

*Estudo das Propriedades de
Engenharia e Condições de Umidade
nos Subleitos de Rodovias Pavimentadas
no Estado da Paraíba
Brasil*



Aos meus pais, minha eterna
gratidão.

À minha espôsa e filha pela
dedicação e incentivo, o
que tornou possível a reali
zação deste trabalho.

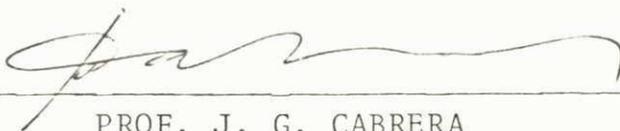
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE ENGENHARIA E CONDIÇÕES DE UMIDADE NOS
SUBLEITOS DE RODOVIAS PAVIMENTADAS NO ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

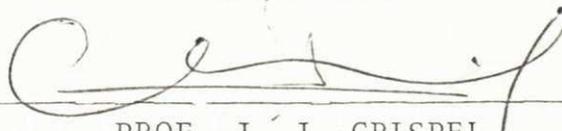
Fernando Luiz Rodrigues Nogueira
Engenheiro Civil

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECES
SÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRÁU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

APROVADA POR:



PROF. J. G. CABRERA
PRESIDENTE



PROF. J. J. CRISPEL
EXAMINADOR EXTERNO

PROF. H. G. LANDAU
EXAMINADOR INTERNO

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
SETEMBRO - 1979

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

STUDY OF THE ENGINEERING PROPERTIES AND MOISTURE CONDITION
IN HIGHWAY SUBGRADES IN THE STATE OF PARAIBA - BRASIL

M.Sc. Dissertation

by

Fernando Luiz Rodrigues Nogueira

A B S T R A C T

A field and Laboratory investigation is described concerning the engineering properties and subgrade conditions of paved roads located in Paraiba State in different topographic and climatic areas and soil formations.

Subgrade materials from seventeen sections of different roads were studied. Traffic volumes for service and project times were determined and evaluated using the Murillo Lopes and the English methods.

Subgrade soil resistance parameters obtained in CBR tests with and without immersion were compared with CBR value determined "in situ". A study was also carried out relating the distribution of moisture contents in the subgrade to the suction values obtained in Laboratory.

The results obtained in this research indicated that pavement design, based on CBR result with saturated specimens, is not adequate for dry climate regions. A CBR test for equilibrium moisture content, could possibly be an indication of the bearing capacity of the soil which can be expected in service. It is suggested that the equilibrium be taken as that which corresponds to the optimum moisture content for maximum dry unit weight.

The laboratory results used to obtain the suction

moisture relationships, did not provide data precise enough to evaluate the equilibrium moisture, due to the fact that the water table levels were very deep and did not influence the equilibrium moisture values which were probably determined by transference of the water in the vapor state as well as by the transference from the shoulders to the center of the road.

ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE ENGENHARIA E CONDIÇÕES
DE UMIDADE NOS SUBLEITOS DE RODOVIAS PAVIMENTADAS
NO ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

Dissertação de Mestrado

por

Fernando Luiz Rodrigues Nogueira

S U M Á R I O

Esta dissertação apresenta uma investigação de campo e de laboratório, sobre as propriedades de engenharia e condições de umidades de subleitos das rodovias pavimentadas do Estado da Paraíba, localizadas em diferentes áreas climáticas, topográficas e de diferentes formação dos solos.

Foram feitos estudos do material de subleito em cerca de 17 seções distribuídas nas diversas rodovias. As estimativas de tráfego para o tempo de serviço e de projeto, foram avaliadas e comparadas com base nos métodos de Murillo Lopes e da Gran Bretanha.

Os parâmetros de resistência dos solos de subleitos, obtidos nos ensaios CBR com e sem imersão, foram relacionados com a resistência determinada pelo CBR "in situ". realizou-se um estudo sobre a distribuição de umidade dos subleitos em relação aos valores de sucção obtidos no laboratório.

Os resultados encontrados nesta pesquisa, indicaram que o dimensionamento de pavimentos baseado nos resultados dos ensaios de CBR com amostras saturadas, não são adequados para regiões de climas secos. O ensaio CBR para o teor de umidade de equilíbrio, provavelmente fornecerá uma indicação da capacidade de suporte do solo mais coerente com aquela que é de se es

perar em serviço. Propõe-se que a umidade de equilíbrio possa ser tomada como aquela correspondente a umidade ótima para o Pêso Específico Aparente Máximo.

Os ensaios de laboratório para obter as relações de sucção-umidade, não forneceram dados precisos para avaliar a umidade de equilíbrio, devido aos níveis do lençol freático serem muito profundos e não influenciarem nos valores de umidade de equilíbrio. Esta umidade, possivelmente, é determinada por transferência da água na fase de vapor e transferência da mesma dos acostamentos para o centro da rodovia.

Í N D I C E

		Página
CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	Introdução	3
	Condições de Umidade no Subleito de Rodovias	3
	CBR em Termos de Umidade de Equilíbrio	5
	CBR com Imersão como Condição mais Crítica	7
	Movimento da Água no Solo	10
	Sucção de Água Retida	18
	Resumo	42
CAPÍTULO 3	OBJETIVO DA PESQUISA	43
CAPÍTULO 4	SELEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	45
	Introdução	45
	Classificação dos Climas	45
	Descrição e Situação das Seções	46
CAPÍTULO 5	CONDIÇÕES DE TRÁFEGO NAS RODOVIAS ESTUDADAS	58
	Introdução	58
	Apresentação dos Dados	59
	Determinação do Número Equivalente Padrão	59
CAPÍTULO 6	MÉTODOS DE ENSAIO	68
	Introdução	68
	Ensaio de Campo	68
	Ensaio de Laboratório	71
CAPÍTULO 7	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	77
	Introdução	77
	Ensaio de Campo	77
	Ensaio de Laboratório	78

	Página
	79
	79
	79
CAPÍTULO 8	114
Introdução	114
Caracterização dos Solos e Subleitos	114
Contrôle de Densidade de Campo	115
Relação entre Umidade de Campo, Umida de Ótima e Após Imersão no Laboratório	115
Correlação entre CBR de Campo, CBR no Laboratório sem Imersão e com Imersão	125
Relações entre Sucção e Umidade	126
Avaliação do Nível de Desempenho das Rodovias Estudadas	129
CAPÍTULO 9	142
CAPÍTULO 10	144
	145
	152
APÊNDICE A	153
APÊNDICE B	155
APÊNDICE C	161
APÊNDICE D	167

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As forças responsáveis pelo movimento da água a través dos vazios dos solos, dependem essencialmente do tipo de solo, estado do solo e a maneira pela qual a água é retida, restringindo deste modo o seu movimento. A água escoá através das areias e pedregulhos sob a ação da gravidade, enquanto que, nas argilas intervêm forças de natureza capilar e molecular de interação entre a fase sólida e a líquida. Se o subleito de uma rodovia tornar-se mais úmido ou mais sêco após a sua construção, estará sujeito a dilatar-se ou contrair-se e, assim mudar sua resistência, o que poderá causar danos na superfície da rodovia. Uma rodovia construída sobre um subleito de argila poderá, por exemplo, sofrer ruptura devido a uma resistência inadequada, causada por um aumento relativamente pequeno, no teor de umidade da argila. Por outro lado, a secagem do solo próximo das bordas durante um período anormal de sêca, pode resultar em recalque do subleito e aparecimento de trincas longitudinais na superfície da estrada. A água movendo-se através do solo sob a ação da gravidade pode ser interceptada ou removida do subleito por drenos subterrâneos convenientemente localizados no subsolo. No caso da água ficar retida no solo por forças superficiais, o sistema de drenos não poderá removê-las. A distribuição desta água é determinada pelas condições de equilíbrio de sucção e pressões de vapor do solo. A quantidade de água vertida desta maneira, umenta com o teor de argila presente na massa de solo e poderá exceder a 50% do pêsô do solo sêco, em argilas gordas (10).

A umidade é uma variável fundamental em todos os problemas de estabilidade dos solos. Ela tem um significado especial para as rodovias e aeroportos, isto porque, as fundações superficiais de tais estruturas são, por necessidade, construídas na superfície do solo, a qual está sujeita a grandes variações no teor de umidade. Estas variações de umidade, resultante das mudanças no volume e resistência do solo do subleito, poderá causar falhas prematuras no pavimento. Estudos dos fatores que dão o crescimento destas variações no teor de umidade, tem estimulado pesquisas sobre as forças responsáveis pela migração da água nos solos.

O efeito da umidade é duplo: (i) se o solo está completamente seco no início da chuva e não havendo formação do "crust", o umedecimento da camada superior provoca um forte potencial de capilaridade sob a superfície, que, somado a força de gravidade provoca a infiltração; (ii) quando sujeitos a umedecimento, alguns colóides presentes no solo incham e reduzem a capacidade de infiltração durante o período inicial da chuva. A umidade do solo é geralmente alta no inverno e na primavera, e baixa no verão e no outono (17).

A importância do conceito de energia da umidade ou sucção do solo tem sido aceita a muito tempo (8) e a influência do ambiente e propriedades do solo sobre a tensão da água nos poros do subleito da rodovia continua a receber atenção. Em climas muito secos, os níveis d'água são muito profundos para exercer uma influência dominante sobre o teor de umidade, e mais recentemente as pesquisas tem-se estendido para incluir estas condições. Os resultados das investigações do subleito deverão mostrar até que ponto suas condições ajustam-se dentro de um padrão, que permita métodos para a determinação das condições críticas de umidade nos subleitos das rodovias para os propósitos de projeto de pavimentos em ambientes de clima temperado e tropical.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Introdução

Muitas das propriedades físicas do solo, tal como sua estrutura, resistência e expansão, são grandemente afetadas pela infiltração da água, de maneira que a relação solo-água desempenha um importante papel no projeto e construção de rodovias.

Esta revisão bibliográfica apresenta alguns estudos realizados sobre o assunto, abrangendo de maneira sucinta os seguintes tópicos:

- Condições de umidade no subleito de rodovias
- CBR em termos de umidade de equilíbrio
- CBR com imersão como a condição mais crítica
- Termodinâmica do movimento da água nos solos.

Condições de Umidade no Subleito de Rodovias

A variação sazonal no teor de umidade nos solos de subleito com os seus efeitos resultantes sobre o desempenho estrutural do pavimento, é uma área de interesse para muitos engenheiros de estradas.

De acordo com Marshall (16), o aspecto do solo e o conhecimento de suas propriedades dependem, em grande parte, do comportamento da água em seu interior. Um solo de textura média ou argiloso, no estado seco, possui uma consistência dura, entretanto, o aumento progressivo da umidade proporcionará uma mudan

ça para uma condição plástica e viscosa. Estas mudanças são facilmente observadas e frequentemente usadas como um guia para a umidade do solo.

É bem documentado na literatura, através de muitos pesquisadores (1, 2, 3, e 4), que a resistência ao cisalhamento de um solo de subleito pode ser reduzida pela afluência da umidade durante os períodos de fortes chuvas. Esta redução na resistência é geralmente atribuída a um aumento no teor de umidade do solo de subleito, ocasionando desta maneira, um aumento da pressão neutra entre as partículas ou grãos e, algumas vezes associado com um decréscimo na densidade do solo. Por exemplo, Yao (4), Bhajandas (5), Williams (6) e outros (7), afirmam que a capacidade de suporte do subleito também será reduzida significativamente, o que pode resultar em extensivas deflexões no pavimento.

Embora o problema da variação de umidade, que causa mudança no volume e resistência nos solos do subleito esteja ainda por resolver, é conveniente dar algumas informações sobre os fatores climáticos que ultimamente podem ser necessários num projeto.

Marks e Haliburton (12) resumiram alguns estudos sobre a umidade do subleito, discutindo várias séries de medidas de umidade do solo com medidores nucleares. Algumas dessas séries estão correlacionadas com as observações de precipitação pluviométrica. Eles informaram variações de 1% a 5% na umidade, causada pela temperatura. De qualquer forma o problema é complexo, necessitando-se de dados sobre o relacionamento entre a radiação e as temperaturas máximas e mínimas do ar, e também do solo e superfície do pavimento, as quais ainda não foram avaliadas. Por outro lado, Mickle e Spangler (13), encontraram que as mudanças da umidade do solo, causada pela variação de temperatura, foram muito pequenas sob áreas cobertas.

Em geral, os pesquisadores do assunto concordam que as mudanças de umidade dos subleitos de rodovias são grandemente influenciadas pelos seguintes fatores:

- a) Água de percolação através dos pavimentos e solos adjacentes

- b) flutuações do nível freático
- c) movimento de umidade das/as bordas das rodovias
- d) nos climas tropicais, o movimento da água na fase de vapor.

CBR em Termos de Umidade de Equilíbrio

De acordo com Croney (18), em climas muito secos, os níveis d'água subterrânea são muito profundos para exercer uma influência dominante sobre o teor de umidade do subleito de uma rodovia, nestes casos a maior influência é exercida pelos gradientes de umidade do centro da rodovia para as bordas. Daí, ser importante avaliar o teor de umidade de equilíbrio abaixo de superfície do subleito, para diferentes situações de carregamento e diferentes níveis d'água. Em um solo saturado, o teor de umidade obtido sob condições de equilíbrio é proporcional ao índice de vazios, e este depende da pressão efetiva que, por sua vez, varia com a pressão neutra positiva ou negativa, nos poros do solo. A determinação do teor de umidade de equilíbrio pode ser feita pelo relacionamento entre a sucção do solo e o teor de umidade ou, entre a pressão efetiva e o índice de vazios.

Para dimensionar um pavimento, o Laboratório de Pesquisa de Transportes e Estradas da Gran Bretanha (Transport and Road Research Laboratory, U.K.) (54,55), considera necessário estimar as condições de umidade mais desfavoráveis da fundação, ou seja, a umidade de equilíbrio ou de projeto, que se irão verificar durante a vida do pavimento a ser construído sobre essa fundação.

A seguir serão referidos exclusivamente os métodos expedidos seguidos pelo referido Laboratório, nas zonas tropicais e subtropicais, para avaliação daquela umidade de equilíbrio.

Estes métodos distinguem zonas de fundações de pavimentos em três condições climo-geológicas:

1. Fundações onde há um nível freático próximo da superfície (menos de 6 m de profundidade). Nes

ta categoria se inclui também as faixas costeiras e planícies inundáveis onde o nível freático é alimentado pela água do mar, lagos, rios, e inclusive, águas pluviais, não drenadas devido a topografia do terreno ser plana.

2. Fundações onde o nível freático é profundo (mais de 6 m) e onde há precipitações sazonais mais ou menos normalizadas, com uma precipitação total anual superior a 254 mm.
3. Fundações onde o clima é árido com uma precipitação inferior a 254 mm e onde o nível freático é profundo (mais de 6 m).

Nas fundações classificadas dentro da primeira categoria, o teor de umidade obtido a 0,60 m acima do nível freático deve ser tomado como um guia para o teor de umidade do projeto, que é adotado nos ensaios que determinarão a espessura do pavimento. Quando houver variação de solos pode-se tomar como constante a relação w_c/w_p , sendo w_c o teor de umidade de campo e, w_p o limite de plasticidade (9). Assim, pode-se fazer uma única determinação do teor de umidade no campo e, com base neste valor e na relação constante indicada, avaliar os diferentes teores de umidade de projeto a considerar para as diferentes camadas. Esta condição de umidade é a que se aproxima mais da saturação do solo.

Nas fundações classificadas dentro da segunda categoria, pode-se tomar a mesma relação constante citada anteriormente, e determinar as condições de umidade mais desfavoráveis sob os pavimentos existentes na mesma zona climática onde se pretende construir uma nova rodovia, sendo conveniente que os solos da fundação dos pavimentos existentes sejam semelhantes aos solos da fundação das futuras rodovias. Quando não existirem tais pavimentos pode-se tomar como guia do teor de umidade do projeto, o teor verificado a uma profundidade onde aquela umidade já não seja afetada pelas variações sazonais, ou seja, cerca de 0,90 m a 1,20 m de profundidade. No caso de uma argila

plástica, o teor de umidade, à mesma profundidade, na época de chuvas deve ser aumentado de 2%. É evidente que no fim da época de chuvas, o teor de umidade de projeto pode ser determinado a partir de uma amostra de solo colhida na superfície.

Quando o solo de fundação contém uma apreciável percentagem de material retido na peneira nº 36 BS (nº 40 ASTM ou 0,42 mm de malha) deve-se utilizar em substituição da relação constante apresentada, a seguinte relação abaixo, também considerada constante:

$$w_c / \{ (w_p \cdot X) + (S \cdot Y) \}$$

onde, " w_c " é o teor de umidade de campo; "X", percentagem de solo que passa na peneira nº 40; "Y", percentagem de solo retido na mesma peneira; " w_p ", limite de plasticidade, sendo que a sua determinação é feita com material que passa na peneira nº 40; "S" é o teor de umidade do material retido na referida peneira.

Tem-se verificado que, para solos de fundação desta categoria, os teores de umidade w_c , são da ordem de grandeza do limite de plasticidade w_p ou inferiores ($w_c \leq w_p$).

Nas fundações classificadas dentro da terceira categoria, o teor de umidade natural obtido à profundidade onde ficará o nível de fundação, poderá servir de guia para o teor de umidade do projeto.

Tal como nos casos anteriores, prevê-se que a estrada possua condições de drenagem adequadas. Por exemplo, basta que a camada de revestimento disponha de flecha necessária para drenar as águas superficiais e que estas sejam afastadas da plataforma da estrada (11).

CBR com Imersão como a Condição mais Crítica

A maior parte dos métodos de dimensionamento de pavimentos são baseados na capacidade de suporte do solo de fundação. Como se sabe, esta característica mecânica varia consideravelmente com o valor da densidade seca e com o teor de

umidade do solo (9).

Quando se recorre ao método de CBR para o referido dimensionamento, segue-se normalmente a norma D 1883 da ASTM ou a norma do D.N.E.R.-ME 50-64 (48), que permite determinar o valor relativo do suporte de solos pelo ensaio com amostra deformada e moldada na umidade ótima obtida em um dos ensaios de compactação de solos: ME 47 ou ME 48 (48). O valor de suporte é obtido após um período de 4 dias (96 horas) em que a amostra permanece imersa em água.

Este método que é utilizado para projetar espessura, representa uma correlação entre o comportamento de um pavimento em serviço e os resultados dos ensaios efetuados de acordo com as normas citadas. Mesmo que os ensaios de laboratório sejam executados em amostras saturadas, isto não querdizer que as fundações dos pavimentos, com os quais estes ensaios foram correlacionados estejam em situação semelhante; possivelmente, a maior parte destes pavimentos não estejam nas mesmas condições de saturação. Em muitos casos, esta técnica de saturar os provetes de CBR, proporcionando a obtenção de valores baixos da resistência do solo de fundação, levam a um dimensionamento excessivo do pavimento, além de um custo alto dependendo do tipo de região onde se está construindo a rodovia (9).

Anos de experiência mostraram que as fundações de subleitos situadas em regiões úmidas, com precipitação variando cerca de 750 mm por ano, apresentavam percentagem de saturação normalmente iguais ao mais baixo valor do limite de plasticidade. Os solos eram principalmente de natureza argilosa com o índice de plasticidade variando de 12% a 15% ou mais. A saturação de solos semelhantes no laboratório durante o ensaio de CBR poderá proporcionar teores de umidade ligeiramente superiores e, por conseguinte, dar valores de capacidade de suporte menores, especialmente para a penetração de 2,5 mm, o que aliás, é evidente para os engenheiros de solo. Assim, para certos solos, são utilizados os valores relativos à penetração de 5 mm. O valor obtido pelo método de CBR com imersão, geralmente proporciona um maior coeficiente de segurança, além de muitas vezes ser considerado como um guia para se apreciar

a qualidade do material e para determinar a espessura inicial do pavimento a partir das curvas de projeto do CBR.

A expansão da amostra deve ser medida durante a imersão, e o resultado desta medição é também usada para estimar a qualidade do material. Assim, são especificados certos limites: a expansão do CBR para o material da camada de base, compactado a 100% AASHO modificado, não deve exceder 0,5% enquanto que, para o material de subbase o limite é de 1% (9).

Os fatores que influenciam as características de inchamento dos solos coesivos compactados (49), incluem o tipo e quantidade dos argilos minerais, a condição de compactação (teor de umidade, densidade sêca, grãu de saturação e tipo de compactação), as propriedades químicas da água, a pressão de confinamento aplicada durante o inchamento, o tempo de inchamento, a pressão osmótica, a compressão do ar nos vazios durante a percolação da água através da massa de solo, a história de tensões do material e o ciclo alternativo de umedecimento e secagem.

O efeito da absorção que ocorre durante o ensaio de expansão sobre a densidade e CBR, foi discutido por Woolton (15). Ele mostrou através de ensaios, que solos pouco coesivos (IP menor que 2%) e solos bem graduados e fracamente plásticos (IP variando de 2 a 6%) não expandem apreciavelmente durante o período de imersão de 4 dias, após o qual, o material era introduzido em um molde de CBR com diâmetro de 15,24cm (6 pol.), e sujeito a um carregamento de 5 kg.

Quando o índice de plasticidade é maior que 6%, a absorção é acompanhada por uma mudança de volume, onde a grandeza desta mudança aumenta com o aumento do índice de plasticidade.

Em termos gerais, a expansão poderá ser mínima para valores de umidade situados no lado seco da curva de compactação do Proctor modificado para materiais de baixa plasticidade, enquanto que, para o lado úmido da curva, seu valor tende a aumentar quando o índice de plasticidade atinge uma faixa em torno de 12% a 15%, o mesmo acontece para o caso de solos haloisíticos e pedra pome em que o valor limite da expansão é apreciável.

É muito provável que em certos casos, as condições de imersão das amostras (9) sejam demasiado severas e que, por isso, elas estejam longe de reproduzir as condições reais segundo as quais o material se encontra no pavimento. No entanto, para que o ensaio se aproxime da realidade, é necessário o conhecimento, em cada caso, dos valores limites que poderão atingir a densidade e o teor de umidade do material "in situ" para que se possa determinar o valor da penetração nestas condições.

Movimento da Água no Solo

O comportamento da água no solo é afetado pelo tamanho das partículas e o modo pelo qual elas se arranjam. Geralmente, quanto maior for o teor de argila, mais água o solo retém para um determinado período de escoamento ou secagem, porém o tipo de argila mineral e o tipo dos cátions trocáveis, também afetam a retenção e o movimento da água. As partículas podem ter uma estrutura aberta ou fechada e, assim deixam mais ou menos espaços vazios entre elas e que são ocupados pela água e o ar. O espaço total de vazios (volume da fração de solo ocupada pela água e ar) é fácil de determinar, porém, a determinação das dimensões destes vazios requer um método pouco comum (16). A água se movimenta mais facilmente através dos grandes vazios do que pelos pequenos, assim, as dimensões e quantidades de vazios tem de ser consideradas para o movimento e a armazenagem da água. Uma aproximação clássica para determinar a dimensão dos vazios de um solo, é feita através de suas partículas. Trabalhos experimentais encontraram algumas bases para relacionar as propriedades dos solos com suas permeabilidades; foram determinadas as geometrias dos canais que compõe os vazios, em sistemas ideais de condicionamento com partículas esféricas (16). Em seguida, eles obteram uma dimensão efetiva do canal através da razão entre a porosidade e a área superficial das partículas. Desta maneira, as partículas irregularmente distribuídas poderiam ser arrumadas; entretanto, o processo falha quando se tem uma grande variação nas dimensões dos canais que compõe os vazios do solo.

A experiência teórica para a retenção da água, movimento e armazenamento em solos não saturados foi estudada a tempos atrás por Buckingham, porém, os avanços nas investigações do solo-água foram grandemente acelerados pelos desenvolvimentos de novas técnicas para medir a sucção (16).

Classificação da Água do Solo (10) - Para o engenheiro, o solo é formado por uma massa de partículas minerais, variáveis em tamanho, forma, arranjo e grau de compactação, entre as quais existe uma intrincada rede de poros, ligados entre si por canais de diferentes tamanhos. Esses canais comunicam-se, eventualmente, com a superfície do solo ou com trincas e fissuras existentes na estrutura do solo.

Uma certa quantidade de água que cai sobre o solo sob condições naturais, penetra no mesmo e vai formar um lençol d'água, sobre uma camada impermeável. A água que passa através do solo, dessa maneira, é geralmente denominada "água gravitacional" e a água abaixo do lençol freático denominada "água subterrânea". Quando o fornecimento de água superficial e o fluxo de água gravitacional cessam, uma certa quantidade de umidade fica retida nos pequenos poros e canais e na superfície das partículas devido à tensão superficial e forças de adsorção. Essa água, que não pode ser drenada diretamente, pode ser convenientemente denominada de "água retida". O vapor d'água, que enche o interstícios do solo, não ocupados por água na fase líquida, e que, em certas circunstâncias pode desempenhar uma parte importante na determinação da distribuição da umidade no solo, pode ser considerado como constituindo uma parte da água retida. Essa classificação geral da água no solo, que está resumida na Fig. 2.1, é desenvolvida detalhadamente nos parágrafos seguintes.

Água Subterrânea: Os poros do solo, abaixo do lençol d'água freático, estão completamente cheios com água e assume-se que qualquer movimento da água subterrânea que possa ocorrer, por exemplo, de medidas tomadas para rebaixar o lençol d'água, segue a lei de Darcy de escoamento saturado. Essa lei estabelece que a velocidade de escoamento, através de uma coluna de solo saturado, é proporcional ao gradiente hidráulico. Segue-se,

da lei de Darcy, que a quantidade de água que escoa através dessa coluna, na unidade de tempo, é proporcional à área da coluna e ao gradiente hidráulico, logo:

$$Q = K.i.A$$

onde: "i" representa o gradiente hidráulico e, "Q" é a quantidade de água escoando, na unidade de tempo, através de uma coluna de solo de seção transversal de área "A".

A constante de proporcionalidade K, denominada coeficiente de permeabilidade saturada pode, portanto, ser definida como a velocidade de escoamento baseada na área total do solo através da qual ocorre o escoamento e não na área média dos vazios.

O valor de K depende, principalmente, da distribuição granulométrica do solo; em pedregulhos poderá ser superior a 7 cm/s, e em argilas gordas poderá ser inferior a 7×10^{-8} cm/s. Seu valor depende, também, da posição e orientação relativa dos grãos do solo, motivo pelo qual os ensaios de permeabilidade devem ser efetuados com amostras indeformadas. Como a permeabilidade no sentido vertical e horizontal podem ser diferentes, as amostras deverão ser cortadas no sentido em que ocorre o escoamento. O valor de K é útil para o engenheiro rodoviário, no cálculo de escoamento de água em drenos instalados para rebaixar um nível d'água elevado.

Água Gravitacional: O movimento da água gravitacional também depende muito das características estruturais e da porosidade do solo, porém, devido à presença de ar nos poros do solo, não é possível aplicar a lei de Darcy. A água gravitacional não é de interesse direto para o engenheiro rodoviário a não ser que, durante sua passagem para o lençol d'água freático, seja desviada do subleito por camadas interpostas de material impermeável, por exemplo, infiltração lateral. Possivelmente, onde houver água gravitacional sendo desviada dessa maneira, serão necessários drenos para interceptá-la.

Água Retida: Se bem que a água retida no solo não se mova livremente sob a ação da gravidade, a mesma não pode ser considerada como estática. Os movimentos que em geral ocorrem são lentos, porém, quantidades consideráveis podem ser transferidas em longos períodos de tempo, tanto na fase líquida como na fase de vapor. O mecanismo pelo qual a água é retida no solo e os fatores que governam seus movimentos, são considerados em seguida.

A água retida no solo, excluindo o vapor d'água, pode ser dividida em duas categorias. Na ordem decrescente da força com que a água é retida, essas categorias são: (1) água adsorvida na superfície das partículas; (2) água retida por tensão superficial e capilaridade.

1. Água Adsorvida: A água retida pelas forças de adsorção, na superfície das partículas do solo, pode ser reduzida por secagem em estufa, porém não é possível sua remoção total. Um solo seco em estufa, se ficar exposto durante o seu resfriamento, adsorverá água e a quantidade adsorvida dependerá da umidade do ar circundante. A quantidade máxima de água retida em um solo por adsorção superficial, depende, principalmente, da área de superfície das partículas. Durante a discussão dos movimentos da umidade na fase de vapor serão dados maiores esclarecimentos sobre a água adsorvida.
2. Água Retida por Tensão Superficial e Capilaridade: A maior parte da água retida, em solos granulares finos, é a retida por tensão superficial, tanto ao redor dos pontos de contato das partículas como nos poros do solo e capilares. Para melhor explicar a maneira como essa retenção ocorre, convém abordar o assunto por meio de uma discussão breve da tensão superficial.

Se uma gota de água cai em uma placa de vidro limpo (ou outra substância "molhável" pela água) as forças de tensão superficial atuam nos limites dos dois materiais tendendo a espalhar a água sobre a superfície do vidro. Essa força está presente em quaisquer limites, líquido/sólido independentemente da curvatura da superfície do material sólido. Uma gota d'água introduzida no ponto de contacto de duas esferas ficará, por exemplo, mantida em equilíbrio pela tensão superficial, da maneira ilustrada na Figura 2.2. Neste caso, a face de contato água/ar tem duas curvaturas principais, cujos raios crescem, caso seja adicionado mais água (Essas curvaturas sofrem ligeira deformação devido a ação da gravidade; deformação essa que depende da maneira em que as esferas estejam orientadas). Existe para esse arranjo, uma quantidade limite de água que pode ser retida contra a gravidade. Qualquer água adicional, além desse limite escorrerá sobre a superfície das esferas.

Se a extremidade inferior de um tubo de vidro, de pequeno diâmetro, é imerso em água {Fig. 2.3 (a)}, o nível da água, no tubo, sobe acima daquele do líquido circundante devido a ação da tensão superficial nos limites entre a água e vidro. Como o líquido no tubo está em equilíbrio, a componente de baixo para cima da força de tensão superficial é igual a força da gravidade atuando sobre o líquido suspenso. Então,

$$2 T \cos \alpha = \gamma_w \cdot h \cdot r \cdot g$$

$$\text{ou} \quad h = \frac{2 T \cos \alpha}{\gamma_w \cdot r \cdot g} \quad (1)$$

em que: T - tensão superficial por unidade de comprimento do contato.

r - raio do tubo

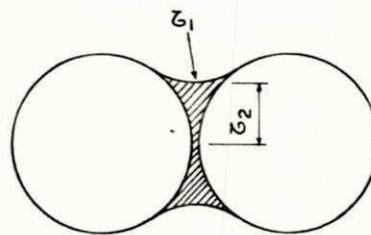
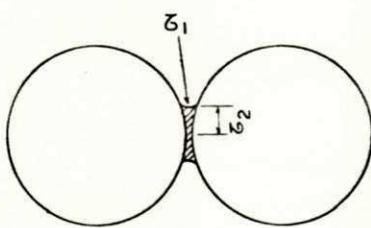
γ_w - densidade da água

h - ascensão capilar

No caso da ascensão capilar máxima, o ângulo de contato entre a

Figura 2.1 - Classificação geral da água no solo (10)

Figura 2.2 - Água mantida pela tensão superficial ao redor do ponto de contacto de duas esferas (10)



água e o vidro é $\alpha = 0^{\circ}$, teremos

$$h = \frac{2 T}{\gamma_w \cdot r \cdot g} \quad (2)$$

Analisando a equação (2) observa-se que, a altura de ascensão varia inversamente com o diâmetro do tubo { Fig. 2.3 (b) } , e, o raio do tubo e conseqüentemente, o raio do menisco d'água é inversamente proporcional a redução da pressão através do menisco; sendo a pressão de redução, ou sucção, na água, imediatamente abaixo do menisco igual a $\gamma_w \cdot h \cdot g$ (sob pressão atmosférica). A variação real da pressão hidrostática, com respeito à pressão na superfície livre da água é ilustrada na { Fig. 2.3(c) }.

O equilíbrio não é possível no caso de uma coluna vertical de água que não esteja em contato com uma superfície de água livre { Fig. 2.3 (d) } , pois a tensão superficial, nas duas extremidades da coluna é igual, e não há força resultante para se opor à gravidade. O equilíbrio é, no entanto, possível, em um tubo de seção não uniforme { Fig. 2.3 (e) } ou no caso de um tubo com estrangulamento, onde a componente da tensão superficial de cima para baixo possa ser menor que a componente de baixo para cima.

