitam de mais cimento que os solos granulares, pelo fato de apresentarem maior superfície específica. Todavia, conforme asseguraram ARMAN e SAIFAN (1967), um aumento no teor de cimento acima do ótimo não melhora, necessariamente, a qualidade do solo-cimento, pois, se a quantidade adequada de cimento for misturada com o solo, toda a área superficial dos agregados será coberta pelo cimento.

PORTO (1958) relatou que a adição de cimento ao solo tem por finalidade aglutinar os grãos dos solos arenosos,

(*) CBR = California Bearing Ratio

diminuir a plasticidade dos solos argilosos e, em ambos os ca sos, proporcionar maior rigidez à base com eles construída. A este respeito, FELT (1955) concluiu que o cimento efetivamente reduz o índice de plasticidade e aumenta o limite de contração dos solos argilosos.

GEORGE (1968), estudando as principais características do fenômeno de contração nas misturas de solo-cimento, observou que o mesmo depende de uma série de fatores que podem favorecê-lo ou não, entre os quais o teor e o tipo de argila, além do teor de cimento; segundo este autor, a contração do so lo-cimento inicialmente diminui com o aumento do teor de cimento, atinge um mínimo, para depois crescer novamente, sendo pos sível, portanto, encontrar um teor ótimo de cimento que reduz a contração a um mínimo.

A influência da finura do cimento foi estudada por CLARE e FERRAS (1956) que ressaltaram o fato de 7% de ci mento passando na peneira de 0,055 mm ter produzido a mesma re sistência aos 7 dias que 10% de cimento comum.

CATTON (1940) afirmou não haver correlação entre o teor de cimento necessário para um solo e o seu pH ou, ainda, o teor de matéria orgânica determinado pelo método colorimétrico, muito embora a existência de matéria orgânica tenha se mostrado altamente prejudicial, em determinados casos, retar dando o endurecimento do cimento. Todavia, este efeito depen de do tipo de matéria orgânica, pois, conforme as conclusões de CLARE e SHERWOOD (1954,1956), compostos orgânicos de alto pe so molecular, como a celulose e a linhita, pouco afetam o solo - ci mento, enquanto que os compostos orgânicos de baixo pe so molecular, como a glicose, os açúcares e o ácido húmico, são al tamente prejudiciais.

Embora se empregue normalmente o cimento Por tland comum, outros cimentos podem ser utilizados, com muita eficiência, para fins de solo-cimento. CLARE e POLLARD (1951) relataram que os cimentos de alta resistência inicial conferem

ao solo-cimento resistências mais elevadas nos primeiros dias além de liberarem, durante sua hidratação, maior quantidade de íons cálcio que podem neutralizar o efeito da matéria orgânica existente no solo.

A alcalinidade das misturas de solo-cimento aumenta com a concentração de cimento, conforme foi demonstrado por CHADDA (1970); as bases trocáveis dos solos argilosos também são afetadas pela adição de cimento, havendo total substituição de íons sódio e potássio por íons cálcio liberados pela hidratação do cimento.

2.1.3. Água

A água usada no solo-cimento deve ser relativamente limpa e isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis ou matéria orgânica.

Certos tipos de sais, comumente presentes na água, como os sulfatos, apresentam um efeito prejudicial sobre o solo-cimento; SHERWOOD (1957), MEHRA et aliá (1955) e UPPAL e KAPUR (1957), demonstraram que sulfatos de cálcio ou de magnésio reagem com o aluminato tricálcio do cimento hidratado, - provocando aumento de volume e conseqüente desagregação do solo-cimento.

A água adicionada à mistura de solo e cimento atende a duas finalidades precípuas: (1) ajuda a obter a máxima compactação (densidade), lubrificando as partículas do solo, e (2) é necessária para a hidratação do cimento, que endurece e transforma o solo numa massa sólida. Além disso, conforme observou PINTO (1960), a água pode servir de veículo para a adição de sais que corrijam ou melhorem as características do solo-cimento.

KROCHIN (1960) relatou que a adoção de uma quantidade correta de água pode ter maior importância que o próprio teor de cimento; embora a resistência do solo-cimento aumente com o aumento do teor de cimento na mistura, este efeito

pode ser anulado pela adição de uma quantidade inadequada de água. Se a quantidade de água adicionada for muito pequena, nem todo o cimento se hidratará e o resultado final será como se o seu teor sofresse uma redução; por outro lado, a adição de uma grande quantidade de água torna impossível a compactação, provocando a segregação do cimento e dando origem a um material poroso e, conseqüentemente, de menor resistência.

Semelhantemente, EL-RAWI et alii (1967) demonstraram que o efeito da relação água-cimento é mais importante que o efeito da densidade; desde que apenas uma parte da água adicionada será utilizada para a hidratação do cimento, qualquer acréscimo na sua quantidade provocará um decréscimo na resistência análogo àquele observado para o concreto. Para solos granulares, quanto mais baixa a relação água-cimento, tanto mais alta será a resistência alcançada.

No caso de solos muito argilosos, GEORGE (1968) atribuiu ao elevado teor de umidade de moldagem a maior incidência do fenômeno de contração do solo-cimento; segundo ele, a contração é provocada pela perda de água por evaporação.

2.2. Características e propriedades do solo-cimento

De entre as principais características e propriedades do solo-cimento, destacam-se as seguintes:

2.2.1. Compactação

O termo "compactação" do solo refere-se à prática de, artificialmente, aplicar sobre ele cargas dinâmicas, com a finalidade de aumentar a sua densidade e se conseguir maior resistência. O valor da densidade obtida pela compactação é influenciado pelo teor de umidade do solo e pela sua natureza (granulometria e propriedades físicas), bem como pela energia de compactação empregada; em menor grau, depende, ainda, da temperatura do solo e da água. Sob o aspecto prático, a densi

dade é o fator físico de maior importância no solo-cimento.

Os ensaios de compactação determinam a densidade à qual o solo pode ser compactado, definindo os parâmetros "densidade aparente máxima" e a correspondente "umidade ótima", - que são fatores comparativos. Segundo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), a densidade aparente máxima é alta quando se situa na faixa de 2,0 a 2,32 g/cm³, expresso em termos de peso seco em estufa, e, baixa, quando varia de 1,36 a 1,6 g/cm³; um teor de umidade ótima baixo coincide com a densidade aparente máxima alta e está ao redor de 8%, enquanto que um teor de umidade ótima alto coincide com a densidade aparente máxima baixa e está ao redor de 20%. Segundo esta mesma fonte, a densidade aparente máxima de um solo dá informação aproximada da sua granulometria; a umidade ótima, sobre o teor de silte e argila; a forma da curva de compactação complementa com informações valiosas mostrando a influência da umidade sobre a capacidade de suporte do solo.

MATEOS et alii (1963) concluíram que o mesmo teor de umidade que produz a máxima densidade de misturas de solo-cimento contendo aditivos químicos, não produz, necessariamente, a máxima resistência; estes autores atribuíram tal fato ao tamanho variável das partículas do solo, que, expondo uma maior ou menor superfície específica, fariam com que a mesma quantidade de água se tornasse insuficiente ou excessiva, respectivamente, para a perfeita hidratação do cimento.

O solo-cimento com solo argiloso é mais sensível à variação de umidade do que o executado com solo arenoso. A fim de se obter um solo-cimento de alta qualidade, FELT (1955) sugeriu que, para solos argilosos e siltosos, a mistura de solo e cimento seja compactada a uma umidade de moldagem igual ou pouco superior à ótima (cerca de 1 a 2%), enquanto que, para solos arenosos, a umidade de moldagem deve ser igual ou levemente inferior à ótima.

STANTON et alii (1943) mostraram que um decréscimo

mo de 5% na densidade ocasionou, para o solo ensaiado, uma diminuição de resistência igual à provocada por redução de 10 a 15% na quantidade de cimento. Semelhantemente, FELT (1955) relatou que, de modo geral, a cada 20 g/dm^3 de diferença, abaixo da densidade aparente máxima, resulta uma diminuição de 1,1 a $1,8 \text{ kg/cm}^2$ no valor da resistência à compressão, muito embora o Método SC-2, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - (1972), que fixa o modo pelo qual se moldam corpos de prova de solo-cimento, admita uma tolerância de mais ou menos 30 g/dm^3 para o valor da densidade aparente máxima.

O efeito do atraso da compactação, por períodos de zero a seis horas após a mistura do solo e cimento, sobre a resistência à compressão, durabilidade e densidade do solo-cimento, foi estudado por ARMAN e SAIFAN (1967), que verificaram sua dependência em relação ao tipo de solo; estes autores estabeleceram como máximo período de tempo tolerável, para o atrazo da compactação do solo-cimento após a mistura dos seus componentes, aquele correspondente a 0,8 vezes o do início de pega do cimento. O efeito do atraso da compactação se faz sentir, também, sobre a umidade ótima e teor de cimento fixado pela Norma Geral de Dosagem do solo-cimento.

Raramente o solo e o cimento são misturados a um teor de umidade muito superior ao ótimo sem a costumeira comcompactação; quando isto acontece, a mistura, comumente chamada solo-cimento plástico, dá origem a um material resistente e durável que pode ser formado com quase todos os tipos de solo, - com exceção daqueles muito argilosos; a este respeito, SHERARD (1969) observou que a designação solo-cimento "plástico" é inadequada, uma vez que o produto final é resistente e quebradiço. Ensaios de laboratório demonstraram que o solo-cimento plástico requer um pouco mais de cimento que o compactado, para alcançar resistências comparáveis, embora a densidade do produto final plástico seja menor.

2.2.2. Resistência

A resistência à compressão tem sido usada como um índice tecnológico, sendo esta a propriedade mais comumente empregada para descrever misturas de solo-cimento; ela serve para indicar o grau de reação da mistura de solo-cimento-água, bem como a relativa pega e velocidade de endurecimento do cimento. Segundo CRONKHITE e DACYSZYN (1966), a resistência à compressão é o parâmetro usado para medir a qualidade do solo-cimento.

ARMAN e SAIFAN (1967) afirmaram que a resistência à compressão do solo-cimento depende do tamanho e forma das partículas do solo, bem como do vínculo estabelecido entre as mesmas pelo processo de cimentação. FELT (1955) demonstrou que os corpos de prova de solo-cimento com solo arenoso são consideravelmente mais resistentes que os corpos de prova com solo siltiloso, os quais, por sua vez, são mais resistentes do que os corpos de prova com solo argiloso; as máximas resistências à compressão obtidas, após um ano, foram de 330 kg/cm^2 para o solo arenoso, 218 kg/cm^2 para o solo siltiloso e 162 kg/cm^2 para o solo argiloso. A resistência decresce com o aumento do teor de silte e argila, tendo KROCHIN (1960) atribuído este fato à presença de poeira fina envolvendo as partículas e impedindo uma boa aderência do cimento.

O efeito do teor de umidade de moldagem sobre a resistência à compressão simples das misturas de solo-cimento foi investigado por FELT (1955); este autor mostrou que a resistência alcança um máximo e decresce de maneira semelhante à da curva de compactação.

EL-RAWI et alii (1967) concluíram que a resistência à compressão simples aumenta com o acréscimo do teor de cimento, e, de acordo com KROCHIN (1960), com o acréscimo do peso específico aparente e, por conseguinte, com o decréscimo da porosidade.

O "grau de pulverização", definido como a porcentagem do peso da mistura que passa na peneira de 4,8 mm em relação ao peso total, permite controlar a mistura de solo-cimento, durante a execução. O grau de pulverização mínimo, para solo-cimento, é da ordem de 80%; nestas condições, segundo GRIMER (1957), ocorre um decréscimo na resistência da ordem de 15 a 35% e, para 60% de pulverização, este decréscimo varia de 37 a 50%.

A resistência do solo-cimento continua a crescer com o tempo, tendo CRONKHITE e DACYSZYN (1966) demonstrado que, amostras de solo-cimento, tomadas um ano após a sua execução como base de uma estrada de rodagem, apresentavam um valor de resistência à compressão simples superior a tres vezes o valor de referência, tomado aos sete dias. SHERARD (1969) afirmou que facilmente se obtém uma resistência à compressão simples da ordem de 35 a 70 kg/cm², ao 28º dia, com a maioria dos solos, sendo que esse valor praticamente dobra, após decorrido um ano.

Para fins de pavimentação de estradas, a mínima resistência à compressão simples aceitável para solo-cimento, aos 7 dias, é de 21 kg/cm². A resistência à flexão, aos 28 dias, está, aproximadamente, ao redor de 20% do valor da resistência à compressão e o módulo de elasticidade, ao redor de 70300 kg/cm². De acordo com a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - (1969), todas estas propriedades aumentam, significativamente, com o prolongamento do tempo de cura. Além disso, o módulo de ruptura está diretamente relacionado com a resistência à compressão, situando-se ao redor de 20% do valor desta.

Sempre que o valor da resistência à compressão simples não alcançar o mínimo estabelecido para os ensaios à compressão de corpos de prova de solo-cimento, de conformidade com o Método SC-4 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972), ensaios adicionais devem ser realizados, pois, provavelmente, o teor de cimento indicado é inadequado.

A estabilidade e, portanto, as propriedades estruturais do solo, são muito afetadas pelo atrito interno e coesão, sendo que estes se combinam, na maioria dos solos, para compor a resistência ao cisalhamento. Todavia, conforme explicou a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969), a estabilidade do solo-cimento é conseguida, principalmente, às custas da hidratação do cimento e não pela coesão e atrito interno dos componentes; daí poder-se utilizar, praticamente, todos os solos e combinações de solos para fins de solo-cimento.

Avaliando os resultados de ensaios de compressão triaxial do solo-cimento, BALMER (1958) relatou que, enquanto a coesão variou consideravelmente com o teor de cimento e o tipo de solo, o ângulo de atrito interno manteve-se praticamente independente do teor de cimento, variando de 36° para solos siltsos a 45° para solos arenosos.

O solo-cimento possui alta capacidade de suporte, tendo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969) verificado que o mesmo pode suportar cargas mais do que três vezes superior à carga suportada por uma base granular.

Embora a maioria dos solos possa ser utilizada para a obtenção de um solo-cimento econômico e de boa qualidade, solos há que, pela variação de suas características físicas, morfológicas ou químicas, produzem um material de péssima qualidade. Assim é que MOH et alii (1962) descreveram um solo arenoso (Wisconsin Sand 1), A_{2-4} , não plástico, contendo 82% de areia e 18% de silte, 1,9% de matéria orgânica e pH 6,7, peso específico dos sólidos igual a $2,64 \text{ g/cm}^3$ e densidade aparente máxima igual a $1,63 \text{ g/cm}^3$, que, moldado com 10% de cimento em peso, apresentou valores de resistência à compressão da ordem de $1,33 \text{ kg/cm}^2$ e $1,62 \text{ kg/cm}^2$ aos 7 e 28 dias, respectivamente.

2.2.3. Durabilidade

O solo-cimento é usado, normalmente, como base

de estradas de rodagem, sendo dimensionado como pavimento fle
xível, e, assim, garantindo uma vida útil de 15 a 20 anos. A
primeira estrada de solo-cimento, construída em 1935, no Esta
do de Carolina do Sul, Estados Unidos, ainda hoje se acha aber
ta ao tráfego.

O solo-cimento é mais elástico que o concreto -
convencional, porém, não tão forte; todavia, isso não impede
que, dosado convenientemente, o solo-cimento produza uma base
com resistência suficiente para atender às solicitações de um
tráfego normal.

A durabilidade do solo-cimento é, antes de tudo,
função da ligação estabelecida entre as partículas do solo pe
la hidratação do cimento, tendo ARMAN e SAIFAN (1967) verifica
do que este fenômeno depende, ainda, da forma e tamanho das
partículas; segundo estes autores, partículas de silte, arre-
dondadas e uniformes, originárias de depósitos fluviais, produ-
zem um solo-cimento de pequena durabilidade e baixa resistên
cia.

GEORGE (1968) chamou a atenção para o fato de
que as trincas, resultantes do fenômeno de contração do solo
-cimento, se não seladas, permitirão a infiltração da água até
o sub-leito, comprometendo a própria durabilidade da base do
pavimento.

O solo-cimento foi pesquisado por JONES (1966) co
mo pavimento de pátios destinados à acomodação e alimentação
de bovinos; este autor concluiu pela viabilidade da medida, a
crescentando que o pavimento de solo-cimento podia ser facil
mente reparado ou então transformado numa boa base para nova
camada de solo-cimento ou concreto, prolongando, assim, a sua
vida útil.

Canais revestidos com solo-cimento apresentavam
-se, segundo JOHNSON (1962), em boas condições de uso, quatro
anos após sua execução; do mesmo modo, canais revestidos com
solo-cimento plástico mostravam-se quase que em perfeitas con

dições decorridos oito anos de uso intensivo.

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

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

A análise do comportamento real dos pavimentos sob a ação do tráfego continua sendo o enfoque principal da ASsociação Brasileira de Cimento Portland para o estudo dos projetos de pavimentos e seu dimensionamento. Para a quantificação de dados relativos à durabilidade dos pavimentos, BASÍLIO (1973a) relatou que há mais de 15 anos se estuda e divulga a técnica de apreciar a curva de remanescentes (representativa das áreas de pavimentos deteriorados pelo uso em função do tempo), a vida mediana (que corresponde a 50% de substituição da área original) e o fator econômico (relação entre o preço de substituição e o de construção de 1 metro quadrado de pavimento).

2.2.4. Custo

A técnica usual de mistura no local bem como o aproveitamento do solo das proximidades, somado ao fato de que o solo representa 85% dos componentes da mistura, são algumas

das razões que tornam o emprego do solo-cimento mais econômico.

De acordo com SHERARD (1969), o custo do solo-cimento pode ser reduzido a um mínimo, quando comparado com o custo do concreto convencional.

JONES (1966) constatou que a pavimentação com solo-cimento, de áreas destinadas à acomodação e alimentação de bovinos de corte, importa em apenas a metade do custo do concreto, caso seja este o material utilizado. A mesma relação de preço foi encontrada por JOHNSON (1962), quando estudou o custo do revestimento de canais com solo-cimento plástico e concreto.

CRONKHITE e DACYSZYN (1966) relataram uma economia de 12% no custo médio final de construção da base de solo-cimento de uma estrada, quando comparado com o custo de uma base granular para o mesmo projeto.

O custo final da pavimentação com solo-cimento de uma área de aproximadamente 1,7 hectares, numa espessura de 15 cm, destinada ao estocamento de madeira, representa, segundo DES CHAMPS (1963), apenas 40% do custo de uma base granular e equivalente; DOLPHIN (1965) verificou que a pavimentação de estradas com solo-cimento acarreta uma economia de 30% em relação ao custo total do projeto equivalente de uma base flexível.

2.3. Propriedades do solo que afetam o solo-cimento

O solo-cimento é afetado pelo conjunto de propriedades do solo, de tal maneira que a persistência de apenas uma característica desfavorável pode comprometê-lo, contraindicando-o para fins de solo-cimento ou exigindo medidas especiais, muitas vezes onerosas, para o seu aproveitamento. Algumas destas propriedades e características e suas relações com o solo-cimento, são relatadas a seguir.

2.3.1. Índices físicos do solo

Os índices físicos são relações entre volumes, entre pesos ou entre pesos e volumes das tres fases constituintes de um solo e, de acordo com NOGUEIRA (1971), fornecem um conhecimento das condições em que o solo se encontra no instante da determinação dos mesmos.

O peso específico dos sólidos, definido como o peso dos sólidos contidos em um certo volume de solo pelo volume dos sólidos, depende da natureza desses sólidos (dos seus pesos atômicos) e da natureza da estrutura cristalina. O peso específico aparente, definido como o peso de um determinado volume de solo, depende, por sua vez, do teor de matéria orgânica do solo, da compactidade, do grau de agregação, etc. A porosidade é a relação entre o volume total dos vazios encontrados em um volume total de solo, enquanto que o índice de vazios é a relação entre o volume total dos vazios encontrados em um volume unitário de sólidos.

A porosidade e o índice de vazios de um solo dependem do grau de compactação ou consolidação do mesmo; segundo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), para um solo particular, em diferentes condições, a porosidade e o índice de vazios variarão, podendo ser usados para avaliar a estabilidade relativa e a capacidade de suporte do solo, com estes fatores aumentando à medida que a porosidade e o índice de vazios vão crescendo. O índice de vazios se presta, também, para medir a compactidade do solo.

KROCHIN (1960) afirmou que o peso específico aparente natural do solo pode ser uma indicação do seu peso específico no estado compactado e, portanto, da sua porosidade mínima e permeabilidade; então, como regra geral, o autor concluiu que os solos secos, pesando menos de $1,2 \text{ g/cm}^3$, dariam um solo-cimento fraco e, por conseguinte, imprestável. Com relação à permeabilidade do solo-cimento, KROCHIN (1960) veri

ficou que, geralmente, esta aumenta com a porosidade do material.

2.3.2. Plasticidade e consistência dos solos

A plasticidade, definida como uma propriedade dos solos que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume, ocorre sempre nos solos finos e, de acordo com VARGAS (1967), depende da forma do grão, mais do que do seu tamanho; quanto mais complexa é a forma dos grãos, maior é sua plasticidade.

Argilas caoliníticas, cujos grãos são, geralmente, placas hexagonais apresentam baixas plasticidades; as montmoriloníticas, cujos grãos têm as formas mais complexas possíveis, apresentam altas plasticidades, enquanto que as ilíticas apresentam plasticidades muito anormais. A maior ou menor plasticidade, em relação à porcentagem da fração argila, define a atividade de uma argila; as caolinitas são argilas de atividade normal enquanto que as montmorilonitas são de alta atividade.

Quanto aos índices de consistência, PINTO (1960) afirmou que, antes de serem correlacionados com o consumo de cimento, estão a indicar a dificuldade de execução no campo.

Solos arenosos, apresentam baixos limites de liquidez enquanto que siltes e argilas apresentam limites de liquidez elevados. Altos limites de liquidez indicam, segundo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), solos com alto teor de argila e baixa capacidade de suporte. SHARP (1960) fixou em 45 a 60% o limite de liquidez aceitável.

Solos exibindo limites de plasticidade contêm silte e argila. A capacidade de suporte dos solos aumenta muito rapidamente à medida que o teor de umidade decresce aquém do limite de plasticidade, e vice-versa. A PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962) relatou que, à medida que o teor de umidade aumenta, a coesão também aumenta até que o limite de plasticidade

dade seja alcançado; então, qualquer acréscimo na umidade reduz a coesão do solo.

O índice de plasticidade é a diferença numérica entre os limites de liquidez e plasticidade e, juntamente com o limite de liquidez, define a plasticidade de um argila. FELT (1955) afirmou que um alto índice de plasticidade normalmente está associado a solos argilosos de alta atividade; solos argilosos de baixa atividade, siltosos ou arenosos, possuem um baixo índice de plasticidade. Segundo a PORTLAND CEMENT ASSO CIATION (1962), um solo "siltoso" é aquele cujo índice de plas ticidade é menor ou igual a 10 e um solo "argiloso", quando o índice de plasticidade é maior que 10.

2.3.3. Estabilidade estrutural do solo

As diferenças na estabilidade estrutural do solo estão, aparentemente, relacionadas com a presença ou ausência de certos agentes cimentantes, de entre os quais BUCKMAN e BRA DY (1968) citaram a matéria orgânica, o tipo de argila e os óxidos de ferro; para a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), o ligante do solo é, geralmente, considerado como sendo o mate rial de tamanho inferior a 0,074 mm.

Já se relatou, no item 2.2.2., que a estabilida de e, portanto, as propriedades estruturais do solo, são muito afetadas pelo atrito interno e coesão os quais, por sua vez, são influenciados por outros fatores básicos, tais como, as pro priedades capilares, a elasticidade e a compressibilidade. - RUFF e DAVIDSON (1961) afirmaram que a imersão dos corpos de prova de solo-cimento, em água, antes do rompimento à compres são, reduz ou destrói qualquer coesão aparente no solo e testa a verdadeira coesão e outros efeitos estabilizantes.

Como regra geral, BUCKMAN e BRADY (1968) concluí ram que, quanto maior for o tamanho dos agregados existentes - num determinado solo, menor será a sua estabilidade. Por outro

lado, Tiulin, citado por BAVER (1966), sugeriu que somente os agregados maiores do que 0,25 mm são os responsáveis pela estabilidade estrutural do solo sendo a porcentagem de agregados maior do que 0,05 mm usada para caracterizar o seu estado de agregação".

Naturalmente, a estrutura do solo é complexa, não podendo ser avaliada, completamente, por um único parâmetro. - No entanto, CHEPIL (1962) observou que o estado e a estabilidade de mecânica dos agregados secundários, determinados pelo peneiramento a seco, são índices muito mais precisos da estrutura natural do solo que o estado dos agregados primários determinados pelo peneiramento em água; a técnica do peneiramento a seco, descrita por este autor, consiste no peneiramento de cada amostra, pelo menos por mais uma vez, para se obter uma idéia da resistência relativa do solo à demolição mecânica. Desta maneira, determinam-se, simultaneamente, a distribuição em tamanho e a estabilidade mecânica dos agregados.

BAVER (1966) admitiu que, sem dúvida alguma, o peneiramento a seco do solo se reveste de considerável mérito sob certas condições experimentais definidas, embora se questione se tal técnica fornece informações valiosas sobre a agregação do solo, caso em que a estabilidade em água das partículas secundárias é o fator importante.

2.3.4. Classificação dos solos

As classificações dos solos pela textura baseiam-se apenas na sua composição granulométrica havendo, segundo VARGAS e NAPOLES NETO (1968), dois tipos principais de classificação pela textura: a do tipo trilinear (que se utiliza de gráficos triangulares, como, por exemplo, os do "U.S. Bureau of Soils", "U.S. Engineer Department" e "U.S. Department of Agriculture") e a classificação por meio de curvas granulométricas padrão.

Todavia, para fins de engenharia, VARGAS (1967)-adverteu para o fato de que, uma classificação do solo, para ser bem sucedida, deve classificá-lo tanto pela granulometria como pela plasticidade, dispondo-se, para tal, da "Classificação da American Association of State Highway Officials" (Highway Research Board), da "Classificação Unificada" (Classificação de Casagrande) e da "Classificação da Federal Aviation Agency" (Civil Aeronautics Administration). Enquanto que a Classificação Unificada tem a vantagem de ser sistemática, isto é, classifica o solo a partir de propriedades mais gerais incluindo-o, sucessivamente, em grupos e sub-grupos mais particulares, a Classificação da AASHO (American Association of State Highway Officials) não é, assim, tão sistemática, classificando os solos em sete grupos, pelo seu comportamento em estradas de rodagem.

Pelo critério da AASHO, os sete grupos básicos são denominados de A_1 , A_2 , A_3 , ... A_7 , de maneira que os melhores solos, para fins de estrada, são classificados como A_1 , o segundo melhor é o A_2 , etc, até o pior de todos, classificado como A_7 ; os sete grupos básicos de solo são divididos, ainda, em sub-grupos, com um índice de grupo ideado para definir a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento, de maneira que os seus valores extremos representam solos ótimos (para um índice de grupo igual a zero) e solos péssimos, que devem ser evitados (quando o índice de grupo é igual a vinte). Portanto, valores crescentes do índice de grupo dentro de cada grupo básico de solo reflete (1) a redução da capacidade de suporte dos sub-leitos e (2) o efeito conjunto do acréscimo do limite de liquidez e índice de plasticidade e decréscimo da porcentagem de material grosso.

PORTO (1958) recomendou que, para fins de solo-cimento, só devem ser empregados solos ou misturas de solos dos tipos A_1 , A_2 ou A_3 , pois são mais facilmente pulverizados e misturados, permitindo o seu emprego em condições atmosféricas

menos favoráveis.

Membros de cada grupo de solos têm características gerais semelhantes. No entanto, segundo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), há uma grande variação na capacidade de suporte de cada grupo bem como uma sobreposição da capacidade de suporte nos grupos, de maneira que um solo A₂ pode conter materiais com uma capacidade de suporte muito superior à de um solo A₁ e, em condições extraordinárias, pode ser inferior aos melhores materiais classificados nos solos A₆ ou A₇.