Os minerais que compõe o solo são "molhados" pela água de maneira semelhante ao vidro e, se bem que as partículas de solo não possam ser consideradas esféricas, ou os canais conectando os poros, considerados como circulares, os resultados deduzidos anteriormente facilitam uma compreensão qualitativa da maneira pela qual a água é retida pelo solo, por forças devido a tensão superficial.

Água Estrutural: A água combinada na estrutura cristalina dos minerais do solo é muito pouca e não pode ser removida pela secagem do solo a 110°C . Sob o ponto de vista da engenharia pode ser considerada como parte integrante dos sólidos do solo.

Quando um lençol d'água está presente no solo, os

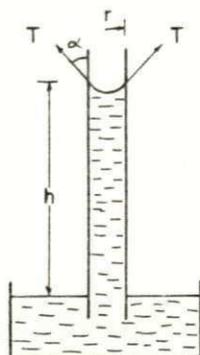
canais conectando seus poros podem ser considerados como uma massa irregular de tubos capilares, não necessariamente verticais, e de diferentes diâmetros, ligados ao nível d'água. Desse modo, a água subirá a diferentes alturas nos diversos canais, resultando, em solos incompressíveis, em um decréscimo geral no teor de umidade conforme aumenta acima do nível d'água. No entanto, mesmo os cálculos mais aproximados dos teores de umidade acima do nível d'água, são inoperantes devido a natureza e distribuição irregular dos canais. O problema da distribuição da umidade acima do nível d'água, de importância particular para o engenheiro rodoviário, é melhor abordado partindo das características, sucção do solo/teor de umidade, dos solos.

Sucção da Água Retida

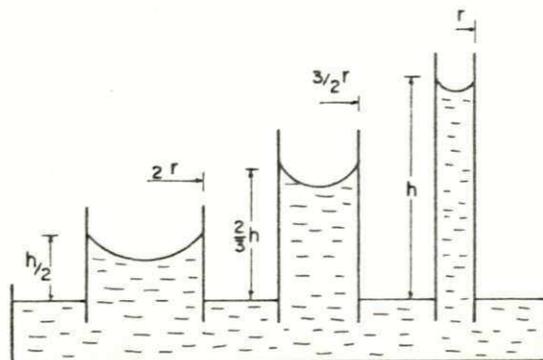
A água retida no solo é mantida em um estado de pressão reduzida ou sucção, que pode ser denominada sucção da umidade do solo, ou mais simplesmente, sucção do solo. Viu-se na analogia do tubo capilar, que a água retida acima do nível de água tinha uma pressão menor que aquela da superfície de água livre, sendo a diferença de pressão, no topo da coluna, relacionada com o raio do menisco. Viu-se também, que as faces de contato ar/água, através do solo se constituem de meniscos, sendo que as curvaturas dos mesmos indicam da mesma forma o estado de pressão reduzida ou sucção do solo. A medida que o teor de umidade do solo é reduzido e as faces de contato retrocedem para os poros menores, seus raios de curvatura decrescem, indicando um aumento na sucção do solo.

Verificou-se experimentalmente (10), que o aumento na sucção do solo com o decréscimo do teor de umidade é contínuo, em toda a faixa de variação de umidade. O seu valor vai desde 0 (zero), na saturação, a grandes valores de kg/cm^2 em um solo seco em estufa. Essa grande variação torna essencial a utilização de uma escala logarítmica, se considerarmos a relação, sucção/ teor de umidade, como um todo. Para esse fim é frequentemente usada a escala pF introduzida por Schofield (32).

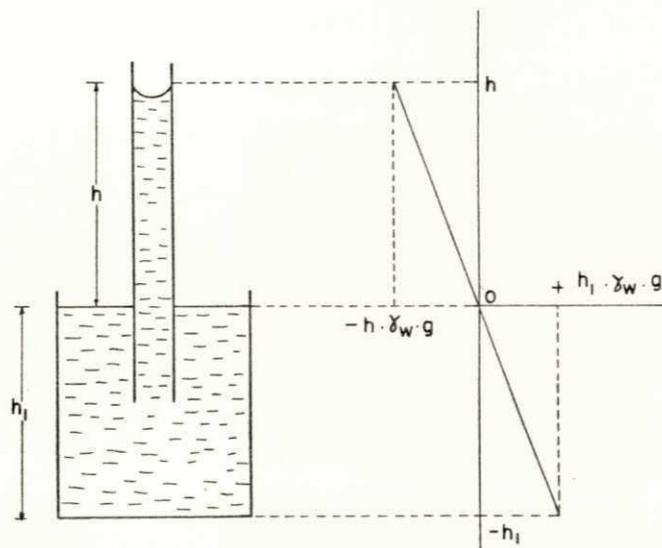
Figura 2.3 - O equilíbrio de um líquido em tubos de pequeno diâmetro.



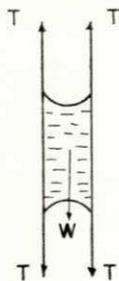
a) Elevação de líquido em tubo capilar.



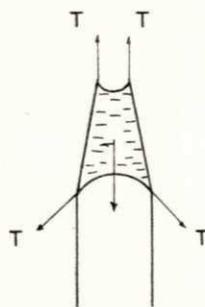
b) Efeito do raio do tubo na altura da ascensão capilar.



c) Variação da pressão em líquido acima e abaixo do nível d'água.



d) Equilíbrio do líquido é impossível. O líquido drena.



e) Equilíbrio do líquido é possível. O líquido fica suspenso.

Se a sucção do solo é expressa em termos do comprimento de uma coluna de água suspensa, o logaritmo comum desse comprimento, expresso em centímetros de água, é equivalente ao valor pF da umidade do solo. A Tabela 2.1 mostra a relação entre a escala pF e a sucção do solo, expressa em cm, lb/pol² e kg/cm².

A Figura 2.4 mostra a relação sucção do solo e teor de umidade, para um solo turfoso (32). Verificou-se que a sucção, quando o solo está sendo "umedecido" isto é, quando o teor de umidade está aumentando, é menor que a sucção, no mesmo teor de umidade, quando o solo está secando. Esse efeito da histerese pode surgir porque a libertação da água dos poros maiores é, até certo ponto, controlada pelos poros menores circundantes, durante o processo de secagem.

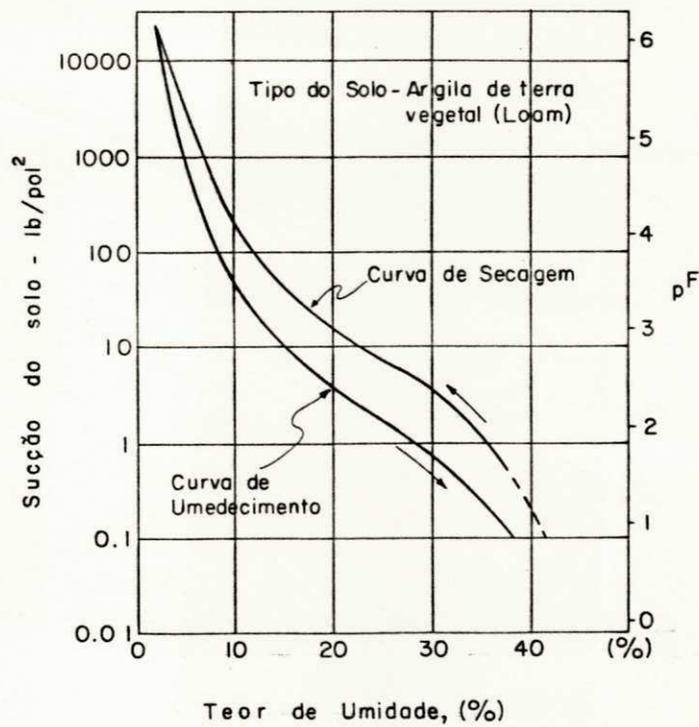
Água em Solos com Alto Teor de Argila: Segundo Haines (18), trabalhando com amostras moldadas, observou que, quando uma argila é seca, a sua perda de volume é, a princípio, igual ao volume de água removida, o que é denominado de contração "normal", e para um determinado estágio de secagem no qual o ar penetra na amostra, a diminuição do volume foi menor do que a perda de água, o que foi chamado de contração "residual" e, finalmente, nenhuma mudança adicional no volume da amostra ocorreu com a perda de água. Outros investigadores, Lauritzen e Stewart (19), Lauritzen (20) e Stirk (21), estenderam seu trabalho para incluir a contração em solo natural e agregados com alto teor de argila. Eles encontraram que, em amostras de solo com alto teor de água, durante a secagem a diminuição de volume foi, a princípio, menor do que a perda de água. Isto mostra que num solo natural, existem poros que permitem a entrada de ar a medida que a água vai sendo removida. Eles consideraram este estágio preliminar como uma importante característica do solo natural, conforme ficou evidente nas amostras moldadas na pesquisa anterior, daí, isto auxiliar a aeração. Esta ocorrência, é uma característica dos poros dos agregados, porém, não é bem representada na massa do subsolo. Este estágio foi chamado por Stirk (21) de contração "estrutural".

Schofield (22) deduziu através dos dados de

Tabela 2.1 - Relação entre pF e sucção da umidade do solo expressa em, cm de água, lb/pol² e kg/cm².

Figura 2.4 - Relação entre a sucção do solo e o teor de umidade (32).

pF	Sucção equivalente		
	cm de água	lb/pol ²	kg / cm ²
0	1	0.0142	0.000 998
1	10	0.142	0.00998
2	100	1.42	0.0998
3	1000	14.2	0.998
4	10000	142	9.982
5	100000	1420	99.826
6	1000000	14200	998.26



Haines que a transição da contração "normal" para a "residual" apresentou um valor de, aproximadamente, 5 pF nas amostras de argila; porém, até aquela época nenhuma medida direta com relação a sucção tinha sido feita. Um estudo detalhado de sucção-teor de umidade e volume, foi feito para duas amostras diferentes de solos argilosos, Holmes (23) observou que a contração "residual" iniciou com um valor de 5,1 pF e cessou com 5,7 pF em uma das amostras, enquanto que na outra, o início deste estágio ocorreu para 5,5 pF, onde a amostra cessou de contrair após o valor de 6 pF. Stirk (21), encontrou o limite de sucção, para o qual não há mais contração adicional em agregados, sendo que, o valor deste limite aumentou com o correspondente aumento do teor de argila nos agregados.

Movimento do Solo Durante a Contração e o Inchaço: É óbvio, pelo padrão das trincas na superfície de um solo argiloso, seco, no campo, que os movimentos horizontais contribuem na mudança de seu volume. A grandeza pela qual, o movimento vertical também irá contribuir sobre as condições de campo, não é tão clara, embora seja suposto que este movimento possa afetar o micro-relêvo, como na formação de barrancos, Leeper, Nicholls e Wadham (25) e Hallsworth, Robertson e Gibbons (26). O recalque de edifícios e rodovias, tendem a aumentar, a medida que a água vai sendo removida pela vegetação, este fato, é outra manifestação do movimento vertical do solo devido a mudança do teor de umidade, Ward (27); Croney e Lewis (28).

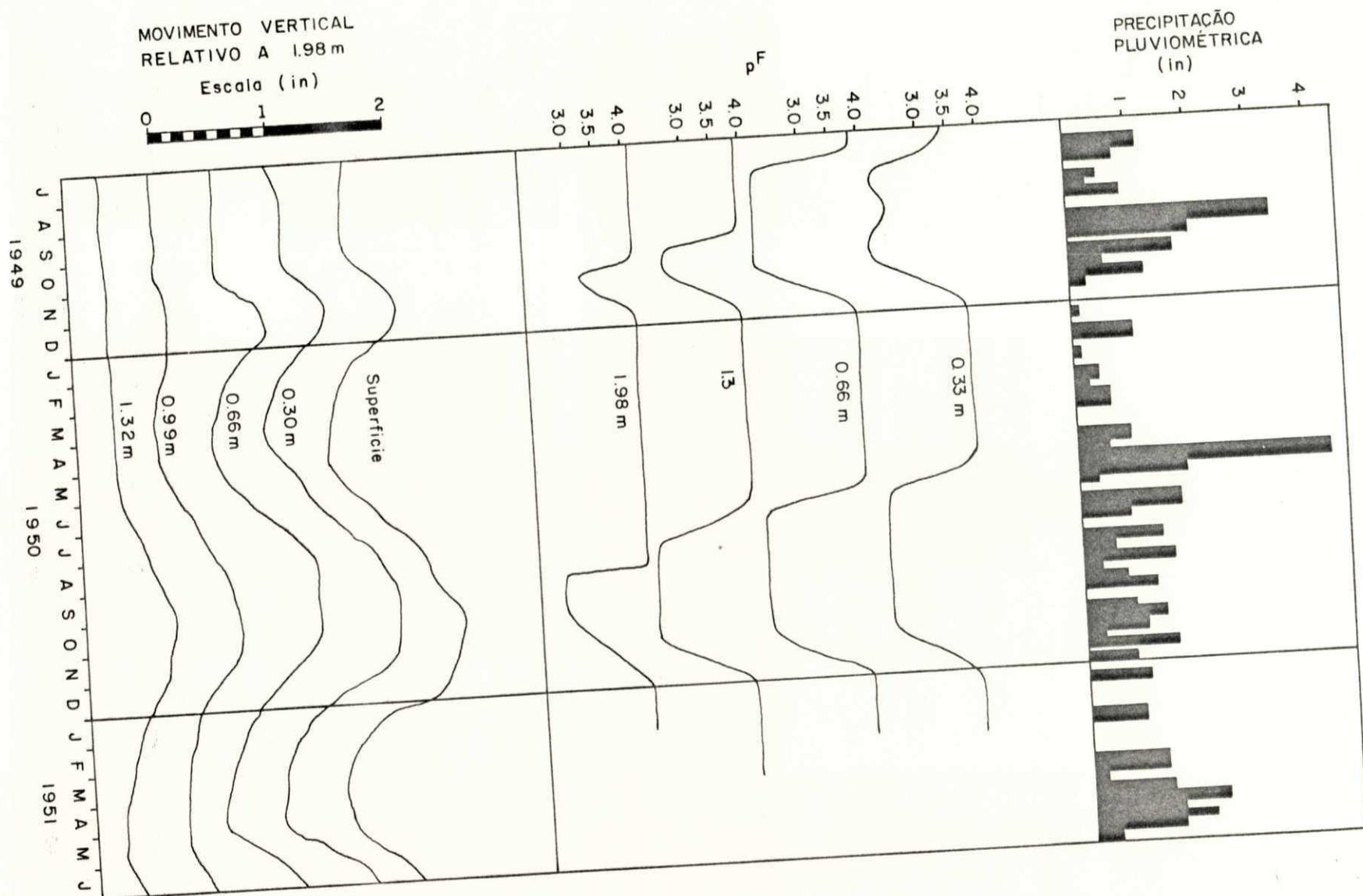
O movimento vertical de um solo com uma cobertura de capim, e sujeito a mudanças sazonais no seu teor de umidade, foi medido por Ward (27) em Garston, Inglaterra, e por Aitchison e Holmes (29) em Adelaide, Australia. Sua grandeza depende do solo, clima e da cobertura. Os movimentos sazonais em um solo com alto teor de argila resultante do aumento de água durante o frio do inverno e a perda durante o calor do verão são ilustradas na Figura 2.5, através dos dados de Aitchison e Holmes. O movimento vertical é muito maior na superfície por causa do amplo efeito do horizonte subjacente, conforme é visto. O deslocamento sazonal da superfície tem mais ou menos

3,81 cm neste solo. Observações, tais como, aquelas da Figura 2.5, são importantes nos projetos de fundações de edifícios, devido a alvenaria ficar exposta a graves rachaduras provocadas pelo movimento desigual do solo argiloso abaixo da estrutura. A fim de reduzir os efeitos do movimento vertical, a base das fundações do edifício deve ser colocada a uma profundidade suficiente na camada de argila, a fim de prevenir os efeitos das mudanças sazonais no teor de umidade.

A mudança de volume de um pequeno bloco isolado de argila, ocorre igualmente nas três dimensões, a não ser que haja alguma orientação dos cristais de argila para um dos planos. Se este processo de mudança de volume tridimensional ou isotrópico ocorrer no campo, aparecem fendas no solo durante o período de calor, e que voltarão a se fechar durante o período de umidade e, desta maneira, o solo cederá e subirá com um mínimo de reorganização entre as próprias partículas. No entanto, é concebível que, sob condições de campo, a carga devida a camada de solo imediatamente acima, irá causar um fluxo plástico na contração. Assim, muitas das mudanças no volume seriam representadas pelo movimento vertical (mudança de volume unidimensional ou anisotrópico) e as rachaduras no subsolo não seriam caracterizadas no período seco. Aitchison e Holmes compararam seus movimentos verticais estudados, com os correspondentes aumentos ou perdas de água nos solos submetidos a carregamento. Os resultados obtidos por eles sobre os subsolos argilosos foram compatível com as mudanças isotrópicas e tri-dimensionais e assumiram a mudança de volume como sendo "normal" (Fig. 2.5 e outros dados). Sua conclusão aplicada para argilas com uma sobrecarga, é que o movimento vertical ocorre para profundidades menores do que 1,2 m.

As fissuras resultantes da contração facilitam a entrada da água, drenagem e a circulação de ar nos subsolos argilosos, desde que, o mesmo se encontre inteiramente seco (21). A unidade estrutural, obviamente quando seca, possui um grau de permanência sobre o umedecimento (30). O inchamento da argila é um processo lento, que pode ocorrer alguns meses depois do início da época úmida, mesmo antes que as fissuras fe-

Figura 2.5 - Movimentos verticais de um solo com alto teor de argila acompanhado das mudanças sazonais na sucção (29).



chem completamente. Como consequência, a completa dessecação (secagem) de um perfil de argila afeta o seu comportamento em relação a água e o ar por algum tempo, depois de umedecido. Emerson (31), mostrou que a secagem acima do subsolo revolvendo o material com pás durante o verão, teve como resultado uma melhoria na drenagem, durante o inverno seguinte na Inglaterra. Ele observou que o teor de umidade dos agregados isolados, continuava a aumentar após um período de três meses, com um baixo valor de sucção. Considerou, que isto foi devido ao rearranjo dos cristais de argila, e também, ao aumento gradual das películas de água ao redor das partículas, as quais, foram se aglomerando devido a diminuição gradual dos poros no interior do agregado, deste modo, a permeabilidade diminuiria progressivamente. Este mecanismo, é provavelmente, a complementação para o lento fechamento das fissuras superficiais dos agregados, a medida em que seu volume aumenta. O mecanismo fechamento-fissuras possivelmente, pode ocorrer em subsolos argilosos, onde os agregados são densos e parcialmente saturados e para valores de sucção maiores que 5 pF.

Um movimento maior do solo é, certamente, acompanhado pelo rearranjo em pequena escala, das partículas, do tipo considerado por Emerson (31). Nesta conexão, Holmes (32), estudou o ciclo de histereses nas curvas de umidade e secagem através da relação teor de umidade/sucção, nas amostras de argila. As explicações baseadas na presença de uma interface ar-água, não foram aceitas porque as amostras, embora saturadas com água, mostraram histereses. Holmes, segundo uma sugestão de Schofield (32), atribuiu a ocorrência de histereses na argila, devido a mudança de energia provocada pelos reajustamentos relativos das partículas próximas.

Tais reajustamentos podem resultar na orientação preferencial dos cristais de argila numa direção. Weymouth e Williamson (33), mostraram que, a moldagem por expulsão sob pressão (extrusão) ou algum movimento em argilas úmidas podem causar esta orientação. Quando isto ocorrer, afetará o comportamento da contração. Williamson (34), mostrou que discos feitos com argila orientada (caulinita e alguma illita), possuem uma contração relativa na direção perpendicular ao seu plano

basal, a qual tem mais do dobro da que se processa na direção radial. A orientação deve desempenhar algum papel na estrutura e no inchamento de muitos solos, porém, atualmente pouco se conhece sobre isto. Brewer e Blackmore (35), mostraram que os agregados de alguns solos tem fragmentos e camadas de argila orientada, e sugeriu que o desarranjo sobre o umedecimento ocorre, por causa desta zona orientada. O inchamento é muito maior numa direção do que em outras, nesta zona, e, assim as tensões se estabelecem principalmente quando o solo é umedecido.

Retenção da Água nas Argilas: Em solos arenosos, o teor de umidade para uma dada sucção depende da quantidade de vazios existentes, e da grandeza correta para a água retida. Nos solos com alto teor de argila, o enchimento e esvaziamento dos vazios durante o umedecimento e secagem, podem ser menos importantes do que o inchamento e a contração. A relação entre o teor de umidade e sucção depende, então, menos da estrutura dos poros do solo e cada vez mais da distribuição de tamanho das partículas e suas propriedades de superfície.

Os cátions permutáveis na camada de água ocupam o espaço entre duas placas paralelas de argila, dando surgimento a uma pressão osmótica altíssima, a mesma existente na maior parte das águas livres provocada pela mudança dos cátions e, em consequência, de baixíssima concentração iônica. Deste modo, os íons permutáveis não são livres para migrar e, assim, eliminar o gradiente de concentração, existe uma tendência de mais água ser atraída para o interior das camadas situadas entre as partículas. Se esta tendência, não encontrar resistência por parte de uma pressão de confinamento igual a pressão de inchamento, a placa de argila será impelida separadamente e o solo irá dilatar.

Métodos para calcular a pressão de inchamento foram deduzidos por Schofield (36) e outros. Estes métodos dependem do conhecimento da distribuição iônica na dupla camada elétrica da partícula, de modo que, a concentração e portanto, a pressão osmótica no plano médio entre as placas de argila, possam ser calculadas através de uma camada de água de espessura conhecida. A diferença entre a pressão osmótica da água neste

plano e da água armazenada ou solução em equilíbrio com ela, representa a pressão de inchamento. Bolt (37), discutiu os princípios e assuntos envolvidos no cálculo da pressão de inchamento, pela teoria da dupla camada e comparou com os dados experimentais que relacionam o teor de umidade e pressões externas num sistema bi-fásico argila-água. Bolt seguindo a consolidação da argila quando pressões eram aplicadas, observou que, durante o processo, a água e soluções escapavam através de uma membrana permeável (um sistema semelhante, em princípio, ao do ensaio de adensamento na Mecânica dos Solos). Neste experimento, a solução extraída representa a solução armazenada de concentração conhecida. A concordância entre os experimentos e os cálculos, foram bastantes boas para proporcionar um auxílio à teoria da dupla camada e, ao mesmo tempo, servindo como base para explicar o inchamento, e também a retenção da água em montmorilonita sódica. Trabalhos sobre illita sódica e montmorilonita cálcica também foram feitos, porém, foram obtidos somente uma concordância qualitativa entre os dados experimentais e calculados.

O inchamento tem sido explicado por outros meios. Terzaghi (38), considerou isto como um fenômeno mecânico. As pequenas partículas em forma de placas, são flexionadas e lâsticamente quando comprimidas juntas por uma pressão externa ou pela tensão na água durante a secagem. Devido a remoção da pressão aplicada ou da umidade, o restabelecimento do sistema continua e a expansão ocorre. Bolt afirmou que não há evidência para este tipo de mecanismo no inchamento das argilas, mas que, por outro lado, a aplicação da teoria da dupla camada está carregadas e tem mudanças de cátions associados com elas. Contudo, trabalhos suplementares são necessários para estabelecer a aplicação desta teoria. Terzaghi e Peck (39) e Terzaghi (40), sugeriram que os dois processos, mecânico e adsorção, desempenham um papel a parte.

Kryukov e Komarova (41), examinaram o efeito de pressões muito altas, de até 20.000 kg/cm^3 (quase 20.000 atm) durante a expulsão da água através de uma camada de material com 5 mm de espessura. Eles obtiveram curvas lineares aproxima

madras, relacionando o teor de umidade e o logaritmo da pressão, para a bentonita e caulinita. Eles concluíram que, a retenção da água nestes materiais é governada primariamente pelas propriedades físicas da água condicionada por sua interação com o sólido e não pela resistência mecânica do esqueleto sólido.

É evidente que a água pode ser retirada de uma argila entumescida pela aplicação de uma carga ou uma sucção, e que a consolidação pode ser usada para um ou outro processo, Terzaghi (42); Croney e Coleman (43). As mudanças no volume foram induzidas pelas mudanças nas pressões aplicadas ao solo, no consolidômetro, por um lado, e pela mudança na sucção por intermedio dos métodos placa de sucção, membrana de pressão e adsorção de vapor, por outro lado, e que foram comparados por Aitchison e Donald (57).

Pressão do Vapor D'Água no Solo: Puri, Crowther e Keen (44), verificaram que a água, colocada em um recipiente pequeno, à vácuo, evapora até que a pressão no vapor d'água alcance um certo valor, dependendo da temperatura, após o qual as velocidades de evaporação e recondensação na superfície da água, tornam-se iguais. Essa pressão de equilíbrio é denominada pressão de vapor saturado da água, à temperatura do recipiente fechado. Se toda água presente evapora antes que seja alcançada a condição saturada, a pressão final expressa como uma porcentagem da pressão de saturação, é denominada de "umidade relativa" do recipiente fechado.

Se colocarmos solo úmido em um recipiente semelhante, será criada uma pressão de equilíbrio que dependerá da temperatura. A pressão, no entanto, será menor que a pressão de saturação do vapor d'água, à mesma temperatura, devido à sucção com que a água do solo é retida. A pressão de vapor da água pode, por conseguinte, ser expressa diretamente ou como uma umidade relativa (aqui definida como a relação da pressão de vapor do solo com a pressão de vapor saturado da água à mesma temperatura, expressa em porcentagem).

A Figura 2.6 mostra as relações, umidade relativa/teor de umidade, para uma areia e uma argila (44). Pode ser observado, que a pressão de vapor do solo aumenta com o teor de

umidade, mas que somente a baixos teores de umidade, isto é, a elevadas succões, a pressão de vapor difere consideravelmente daquela da água livre, à mesma temperatura. As curvas mostram, também, que a pressão de vapor da argila é menor que a da a reia, aos mesmos teores de umidade e temperatura.

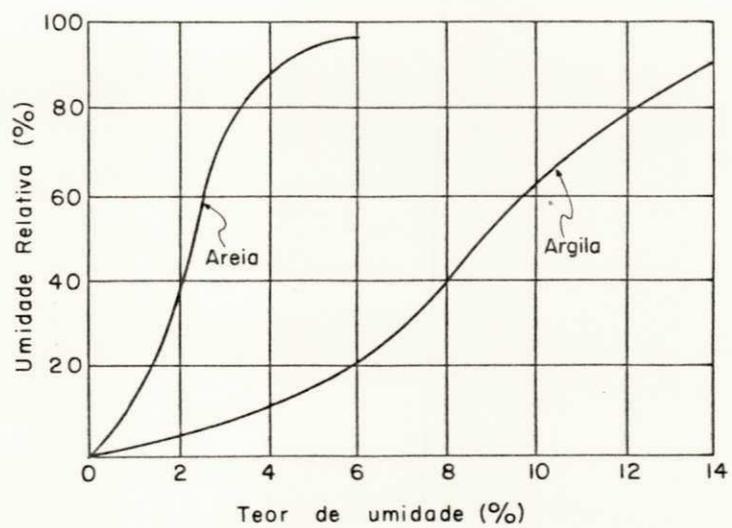
Observa-se na Figura 2.6 que, se duas amostras do mesmo solo a diferentes teores de umidade forem colocadas juntas em um recipiente fechado à vácuo, ocorrerá uma evaporação na amostra mais úmida e uma condensação na amostra menos úmida, até que ambas tenham o mesmo teor de umidade. Por outro lado, se as duas amostras forem de solos diferentes, a água poderá deixar a amostra mais seca e ir aumentar o teor de umidade da amostra mais úmida, se esta última tiver um teor de argila maior (44).

O equilíbrio da pressão de vapor do tipo considerado acima, não é afetado pela presença de outros gases, que não sejam o vapor d'água, uma vez que a presença de ar seco no recipiente considerado, como prêviamente, em condição de vácuo, não terá efeito na pressão final do vapor d'água. Na prática o ar sempre contém vapor d'água, sendo que sua quantidade de

pende da umidade relativa da atmosfera (relação entre a pressão do vapor d'água existente no ar com a pressão necessária para satura-lo à mesma temperatura). Em consequência, se deixarmos um solo úmido em contacto com a atmosfera, a água se evaporará do mesmo, ou condensará no mesmo, até que a sua pressão de vapor se torne igual à da atmosfera. Um solo seco em estufa, deixado a resfriar no ar, absorve umidade dessa maneira, sendo que a primeira umidade a condensar irá engrossar a camada de adsorção, na superfície das partículas do solo. O teor de umidade do solo, em equilíbrio de vapor com o ar, é algumas vezes chamado "teor de umidade higroscópico". Esse valor não pode ser considerado constante para um determinado solo, pois seu valor depende da umidade relativa da atmosfera. Em uma atmosfera saturada (100% de umidade relativa) o teor de umidade higroscópico pode, inclusive, aproximar-se da saturação.

No interior do solo, a umidade relativa da atmosfera tem pequeno efeito na pressão do vapor, pois esta última





dependerá do teor de umidade e da temperatura do solo. A pressão de vapor do ar tem, no entanto, um efeito crescente quando nos aproximamos da superfície. Se a pressão do vapor do solo é maior que a da atmosfera, ocorre a evaporação, que irá reduzir o teor de umidade do solo a uma profundidade progressivamente maior. Experiências efetuadas na Inglaterra durante secas prolongadas indicam que o efeito da evaporação superficial pode atingir vários pés de umidades (44).

Movimento da Água Associado com Gradiente de Temperatura: Uma diferença de temperaturas, entre partes vizinhas de um solo, provocará uma diferença correspondente na pressão do vapor, cuja grandeza pode ser obtida de curvas do tipo ilustrado na Figura 2.7. A umidade transferida na fase de vapor para restaurar o equilíbrio da pressão de vapor, evapora das regiões de elevada temperatura (pressão de vapor elevado) e condensa em regiões de temperatura menor (pressão de vapor menor), sendo o movimento acompanhado por uma troca de calor (calor latente) que tende a reduzir o gradiente de temperatura.

A Figura 2.8 mostra alguns resultados de ensaios de laboratório efetuados no Laboratório de Pesquisas Rodoviárias da Gran Bretanha. Amostras cilíndricas de 11 cm de altura, compactadas a um peso específico aparente seco conhecido, em vários teores de umidade, foram submetidas, cada uma, a um gradiente de temperatura constante, de aproximadamente $1,7^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, sendo que as partes laterais das amostras foram protegidas para evitar perdas de temperatura. Como se poderá esperar da relação, pressão de vapor/temperatura, houve uma migração da umidade na direção da extremidade mais fria, migração essa que continuou por cerca de três dias. A distribuição da umidade no fim desse período concordou razoavelmente com os cálculos baseados nas curvas de pressão de vapor de solo.

Em uma série de ensaios executados em solos, de diferentes tipos, pesos específicos aparentes secos, e teores de umidade iniciais, chegou-se as seguintes conclusões:

1. Os movimentos de vapor ocorrem mais rapidamen

Figura 2.7 - Curvas, pressão de Vapor/Temperatura, deduzidas das curvas umidade/teor de umidade constante da Figura 2.6.