2.4. Aditivos químicos e solo-cimento

A literatura chama de condicionadores do solo a quaisquer aditivos que, de alguma maneira, modifiquem as suas propriedades físicas.

Historiando o assunto, CARLETON (1953) relatou que, muito tempo antes da descoberta dos modernos condicionadores sintéticos, Plínio e alguns outros escritores antigos descreveram o uso da cal e de outros materiais que, aplicados ao solo, melhoravam algumas de suas características, refletindo favoravelmente sobre o desenvolvimento vegetal. Os condicionadores sintéticos, no entanto, só foram descobertos recentemente, sendo o primeiro deles anunciado em 1951, segundo QUASTEL (1953), em Philadelphia, Estados Unidos; de lá para cá, os resultados de longas e exaustivas pesquisas indicaram alguns que, misturados com o solo em quantidades excepcionalmente pequenas, promoviam acentuada estabilidade estrutural.

2.4.1. Aditivos químicos e seu efeito sobre o solo

JONES e MARTIN (1957) afirmaram que o efeito da aplicação de um condicionador sobre a agregação do solo varia muito em função das características do solo e das condições sob as quais o produto foi aplicado, porém, para que ocorram mudanças físicas e químicas satisfatórias, CARLETON (1953) e ALLISON

(1957) observaram que há absoluta necessidade de um contacto íntimo e completo entre o condicionador e o solo.

Segundo O'BRIEN (1952) e BROCKMAN e ALLENBY (1953), a eficiência de um condicionador é maior quando o mesmo é aplicado ao solo relativamente seco; no solo muito úmido, o condicionador absorve água rapidamente, tornando-se gelatinoso e dificultando a mistura. Estes autores comprovaram, ainda, que a eficiência de um condicionador depende, também, da concentração e da forma com que o mesmo é apresentado, sendo que, na forma de solução, o seu efeito estabilizante é maior do que na forma de pó; nesta forma, o produto deve ser distribuído sobre a superfície do solo e depois incorporado até a profundidade desejada.

A eficiência de um condicionador se mede pela proporção de agregados estáveis em água formados, tendo O'BRIEN (1952) concluído que os solos com alto teor de argila são os que melhor respondem ao tratamento, enquanto que os arenosos são muito pouco afetados; os solos silteosos se situam numa posição intermediária. A este respeito, SHERWOOD e ENGIBOUS (1953) frisaram que os solos muito argilosos, que apresentam problemas de compactação e encrostamento superficial ou exibem condições físicas indesejáveis, são os que melhor respondem ao tratamento com condicionadores. Todavia, se o estado natural de agregação do solo for bastante desenvolvido, SLATER (1953) afirmou que o efeito do condicionador não será tão acentuado como seria se o solo fosse mal estruturado.

A duração do efeito do condicionador sobre o solo depende de uma série de fatores, de entre os quais SHERWOOD e ENGIBOUS (1953) citaram: a quantidade do produto usado, o estado inicial de agregação do solo e o teor e natureza da argila; com um condicionador, comprovadamente eficiente, consegue-se em poucas horas ou dias, um grau de estabilização tal que, se alcançado por meios naturais, levaria décadas. Reforçando esta idéia, DJTT (1947) observou que uma estrutura estável, de

se desenvolvida naturalmente em dois ou tres anos por efeito de uma vegetação apropriada, é formada em poucos dias pela aplicação de silicato de potássio.

JACOBSON e SWANSON (1958) verificaram que o tipo de solo afeta a intensidade e duração da resposta dos mesmos à aplicação de um condicionador sintético; logo após a aplicação do condicionador, o solo arenoso responde melhor ao tratamento, embora o efeito dure mais nos solos siltosos e argilosos.

Quando o teor de umidade do solo, ao qual se vai adicionar o condicionador, está próximo ao da capacidade de campo, MARTIN et alii (1952) encontraram que as mudanças nas condições estruturais do solo são visíveis uma hora após a incorporação de um polieletrólito sintético; quando o condicionador é aplicado ao solo com um teor de umidade próximo ao do ponto de murchamento permanente, não se observa alteração alguma até que o solo seja molhado com água de chuva ou de irrigação.

A indicação da quantidade de água que se deve adicionar ao solo para solubilizar o condicionador a ele incorporado, varia de um pesquisador para outro. De acordo com LAWS e PAGE (1946), esta quantidade de água deve ser aquela capaz de elevar a umidade do solo a um teor igual a 10% abaixo do seu limite de plasticidade; RAMACHARIU (1956) adotou, como teor de umidade ideal, aquele correspondente a 3/4 do limite de plasticidade do solo.

BROCKMAN e ALLENBY (1955) sugeriram que, para fins de análise, os agregados formados pelos condicionadores, devem ser mantidos em repouso pelo período de um dia, em condições ambientais, e mais tres dias, a 25°C e 40 a 50% de umidade relativa do ar.

JOHNSTONE et alii (1957) relataram que a adição de um condicionador ao solo, além de torná-lo mais escuro, superficialmente, diminui o peso específico aparente, aumentando, assim, a porosidade total. Os solos tratados com condicio

nadores são soltos e friáveis não sendo, segundo MARTIN et alii (1952), muito firmes quando úmidos ou muito duros quando secos.

De acordo com DUBOSE (1955), a habilidade de quantidades traço de alguns condicionadores em modificar acenutuadamente as características de plasticidade do solo é reconhecida por muitos pesquisadores, embora a natureza exata deste fenômeno não seja, ainda, devidamente compreendida.

Para MICHAELS (1954), HAGIN e BODMAN (1954) e HOLMES e TOTH (1957), os mecanismos pelos quais os condicionadores químicos desenvolvem o seu efeito estabilizante no solo são atribuídos à presença de forças aniônicas, atividades de superfície, pontes hidrogeniônicas e intermoleculares e mesmo à formação de ésteres na superfície de argilas hidratadas.

MARTIN e ALDRICH (1955) observaram que a ação cimentante de alguns condicionadores químicos do solo é reduzida pela presença de teores elevados de sódio e potássio trocáveis. Por outro lado, ALLISON (1952) relatou um aumento na agregação de solos com alto teor de sódio, pelo tratamento com polieletrólitos sintéticos. Neste particular, em se tratando de solos salinos, SINGH (1955) anunciou que, após a estrutura do solo ter sido estabilizada por um condicionador adequado, o excesso de sódio pode ser lavado mais facilmente e, assim, tais solos podem ser recuperados.

SILVEIRA (1967) concluiu que não há limitação para o emprego de substâncias químicas como estabilizantes do solo, havendo sempre o maior interesse em se pesquisar novos produutos, para uma criteriosa avaliação técnico-econômica da conveniência de sua utilização em cada caso particular.

2.4.1.1. Efeito da carboximetilcelulose

SINGH (1955), discorrendo sobre o papel da matéria orgânica como agente cimentante da estrutura do solo, afirmiou que este fenômeno é (1) físico, devido à presença de partí

culas finas que ajudam a aglutinar os agregados do solo e (2) químico ou físico-químico, provavelmente devido à presença de poliuronídeos ou polissacarídeos afetando as propriedades hidrofílicas das partículas de argila; ao lado destes, os ésteres de celulose, tais como o acetato de celulose, a metilcelulose e a carboximetilcelulose, também melhoram a estrutura do solo.

GEOGHEGAN (1950) relatou que a aplicação de 0,25% de CMC (carboximetilcelulose) aumenta significativamente a agregação do solo, no que foi confirmado por DOYLE (1952), que verificou ser a CMC um eficiente agente agregativo de argilas caoliníticas, ilíticas e montmoriloníticas.

Segundo TAYLOR e BALBRIDGE (1954), aumentando-se o grau de substituição de grupos carboximetil por hidroxilas reativas, nas unidades da CMC, ocorre um maior efeito agregativo, havendo, no entanto, uma certa seletividade entre o tipo de solo e a CMC com alto grau de substituição, especificamente no caso de solos argilosos e barro-argilo limosos.

De acordo com MARTIN e ALDRICH (1955), a ação cimentante da CMC aumenta apreciavelmente com o aumento da acidez do solo.

O tratamento de uma pequena camada superficial de solo com 0,05% de CMC, evita, conforme TAYLOR e MARTIN (1953), o encrostamento, facilitando, assim, a emergência de certas culturas vegetais.

A permeabilidade dos solos é muito sensível à adição de CMC, tendo TAYLOR e BALBRIDGE (1954) mostrado que a aplicação de 0,05% de CMC aumenta dez vezes a permeabilidade de um solo argiloso e quatro vezes a de um barro limoso; ainda segundo estes autores, um teor de 0,1% de CMC aumenta, significativamente, o limite de plasticidade dos solos, enquanto que a umidade equivalente e o ponto de murchamento permanente não são afetados.

QUASTEL (1952) concluiu que a incorporação de

1% de CMC ao solo, aumenta a sua porosidade. O solo tratado com condicionadores químicos mantém, conforme a observação de CARLETON (1953), tanto o ar como a água em muito maior proporção que o solo não tratado.

2.4.1.2. Efeito do silicato de sódio

O silicato de sódio é um composto químico cujo processo manufatureiro consiste, essencialmente, na fusão conjunta de carbonato de sódio e areia, devidamente dosados, sendo que o cristal obtido é, posteriormente, dissolvido em água. Os tipos especiais de solução são obtidos pela adição de soda cáustica ou sílica, a fim de conseguir a proporção requerida de sílica para álcali, e evaporando a solução para se obter a concentração desejada. Portanto, além de variarem na relação sílica-álcali, os silicatos de sódio variam no conteúdo de água e tamanho da partícula, dependendo da finalidade proposta.

O silicato de sódio tem sido pesquisado como estabilizador de vários solos. Todavia, chegou-se à conclusão que, embora os silicatos de sódio se mostrem promissores como agentes estabilizantes, o solo deve ser previamente estudado e avaliado, uma vez que alguns deles respondem negativamente ao tratamento.

RUFF e DAVIDSON (1961) relataram que o exato mecanismo da estabilização do solo com silicato de sódio não é conhecido; sabe-se que este produto é usado em estabilização de solos principalmente porque reage com os sais de cálcio solúveis, presentes na solução aquosa, para formar silicatos de cálcio hidratados, gelatinosos e insolúveis, que são agentes cimentantes comprovadamente eficientes. A par de suas propriedades cimentantes, o silicato de cálcio gelatinoso melhora a estabilidade do solo preenchendo os seus vazios, embora expulsando a água.

À medida em que ocorre a formação do gel de silicato de sódio, o mesmo começa a absorver água e a se hidratar, endurecendo-se e alterando a aparência do solo cujas partículas são aglutinadas, mudando, assim, a granulometria da mistura e aumentando sua resistência à compactação; isto afeta não apenas a unidade ótima como, também, a própria densidade aparente seca máxima. Uma vez que a energia de compactação é mantida constante, no ensaio de compactação, um aumento na resistência do solo à compactação provocará um decréscimo na densidade.

Vail, citado por RUFF e DAVIDSON (1961), afirmou que a estrutura deste gel pode ser quebrada pela compactação e reformada, porém, o gel reformado não se constituirá em agente cimentante tão poderoso como antes; a quantidade de gel presente, num dado momento, depende da quantidade de água na mistura e da velocidade de formação do mesmo.

A eficiência de alguns aditivos sódicos sobre tipos particulares de solo foi estudada por MOH et alii (1962); estes autores concluíram que o hidróxido de sódio é eficiente em melhorar a resistência de todos os solos com teores de matéria orgânica baixos a moderados; sais sódicos de ácidos fracos não são eficientes em solos extremamente argilosos; o sulfato de sódio só é eficiente em solos arenosos contendo matéria orgânica; e, por fim, a eficiência de compostos sódicos decresce com o aumento da plasticidade e/ou teor de matéria orgânica do solo.

SINGH (1955) relatou que o efeito agregativo do silicato de sódio não é significante quando o mesmo é aplicado em doses pequenas (0,1% ou menos).

Quando o sódio compreende mais que 10 a 15% do total de bases trocáveis, ALLISON (1952) verificou que o solo tende a se dispersar; nestas condições, se irrigado ou cultivado, o solo se desagrega, perde sua estrutura favorável e torna-se relativamente impermeável à água e ar; a velocidade de inin

filtração da água de irrigação é diminuída e a drenagem interna torna-se restrita. JAMISON (1954) completou dizendo que, em altas concentrações, o silicato de sódio desenvolve forte alcalinidade no solo onde é aplicado.

Tanto os silicatos de sódio como os de potássio desenvolvem um grau de agregação satisfatório, tendo LAWS e PAGE (1946) observado que os silicatos de sódio de alta relação sílica-álcali apresentam maior efeito agregativo que os silicatos de baixa relação; por outro lado, silicatos de potássio de relação $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$ igual a 3,9:1,0 são mais eficientes que o equivalente em silicato de sódio.

Segundo DUTT (1948), é a fração sílica dos silicatos solúveis que contribui para a formação de agregados estáveis em água.

A adição de 0,25% de silicato de sódio aumentou, de acordo com LAWS e PAGE (1946), o grau de agregação do solo barro siltoso Wooster de 12,1 para 80,1%, tendo os autores observado que os agregados formados eram semelhantes, em tamanho e forma, àqueles encontrados naturalmente no solo; o grau de agregação do solo barro siltoso Clermont aumentou de 22,7 para 88,2% quando se aplicou 1,2%, em peso, de silicato de sódio; - no entanto, quando o silicato de sódio foi aplicado ao solo, - naturalmente bem estruturado, o seu efeito foi negativo. Paralelamente, os autores observaram que houve considerável agregação de partículas primárias em partículas secundárias, estáveis em água, de diâmetro inferior a 0,25 mm.

A incorporação de uma solução de silicato de sódio a um solo argiloso que exhibia características de materiais montmoriloníticos, fez com que este perdesse, segundo LAWS (1950), a maior parte das propriedades plásticas exibidas pelos solos muito argilosos e apresentasse propriedades comumente associadas aos solos barrentos; ocorreu, ainda, um notável aumento na friabilidade do solo que perdeu, também, muito da sua capacidade de contração e expansão.

2.4.2. Aditivos químicos e seu efeito sobre o solo-cimento

O uso de pequenas quantidades de aditivos químicos selecionados, em misturas de solo-cimento, resulta, de acordo com MATEOS et alii (1963), em um significativo aumento da resistência; contudo, sob condições normais, os autores chamaram a atenção para o fato de que o uso de aditivos químicos, em solo-cimento, pode ser anti-econômico, recomendando-os apenas para os casos em que o volume e o peso do material a ser estabilizado devem ser minimizados.

Infelizmente, a base de solo-cimento requer um revestimento betuminoso o qual, conforme HANDY et alii (1959), quase sempre custa mais que a própria estabilização do solo.

LAMBE e MOH (1957) concluíram que o uso de aditivos químicos pode ser uma medida mais eficiente e conveniente que o acréscimo na quantidade de cimento pois, exemplificando, a adição de 1 libra de carbonato de sódio, permitiu obter, nas mesmas condições, maior resistência que 10 libras de cimento. Ainda, segundo estes autores, o custo da mistura total, para se obter uma resistência comparável de 21 kg/cm^2 , é consideravelmente menor para o solo-cimento mais aditivos que apenas para o solo-cimento; com a combinação de solo-cimento e aditivos químicos, há, também, uma economia no manuseio dos materiais e, possivelmente, no processamento do solo. MATEOS et alii (1963), por sua vez, mostraram que, para uma resistência maior que $24,6 \text{ kg/cm}^2$, o uso de aditivos químicos só é econômico para solos barro siltosos; nos solos argilosos e barro arenosos, aquela resistência pode ser alcançada, com muito maior vantagem, aumentando-se a quantidade de cimento.

Estudando os efeitos de 29 aditivos sobre a resistência do solo-cimento, LAMBE e MOH (1957) afirmaram que os efeitos benéficos dos aditivos não eram devidos, meramente, à aceleração da hidratação do cimento, uma vez que estes efeitos

eram aparentes aos 28 dias, persistindo, ainda, por muitos meses; os autores afirmaram, também, que a influência da concentração dos aditivos é imprevisível, devendo seus níveis ótimos ser determinados através de pesquisas.

2.4.2.1. Efeito da carboximetilcelulose

Não há registrado, na literatura disponível, qualquer referência quanto ao uso deste produto como aditivo em misturas de solo-cimento.

2.4.2.2. Efeito do silicato de sódio

Já há algumas décadas se investiga a eficácia de um grupo de compostos metálicos alcalinos em melhorar as propriedades do solo-cimento.

HANDY et alii (1959) aspergiram corpos de prova de solo-cimento com uma solução de silicato de sódio e hidróxi do de sódio e observaram um aumento na resistência dos mesmos, de sorte que o silicato de sódio foi eficaz com o solo barro arenoso, enquanto que o hidróxido de sódio foi o melhor para o solo barro siltoso.

Segundo HANDY (1958), o tratamento com álcalis fortes favorece as reações do quartzo com estabilizadores alcalinos, tais como a cal ou o cimento Portland, podendo a resistência inicial ser elevada em 15 a 400%. Por sua vez, MOH et alii (1962) relataram que o pré-tratamento de solos muito argi losos, com pequenas quantidades de sais metálicos polivalentes e sais de cations orgânicos, melhora suas respostas à estabilização com cimento, reduzindo a expansão dos solos montmoriloní ticos; estes autores afirmaram, ainda, que os aditivos sódicos aumentam consideravelmente a resistência de todos os tipos de solo-cimento ao ataque de sulfatos.

MATEOS et alii (1963), estudando os efeitos de aditivos químicos sobre a resistência das misturas de solo-ci-

mento, verificaram que, em geral, a resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento aumenta diretamente com o teor de cada aditivo experimentado; contudo, o aditivo químico só é eficiente até um certo teor de cimento, acima do qual, qualquer acréscimo na resistência é atribuído, primeiramente, ao teor mais elevado de cimento e não, propriamente, à reação do aditivo com as partículas do solo. Além disso, o tipo e a porcentagem exata do aditivo químico são exclusivos para cada solo.

Conforme já se referiu no item 2.4.2., a influência da concentração dos aditivos não é previsível, tendo LAMBE e MOH (1957) mostrado que, um acréscimo de 0,5 a 1,0% de carbonato de sódio promove um efeito benéfico sobre a resistência do solo-cimento aos 7 dias, porém, tal efeito é deletério aos 28 dias.

Os estudos sobre os efeitos da relação sílica-álcali do silicato de sódio, quando usado como aditivo de solo-cimento, indicam que os silicatos de mais baixa relação tendem, de acordo com MOH *et alii* (1962), a produzir maiores resistências iniciais, porém, menores resistências finais, enquanto que silicatos de mais alta relação sílica-álcali retardam o processo de cimentação; conseqüentemente, há uma relação sílica-álcali ótima que concorre para a maior eficiência do silicato de sódio, como aditivo. Por outro lado, a resistência máxima depende da quantidade total de material cimentante o qual, por sua vez, é uma função do teor total de sílica e cálcio disponíveis; deste modo, maiores resistências são alcançadas utilizando-se de silicatos de mais alta relação sílica-álcali; no entanto, a resistência máxima depende, também, do total de cálcio disponível o qual, por sua vez, depende do teor de cimento; se a quantidade de silicato adicionada for muito alta, não haverá cálcio suficiente para precipitá-lo ou formar silicato de cálcio hidratado e, conseqüentemente, menores resistências serão esperadas. MOH *et alii* (1962) concluíram que a relação

sílica-álcali ótima tenderá a um maior valor se o teor de cimento for aumentado.

O silicato de sódio, além de fornecer silicatos reativos, eleva, também, o pH da mistura de solo-cimento e ataca os constituintes do solo.

MATEOS et alii (1963) relataram que o metasilicato de sódio, usado como aditivo em misturas de solo-cimento, - fornece sílica, que reage diretamente com o cálcio do cimento e forma silicato de cálcio e, possivelmente, hidróxido de sódio; o hidróxido de sódio, neste caso, reage com a sílica do solo, libera mais sílica, e, como resultado, cria mais silicato de cálcio. Segundo estes autores, isto significa que o cimento Portland deve fornecer cálcio suficiente para reagir tanto com a sílica das partículas do solo como com a sílica do metasilicato de sódio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho lançou-se mão dos seguintes materiais e métodos:

3.1. Materiais

3.1.1. Solos

Foram pesquisados dois solos, representativos de duas classes texturais distintas, tomados ao acaso, os quais foram submetidos aos diversos tratamentos com a finalidade de avaliar os seus efeitos sobre a qualidade do solo-cimento formado. As amostras de ambos os solos foram coletadas à profundidade média de 20 a 50 cm.

3.1.1.1. Solo argiloso

Este solo, cujas propriedades estão descritas no QUADRO 1, foi tomado de uma área pertencente à Estação Experimental "Presidente Médici", da Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, no Município do mesmo nome, situado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo.

Os valores médios anuais de precipitação e temperatura são, respectivamente, 1328 mm e 19,9^oC; o tipo climático é definido como Cfa (Clima úmido mesotérmico), pela classificação de Köppen, tendo SOUZA (1973) verificado que o relevo

QUADRO 1 - Propriedades dos solos empregados

	Solo	Argiloso	Arenoso
Composição textural ^(a) (% em peso)	Areia grossa	2,8	4,0
	Areia fina	25,6	73,4
	Silte	20,8	5,0
	Argila	50,8	17,6
Limites de consistência ^(b) (%)	Limite de liquidez	41,55	17,62
	Limite de plasticidade	28,29	NP
	Índice de plasticidade	13,26	-
Classificação	AASHO	A ₇₋₆₍₉₎	A ₂₋₄₍₀₎
	Unificada	CI	SU
	F.A.A.	E-7	E-2
	U.S.B.S. ^(c)	argila	barro arenoso
	Pedológica	TE ^(d)	LVE-ar. ^(e)
	S.S.S. ^(f)	ultisol	oxisol
Propriedades químicas ^(g)	Capac. Troca Cat., e.mg/100g	7,41	2,73
	Soma de bases, e.mg/100g	3,73	0,01
	pH	5,6	4,6
	Matéria orgânica, %	1,91	0,47
Composição mineralógica ^(h) (%)	Caolinita	64,0 - 75,5	60,0 - 85,0
	Gibbsita	3,0 - 11,5	2,2 - 2,5
	Alofana	13,3 - 18,0	11,6 - 13,9

(a) Baseada na classificação da AASHO (American Association of State - Highway Officials), ASTM (American Society for Testing Materials) e FAA (Federal Aviation Agency): areia grossa: 2,00 a 0,42 mm; areia fina: 0,42 a 0,074 mm; silte: 0,074 a 0,005 mm; argila: inferior a 0,005 mm.

(b) Determinados na fração menor que 0,42 mm

(c) United States Bureau of Soils, classificação trilinear

(d) Terra Roxa Estruturada

(e) Latossol Vermelho Escuro-fase arenosa

(f) SOIL SURVEY STAFF (1960), 7ª Aproximação

(g) Determinadas na fração menor que 2,0 mm

(h) Apud SOUZA (1973) e AVELAR (1971); até a profundidade de 2,5 m

é ondulado a fortemente ondulado, numa altitude média de 800 metros.

A geologia da Fazenda Lageado (antigo nome da Estação Experimental "Presidente Médici") está representada, segundo ALMEIDA (1964), pela formação Serra Geral, do Grupo São Bento, assentada sob formações Cenozóicas - sedimentos modernos e materiais do quaternário, em determinadas áreas. A formação Serra Geral é representada especificamente pelas rochas eruptivas básicas, basaltos e produtos de alterações hidrotermais pertencentes a derrames mais antigos.

3.1.1.2. Solo arenoso

Este solo foi tomado de uma área pertencente à Fazenda Experimental São Manoel, da Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, no Município de São Manoel, região Centro-Sul do Estado de São Paulo.

A precipitação e a temperatura, na região, apresentam valores médios anuais de 1053 mm e 20,1°C, respectivamente; o tipo climático é definido como Cwa (mesotérmico de inverno seco ou sub-tropical úmido), pela classificação de Köppen, tendo AVELAR (1971) verificado que o relevo é ondulado e a altitude média é de 725 metros. A geologia da região se enquadra no Período Cretáceo da Era Mesozóica, representada pela série Bauru.

De acordo com a COMISSÃO DE SOLOS (1960), este solo, denominado Latossol Vermelho Escuro - fase arenosa, apresenta as seguintes características: profundo, arenoso, com horizonte B latossólico, acentuadamente drenado, cor geralmente vermelha a vermelha escura, originado do arenito Bauru sem cimento calcárico, pequena variação textural ao longo do perfil, observando-se, porém, ligeiro aumento do teor de argila à medida que o mesmo se aprofunda. A textura deste solo, apesar de uniforme dentro do mesmo perfil, pode apresentar sensível variação de um perfil para outro, encontrando-se, em alguns perfis, princi

palmente nos de textura mais leve, pontuações de areia lavada.

No QUADRO 1 estão, também, descritas as propriedades principais deste solo.

3.1.2. Aditivos químicos

Foram estudados dois aditivos químicos, previamente selecionados, os quais, aplicados aos solos, tiveram seus efeitos analisados.

3.1.2.1. Carboximetilcelulose

A CMC (carboximetilcelulose), de fórmula geral $Rn.OCH_2COONa$, é obtida tratando-se celulose alcalina com cloroacetato de sódio.

Apresenta-se na forma de grânulos brancos e, segundo o MERCK INDEX (1968), sua solubilidade em água depende do grau de substituição. A CMC solúvel em água, de viscosidade variável, dissolve-se bem tanto em água fria como quente; a presença de sais metálicos pouco afeta sua viscosidade, sendo as soluções estáveis entre pH 2 e 10; abaixo de pH 2 precipita-se, e, acima de pH 10, sua viscosidade decresce rapidamente.

3.1.2.2. Silicato de sódio

O silicato de sódio empregado neste trabalho é do tipo P 84, fabricado pela Companhia Imperial de Indústrias Químicas do Brasil. Trata-se de uma solução neutra, de relação sílica-álcali igual a 3,20, contendo 30,1% de SiO_2 em peso, 9,4% de Na_2O e 60,5% de água; seu peso específico, a $20^{\circ}C$, é $42,7^{\circ}Bé$ (densidade $1,42 g/cm^3$), e sua viscosidade média, a $20^{\circ}C$, é da ordem de 900 centipóises.

O silicato de sódio é apresentado sob a forma de solução aquosa, transparente e límpida, que, em contacto com o ar, absorve gás carbônico o qual provoca, lentamente, a formação de gel, tornando-a turva; sua viscosidade varia de um tipo

para outro e está inversamente relacionada com a temperatura.

3.1.3. Cimento

O cimento utilizado é o do tipo Portland comum, marca Votoran, adquirido, comercialmente, em casa idônea do ramo de materiais de construção.

3.1.4. Equipamentos

3.1.4.1. Prensa

O rompimento dos corpos de prova de solo-cimento foi feito em prensa de procedência alemã, marca LOSENHAUSENWERK com capacidade máxima de 6 toneladas e sensibilidade de 20 kg. Tal prensa é dotada de duas outras escalas de menor capacidade, uma de 3,0 toneladas e sensibilidade de 10 kg e outra de 1,2 toneladas e sensibilidade de 5 kg, que eram usadas conforme a conveniência. A máquina dispõe, também, de um dispositivo que permite regular a velocidade de carregamento.

3.1.4.2. Outros equipamentos

Para se proceder aos ensaios, foram utilizados, ainda, equipamentos como o de Próctor, nos ensaios de compactação e moldagem dos corpos de prova; aparelho de Casagrande, nos ensaios de consistência do solo; placa e membrana de Richards, na determinação das curvas características de umidade; densímetro, peneirador automático e jogo de peneiras, nas análises granulométricas do solo; bomba de vácuo e aquecedor de banho-maria, na determinação dos índices físicos; incluem-se, ainda, -balanças, estufas, picnômetros, extrator de corpos de prova , etc.