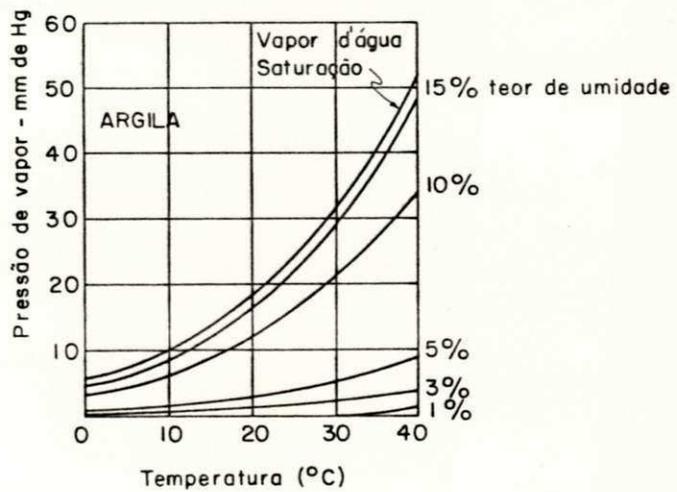
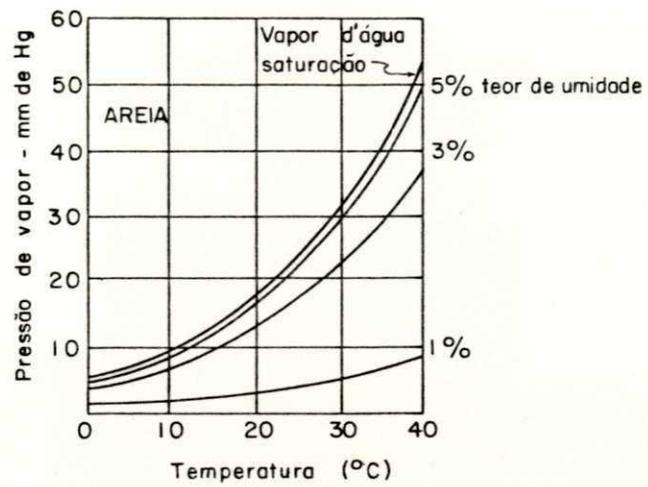
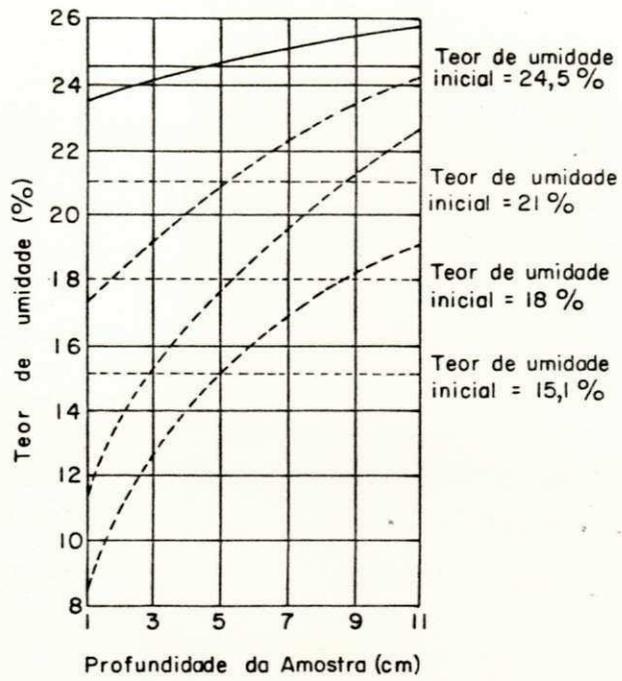
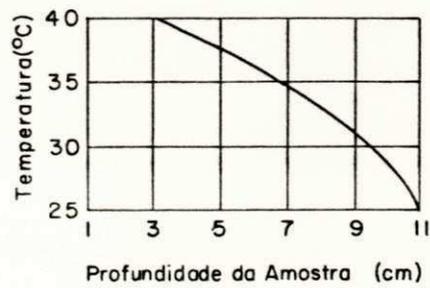


Figura 2.8 - Distribuição da umidade de equilíbrio, em corpos de prova cilíndricos de argila, com teores de umidade iniciais diferentes, quando submetidos aos mesmos gradientes de temperatura.



a) Distribuição de equilíbrio da umidade nas amostras.
(Peso específico aparente seco do solo $1,55 \text{ g/cm}^2$)



b) Gradiente de temperatura da amostra

te em solos tendo baixos teores de umidade; acima do limite de plásticidade os movimentos são muito pequenos.

2. Os movimentos de vapor ocorrem menos rapidamente em solos bem compactados do que em solos soltos, de mesmo teor de umidade.

Dessas conclusões observa-se que, quaisquer fatores que reduzam o número e tamanho dos canais livres através dos quais o vapor pode passar, irão impedir os movimentos da umidade na fase de vapor.

Nos subleitos das rodovias poderão ocorrer movimentos de vapor d'água devido aos gradientes de temperatura estabelecidos na superfície do solo pelos ciclos de temperatura atmosféricos durante o dia e o ano. O ciclo diário, que afeta somente algumas polegadas superficiais, não causa provavelmente movimentos de umidade em grande escala. Certa condensação de umidade poderá ocorrer na parte lateral inferior de estruturas rodoviárias durante a parte de esfriamento do ciclo, porém, considerações teóricas e ensaios de laboratório mostraram que a água de condensação torna a evaporar rapidamente assim que a temperatura da superfície aumenta.

Termo-Osmose: Através de investigações, Bouyoucos (45) e Winterkorn (46), sugeriram que as películas de água ao redor das partículas movem-se por causa de uma mudança na afinidade da água com a temperatura. Esta afinidade, é considerada como sendo relativa à dupla camada elétrica e, em consequência, à quantidade e tipo dos cátions permutáveis. A termo-osmose é considerada por Winterkorn, similar, em princípio, a eletro-osmose, que vem ser o movimento da água sob a influência de um potencial elétrico aplicado.

Deryaguin e Melnikova (47), consideraram que a termo-osmose não tem muita importância em solos com baixo teor de umidade. Sob condições de saturação o efeito pode ser muito grande, e, é para esta condição que outras técnicas, aliadas a eletro-osmose tem sido aplicadas com algum sucesso para auxili

liar a drenagem.

Movimento Termo-Capilar: Deryaguin e Melnikova (47) explicam os grandes movimentos para baixos teores de umidade, como devido ao efeito da temperatura sob a tensão superficial da água, a qual decresce com o aumento da temperatura. A sucção, portanto, decrescerá com a temperatura e assim haverá um gradiente de sucção capaz de mover a água em direção a parte mais fria do solo. O movimento ocorre de acordo com a lei de Darcy naquela direção.

R e s u m o

Dos pontos principais abordados nesta revisão bibliográfica, pode-se afirmar de uma maneira geral, que o controle do teor de umidade do subleito é essencial para o bom desempenho de uma rodovia. A água movendo-se livremente sob a ação da gravidade poderá atingir a camada de subleito através de um revestimento permeável, afetando o seu teor de umidade por infiltração ou por uma elevação do nível do lençol freático. A umidade pode, também, entrar ou sair de um subleito, tanto na fase líquida como na de vapor, sob a ação de forças inteiramente inerentes ao próprio solo.

A tensão superficial e as forças de absorção que retêm a água reduzem-lhe a pressão de vapor e, ao mesmo tempo, estabelecem na própria água um estado de pressão reduzida ou sucção. Se as condições de equilíbrio da umidade de um solo sofrem um distúrbio local, os gradientes de sucção e pressão de vapor criados, causam um movimento da umidade nas fases de vapor e líquida, tendente a restabelecer o equilíbrio.

Resumindo, então, podemos dizer que a tecnologia para avaliar a capacidade suporte dos subleitos, está baseada na determinação da quantidade de umidade presente nos subleitos. Alguns métodos utilizam o conceito de condição mais desfavorável, no entanto, a tecnologia inglesa utiliza o conceito mais lógico de estabelecer a umidade de equilíbrio resultante das condições de drenagem da área da rodovia.

Parece então apropriado, revisar com maiores detalhes os princípios do movimento da água nos solos para, assim, utilizar estes conceitos no estudo de campo e interpretação das condições de umidade das rodovias do Estado da Paraíba.

CAPÍTULO 3

OBJETIVO DA PESQUISA

A tecnologia para o dimensionamento de pavimentos flexíveis usada no Brasil, é empírica e baseada nos resultados obtidos nas experiências dos Estados Unidos da América do Norte. Esta situação não é particular para o Brasil, mas é muito comum nos países em vias de desenvolvimento.

O maior problema de aplicar uma tecnologia empírica no Brasil, é que as condições climáticas, geográficas e de tráfego são muito distintas entre uma região e outra. O método oficial do D.N.E.R. para o dimensionamento de pavimentos flexíveis é o de Murillo Lopes. Pode ser que este método seja adequado para algumas regiões do país, mas, é aceitável pensar que não seja de aplicação geral.

Para contribuir à solução deste problema, isto é, para verificar se o método de Murillo Lopes é adequado às condições do Nordeste do país, se planejou esta pesquisa, que tem como objetivo adicional desenvolver uma tecnologia para a avaliação e prognóstico das condições de umidade dos subleitos de rodovias, de tal maneira que seja possível estabelecer com rigor tecnológico, as variáveis mais importantes para determinar o valor suporte dos subleitos e estabelecer as espessuras apropriadas dos pavimentos.

Este trabalho inclui os seguintes tópicos:

- a) Estudo das variações de umidade ao longo do perfil do subleito nas seções de rodovias selecionadas, e comparação com as relações de suc-

ção-umidade obtidas no laboratório.

- b) Determinação das propriedades físicas das camadas dos pavimentos e comparação com os valores determinados no laboratório.
- c) Comparação dos valores de CBR de campo com os valores de CBR de laboratório obtidos com ensaios após imersão e sem imersão.
- d) Proposição de uma nova metodologia para determinar o valor suporte dos subleitos no Nordeste do país com fins de dimensionamento.

CAPÍTULO 4

SELEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Introdução

De acordo com o programa elaborado para esta pesquisa, a seleção dos locais onde estão situadas as seções, foi feita, baseada na ocorrência de diferentes materiais que compõem o subleito e, nas variações sazonais das diversas regiões onde situam-se os trechos das rodovias em estudo. Antes de dar prosseguimento ao assunto deste capítulo, é importante situar a área usada para o desenvolvimento desta pesquisa.

O Estado da Paraíba está localizado na porção oriental da Região Nordeste do Brasil, situando-se, entre os meridianos de $34^{\circ}45'54''$ e $38^{\circ}45'45''$ de longitude a Oeste de Greenwich e os paralelos de $6^{\circ}02'12''$ e $8^{\circ}19'18''$ de latitude Sul. Limita-se ao Norte com o Estado do Rio Grande do Norte, ao Sul com o Estado de Pernambuco, a Oeste com o Estado do Ceará e a Leste com o Oceano Atlântico. Possui uma área de 56.372 km^2 , dos quais 55.119 km^2 estão incluídos no polígono das secas, ou seja, 97,78% do Estado, (53).

Classificação dos Climas

O clima influencia no desempenho do pavimento, principalmente devido a ação da precipitação pluviométrica que, em alguns casos, pode provocar o aumento do nível do lençol freático ocasionando sérios problemas sobre a capacidade de suporte dos subleitos das rodovias.

De acordo com Koppen (53), tem-se as seguintes

classificações climáticas das regiões, onde estão localizadas as seções.

As Zonas Fisiográficas do Litoral e Mata, Agreste e Caatinga Litorânea, Brejo e Borborema Oriental, conforme é mostrado na Figura 4.1, apresentam a classificação As', que denomina o clima quente e úmido com chuvas de outono-inverno e um período de estiagem de 5 a 6 meses.

As precipitações pluviométricas mostradas na Fig. 4.2, na zona do Litoral e Mata oscilam em torno de 1.500 mm, decrescendo rapidamente para o interior, atingindo, já na localidade de Sapé, a média de 990 mm anuais. Na região do Agreste e Caatinga Litorânea e em grande parte da Frente Oriental da Borborema, as precipitações pluviométricas estão normalmente em torno de 700 mm. A parte central da encosta do planalto correspondente à Zona do Brejo, em consequência de sua maior altitude, destaca-se por sua elevada pluviosidade, comparável à que ocorre no litoral. As temperaturas variam muito pouco durante o ano e as médias anuais são elevadas, com valores compreendidos entre 22°C e 26°C.

A Zona Fisiográfica Borborema Central, apresenta a Classificação Bsh (ver Fig. 4.3), com clima semi-árido quente. Esta faixa semi-árida entre o Leste e o Oeste paraibano é a área mais seca de todo o Estado, com precipitações pluviométricas médias anuais muito baixas e uma estação seca que pode atingir 11 meses. As precipitações pluviométricas médias anuais da região estão em torno dos 400 mm, e as médias de temperatura nunca são inferiores a 24°C.

A Zona Fisiográfica do Sertão Piranhas apresenta a classificação Aw', com clima quente e úmido com chuvas de verão-outono. Embora as precipitações não sejam muito pequenas, em torno de 800 mm, a irregularidade das mesmas dá lugar a características de aridez quase tão acentuadas quanto as que ocorreram na região Bsh, havendo anos de período de chuvas quase ausente.

Descrição e Situação das Seções

Dando continuidade ao programa da pesquisa, foram

Figura 4.1 - Zona fisiográficas do Estado da Paraíba

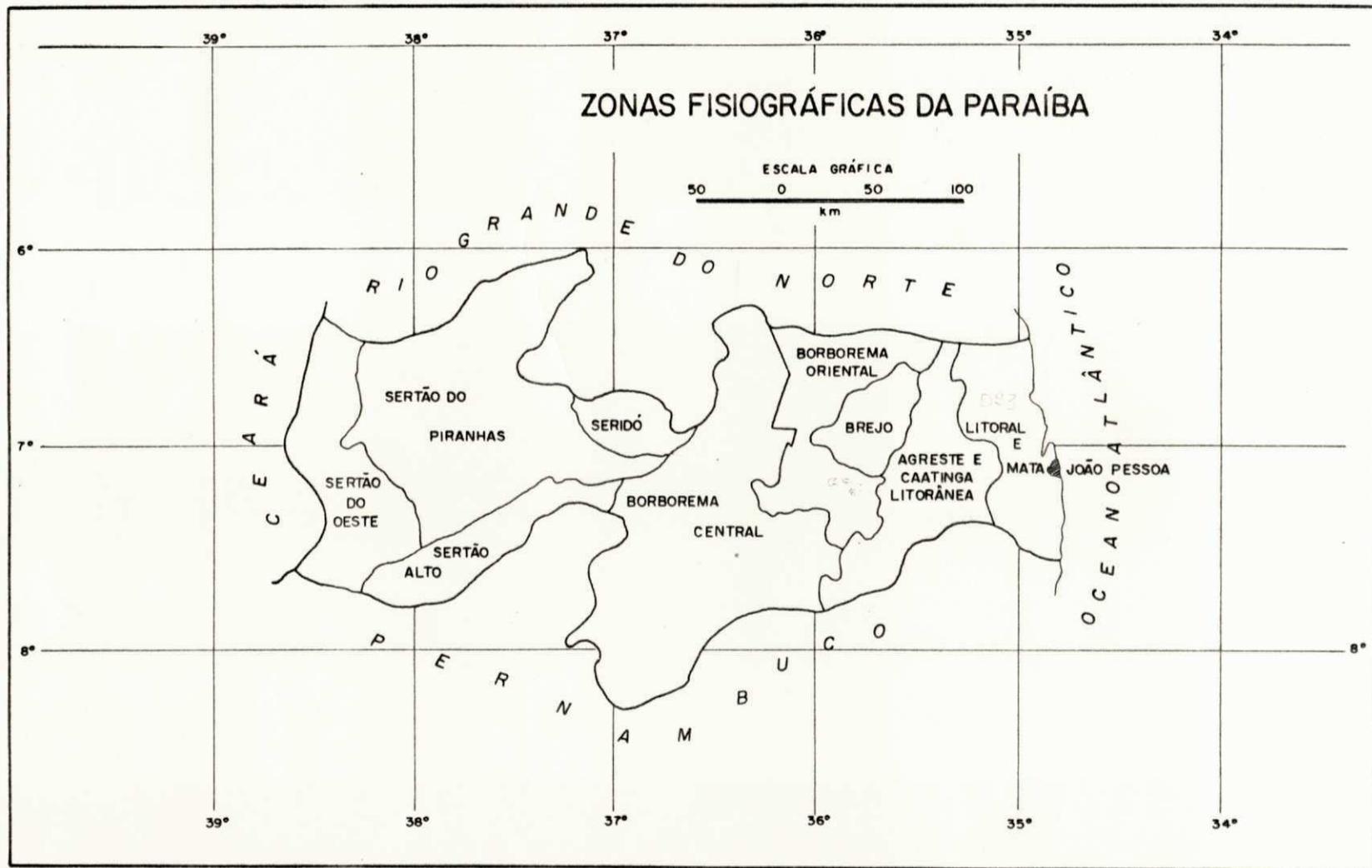


Figura 4.2 - Situação das seções nas Rodovias

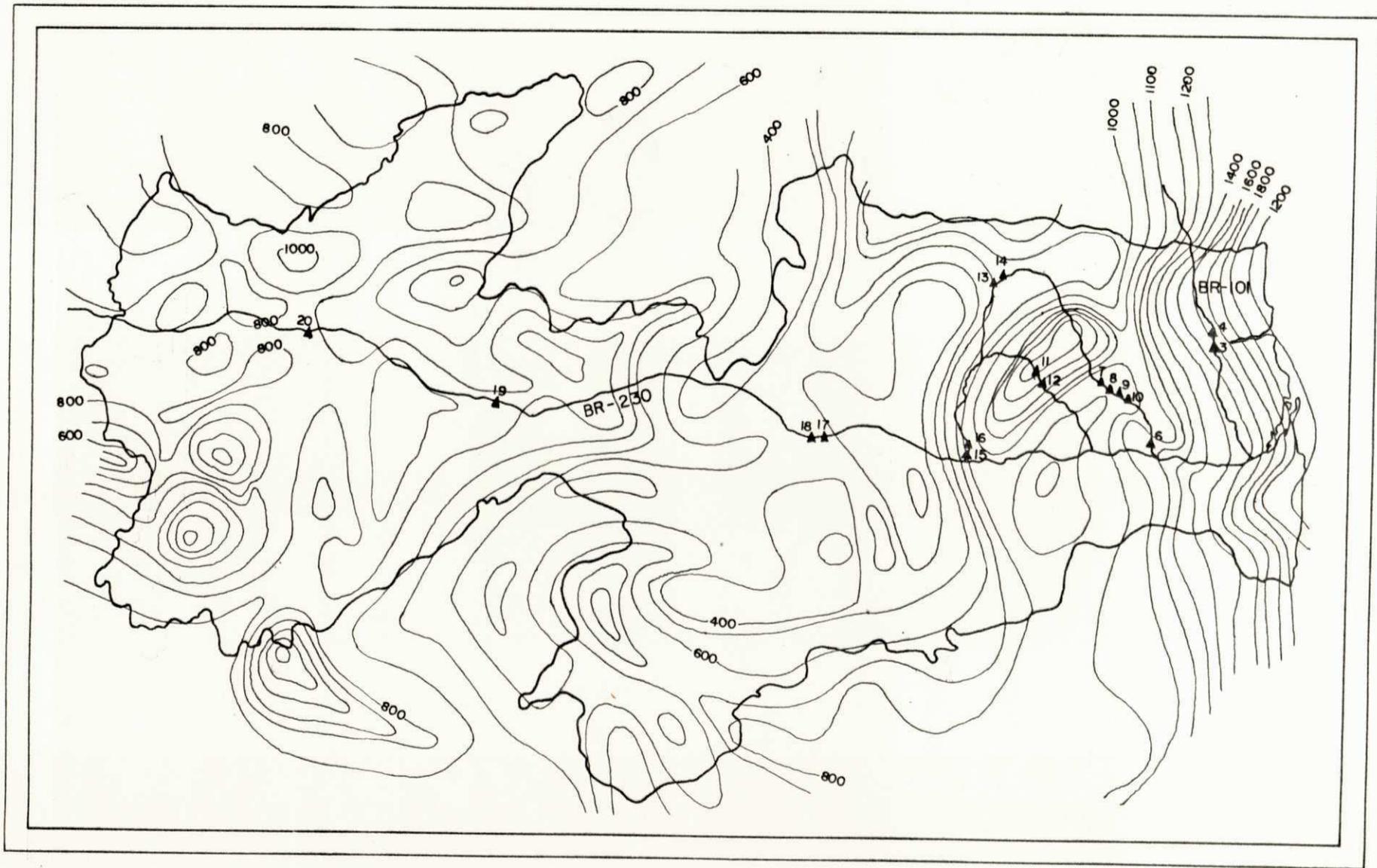
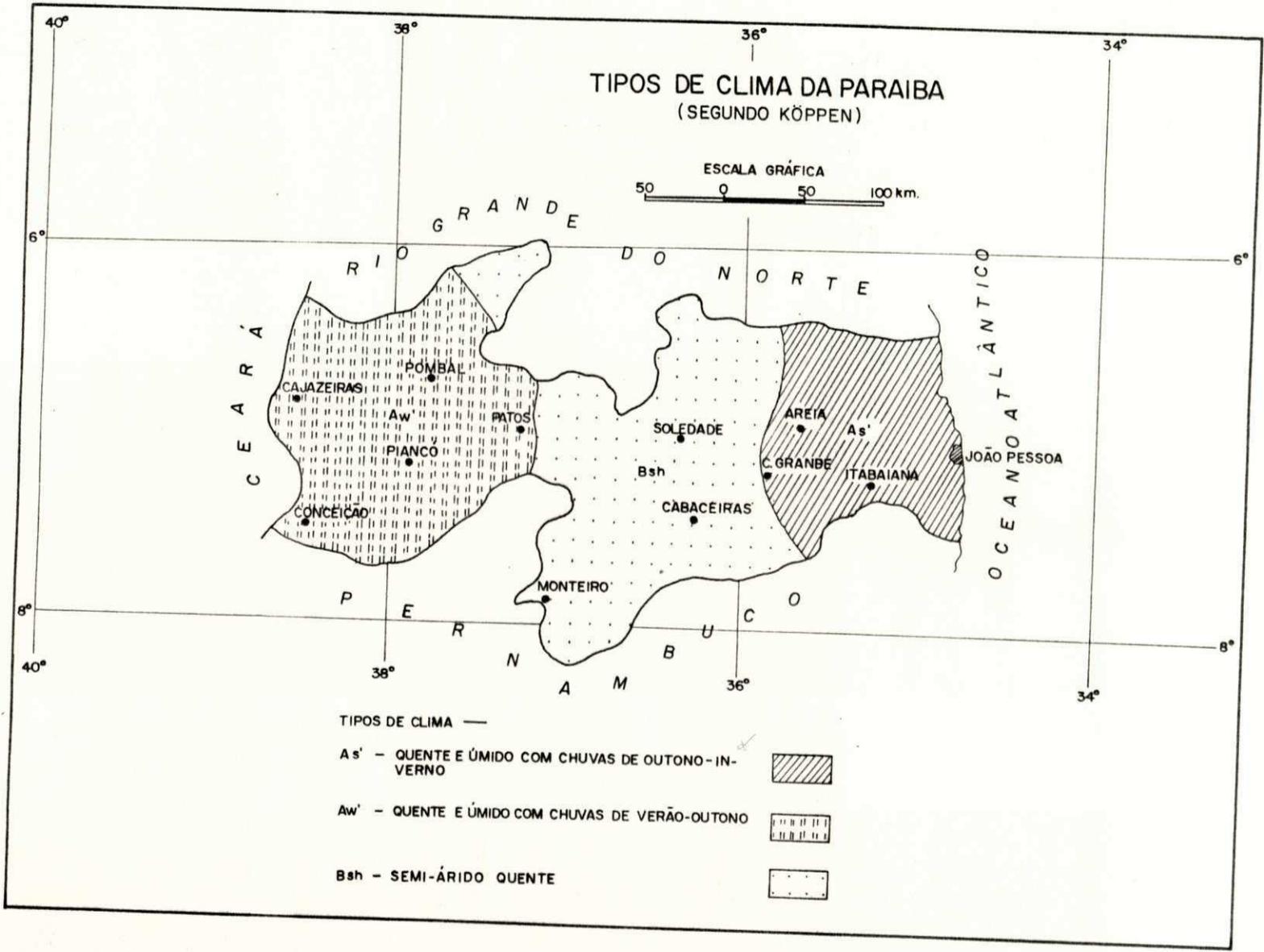


Figura 4.3 - Classificação de climas do Estado da Paraíba

UFPA / BIBLIOTECA / PRAI

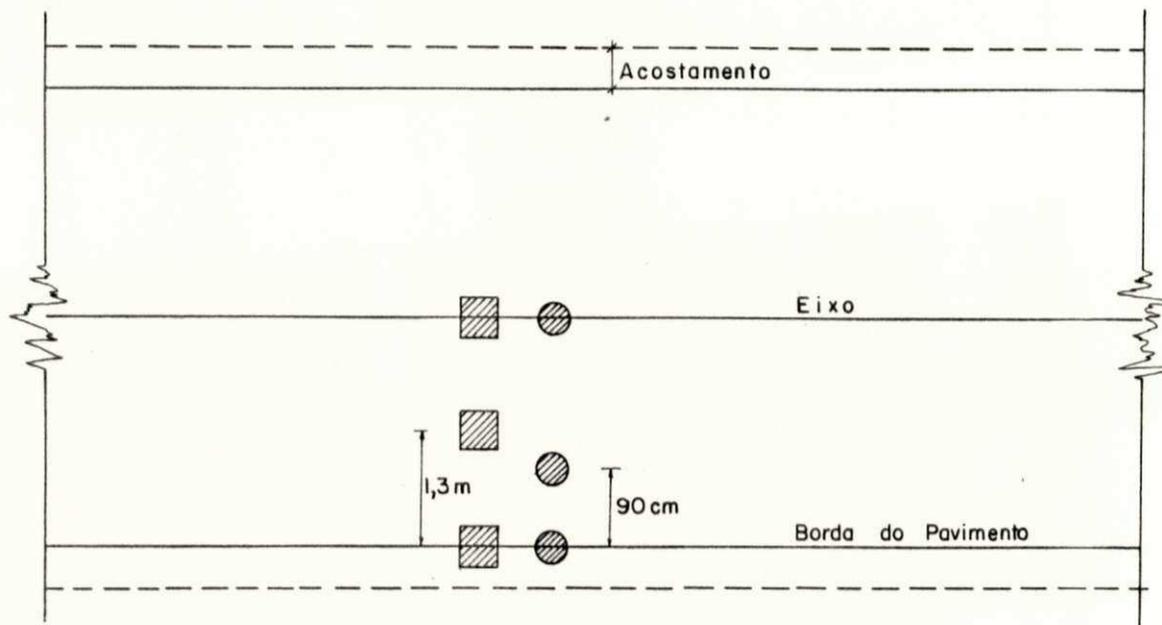


realizados os ensaios geotécnicos dos solos do subleito das rodovias, compreendendo os trechos da BR-101, BR-104, BR-105, Pb-055, Pb-079 e BR-230, neste Estado. A Figura 4.2, mostra a distribuição das seções escolhidas ao longo dos trechos citados acima.

A Figura 4.4, mostra a posição das sondagens para coleta de amostras, com a finalidade de estudar a umidade do subleito. As sondagens estão localizadas no centro (eixo), a 90 cm da borda e na borda do pavimento, atingindo a profundidade de 1,5 m a partir do nível do subleito. Em seguida, situam-se os poços, onde foram executados os ensaios de campo, bem como a coleta de material. Estes poços localizam-se no centro, a 1,30 m da borda e na borda do pavimento. Respectivamente. A Tabela 4.1, mostra a localização e posição das seções, assim como as espessuras da base, subbase e reforço e também as condições do pavimento.

A Tabela 4.2, mostra todos os dados coletados no início da pesquisa. Pode-se observar a variedade de tráfego atual, classificação climática, precipitação anual, zona fisiográfica e o possível tipo de solo obtido dos mapas pedológicos elaborados pela SUDENE (53). Estes dados, conjuntamente com os dados da Tabela 4.1 que fornece as espessuras dos pavimentos, assim como as condições do pavimento numa escala qualitativa de 5 pontos (condição: excelente, boa, aceitável, pobre e inaceitável), são suficientes para uma correlação com o estudo de engenharia que é apresentado nos capítulos seguintes.

Figura 4.4 - Posição das sondagens do Pavimento



▨ Poços para o CBR e Densidade de Campo.

● Sondagens para coleta de amostra do subleito.

SEÇÃO Nº	T R E C H O	POSIÇÃO DOS FUROS	ESPESSURA/cm			CONDIÇÃO DO PAVIMENTO
			BASE	SUB-BASE	REFORÇO	
3	STA. RITA-MAMAGUAPE	A 140 m DO RIO MAMAGUAPE	20	20	20	BOA
4	BR-101					
6	SAPÉ-ENTR. BR-230/Pb-055	EST. 161	20	20	10	BOA
7		EST. 275 + 5	15	10	20	BOA
8	SAPÉ-MARI	EST. 356 - LD	15	20	15	
9	Pb-055	EST. 360	20	15	15	
10		EST. 400	20	20	20	
11	AREIA-ALAGOA GRANDE	EST. 3729	20	15	15	BOA
12	Pb-079	EST. 3734				
13	SOLÂNEA-BANANEIRAS	EST. 80	20	30	20	EXCELENTE
14	Pb-105	EST. 92 + 10	20	20	30	
15	CAMPINA GRANDE-LAGOA SÊCA	A 800 m DE LAGOA SÊCA	15	30	15	EXCELENTE
16	BR-104	A 500 m DE LAGOA SÊCA	20	20	20	
17	SOLEDADE-JUAZEIRINHO	EST. 2330 + 2	20	30	40	BOA
18	BR-230	EST. 2333				
19	PATOS-MALTA, BR-230	350 m P/MARCO DO Km 349	20	20	20	BOA
20	POMBAL-SOUZA, BR-230	A 7,4 Km DE APARECIDA	17	18	17	BOA

TABELA 4.1 - LOCALIZAÇÃO E POSIÇÃO DOS FUROS, ESPESSURA DA BASE, SUB-BASE E REFORÇO EM CENTÍMETROS.

SEÇÃO Nº	TRÁFEGO ATUAL ΣN	CLASSIFICAÇÃO DE KOPPEN	PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRI- CA ANUAL * (mm)	ZONA FISIOGRÁFICA	CLASSE DE SOLO DO SUBLEITO
3	$8,3 \times 10^5$	As'	1700	LITORAL E	PODZÓLICO VERMELHO AMARELO, TEX-
4		As'	1700	MATA	TURA INDISCRIMINADA
6	$4,6 \times 10^5$	As'	1100	AGRESTE E	BRUNO NÃO CÁLCICO, TEXTURA MÉDIA
7		As'	900		
8	$5,6 \times 10^5$	As'	900	CAATINGA	PODZÓLICO VERMELHO AMARELO,
9		As'	900	LITORÂNEA	TEXTURA ARGILOSA
10		As'	900		
11	$2,8 \times 10^5$	As'	1300		TERRA ROXA ESTRUTURADA EUTRÓFICA,
12		As'	1300	BREJO	
13	$5,3 \times 10^4$	As'	500		BRUNO NÃO CÁLCICO LITÓLICO, TEX-
14		As'	500		TURA ARENOSA
15	$1,4 \times 10^5$	As'	700	BORBOREMA	PODZÓLICO VERMELHO AMARELO EQUIVALEN
16		As'	700	ORIENTAL	TE EUTRÓFICO, TEXTURA ARGILOSA
17	$2,6 \times 10^5$	Bsh	500	BORBOREMA	SOLO NETZ SOLODIDADO E LITÓLICOS, EU
18		Bsh	500	CENTRAL	TRÓFICOS, TEXTURA MÉDIA E ARENOSA
19	$2,9 \times 10^5$	Aw'	800	SERTÃO DO	BRUNO NÃO CÁLCICO E LITÓLICOS EUTRÓF.
20	$1,3 \times 10^5$	Aw'	800	PIRANHAS	BRUNO NÃO CÁLCIO, TEXTURA ARENOSA

TABELA 4.2 - SITUAÇÕES DAS SEÇÕES COM RELAÇÃO AO TRÁFEGO ATUAL, CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KOPPEN, PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL E AS CORRESPONDENTES CLASSES DE SOLO DO SUBLEITO COM AS ZONAS FISIOGRÁFICAS, OBTIDAS DO MAPA PEDOLÓGICO DA PARAÍBA.

(*) VALORES DETERMINADO NA FIGURA 4.2.

CAPÍTULO 5

CONDIÇÕES DE TRÁFEGO NAS RODOVIAS ESTUDADAS

Introdução

Entre muitos fatores a serem avaliados num projeto estrutural de pavimentos, são os efeitos do volume de tráfego, tipo de veículos e o modo de operação desses veículos. Sabe-se que, as estimativas sobre o crescimento de tráfego nas rodovias são de aproximações duvidosas. Aparentemente parece muito fácil prognosticar a taxa de crescimento de tráfego que se deveria esperar numa rodovia, porém, as variáveis que influenciam esta taxa de caráter aleatório é difícil de quantificar. O problema da determinação do tipo de trânsito é todavia, muito difícil e laborioso porque a classe de veículos, suas cargas e quantidades, varia com o tipo de estrada e com o caráter das áreas ligadas por elas. Por isso, a maioria dos métodos para determinar o tipo e quantidade de tráfego são aproximados (60).

A melhor maneira que se encontrou até o momento para quantificar o trânsito é converter todos os tipos de veículos comerciais, o que se denomina "eixo padrão ou eixo equivalente padrão". Por convenção e porque a grande maioria de veículos comerciais são equipados com eixo que possuem uma carga de 8.200 kg, foi assumido, em todas as partes, que o eixo equivalente é aquele que possui carga de 8.200 kg. O efeito mais importante da repetição de cargas é a fadiga em pavimentos. As cargas repetidas produzem deformações elásticas, as quais, originam deformações plásticas que ocasionam a falha de um pavimento. A Figura 5.1 mostra esquematicamente uma curva de fadiga

ga. As deformações horizontais ou verticais no pavimento são normalmente medidas com ensaios de carga constante ou deformação constante.