3.2. Métodos

3.2.1. Peneiramento a seco

A técnica do peneiramento a seco consistiu em se peneirar uma amostra de 200 g de solo, compreendendo a fração menor do que 4,76 mm (peneira nº 4), durante 10 minutos, em peneirador automático dotado de reostato, através de um jogo de seis peneiras, dispostas no sentido decrescente da abertura de suas malhas, a saber, peneiras nº 10 (2,00 mm), nº 18 (1,00 mm), nº 35 (0,50 mm), nº 60 (0,25 mm), nº 140 (0,105 mm) e nº 270 (0,053 mm), anotando-se o peso da porção de solo retida em cada uma delas e tomando-se o cuidado de, simultaneamente, separar uma certa quantidade de terra para a determinação da umidade.

Após esta primeira operação, a amostra era recomposta e novamente submetida ao processo de peneiramento, tal qual descrito no parágrafo anterior. E assim se fez, ainda, uma terceira vez, para se obter uma idéia da resistência relativa do solo à demolição mecânica.

Através desta técnica de peneiramento determinam-se, simultaneamente, a distribuição em tamanho e a estabilidade mecânica dos agregados, tal como pressuposta por CHEPIL (1962).

Como, segundo O'BRIEN (1952), a eficiência de um aditivo químico estabilizante se mede pela proporção de agregados estáveis em água formados, procurou-se determinar, através da técnica do peneiramento a seco, não apenas a estabilidade mecânica dos agregados formados, mas, também, a expressão do efeito máximo do estabilizante sobre a resistência relativa à desagregação, em função do tempo, quando os mesmos eram submetidos ao peneiramento após um, dois, tres e quatro dias, a contar do momento da aplicação do aditivo ao solo.

Desta maneira, conseguiu-se determinar depois de quanto tempo, dentro do período considerado, o aditivo químico exerce o seu maior efeito estabilizante sobre a agregação do solo, traduzido pela maior resistência à demolição mecânica pro

vocada pelo peneiramento a seco ou, por outro lado, pela persistência da proporção de agregados estáveis formados, após submissão ao processo de peneiramento.

Os resultados do peneiramento a seco são expressos em porcentagem, em peso seco, usando, para comparar o efeito dos tratamentos, apenas a porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60 (0,25 mm), pois, de acordo com Tiulin, citado por BAVER (1966), esta é a fração responsável pela estabilidade estrutural do solo.

Determinou-se, também, o Módulo de Finura dos agregados do solo, a partir dos dados do peneiramento a seco, para avaliar e comparar o efeito dos tratamentos sobre a agregação. O Módulo de Finura foi calculado da maneira usual, dividindo por 100 a somatória das porcentagens acumuladas nas peneiras consideradas.

3.2.2. Aplicação dos tratamentos

Os tratamentos com aditivos químicos foram aplicados ao solo que, em todos os casos, compreendeu a fração menor do que 4,76 mm (100% passando em peneira nº 4), no seu teor de umidade natural, e a ele incorporados, adicionando-se, em seguida, uma quantidade de água definida, indispensável para a solubilização dos mesmos.

Adotou-se, no presente trabalho, a indicação de RAMACHARLU (1956), para quem a quantidade ideal de água, a ser adicionada ao solo para solubilizar o condicionador a ele misturado, corresponde a $3/4$ do seu limite de plasticidade.

No caso do solo argiloso, determinou-se o teor de umidade correspondente a $3/4$ do seu limite de plasticidade, fixando-o para este solo, independentemente do tipo de aditivo e da dose considerada. Em se tratando do solo arenoso, não plástico, lançou-se mão de um artifício, determinando-se o teor de umidade, correspondente aos $3/4$ do limite de plasticidade

do solo argiloso, por via indireta; para tal, obtiveram-se as curvas características de umidade de ambos os solos, conforme a técnica descrita por RICHARDS (1947,1949), de tal maneira que, partindo-se da curva característica do solo argiloso, extrapolou-se o valor do potencial matricial da água correspondente ao teor de umidade definido pelos $3/4$ do limite de plasticidade, com o qual entrou-se no gráfico da curva característica do solo arenoso para encontrar o teor de umidade equivalente àquele potencial matricial; este teor de umidade foi fixado como o ideal para o solo arenoso, independentemente do tipo de aditivo e da dose considerada.

As doses de aditivos empregadas foram 0,1% e 0,25% de carboximetilcelulose e 0,6% e 1,2% de silicato de sódio, em relação ao peso do solo seco.

A quantidade indicada de carboximetilcelulose foi totalmente incorporada ao solo e a ele misturada, recebendo, em seguida, o volume estipulado de água e sendo, a mistura, novamente uniformizada. A solução de silicato de sódio, aplicada ao solo juntamente com a água, foi, também, uniformemente misturada.

Logo após a aplicação dos tratamentos e por indicação de ensaios preliminares, a mistura foi deixada em repouso, em condições ambientais, pelo período de um dia, antes de ser ensaiada.

3.2.3. Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi feita de acordo com o Método Brasileiro MB-32, da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), pela combinação de análise por sedimentação e por peneiramento; esta análise foi determinada na fração do solo menor que 2,00 mm (peneira nº 10), sendo o diâmetro das partículas, no ensaio de sedimentação, calculado pelo nomograma de Casagrande.

Os resultados desta análise foram expressos atra

vés de curvas de distribuição granulométrica e em quadros de composição granulométrica dos solos analisados.

3.2.4. Limites de consistência

A determinação do limite de liquidez do solo foi feita de acordo com a técnica prescrita pelo Método Brasileiro MB-30, da ABNT, utilizando-se do aparelho de Casagrande, enquanto que a determinação do limite de plasticidade foi feita de conformidade com o Método Brasileiro MB-31.

Ambos os limites de consistência foram determinados na fração de solo menor que 0,42 mm (peneira nº 40).

3.2.5. Índices físicos

O peso específico aparente seco (ρ_o) foi obtido vertendo-se o solo peneirado (fração menor que 4,76 mm) em recipiente cilíndrico de volume conhecido e adensando-o, à custa de pancadas laterais com um bastão de borracha, até que, aparentemente, não se notasse mais variação de volume; após o acerto e nivelamento da parte superior, o peso do volume do solo úmido foi anotado e sua umidade natural determinada. O peso específico aparente seco expressa o peso seco de um determinado volume de solo.

A umidade natural do solo (h) foi determinada pelo método da estufa; uma pequena porção do solo foi pesada e levada à estufa à temperatura de 105 a 110°C, até constância de peso. A umidade do solo define a relação entre o peso da água contida nos vazios de um certo volume de solo pelo peso dos sólidos contidos neste mesmo volume.

O peso específico dos sólidos (ρ_s) foi determinado pelo método do picnômetro, descrito por NOGUEIRA (1973), utilizando-se o material que passa na peneira nº 10 (2,0 mm).

O índice de vazios (e) e a porosidade (n) do solo foram calculados a partir de fórmulas desenvolvidas em mecâ

nica dos solos e deduzidas de relações entre os índices físicos, de tal maneira que

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} - 1 \quad e \quad n = \frac{e}{1 + e} (\%)$$

3.2.6. Compactação

Os ensaios de compactação compreenderam

3.2.6.1. Compactação do solo

Para o traçado da curva de compactação do solo empregou-se o ensaio normal de Próctor, padronizado pela ABNT em seu Método Brasileiro MB-33, determinando-se a densidade aparente máxima e a umidade ótima correspondente.

3.2.6.2. Compactação do solo-cimento

O ensaio de compactação do solo-cimento foi feito de acordo com o Método SC-1 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972), que fixa o modo pelo qual se determina a correlação entre o teor de umidade e a densidade aparente de uma mistura de solo-cimento.

Empregou-se, neste ensaio, a mesma aparelhagem e a mesma energia de compactação do ensaio normal de compactação de solos, referido no item 3.2.6.1.

3.2.7. Dosagem do solo-cimento

A escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação foi feita de conformidade com as normas elaboradas pela PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1971) que indicam os prováveis teores necessários e o teor a ser adotado no ensaio de compactação, em função da classificação do solo segundo a AASHO.

Os teores de cimento para o ensaio de resistência à compressão foram tirados de tabelas incluídas nas normas

de dosagem da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1971) que apresentam uma indicação dos prováveis teores de cimento necessários, em função das características físicas do solo e da densidade aparente máxima obtida no ensaio de compactação.

3.2.8. Moldagem de corpos de prova de solo-cimento

A moldagem de corpos de prova de solo-cimento foi feita de acordo com o Método SC-2, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972), que fixa o modo pelo qual se moldam corpos de prova de solo-cimento a serem submetidos ao ensaio à compressão simples.

A aparelhagem empregada é a mesma indicada para o ensaio normal de compactação de solos, referido no item 3.2.6.1.

3.2.9. Ensaio à compressão de corpos de prova de solo-cimento

O ensaio à compressão foi feito de acordo com o Método SC-4, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972), que fixa o modo pelo qual devem ser rompidos à compressão os corpos de prova de solo-cimento.

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida até 4 horas antes do ensaio quando, então, foram removidos e colocados totalmente imersos em água; após 4 horas em imersão, os corpos de prova foram retirados da água, enxutos superficialmente, e rompidos à compressão pela elevação progressiva da carga.

Adotou-se uma velocidade de carregamento de aproximadamente $1,4 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$, segundo recomendação da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1971), correspondendo, essa velocidade, à fase dos pequenos carregamentos, pois, próximo da ruptura, ela se torna praticamente incontrolável.

Os corpos de prova, para este ensaio, foram exe

cutados com dois teores de cimento e rompidos com as idades de 7 e 28 dias.

3.2.10. Absorção de água

A determinação da absorção de água por corpos de prova de solo-cimento foi feita de acordo com a indicação de JONES (1966). Após moldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida durante uma semana sendo, então, removidos e colocados em um recipiente com água até uma altura de 7,5 cm (aproximadamente $2/3$ da altura do corpo de prova) e lá deixados por mais uma semana; findo este prazo, os corpos de prova foram retirados da água, enxutos superficialmente e pesados, anotando-se seus pesos; em seguida, foram deixados a secar, em condições ambientais, pelo período de sete dias, sendo novamente pesados e seus pesos anotados.

A diferença entre o peso úmido anotado após o contacto dos corpos de prova de solo-cimento com a água e o peso úmido exibido após sete dias de secagem ao ar, representa a quantidade de água perdida pelos corpos de prova após o tratamento com água, ou, por outro lado, a quantidade de água absorvida pelos corpos de prova se submetidos ao processo inverso.

3.2.11. Análise estatística

O efeito da aplicação dos tratamentos, sob seus diversos aspectos, foi avaliado através da análise estatística dos dados fornecidos pelo experimento.

Todavia, além da análise paramétrica normal aplicada aos QUADROS 16 e 17 (fatorial $5 \times 2 \times 2$) e ao QUADRO 18 (fatorial 5×2 , com o uso da transformação $y_{ij} = \text{arc sen} \sqrt{x_{ij}/100}$, optou-se pela análise não paramétrica dos demais dados (testes de Friedman e de Kruskal-Wallis), devido ao seu pequeno número e à própria natureza dos mesmos.

Tanto o teste de Friedman como o de Kruskal-Wallis foram complementados com o emprego das comparações múltiplas correspondentes para localizar as diferenças significativas ocorridas entre pares de tratamentos.

3.2.11.1. Análise não paramétrica

A estatística não paramétrica permite estruturar, segundo CAMPOS (1976), certos testes que, trabalhando com as ordens das observações, constituem os diretos competidores das análises de variância do campo paramétrico cujo modelo matemático exige normalidade dos dados, homogeneidade das variâncias de tratamentos, erros ou desvios independentes e efeitos aditivos; se estas exigências forem satisfeitas, no campo paramétrico, os testes não paramétricos serão, geralmente, menos e eficientes. Entretanto, de acordo com este autor, os testes não paramétricos apresentam uma maior versatilidade, desde que não exigem normalidade dos dados e nem a homogeneidade das variâncias dos tratamentos, permitindo a obtenção de conclusões mais acuradas; ao lado da grande flexibilidade e simplicidade dos testes não paramétricos, os mesmos podem ser aplicados, com maior eficiência, no caso de pequenas amostras onde, às vezes, embora o modelo esteja satisfeito, a aplicação do teste F não é muito conveniente ou recomendável.

3.2.11.1.1. Teste de Kruskal-Wallis

O teste de Kruskal-Wallis é um teste F, substituído das análises paramétricas dos ensaios inteiramente casualizados, aplicado às ordens das $N = \sum_{i=1}^k n_i$ observações, quando classificadas conjuntamente; este teste permite averiguar se k amostras independentes são provenientes de uma mesma população ou de populações idênticas, ou se provêm de populações distintas.

As pré-suposições deste teste são:

- as amostras são casualizadas e independentes;
- as observações provêm de populações com distribuição contínua.

As hipóteses consideradas são:

- (1) $H_0: t_1 = t_2 = \dots = t_k$ (t_i = efeito do tratamento i);
- (2) H_a : pelo menos 2 tratamentos diferem entre si.

As $N = \sum_{i=1}^k n_i$ observações são classificadas conjuntamente, em ordem crescente, considerando R_{ij} a ordem x_{ij} .

Assim, define-se,

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

$$\text{onde } R_i = \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij}$$

Para se testar H_0 vs H_a , ao nível α de significância, rejeita-se H_0 em favor de H_a se

$$H \geq h[\alpha, k, (n_1, n_2, \dots, n_k)]$$

$$\text{onde } P_0 \left\{ H \geq h[\alpha, k, (n_1, n_2, \dots, n_k)] \right\} = \alpha$$

As tabelas que dão os limites h , para $n_i \leq 5$ e $k = 3$, são apresentadas por HOLLANDER e WOLFE (1973); para $k > 3$, aplica-se a distribuição de χ^2 , isto é, consulta-se o ní

vel de significância, para o valor H calculado, numa tabela comum de χ^2 , com k-1 graus de liberdade, como a reproduzida por GOMES (1966).

No caso de ocorrerem empates entre as observações, procede-se ao desempate considerando, para cada observação do grupo, a média das ordens que seriam a elas atribuídas se não houvesse o empate, substituindo-se H por H', de maneira que

$$H' = \frac{H}{1 - \frac{\sum_{i=1}^g T_i}{N^3 - N}}$$

onde: g = número de grupos empatados

$$T_i = t_i^3 - t_i$$

t_i = nº de observações empatadas, no grupo i.

3.2.11.1.2. Teste de Friedman

O teste de Friedman pode ser considerado como um teste F, substituto das análises paramétricas de um delineamento em blocos casualizados, aplicado às ordens das k observações dentro de cada bloco, admitindo-se que, dentro de cada bloco, os k tratamentos estão sujeitos às mesmas condições ambientais; este teste permite averiguar se k amostras (tratamentos) são provenientes de uma mesma população ou de populações análogas, ou se provêm de populações distintas.

As pré-suposições deste teste são:

- os erros são independentes;
- as observações provêm de populações com distribuição contínua, caso contrário, ele é apenas aproximado.

As hipóteses consideradas são:

- (1) $H_0: t_1 = t_2 = \dots = t_k$ (t_i = efeito do tratamento i);
- (2) H_a : pelo menos 2 tratamentos diferem entre si.

As k observações são classificadas, dentro de cada bloco, definindo-se

$$S = \frac{12}{n \cdot k (k + 1)} \sum_{i=1}^k R_i^2 - 3n(k + 1)$$

onde: R_i = soma das ordens atribuídas ao tratamento i , nos n blocos.

Para se testar H_0 vs H_a , ao nível α de significância, rejeita-se H_0 em favor de H_a se

$$S \geq s(\alpha, k, n)$$

$$\text{onde } P_0 \left[S \geq s(\alpha, k, n) \right] = \alpha$$

Os valores de $s(\alpha, k, n)$ são tabelados e não permitem interpolação. As tabelas, apresentadas por HOLLANDER e WOLFE (1973), dão valores para $k = 3, 4$ e 5 e para um número variável de blocos, de acordo com k ; para $k > 5$ ou para um número de blocos não previsto nas tabelas, deve se utilizar a aproximação para grandes amostras.

No caso de ocorrerem empates entre as observações de um mesmo bloco, utiliza-se a média das ordens, substituindo-se S por S' , de maneira que

$$S' = \frac{S}{1 - \frac{\sum_j T_j}{n \cdot k (k^2 - 1)}}$$

$$\text{onde: } T_j = \sum_i t_{ij}^3 - k$$

t_{ij} = tamanho do grupo i empatado no bloco j

3.2.11.1.3. Comparações múltiplas

Nas análises de variância dos testes não paramétricos, quando se rejeita a hipótese H_0 em favor de H_a , admite-se que pelo menos dois tratamentos diferem entre si; assim, a finalidade das comparações múltiplas é localizar, quando exist

tem, as diferenças significativas entre pares de tratamentos.

As comparações múltiplas podem ser estabelecidas entre todos os pares de tratamentos ou envolvendo apenas os contrastes tratamentos vs controle.

a) comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos

De entre os vários métodos relatados por CAMPOS (1976), para o caso das comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos, o método exato se aplica somente quando os tratamentos são igualmente repetidos.

Consideram-se os pares de tratamentos e determina-se

$$| R_i - R_j |$$

onde R_i e R_j representam as somas das ordens atribuídas aos tratamentos i e j , na classificação conjunta das N observações referentes aos k tratamentos.

Ao invés de se referir ao "nível de significância", refere-se, no caso, à "taxa de erro experimental", que também se denomina α .

Admite-se, pois, que

$$t_i \neq t_j \text{ se}$$

$$| R_i - R_j | \geq y(\alpha, k, n)$$

onde: $n_1 = n_2 \dots = n_k = n$, sendo os valores de $y(\alpha, k, n)$ obtidos em tabelas.

$$P_0 \left[| R_i - R_j | < y(\alpha, k, n) \right] = 1 - \alpha$$

isto é, sob H_0 , admite-se que a probabilidade de todas as $\frac{k(k-1)}{2}$ diferenças $(R_i - R_j)$ serem simultaneamente menores do que $y(\alpha, k, n)$ é igual a $1 - \alpha$.

No caso de empates entre as observações, utiliza-se as ordens médias para proceder ao desempate.

b) comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle

Designando o "controle" (ou "testemunha") por t_1 e admitindo-se k tratamentos, pode-se fazer $(k-1)$ comparações referentes às diferenças do tipo:

$$|R_i - R_1| \quad (i = 2, 3, \dots, k)$$

que envolve o tratamento t_i e o controle t_1 .

Para as comparações bilaterais admite-se

$$t_i \neq t_1 \text{ se}$$

$$|R_i - R_1| \geq y(\alpha; k-1; n)$$

$$\text{onde: } P_0 \left[|R_i - R_1| < y(\alpha; k-1; n) \right] = 1 - \alpha,$$

englobando, simultaneamente, todas as $(k-1)$ desigualdades.

As tabelas que dão os valores de $y(\alpha; k-1; n)$ - estão estruturadas apenas para $k = 3$ e $n \leq 6$ e com tratamentos igualmente repetidos; fora desses casos, devem ser utilizadas as aproximações para grandes amostras.

Para grandes amostras, igualmente repetidas, onde se tem $n_1 = n_2 = \dots = n_k = n$, ou ainda, para $k > 3$, admite-se que, para o teste bilateral,

$$t_i \neq t_1 \text{ se}$$

$$|\bar{R}_i - \bar{R}_1| \geq |m|(\alpha; k-1; \rho) \sqrt{\frac{N(N+1)}{6n}} \quad (1)$$

$$\text{onde: } \bar{R}_i = \frac{R_i}{n} \quad \text{e} \quad \bar{R}_1 = \frac{R_1}{n}$$

$|m|(\alpha; k-1; \rho) =$ valor tabelado para o limite do máximo de $k-1$ variáveis com distribuição $N(0,1)$ e com correlação comum $\rho = \frac{n}{n_1+n} = \frac{n}{n+n} = \frac{1}{2}$

A expressão (1) aplica-se nos casos de compara

ções múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle em complementação ao teste de Kruskal-Wallis; em se tratando do teste de Friedman, utiliza-se a expressão (2) para as comparações múltiplas bilaterais, admitindo-se que

$$t_i \neq t_1 \text{ se}$$

$$|R_i - R_1| \geq |m| (\alpha; k - 1; \mathcal{F}) \sqrt{\frac{n \cdot k (k + 1)}{6}} \quad (2)$$

4. RESULTADOS

Observando a mesma disposição dos assuntos enumerados no item 3.2., os resultados fornecidos pelo experimento são apresentados a seguir.

A porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), que representa a fração do solo responsável pela sua estabilidade estrutural, está registrada nos QUADROS 2 e 3, enquanto que os QUADROS 4 e 5 apresentam os valores do Módulo de Finura dos agregados de ambos os solos, calculados a partir dos dados fornecidos pelo peneiramento a seco.

A quantidade de água necessária para solubilizar os aditivos químicos em mistura com o solo, correspondente a $\frac{3}{4}$ do seu limite de plasticidade, foi de 21,22%, em peso, para o solo argiloso, e 5,93% para o solo arenoso, sendo este valor encontrado, indiretamente, através da FIGURA 1, que estabelece a equivalência entre os teores de umidade de ambos os solos estudados, expressos volumetricamente, a um mesmo potencial matricial.

Nos QUADROS 6 e 7 estão relatados os resultados das análises granulométricas dos solos argiloso e arenoso, respectivamente, juntamente com os tratamentos a eles aplicados, enquanto que as FIGURAS 2 a 11 contêm a representação gráfica de tais análises, expressando-as através das curvas de distribuição granulométrica dos solos.

O efeito da aplicação dos tratamentos sobre os limites de liquidez e plasticidade dos solos foi pesquisado e

QUADRO 2 - Porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), para o solo argiloso.

SOLO ARGILOSO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1º DIA	A ^(a)	87,73	95,98	96,49	96,78	95,81
	B ^(b)	85,31	92,87	95,19	95,69	94,81
	C ^(c)	85,61	92,33	94,10	95,09	94,01
	\bar{x}	86,22	93,73	95,26	95,85	94,88
2º DIA	A	87,11	93,14	92,05	95,19	95,40
	B	85,20	90,22	90,41	92,57	93,91
	C	84,51	88,65	89,62	91,73	92,77
	\bar{x}	85,61	90,67	90,69	93,16	94,03
3º DIA	A	86,15	88,69	93,77	91,69	93,16
	B	84,42	87,52	92,56	90,23	91,90
	C	83,00	85,93	91,26	88,92	91,26
	\bar{x}	84,52	87,38	92,53	90,28	92,11
4º DIA	A	86,55 ^(d)	87,99	90,12	91,99	92,23
	B	86,95 ^(d)	88,06	89,74	90,00	90,39
	C	86,32 ^(d)	85,32	88,67	88,45	90,18
	\bar{x}	86,61	87,12	89,51	90,15	90,93

- (a) Primeira peneiragem da amostra de solo
 (b) Segunda peneiragem da amostra recomposta
 (c) Terceira peneiragem da amostra novamente recomposta
 (d) Análise refeita, em virtude da perda acidental dos da
 dos originais.

TEST. = Testemunha
 CMC = Carboximetilcelulose
 SS = Silicato de sódio
 \bar{x} = média

QUADRO 3 - Porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), para o solo arenoso.

SOLO ARE- NOSO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1º DIA	A ^(a)	62,79	55,43	77,47	70,81	66,74
	B ^(b)	58,19	62,61	72,38	67,52	64,08
	C ^(c)	54,81	60,43	69,66	64,82	63,72
	\bar{x}	58,60	62,82	73,17	67,72	64,85
2º DIA	A	59,64	61,10	73,60	67,96	63,20
	B	57,91	58,03	69,63	67,14	69,15
	C	57,24	57,99	63,43	63,58	61,29
	\bar{x}	58,26	59,04	68,89	66,23	64,55
3º DIA	A	58,72	58,83	62,47	67,08	63,94
	B	55,10	59,49	61,91	68,09	63,70
	C	54,95	58,51	59,12	65,86	59,45
	\bar{x}	56,26	58,94	61,17	67,01	62,36
4º DIA	A	67,77 ^(d)	58,76	65,90	67,83	64,22
	B	60,39 ^(d)	56,53	62,91	65,41	61,06
	C	58,19 ^(d)	54,44	62,02	65,22	59,90
	\bar{x}	62,12	56,58	63,61	66,15	61,73

- (a) Primeira peneiragem da amostra de solo
 (b) Segunda peneiragem da amostra recomposta
 (c) Terceira peneiragem da amostra novamente recomposta
 (d) Análise refeita, em virtude da perda acidental dos dados originais.

TEST. = Testemunha
 CMC = Carboximetilcelulose
 SS = Silicato de sódio
 \bar{x} = média

QUADRO 4 - Módulo de Finura dos agregados do solo argiloso

SOLO ARGILOSO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1º DIA	A ^(a)	4,16	4,65	4,72	4,94	4,72
	B ^(b)	4,04	4,46	4,64	4,86	4,63
	C ^(c)	4,04	4,42	4,59	4,80	4,58
	\bar{x}	4,08	4,51	4,65	4,87	4,64
2º DIA	A	4,12	4,41	4,56	4,66	4,79
	B	4,02	4,28	4,36	4,52	4,70
	C	3,98	4,20	4,32	4,46	4,63
	\bar{x}	4,04	4,30	4,41	4,55	4,71
3º DIA	A	4,10	4,13	4,50	4,43	4,51
	B	4,02	4,07	4,39	4,35	4,44
	C	3,93	3,99	4,34	4,28	4,40
	\bar{x}	4,02	4,06	4,41	4,35	4,45
4º DIA	A	4,11 ^(d)	4,11	4,43	4,57	4,45
	B	4,11 ^(d)	4,08	4,38	4,45	4,36
	C	4,08 ^(d)	3,98	4,33	4,37	4,33
	\bar{x}	4,10	4,06	4,38	4,46	4,38

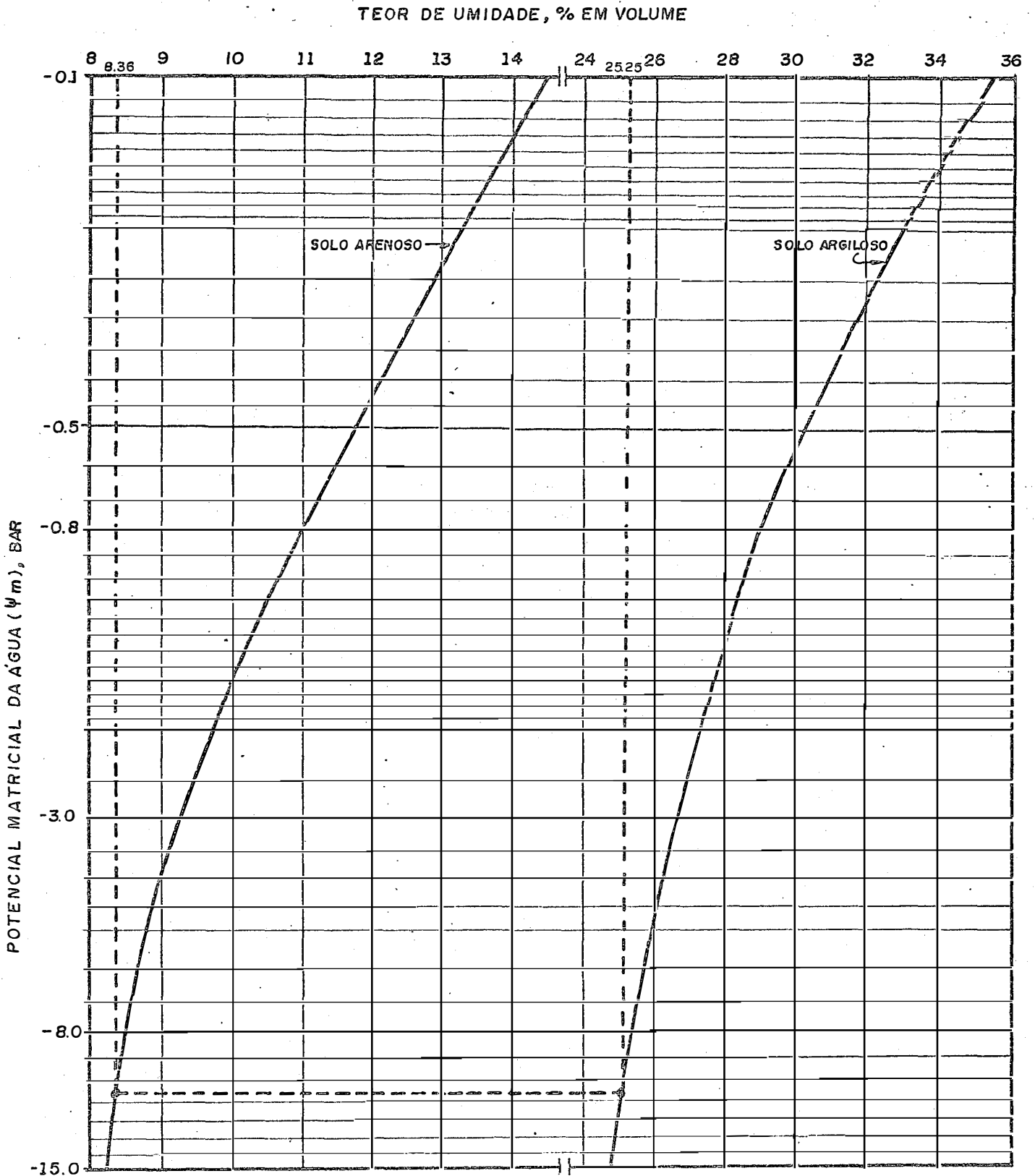
- (a) Primeira peneiragem da amostra de solo
 (b) Segunda peneiragem da amostra recomposta
 (c) Terceira peneiragem da amostra novamente recomposta
 (d) De análise refeita, em virtude da perda acidental dos dados originais

QUADRO 5 - Módulo de Finura dos agregados do solo arenoso

SOLO ARENOSO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1º DIA	A ^(a)	2,76	2,72	3,08	2,87	2,73
	B ^(b)	2,62	2,65	2,95	2,77	2,66
	C ^(c)	2,56	2,61	2,87	2,72	2,64
	\bar{x}	2,65	2,66	2,97	2,79	2,68
2º DIA	A	2,66	2,67	3,08	2,83	2,69
	B	2,61	2,61	2,95	2,80	2,76
	C	2,60	2,59	2,77	2,72	2,66
	\bar{x}	2,62	2,62	2,93	2,78	2,70
3º DIA	A	2,64	2,62	2,75	2,79	2,70
	B	2,55	2,64	2,72	2,80	2,68
	C	2,55	2,61	2,66	2,72	2,61
	\bar{x}	2,58	2,62	2,71	2,77	2,66
4º DIA	A	2,87 ^(d)	2,63	2,84	2,83	2,73
	B	2,67 ^(d)	2,57	2,74	2,75	2,65
	C	2,63 ^(d)	2,59	2,72	2,74	2,62
	\bar{x}	2,72	2,60	2,77	2,77	2,67

- (a) Primeira peneiragem da amostra de solo
(b) Segunda peneiragem da amostra recomposta
(c) Terceira peneiragem da amostra novamente recomposta
(d) De análise refeita, em virtude da perda acidental dos dados originais

FIGURA. 1- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMIDADE DOS SOLOS ARGILOSO E ARENOSO



QUADRO 6 - Composição granulométrica do solo argiloso, em porcentagem

FRAÇÃO DO SOLO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
ARGILA (a)	R ^(e)	47,5	41,0	42,2	45,8	49,6
	E	52,0	41,2	41,5	49,1	48,2
	P	53,0	38,5	41,8	48,6	46,8
	\bar{x}	50,8	40,2	41,8	47,8	48,2
SILTE (b)	R	20,3	22,7	23,8	23,5	24,9
	E	21,6	24,1	24,0	24,4	25,0
	P	20,5	23,4	24,8	24,1	26,0
	\bar{x}	20,8	23,4	24,2	24,0	25,3
AREIA FINA (c)	R	25,1	26,5	27,4	24,0	22,6
	E	24,9	28,1	26,9	24,3	24,1
	P	26,8	28,8	27,0	26,4	24,4
	\bar{x}	25,6	27,8	27,1	24,9	23,7
AREIA GROSSA (d)	R	5,8	8,8	6,5	4,4	2,6
	E	1,5	7,5	6,6	2,9	2,3
	P	1,0	9,4	7,5	2,5	3,6
	\bar{x}	2,8	8,6	6,9	3,3	2,8

- (a) Argila: diâmetro das partículas inferior a 0,005 mm
 (b) Silte: diâmetro compreendido entre 0,074 e 0,005 mm
 (c) Areia fina: diâmetro compreendido entre 0,42 e 0,074 mm
 (d) Areia grossa: diâmetro compreendido entre 2,00 e 0,42 mm
 (e) REP = REPetições

QUADRO 7 - Composição granulométrica do solo arenoso, em por
centagem

FRAÇÃO DO SOLO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% C	M00,25% C	M00,6% SS	1,2% SS
ARGILA (a)	R ^(e)	17,5	18,0	17,4	15,6	11,6
	E	17,6	17,2	17,4	14,9	12,5
	P	17,6	17,1	17,4	15,4	11,6
	\bar{x}	17,6	17,4	17,4	15,3	11,9
SILTE (b)	R	5,3	4,6	5,1	6,8	8,1
	E	4,9	4,0	4,9	7,2	8,2
	P	4,8	4,3	4,4	7,0	8,9
	\bar{x}	5,0	4,3	4,8	7,0	8,4
AREIA FI NA (c)	R	72,4	74,0	72,7	73,0	76,0
	E	73,7	74,8	72,7	72,7	74,4
	P	74,1	75,6	73,4	73,3	74,9
	\bar{x}	73,4	74,8	73,0	73,0	75,1
AREIA GROSSA (d)	R	4,8	3,4	4,8	4,6	4,3
	E	3,8	4,0	4,8	4,6	4,9
	P	3,4	3,1	4,7	4,9	4,5
	\bar{x}	4,0	3,5	4,8	4,7	4,6

(a) Argila: diâmetro das partículas inferior a 0,005 mm

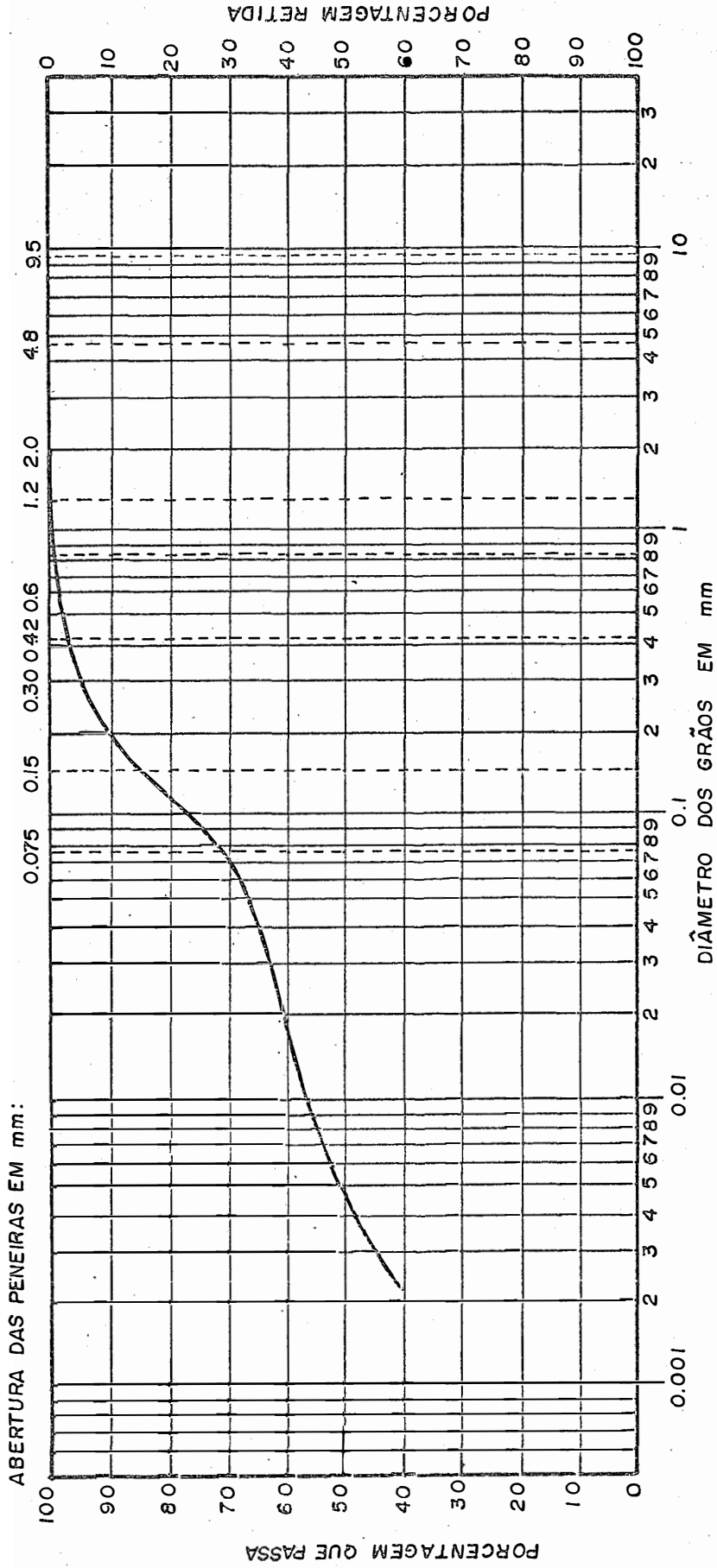
(b) Silte: diâmetro compreendido entre 0,074 e 0,005 mm

(c) Areia fina: diâmetro compreendido entre 0,42 e 0,074 mm

(d) Areia grossa: diâmetro compreendido entre 2,00 e 0,42 mm

(e) REP = REPetições

FIG. 2 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARGILOSO (MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES)

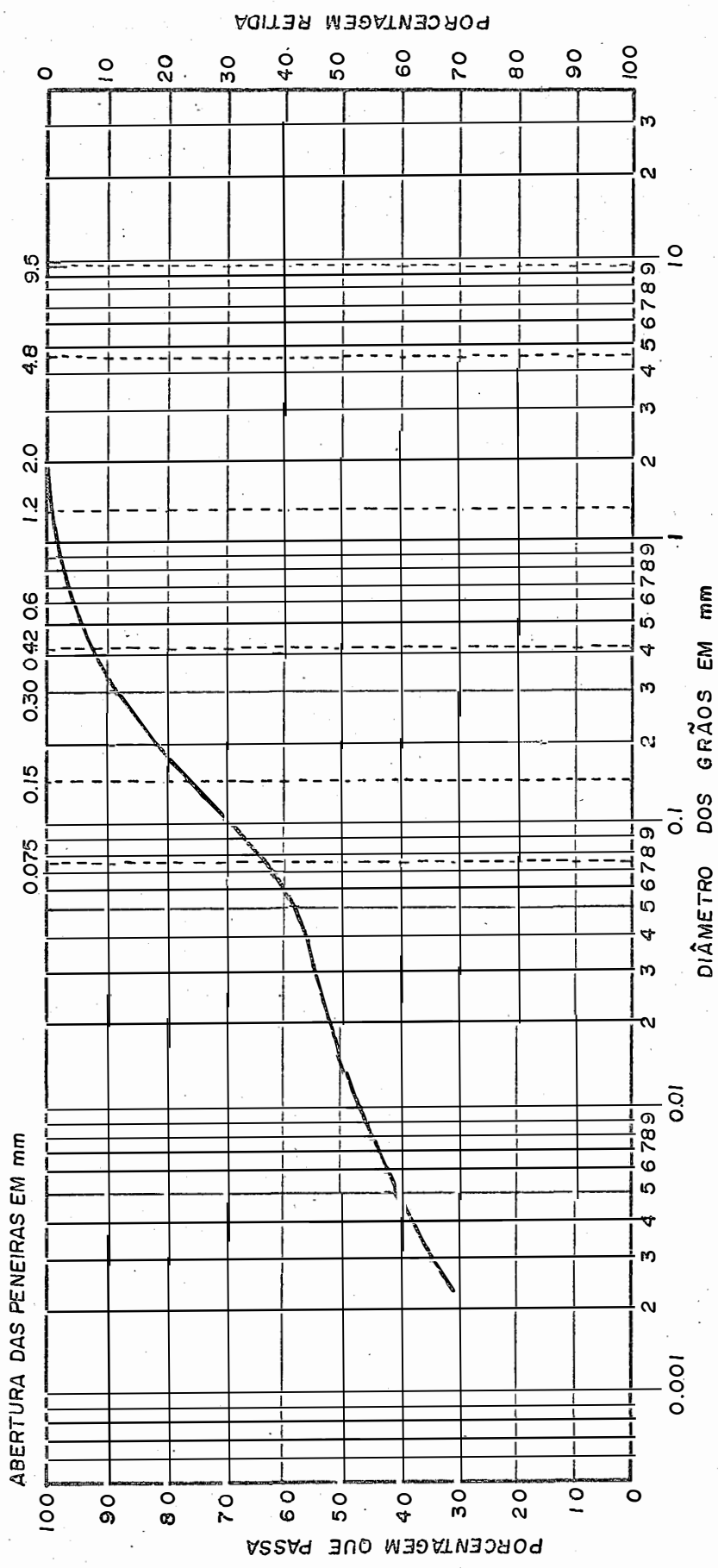


COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
50.8%	15.7%	30.7%	2.8%

< 0.005mm 0.05mm 0.42mm 2.00mm

FIG. 3 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARGILOSO TRATADO COM 0.1% DE CMC (MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES)

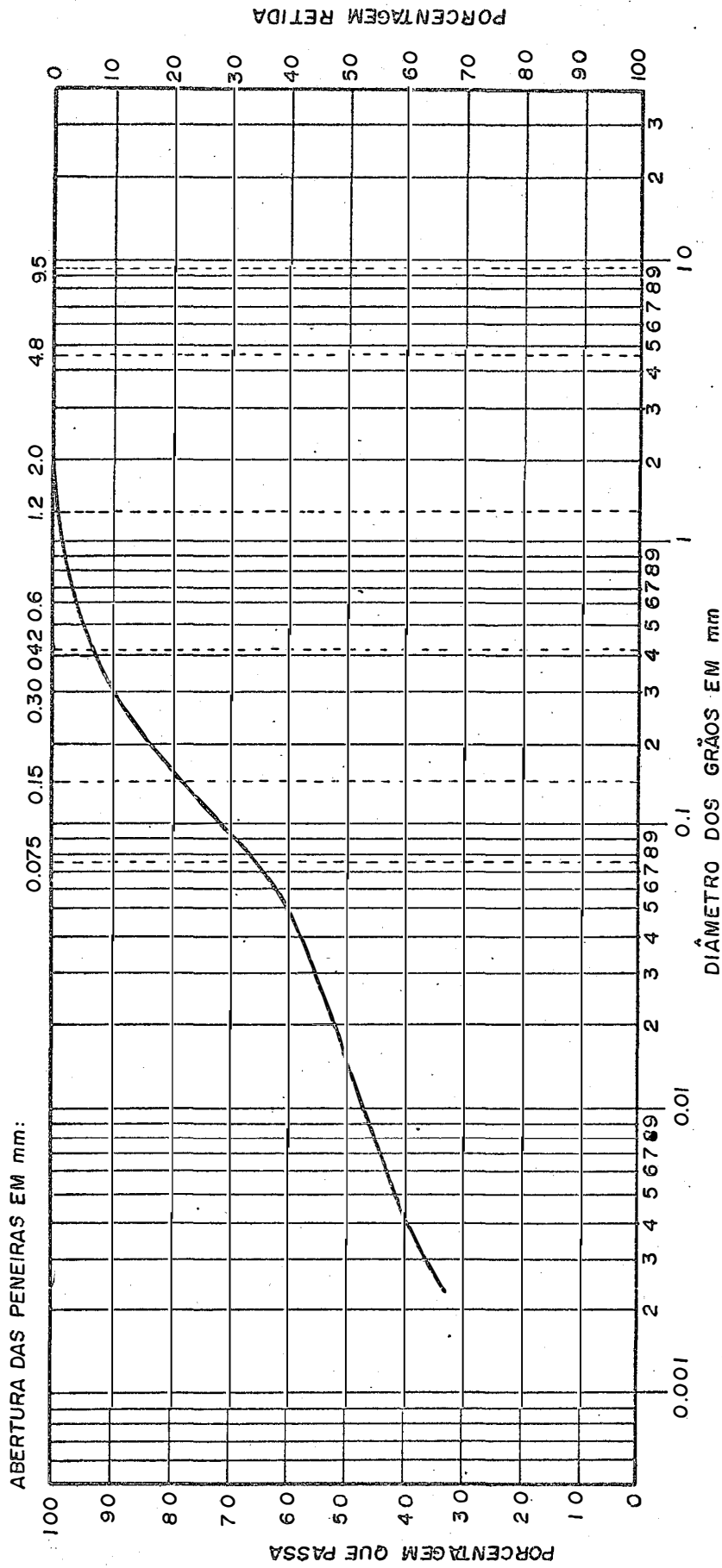


COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
40.2%	18.0%	33.2%	8.6%

<0.005mm 0.05mm 0.42mm 2.00mm

FIG. 4 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARGILOSO TRATADO COM 0.25% DE CMC (MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES)

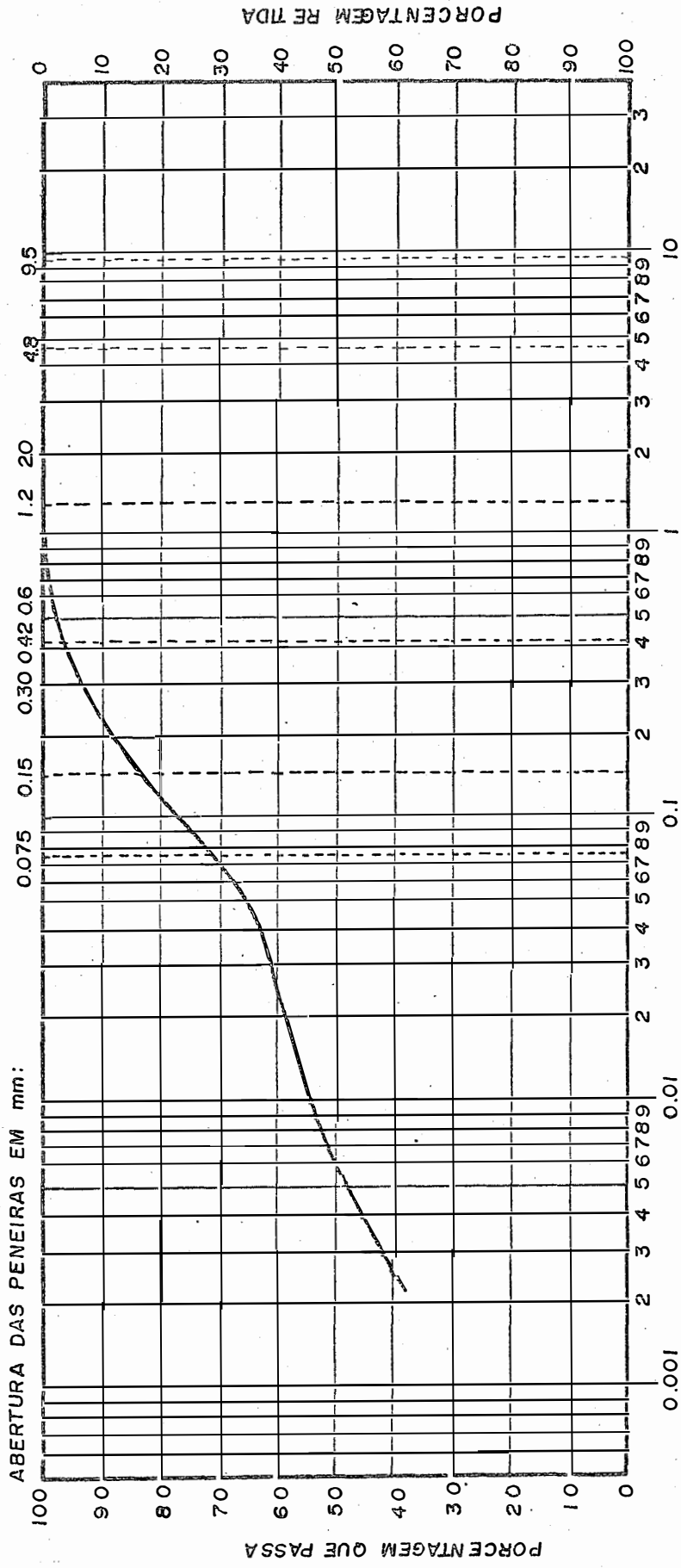


COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Slite	Areia Fina	Areia Grossa
41.8%	10.4%	32.9%	6.9%

<0.005 mm 0.05 mm 0.42 mm 200 mm

FIG. 5 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARGILOSO TRATADO COM 0.6% DE SILICATO DE SÓDIO
(MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES)

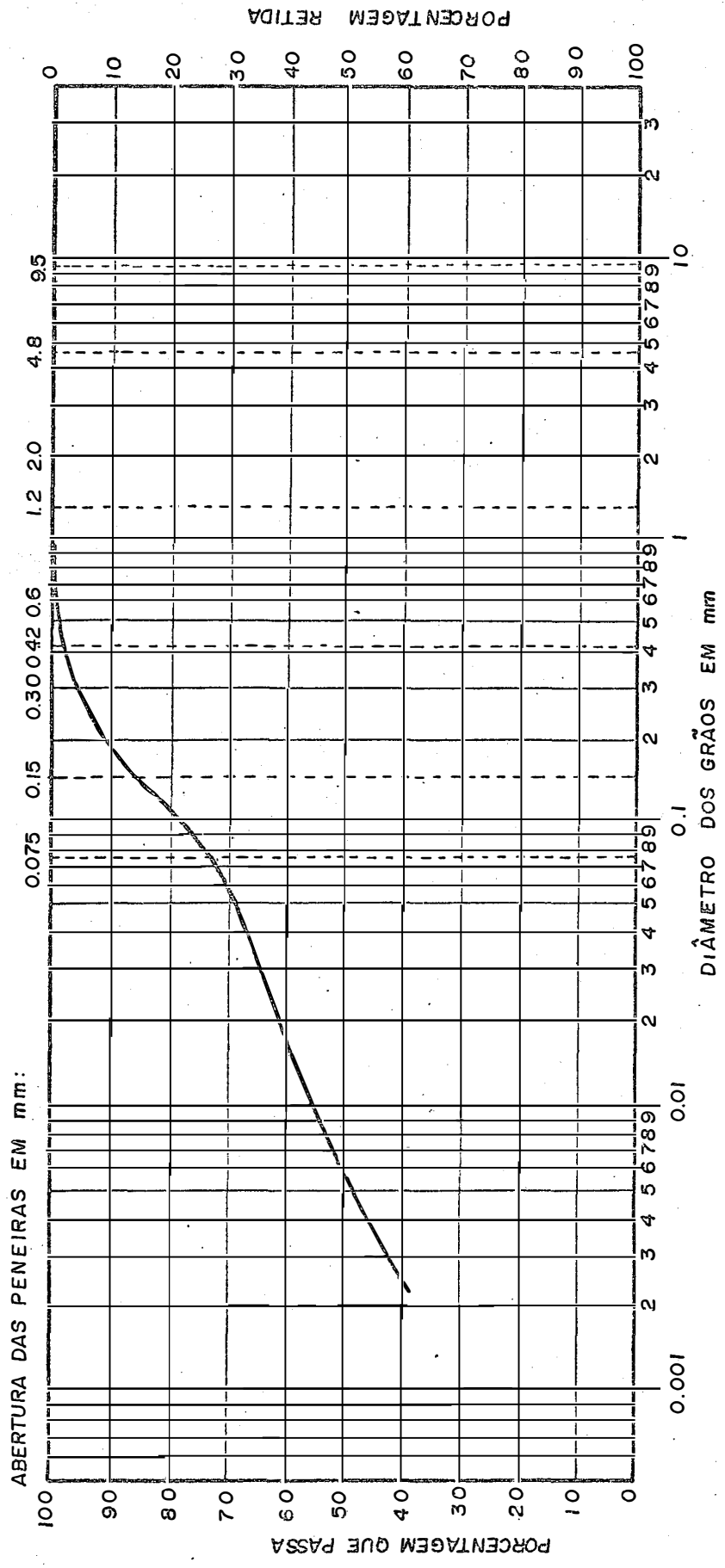


DIÂMETRO DOS GRÃOS EM mm

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	47.8%	<0.005mm
Silte	17.1%	0.005mm - 0.42mm
Areia Fina	31.8%	0.42mm - 2.00mm
Areia Grossa	3.3%	>2.00mm

FIG. 6 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARGILOSO TRATADO COM 1.2% DE SILICATO DE SÓDIO
(MÉDIA DE TRES REPETICOES)

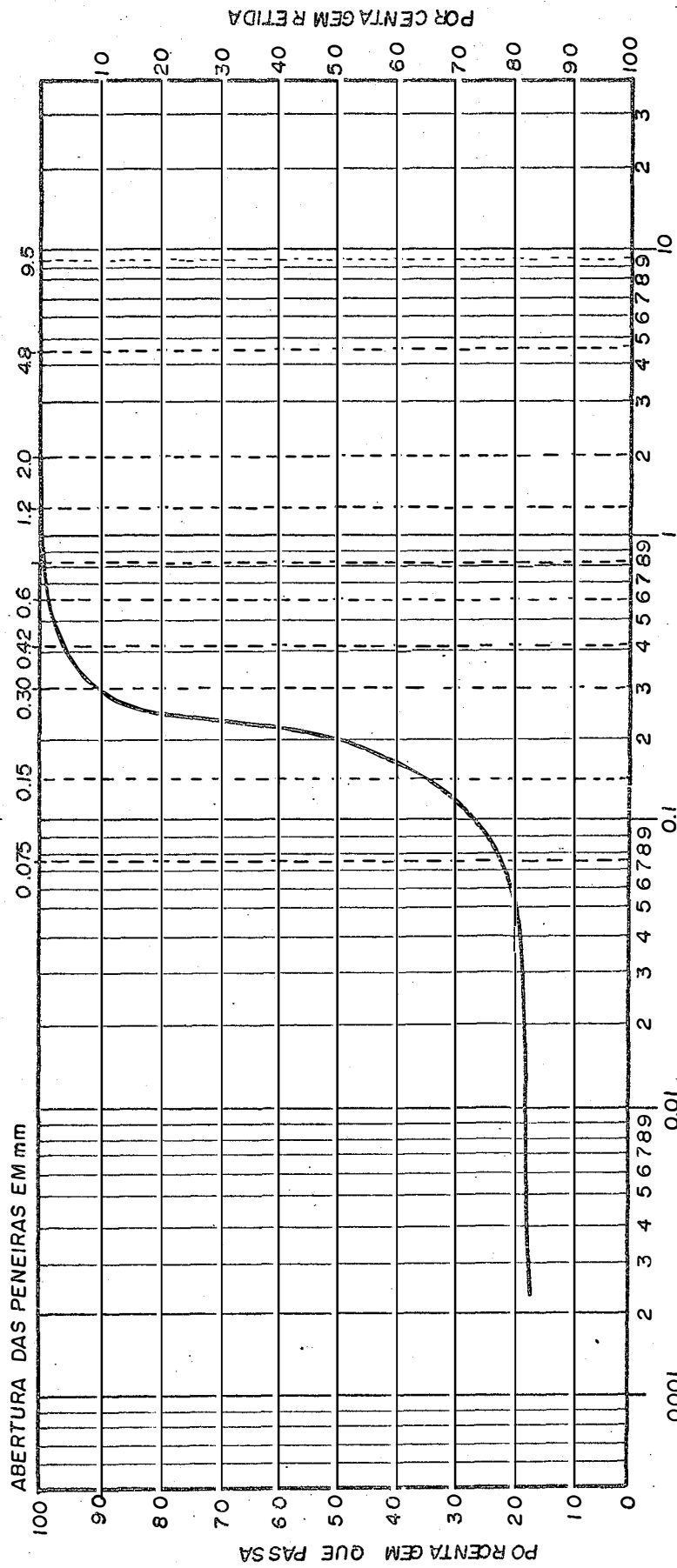


COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
48.2 %	19.5 %	29.5 %	2.8 %

< 0.005mm 0.05mm 0.42mm 200mm

FIG. 7 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARENOSO (MÉDIA DE TRÊS REPETIÇÕES)



DIÂMETRO DOS GRÃOS EM mm

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
17.6 %	1.9 %	76.5 %	4.0 %

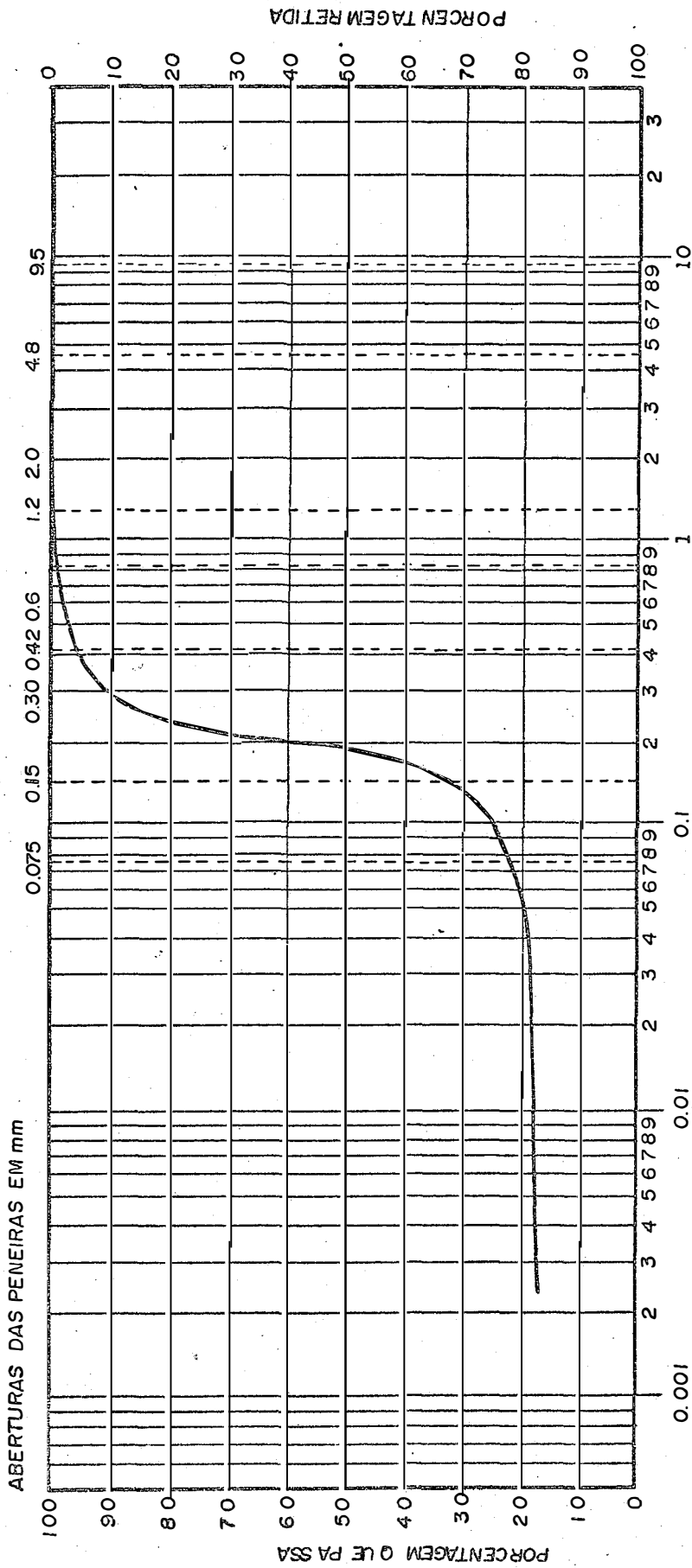
< 0.005 mm

0.05 mm

0.42 mm

2.00 mm

FIG. 8 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARENOSO TRATADO COM 0.1% DE CMC (MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES).