A implicação de uma curva de fadiga como a mostrada na Figura 5.1, é que um pavimento submetido a grandes deformações tem uma vida mais curta que a de um pavimento dimensionado para pequenas deformações.

Apresentação dos Dados

Com a finalidade de avaliar as condições de tráfego nos trechos das rodovias em estudo, inicialmente são apresentados dados estatísticos do volume de tráfego anual obtidos através da SUDENE (56). A Tabela 5.1, mostra os resultados da contagem de veículos comerciais, para os locais onde estão situadas as seções. São conhecidos também, os tempos de serviço (59) de cada trecho, a partir da data em que foram entregues ao tráfego, bem como, o tempo de vida de projeto, os quais possibilitarão na avaliação do Número Equivalente de Operações do Eixo Padrão, N, ou simplesmente número equivalente padrão.

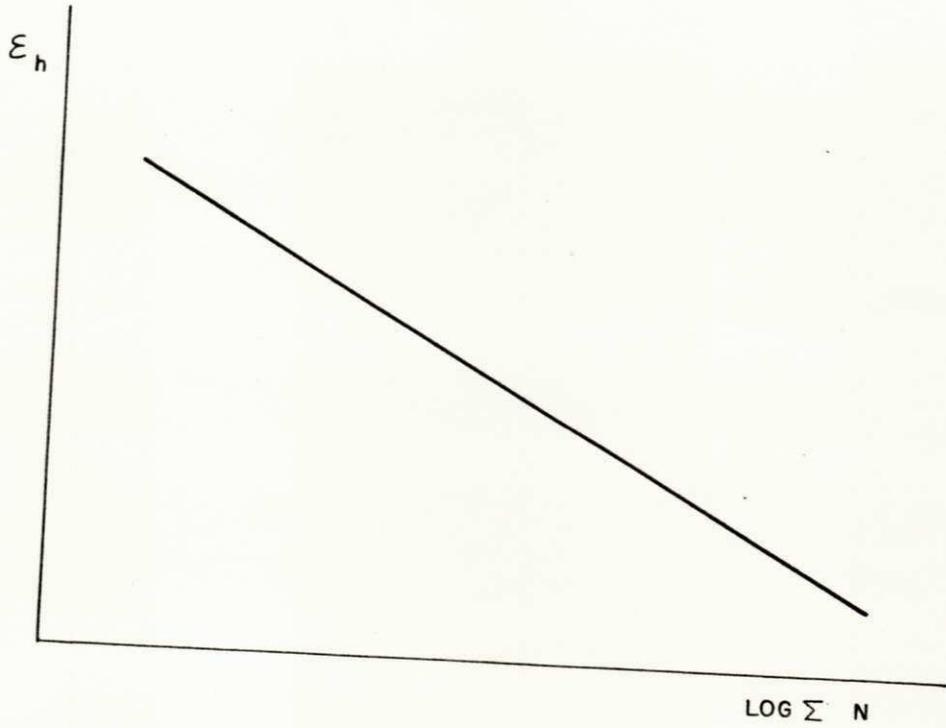
Determinação do Número Equivalente Padrão

Para o cálculo de "N", foram considerados apenas o tráfego comercial, ou seja, o de veículos cujo peso próprio seja superior a 1.500 kg (52). Os dados nas tabelas já citadas no ítem anterior, representam o volume médio anual de veículos, para os períodos de 1972 a 1975, sendo que, os valores apresentados para o ano de 1972 foram considerados altos em relação aos outros períodos, daí não terem sido computados. Deste modo, foram tomados os dados relativos ao ano de 1973. O volume diário inicial, foi determinado através da seguinte equação:

$$A = P (1 + i)^t \quad (3)$$

onde, "A" representa o volume diário anual; "P" o volume diário

Figura 5.1 - Relação entre a deformação devido a tensões horizontais e carregamento expresso em número equivalente total de eixo padrão



rio inicial; "i" a taxa de crescimento anual e, "t" o número de anos, a partir do ano de construção até o ano para o qual se deseja o volume de tráfego (54).

Os valores adotados para a taxa de crescimento permitiram estimar, aproximadamente, o volume diário inicial de tráfego para cada trecho. A Tabela 5.2, mostra os resultados obtidos através da fórmula (3). Pode-se observar, que as taxas de crescimento referentes aos últimos quatro trechos das rodovias são excessivas e, provavelmente não refletem a realidade, mas, para o propósito desta pesquisa, fornecem valores mais lógicos para o volume inicial de tráfego, por outro lado, convém lembrar que nos países desenvolvidos a taxa de crescimento oscila em torno de 3% a 6% ao ano, sendo que nos países em desenvolvimento, estas taxas são muito maiores, principalmente nas regiões que estão se industrializando rapidamente (61).

Foram determinados os valores do Número Equivalente Padrão para o período de vida de projeto e, também, para o tempo de serviço dos pavimentos até o ano de 1975. A conversão do número total de veículos comerciais foi obtida, utilizando-se os coeficientes propostos pela metodologia inglesa (54), ver Tabela 5.3, visto que as porcentagens de distribuição de cargas proposta por Murillo Lopes (49) fornecem valores de "N" total muito altos e claramente não realísticos.

O cálculo da soma total de eixos equivalentes foi feito pela equação de interação composta (61), abaixo:

$$\sum_0^n Eeq = Eeq_{(0)} (365) / \log_e (1 + i) \times \{(1 + i)^n - 1\} \quad (4)$$

onde, $Eeq_{(n)}$ representa o número total de eixos equivalentes para o ano "n"; $Eeq_{(0)}$ o volume inicial de tráfego em termos de eixo equivalente e, "i" a taxa de crescimento anual.

Os dados da Tabela 5.4, permitem uma comparação quantitativa, entre os valores do número equivalente de eixo padrão obtidos pelos métodos citados. Os resultados encontrados através da equação (4) foram menores, com relação aos de

Murillo Lopes e, provavelmente, se encontram mais próximo do real, os quais poderão servir de base para estimar as condições futuras de deterioração nas rodovias.

SIGLA DA RODOVIA	TRECHO	SEÇÃO Nº	1972					1973					1974					1975				
			ÔNIBUS	CAMINH. SIMPL.	CAMINH. DUPL.	REBOC. SEMI-REB.	TOTAL	ÔNIBUS	CAMINH. SIMPL.	CAMINH. DUPL.	REBOC. SEMI-REB.	TOTAL	ÔNIBUS	CAMINH. SIMPL.	CAMINH. DUPL.	REBOC. SEMI-REB.	TOTAL	ÔNIBUS	CAMINH. SIMPL.	CAMINH. DUPL.	REBOC. SEMI-REB.	TOTAL
BR-101	SANTA RITA - MAMANGUAPE	3 ; 4	80	516	-	-	596	84	272	132	18	506	97	282	150	19	548	109	290	219	32	650
PB-055	SAPÉ - ENTRONCAMENTO BR-230	6	63	302	-	-	365	60	188	29	2	279	62	213	43	2	320	67	173	51	2	293
PB-055	SAPÉ - MARI	7;8;9;10	61	312	-	-	373	77	362	-	-	439	77	371	-	-	448	79	446	-	-	525
PB-079	AREIA - ALAGOA GRANDE	11 ; 12	13	102	-	-	115	18	129	-	-	147	28	165	-	-	193	19	127	-	-	146
PB-105	SOLÂNEA - BANANEIRAS	13 ; 14	6	78	-	-	84	6	79	-	-	85	15	200	-	-	215	17	124	-	-	131
BR-104	CAMPINA GRANDE - LAGOA SECA	15 ; 16	103	266	-	-	369	109	146	5	-	260	109	170	15	1	295	110	171	36	1	318
BR-230	SOLEDADE - JUAZEIRINHO	17 ; 18	56	311	-	-	367	63	336	-	-	399	65	408	-	-	473	67	380	-	-	447
BR-230	PATÓS - SANTA GERTRUDES	19	30	408	-	-	438	32	503	-	-	535	42	403	-	-	445	40	399	-	-	439
BR-230	ENTRONC. PB-325 - APARECIDA	20	26	172	-	-	198	36	214	-	-	250	47	266	-	-	313	48	353	-	-	401

TABELA 5.1 - NÚMEROS DE VEÍCULOS COMERCIAIS NOS TRECHOS DE RODOVIAS.

1 9 7 3	VDM ANUAL	VOLUME DE TRÁFEGO DIÁRIO INICIAL						TEMPO DE SERVIÇO (ANOS)
		TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL ESTIMADO (%)						
TRECHO		2,0	5,0	8,0	10	15	20	
STA. RITA-MAMAGUAPE	506	347,3	200	117 *	82,7	36	-	19
SAPÉ-ENT. BR-230	279	211	141 *	95	73,5	-	-	14
SAPÉ-MARI	439	332,7	222	149	116 *	62	-	14
AREIA-ALAGOA GRANDE	147	109 *	70,7	-	-	-	-	15
ARARA-SOLÂNEA	85	78,5*	-	-	-	-	-	4
C. GRANDE - L. SÊCA	260	-	-	-	161	129	104,5*	5
SOLEDADE-JUAZEIRINHO	399	-	-	-	205	150	111 *	7
PATOS-STA. GERTRUDES	535	-	-	-	-	266	215 *	5
ENT. PB-325-APARECIDA	250	-	-	-	155	124,3	100 *	5

TABELA 5.2 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE TRÁFEGO DIÁRIO INICIAL, POR TENTATIVAS, PARA O ANO DE 1973.

(*) VALORES UTILIZADOS PARA O VOLUME INICIAL DE TRÁFEGO.

TIPO DE RODOVIA	NÚMERO DE EIXOS POR VEÍCULOS CO MERCIAL (a)	NÚMERO DE EIXOS PADRÃO POR EIXO COMERCIAL (b)	NÚMERO DE EIXOS PADRÃO POR VEÍ- CULOS COMERCIAL (a) x (b)
AUTOPISTAS E TRONCOS DE RODOVIAS PARA MAIS DE 1000 VEÍCULOS COMER CIAL P/DIA, EM CADA DIREÇÃO, PA RA O TEMPO DE CONSTRUÇÃO.	2,7	0,4	1,08
RODOVIAS PLANEJADAS PARA ABSORVER ENTRE 250 E 1000 VEÍCULOS, EM CA DA DIREÇÃO, PARA O TEMPO DE CONS TRUÇÃO.	2,4	0,3	0,72
OUTRAS RODOVIAS PÚBLICAS	2,25	0,2	0,45

TABELA 5.3 - FATORES DE CONVERSÃO USADOS PARA OBTER O Nº EQUIVALENTE DE EIXOS PADRÃO
ATRAVÉS DO Nº DE VEÍCULOS COMERCIAIS (54).

T R E C H O	MÉTOD O ENGº MURILLO LOPES Σ N		MÉTOD O INGLÊS Σ N		TAXA CRESCI- MENTO (%)
	20 ANOS	TEMPO SERVIÇO	20 ANOS	TEMPO SERVIÇO	
STA. RITA-MAMAGUAPE	$1,6 \times 10^7$	$1,4 \times 10^7$	$9,13 \times 10^5$	$8,3 \times 10^5$	8
SAPÉ-ENT. BR-230	$2,4 \times 10^7$	$1,6 \times 10^7$	$7,8 \times 10^5$	$4,6 \times 10^5$	5
SAPÉ-MARI	$1,3 \times 10^7$	$8,9 \times 10^6$	$1,14 \times 10^6$	$5,6 \times 10^5$	10
AREIA-ALAGOA GRANDE	$7,9 \times 10^6$	$5,9 \times 10^6$	$3,9 \times 10^5$	$2,8 \times 10^5$	2
ARARA-SOLÂNEA	$2,6 \times 10^6$	$5,3 \times 10^5$	$3,13 \times 10^5$	$5,3 \times 10^4$	2
C.GRANDE-L. SÊCA	$8,5 \times 10^6$	$2,1 \times 10^6$	$3,5 \times 10^6$	$1,4 \times 10^5$	20
SOLEDADA-JUAZEIRINHO	$9,4 \times 10^6$	$3,3 \times 10^6$	$3,7 \times 10^6$	$2,6 \times 10^5$	20
PATOS-STA.GERTRUDES	$3,6 \times 10^7$	$9,1 \times 10^6$	$7,24 \times 10^6$	$2,9 \times 10^5$	20
ENT.PB-325-APARECIDA	1×10^7	$2,5 \times 10^6$	$3,37 \times 10^6$	$1,3 \times 10^5$	20

TAB. 5.4 - VALORES DE NÚMEROS EQUIVALENTES DE OPERAÇÕES DE EIXO PADRÃO PARA VIDA DO PROJETO (20 ANOS) E TEMPO DE SERVIÇO DA RODOVIA, PELOS MÉTODOS DO ENGº MURILLO LOPES E INGLÊS.

CAPÍTULO 6

MÉTODOS DE ENSAIO

Introdução

Em um programa de investigação de rodovias, o conhecimento das propriedades de engenharia dos solos é fundamental para que se possa avaliar com clareza as reais condições em que se encontra uma determinada obra.

Na presente pesquisa foram elaborados e executados ensaios geotécnicos nos subleitos das rodovias, já citadas no Capítulo 4. Em cada seção, foram abertos poços até o nível da camada de fundação do pavimento, onde realizou-se ensaios "in situ" e, posteriormente, coletou-se amostras representativas para os ensaios de laboratório. O Fluxograma da Figura 6.1 mostra, esquematicamente, os ensaios executados durante esta pesquisa.

Ensaio de Campo

Inicialmente efetuou-se a abertura dos poços, em três posições da seção do pavimento, conforme Figura 4.4, até atingir-se o nível do subleito, onde foram realizados os ensaios referidos a seguir.

Densidade de Campo: Utilizou-se o processo do Frasco de Areia, para a determinação da densidade "in situ" dos solos de subleitos. O procedimento de ensaio foi de acordo com o método D.N.E.R.-ME 50-64 (48).

CBR de Campo: Este ensaio é semelhante ao de

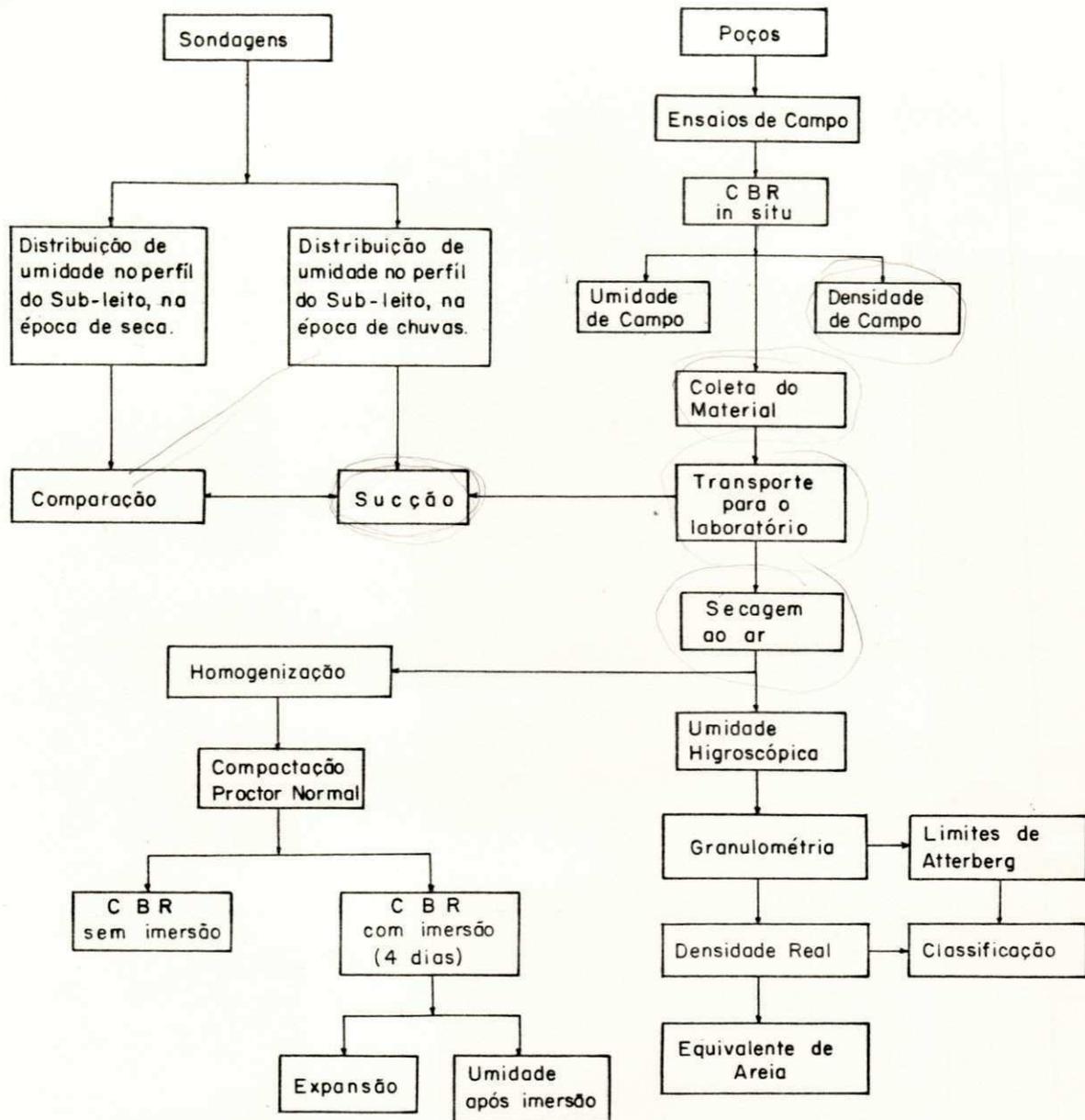


Figura 6.1 - Fluxograma mostrando os Ensaaios de Campo e
Laboratório

CBR no laboratório, com a diferença de que o solo não se encontra confinado. Um equipamento similar ao usado para a determinação do CBR "in situ" é mostrado na Figura 6.2. Este consiste de um macaco mecânico adaptado à parte trazeira de um caminhão, o qual é utilizado para aplicar carga ao pistão através de um anel de deformação. Uma estrutura feita com canos fornece uma referência, independentemente, para medir a penetração por meio de extensômetros adaptados a essa estrutura, que por sua vez se apoia em pontos do terreno, livre do efeito de deformação, do solo, sob a ação do pistão.

O ensaio em questão, não é normalizado pelos Orgãos Rodoviários Brasileiros, sua execução é feita normalmente sob recomendações de especificações, tais como o B.S. (10).

Ensaio de Laboratório

As amostras de solos coletados, foram enviadas para os Laboratórios do D.E.R.-João Pessoa, a fim de serem submetidas a uma série de ensaios, que são discriminados a seguir.

Granulometria: Foram feitos dois ensaios de análise de distribuição granulométrica dos solos para cada seção do pavimento. Este ensaio foi de acordo com o método D.N.E.R. ME 80-64 (48).

Limites de Atterberg: A determinação dos limites de liquidez e plasticidade foi executada com o material passando na peneira nº 40 (0,42 mm). Foram realizados dois ensaios para cada amostra, os resultados são a média aritmética dos valores encontrados. Os ensaios de LL e LP obedeceram os métodos D.N.E.R.-ME 44-64 e ME 82-63 (48), respectivamente.

Densidade Real: Para a determinação da Densidade Real, procedeu-se de acordo com as recomendações do ensaio D.N.E.R.-ME 93-64 (48). Foram feitas duas determinações, usando-se, então, a média aritmética como o valor mais representativo.

Compactação: A relação entre o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente seca foi determinada seguindo-se o método D.N.E.R.-ME 47-64 (48). Neste ensaio a

Figura 6.2 - Equipamento para o ensaio de CBR "in situ"

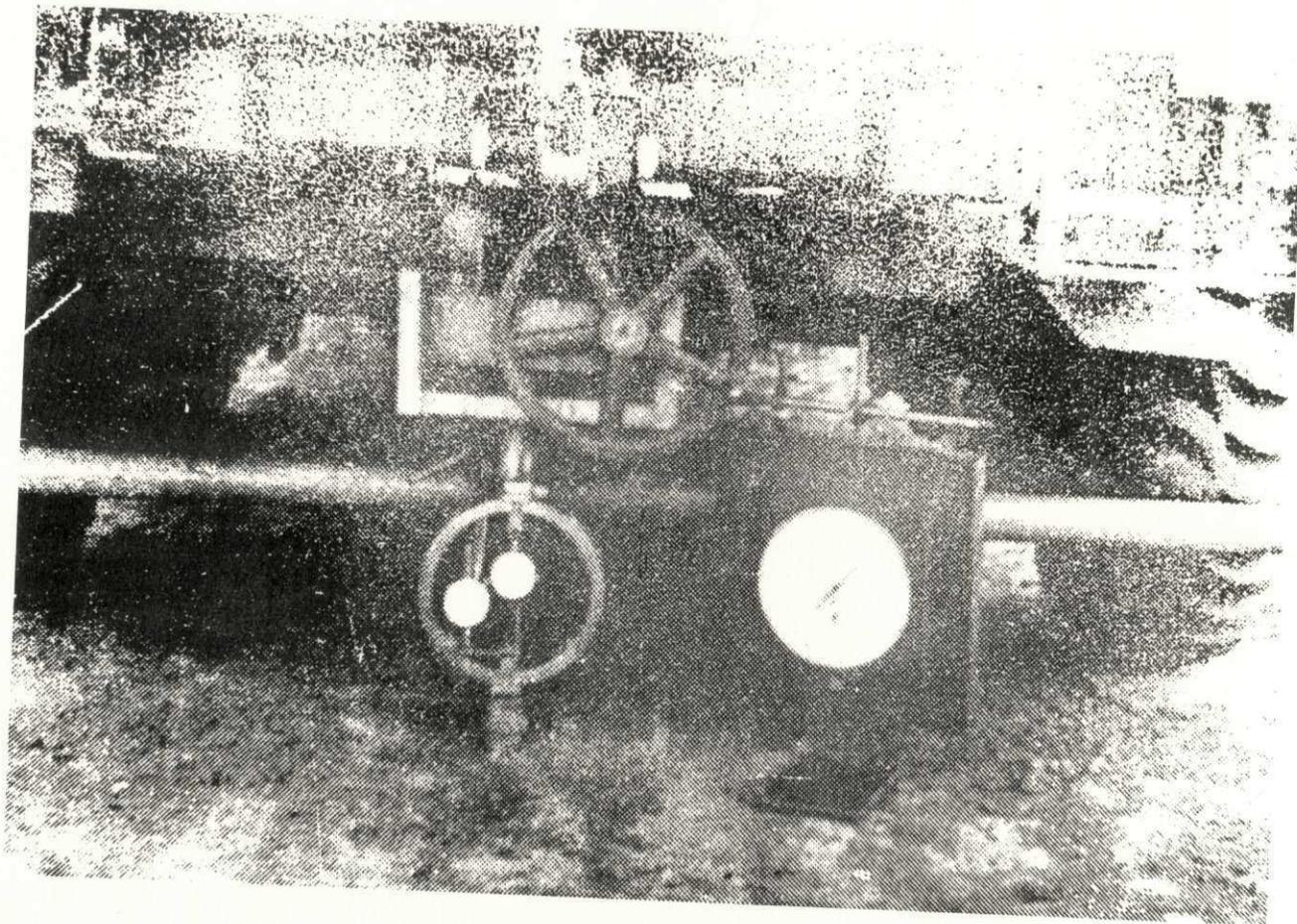


FIGURA 6.2

compactação é feita com a fração de solo que passa na peneira nº 4 (4,8 mm), e energia correspondente ao AASHO normal (5,6kg cm/cm³).

CBR: Os ensaios obedeceram ao método D.N.E.R.-ME 49-64 (48). Os valores de CBR foram obtidos de duas maneiras: (a) os provetes moldados a diferentes umidades foram submetidos ao teste, após um período de imersão de 96 horas (4 dias) e; (b) sem o período de imersão, o teste foi realizado apenas para o solo com diferentes teores de umidade.

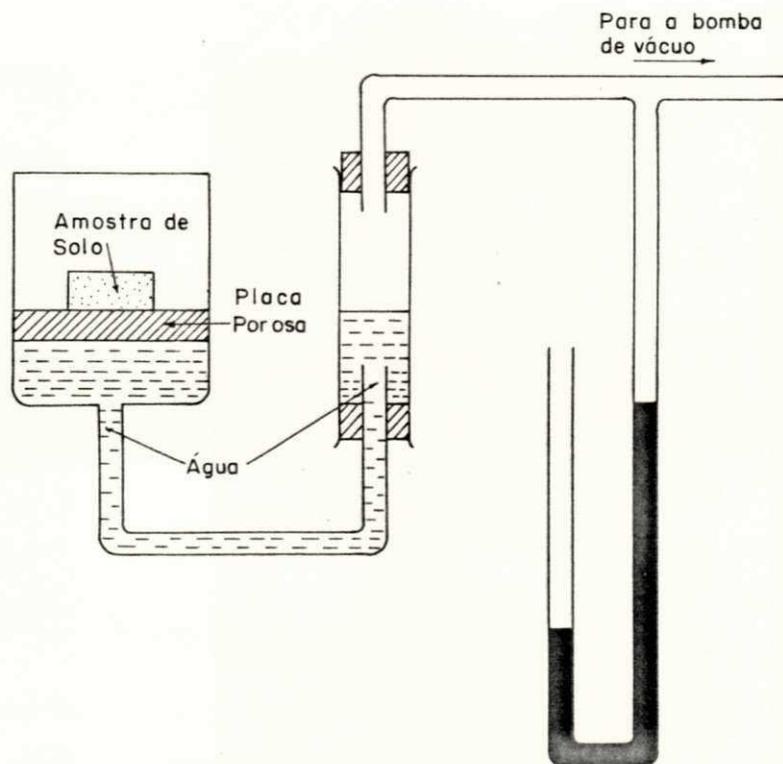
Durante o ensaio de CBR com imersão, foram feitas medidas da expansão do material em intervalos de 24 horas.

Em ambos ensaios foi usada a energia correspondente ao Proctor normal do método D.N.E.R.-ME 47-64.

Equivalente de Areia: Este ensaio foi realizado com o material passando na peneira de 4,8 mm. O procedimento obedeceu ao método D.N.E.R.-ME 54-63 (48).

Sucção: Os ensaios de sucção foram realizados no Laboratório da SUDENE, através do método Placa de Sucção. A placa possui poros cujos tamanhos são menores que 1 micron (10⁻⁴ cm), não permitindo a passagem do ar quando está sendo usada para sucções menores que 0,84 Kg/cm². A amostra de solo é compactada na densidade e umidade que deverá ter no campo e, em seguida, colocada sobre a placa de sucção, onde ocorre uma transferência de umidade até que a placa e amostra estejam em equilíbrio de sucção e vapores. A sucção na placa e consequentemente a pressão do vapor no conjunto fechado, podem ser controlados, usando uma bomba de vácuo e o seu manômetro. A Figura 6.3 mostra, esquematicamente, o princípio do método de Placa de Sucção.

Figura 6.3 - Princípio do método de placa de sucção



CAPÍTULO 7

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Introdução

Os resultados do estudo são apresentados em três grupos: O primeiro consiste dos ensaios "in situ", isto é, Peso Específico Aparente de Campo e CBR de Campo. O segundo grupo corresponde aos ensaios de Laboratório executados com as amostras coletadas dos mesmos locais onde se efetuaram os ensaios de campo. O terceiro grupo corresponde ao estudo especial de sucção e de distribuição de umidade numa profundidade de 1,5 m do material dos subleitos, sendo que, os valores obtidos correspondem as épocas de secas e de chuvas.

Ensaio de Campo

Densidade de campo: Os valores quantitativos dos ensaios, realizados no subleito a profundidade de 20 e 40 cm (abaixo do nível do subleito), são mostrados na Tabela 7.1. Pode-se observar que, para a quase totalidade das seções, os valores obtidos para a densidade variam numa faixa de 1.700 a 2.000 Kg/cm³. Estes resultados, provavelmente, deverão estar atendendo as reais condições de densificação para os solos dos subleitos.

CBR de campo: A Tabela 7.2, mostra os resultados do ensaio de CBR de campo, ao nível do subleito e a 60 cm abaixo deste, para as três posições indicadas na Figura 4.4. São apresentados também os valores médios de umidade de campo.

Ensaaios de Laboratório

Granulometria: O ensaio de peneiramento foi realizado com as amostras de solos, sêcas ao ar. Os valores quantitativos são apresentados na Tabela 7.3.

Limites de Atterberg: A Tabela 7.4, mostra os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade dos Solos do subleito. Pode-se observar que mais de 50% das seções apresentam solos não plásticos e uma outra parte destas possuem valores altos para o Limite de Liquidez. A Tabela apresenta, também, a classificação unificada de Casagrande e HRB, bem como os valores do Índice de grupos dos materiais.

Densidade Real: Os resultados obtidos no ensaio, são apresentados na Tabela 7.5, sendo que os valores encontrados variaram de 2,5 a 2,7, os quais foram considerados normais para os solos dos subleitos das diferentes seções.

Equivalente de Areia: Para a determinação do E.A. dos solos, foram realizados dois ensaios com o material de uma determinada profundidade, para cada seção, tomando-se a média como o valor mais representativo. A Tabela 7.6 apresenta os resultados dos ensaios, verificando-se que os mesmos satisfazem as especificações.

Compactação: Os ensaios de compactação foram efetuados com as amostras de solos a diferentes teores de umidade, utilizando-se a energia do Proctor Normal, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.7. Os valores correspondentes do Pêso Específico Aparente máximo e umidade ótima também são mostrados.

CBR: Foram moldados cerca de 10 corpos de prova para cada seção. Para os cinco primeiros pontos realizou-se o ensaio de CBR sem imersão e obtiveram-se os respectivos valores de umidades. Com os demais corpos de provas efetuou-se o ensaio de CBR após 4 dias de imersão. Os resultados são apresentados na Tabela 7.8.

A Tabela 7.9, mostra os resultados de umidades

obtidas após imersão das amostras, bem como os valores de expansão.

Estudo Especial de Sucção e Distribuição de Umidade nos Perfis

As amostras representativas dos solos de cada seção, foram submetidas ao ensaio de sucção no laboratório, os valores quantitativos são apresentados no Apêndice A, na Tabela A.1. As correlações entre os valores de umidades e sucção, expressa em centímetros de coluna de água, são mostradas nas Figuras 7.1 de "a" a "q", onde pode-se observar o aumento do valor de sucção com o decréscimo da umidade do solo.

Distribuição de Umidades com a Profundidade, a Partir do Nível de Subleito até 1,5 m Abaixo Deste Nível.

O estudo da umidade dos solos de fundação do pavimento obedeceu a seguinte ordem, dentro do programa elaborado para esta pesquisa. Determinou-se, em primeiro lugar, os valores de umidades para intervalos de 20 cm, a partir da camada de reforço do subleito, nas três posições indicadas na Figura 4.4. Estas medidas foram determinadas em estações climáticas distintas, ou seja, durante o período de sêcas e o de chuvas da região. Os resultados são apresentados nas Tabelas dos Apêndices B e C.

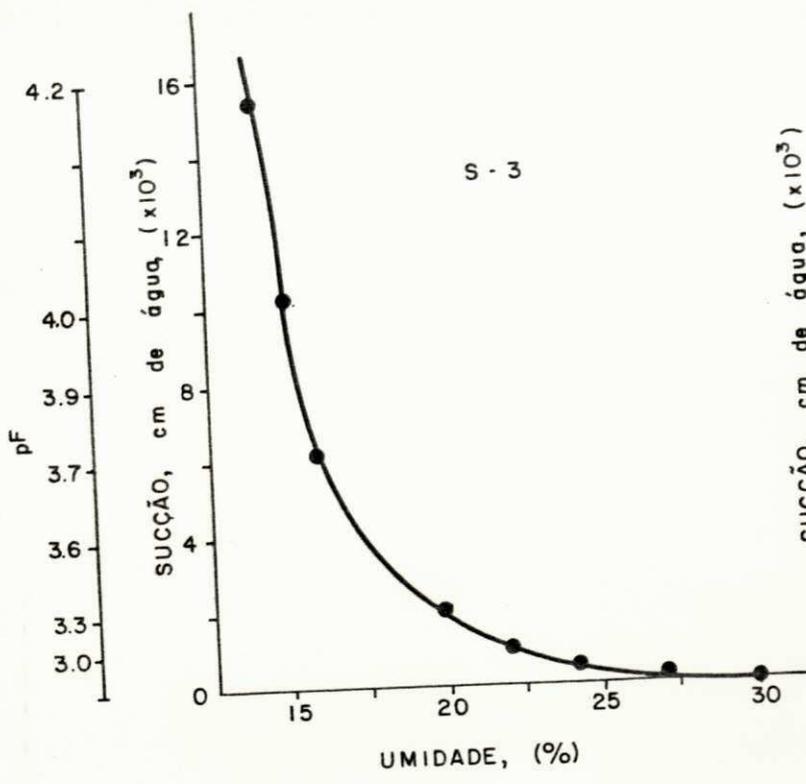
Comparação Entre Umidades Medidas e Umidades Obtidas do Ensaio de Sucção

A correlação entre umidades medidas e umidades calculadas da curva de sucção, são na maioria dos casos um tanto difíceis quando o nível do lençol freático não é conhecido com precisão.