DIÂMETRO DOS GRÃOS EM mm

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
17.4 %	2.1 %	77.0 %	3.5 %

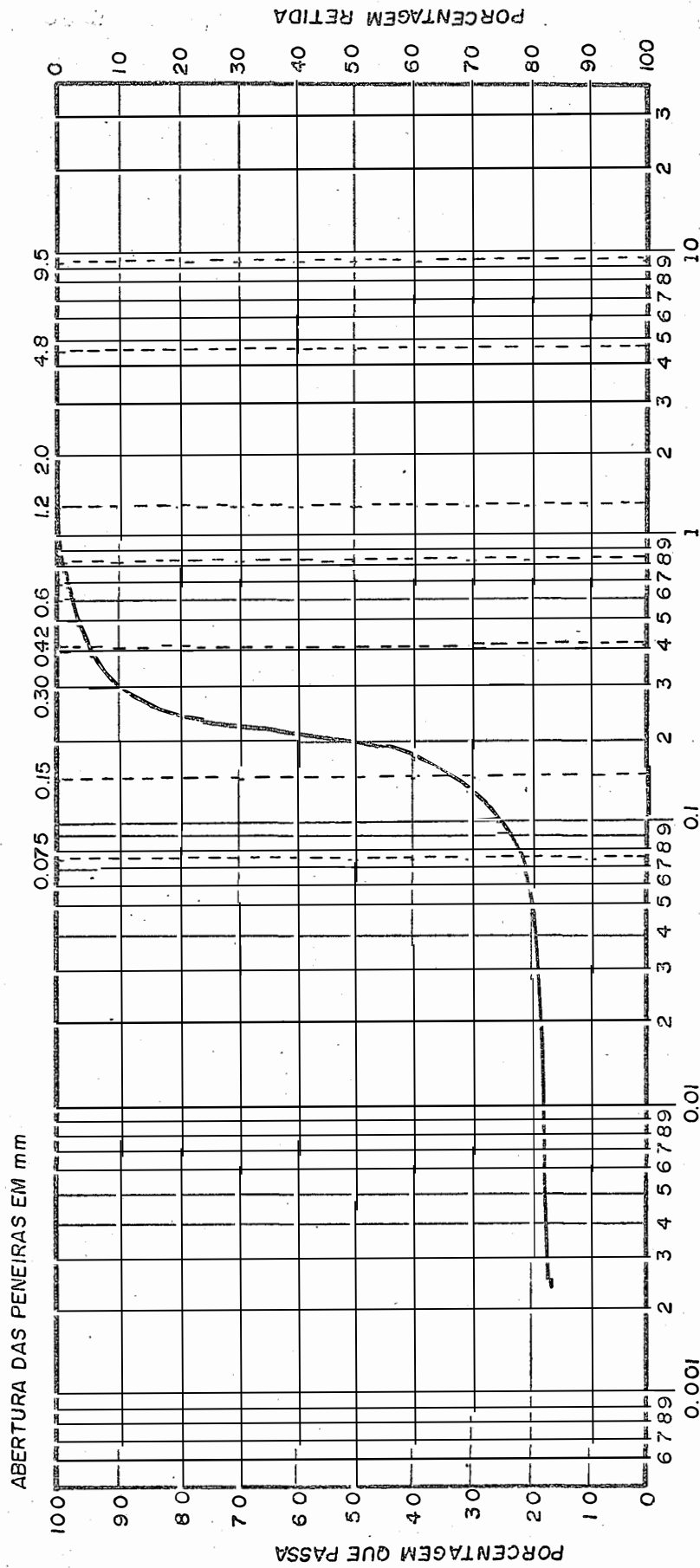
< 0.005 mm

0.05 mm

0.42 mm

2.00 mm

FIG. 9 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARENOSO TRATADO COM 0,25% DE CMC (MÉDIA DE TRÊS REPE-
TIÇÕES)



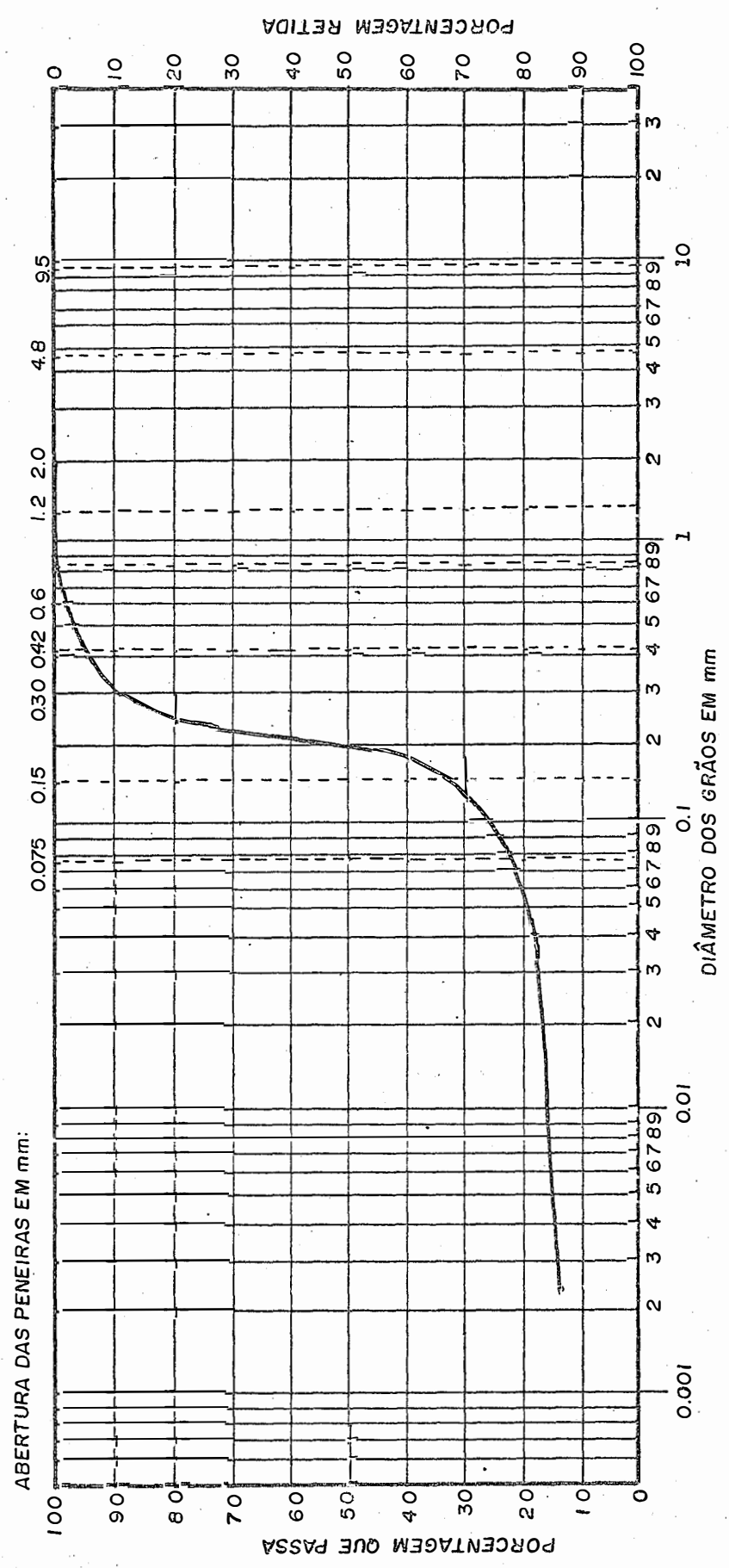
DIÂMETRO DOS GRÃOS EM mm

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
17.4%	2.4%	75.4%	4.8%

<0.005mm 0.05mm 0.42mm 2.00mm

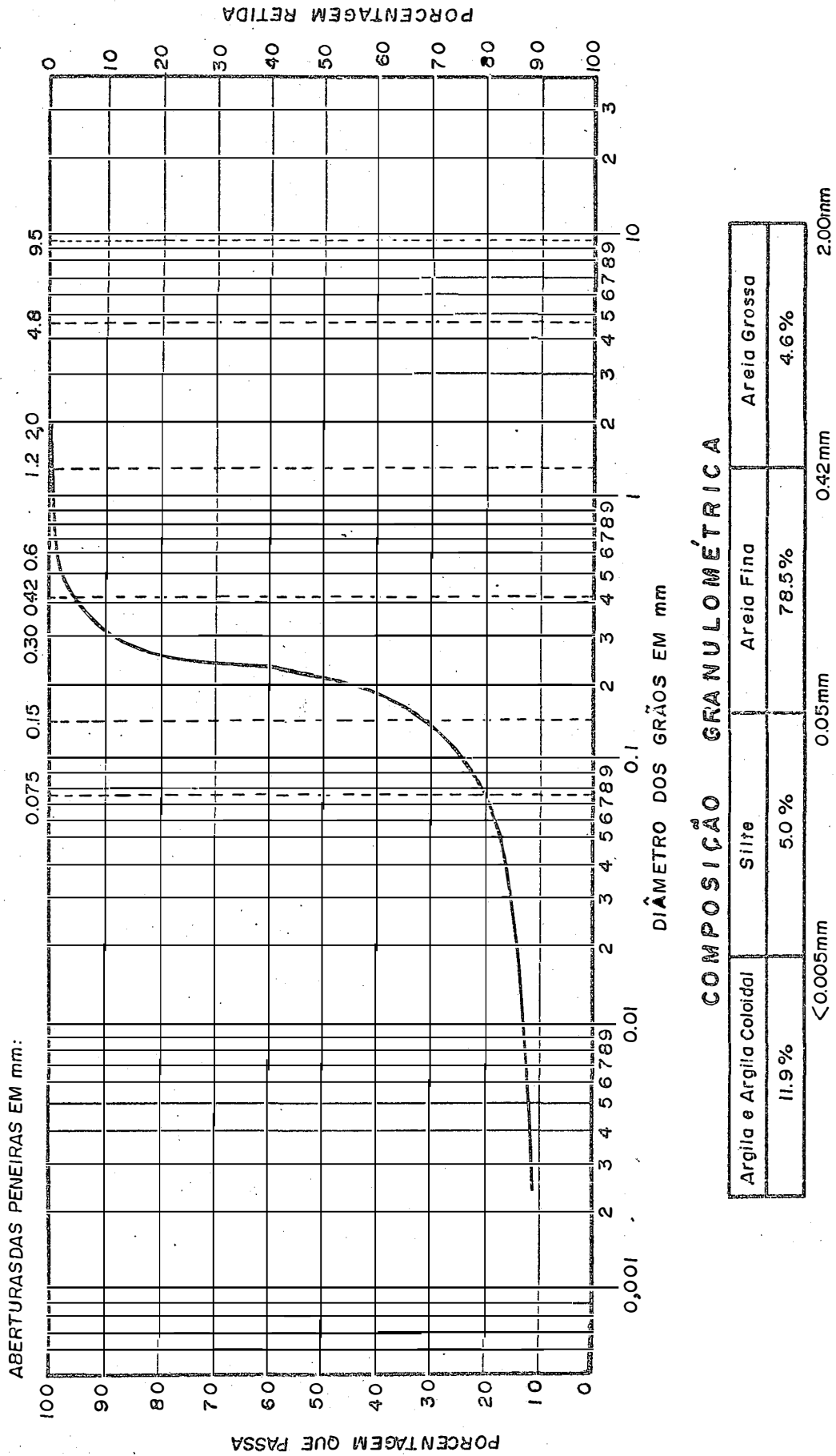
FIG. 10 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARENOSO TRATADO COM 0.6% DE SILICATO DE SÓDIO
(MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES).



COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Argila e Argila Coloidal	Silte	Areia Fina	Areia Grossa
15.3%	4.2%	75.8%	4.7%
< 0.005mm		0.05mm	0.42mm
			2.00mm

FIG. 11 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO ARENOSO TRATADO COM 1.2% DE SILICATO DE SÓDIO
(MÉDIA DE TRES REPETIÇÕES)



os resultados se acham relatados no QUADRO 8.

O efeito do tratamento com aditivos químicos sobre a classificação do solo, de acordo com os diferentes sistemas baseados na granulometria e, também, na plasticidade, está apresentado no QUADRO 9.

Com relação aos índices físicos do solo, o QUADRO 10 apresenta os valores encontrados para o peso específico aparente seco e peso específico dos sólidos, enquanto que os valores do índice de vazios e da porosidade, calculados através de fórmulas deduzidas de relações estabelecidas entre os referidos índices, estão registrados no QUADRO 11.

Os resultados do ensaio de compactação dos solos estudados, sob tratamento com aditivos químicos, estão apresentados no QUADRO 12.

A escolha do teor de cimento provável (C_p) para o ensaio de compactação do solo-cimento foi feita de acordo com as normas, estando os mesmos expostos no QUADRO 13; o QUADRO 14 apresenta os resultados do ensaio de compactação do solo-cimento conduzido com o teor de cimento provável recomendado para cada caso.

Baseados nos resultados anteriores, escolheram-se os teores de cimento prováveis para a moldagem de corpos de prova de solo-cimento destinados aos ensaios subsequentes, estando os mesmos apresentados no QUADRO 15.

Os QUADROS 16 e 17 contêm os resultados do ensaio à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento, cuja área média era igual a 77 cm^2 , para os solos argiloso e arenoso, respectivamente. A representação gráfica dos resultados está ilustrada na FIGURA 12.

A absorção de água por corpos de prova de solo-cimento apresentou resultados que, expressos em porcentagem, estão relatados no QUADRO 18.

QUADRO 8 - Limites de consistência dos solos estudados, em -
porcentagem

LIMITES DE CONSISTÊNCIA		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso						
LIMITE DE LIQUIDEZ	R	41,24	52,35	63,98	34,25	33,38
	E	42,22	50,88	60,15	34,90	31,25
	P	41,20	53,50	63,50	34,28	31,18
	\bar{x}	41,55	52,24	62,54	34,48	31,94
LIMITE DE PLASTICIDADE	R	28,20	38,41	54,42	26,33	28,94
	E	28,50	37,78	52,28	27,53	27,98
	P	28,18	38,72	52,83	26,38	27,66
	\bar{x}	28,29	38,30	53,18	26,75	28,19
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	R	13,04	13,94	9,56	7,92	4,44
	E	13,72	13,10	7,87	7,37	3,27
	P	13,02	14,78	10,67	7,90	3,52
	\bar{x}	13,26	13,94	9,36	7,73	3,75
Solo arenoso						
LIMITE DE LIQUIDEZ	R	17,73	20,32	28,95	12,70	14,34
	E	18,00	20,05	28,55	12,68	14,34
	P	17,14	19,73	28,53	12,90	14,45
	\bar{x}	17,62	20,03	28,68	12,76	14,38
LIMITE DE PLASTICIDADE	R	NP	NP	25,28	NP	NP
	E	NP	NP	25,25	NP	NP
	P	NP	NP	24,48	NP	NP
	\bar{x}	NP	NP	25,00	NP	NP
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	R	-	-	3,67	-	-
	E	-	-	3,30	-	-
	P	-	-	4,05	-	-
	\bar{x}	-	-	3,68	-	-

QUADRO 9 - Efeito dos tratamentos sobre a classificação do solo segundo os diferentes sistemas adotados.

SISTEMA ADOTADO	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Classificação do solo argiloso					
USBS ^(a)	argila	argila	argila	argila	argila
AASHO ^(b)	A ₇₋₆ (9)	A ₇₋₅ (9)	A ₅ (9)	A ₄ (7)	A ₄ (8)
Casagrande ^(c)	CI	CH	CH	CL	CL
FAA ^(d)	E-7	E-9	E-9	E-6	E-6
Classificação do solo arenoso					
USBS ^(a)	b.a. ^(e)	b.a.	b.a.	b.a.	b.a.
AASHO ^(b)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)
Casagrande ^(c)	SU	SU	SU	SU	SU
FAA ^(d)	E-2	E-2	E-4	E-2	E-2

- (a) United States Bureau of Soils, classificação trilinear
 (b) American Association of State Highway officials
 (c) Classificação de Casagrande ou Classificação Unificada
 (d) Federal Aviation Agency
 (e) b.a. = barro arenoso

QUADRO 10 - Peso específico aparente seco (γ_o) e peso específico dos sólidos (γ_s) dos solos estudados, em g/cm^3

PESO ESPECÍFICO	T R A T A M E N T O S					
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS	
Solo argiloso						
γ_o	R	1,19	1,03	0,99	1,06	1,00
	E	1,19	1,03	1,00	1,05	1,01
	P	1,18	1,04	1,00	1,07	0,99
	\bar{x}	1,19	1,03	1,00	1,06	1,00
γ_s	R	2,87	2,89	2,95	2,82	2,90
	E	2,80	2,89	2,86	2,81	2,86
	P	2,79	2,83	2,93	2,82	2,80
	\bar{x}	2,82	2,87	2,91	2,82	2,85
Solo arenoso						
γ_o	R	1,41	1,30	1,26	1,34	1,33
	E	1,42	1,30	1,25	1,34	1,33
	P	1,41	1,30	1,26	1,34	1,33
	\bar{x}	1,41	1,30	1,26	1,34	1,33
γ_s	R	2,58	2,59	2,61	2,61	2,59
	E	2,56	2,57	2,61	2,52	2,56
	P	2,53	2,59	2,66	2,58	2,54
	\bar{x}	2,56	2,58	2,63	2,57	2,56

QUADRO 11 - Índice de vazios (e) e porosidade (n) dos solos estudados

ÍNDICES FÍSICOS		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso						
e	R	1,37	1,79	1,94	1,66	1,85
	E	1,37	1,79	1,91	1,68	1,82
	P	1,39	1,76	1,91	1,63	1,88
	\bar{x}	1,38	1,78	1,92	1,66	1,85
n (%)	R	57,80	64,16	65,99	62,41	64,91
	E	57,80	64,16	65,63	62,69	64,54
	P	58,16	63,77	65,63	61,98	65,28
	\bar{x}	57,92	64,03	65,75	62,36	64,91
Solo arenoso						
e	R	0,81	0,98	1,09	0,92	0,92
	E	0,80	0,98	1,10	0,92	0,92
	P	0,81	0,98	1,09	0,92	0,92
	\bar{x}	0,81	0,98	1,09	0,92	0,92
n (%)	R	44,75	49,49	52,15	47,92	47,92
	E	44,44	49,49	52,38	47,92	47,92
	P	44,75	49,49	52,15	47,92	47,92
	\bar{x}	44,65	49,49	52,23	47,92	47,92

QUADRO 12 - Ensaio de compactação dos solos estudados: densi
dade aparente máxima ($\gamma_{\text{máx.}}$) e umidade ótima ($h_{\text{ot.}}$)

PARÂMETROS		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso						
$\gamma_{\text{máx.}}$ (g/dm ³)	R	1472	1467	1455	1481	1465
	E	1469	1459	1459	1488	1475
	P	1469	1462	1434	1472	1471
	\bar{x}	1470	1463	1449	1480	1470
$h_{\text{ot.}}$ (%)	R	30,8	31,0	30,6	30,2	31,0
	E	29,9	29,8	31,4	30,6	31,5
	P	30,1	31,2	31,7	30,6	30,6
	\bar{x}	30,3	30,7	31,2	30,5	31,0
Solo arenoso						
$\gamma_{\text{máx.}}$ (g/dm ³)	R	1932	1910	1830	1956	1957
	E	1930	1924	1826	1960	1964
	P	1928	1923	1828	1957	1953
	\bar{x}	1930	1919	1828	1958	1958
$h_{\text{ot.}}$ (%)	R	11,3	12,7	14,0	10,7	10,6
	E	11,8	12,1	13,8	10,0	10,5
	P	11,8	12,3	14,3	10,5	10,5
	\bar{x}	11,6	12,4	14,0	10,4	10,5

QUADRO 13 - Teor de cimento provável (C_P) para o ensaio de compactação do solo-cimento

CRITÉRIO DA AASHO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso						
% QUE PASSA	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
EM PENEIRA	40	97,2	91,4	93,1	96,7	97,2
Nº	200	71,6	63,6	66,0	71,8	73,5
LL ^(a)	(%)	41,55	52,24	62,54	34,48	31,94
IP ^(b)	(%)	13,26	13,94	9,36	7,73	3,75
CLASSIFICAÇÃO DO SOLO		A ₇₋₆ (9)	A ₇₋₅ (9)	A ₅ (9)	A ₄ (7)	A ₄ (8)
C_P (%)		13	13	10	10	10
Solo arenoso						
% QUE PASSA	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
EM PENEIRA	40	96,0	96,5	95,2	95,3	95,4
Nº	200	22,6	21,7	22,2	22,3	20,3
LL ^(a)	(%)	17,62	20,03	28,67	12,76	14,37
IP ^(b)	(%)	NP	NP	3,67	NP	NP
CLASSIFICAÇÃO DO SOLO		A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)	A ₂₋₄ (0)
C_P (%)		7	7	7	7	7

(a) LL = Limite de Liquidez

(b) IP = Índice de Plasticidade

QUADRO 14 - Ensaio de compactação do solo-cimento: densidade aparente máxima ($\gamma_{\text{máx.}}$) e umidade ótima ($h_{\text{ót.}}$)

PARÂMETROS		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso						
$\gamma_{\text{máx.}}$ (g/dm ³)	R	1497	1492	1490	1533	1483
	E	1520	1518	1469	1538	1468
	P	1536	1530	1445	1534	1462
	\bar{x}	1518	1513	1468	1535	1471
$h_{\text{ót.}}$ (%)	R	27,6	29,4	30,7	28,3	30,7
	E	27,8	26,8	30,8	28,8	30,9
	P	26,6	28,6	31,6	28,7	31,6
	\bar{x}	27,3	28,3	31,0	28,6	31,1
Solo arenoso						
$\gamma_{\text{máx.}}$ (g/dm ³)	R	1924	1912	1853	1868	1875
	E	1922	1883	1890	1884	1866
	P	1930	1891	1870	1878	1869
	\bar{x}	1925	1895	1871	1877	1870
$h_{\text{ót.}}$ (%)	R	12,0	12,5	12,8	13,3	12,4
	E	12,2	12,3	12,4	13,5	13,0
	P	12,3	12,4	13,0	12,8	13,0
	\bar{x}	12,2	12,4	12,7	13,2	12,8

QUADRO 15 - Teor de cimento provável (C_P) para a moldagem de corpos de prova de solo-cimento

CRITÉRIO DA AASHO	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso					
CLASSIFICAÇÃO	A ₇₋₆₍₉₎	A ₇₋₅₍₉₎	A ₅₍₉₎	A ₄₍₇₎	A ₄₍₈₎
SILTE (%)	15,7	18,0	18,4	17,1	19,5
$\gamma_{\text{máx.}}$ (g/dm ³)	1518	1513	1468	1535	1471
C_P (%)	14	14	14	13	15
Solo arenoso					
CLASSIFICAÇÃO	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎
SILTE + ARGILA (%)	19,5	19,5	19,8	19,5	16,9
PEDREGULHO GROSSO (%)	0	0	0	0	0
$\gamma_{\text{máx.}}$ (g/dm ³)	1925	1895	1871	1877	1870
C_P (%)	7	8	8	8	8

Obs. - Teor de silte (diâmetro das partículas compreendido entre 0,05 e 0,005 mm) e teor de silte + argila (diâmetro inferior a 0,05 mm) tirados das curvas granulométricas dos solos (FIG. 2 a 11).