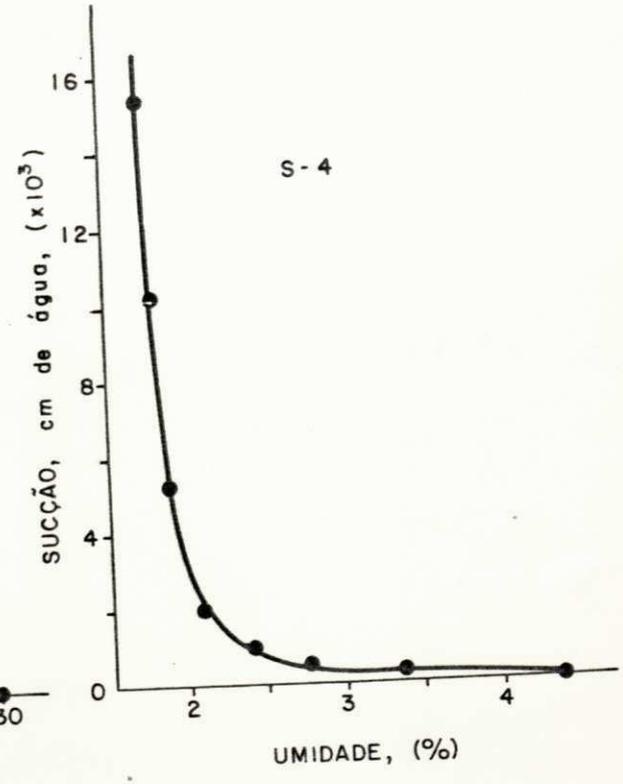
Neste trabalho, tal correlação foi feita partindo da suposição de que o subleito teria como umidade de equilíbrio.

Figuras 7.1a, e 7.1b - Relação entre Umidade-Sucção

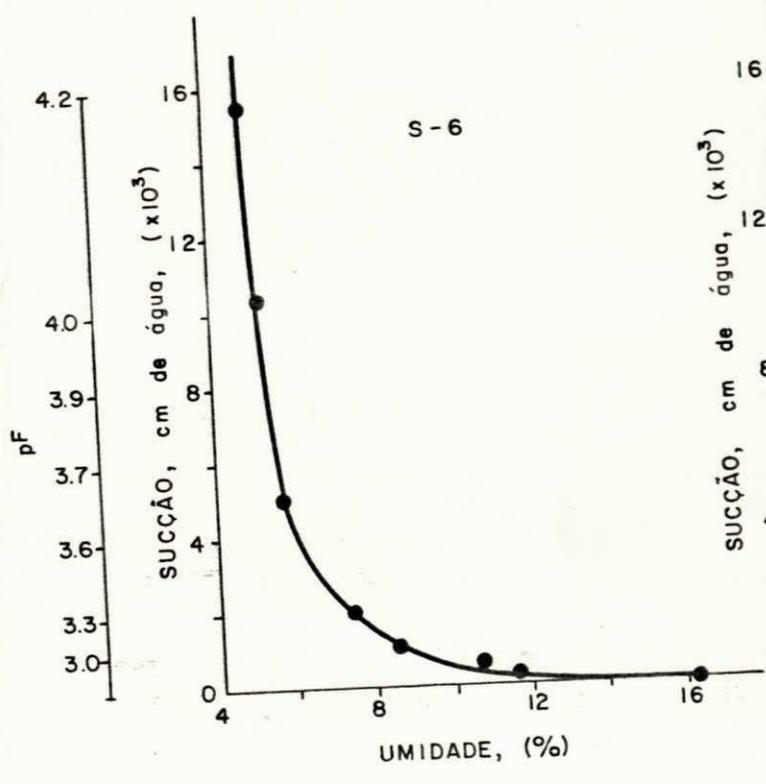
Figuras 7.1c, e 7.1d - Relação entre Umidade-Sucção



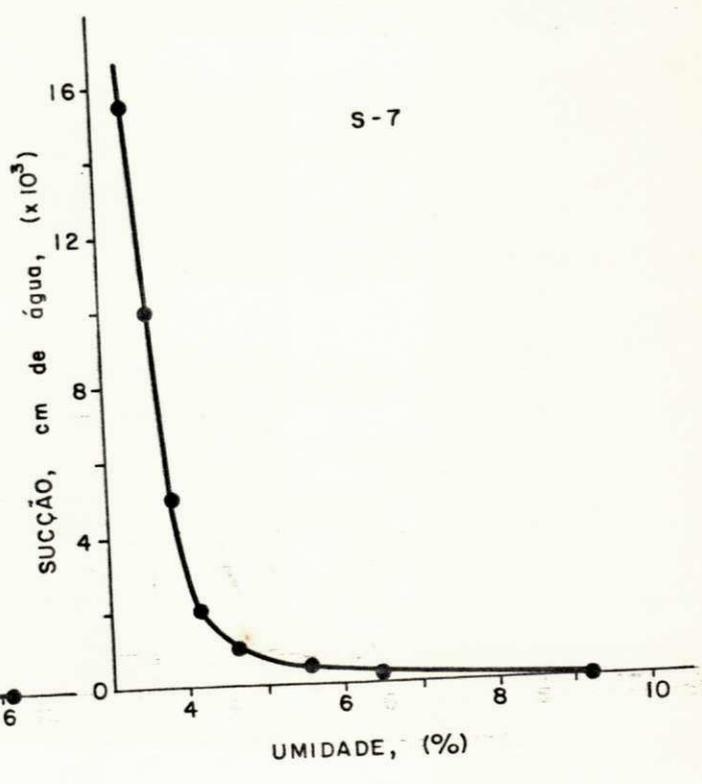
(a)



(b)



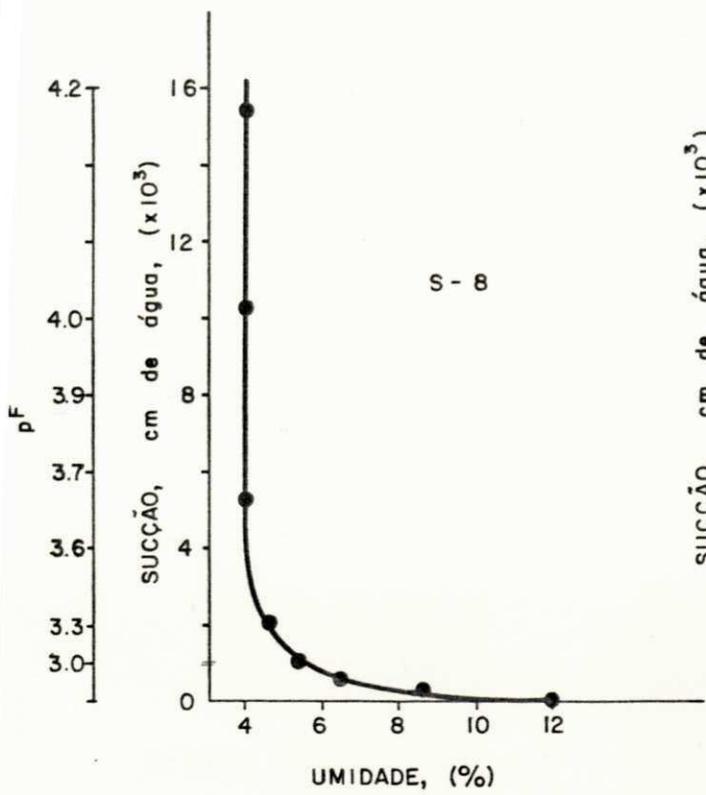
(c)



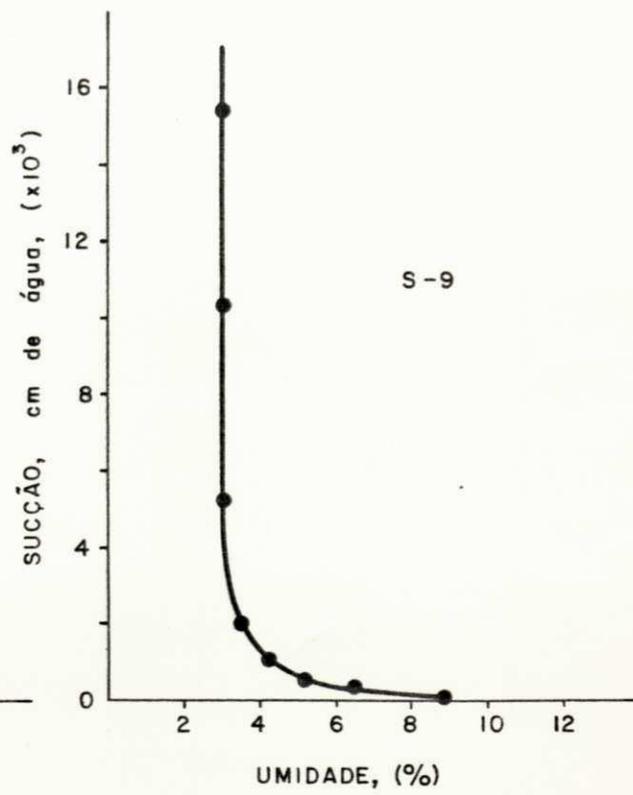
(d)

Figuras 7.1e, e 7.1f - Relação entre Umidade-Sucção

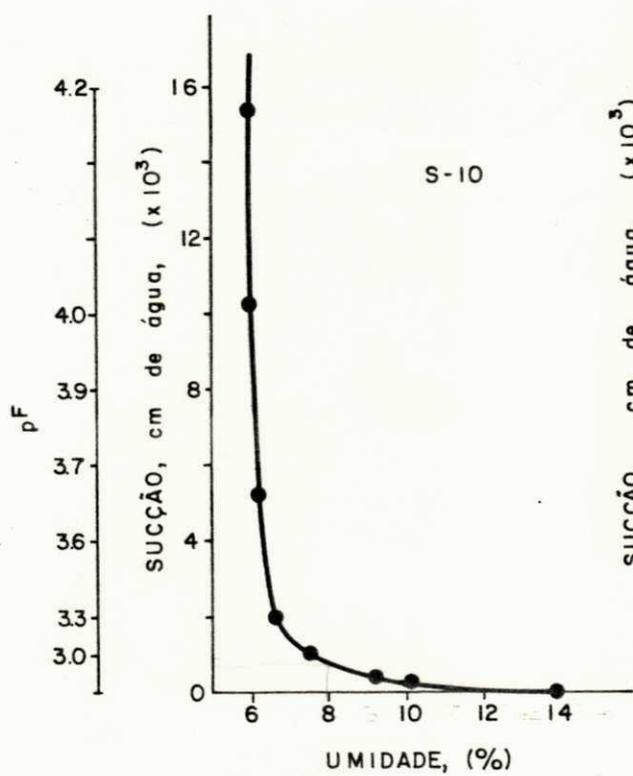
Figuras 7.1g, e 7.1h - Relação entre Umidade-Sucção



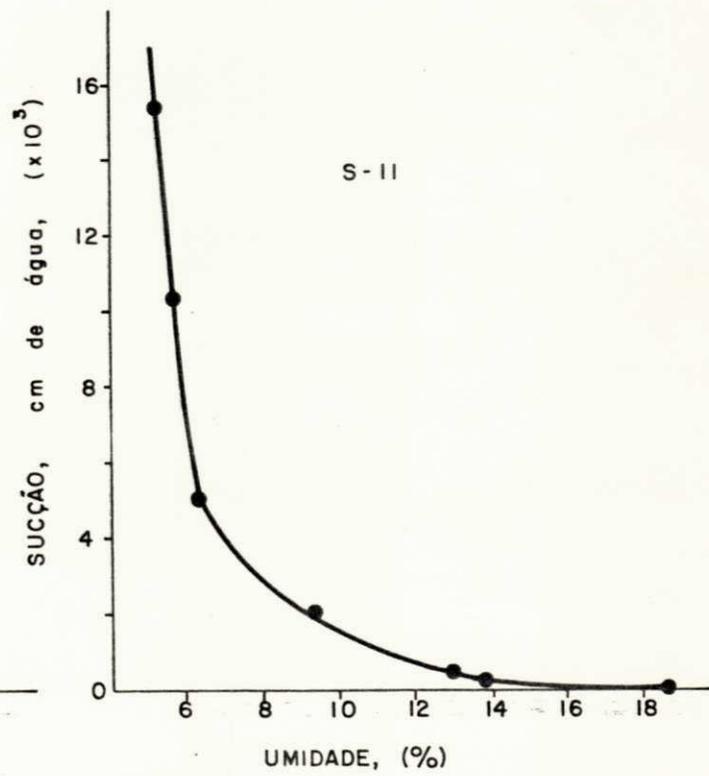
(e)



(f)



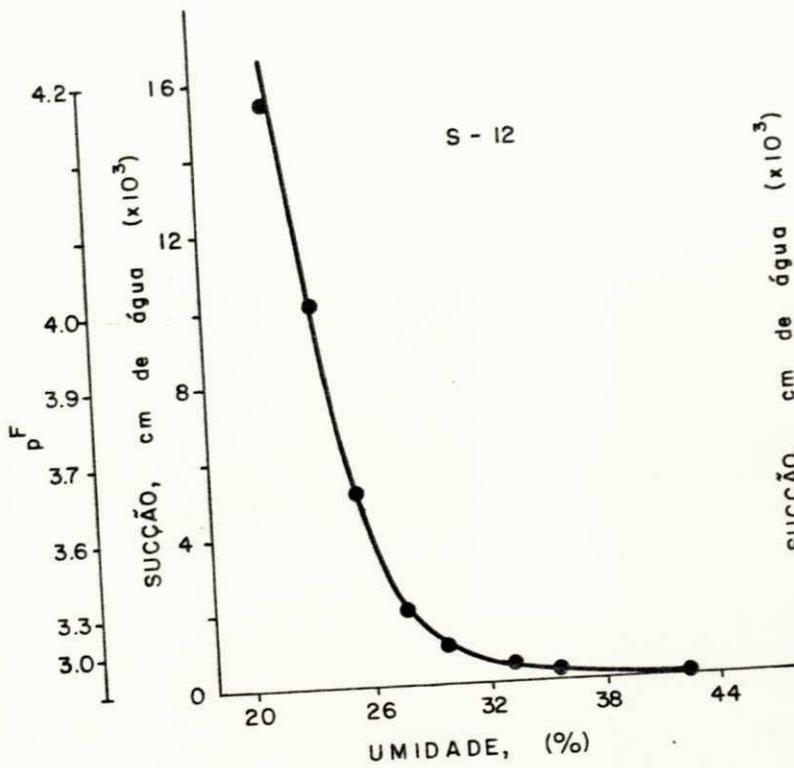
(g)



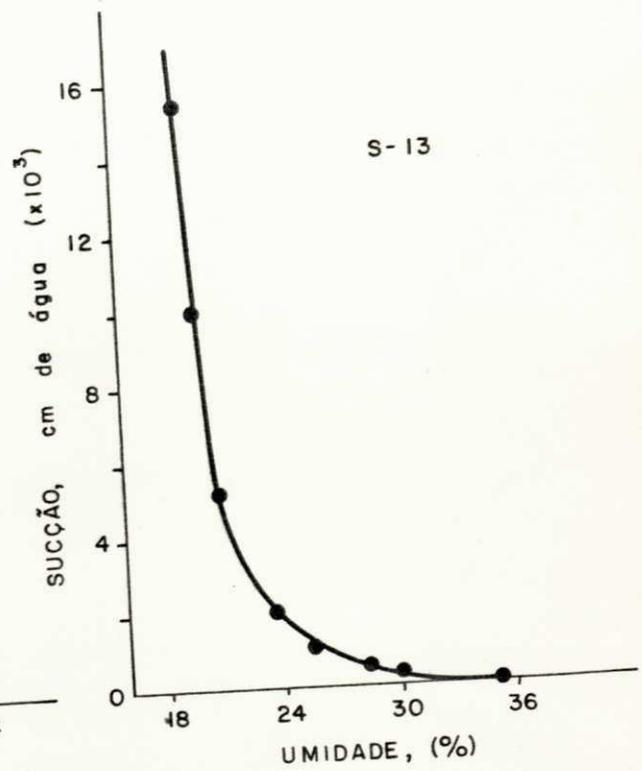
(h)

Figuras 7.1i, e 7.1j - Relação entre Umidade-Sucção

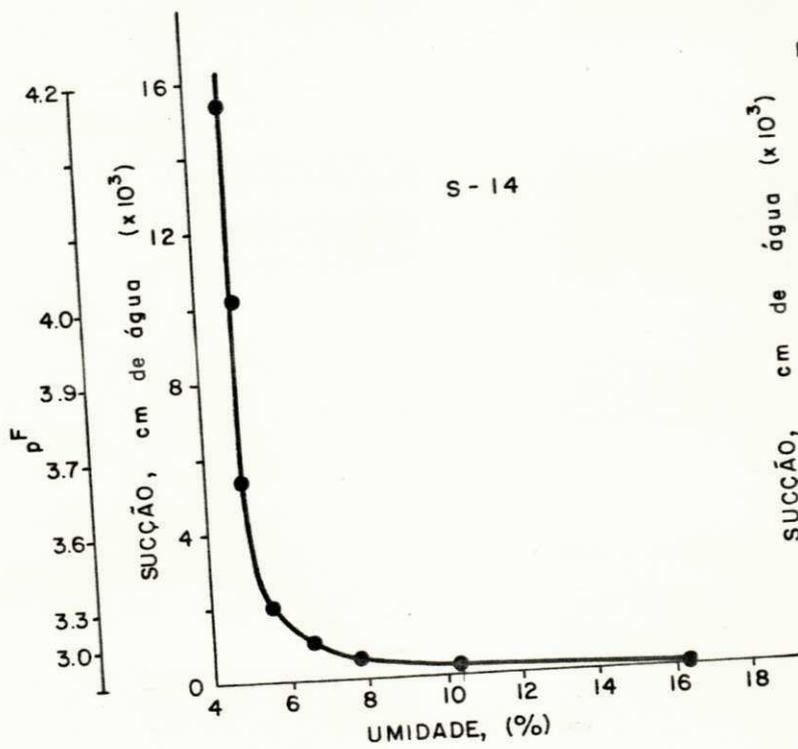
Figuras 7.1k, e 7.1l - Relação entre Umidade-Sucção



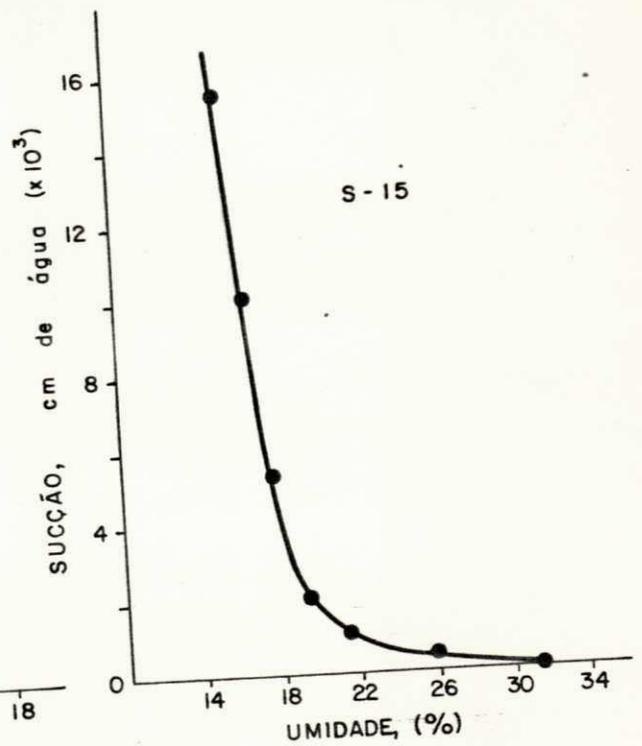
(i)



(j)



(k)



(l)

Figuras 7.1m, e 7.1n - Relação entre Umidade-Sucção

Figuras 7.1o, e 7.1p - Relação entre Umidade-Sucção

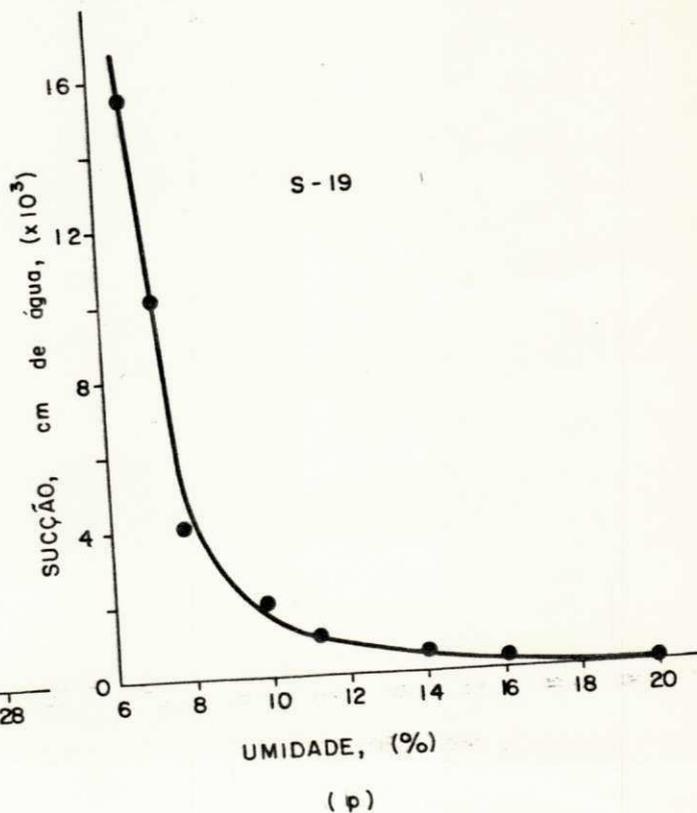
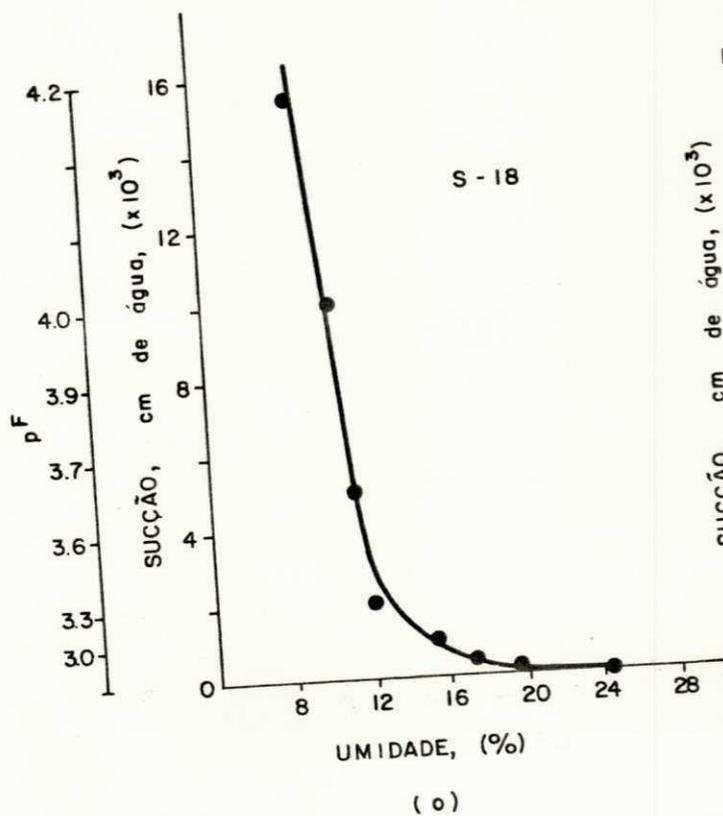
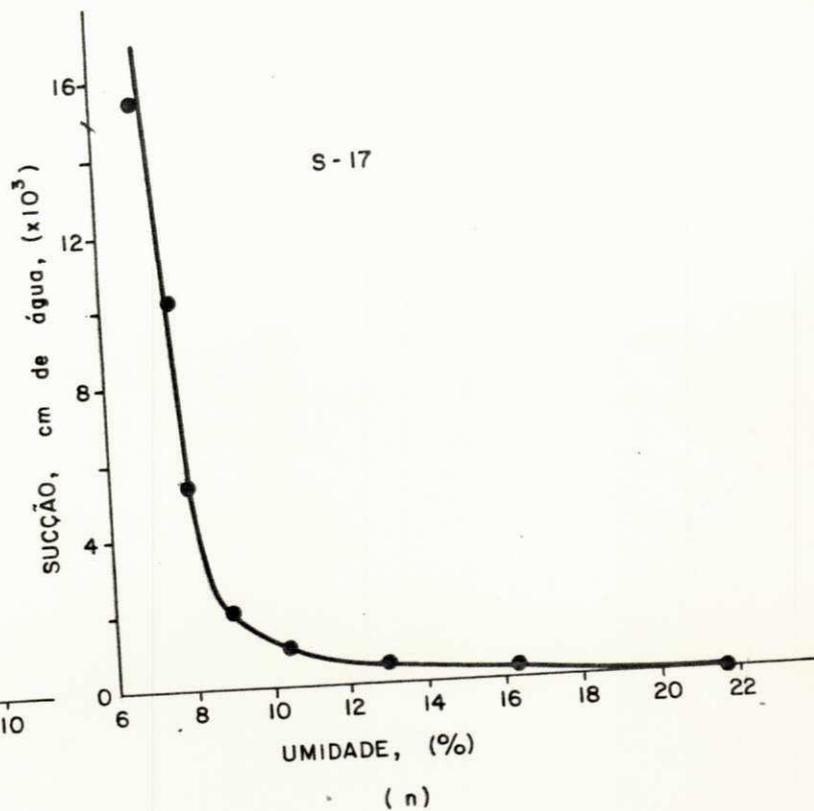
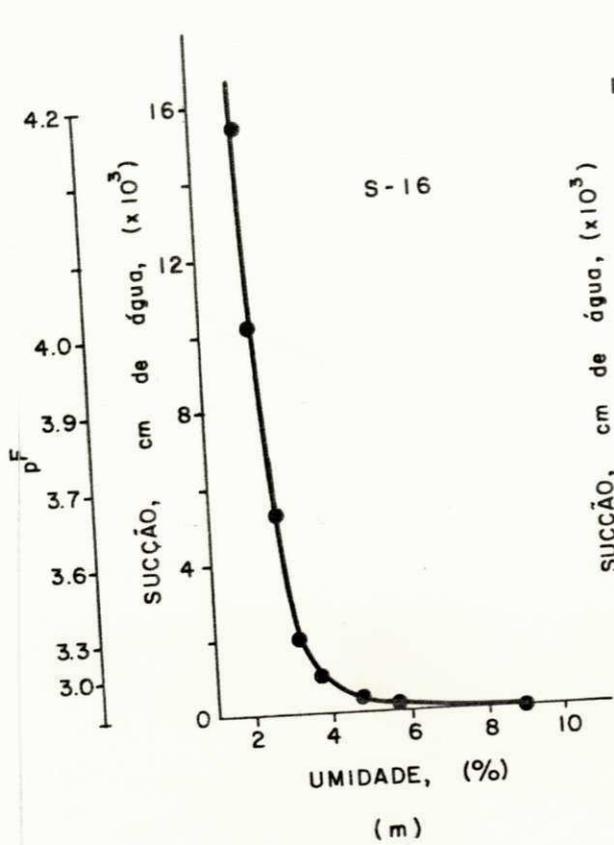
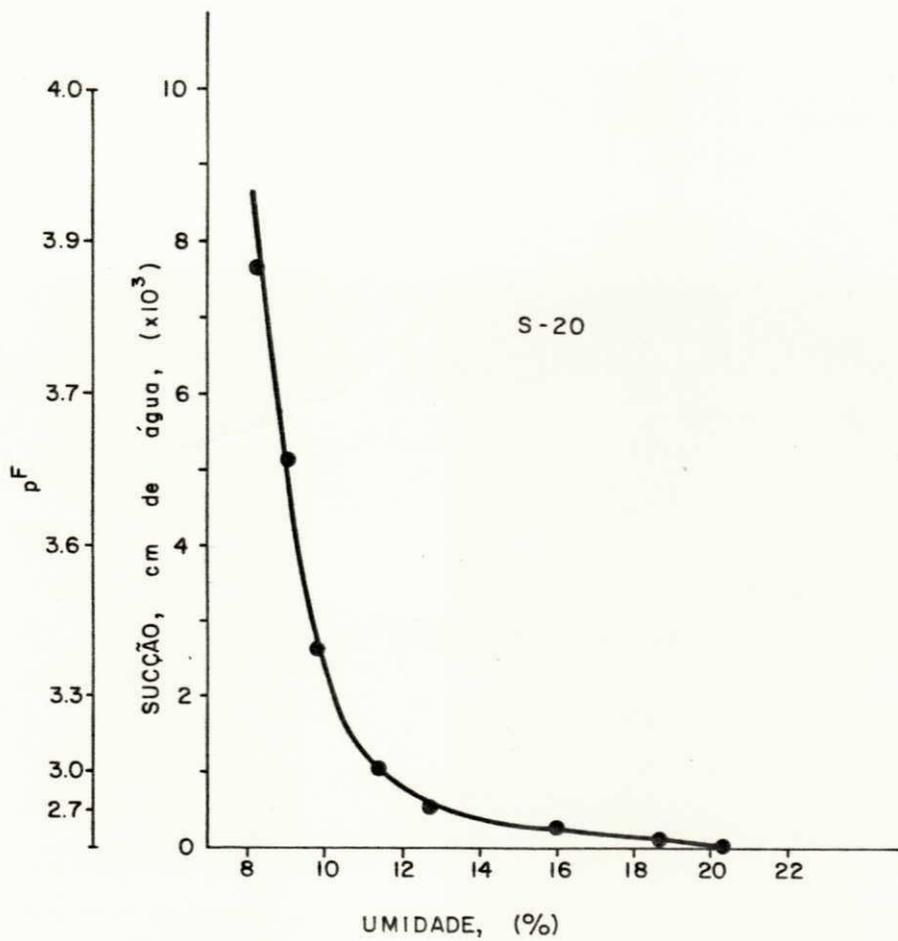


Figura 7.1q - Relação entre Umidade-Sucção

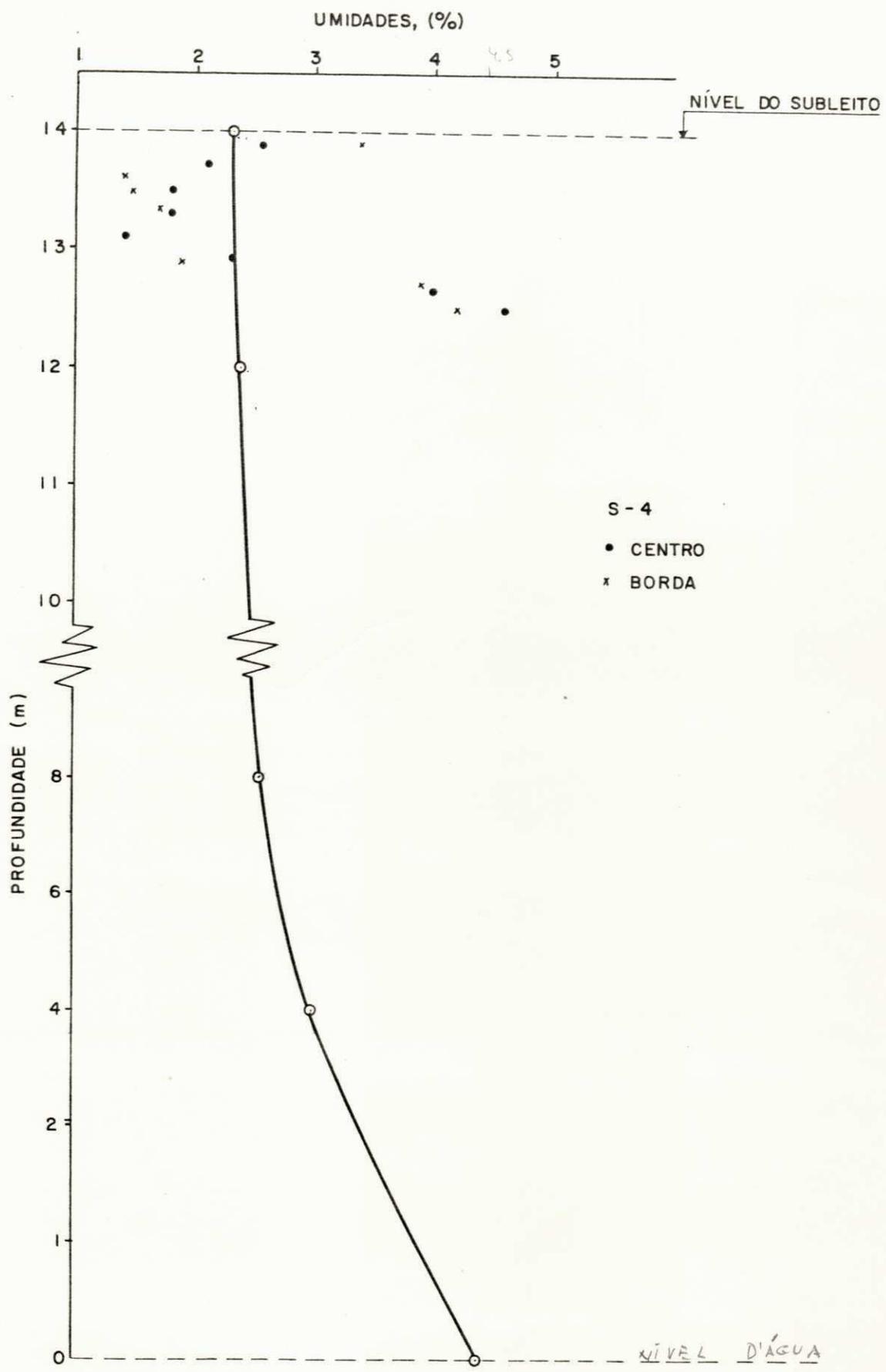


(a)

brio, a correspondente umidade ótima para o máximo peso específico aparente. Desta maneira, a curva de umidade versus profundidade da carga hidrostática, foi fixada com referência a posição do subleito por um ponto correspondente ao valor da umidade ótima. Os valores reais medidos nos ensaios de umidade de campo no perfil, foram então, plotados no mesmo gráfico para efeitos de comparação. Estas umidades correspondem aos valores obtidos no centro e na borda dos pavimentos.