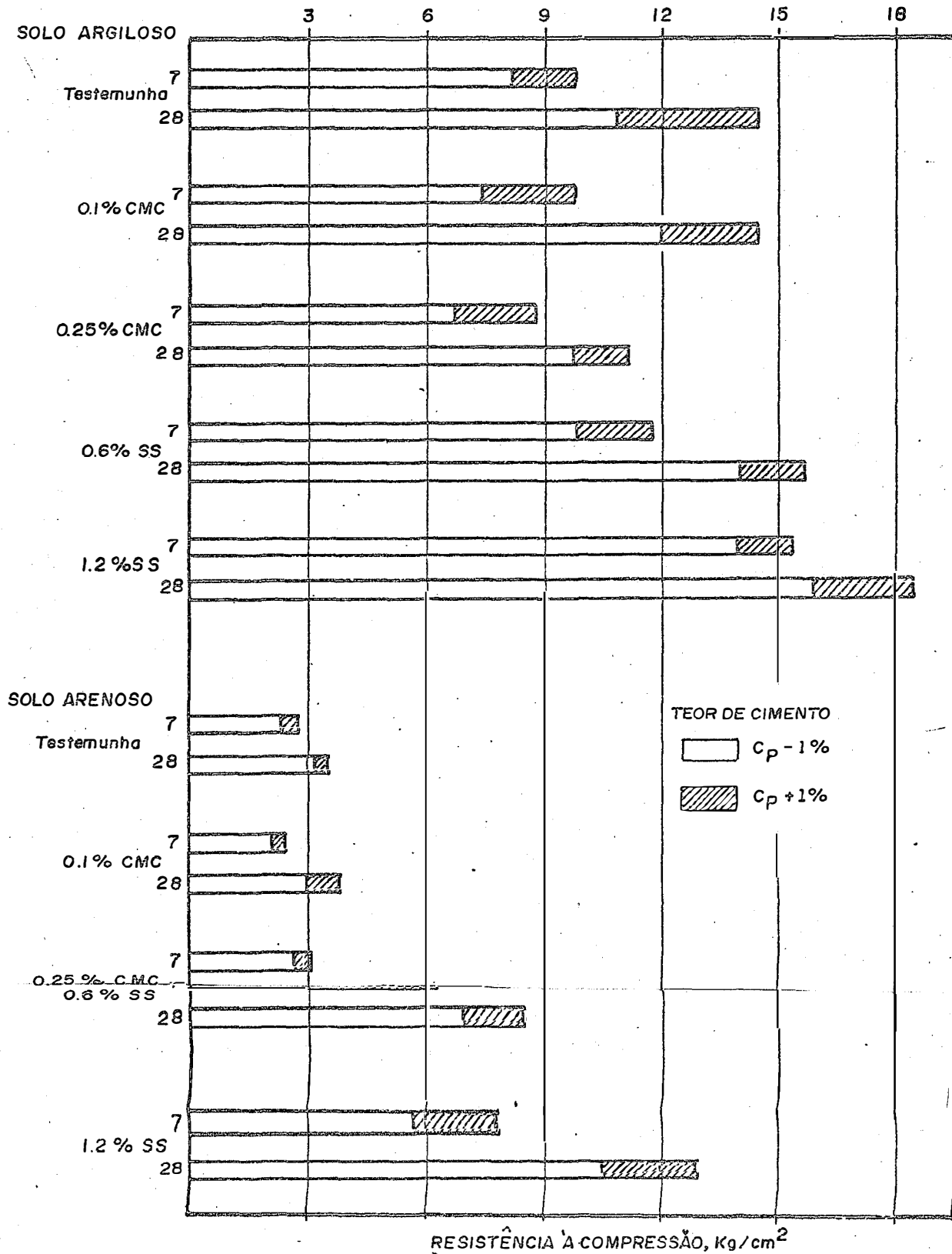
QUADRO 16 - Resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento com solo argiloso, em kg/cm^2

IDADE	TEOR DE CIMENTO	T R A T A M E N T O					
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS	
7º DIA	C _P - 1%	R	7,79	7,73	6,36	9,93	13,70
		E	8,54	6,95	6,82	9,74	14,02
		P	8,12	7,60	7,08	9,93	14,15
		\bar{x}	8,15	7,43	6,75	9,87	13,96
	C _P + 1%	R	10,13	10,06	9,09	11,82	15,58
		E	9,54	9,41	8,18	12,08	15,65
		P	9,90	9,80	9,15	11,49	15,06
		\bar{x}	9,86	9,76	8,81	11,80	15,43
28º DIA	C _P - 1%	R	10,97	12,08	9,67	14,22	15,71
		E	11,23	12,08	9,74	13,70	16,30
		P	10,52	11,88	10,06	14,09	15,78
		\bar{x}	10,91	12,01	9,82	14,00	15,93
	C _P + 1%	R	15,45	13,96	11,43	16,23	18,31
		E	12,86	13,51	11,36	15,84	19,02
		P	15,19	16,10	10,91	14,41	18,05
		\bar{x}	14,50	14,52	11,23	15,49	18,46

QUADRO 17 - Resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento com solo arenoso, em kg/cm^2 .

IDADE	TEOR DE CIMENTO	T R A T A M E N T O S					
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS	
7º DIA	C _P - 1%	R	2,34	2,08	2,66	3,96	5,39
		E	2,34	2,14	2,73	3,83	5,52
		P	2,21	2,21	2,60	3,51	6,30
		\bar{x}	2,30	2,14	2,66	3,77	5,74
	C _P + 1%	R	2,79	2,40	3,05	6,17	8,12
		E	2,79	2,47	3,05	6,36	8,12
		P	2,73	2,40	2,99	6,30	7,60
		\bar{x}	2,77	2,42	3,03	6,28	7,95
28º DIA	C _P - 1%	R	2,99	2,86	3,18	6,95	11,30
		E	3,38	2,73	3,12	6,49	10,06
		P	3,12	3,25	3,18	7,47	10,65
		\bar{x}	3,16	2,95	3,16	6,97	10,67
	C _P + 1%	R	3,38	3,90	3,64	8,83	12,53
		E	3,57	3,44	3,90	8,18	14,22
		P	3,51	4,22	3,25	8,44	12,40
		\bar{x}	3,49	3,85	3,60	8,48	13,05

FIGURA.12 - Efeito dos aditivos sobre a resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento, aos 7 e 28 dias (valores médios de tres repetições)



QUADRO 18 - Absorção de água por corpos de prova de solo-cimento, em porcentagem.

TEOR DE CIMENTO		T R A T A M E N T O S				
		TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso						
C _P - 1%	R	5,36	5,25	4,55	5,30	4,97
	E	5,83	5,98	5,00	4,18	3,66
	P	6,61	6,12	5,84	4,75	5,00
	\bar{x}	5,93	5,78	5,13	4,74	4,54
C _P + 1%	R	5,94	4,70	4,84	4,40	4,14
	E	4,48	4,71	4,04	3,96	4,32
	P	4,64	4,79	5,11	4,21	3,84
	\bar{x}	5,02	4,73	4,66	4,19	4,10
Solo arenoso						
C _P - 1%	R	4,57	3,61	3,84	3,49	3,01
	E	4,33	3,85	3,38	3,25	3,47
	P	4,08	4,05	3,62	3,02	3,21
	\bar{x}	4,33	3,84	3,61	3,25	3,23
C _P + 1%	R	3,54	3,06	2,82	2,82	2,78
	E	3,26	2,34	2,84	2,55	2,00
	P	3,98	2,58	2,36	2,31	2,38
	\bar{x}	3,59	2,66	2,67	2,56	2,39

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO

O efeito da aplicação dos tratamentos, sobre os vários aspectos considerados do solo e do solo-cimento com ele formado, foi avaliado através da análise estatística dos dados fornecidos pelo experimento, sendo aqui discutidos.

A estabilidade estrutural do solo, promovida pela presença de agregados maiores do que 0,25 mm de diâmetro e avaliada através do peneiramento a seco, observou o mesmo padrão de comportamento em ambos os solos estudados. A análise estatística aplicada aos dados referentes à porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), para o solo argiloso, está registrada no QUADRO 19, enquanto que, para o solo arenoso, está no QUADRO 20. Estatisticamente, não há diferença entre dias, para ambos os solos, embora o quarto dia difira do primeiro, no caso do solo argiloso, para todos os tratamentos experimentados, e, no caso do solo arenoso, o terceiro e quarto dias difiram do primeiro, para os tratamentos 0,25% e 0,1% de CMC (carboximetilcelulose), respectivamente. O quarto dia difere, ainda, do terceiro, para a Testemunha do solo arenoso; todavia, esta diferença provavelmente foi provocada pelo refazimento da análise, em virtude da perda accidental dos dados originais.

O confronto dos cinco tratamentos, no solo argiloso, mostrou que ambas as doses de SS (silicato de sódio) são diferentes da Testemunha e do tratamento 0,1% de CMC; difere,

QUADRO 19 - Teste de Friedman aplicado aos dados referentes à porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), para o solo argiloso.

a) para cada tratamento

$$k = 4, \quad n = 3$$

$m^{(a)} = 8$ ($\alpha^{(b)} = 4,9\%$) e 9 ($\alpha^{(b)} = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

PENEIRAGEM	$D_1^{(c)}$	$D_2^{(c)}$	$D_3^{(c)}$	$D_4^{(c)}$
Testemunha (S = 6,6; $\alpha = 7,5\%$)				
1ª PENEIRAGEM	87,73	87,11	86,15	86,55
2ª PENEIRAGEM	85,31	85,20	84,42	86,95
3ª PENEIRAGEM	85,61	84,51	83,00	86,32
0,1% CMC (S = 8,2; $\alpha = 1,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	95,98	93,14	88,69	87,99
2ª PENEIRAGEM	92,87	90,22	87,52	88,06
3ª PENEIRAGEM	92,33	88,65	85,93	85,32
0,25% CMC (S = 9; $\alpha = 0,2\%$)				
1ª PENEIRAGEM	96,49	92,05	93,77	90,12
2ª PENEIRAGEM	95,19	90,41	93,56	89,74
3ª PENEIRAGEM	94,10	89,62	91,26	88,67
0,6% SS (S = 8,2; $\alpha = 1,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	96,78	95,19	91,69	91,99
2ª PENEIRAGEM	95,69	92,57	90,23	90,00
3ª PENEIRAGEM	95,09	91,73	88,92	88,45
1,2% SS (S = 9; $\alpha = 0,2\%$)				
1ª PENEIRAGEM	95,81	95,40	93,16	92,23
2ª PENEIRAGEM	94,81	93,91	91,90	90,39
3ª PENEIRAGEM	94,01	92,77	91,26	90,18

(a) m = nível mínimo de significância
 (b) α = taxa de erro experimental
 (c) D_n = dias (n = 1,2,3,4)

QUADRO 19 - continuação

b) para confronto dos tratamentos

$$k = 5, \quad n = 12$$

$m = 22$ ($\alpha = 3,8\%$), 23 ($\alpha = 2,5\%$) e 25 ($\alpha = 1,1\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 18,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $23,2$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BIOCOS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1	87,73	95,98	96,49	96,78	95,81
2	85,31	92,87	95,19	95,69	94,81
3	85,61	92,33	94,10	95,09	94,01
4	87,11	93,14	92,05	95,19	95,40
5	85,20	90,22	90,41	92,57	93,91
6	84,51	88,65	89,62	91,73	92,77
7	86,15	88,69	93,77	91,69	93,16
8	84,42	87,52	92,56	90,23	91,90
9	83,00	85,93	91,26	88,92	91,26
10	86,55	87,99	90,12	91,99	92,23
11	86,95	88,06	89,74	90,00	90,39
12	86,32	85,32	88,67	88,45	90,18

$$(S = 36,26^{***})$$

Obs: níveis de significância para S e S', quando não previstos, são obtidos em tabelas de limites unilaterais de χ^2 , com $k-1$ G.L., onde (***) = significativo a 0,1% de probabilidade.

QUADRO 19 - continuação

c) para médias de tratamentos

$$k = 5, \quad n = 4$$

$m = 12$ ($\alpha = 5,4\%$), 13 ($\alpha = 2,0\%$) e 14 ($\alpha = 0,6\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 10,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $13,4$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOCOS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
D ₁	86,22	93,73	95,26	95,85	94,88
D ₂	85,61	90,67	90,69	93,16	94,03
D ₃	84,52	87,38	92,53	90,28	92,11
D ₄	86,61	87,12	89,51	90,15	90,93

$$(S = 13; \alpha = 0,1\%)$$

d) para médias de blocos (dias)

$$k = 4, \quad n = 5$$

$m = 11$ ($\alpha = 3,7\%$) e 12 ($\alpha = 1,3\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

"BLOCOS"	"T R A T A M E N T O S"			
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
TEST.	86,22	85,61	84,52	86,61
0,1% CMC	93,73	90,67	87,38	87,12
0,25% CMC	95,26	90,69	92,53	89,51
0,6% SS	95,85	93,16	90,28	90,15
1,2% SS	94,88	94,03	92,11	90,93

$$(S = 8,28; \alpha = 3,1\%)$$

QUADRO 20 - Teste de Friedman aplicado aos dados referentes à porcentagem acumulada de agregados, em peneira nº 60 (0,25 mm), para o solo arenoso.

a) para cada tratamento

$$k = 4, \quad n = 3$$

$m = 8$ ($\alpha = 4,9\%$) e 9 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

PENEIRAGEM	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
Testemunha (S = 6,6; $\alpha = 7,5\%$)				
1ª PENEIRAGEM	62,79	59,64	58,72	67,77
2ª PENEIRAGEM	58,19	57,91	55,10	60,39
3ª PENEIRAGEM	54,81	57,24	54,95	58,19
0,1% CMC (S = 8,2; $\alpha = 1,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	65,43	61,10	58,83	58,76
2ª PENEIRAGEM	62,61	58,03	59,49	56,53
3ª PENEIRAGEM	60,43	57,99	58,51	54,44
0,25% CMC (S = 9; $\alpha = 0,2\%$)				
1ª PENEIRAGEM	77,47	73,60	62,47	65,90
2ª PENEIRAGEM	72,38	69,63	61,91	62,91
3ª PENEIRAGEM	69,66	63,43	59,12	62,02
0,6% SS (S = 1,8; $\alpha = 72,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	70,81	67,96	67,08	67,83
2ª PENEIRAGEM	67,52	67,14	68,09	65,41
3ª PENEIRAGEM	64,82	63,58	65,86	65,22
1,2% SS (S = 4,2; $\alpha = 30,0\%$)				
1ª PENEIRAGEM	66,74	63,20	63,94	64,22
2ª PENEIRAGEM	64,08	69,15	63,70	61,06
3ª PENEIRAGEM	63,72	61,29	59,45	59,90

QUADRO 20 - continuação

b) para confronto dos tratamentos

$$k = 5, \quad n = 12$$

$m = 22$ ($\alpha = 3,8\%$), 23 ($\alpha = 2,5\%$) e 25 ($\alpha = 1,1\%$), para com
parações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 18,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $23,2$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOCOS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1	62,79	65,43	77,47	70,81	66,74
2	58,19	62,61	72,38	67,52	64,08
3	54,81	60,43	69,66	64,82	63,72
4	59,64	61,10	73,60	67,96	63,20
5	57,91	58,03	69,63	67,14	69,15
6	57,24	57,99	63,43	63,58	61,29
7	58,72	58,83	62,47	67,08	63,94
8	55,10	59,49	61,91	68,09	63,70
9	54,95	58,51	59,12	65,86	59,45
10	67,77	58,76	65,90	67,83	64,22
11	60,39	56,53	62,91	65,41	61,06
12	58,19	54,44	62,02	65,22	59,90

(S = 36,27^{***})

QUADRO 20 - continuação

c) para médias de tratamentos

$$k = 5, \quad n = 4$$

$m = 12$ ($\alpha = 5,4\%$), 13 ($\alpha = 2,0\%$) e 14 ($\alpha = 0,6\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 10,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $13,4$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOC OS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% C MC	0,25% C MC	0,6% SS	1,2% SS
D ₁	58,60	62,82	73,17	67,72	64,85
D ₂	58,26	59,04	68,89	66,23	64,55
D ₃	56,26	58,94	61,17	67,01	62,36
D ₄	62,12	56,58	63,61	66,15	61,73

$$(S = 12,2; \alpha = 0,4\%)$$

d) para médias de blocos (dias)

$$k = 4, \quad n = 5$$

$m = 11$ ($\alpha = 3,7\%$) e 12 ($\alpha = 1,3\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

"BLOC OS"	"T R A T A M E N T O S"			
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
TEST.	58,60	58,26	56,26	62,12
0,1% C MC	62,82	59,04	58,94	56,58
0,25% C MC	73,17	68,89	61,17	63,61
0,6% SS	67,72	66,23	67,01	66,15
1,2% SS	64,85	64,55	62,36	61,73

$$(S = 8,04; \alpha = 3,4\%)$$

ainda, da Testemunha, a dose 0,25% de CMC. As comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle localizaram as diferenças significativas entre a Testemunha e os tratamentos 0,25% de CMC, 0,6% de SS e 1,2% de SS. Para o solo arenoso, o confronto dos cinco tratamentos indicou as diferenças estatísticas entre os tratamentos 0,25% de CMC e 0,6% de SS com os tratamentos Testemunha e 0,1% de CMC; difere, ainda, da Testemunha, o tratamento 1,2% de SS. Semelhantemente ao que ocorrera com o solo argiloso, a análise estatística permitiu observar diferenças significativas dos tratamentos 0,25% de CMC, 0,6% de SS e 1,2% de SS, com a Testemunha, quando individualmente com ela comparados.

Com relação à porcentagem acumulada de agregados, em peneira de 0,25 mm, a análise estatística permitiu estabelecer dois grupos de tratamentos, significativamente diferentes quanto ao seu efeito, para ambos os solos estudados; isto é, - os tratamentos 0,25% de CMC, 0,6% de SS e 1,2% de SS, que compõem o primeiro grupo, são mais eficientes que a Testemunha e o tratamento 0,1% de CMC, que compõem o segundo grupo.

Tal resultado, em parte discorda das afirmações de O'BRIEN (1952), uma vez que ambos os solos foram igualmente afetados pelo tratamento com aditivos químicos, discordando, também, das conclusões de JACOBSON e SWANSON (1958), pois a intensidade e duração da resposta de ambos os solos à aplicação dos aditivos foram muito semelhantes, resguardadas as condições do trabalho.

Desde que BROCKMAN e ALLENBY (1955) sugeriram que os agregados formados pelo efeito de aditivos fossem mantidos em repouso por um determinado tempo e em determinadas condições, antes de serem ensaiados ou revolvidos, procurou-se confirmar este fato através da determinação da estabilidade estrutural dos agregados, constatando-se, porém, que, estatisticamente, os agregados formados podem ser revolvidos, sem prejuízo da sua estabilidade estrutural, apenas nos tres primeiros dias, no solo argiloso e, no solo arenoso, para o tratamento

0,1% de CMC; para os demais tratamentos do solo arenoso, em qualquer dia, dentro do período considerado, tal solo pode ser trabalhado, com exceção do terceiro, para o tratamento 0,25% de CMC.

Buscando uma maior compreensão do assunto, suplementaram-se as informações relativas à estabilidade estrutural dos agregados com a determinação do Módulo de Finura, cuja análise estatística está apresentada nos QUADROS 21 e 22.

No caso do solo argiloso, observou-se que, estatisticamente, ocorrem diferenças entre dias para os tratamentos 0,1% de CMC, 0,6% de SS e 1,2% de SS, enquanto que, no solo arenoso, estas diferenças ocorrem para os tratamentos Testemunha e 0,25% de CMC. Para os tratamentos 0,1% de CMC e 1,2% de SS, - no solo argiloso, o quarto dia difere do primeiro e do segundo, respectivamente, enquanto que o terceiro difere do primeiro, - para o tratamento 0,6% de SS. Em se tratando do solo arenoso, o terceiro dia difere do primeiro, para o tratamento 0,25% de - CMC, enquanto que o quarto dia difere do terceiro, para a Testemunha, diferença esta provocada, provavelmente, pelo refazimento da análise cujos dados originais se perderam acidentalmente.

O confronto dos cinco tratamentos, no solo argiloso, levou exatamente ao mesmo resultado indicado pela porcentagem acumulada de agregados, em peneira de 0,25 mm; para o solo arenoso, as diferenças estatísticas ocorreram entre os tratamentos 0,25% de CMC e 0,6% de SS com a Testemunha e o tratamento 0,1% de CMC, além do tratamento 1,2% de SS ter diferido do tratamento 0,25% de CMC. Comparados com a Testemunha, apenas os tratamentos 0,25% de CMC e 0,6% de SS foram significativos, no solo arenoso, juntando-se a estes o tratamento 1,2% de SS, no caso do solo argiloso.

A análise estatística permitiu estabelecer dois grupos de tratamentos, significativamente diferentes quanto ao seu efeito sobre o Módulo de Finura dos agregados; para o solo argiloso, os tratamentos são agrupados exatamente da mesma maneira como o foram para o caso da porcentagem acumulada dos agregados, em peneira de 0,25 mm; para o solo arenoso, o grupo de maior efeito compreende os tratamentos 0,25% de CMC e 0,6%

QUADRO 21 - Teste de Friedman aplicado aos dados referentes ao
Módulo de Finura dos agregados do solo argiloso.

a) para cada tratamento

$$k = 4, \quad n = 3$$

$m = 8$ ($\alpha = 4,9\%$) e 9 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas
entre todos os pares de tratamentos.

PENEIRAGEM	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
Testemunha (S = 6,1; $\alpha = 14,8\%$)				
1ª PENEIRAGEM	4,16	4,12	4,10	4,11
2ª PENEIRAGEM	4,04	4,02	4,02	4,11
3ª PENEIRAGEM	4,04	3,98	3,93	4,08
0,1% CMC (S = 8,2; $\alpha = 1,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	4,65	4,41	4,13	4,11
2ª PENEIRAGEM	4,46	4,28	4,07	4,08
3ª PENEIRAGEM	4,42	4,20	3,99	3,98
0,25% CMC (S = 6,6; $\alpha = 7,5\%$)				
1ª PENEIRAGEM	4,72	4,56	4,50	4,43
2ª PENEIRAGEM	4,64	4,36	4,39	4,38
3ª PENEIRAGEM	4,59	4,32	4,34	4,33
0,6% SS (S = 9; $\alpha = 0,2\%$)				
1ª PENEIRAGEM	4,94	4,66	4,43	4,57
2ª PENEIRAGEM	4,86	4,52	4,35	4,45
3ª PENEIRAGEM	4,80	4,46	4,28	4,37
1,2% SS (S = 9; $\alpha = 0,2\%$)				
1ª PENEIRAGEM	4,72	4,79	4,51	4,45
2ª PENEIRAGEM	4,63	4,70	4,44	4,36
3ª PENEIRAGEM	4,58	4,63	4,40	4,33

QUADRO 21 - continuação

b) para confronto dos tratamentos

$k = 5, n = 12$

$m = 22$ ($\alpha = 3,8\%$), 23 ($\alpha = 2,5\%$) e 25 ($\alpha = 1,1\%$), para com
parações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 18,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $23,2$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOCOS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1	4,16	4,65	4,72	4,94	4,72
2	4,04	4,46	4,64	4,86	4,63
3	4,04	4,42	4,59	4,80	4,58
4	4,12	4,41	4,56	4,66	4,79
5	4,02	4,28	4,36	4,52	4,70
6	3,98	4,20	4,32	4,46	4,63
7	4,10	4,13	4,50	4,43	4,51
8	4,02	4,07	4,39	4,35	4,44
9	3,93	3,99	4,34	4,28	4,40
10	4,11	4,11	4,43	4,57	4,45
11	4,11	4,08	4,38	4,45	4,36
12	4,08	3,98	4,33	4,37	4,33

($S' = 38,56^{***}$)

QUADRO 21 - continuação

c) para médias de tratamentos

$$k = 5, \quad n = 4$$

$m = 12$ ($\alpha = 5,4\%$), 13 ($\alpha = 2,0\%$) e 14 ($\alpha = 0,6\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 10,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $13,4$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOCOS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
D ₁	4,08	4,51	4,65	4,87	4,64
D ₂	4,04	4,30	4,41	4,55	4,71
D ₃	4,02	4,06	4,41	4,35	4,45
D ₄	4,10	4,06	4,38	4,46	4,38

$$(S' = 12,71; \alpha = 0,2\%)$$

d) para médias de blocos (dias)

$$k = 4, \quad n = 5$$

$m = 11$ ($\alpha = 3,7\%$) e 12 ($\alpha = 1,3\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

"BLOCOS"	"T R A T A M E N T O S"			
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
TEST.	4,08	4,04	4,02	4,10
0,1% CMC	4,51	4,30	4,06	4,06
0,25% CMC	4,65	4,41	4,41	4,38
0,6% SS	4,87	4,55	4,35	4,46
1,2% SS	4,64	4,71	4,45	4,38

$$(S' = 7,94; \alpha = 4,4\%)$$

QUADRO 22 - Teste de Friedman aplicado aos dados referentes ao
Módulo de Finura dos agregados do solo arenoso.

a) para cada tratamento

$$k = 4, \quad n = 3$$

$m = 8$ ($\alpha = 4,9\%$) e 9 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas
entre todos os pares de tratamentos.

PENEIRAGEM	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
Testemunha ($S = 8,2$; $\alpha = 1,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	2,76	2,66	2,64	2,87
2ª PENEIRAGEM	2,62	2,61	2,55	2,67
3ª PENEIRAGEM	2,56	2,62	2,55	2,63
0,1% CMC ($S' = 5,57$; $\alpha = 17,5$)				
1ª PENEIRAGEM	2,72	2,67	2,62	2,63
2ª PENEIRAGEM	2,65	2,61	2,64	2,57
3ª PENEIRAGEM	2,61	2,59	2,61	2,59
0,25% CMC ($S' = 8,79$; $\alpha = 1,7\%$)				
1ª PENEIRAGEM	3,08	3,08	2,75	2,84
2ª PENEIRAGEM	2,95	2,95	2,72	2,74
3ª PENEIRAGEM	2,87	2,77	2,66	2,72
0,6% SS ($S' = 0,37$; $\alpha =$ não previsto)				
1ª PENEIRAGEM	2,87	2,83	2,79	2,83
2ª PENEIRAGEM	2,77	2,80	2,80	2,75
3ª PENEIRAGEM	2,72	2,72	2,72	2,74
1,2% SS ($S' = 1,34$; $\alpha =$ não previsto)				
1ª PENEIRAGEM	2,73	2,69	2,70	2,73
2ª PENEIRAGEM	2,66	2,76	2,68	2,65
3ª PENEIRAGEM	2,64	2,66	2,61	2,62

QUADRO 22 - continuação

b) para confronto dos tratamentos

$$k = 5, \quad n = 12$$

$m = 22$ ($\alpha = 3,8\%$), 23 ($\alpha = 2,5\%$) e 25 ($\alpha = 1,1\%$), para com
parações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 18,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $23,2$ ($\alpha = 1,0\%$), para com
parações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOCOS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
1	2,76	2,72	3,08	2,87	2,73
2	2,62	2,65	2,95	2,77	2,66
3	2,56	2,61	2,87	2,72	2,64
4	2,66	2,67	3,08	2,83	2,69
5	2,61	2,61	2,95	2,80	2,76
6	2,60	2,59	2,77	2,72	2,66
7	2,64	2,62	2,75	2,79	2,70
8	2,55	2,64	2,72	2,80	2,68
9	2,55	2,61	2,66	2,72	2,61
10	2,87	2,63	2,84	2,83	2,73
11	2,67	2,59	2,74	2,75	2,65
12	2,63	2,59	2,72	2,74	2,62

($S' = 32,04^{***}$)

QUADRO 22 - continuação

c) para médias de tratamentos

$$k = 5, \quad n = 4$$

$m = 12$ ($\alpha = 5,4\%$), 13 ($\alpha = 2,0\%$) e 14 ($\alpha = 0,6\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 10,9$ ($\alpha = 5,0\%$) e $13,4$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

BLOC OS	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% C MC	0,25% C MC	0,6% SS	1,2% SS
D ₁	2,65	2,66	2,97	2,79	2,68
D ₂	2,62	2,62	2,93	2,78	2,70
D ₃	2,58	2,62	2,71	2,77	2,66
D ₄	2,72	2,60	2,77	2,77	2,67

$$(S' = 13,74; \alpha = 0,1\%)$$

d) para média de blocos (dias)

$$k = 4, \quad n = 5$$

$m = 11$ ($\alpha = 3,7\%$) e 12 ($\alpha = 1,3\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

"BLOC OS"	"T R A T A M E N T O S			
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
TEST.	2,65	2,62	2,58	2,72
0,1% C MC	2,66	2,62	2,62	2,60
0,25% C MC	2,97	2,93	2,71	2,77
0,6% SS	2,79	2,78	2,77	2,77
1,2% SS	2,68	2,70	2,66	2,67

$$(S' = 8,56; \alpha = 3,1\%)$$

de SS.