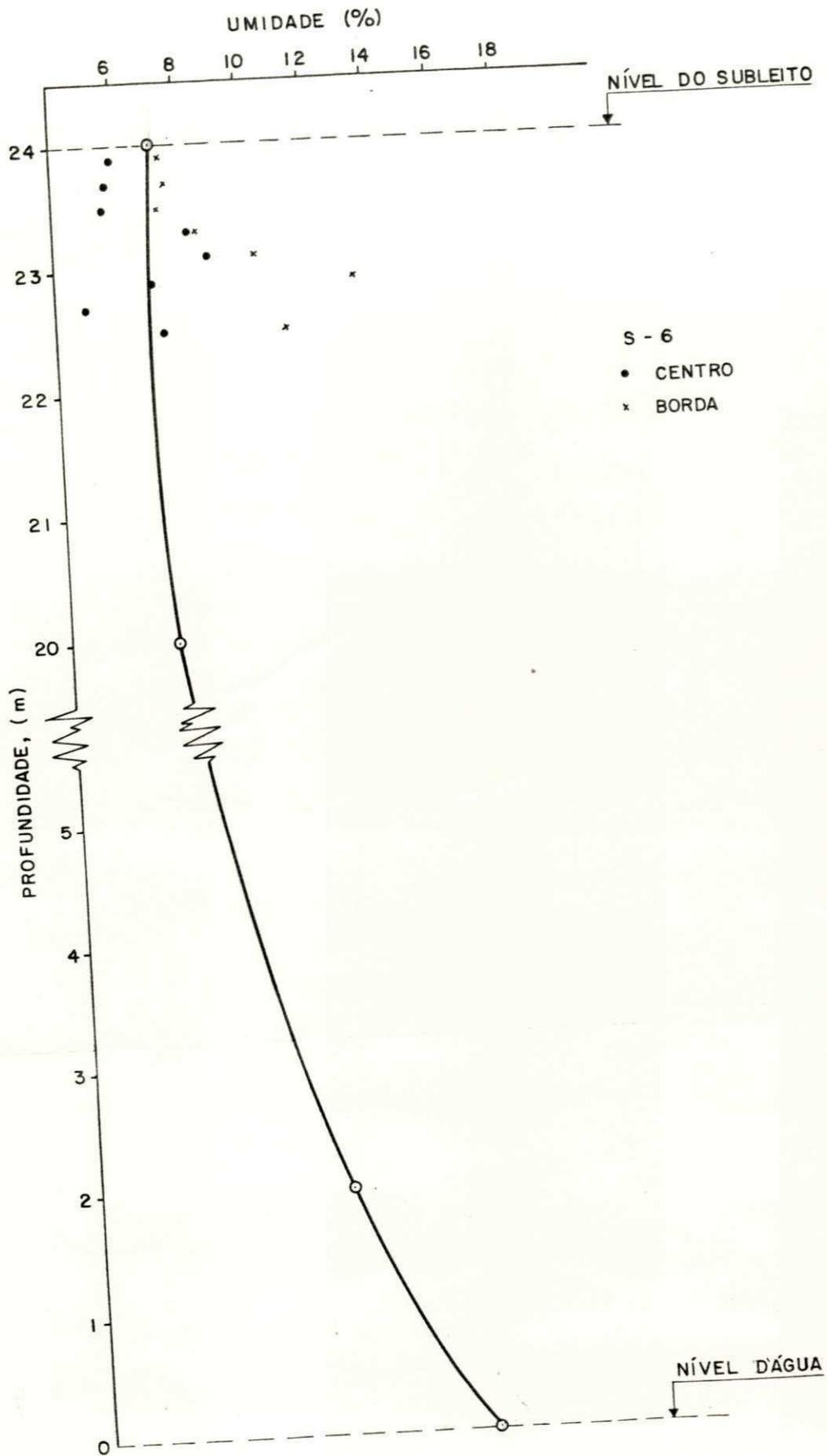
A profundidade do lençol freático com relação ao nível do subleito para o período de secas, é apresentada nos gráficos das Figuras 7.10a, b, c, d, e. As Figuras 7.11a e 7.11b, mostram a mesma situação para o período de chuvas dos subleitos estudados.

Figura 7.10a - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umidade, e distribuição de umidade no período de sêcas



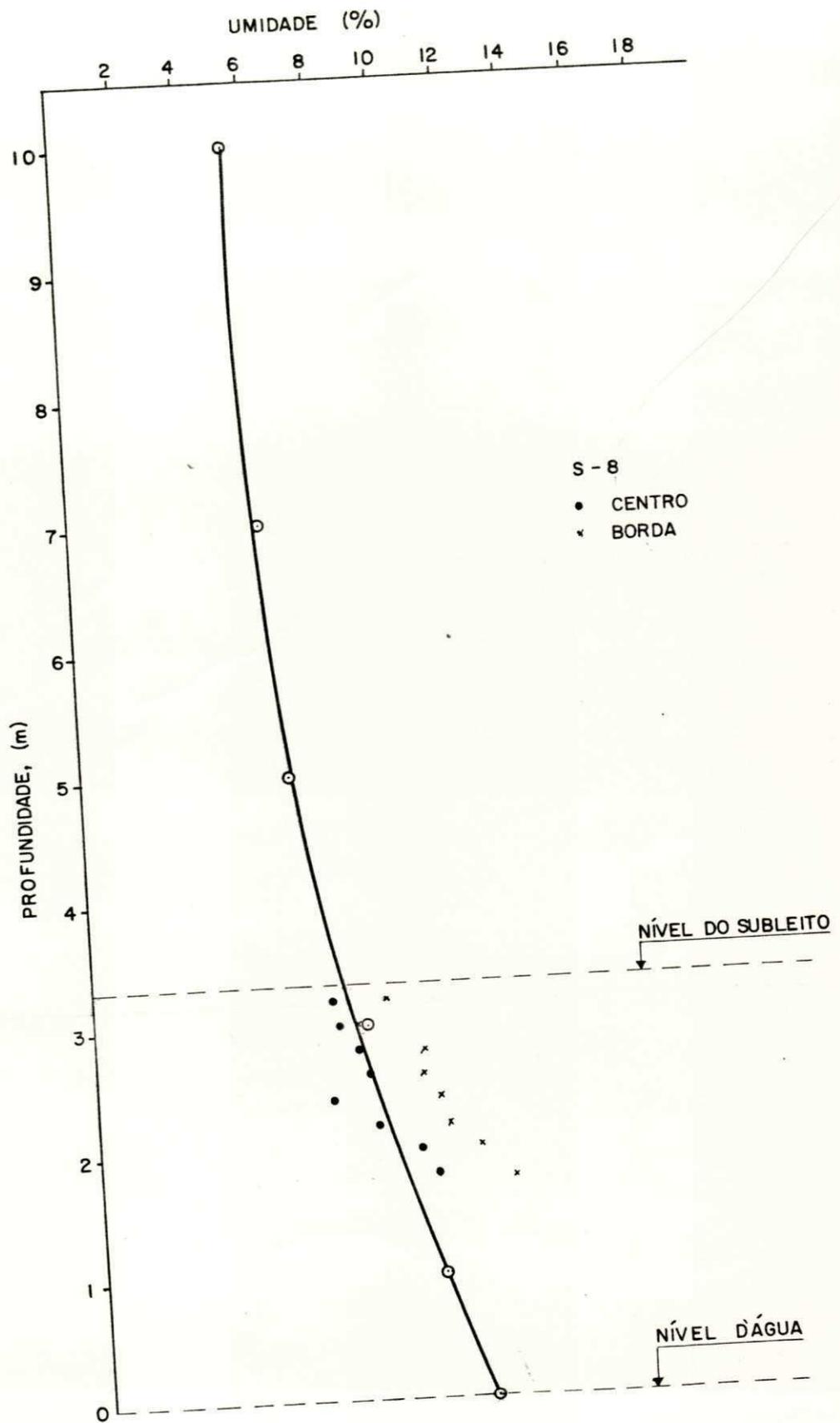
(a)

Figura 7.10b - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umididade, e distribuição de umidade no período de sêcas



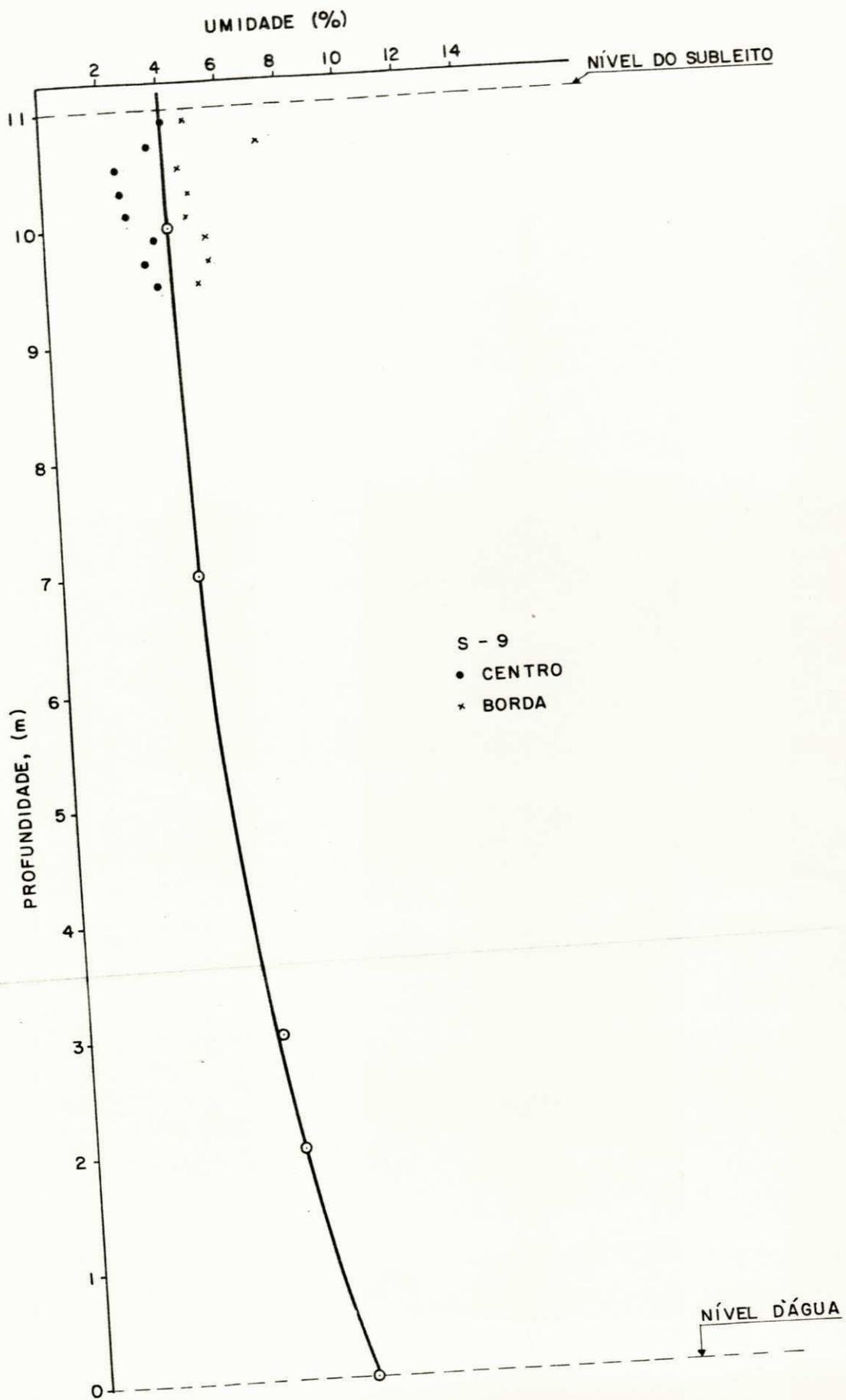
(b)

Figura 7.10c - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umididade, e distribuição de umidade no período de sêcas



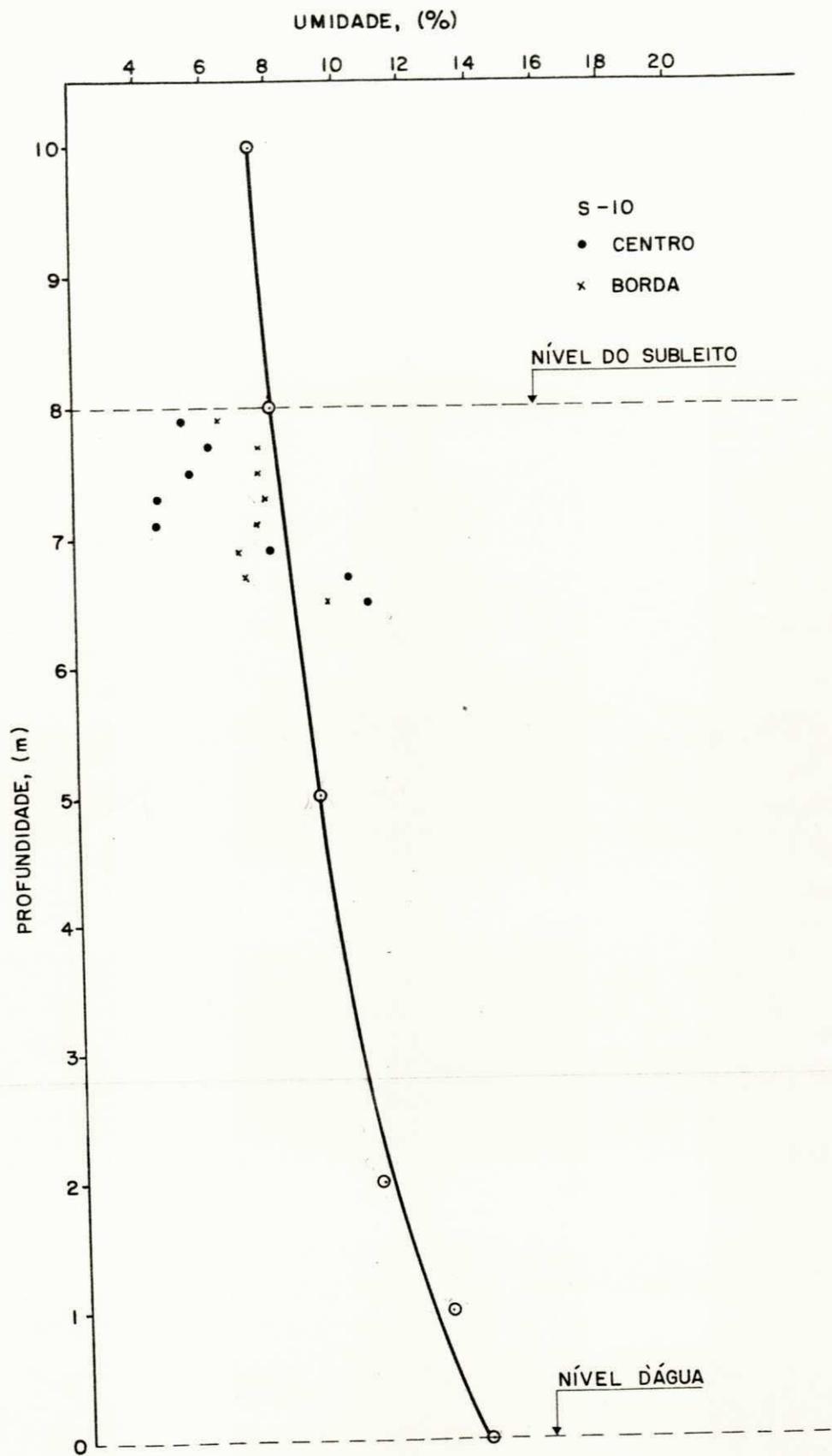
(d)

Figura 7.10d - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umidade, e distribuição de umidade no período de sêcas



(c)

Figura 7.10e - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umidade, e distribuição de umidade no período de sêcas



(e)

Figura 7.11a - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umidade, e distribuição de umidade no período de chuvas

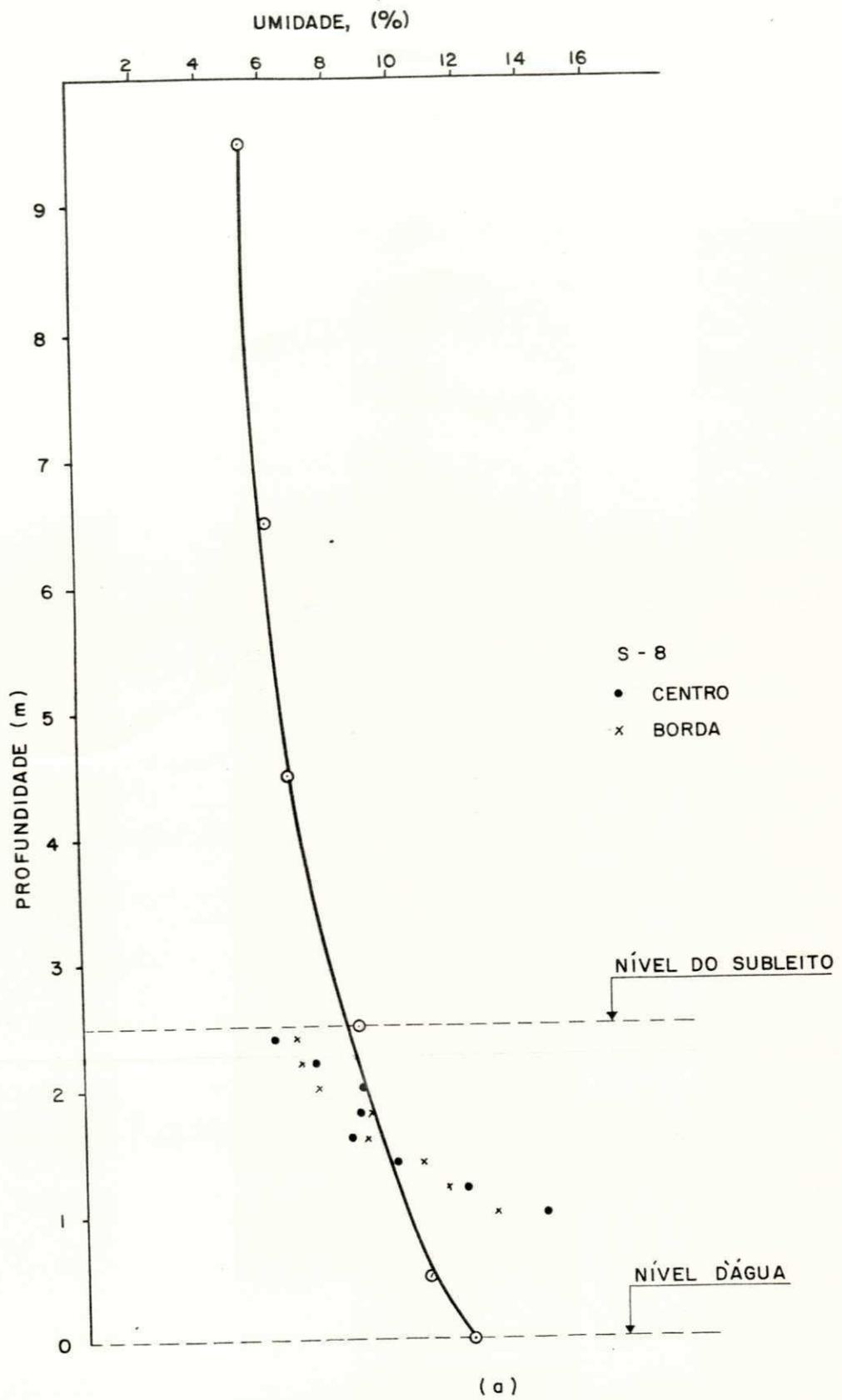
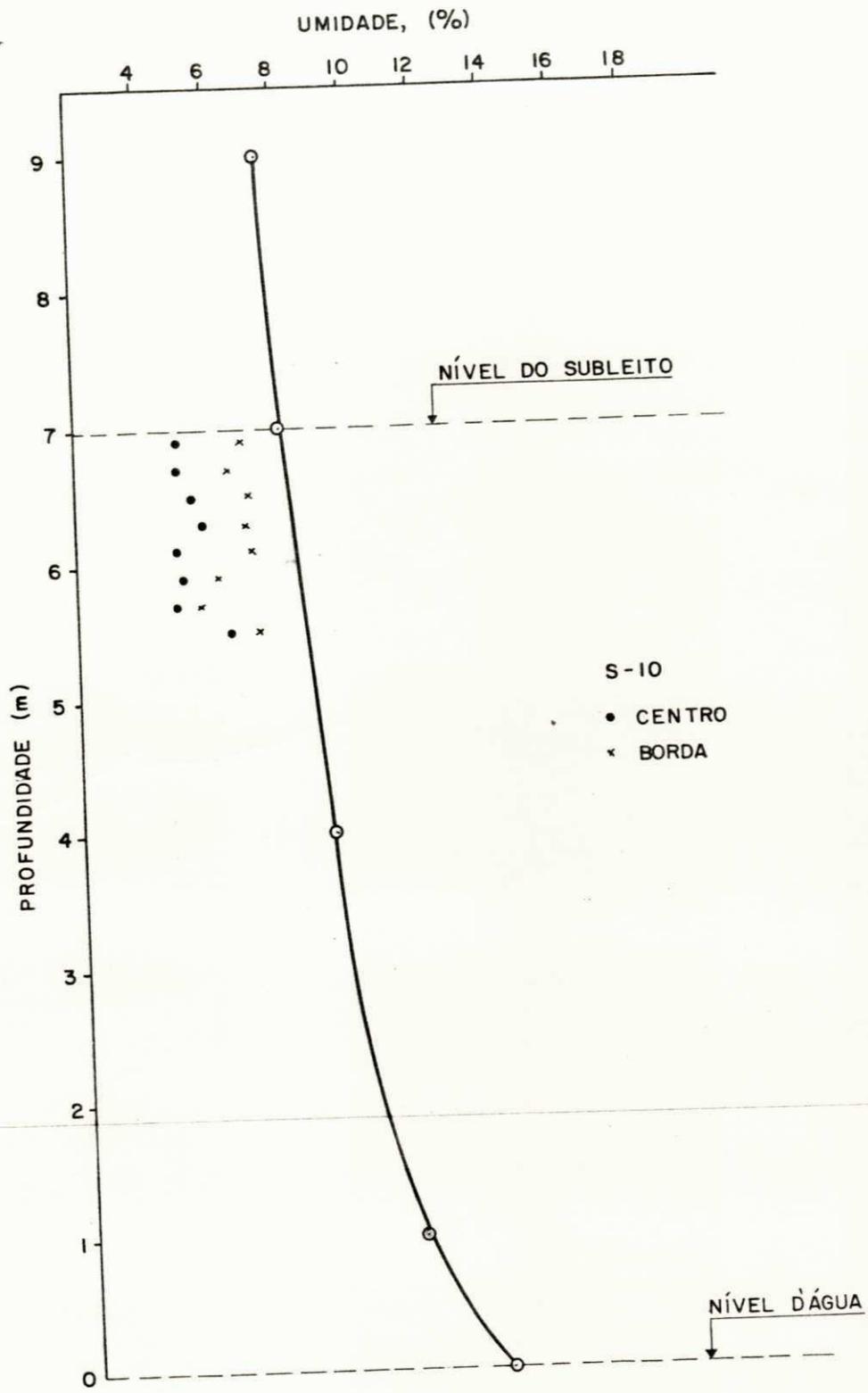


Figura 7.11b - Localização do nível do subleito através da relação Sucção-Umidade, e distribuição de umidade no período de chuvas



(b)

SEÇÃO Nº	POSIÇÃO DO FURO NO PAVIMENTO		PROFUNDIDADE ABAIXO DO NÍVEL DO SUBLEITO (cm)		DENSIDADE DE CAMPO (Kg/m ³)	
3	BORDA	EIXO	20	20	1814	1763
4	1,3 m BORDA	BORDA	40	40	1921	1940
6	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1938	2014
7	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1737	1788
8	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1842	1798
9	BORDA	1,3 m BORDA	20	20	1806	1575
10	BORDA	1,3 m BORDA	20	20	1774	1771
11	1,3 m BORDA	BORDA	16	20	1684	1674
12	BORDA	1,3 m BORDA	20	20	1781	1793
13	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1625	1539
14	BORDA	EIXO	20	20	1587	1617
15	BORDA	1,3 m BORDA	20	20	1843	1590
16	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1508	1483
17	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1906	1859
18	1,3 m BORDA	BORDA	20	20	1887	1839
19	BORDA	EIXO	20	20	1889	1949
20	1,3 m BORDA	EIXO	20	20	1697	1873

TABELA 7.1 - VALORES DE DENSIDADE "IN SITU" OBTIDOS NAS PROFUNDIDADES INDICADAS, A PARTIR DO NÍVEL DOS SUBLEITOS.

SEÇÃO Nº	CBR DE CAMPO (%)						UMIDADE DE CAMPO *		OBSERVAÇÕES	
	NÍVEL DO SUBLEITO			60 cm ABAIXO SUBLEITO			NÍVEL DO	60 cm		
	EIXO	1,m BORDA	BORDA	EIXO	1,m BORDA	BORDA	SUBLEITO	ABAIXO		
3	86	72	91	33	26	26	9,5	10,0	ROCHA-2 ^a CAMADA	
4	101	55	90	-	-	-	2,3	1,3		
6	21	7	7	21	27	13	7,2	7,0		
7	17	9	12	7	6	5	3,0	3,0		
8	5	14	11	1	2	1	8,1	10,0		
9	16	24	26	3	6	2	4,0	3,5		
10	39	28	34	3	3	3	8,6	8,0		
11	8	11	9	-	-	-	5,2	5,7		ROCHA-2 ^a CAMADA
12	24	19	13	9	19	32	7,8	8,0		
13	8	7	19	11	11	12	13,1	19,2		
14	33	22	3	6	4	8	18,0	17,4		
15	81	87	85	47	42	40	11,2	25,5		
16	5	4	6	9	8	6	16,7	16,4		
17	14	18	11	6	9	8	5,5	5,2		
18	28	14	12	12	11	-	10,8	9,0		
19	27	39	36	2	3	3	3,5	8,0		
20	19	13	27	4	4	4	3,5	9,7		

TABELA 7.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CBR E UMIDADE DE CAMPOS NOS SUBLEITOS.

(*) MÉDIA DOS TRÊS VALORES.

SEÇÃO Nº	ABERTURA DAS MALHAS - % PASSANDO					
	1"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200
3	96,8	93,6	91,0	87,1	67,5	43,0
4	-	-	100	99,2	69,1	9,7
6	100	94	87,6	78,6	47,1	26,7
7	-	-	100	96,3	66,3	14,2
8	-	100	99,6	93,5	57,0	19,1
9	100	99,0	97,4	93,0	57,0	18,2
10	-	100	99,6	98,0	71,0	26,1
11	100	97,8	95,0	88,3	52,3	21,0
12	100	99,8	98,5	94,3	67,2	30,6
13	100	99,1	98,2	96,1	78,4	59,7
14	-	100	98,9	96,5	80,4	60,1
15	-	100	99,6	98,2	71,2	30,1
16	100	99,4	98,5	96,6	77,4	55,0
17	100	96,2	87,9	80,1	44,3	17,4
18	-	100	99,2	96,3	64,0	33,3
19	100	96,9	93,0	87,2	67,5	34,3
20	-	100	96,7	79,2	54,3	35,1

TABELA 7.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

SEÇÃO Nº	LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)	ÍNDICE DE GRUPO	CLASSIFICAÇÃO	
				UNIFICADA DE CASAGRANDE	HRB
3	35,9	11,8	2	SC	A-6
4	NP *	NP	0	SM-SP	A-3
6	23,7	9,9	0	SC	A-2-4
7	NP	NP	0	SM	A-2-4
8	NP	NP	0	SM	A-2-4
9	NP	NP	0	SM	A-2-4
10	NP	NP	0	SM	A-2-4
11	NP	NP	0	SM	A-2-4
12	NP	NP	0	SM	A-2-4
13	42,0	16,0	7	CL	A-7-5 ×
14	37,8	13,2	6	CL	A-7-5 >
15	NP	NP	0	SM	A-2-4 -
16	43,5	18,4	7	CL	A-7-5
17	NP	NP	0	SM	A-2-4
18	28,5	9,5	0	SC	A-2-4
19	23,3	7,9	0	SC	A-2-4
20	24,7	5,6	0	SM-SC	A-2-4

TABELA 7.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIMITES DE ATTERBERG. VALORES DO ÍNDICE DE GRUPO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DE SUBLEITOS.

(*) NP - NÃO PLÁSTICO

SEÇÃO Nº	DENSIDADE REAL
3	2,54
4	2,66
6	2,66
7	2,61
8	2,62
9	2,61
10	2,58
11	2,59
12	2,57
13	2,48
14	2,62
15	2,56
16	2,48
17	2,59
18	2,50
19	2,50
20	2,48

TABELA 7.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE
DENSIDADE REAL

SEÇÃO Nº	PROFUNDIDADE (cm)	EQUIVALENTE DE AREIA (%)		VALOR MÉDIO (%)
3	60-120	5,0	5,3	5,2
4	40-100	24,5	23,3	23,9
6	50-110	14,5	15,8	15,2
7	45-105	28,0	27,5	27,8
8	50-110	20,5	20,1	20,3
9	50-110	19,0	20,0	19,5
10	40-100	20,7	21,1	20,9
11	50-70	19,4	16,8	18,1
12	50-110	18,1	19,3	18,7
13	70-130	2,2	3,0	2,6
14	70-130	2,9	3,9	3,2
15	60-120	14,4	15,7	15,5
16	75-135	4,6	3,0	3,8
17	90-140	18,7	19,7	19,2
18	55-105	13,3	14,7	14,0
19	52-102	11,3	11,3	11,3
20	40-100	11,8	11,9	11,8

TABELA 7.6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EQUIVALENTE DE AREIA DE SOLOS COLETADOS NAS PROFUNDIDADES INDICADAS, ABAIXO DO NÍVEL DO SUBLEITO.