Para avaliar e comparar o efeito dos tratamentos sobre a agregação do solo, o Módulo de Finura dos agregados, - determinado a partir dos dados fornecidos pelo peneiramento a seco, se mostrou um eficiente índice, permitindo observar e comparar a formação de agregados maiores quanto maior for o seu valor. Além disso, o Módulo de Finura se mostrou capaz de representar a estabilidade estrutural do solo uma vez que acusou, praticamente, as mesmas diferenças estatísticas e as mesmas tendências encontradas para ambos os solos estudados, quando levantadas através da porcentagem acumulada de agregados, em peneira de 0,25 mm, muito embora, para o solo arenoso, o tratamento 1,2% de SS tenha sido incluído em grupo diferente, juntamente com a Testemunha e o tratamento 0,1% de CMC; todavia o nível de significância alcançado pelo tratamento 1,2% de SS, - quando se determinou a porcentagem acumulada de agregados, em peneira de 0,25 mm, foi a uma taxa de erro experimental maior que as demais do mesmo grupo.

O efeito positivo da carboximetilcelulose e do - silicato de sódio sobre a agregação do solo, verificado neste trabalho, veio confirmar o que antes LAWS e PAGE (1946), GEOGHEGAN (1950) e DOYLE (1952) haviam relatado.

A análise estatística aplicada aos dados referentes à composição granulométrica dos solos estudados está resumida nos QUADROS 23 e 24. Tanto para o solo argiloso como para o arenoso, os teores de argila, silte, areia fina e areia grossa não foram estatisticamente afetados pelos tratamentos, embora ocorresse uma ou outra diferença entre tratamentos.

Em relação à testemunha do solo argiloso, o tratamento 0,1% de CMC abaixou o teor de argila e aumentou o teor de areia grossa, enquanto que o tratamento 1,2% de SS aumentou o teor de silte; este tratamento abaixou, também, o teor de areia fina, quando comparado com o tratamento 0,1% de CMC. No caso do solo arenoso, o tratamento 1,2% de SS provocou o abai

QUADRO 23 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes à composição granulométrica porcentual do solo argiloso.

$k = 5, n = 3$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$) e 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

REPETI- CÕES	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% C MC	0,25% C MC	0,6% SS	1,2% SS
Teor de argila ($H = 11,43^*$)					
R	47,5	41,0	42,2	45,8	49,6
E	52,0	41,2	41,5	49,1	48,2
P	53,0	38,5	41,8	48,6	46,8
Teor de silte ($H = 11,58^*$)					
R	20,3	22,7	23,8	23,5	24,9
E	21,6	24,1	24,0	24,4	25,0
P	20,5	23,4	24,8	24,1	26,0
Teor de areia fina ($H' = 11,10^*$)					
R	25,1	26,5	27,4	24,0	22,6
E	24,9	28,1	26,9	24,3	24,1
P	26,8	28,8	27,0	26,4	24,4
Teor de areia grossa ($H' = 10,98^*$)					
R	5,8	8,8	6,4	4,4	2,6
E	1,5	7,5	6,6	2,9	2,3
P	1,0	9,4	7,5	2,5	3,6

Obs: níveis de significância para H e H' são obtidos em tabelas de limites unilaterais de χ^2 , com $k-1$ G.L., onde $(^*)$ = significativo a 5% de probabilidade e $(^{**})$ = significativo a 1,0%.

QUADRO 24 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes à composição granulométrica percentual do solo arenoso.

$k = 5, n = 3$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$) e 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

REPETI- ÇÕES	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Teor de argila ($H' = 11,83^*$)					
R	17,5	18,0	17,4	15,6	11,6
E	17,6	17,2	17,4	14,9	12,5
P	17,6	17,1	17,4	15,4	11,6
Teor de silte ($H' = 12,49^*$)					
R	5,3	4,6	5,1	6,8	8,1
E	4,9	4,0	4,9	7,2	8,2
P	4,8	4,3	4,4	7,0	8,9
Teor de areia fina ($H' = 9,88^*$)					
R	72,4	74,0	72,7	73,0	76,0
E	73,7	74,8	72,9	72,7	74,4
P	74,1	75,6	73,4	73,3	74,9
Teor de areia grossa ($H' = 7,41$)					
R	4,8	3,4	4,8	4,6	4,3
E	3,8	4,0	4,8	4,6	4,9
P	3,4	3,1	4,7	4,9	4,5

xamento do teor de argila e o acréscimo do teor de silte, quando comparado, respectivamente, com a Testemunha e o tratamento 0,1% de CMC.

Com relação aos limites de consistência, o QUA DRO 25 traz a análise estatística correspondente aos resultados encontrados para ambos os solos, mostrando que houve diferenças significativas entre tratamentos; o tratamento 0,25% de CMC difere do tratamento 1,2% de SS, quanto ao seu efeito sobre o limite de liquidez do solo argiloso, e do tratamento 0,6% de SS, quanto ao seu efeito sobre o limite de plasticidade do mesmo solo; com relação ao índice de plasticidade do solo argiloso, o tratamento 1,2% de SS difere da Testemunha e do tratamento 0,1% de CMC. No caso do solo arenoso, não plástico, apenas a determinação do limite de liquidez foi aplicável, anotando-se que o tratamento 0,25% de CMC difere do tratamento 0,6% de SS.

Tais resultados vieram confirmar as asseverações de TAYLOR e BALBRIDGE (1954) e DUBOSE (1955). Para fins de solo-cimento, o tratamento 1,2% de SS demonstrou ser o melhor, pois diminuiu, significativamente, o limite de liquidez e o índice de plasticidade, quando comparado com o tratamento 0,25% de CMC e os tratamentos Testemunha e 0,1% de CMC, respectivamente, tornando o solo argiloso, empregado neste trabalho, mais aceitável, pelos critérios da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972) que fixam em 40% o limite de liquidez máximo e em 18% o índice de plasticidade, embora SHARP (1960) tenha ampliado tal limite a 45-60%. Sob este mesmo aspecto, o tratamento 0,25% de CMC foi o pior, para ambos os solos, pois aumentou, significativamente, seus limites de liquidez quando comparado com os tratamentos que envolvem silicato de sódio.

QUADRO 25 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes aos limites de consistência dos solos estudados (em porcentagem).

$$k = 5, \quad n = 3$$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$) e 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

a) limites de consistência do solo argiloso

REPETI- CÕES	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Limite de liquidez ($H = 13,5^{**}$)					
R	41,24	52,35	63,98	34,25	33,38
E	42,22	50,88	60,15	34,90	31,25
P	41,20	53,50	63,50	34,28	31,18
Limite de plasticidade ($H = 12,9^*$)					
R	28,20	38,41	54,42	26,33	28,94
E	28,50	37,78	52,28	27,53	27,98
P	28,18	38,72	52,83	26,38	27,66
Índice de plasticidade ($H = 12,76^*$)					
R	13,04	13,94	9,56	7,92	4,44
E	13,72	13,10	7,87	7,37	3,27
P	13,02	14,78	10,67	7,90	3,52

b) limites de consistência do solo arenoso

REPETI- CÕES	T R A T A M E N T O S				
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS
Limite de liquidez ($H = 13,52^{**}$)					
R	17,73	20,32	28,95	12,70	14,34
E	18,00	20,05	28,55	12,68	14,34
P	17,14	19,73	28,53	12,90	14,45

O efeito do tratamento com aditivos químicos sobre o peso específico aparente seco, em ambos os solos, provou diferenças estatisticamente significativas, o mesmo não acontecendo com relação ao peso específico dos sólidos. A análise estatística, apresentada no QUADRO 26, permite observar que, no primeiro caso, o tratamento 0,25% de CMC difere da Testemunha, em ambos os solos, o mesmo acontecendo com os tratamentos 1,2% de SS e 0,1% de CMC, para os solos argiloso e arenoso, respectivamente.

O índice de vazios e a porosidade, cuja análise estatística se acha no QUADRO 27, sendo uma relação entre os índices físicos anteriores, apresentam as mesmas diferenças estatísticas encontradas para o peso específico aparente seco, em ambos os solos.

Os resultados encontrados corroboram as conclusões de JOHNSTONE et alii (1957), uma vez que a incorporação de aditivos químicos diminuiu o peso específico aparente do solo e aumentou, conseqüentemente, a porosidade. O fato de o tratamento 0,25% de CMC ter diminuído, significativamente, o peso específico aparente seco de ambos os solos estudados, confirma a asseveração de QUASTEL (1952) que relatou o efeito favorável da carboximetilcelulose sobre a porosidade do solo; e, uma vez que, segundo KROCHIN (1960), o aumento da porosidade do solo acarreta um aumento da permeabilidade, pode-se supor que, de acordo com TAYLOR e BALBRIDGE (1954), os tratamentos com carboximetilcelulose que aumentaram a porosidade do solo, aumentaram, também, a sua permeabilidade. Pode-se esperar ainda, que, conforme KROCHIN (1960), os tratamentos 0,25% de CMC e 1,2% de SS que diminuíram o peso específico aparente seco do solo argiloso, e os tratamentos 0,1% e 0,25% de CMC que dimi

QUADRO 26 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes ao peso específico aparente seco (γ_o) e peso específico dos sólidos (γ_s) dos solos estudados (em g/cm^3).

$$k = 5, \quad n = 3$$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$) e 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

TIPO DE SOLO	T R A T A M E N T O S					
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS	
ARGILOSO	γ_o ($H' = 13,02^*$)					
	R	1,19	1,03	0,99	1,06	1,00
	E	1,19	1,03	1,00	1,05	1,01
	P	1,18	1,04	1,00	1,07	0,99
	γ_s ($H' = 6,87$)					
	R	2,87	2,89	2,95	2,82	2,90
E	2,80	2,89	2,86	2,81	2,86	
P	2,79	2,83	2,93	2,82	2,80	
ARENOSO	γ_o ($H' = 13,85^{**}$)					
	R	1,41	1,30	1,26	1,34	1,33
	E	1,42	1,30	1,25	1,34	1,33
	P	1,41	1,30	1,26	1,34	1,33
	γ_s ($H' = 7,49$)					
	R	2,58	2,59	2,61	2,61	2,59
E	2,56	2,57	2,61	2,52	2,56	
P	2,53	2,59	2,66	2,58	2,54	

QUADRO 27 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes ao índice de vazios (e) e porosidade (n) dos solos estudados.

$$k = 5, \quad n = 3$$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$) e 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

TIPO DE SOLO	T R A T A M E N T O S					
	TEST.	0,1% C	MC	0,25% C	MCO,6% SS	1,2% SS
ARGILOSO	e ($H' = 13,57^{**}$)					
	R	1,37	1,79	1,94	1,66	1,85
	E	1,37	1,79	1,91	1,68	1,82
	P	1,39	1,76	1,91	1,63	1,88
	n, % ($H' = 13,57^{**}$)					
	R	57,80	64,16	65,99	62,41	64,91
	E	57,80	64,16	65,63	62,69	64,54
P	58,16	63,77	65,63	61,98	65,28	
ARENOSO	e ($H' = 13,83^{**}$)					
	R	0,81	0,98	1,09	0,92	0,92
	E	0,80	0,98	1,10	0,92	0,92
	P	0,81	0,98	1,09	0,92	0,92
	n, % ($H' = 13,84^{**}$)					
	R	44,75	49,49	52,15	47,92	47,92
	E	44,44	49,49	52,38	47,92	47,92
P	44,75	49,49	52,15	47,92	47,92	

nuiram o peso específico aparente seco do solo arenoso, ou, por outro lado, aumentaram a porosidade, a níveis estatisticamente significativos, alcançarão os menores valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento; conduzirão, também, segundo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), a menores estabilidade relativa e capacidade de suporte.

A análise estatística aplicada aos dados fornecidos pelo ensaio de compactação dos solos empregados, apresentada no QUADRO 28, mostrou que, com relação à densidade aparente máxima, ocorreram diferenças estatísticas localizadas entre os tratamentos 0,6% de SS e 0,25% de CMC, em ambos os solos; no solo arenoso, o tratamento 1,2% de SS difere, também, do tratamento 0,25% de CMC. Em se tratando da unidade ótima, a análise estatística apenas foi significativa no caso do solo arenoso, tendo os tratamentos com silicato de sódio diferido do tratamento 0,25% de CMC.

Para fins de solo-cimento, é desejável que o solo apresente, além de outras características, elevada densidade; sob este aspecto, o tratamento 0,6% de SS foi melhor que o tratamento 0,25% de CMC, conduzindo a valores mais elevados de densidade, em ambos os solos, o mesmo acontecendo com o tratamento 1,2% de SS que, no caso do solo arenoso, também difere do tratamento 0,25% de CMC. Os valores de densidade aparente máxima alcançados são considerados baixos, segundo o critério da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962), para o solo argiloso, e médios ou quase altos, para o solo arenoso, correspondendo teores de unidade ótima muito altos, para o solo argiloso, e médios ou quase baixos, para o solo arenoso, conforme se observa no QUADRO 12.

A análise estatística aplicada aos dados fornecidos pelo ensaio de compactação do solo-cimento com os solos estudados, está registrada no QUADRO 29. Tanto a densidade

QUADRO 28 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes à densidade aparente máxima ($\gamma_{\text{máx.}}$) e umidade ótima ($h_{\text{ot.}}$) do ensaio de compactação dos solos estudados (em g/dm^3 e %, respectivamente).

$$k = 5, \quad n = 3$$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$) e 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

TIPO DE SOLO	TRATAMENTOS					
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS	
ARGILOSO	$\gamma_{\text{máx.}}$ ($H' = 11,66^*$)					
	R	1472	1467	1455	1481	1465
	E	1469	1459	1459	1488	1475
	P	1469	1462	1434	1472	1471
	$h_{\text{ot.}}$ ($H' = 5,23$)					
	R	30,8	31,0	30,6	30,2	31,0
	E	29,9	29,8	31,4	30,6	31,5
	P	30,1	31,2	31,7	30,6	30,6
	ARENOSO	$\gamma_{\text{máx.}}$ ($H' = 12,84^*$)				
		R	1932	1910	1830	1956
E		1930	1924	1826	1960	1964
P		1928	1923	1828	1957	1953
$h_{\text{ot.}}$ ($H' = 12,91^*$)						
R		11,3	12,7	14,0	10,7	10,6
E		11,8	12,1	13,8	10,0	10,5
P		11,8	12,3	14,3	10,5	10,5

QUADRO 29 - Teste de Kruskal-Wallis aplicado aos dados referentes à densidade aparente máxima ($\gamma_{\text{máx.}}$) e umidade ótima ($h_{\text{ot.}}$) do ensaio de compactação do solo-cimento com os solos estudados (em g/dm^3 e %, respectivamente).

$$k = 5, \quad n = 3$$

$m = 28$ ($\alpha = 6,0\%$), 30 ($\alpha = 2,3\%$), 32 ($\alpha = 0,7\%$), para comparações múltiplas entre todos os pares de tratamentos.

$m = 8,91$ ($\alpha = 5,0\%$) e $10,95$ ($\alpha = 1,0\%$), para comparações múltiplas entre os contrastes tratamentos vs controle.

TIPOS DE SOLO	T R A T A M E N T O S					
	TEST.	0,1% CMC	0,25% CMC	0,6% SS	1,2% SS	
ARGILOSO	$\gamma_{\text{máx.}}$ ($H = 11,57^*$)					
	R	1497	1492	1490	1533	1483
	E	1520	1518	1469	1538	1468
	P	1536	1530	1445	1534	1462
	$h_{\text{ot.}}$ ($H' = 11,44^*$)					
	R	27,6	29,4	30,7	28,3	30,7
	E	27,8	26,8	30,8	28,8	30,9
P	26,6	28,6	31,6	28,7	31,6	
ARENOSO	$\gamma_{\text{máx.}}$ ($H = 10,10^*$)					
	R	1924	1912	1853	1868	1875
	E	1922	1883	1890	1884	1866
	P	1930	1891	1870	1878	1869
	$h_{\text{ot.}}$ ($H' = 10,28^*$)					
	R	12,0	12,5	12,8	13,3	12,4
	E	12,2	12,3	12,4	13,5	13,0
P	12,3	12,4	13,0	12,8	13,0	

aparente máxima como a umidade ótima, em ambos os solos, foram significativamente afetadas pelo tratamento com aditivos químicos. Com relação à densidade aparente máxima do solo-cimento com solo argiloso, o tratamento 0,6% de SS difere dos tratamentos 0,25% de CMC e 1,2% de SS; no caso do solo arenoso, o tratamento 1,2% de SS difere, significativamente, da Testemunha. Em se tratando da umidade ótima, os tratamentos 0,25% de CMC e 1,2% de SS diferem, estatisticamente, da Testemunha, no solo argiloso, sendo que, no solo arenoso, a única diferença ocorre entre o tratamento 0,6% de SS e a Testemunha.

Observa-se, com relação aos resultados da densidade aparente máxima do solo-cimento, que não há uma tendência de comportamento que possa ser estabelecida para ambos os solos. Em se tratando do solo argiloso, o fato de o tratamento 0,6% de SS ter produzido o maior valor de densidade aparente máxima, significativamente diferente dos tratamentos 0,25% de CMC e 1,2% de SS, que alcançaram, por outro lado, os menores valores de densidade aparente máxima, não encontra apoio na literatura consultada. No item 2.4.1.2., relatou-se que a formação do gel de silicato de sódio provoca a aglutinação das partículas do solo, alterando, assim, a granulometria da mistura e aumentando a resistência à compactação, de modo a afetar não apenas o teor de umidade ótima, como, também, a densidade aparente seca máxima; o aumento na resistência do solo à compactação conduz a um decréscimo na densidade, uma vez que a energia de compactação, no ensaio, é mantida constante; se isso ocorrer, o menor valor de densidade aparente máxima alcançado pelo tratamento 1,2% de SS, no solo arenoso, estaria justificado. Com relação à umidade ótima, os tratamentos que produziram os menores valores de densidade aparente máxima do solo-cimento com solo argiloso, alcançaram, por outro lado, os mais altos teores de umidade ótima, significativamente diferentes da Testemunha.

No que concerne aos dados de resistência à compressão de corpos de prova de solo-cimento com o solo argiloso,

a análise da variância correspondente está apresentada no QUADRO 30; aplicado às médias de tratamentos, o teste de Tukey mostrou o efeito positivo do tratamento com silicato de sódio sobre a resistência adquirida pelos corpos de prova de solo-cimento que, por outro lado, foi negativamente afetada pelo tratamento 0,25% de CMC. O teor de cimento $C_P + 1\%$, empregado na moldagem dos corpos de prova de solo-cimento, se mostrou, independentemente dos tratamentos e das épocas, significativamente superior ao teor $C_P - 1\%$; do mesmo modo, a época 2 (28º dia), independentemente dos tratamentos e das doses, foi melhor que a época 1 (7º dia), conferindo, aos corpos de prova de solo-cimento, maior resistência. O desdobramento dos graus de liberdade da interação T x E (Tratamento x Época) revelou que, dentro de tratamentos, a época 2 foi significativamente melhor, para cada um deles, individualmente, enquanto que, aos 7 dias, os tratamentos com silicato de sódio foram estatisticamente superiores aos demais, ocorrendo, ainda, que o tratamento 0,25% de CMC diferiu da Testemunha, influenciando, negativamente, sobre o valor da resistência à compressão; aos 28 dias, os tratamentos com silicato de sódio fizeram crescer a resistência dos corpos de prova a níveis altamente significativos, ao passo que o tratamento 0,25% de CMC persistiu em seu efeito negativo.

Com relação ao solo arenoso, o QUADRO 31 mostra a análise da variância dos dados referentes à resistência à compressão; a aplicação do teste de Tukey revelou o efeito positivo dos tratamentos com silicato de sódio sobre a resistência apresentada pelos corpos de prova de solo-cimento, enquanto que os demais tratamentos não diferiram entre si; independentemente de tratamentos e épocas, o teor de cimento de moldagem $C_P + 1\%$ se mostrou significativamente superior ao teor $C_P - 1\%$, o mesmo ocorrendo para a época 2 (28º dia), que, independentemente de tratamentos e doses, permitiu a obtenção de maior ganho de resistência pelos corpos de prova de solo-cimento. O desdobramento dos graus de liberdade das interações T x

QUADRO 30 - Análise da variância dos dados referentes à resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento com o solo argiloso, em kg/cm^2 (fatorial $5 \times 2 \times 2$).

CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento (T)	4	320,6101	80,1525	237,21**
Dose (D)	1	66,3181	66,3181	196,26**
Época (E)	1	184,6612	184,6612	546,50**
T x D	4	2,1069	0,5267	1,56
T x E	4	9,4782	2,3695	7,01**
D x E	1	0,6242	0,6242	1,85
T x D x E	4	3,3628	0,8407	2,49
Resíduo	40	13,5171	0,3379	
TOTAL	59	600,6787		

(**) significativo a 1% de probabilidade

C.V. = 4,87%

QUADRO 31 - Análise da variância dos dados referentes à resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento com o solo arenoso, em kg/cm^2 (fatorial $5 \times 2 \times 2$).

CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento (T)	4	399,5617	99,8904	780,39**
Dose (D)	1	19,4940	19,4940	152,30**
Época (E)	1	61,9760	61,9760	484,19**
T x D	4	10,4637	2,6159	20,44**
T x E	4	41,9952	10,4988	82,02**
D x E	1	0,0117	0,0117	0,09
T x D x E	4	1,0700	0,2675	2,09
Resíduo	40	5,1213	0,1280	
TOTAL	59	539,6936		

C.V. = 7,27%

D (Tratamento x Dose) e T x E (Tratamento x Época) revelou que, dentro de tratamento, tanto a dose 2 ($C_p + 1\%$) como a época 2 (28º dia), foram significativamente melhores, para cada um de les, separadamente; por outro lado, para ambas as doses e para ambas as épocas, os tratamentos com silicato de sódio foram estatisticamente superiores aos demais, que não diferiram entre si.

A resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento que, neste trabalho, está sendo usada para medir a qualidade do solo-cimento, produziu resultados que, em parte, concordaram com MATEOS et alii (1963), uma vez que o tratamento do solo com aditivos químicos, não somente aumentou como também diminuiu o valor da resistência apresentada pelos corpos de prova de solo-cimento com os solos estudados. O tratamento prévio dos solos com silicato de sódio, cujo efeito positivo sobre a resistência do solo-cimento foi altamente significativo, comprova, em parte, as conclusões de HANDY et alii (1959), que haviam verificado a sua eficiência apenas sobre um solo barro arenoso; os acréscimos médios no valor da resistência à compressão atendem às previsões de HANDY (1958), pois, - em relação à Testemunha, o tratamento 0,6% de SS aumentou o valor da resistência à compressão simples em 20,38% e 17,57%, - aos 7 e 28 dias, respectivamente, para o solo argiloso, e em 95,31% e 131,77%, para o solo arenoso; no caso do tratamento 1,2% de SS, estes acréscimos foram de 63,89% e 36,66%, para o solo argiloso, e 168,28% e 255,79%, para o solo arenoso, aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Conforme se observa nos QUADROS 16 e 17 e na FIGURA 12, a resistência à compressão aumentou com o teor de cimento, confirmando a afirmação de EL-RAWI et alii (1967), além de concordar com MOH et alii (1962) e MATEOS et alii (1963), uma vez que a resistência adquirida pelo solo-cimento depende, também, do teor de cálcio disponível e este, do teor de cimento; aumentando com a idade, os valores de resistência à com

pressão confirmaram as conclusões de CRONKHITE e DACYSZYN (1966), SHERARD (1969) e PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969).

Os resultados do presente trabalho discordam de FELT (1955), pois, com o solo argiloso, se conseguiu maiores resistências do que com o solo arenoso, embora ambos tenham se revelado contra-indicados para fins de pavimentação de estradas de rodagem com solo-cimento pelo fato de não terem alcançado a resistência à compressão mínima aceitável, comprovando as previsões da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1962) de que, eventualmente, um solo A₇ poderia ser superior a um solo A₂; por outro lado, ambos os solos demonstraram a viabilidade do tratamento com silicato de sódio como uma das medidas alternativas de correção propostas pela PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969).

Por se tratar de um solo argiloso com um teor de argila igual a 50,8% e um limite de liquidez igual a 41,55%, KROCHIN (1960) não o recomendaria para solo-cimento, uma vez que, segundo o seu critério, o teor de argila ultrapassa 35%; e, pelo fato de conter um teor de areia igual a 28,4% e um teor de silte mais argila igual a 71,6%, este solo não satisfaz, também, as recomendações da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1969) e da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1972); com relação ao solo arenoso utilizado, cujo teor de areia é da ordem de 77,4% dos quais 73,4% correspondem a areia fina uniforme, nota-se que o mesmo está longe do solo ideal preconizado por PINTO (1960), mais se assemelhando ao solo descrito por MOH et alii (1962) o qual, embora moldado com 10% de cimento, apresentou uma resistência à compressão simples baixíssima, aos 28 dias; para fins de solo-cimento, SHARP (1969) relatou que um solo com estas características deve ser evitado.

Quando moldado e executado de acordo com as normas, espera-se que o solo-cimento alcance valores de resistência à compressão simples à altura das exigências técnicas; quando isto não ocorrer, a insuficiente resistência obtida estará indicando, segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

(1972), um teor de cimento inadequado para tal solo. Por outro lado, PINTO (1960) afirmou que a ocorrência de areia fina uniforme implica, naturalmente, em maior consumo de cimento.

Confrontando os resultados até agora analisados e discutidos, observa-se que o tratamento 1,2% de SS, que diminuiu o limite de liquidez e o índice de plasticidade do solo argiloso, permitiu, ao solo-cimento, alcançar o maior valor de resistência à compressão; por outro lado, o tratamento 0,25% de CMC que, em ambos os solos, aumentou o limite de liquidez, produziu o menor valor de resistência à compressão simples, no solo argiloso, valor que não diferiu da Testemunha, no solo arenoso.

Com relação ao peso específico aparente seco, os tratamentos 0,1% e 0,25% de CMC que, no solo arenoso, provocaram a sua diminuição, apresentaram valores de resistência não diferentes da Testemunha; os tratamentos 0,25% de CMC e 1,2% de SS que, no caso do solo argiloso, diminuíram o peso específico aparente seco, tiveram efeito diverso sobre a resistência à compressão do solo-cimento, sendo que o primeiro tratamento diminuiu e o segundo aumentou o seu valor, resultados que concordam, apenas em parte, com a afirmação de KROCHIN (1960). Em se tratando da densidade aparente máxima do ensaio de compactação do solo, os tratamentos com silicato de sódio que, no solo arenoso, aumentaram o valor da densidade aparente máxima, quando comparados com o tratamento 0,25% de CMC, conferiram, ao solo-cimento, maior resistência; o tratamento 0,6% de SS que, no solo argiloso, permitiu alcançar maior densidade e diferiu do tratamento 0,25% de CMC o qual, por outro lado, produziu o menor valor da resistência à compressão, apresentou maior resistência.

A análise da variância dos dados referentes à absorção de água por corpos de prova de solo-cimento está apresentada no QUADRO 32. No caso do solo argiloso, o teste de Tukey aplicado às médias de tratamentos mostrou que não houve di

QUADRO 32 - Análise da variância dos dados referentes à absorção de água por corpos de prova de solo-cimento, - para ambos os solos estudados, com uso da transformação $y_{ij} = \text{arc sen} \sqrt{x_{ij}}$ (fatorial 5x2).

a) para o solo argiloso

CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento (T)	4	196,9603	49,2401	4,90 ^{**}
Dose (D)	1	117,0188	117,0188	11,64 ^{**}
T x D	4	15,4505	3,8626	0,38
Resíduo	20	201,0221	10,0511	
TOTAL	29	530,4517		

C.V. = 7,15%

b) para o solo arenoso

CAUSA DE VARIAÇÃO	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento (T)	4	183,7002	45,9250	14,02 ^{**}
Dose (D)	1	222,2240	222,2240	67,83 ^{**}
T x D	4	8,7184	2,1796	0,66
Resíduo	20	65,5229	3,2761	
TOTAL	29	480,1655		

C.V. = 5,26%

ferença entre eles, embora os tratamentos com silicato de só dio diferissem da Testemunha, além do tratamento 1,2% de SS ter diferido, também, do tratamento 0,1% de CMC; no caso do solo a renoso, a Testemunha diferiu de todos os demais tratamentos. Com relação às doses empregadas, o teste de Tukey acusou dife rença altamente significativa entre elas, em ambos os solos.