SEÇÃO Nº	UMIDADE (%)					PESO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO (Kg/m ³)					UMIDADE ÓTIMA (%)	P.E.A.S. MAX (Kg/m ³)
3	8,6	10,7	13,8	15,5	18,2	1640	1769	1800	1739	1667	12,8	1810
4	2,1	3,4	5,5	7,0	9,2	1713	1800	1834	1808	1737	5,6	1835
6	3,5	5,8	9,3	11,5	13,8	1750	1825	1940	1865	1807	9,3	1940
7	3,5	5,0	6,8	8,7	10,0	1668	1746	1805	1743	1705	6,8	1805
8	5,3	6,7	8,4	10,0	11,4	1783	1898	2003	1953	1907	8,7	2005
9	4,1	6,4	8,5	10,0	12,4	1859	1978	2036	1974	1890	8,5	2036
10	4,8	7,2	9,0	11,0	12,2	1670	1793	1881	1804	1750	9,0	1881
11	4,4	7,7	8,5	10,8	12,8	1723	1793	1880	1828	1784	9,0	1885
12	5,6	8,2	10,0	11,7	13,5	1775	1872	1919	1868	1806	10,2	1920
13	11,0	14,0	16,3	18,6	20,9	1471	1569	1689	1588	1538	16,5	1690
14	13,6	15,7	18,4	21,6	24,0	1567	1636	1695	1627	1565	19,0	1700
15	4,5	6,4	8,7	10,7	12,8	1680	1735	1864	1830	1762	9,1	1870
16	11,3	13,2	15,4	18,0	19,8	1513	1567	1660	1535	1508	15,8	1665
17	3,6	6,4	8,4	9,5	11,9	1700	1827	1899	1858	1771	8,4	1900
18	5,0	5,9	9,2	10,8	12,4	1645	1755	1889	1820	1710	9,3	1890
19	4,3	7,3	10,0	12,9	14,2	1705	1832	1909	1818	1736	10,4	1915
20	7,2	9,6	11,3	12,0	14,1	1694	1761	1844	1870	1758	12,0	1870

TABELA 7.7 - RESULTADOS DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO VALORES DE UMIDADE ÓTIMA E PESO ESPECÍFICO APARENTE SÊCO MÁXIMO DOS SOLOS DO SUBLEITO, ENERGIA DE COMPACTAÇÃO IGUAL A 5,6 Kg.cm/cm³.

SEÇÃO Nº	1			2			3			4			5		
	UMIDADE (%)	CBR _{si} (%)	CBR _{ci} (%)												
3	8,5	7	3	10,6	24	12	13,2	34	22	15,7	6	5	18,7	4	3
4	2,0	18	10	4,0	21	16	5,9	26	20	7,6	23	17	9,0	21	13
6	3,4	9	4	6,5	27	10	9,4	32	22	11,8	8	4	13,6	5	3
7	3,8	9	5	5,2	11	6	7,2	25	19	8,8	18	14	9,9	11	9
8	5,1	23	9	6,6	42	23	8,6	43	38	10,3	7	6	11,3	3	2
9	4,8	37	8	6,7	50	25	8,5	59	37	10,9	5	4	12,6	3	2
10	5,2	16	4	7,4	22	10	9,1	23	21	10,9	6	3	12,5	2	2
11	4,3	20	7	6,6	23	12	9,1	28	17	11,4	25	8	13,2	11	5
12	5,6	18	7	8,1	24	18	9,9	27	19	11,6	10	4	13,8	5	2
13	10,7	16	3	14,3	25	6	16,1	33	12	18,7	7	3	20,7	4	2
14	13,6	9	3	15,6	12	7	18,5	26	11	21,6	5	3	24,0	3	2
15	4,5	13	5	6,7	27	13	8,9	34	15	10,7	10	7	12,7	3	2
16	11,5	16	4	13,5	23	8	15,7	24	10	18,4	9	5	19,6	7	3
17	3,1	19	7	6,7	25	9	8,5	29	15	9,7	17	16	12,0	7	3
18	7,2	14	3	9,6	22	5	11,3	29	9	12,8	9	4	14,2	8	3
19	4,3	17	3	7,3	23	7	10,2	40	27	12,6	15	6	14,3	7	2
20	5,3	12	2	6,1	21	4	9,3	32	11	10,8	7	3	12,6	6	2

TABELA 7.8 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CBR SEM IMERSÃO, CBR COM IMERSÃO E UMIDADE DE MOLDAGEM DOS SOLOS DE SUBLEITOS.

SEÇÃO Nº	EXPANSÃO (%)					UMIDADE APÓS IMERSÃO (%)				
	1 *	2 *	3 *	4 *	5 *	1 *	2 *	3 *	4 *	5 *
3	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	19,5	15,4	17,4	17,3	21,1
4	0,1	0	0	0	0	6,4	7,3	8,5	8,7	10,9
6	0,8	0,7	0,7	0,5	0,4	7,2	11,1	13,8	17,9	19,7
7	0,1	0,1	0,1	0,1	0	4,5	13,7	11,9	14,0	15,2
8	0,1	0	0	0	0	15,1	9,4	10,8	11,2	12,0
9	0,1	0,1	0,1	0	0	12,6	10,0	9,5	11,4	13,4
10	0,2	0,2	0,1	0,1	0	19,3	13,8	11,6	16,8	15,3
11	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	16,1	14,5	14,3	14,6	15,7
12	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1	12,3	12,7	13,9	12,7	14,0
13	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	24,8	25,4	20,5	21,9	24,0
14	0,8	0,3	0,1	0,1	0	22,1	18,3	20,4	23,3	25,8
15	0,3	0,2	0,1	0,1	0	21,5	15,6	15,5	14,1	18,2
16	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	24,9	22,5	18,8	22,8	23,2
17	0,4	0,3	0,2	0,1	0	15,4	14,0	13,0	12,8	13,6
18	0,8	0,4	0,5	0,4	0,3	18,3	18,6	17,7	18,5	17,9
19	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1	17,7	15,1	16,5	14,7	18,0
20	0,7	0,6	0,4	0,4	0,2	16,5	13,5	13,2	13,3	18,4

TABELA 7.9 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO E UMIDADES APÓS IMERSÃO DOS SOLOS DE SUBLEITOS.

(*) NÚMEROS DE ENSAIOS EFETUADOS.

CAPÍTULO 8

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Introdução

Neste capítulo, são discutidos os aspectos de maior importância, obtidos dos resultados de ensaios de campo e laboratório com os solos de subleitos, caracterizando-os em termos de suas propriedades físicas e de engenharia. São analisadas as possíveis correlações existentes entre os diversos parâmetros medidos, apresentados no capítulo anterior.

Caracterização dos Solos e Subleitos

A caracterização dos materiais de subleitos é uma das etapas obrigatórias para o conhecimento de suas propriedades físicas, e principalmente, para avaliar as condições de sua capacidade suporte.

Uma análise cuidadosa das propriedades dos subleitos estudados, que são apresentados nas Tabelas 7.3 a 7.6, mostram que, com exceção das seções 13, 14 e 16, a maioria dos solos são classificados como materiais do grupo A-2-4, na classificação do HRB e SM, SC na classificação unificada de Casagrande. Isso significa que sob condições apropriadas de drenagem, eles exibiram boas propriedades de suporte. A Tabela 7.2, mostra que ao nível do subleito, os CBR's de campo foram em geral bastante altos, com exceção das seções 8, 11, 13 e 16 onde os valores de CBR baixos correspondem aos tipos de solos ou ao valor relativo maior de umidade. Uma característica geral dos mate

riais do subleito foi que eles, ainda com teores alto de silte mais argila (Tabela 7.3) exibiram plásticidades baixas. Isso leva a conclusão de que, provavelmente, os compostos argilo minerais seriam de pequena quantidade ou de baixa atividade físico-química e, portanto, os problemas de variações volumétricas não seriam de importância no comportamento dos pavimentos. Isso foi constatado durante a avaliação do estado dos pavimentos que serão discutidos mais adiante.

Contrôle da Densidade de Campo

Uma vez que o material do subleito é aceito para formar a fundação do pavimento, o contrôle de construção é normalmente limitado a medição de densidade e umidade de campo, de tal maneira que se atinge um nível de compactação aceitável com relação ao valor de compactação no laboratório.

Assim, uma comparação das densidades de campo com as densidades de laboratório são um meio de avaliar o padrão de contrôle de construção numa rodovia. A Tabela 8.1 mostra que, em todas as seções, o grau de compactação atingido foi de 90% ou mais. Isto significa, que o processo de construção foi de um nível aceitável. Muitas vezes arguiu-se que, nos países como o Brasil uma das incôgnitas na construção de rodovias é a uniformidade de qualidade na construção das camadas de uma rodovia. Ao longo desta investigação, não se constatou obvios erros ou níveis de baixa qualidade nos subleitos estudados e na avaliação dos pavimentos suportados por esses subleitos.

Relação Entre Umidade de Campo, Umidade Ótima e Após Imersão no Laboratório

Sendo um dos objetivos principais desta pesquisa avaliar a umidade de equilíbrio do subleito, é de interesse prático comparar esta umidade com as condições de umidade simuladas no laboratório que, como se sabe, são aquelas que supostamente imitam as condições reais de campo.

Os valores numéricos entre as umidades de campo para as seções estudadas, e os valores de umidade após imersão, para os espécimens preparados a peso específico aparente máximo e umidade ótima, antes do ensaio de CBR, assim como os valores de umidade ótima para P.E.A.M., são mostrados na Tabela 8.2. Para maiores esclarecimentos, são apresentadas as Figuras 8.1 e 8.2, que mostram as relações umidade de campo/umidade ótima, e umidade de campo/umidade após imersão. Pode-se claramente apreciar que as umidades de campo, tomadas aqui como umidades de equilíbrio, foram sempre menores que as umidades após imersão, as quais, foram em sua maioria, menores que as umidades ótimas para o P.E.A.M's. Essa situação foi a mesma para o período anual de secas e para o período de chuvas. É claro, então, que a conclusão desta comparação é que a medida de suporte de subleito após imersão é inadequada e pouco real para as condições climáticas e o tipo de muitos solos do Nordeste. Esta mesma conclusão foi encontrada por Croney do Laboratório de Pesquisas de Rodovias da Inglaterra (14) para os estudos realizados no Kenia.

Como não se possui dados correspondentes à zona litorânea, é necessário fazer notar que, para casos especiais do Nordeste deve-se previamente, fazer estudos localizados. Mas, a conclusão geral de que a medida de suporte CBR deve ser obtida a umidade de equilíbrio no campo é válida. Esta umidade de equilíbrio está muito perto da umidade ótima de compactação. Um estudo encomendado pelo IPR e executado pela Máxima Consultoria S.A (61) nos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Rio Grande do Sul, mostrou que para essas regiões, a comparação entre umidade ótima para P.E.A.M. e a umidade de campo, deu resultados similares aos encontrados nesta pesquisa.

Para esclarecer ainda mais a pouca validade dos ensaios de CBR com imersão, é interessante analisar o efeito do período arbitrário de 4 dias de imersão. É claro que a validade de um teste é ainda melhorada, se as condições do material para o ensaio obedecerem algum critério que permite assegurar não somente as condições de equilíbrio no material, mas ainda, um estado similar para todos os materiais a serem testados.

Figura 8.1 - Relação entre umidade de campo e umidade ótima de compactação

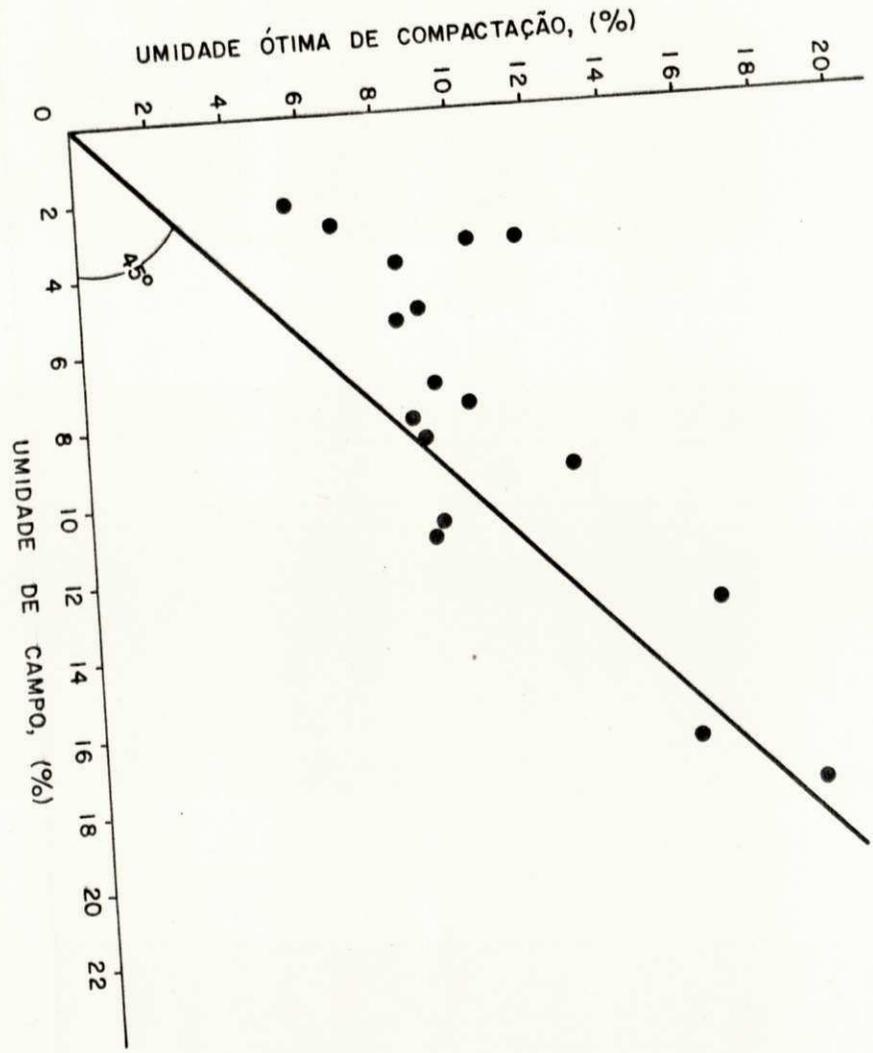


Figura 8.2 - Relação entre umidade de campo e umidade após imersão

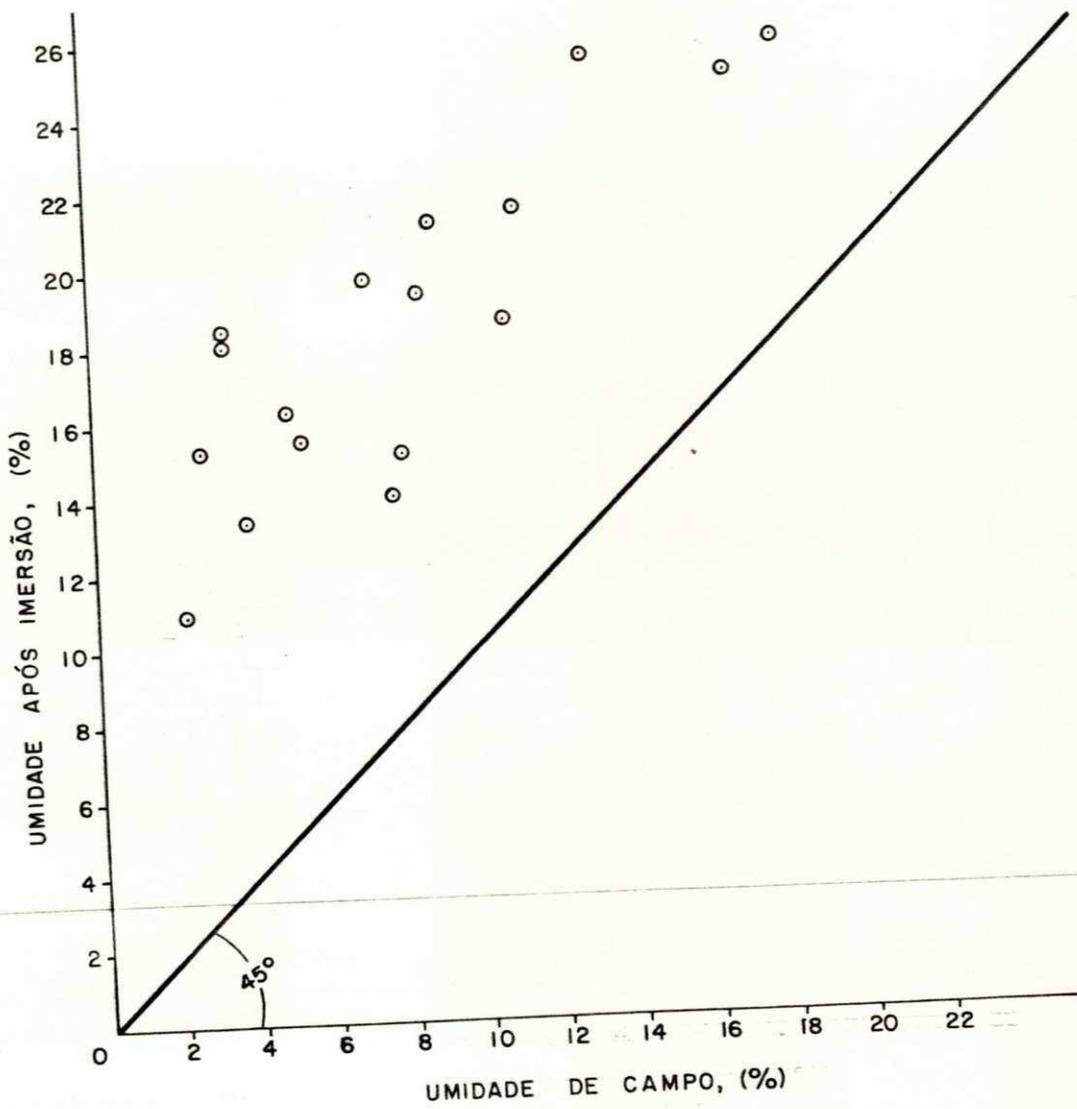
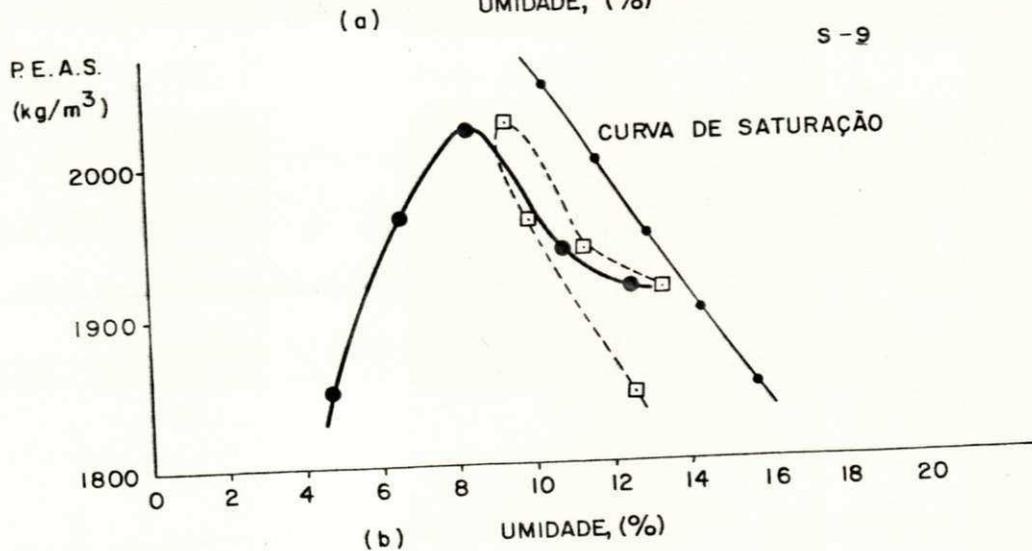
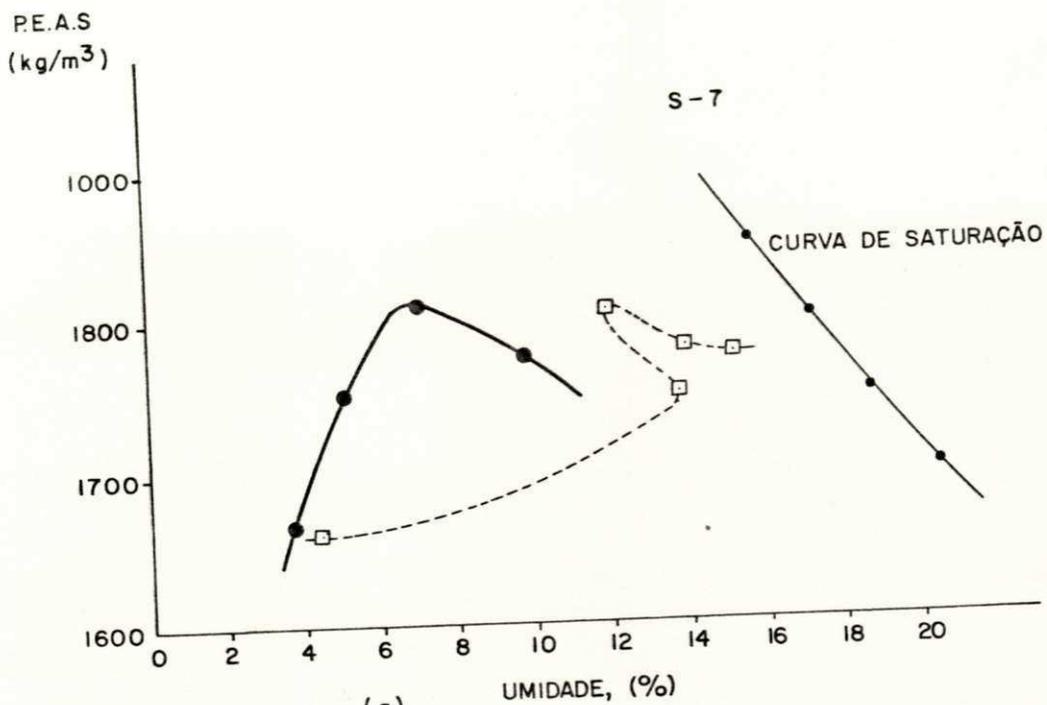


Figura 8.3a - Relação entre umidade com Pêso Específico Aparente
Sêco de Moldagem e após imersão. Sessão 7

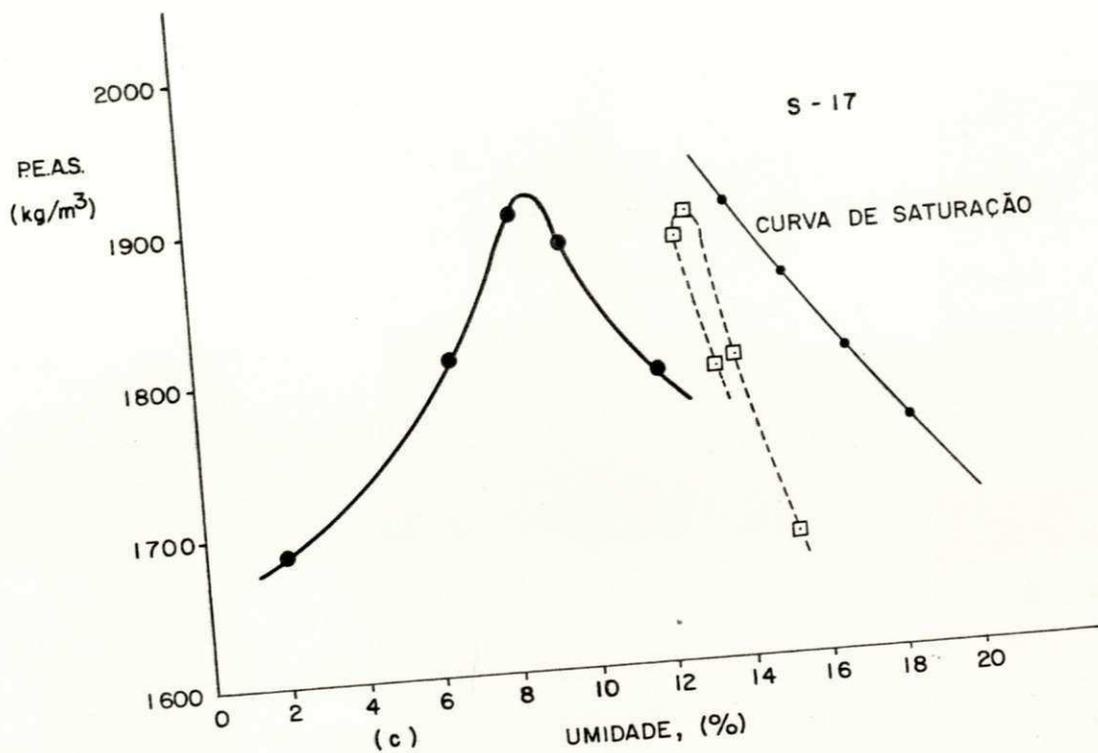
Figura 8.3b - Relação entre umidade com Pêso Específico Aparente
Sêco de Moldagem e após imersão. Sessão 9



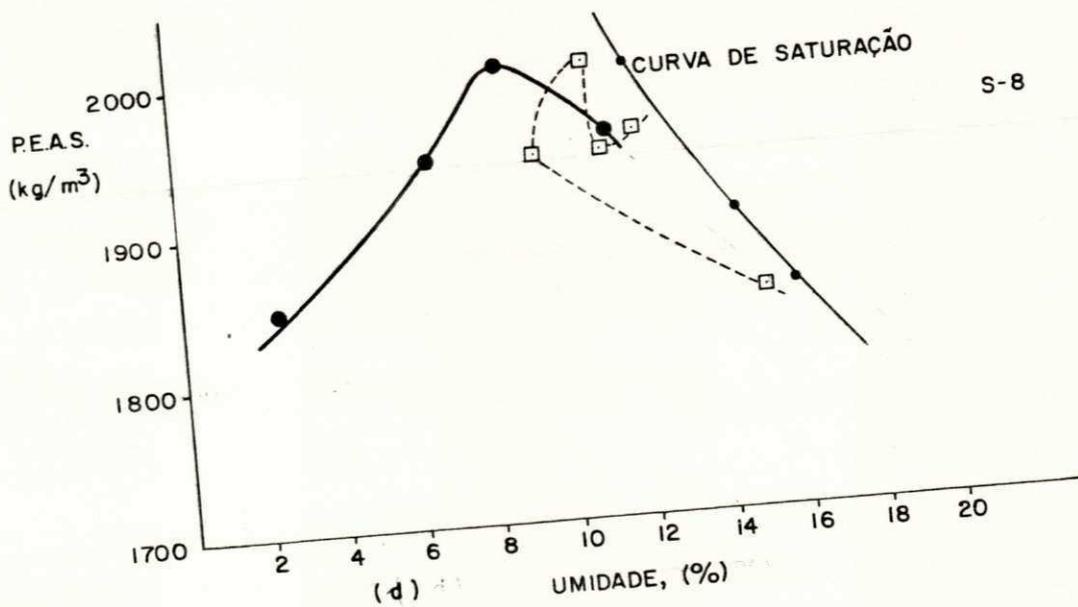
- P.E.A.S. DE MOLDAGEM
- P.E.A.S. APÓS IMERSÃO x UMIDADE APÓS IMERSÃO

Figura 8.3c - Relação entre umidade com Pêso Específico Aparente
Sêco de Moldagem e após imersão. Sessão 17

Figura 8.3d - Relação entre umidade com Pêso Específico Aparente
Sêco de Moldagem e após imersão. Sessão 8



● PE.A.S. DE MOLDAGEM
 □ PE.A.S. APÓS IMERSÃO x UMIDADE APÓS IMERSÃO



S-8

As Figuras 8.3 a, b, c, d, assim como as Tabelas 7.7, 7.8 e 7.9 mostram claramente que a umidade alcançada por um corpo de prova após imersão varia não somente com a densidade deste, mas com a permeabilidade, desde que um corpo de prova possa atingir na prática qualquer grau de saturação. Assim, para materiais com pouca porosidade e baixa permeabilidade, o ensaio de CBR após quatro dias de imersão dá vantagens aos materiais com alta porosidade e alta permeabilidade.

Correlação Entre CBR de Campo, CBR no Laboratório Sem Imersão e Com Imersão

O valor de CBR de campo é somente utilizado como método de controle de uniformidade, e foi muitas vezes relacionado com o módulo de elasticidade dinâmica, por isso, seria interessante pesquisar se existe alguma correlação válida entre CBR de campo e CBR de laboratório.

A Tabela 8.3, apresenta os valores numéricos de CBR's usado para as correlações. O CBR de campo não tem correlação significativa com o CBR após imersão e nem com o CBR sem imersão. Pensa-se que uma correlação existirá para alguns grupos dos solos estudados, porém todas as tentativas foram negativas. A falta de correlação foi também registrada pela Máxima Consultoria S.A (61). Das observações de campo durante os ensaios, pode-se dizer que a repetibilidade dos ensaios de campo é muito pobre. Ao mesmo tempo, as condições de ensaio foram muito difíceis, sobretudo porque os mesmos foram feitos a quase um metro de profundidade. A aproximação do caminhão para fornecer a carga foi muitas vezes precária, devido a possibilidade de falha do pavimento na borda do poço. Assim, nesta pesquisa, pode-se somente indicar que não se encontrou correlação de validade estatística, mas a causa disto é desconhecida.

Uma correlação que pode ser de grande utilidade prática, é a correlação entre CBR com imersão e CBR sem imersão, isto porque, os resultados de um valor poderá se converter ao outro sem esperar os 4 dias, no caso de requerer-se o valor de CBR com imersão para alguma situação especial. Esta correlação

é apresentada na Figura 8.4. A equação de regressão é:

$$CBR_{Ci} = 0,224 + 0,533 CBR_{Si}$$

com o coeficiente de correlação igual a 0,817 e com significância de 99,8%. Como pode-se ver então, esta correlação é de alta validade estatística e pode ser utilizada com grande segurança, principalmente para valores de CBR sem imersão menores que 36%.

A relação entre umidade de moldagem, CBR com e sem imersão, são mostradas no Apêndice D.

Relações Entre Sucção e Umidade

Conforme foi discutido no capítulo de Revisão Bibliográfica, a maneira mais lógica de prognosticar a umidade de equilíbrio de um solo, é utilizar a relação de umidade potencial, ou mais conhecidamente chamada sucção com o teor de umidade. Se o nível d'água freática é conhecido (o nível inclui o intervalo de flutuação no período anual), então, é possível prognosticar a umidade de equilíbrio num subleito onde o pavimento fornece uma camada impermeável efetiva, isto é, não há perdas apreciáveis devido a evaporação.

No estudo realizado durante esta pesquisa, as umidades nos perfis dos subleitos não foram diferentes para a época de chuvas e para a época de secas. Esta situação só é possível quando a deficiência de água nos solos é muito grande, parece então que, para as regiões da Paraíba (exceto a região litorânea), os solos permanecem com deficiência de água, isto é, inclusive no período das chuvas, a evaporação é bem maior do que qualquer possível retenção.

As Tabelas dos Apêndices B e C, mostram ainda que as umidades na borda do pavimento, foram em muitos casos, maiores que as umidades no eixo do pavimento. No entanto, o nível d'água freático não foi encontrado até a profundidade máxima dos furos, isto é, 1,5 m. É interessante assinalar, que o per

Figura 8.4 - Relação entre CBR sem imersão e CBR com imersão

fil da distribuição de umidade, é na realidade um perfil de sucção-umidade sem mesmo conhecer-se o nível d'água freático. Com essa idéia, utilizaram-se os resultados de laboratório das relações sucção-umidade para tentar localizar o nível do lençol freático e então, comparar as distribuições reais de umidade com as umidades da curva de sucção do laboratório. Os resultados são mostrados nas Figuras 7.10a, b, c, d, e; e 7.11a, b.

Pode-se notar que, para poucos perfis a curva teórica poderia aproximar os valores reais de umidade no perfil dos subleitos. Pode-se ainda observar, que o nível do lençol freático encontra-se muito profundo.

Conforme foi encontrado nas experiências na África (55), o tipo de solo e o nível do lençol freático estão interrelacionados com referência as condições de umidades de equilíbrio. Se o solo é não plástico, então, a umidade de equilíbrio será influenciada somente pelo nível do lençol freático quando este estiver até 0,9 m do nível do subleito. Para solos com $IP \leq 20\%$, o lençol freático influencia a umidade de equilíbrio quando estiver a até 3 m ou menos. Em solos argilosos com $IP \geq 40\%$, o lençol freático influencia a umidade de equilíbrio quando estiver até 7 m ou menos de profundidade.