Desde que o tratamento de ambos os solos com si licato de sódio diminuiu a absorção de água a níveis estatisti^c camente diferentes da Testemunha que, no solo arenoso, foi o pior tratamento, permitindo a máxima absorção de água, depreen^d de-se que há uma relação inversa entre a absorção de água por corpos de prova de solo-cimento e a resistência à compressão alcançada pelos mesmos, pois, os tratamentos que reduziram a absorção conferiram, por outro lado, o maior ganho de resistên^c cia. Os resultados obtidos concordam com JONES (1966) e NEU^{BAUER} e QUINTERO (1966), mostrando que a quantidade de água ab sorvida pelos corpos de prova de solo-cimento é inversamente proporcional à quantidade de cimento na mistura.

O efeito dos tratamentos sobre a classificação do solo segundo os sistemas do USBS, AASHO, Casagrande e FAA, ex posto no QUADRO 9, permite observar que, em se tratando do so lo argiloso, a classificação textural, segundo o critério do USBS, não sofreu qualquer variação em decorrência da aplicação dos tratamentos; todavia, quando se classificou pelo sistema da AASHO, a Testemunha do solo argiloso passou de A₇₋₆₍₉₎ para A₇₋₅₍₉₎ e A₅₍₉₎, sob efeito dos tratamentos 0,1% e 0,25% de CMC, bem como para A₄₍₇₎ e A₄₍₈₎, sob efeito dos tratamentos 0,6% e 1,2% de SS, respectivamente. O solo A₇ é empregado excepcio nalmente, enquanto que o solo A₅, embora contra-indicado como base de estradas de rodagem de solo-cimento, é tolerado como sub-base; o tratamento com silicato de sódio, que transformou o solo A₇ em solo A₄, fez dele um material de características re gulares, com relação ao seu comportamento em estradas de rodã gem. Pela Classificação Unificada ou Classificação de Casa^u

grande, a Testemunha CI, que representa um solo argiloso de média plasticidade, passou a CH e CL, respectivamente, pelo tratamento com carboximetilcélulose e silicato de sódio, onde CH indica um solo argiloso de alta plasticidade e resistência seca alta a muito alta, e CL, um solo argiloso de baixa plasticidade e resistência seca média a alta. Pela classificação da FAA, observa-se a mesma tendência apontada pela Classificação de Casagrande, ou seja, a Testemunha E-7 passou a E-9 e E-6, - pelo tratamento com carboximetilcelulose e silicato de sódio, respectivamente, tornando o solo argiloso tanto mais favorável, para fins de dimensionamento de pavimentos de aeroportos, quanto menor for o número que representa o grupo do solo.

Com relação ao solo arenoso, não houve alteração, após a aplicação dos tratamentos, quaisquer que fossem os sistemas classificatórios adotados, exceção feita para o tratamento 0,25% de CMC, que, segundo o critério da FAA, levou o solo E-2 a ser classificado como E-4; classificado como A₂₋₄₍₀₎, pelo sistema da AASHO, este solo tem, normalmente, um comportamento satisfatório, como base ou pavimento de solo-cimento; pela Classificação Unificada, este solo é simbolizado por SU, cujo grupo compreende as areias uniformes com pequena ou nenhuma proporção de finos.

6. CONCLUSÕES

Resguardadas as condições do trabalho, os resultados obtidos, analisados e interpretados estatisticamente, permitiram as seguintes conclusões:

6.1. Com relação ao solo

- 6.1.1. os tratamentos 0,25% de CMC (carboximetilcelulose), 0,6% de SS (silicato de sódio) e 1,2% de SS aumentaram a estabilidade estrutural dos solos estudados;
- 6.1.2. os agregados formados pelo tratamento do solo argiloso com aditivos químicos podem ser revolvidos, sem prejuízo da estabilidade estrutural, apenas nos tres primeiros dias a partir da aplicação dos tratamentos; no caso do solo arenoso, em quaisquer dias, dentro do período considerado, com exceção do terceiro e quarto dias - para os tratamentos 0,25% e 0,1% de CMC, respectivamente;
- 6.1.3. o Módulo de Finura dos agregados do solo pode ser usado para representar a sua estabilidade estrutural;
- 6.1.4. o tratamento 1,2% de SS diminuiu o limite de liquidez e o índice de plasticidade do solo argiloso quando comparado, respectivamente, com o tratamento 0,25% de CMC e tratamentos Testemunha e 0,1% de CMC, tornando-o mais aceitável para fins de solo-cimento; sob este mesmo as

- pecto, o tratamento 0,25% de CMC influenciou negativamente, aumentando os limites de liquidez dos solos estudados, em comparação com os tratamentos com silicato de sódio;
- 6.1.5. o tratamento 0,25% de CMC diminuiu o peso específico aparente seco e aumentou, consequentemente, o índice de vazios e porosidade; os tratamentos 1,2% de SS, no solo argiloso, e 0,1% de CMC, no solo arenoso, tiveram efeito semelhante ao do tratamento 0,25% de CMC;
- 6.1.6. em comparação com o tratamento 0,25% de CMC, o tratamento 0,6% de SS produziu, em ambos os solos, a maior densidade aparente máxima; este mesmo efeito foi conseguido, também, pelo tratamento 1,2% de SS, quando aplicado ao solo arenoso;
- 6.1.7. o tratamento com silicato de sódio provocou a diminuição do teor de umidade ótima do ensaio de compactação do solo arenoso, quando comparado com o tratamento 0,25% de CMC;
- 6.1.8. o tratamento do solo argiloso com silicato de sódio fez com que o solo A₇, contra-indicado para fins de solo-cimento, se transformasse em A₄, agora um material de características regulares com relação ao seu comportamento em estradas de rodagem;
- 6.1.9. a Testemunha do solo argiloso que, pela Classificação Unificada, é simbolizada por CI e, pela classificação da FAA, é representada por E-7, passou a ser CH e E-9, sob efeito do tratamento com carboximetilcelulose, e CI e E-6, sob efeito do tratamento com silicato de sódio, observando-se, em ambos os sistemas de classifi

cação, a mesma tendência.

6.2. Com relação ao solo-cimento

- 6.2.1. o tratamento 1,2% de SS conferiu ao solo-cimento o menor valor de densidade aparente máxima, em relação à Testemunha, no solo arenoso, e ao tratamento 0,6% de SS, no solo argiloso;
- 6.2.2. os mais altos teores de umidade ótima do ensaio de compactação do solo-cimento com solo argiloso, corresponderam aos tratamentos que produziram os menores valores de densidade aparente máxima;
- 6.2.3. a resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento, em ambos os solos, foi consistentemente aumentada pelo tratamento com silicato de sódio;
- 6.2.4. o tratamento 0,25% de CMC, aplicado ao solo argiloso, teve efeito negativo sobre a resistência à compressão do solo-cimento, enquanto que, no solo arenoso, tal tratamento não diferiu da Testemunha;
- 6.2.5. a resistência à compressão simples, em ambos os solos, aumentou diretamente com o teor de cimento e com a idade do solo-cimento;
- 6.2.6. o tratamento 1,2% de SS, que diminuiu o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o peso específico aparente seco do solo argiloso, conferiu, ao solo-cimento, maior resistência;
- 6.2.7. o tratamento 0,25% de CMC, que aumentou o limite de liquidez e diminuiu o peso específico aparente seco de ambos os solos, afetou, negativamente, o valor da resistência à compressão do solo-cimento com solo argiloso, não diferenciando da Testemunha, no solo arenoso;

- 6.2.8. o tratamento 0,6% de SS que, em ambos os solos, aumentou o valor da densidade aparente máxima do ensaio de compactação do solo, apresentu maior resistência que o tratamento 0,25% - de CMC, cujo efeito foi negativo;
- 6.2.9. em ambos os solos, o tratamento com silicato de sódio diminuiu a absorção de água pelos corpos de prova de solo-cimento, diferindo da Testumunha que, no solo arenoso, permitiu a máxima absorção;
- 6.2.10. a quantidade de água absorvida pelos corpos de prova de solo-cimento diminuiu com o aumento da quantidade de cimento na mistura;
- 6.2.11. os tratamentos que reduziram a absorção de água, conferiram, ao solo-cimento, o maior ganho de resistência;
- 6.2.12. ambos os solos empregados mostraram a viabilidade do tratamento prévio com silicato de sódio, como uma das medidas indicadas para o seu aproveitamento como solo-cimento.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de se pesquisar o efeito que o tratamento prévio do solo com aditivos químicos exerce sobre a qualidade do solo-cimento, avaliando-a através da resistência à compressão simples; revestem-se de grande interesse, atualmente, as pesquisas orientadas - no sentido de se descobrirem novos meios de tornar o solo-cimento mais econômico e, ao mesmo tempo, mais resistente, quer testando quer reconhecendo a eficiência de aditivos químicos sobre o comportamento do cimento Portland como estabilizante do solo.

Para tal, foram pesquisados dois solos, a saber, um argiloso A₇₋₆₍₉₎ e um barro arenoso A₂₋₄₍₀₎, e dois aditivos, a carboximetilcelulose, nas dosagens 0,1% e 0,25%, e o silicato de sódio (relação sílica-álcali igual a 3,2), a 0,6% e 1,2%, sendo os corpos de prova moldados com cimento Portland comum, ensaiados com dois teores e rompidos aos 7 e 28 dias.

Uma vez tratados, os solos foram submetidos ao peneiramento a seco e determinados a estabilidade estrutural e Módulo de Finura dos agregados formados; foram determinadas, - também, a composição e distribuição granulométrica, além dos limites de consistência e índices físicos, cujos resultados , juntamente com os do ensaio de compactação, permitiram caracterizar o efeito dos tratamentos.

Posteriormente, foram escolhidos os teores de ci

mento para os ensaios de compactação e resistência à compressão simples do solo-cimento, de acordo com as normas de dosagem, procedendo-se, ainda, ao ensaio de absorção de água.

Os dados obtidos foram estatisticamente analisados, e os resultados permitiram que se tirassem algumas conclusões.

A resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento, em ambos os solos, foi consistentemente aumentada pelo tratamento com silicato de sódio; aumentou, também, com o acréscimo do teor de cimento e com a idade. O tratamento do solo argiloso com 0,25% de CMC (carboximetilcelulose) teve efeito negativo sobre a resistência à compressão do solo-cimento, enquanto que, no solo arenoso, tal tratamento não diferiu da Testemunha.

O tratamento 1,2% de SS (silicato de sódio) que, no solo argiloso, diminuiu o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o peso específico aparente seco, conferiu, ao solo-cimento, maior resistência; por outro lado, o tratamento 0,25% de CMC que aumentou o limite de liquidez e diminuiu o peso específico aparente seco de ambos os solos, afetou, negativamente, o valor da resistência à compressão do solo-cimento - com solo argiloso, não diferindo da Testemunha, no solo arenoso.

O tratamento 0,6% de SS que, em ambos os solos, aumentou o valor da densidade aparente máxima do ensaio de compactação do solo, apresentou maior resistência que o tratamento 0,25% de CMC, cujo efeito foi negativo.

O tratamento do solo argiloso A₇ (assim classificado pelo sistema da American Association of State Highway Officials) com silicato de sódio, fez com que este solo, usualmente contra-indicado para fins de solo-cimento, se transformasse em A₄, agora um material de características regulares - com relação ao seu comportamento em estradas de rodagem.

Os tratamentos que reduziram a absorção de água

pelos corpos de prova de solo-cimento foram aqueles que apresentaram maior resistência à compressão.

Ambos os solos experimentados neste trabalho mostraram a viabilidade do tratamento prévio com silicato de sódio, como uma das medidas indicadas para o seu aproveitamento como solo-cimento.

SUMMARY

This work was done with the objective of studying the effect of the pre-treatment of the soil with chemical additives on the quality of the soil-cement mixture, measuring it through the compressive strength of soil-cement specimens. Presently there is a great interest of finding new ways in making the soil-cement more economical and at the same time more resistant either discovering or testing the efficiency of chemical additives on the reaction of the Portland cement as a soil stabilizer.

For this purpose two soils were researched, the clayey soil A₇₋₆₍₉₎ and the sandy soil A₂₋₄₍₀₎, and two additives, the carboxy methyl cellulose in the dosage of 0.1% and 0.25%, and sodium silicate (3:2 of silica-to-soda ratio) in the quantity of 0.6% and 1.2%, being the specimens molded with common Portland cement tested with two contents and broken in compression at ages of 7 and 28 days.

Firstly the soils were treated with the chemical additives and submitted to dry sieving, determining the structural stability and the Modulus of Finesse of the soil aggregates; next, the grain-size analysis and the grain-size curve of soils were determined as well as the physical test constants and physical indices of soils complemented by the moisture-density test.

Afterwards the cement contents were chosen for

the moisture-density test and compressive strength of soil-cement mixtures, according to the dosage regulations. Beyond this a water absorption test was made.

The data were statistically analysed and the results lead to several conclusions.

The compressive strength of soil-cement specimens in both soils was strongly increased by the sodium silicate treatment, increasing also with the cement content and with age. The treatment of the clayey soil with 0.25% of CMC (carboxy methyl cellulose) had a negative reaction over the compressive strength of the soil-cement. On the other hand on the sandy soil the same treatment was not different from the control.

The treatment 1.2% of SS (sodium silicate) that on the clayey soil diminished the liquid limit, the plasticity index and the dry density, gave stronger resistance to the soil-cement. On the other hand the treatment 0.25% of CMC that increased the liquid limit and decreased the dry density of both the soils influenced negatively the compressive strength of the soil-cement with the clayey soil not differentiating from the control on the sandy soil.

The treatment 0.6% of SS that in both soils augmented the maximum density of the moisture-density test of soil presented greater resistance than the 0.25% of CMC treatment which effect was negative.

The treatment of the A₇ clayey soil (which is thus classified by the American Association of State Highway Officials system) with sodium silicate made it possible for this soil (usually not recommended for soil-cement practices) to be classified as A₄ soil, which is now a material of common characteristics based on field performance of highways.

The treatments which reduced the absorption of water by soil-cement specimens were those that presented greater compression strength.

Both soils tested on this work showed the pre-treatment viability with sodium silicate as one of the indicated measures for its usefulness for soil-cement practice.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Curso de solo-cimento: Normas de dosagens e métodos de ensaios. Anexo 3.1. Dosagem das misturas de solo-cimento. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1972. 44 p. (mecano.)
- ALLISON, L.E. Effect of synthetic polyelectrolytes on the structure of saline and alkali soils. Soil Sci. 73: 443-454. 1952
- _____. Effect of soil-conditioning polymers on the cation-exchange capacity. Soil Sci. 83 (5): 391 - 397. - 1957
- ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. - In Inst. Geogr. Geol., ed. Geologia do Estado de São Paulo. São Paulo, Bol. Inst. Geogr. Geol. 41: 167 - 262. 1964
- ARMAN, A e SAIFAN, F. The effect of delayed compaction on stabilized soil-cement. Nat. Res. Council-Highway Research Board. Research Rec. 198: 30 - 38. 1967
- AVELAR, B.C. Gênese e classificação de solos de uma catena - da região de São Manoel - S.P. Dissertação apresentada à ESALQ/USP. Piracicaba, 1971. 95 p. (mecano.)

- BALMER, G.G. Shear strength and elastic properties of soil-cement mixtures under triaxial loading. Chicago, Portland Cement Association. Bulletin D 32, 1958. 18 p.
- BASÍLIO, F.A. Considerações sobre dimensionamento e durabilidade dos pavimentos de solo-cimento. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1973a. 12 p.
- _____. Cimento Portland. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1973b. 34 p.
- BAVER, L.D. Soil Physics. 3rd Ed. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1966. 489 p.
- BROCKMAN, F.J. e ALLENBY, O.C.W. Note on factors affecting the laboratory evaluation of soil conditioner. Canad. J. Agric. Sci. 33: 623 - 624. 1953
- _____. e _____. Factors affecting the laboratory evaluation of soil conditioners. Canad. J. Agric. Sci. 35: 27 - 35. 1955
- BUCKMAN, H.O. e BRADY, N.C. Natureza e propriedades dos solos. 2^a Ed. Rio de Janeiro/São Paulo, Livraria Freitas Bastos S.A., 1968. 594 p.
- CAMPOS, H. Estatística experimental não paramétrica. 2^a ed. Piracicaba, ESALQ/USP, 1976. 332 p. (mimeo.)
- CARLETON, R.M. Understanding soil conditioners. Horticulture. 31: 365, 389. 1953
- CATTON, M.D. Research on the physical relations of soil-cement mixtures. Washington, Proc. of the Highway Research Board, 20: 821 - 855. 1940
- CHADDA, L.R. The phenomenon of aggregation in the stabilization of soils with cement. India, Central Road Research Inst. New Delhi. Indian Concrete Journal, 44 (5): 210 - 212. 1970.

- CHEPIL, W.S. A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26: 4 - 6. 1962
- CLARE, M.D. e FERRAS, D.M. The use of cement of different fineness in soil-cement mixtures. London, Magazine of Concrete Research, 8 (24): 137 - 144. 1956
- _____ e POLLARD, A.E. The relationship between compressive strength and age for soil stabilized with four types of cement. London, Magazine of Concrete Research, 3 (8): 57 - 64. 1951
- CLARE, K.E. e SHERWOOD, P.T. The effect of organic matter on the setting of soil-cement mixtures. London, Journal of Applied Chemistry, 25 (4): 625 - 630. 1954.
- _____ e _____. Further studies on the effect of organic matter on the setting of soil-cement mixtures. London, Journal of Applied Chemistry, 27 (6): 317 - 324. 1956
- COMISSÃO DE SOLOS. Levantamento de Reconhecimento de Solos - do Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Boletim 12, 1960. 634p.
- CRONKHITE, R.H. e DACYSZYN, J.M. Soil-cement construction on the Alberta Freeway. Can. Good Roads Assn. Proc., vol.6 - 9: 161 - 172. 1966
- DES CHAMPS, J. Soil-cement makes low-cost bid as haul road base. Canada Lumberman, 83 (11): 16 - 18. 1963
- DOLPHIN, R.L. Soil-cement for low cost logging roads. Pulp and Paper Mag. Can. 66 (1): WR 20 - WR 21, WR 24. 1965
- DOYLE, J.J. Organo-clay relationships in soil aggregate formation. Ohio State Univ., Ph.D. Thesis. 1952

- DUBOSE, L.A. Influence of some agricultural soil conditioners on engineering properties of clay soils. Roads and Streets 98 (4): 92 - 94. 1955
- DUTT, A.K. The effect of water-soluble potassium silicate - and various other treatments on soil structure and crop - growth. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 12: 497 - 501. 1947
- _____ . Mechanism of aggregation of clay minerals by soluble silicates. Soil Sci. 65: 309 - 319. 1948
- EL-RAWI, N.M.; HALIBURTON, T.A. e JANES, R.L. Effect of compaction on strength of soil-cement. J. Soil Mech. Found. - Div. 93 (SM 6): 195 - 208. 1967
- FELT, E.J. Factors influencing physical properties of soil -cement mixtures. Portland Cement Association B., Res. Develop. Lab. D5, 1955. 24 p.
- GEOGHEGAN, M.J. Aggregate formation in soil. Trans. 4th - Int. Congr. Soil Sci. 1: 198. 1950
- GEORGE, K.P. Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures. Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council - Highway Res. - Board. Research Rec. 255: 42 - 58. 1968
- GOMES, F.P. Curso de Estatística Experimental. 3ª ed. São Paulo, Gráfica Benetti Ltda, 1966. 404 p.
- GRIMER, F.J. The effect of pulverization on the quality of clay-cement. London, Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. - Found. Engng, 1957
- HAGIN, J. e BODMAN, G.B. Influence of the polyelectrolyte - CRD-186 on aggregation and other physical properties of some California and Israeli soils and some clay minerals. - Soil Sci. 78: 367. 1954
- HANDY, R.L. Cementation of soil minerals with Portland Cement or alkalies. Highway Res. Board. Bul., 198: 55 - 64. 1958

- _____ ; JORDAN, J.L.; MANFRE, L.E. e DAVIDSON, D.T. Chemical treatments for surface hardening of soil-cement and soil-lime-flyash. Highway Res. Board Bul., 241: 49 - 66. 1959
- HOLLANDER, M. e WOLFE, D.A. Nonparametric statistical methods. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1973. 503 p.
- HOLMES, R.M. e TOTH, S.J. Physico-chemical behavior of clay-conditioner complexes. Soil Sci. 84 (6): 479 - 487. - 1957
- JACOBSON, H.G.M. e SWANSON, C.L.W. Effect of soil type on duration of response to conditioner. Soil Sci. 86 (4):216 - 219. 1958
- JAMISON, V.C. The effect of some soil conditioners on friability and compactibility of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 18: 391 - 394. 1954
- JOHNSON, E.G. Soil-cement for channel stabilization. Agr. - Engng, 43 (7): 402 - 404. 1962
- JOHNSTONE, F.E.; MORRIS, H.D.; HANSON, K.W. e YOUNG, H.W. The effect of soil conditioners on the yields of sweet potatoes. Am. Soc. Hortic. Sci. Proc. 70: 403 - 406. 1957
- JONES, T.N. Soil-cement for hard surfacing feed lots. Miss. Agr. Exp. Sta. Inform. Sheet 949, 1966. 2 p.
- JONES, M.B. e MARTIN, W.P. Methods of evaluating aggregate stabilization by HPAN as it is affected by various inorganic salts. Soil Sci. 83 (6): 475 - 479. 1957
- KROCHIN, S. Soil-cement for canal linings. Inst. Conn. Irrig. and Drain. Annu. B., p.101 - 108. 1960
- LAMBE, T.W. e MOH, Z. Improvement of strength of soil-cement with additives. Highway Res. Board Bul., 183: 38 - 47. - 1957

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

_____ e PAGE, J.B. Silicate of soda as a soil-aggregating agent. J. Am. Soc. Agron. 38: 95 - 97. 1946

MARTIN, J.P. e ALDRICH, D.G. Influence of soil exchangeable-cation ratios on the aggregating effects of natural and synthetic soil conditioners. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19: 50 - 54. 1955

_____ ; TAYLOR, G.S.; ENGIBOUS, J.C. e BURNETT, E. Soil and crop responses from field applications of soil conditioners. Soil Sci. 73: 455 - 471. 1952

MATEOS, M.; TAWES, R.H. e DAVIDSON, D.T. Effects of chemical additives on the strength of soil-cement mixtures. Anais do 2º Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, vol. I: 547 - 570. 1963

MEHRA, S.R.; CHADDA, L.R. e KAPUR, R.N. Role of detrimental salts in soil stabilization with and without cement: effect of sodium sulphate. Bombay, Indian Concrete Journal, 29 : 336 - 337. 1955

The MERCK INDEX. 8th ed. New Jersey, Rahway, Merck and Co., Inc., 1968

MICHAELS, A.J. Aggregation of suspensions by polyelectrolytes. Ind. Eng. Chem. 46: 1485 - 1490. 1954

MOH, Z.C.; LAMBE, T.W. e MICHAELS, A. Improvement of soil-cement with chemical additives. Highway Res. Board Bul., - 309: 57 - 76. 1962

NEUBAUER, L.W. e QUINTERO, J.E. High pressure for strengthening and stabilizing soil-cement and adobe bricks. Trans. ASAE, 9 (4) : 507 - 508, 512. 1966

NOGUEIRA, J.B. Índices físicos dos solos. São Carlos, EESC/USP, Departamento de Geologia e Mecânica dos Solos, 1971. 17 p. (mecano.)

_____. Mecânica dos Solos: ensaios de laboratório. - São Carlos, EESC/USP, Departamento de Geologia e Mecânica dos Solos, 1973. 150 p. (mecano.)

O'BRIEN, A.J. Five things you may not know about soil conditioners. Chem. Engng 59 (8): 311 - 312, 314 - 315. 1952

PINTO, C.S. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1960. 19 p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Soil Primer. Illinois, Portland Cement Association, 1962. 52 p.

_____. Soil-cement slope protection for earth dams. Illinois, Portland Cement Association, C 24, 1965. 12 p.

_____. Soil-cement construction handbook. Illinois, Portland Cement Association, 1969. 42 p.

_____. Soil-cement laboratory handbook. Illinois, Portland Cement Association, Engng Bul., 1971. - 64 p.

PORTO, T.F.A. Construção de bases de solo-cimento. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, vol. I: 113 - 125. - 1958

QUASTEL, J.H. Synthetic soil conditioners and soil structure. Sci. Prog. (London) 40: 385 - 402. 1952

_____. "Krilium" and synthetic soil conditioners. Nature (London) 171: 7 - 10. 1953

- RAMACHARIU, P.T. Influence of synthetic soil conditioners on the evaporation of water from soil. Indian Soc. Soil Sci. J. 4 (4): 265 - 269. 1956
- RICHARDS, L.A. Pressure-membrane apparatus, construction and use. Agric. Engng 28: 451 - 454, 460. 1947
- _____. Methods of measuring soil moisture tension. - Soil Sci. 68: 95 - 112. 1949
- RUFF, C.G. e DAVIDSON, D.T. Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. Highway Res. Board - Bull. 304: 76 - 92. 1961
- SHARP, D.R. Lean concrete and soil-cement in road and air field bases: a review of current practice in Great Britain. London, Roads and Road Constructions, 38 (446): 49 - 52. - 1960
- _____. Utilization of low cost materials in areas deficient in roadstone. The Journal of the Institution of Highway Engineers, 1969. p. 11 - 15.
- SHERARD, J.L. Mixing-in-place soil and portland cement. J. Soil Mech. Found. Div. 95 (SM 6, 6909): 1357 - 1363. - 1969
- SHERWOOD, P.T. Stabilization with cement of weathered and sulphate-bearing clays. London, Geotechnique, 1957
- SHERWOOD, L.V. e ENGIBOUS, J.C. Status report on soil conditioning chemicals. II. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 9 - 16. 1953
- SILVEIRA, E.B.S. Estabilização do solo. São Carlos, EESC/USP. Publicação nº 129, 1967. 50 p.
- _____. e SILVEIRA, A. Notas sobre a dosagem dos componentes na estabilização granulométrica. São Carlos, EESC/USP. Publicação nº 102, 1964. 16 p.

- SINGH, R. A review on the use of synthetic soil conditioners. Sci. and Cult. 20 (10): 483 - 486. 1955
- SLATER, C.S. Soil conditioners in soil conservation. Agr. - Engng. 34 (2): 98, 100, 102. 1953
- SOIL SURVEY STAFF. Soil Classification: a Comprehensive System 7th Approximation. Washington, United States Department of Agriculture, 1960
- SOUZA, J.L.G. Estudo da fração argila da Terra Roxa Estruturada do Município de Botucatu (SP) para fins de gênese e classificação de solos. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, - 1973. 63 p. (mecano.)
- STANTON, T.E.; HVEEM, F.N. e BEATTY, J.L. Progress report on California experience with cement treated bases. Washington, Proc. Highway Res. Board, 23: 279 - 295. 1943
- TAYLOR, G.S. e BALBRIDGE, P.E. The effect of Sodium Carboxymethylcellulose on some physical properties of Ohio soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 18 (4): 382 - 385. 1954
- _____ e MARTIN, W.P. Effect of soil-aggregating chemicals on soils. Agr. Engng 34 (8): 550 - 554. 1953
- UPPAL, I.S. e KAPUR, B.P. Role of detrimental salts in soil stabilization with and without cement: effect of magnesium sulphate. Bombay, Indian Concrete Journal, 31. 1957
- VARGAS, M. Curso de solo-cimento: identificação e classificação dos solos. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1967. 17 p. (mecano.)
- _____ e NÁPOLES NETO, A.D.F. Mecânica dos Solos. In Manual do Engenheiro. 3^a ed. Porto Alegre, Editora Globo S. A., vol.IV, Tomo I, 1968. p. 5 - 182 .