Para o caso dos subleitos estudados, a maioria foram não plásticos e outros com $IP \leq 20\%$. Nestes, então, o lençol freático tenderia influenciar, se o seu nível fosse menor ou igual a 3 m de profundidade. Mas como foi mostrado, não houve caso em que o lençol freático poderia influenciar a umidade de equilíbrio.

Deve-se então concluir, que a umidade de equilíbrio nesta região climática e para as condições de drenagem das rodovias estudadas é, provavelmente, influenciada pelo movimento da água na fase de vapor e por transferência da fase líquida na direção horizontal, isto é do acostamento ao eixo da rodovia ou vice-versa.

Avaliação do Nível de Desempenho das Rodovias Estudadas

Não foi possível conduzir uma avaliação estrutu

ral das rodovias estudadas, porém, se procedeu para trazer uma avaliação qualitativa, utilizando-se uma simples escala de 5 pontos, que foi mostrada na Tabela 4.1 do Capítulo 4. Em geral, as condições das rodovias foi qualificada de boa em termos estruturais, foram registradas poucas trincas e certamente não se observou deformações devidas a falhas plásticas. Constatou-se que, a maior deterioração ocorreu nas bordas devido não existir proteção nos acostamentos e, em alguns casos, devido ao incremento da umidade nos mesmos, após precipitações pluviais e solicitação de tráfego.

As fotografias mostradas nas Figuras 8.5 de "a" à "h", incluem uma descrição suscinta do estado de algumas seções estudadas.

Figura 8.5a - Trincas longitudinais na borda do pavimento devido a contração do solo durante o período de sêca. Trecho Sapé-Mari, seção 9.

Figura 8.5b - Posição dos furos e vista parcial mostrando as boas condições do pavimento. Trecho Sapé-Mari, seção 10.



FIGURA 8.5a



FIGURA 8.5b

Figura 8.5c - Vista parcial do trecho Sapê-Mari mostrando o desgaste nas bordas do pavimento provocado pelas águas superficiais, seção 10.

Figura 8.5d - Vista parcial da seção 13, no trecho Solânea-Bananeira. Vê-se, em primeiro plano, o local do poço para ensaio de campo.



FIGURA 8.5c

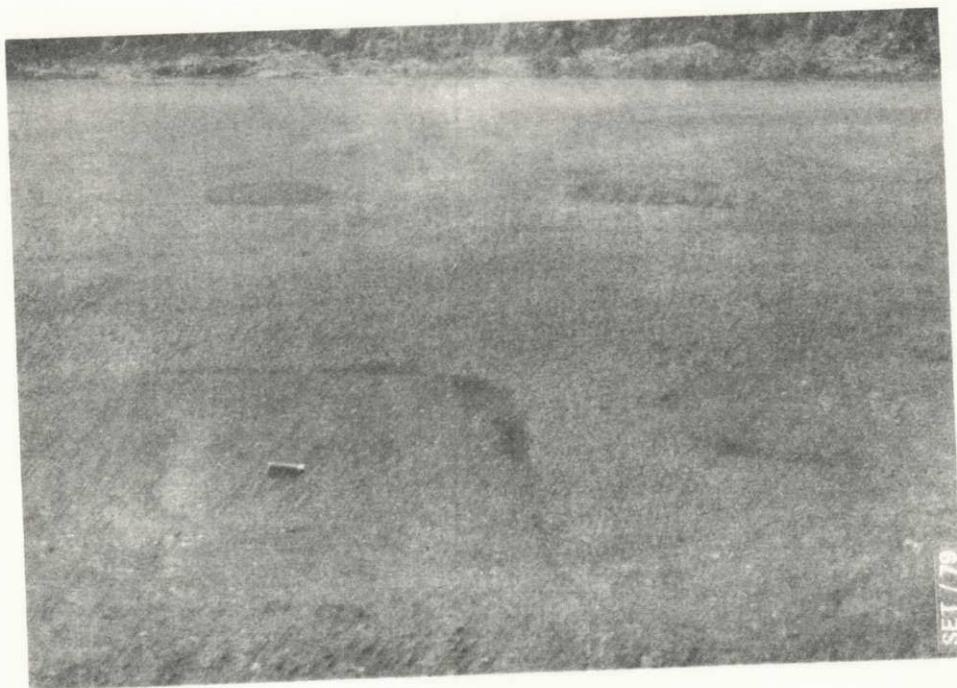


FIGURA 8.5d

Figura 8.5e - Vista parcial da seção 13, mostrando a posição dos furos e desgastes nas bordas. Pode-se ainda observar a boa condição estrutural do pavimento.

Figura 8.5f - Trecho Solânea-Bananeiras. Desgaste nas bordas devido as águas superficiais.

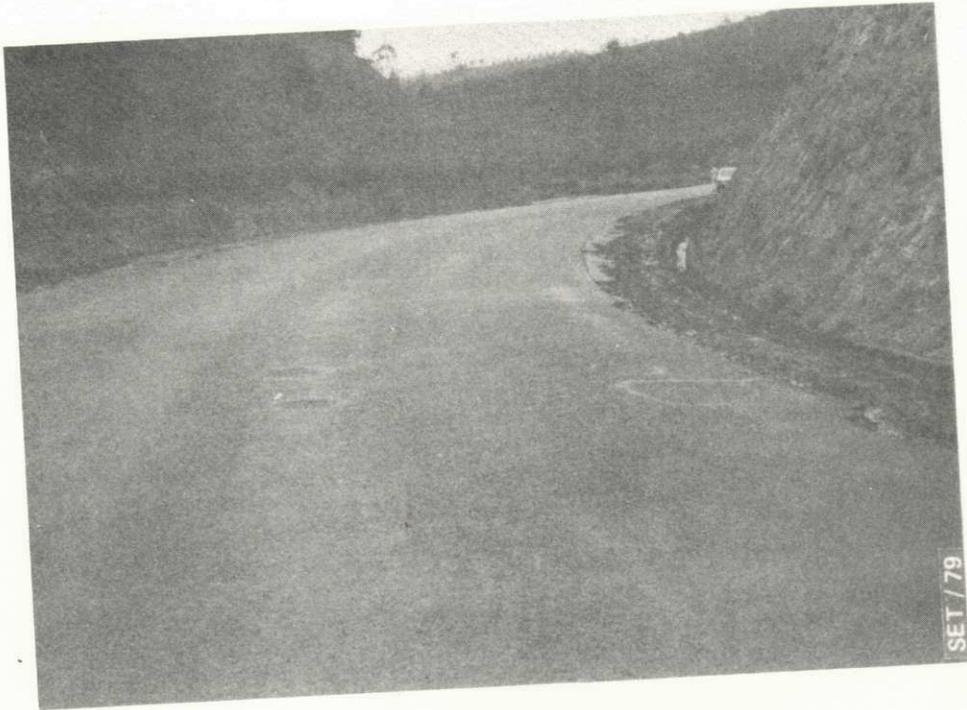


FIGURA 8.5e



FIGURA 8.5f

Figura 8.5g - Vista parcial do trecho Solânea-Bananeiras mostrando a posição dos poços e furos de sondagem, bem como, trincas na borda do pavimento.

Figura 8.5h - Vista parcial do trecho Areia-Alagoa Grande, vendo-se a posição dos furos de sondagem e poços para os ensaios de campo.

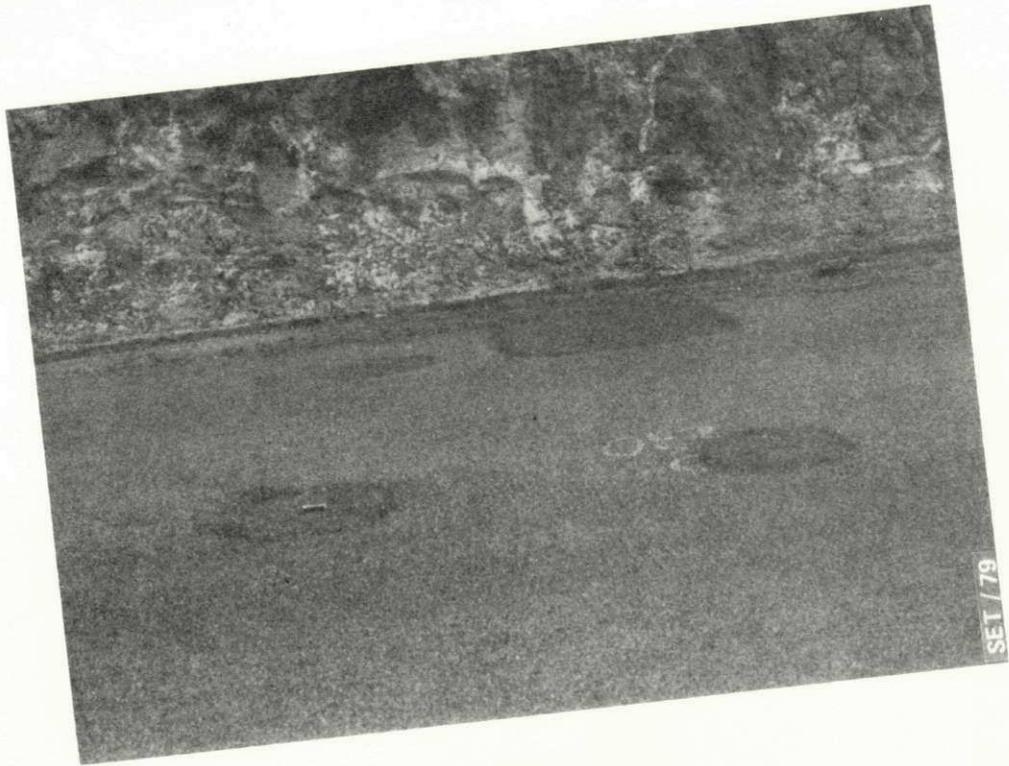


FIGURA 8.5g

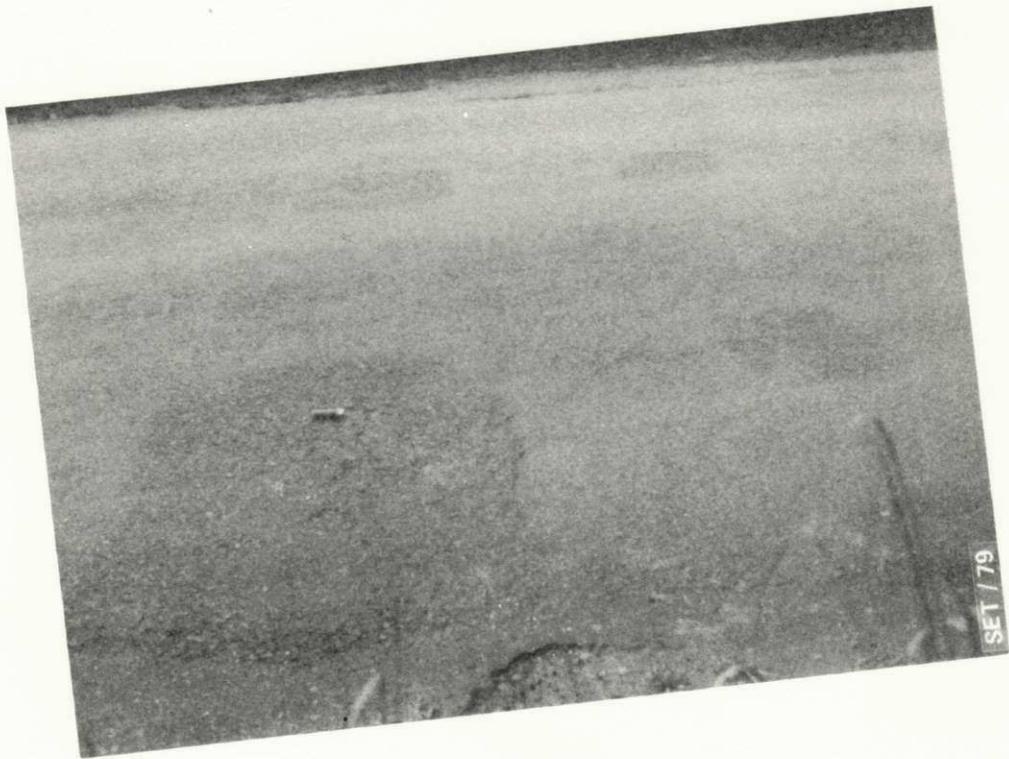


FIGURA 8.5h

SEÇÃO Nº	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	
3	100	97
4	105	106
6	100	104
7	96	99
8	92	90
9	89	89
10	94	94
11	89	89
12	93	93
13	96	91
14	93	95
15	89	85
16	90	89
17	100	98
18	100	97
19	99	102
20	92	101

TABELA 8.1 - VALORES DO GRÁU DE COMPACTAÇÃO
PARA AS PROFUNDIDADES DE 20, E
40 cm OBTIDOS ATRAVÉS DOS RE
SULTADOS APRESENTADOS NA TABE
LA 7.1.

SEÇÃO Nº	UMIDADE DE CAMPO AO NÍVEL DO SUBLEITO (%)	UMIDADE APÓS IMERSÃO (%)	UMIDADE ÓTIMA (%)
3	9,5	21,1	12,8
4	2,3	10,9	5,6
6	7,7	19,7	9,3
7	2,9	15,2	6,8
8	8,1	15,1	8,7
9	4,0	13,4	8,5
10	8,6	19,3	9,0
11	5,2	16,1	9,0
12	7,8	14,0	10,2
13	13,1	25,4	16,5
14	18,0	28,8	19,0
15	11,2	21,5	9,1
16	16,7	24,9	15,8
17	5,5	15,4	8,4
18	10,8	16,6	9,3
19	3,5	18,0	10,4
20	3,5	18,4	11,7

TABELA - 8.2 - VALORES DE UMIDADES DE CAMPO, UMIDADES APÓS IMERSÃO E UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO. COM ENERGIA 5,6 Kg. cm/cm³.

SEÇÃO Nº	CBR DE CAMPO (%)	CBR SEM IMERSÃO (1) (%)	CBR COM IMERSÃO (2) (%)
3	86,0	14,2	24,0
4	101,0	18,2	20,0
6	21,0	30,9	22,0
7	17,0	5,6	19,0
8	5,0	46,0	38,0
9	16,0	32,0	37,0
10	39,0	24,1	20,5
11	8,0	21,2	17,0
12	24,0	26,5	20,0
13	8,0	26,1	12,0
14	33,0	27,4	11,0
15	81,0	6,0	15,5
16	51,0	18,0	10,2
17	14,0	23,6	16,4
18	28,0	27,7	9,0
19	27,0	10,5	27,0
20	19,0	-	11,2

TABELA 8.3 - VALORES DE CBR DE CAMPO, CBR SEM IMERSÃO E COM IMERSÃO.

(1) CBR OBTIDO A UMIDADE REAL DO SUBLEITO COM A UMIDADE DE EQUILÍBRIO

(2) VALOR MÁXIMO OBTIDO DO ENSAIO COM IMERSÃO

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na presente pesquisa permitem apresentar as seguintes conclusões:

1. Os subleitos estudados foram de características físicas aceitáveis, ou seja, solos finos de baixa plásticidade e resistência suporte geralmente maior que CBR 8.
2. O grau de compactação de campo dos subleitos estudados, foi sempre igual ou maior que os 90% da densidade máxima de laboratório. No entanto, a umidade dos subleitos foi encontrada com valor igual ou menor que a umidade ótima para o máximo pêso específico aparente, independentemente da estação sazonal correspondente a medida de umidade de subleito.
3. Baseado nos resultados de umidades de campo dos subleitos (umidades de equilíbrio), propõe-se que as umidades de equilíbrio, sejam consideradas iguais as umidades ótimas correspondentes a energia do Proctor Normal, para obter-se o pêso específico aparente máximo.
4. A determinação do valor suporte utilizando o ensaio de CBR, deve ser modificada na metodologia atual, isto é, o valor suporte deve ser medido a umidade de equilíbrio. Somente em casos especiais, onde constata-se a presença do lençol freático superficial como nos climas mais úmidos do litoral, pode-se justificar o uso do ensaio de CBR após imersão. Ainda neste caso, deve-se estudar os níveis de saturação atingidos pelos

espécimes dos solos após imersão.

5. Para os solos e condições de ensaios desta pesquisa, não se encontrou correlações de validade estatística entre os valores de CBR de campo e os valores dos dois tipos de ensaios de CBR no laboratório.
6. Uma correlação de alta significância existe entre o CBR com imersão e CBR sem imersão de laboratório, esta relação é linear e igual a:

$$CBR_{ci} = 0,223 + 0,533 CBR_{si}$$

O nível de significância foi de 99,8%, com um coeficiente de correlação igual a 0,817.

7. A pesquisa foi limitada aos tipos de solos característicos das regiões do Estado da Paraíba, predominantemente, areias siltosas e argilosas, de maneira que, a correlação encontrada entre o CBR com e sem imersão poderá ser usada em outras regiões cujo clima e tipo de solo sejam semelhantes aos utilizados neste estudo.
8. Verificou-se que os níveis dos lençóis freáticos são muito profundos. Pode-se dizer que a umidade de equilíbrio é, provavelmente, determinada por transferência de vapor e transferência de água na fase líquida, dos acostamentos ao eixo das rodovias ou vice-versa. Isto então, explica porque não é possível utilizar as relações de sucção/umidade de laboratório para prognosticar as umidades de equilíbrio.
9. A avaliação qualitativa do desempenho dos pavimentos, relacionada a um tráfego estimado, mostra que eles se comportaram estruturalmente como sistemas apropriadamente dimensionados, provavelmente sobredimensionados se levarmos em consideração a diferença entre os valores de suporte com e sem imersão.

CAPÍTULO 10

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Apesar de que, esta pesquisa abrangeu uma grande quantidade de ensaios de campo e de laboratório, é necessário ainda continuar e ampliar este trabalho, com o objetivo de fornecer "Know how" para finalmente, adotar um método mais adequado para o dimensionamento de pavimentos, nas regiões áridas e semi-áridas do Brasil. Sugere-se que os pontos a investigar sejam:

1. Fazer uma avaliação quantitativa dos pavimentos, utilizando medidas de deflexão, medidas de rugosidade e medidas dinâmicas dos módulos de elasticidade das diferentes camadas dos pavimentos.
2. Ampliar as investigações para abranger todas as camadas dos pavimentos.
3. Selecionar outras áreas onde as condições de clima e topografia conduzam a lençóis freáticos superficiais e onde não exista deficiência de água nos solos.
4. Verificar a extensão de sobredimensionamento, calculando as espessuras das estruturas para o tráfego atual, com valores de suporte com e sem imersão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Broms, B.B., Effect of Degree of Saturation on Bearing Capacity of Flexible Pavements. Highway Research Record 71, pp. 1-14, 1965.
2. Cominsky, R.J., Cumberledge, G., e Bhajandas, A.C., Frost Action Phenomena in Soils and Pavements. PennDOT Bureau of Materials, Testing, and Research. Research Project 68, p. 30, 1972.
3. Cumberledge, G.A. Study of Factors Influencing the Reduction of Highway Subgrade Support, During the Spring Thaw Period. MSCE Thesis, West Virginia Univ., 1967.
4. Yao, L.Y.C., e Broms, B.B., Excess Pore Pressures Which Develop During Thawing of Frozen Fine-Grained Subgrade Soils. Highway Research Record 101, pp. 35-57, 1965.
5. Bhajandas, A.C., Cumberledge, G., e Cominsky, R.J., Flexible Pavement Evaluation and Overlay Design Through Deflection Measurements With the Dynaflect. PennDOT Bureau of Material, Testing and Research. Research Project, 1971.
6. Canadian Good Roads Association. A Guide to the Structural Design of Flexible and Rigid Pavement in Canada. Canada, 1965.
7. Williams, A.A.B., The Deformation of Roads Resulting From Moisture Change in Expansive Soils in South Africa. In Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. (Aitchison, C.D., ed.), Butterworths, 1965.
8. Croney, D., Coleman, J.D., and Black, W.F.M. Movement and Distribution of Water in Soil in Relation to Highway Design

and Performance. HRB Spec. Rept. 40, pp. 226-252, 1958.

9. Condições de Umidade do Provede no Ensaio de CBR - Laboratório de Engenharia de Angola, Publicação n^o 147, Luanda 1972.
10. Soil Mechanics for Road Engineers. Road Research Laboratory. Her Majesty's Stationery Office, London, 1952.
11. Aitchison, G.D., Russam, R. e Richards, B.E., Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. RRL Report n^o 38. England, 1956.
12. Marks, B.D., III, e Haliburton, T.A., Interin Report VI: Evaluation of Collected Data 1966-1967. Subgrade Moisture Variations Research Project, School of Civil Engineering, Oklahoma, State Univ. 1968.
13. Mickle, J.L., e Spangler, M.G., Accumulation of Moisture in Soil under an Impervious Surface. Engineering Research Institute, Iowa State Univ., Ames, 1961.
14. Croney, D., The Movement and Distribution of Water in Soils. Geotechnique. Vol. 3, pp. 1-16, 1952.
15. Wooltorton, F.L.D., Planning Engineer, Roads Branch, Ministry of Works, Nairobi, Kenya Colony. 1956.
16. Marshall, T.J., Relations Between Water and Soil. Commonwealth Agricultural Bureaux, England, 1952.
17. Wisler, C.D., e Brater, E.F., Hidrology. Second Edition. John & Sons. Inc., New York, pp. 123, 1959.
18. Haines, W.B., The Volume Changes Associated With Variation of Water Content in Soil. J. Agric. Sci. Vol. 3, pp.296-310, 1923.

19. Lauritzen, C.W. e Stewart, A.J., Soil-Volume Changes and Accompanying Moisture and Pore-Space Relationships. Soil Sci. Soc. Amer., Proc., Vol. 6, pp. 113-116, 1941.
20. Lauritzen, C.W., Apparent Specific Volume and Shrinkage Characteristics of Soil Materials. Soil Sci. Vol. 65, pp. 155-179, 1948.
21. Stirk, G.B. Some Aspects of Soil Shrinkage and the Effect of Cracking upon Water Entry Into the Soil. Aust. J. Agric. J. Agric. Res., Vol. 5, pp. 279-290, 1954.
22. Schofield, R.K., Pore Size Distribution as Revealed by Dependence of Suction (pF) on Moisture Content. Trans. 1, st Comm. Int. Soc. Soil Sci. Am., pp. 38-45, 1938.
23. Holmes, J.W., Water Sorption and Swelling of Clay Blocks. J. Soil Sci., Vol. 6, pp. 200-208, 1955.
24. Keen, B.A. The Physical Properties of the Soil. p. 305, London, 1931.
25. Leeper, G.W., Nicholls, A., e Wadham, S.M., Soil and Pasture Studies in the Mount Gellibrand Area, Western District of Victoria. Proc. Roy Soc. Vict., Vol. 49, pp. 77-134, 1936.
26. Hallsworth, E.G., Robertson, Gwen, K., e Gibson, F.R., Studies in Pedogenesis in New South Wales. VII. The "Gilgai" Soils. J. Soil Sci., Vol. 6, pp. 1-31, 1935.
27. Ward, W.H., The Effect of Vegetation on the Settlement of Structures. Proc. Conf. Biol. Civ. Eng., Inst. Civ. Eng. pp. 181-194, 1949.
28. Croney, D., e Lewis, W.A., The Effect of Vegetation on the Settlement of Roads. Proc. Conf. Biol. and Civ. Eng., Inst. Civ. Eng., 195-202, 1949.

29. Aitchison, G.D., e Holmes, J.W., Aspects of Swelling in the Soil Profile. Aust. J. Appl. Sci., Vol. 4, pp. 244-259, 1953.
30. Russel, E.J., Soil Conditions and Plant Growth. 8 th Edition, pp. 399, London, 1950.
31. Emerson, W.W. The Rate of Water Uptake of Soil Crumbs at Low Suctions. J. Soil Sci., Vol. 6, pp. 147-159, 1955.
32. Schofield, R.K. The pF of the Water in Soil. Trans. 3 rd., Int. Cong. Soil Sci. Vol. 2, pp. 37-48, 1935.
33. Weymouth, J.H., e Williamson, W.O. The Effects of Extrusion and Some the Other Processes on the Microstructure of Clay. Amer. J. Sci. Vol. 251. pp. 89-107, 1953.
34. Williamson, W.O. The Fabric, Water-Distribution, Drying Shrinkage and Porosity of Some Shaped Disc of Clay. Am. J. Sci. Vol. 245, pp. 645-662, 1947.
35. Brewer, R., e Blackmore, A.V. The Effects of Entrapped air and Optically Orientend Clay on Aggregate Breakdown and Soil Consistence. Aust. J. Appl. Sci., Vol. 7, pp. 59-68, 1956.
36. Shofield, R.K. Ionic Forces in Thick Films of Liquid Between Charged Surfaces. Trans. Faraday Soc. 42 B. pp. 219-225. 1946.
37. Bolt, G.H. Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays. Geotechnique n° 6, pp. 86-93, 1956.
38. Terzaghi, K. The Influence of Elasticity and Permeability on the Swelling of two Phase Systems. In Colloid Chemistry (Ed. by Alexander, Jerome), Vol. 3, pp. 65-88, 1931.
39. Terzaghi, K. e Peck, R.B. Soil Mechanics in Engineering

- Practice. Wiley, New York, 1948.
40. Terzaghi, K. Correspondence on the Paper by Bolt. Geotechnique n° 6, pp. 191-192, 1956.
 41. Kryukov, P.A. e Komarova, N.A. Expulsion of Water from Clays Under Very High Pressures. Doklady Akademi Nank., S. S.S.R., n° 99, pp. 617-619, 1954.
 42. Terzaghi, K. Theoretical Soil Meachanics. Wiley, New York, 1954.
 43. Croney, D., e Coleman, J.D. Soil-Moisture Suction Properties and Their Bearing on the Moisture Distribution in Soils. Proc. 3rd. Int. Cont. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, pp. 13-18, 1953.
 44. Puri, A.N., Crowther, E.M., e Keen, B.A. The Relation Between the Vapour Pressure and Water Content of Soils. J. Agric. Sci., Vol. 1, pp. 68-88, 1925.
 45. Bouyoucos, G.J. Effect of Temperature on the Movement of Water Vapor and Capillary Moisture in Soils. J. Agric. Res. Vol. 5, pp. 141-147, 1915.
 46. Winterkorn, H.F. Fundamental Similarities Between Electro-Osmotic and Thermo-Osmotic Phenomena. Higway Res. Bd. Proc. n° 27. Washington. pp. 443-455, 1947.
 47. Deryaguin. B.D. e Melnikova, M.K. Experimental Study of Water Through the Soil Under the Influence of Salt Concentration, Temperature, and Moisture Gradients. Proc. 6 th. Int. Cong. Soil Sci., Vol. 1, pp. 305-314, 1955.
 48. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Métodos de Ensaios. Divisão de Pesquisas Tecnológicas-DNER, Rio de Janeiro, 1971.

49. Winterkon, H.F. e Fang, H.Y. Foundation Engineering Handbook. Van Nostrand Reinhold Company Regional Offices, p.305. New York, 1975.
50. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. Especificações Gerais para Obras Rodoviárias - DNER, Rio de Janeiro, 1971.
51. Neto, J.M.R. Rápida Determinação das Condições Ótimas de Compactação dos Solos e seu Contrôlo em Obras de Terra. Memória nº 255. Lisboa, 1955.
52. Cabrera, J.G. Curso de Pavimentação. Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. Notas de Aulas. Campina Grande-Pb. 1974.
53. Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. EPE - Ministério da Agricultura. Boletim Técnico nº 15. Rio de Janeiro, 1972.
54. Road Research Laboratory. A Guide to the Structural Design of Pavements for New Roads. Department of the Environment, Road Note 29. London, H.M. Stationary Office, 3rd. Edition, 1970.
55. Road Research Laboratory. A Guide to the Structural Design of Bitumen Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries. Department of the Environment, Road Note 31. London, H.M. Stationary Office, 3rd. Edition, 1977.
56. Estatística de Tráfego. Ministério do Interior. SUDENE. Departamento de Serviços Básicos. 1972, 1973, 1974, 1975.
57. Aitchison, G.D. e Donald, I.B. Effective Stresses in Unsaturated Soils. Second Aust. New Zeal. Cond. in Soil Mech. Foud. Engg., pp. 192-199, 1955.

58. Spangler, M.G. The Structural Design of Flexible Pavements. Proc. Highw. Res. Bd., Vol, 22, Washington, pp. 199-219, 1942.
- ×59. Maia, S. Caminhos da Paraíba 1500-1978, História do DER-Pb. Cia Editora União, J. Pessoa, 1979.
- ×60. Cabrera, J.G. Projeto Avançado de Estruturas Flexíveis para Pavimentos. Notas de Aula. CCT-UFPb, C. Grande, 1979.
61. Máxima Consultoria S.A. Dimensionamento de Pavimentos. Verificação do Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis Adotado pelo DNER. Relatório IPR-Contrato PG 300/75. Rio de Janeiro, 1977.

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

Ao Professor J.G. CABRERA, Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds e Professor Visitante e Consultor Científico e Técnico na Universidade Federal da Paraíba, pela orientação, estímulo e colaboração, sem os quais a realização deste trabalho seria impossível.

Ao Departamento de Estradas e Rodagem do Estado da Paraíba, DER-Pb., na pessoa do Eng^o. CARLOS ALBERTO PIMENTEL, e equipes de funcionários, pela condução e ajuda na realização dos ensaios de campo e laboratório.

Ao Professor F.B. LUCENA pela ajuda econômica inestimável através da ATECEL para suportar os gastos da pesquisa.

Ao Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, nas pessoas do seu Diretor, Professor J.M. FEU ROSA e do Chefe do D.E.E., Professor H. CYRINO, que tornaram possível a vinda do autor para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos que souberam se colocar em disponibilidade nos momentos mais necessários.

Finalmente, aos Funcionários do CCT-UFPb., H.H. SOBREIRA DE ALMEIDA pela datilografia deste trabalho, e W. RAMOS pela confecção dos desenhos.

APÊNDICE A

TABELAS COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS
DE SUCÇÃO NO LABORATÓRIO

$f_{atm} = 10,23 \text{ m H}_2\text{O} @ 15^\circ\text{C}$

SEÇÕES Nº	SUCÇÃO (cm)							
	100	300	500	1000	2000	5000	10000	15500
	x	x		x		x	x	x
UMIDADES (%)								
3	29,93	27,23	24,75	21,86	19,96	16,18	14,97	13,76
4	4,41	3,34	2,83	2,48	2,13	1,86	1,82	1,85
6	16,31	11,86	10,72	8,49	7,57	5,97	5,33	5,16
7	9,21	6,44	5,71	4,71	4,20	3,83	3,65	3,30
8	11,96	8,62	6,54	5,39	4,69	4,14	4,12	4,05
9	8,93	6,49	5,10	4,14	3,59	3,51	3,44	3,41
10	14,10	10,07	9,25	7,47	6,67	6,28	6,04	6,05
11	18,85	13,89	13,05	10,87	9,22	6,35	5,62	5,18
12	41,83	35,61	33,25	30,11	27,93	25,88	23,77	21,73
13	34,84	30,13	28,28	25,57	23,84	21,08	19,89	19,55
14	16,22	10,40	7,88	6,45	5,56	4,98	4,89	4,80
15	31,24	27,00	25,14	21,51	19,32	17,95	16,73	15,45
16	9,04	5,73	4,71	3,61	3,11	2,61	2,34	2,30
17	21,78	16,27	13,07	10,51	9,04	8,02	7,28	7,49
18	24,23	19,62	17,34	15,25	12,10	11,63	10,54	9,12
19	20,14	16,12	14,13	11,26	9,95	7,76	7,28	6,68
20	20,45	18,70	15,99	12,75	11,34	9,88	9,15	8,53

TABELA A.1 - VALORES DE UMIDADES E SUCÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLOS DO SUBLEITO.

APÊNDICE B

TABELAS COM OS RESULTADOS DE UMIDADES OBTIDOS
DURANTE O PERÍODO DE SÊCAS

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADES NA ÉPOCA DE SÊCA (%)											
	SEÇÃO Nº 3			SEÇÃO Nº 4			SEÇÃO Nº 6			SEÇÃO Nº 7		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	6,2	9,1	9,0	-	-	-	6,6	8,3	6,0	2,6	2,7	2,2
SUBLEITO 10	9,2	4,5	7,5	3,4	1,8	2,6	7,5	7,9	5,9	2,7	2,6	2,3
30	8,3	8,3	7,7	1,4	1,4	2,1	7,7	6,4	5,8	2,8	2,9	2,1
50	10,3	8,5	8,3	1,5	1,5	1,8	7,4	6,7	5,6	2,4	2,3	2,3
70	10,2	8,5	8,6	1,7	1,7	1,8	8,6	8,7	8,3	2,8	2,4	2,7
90	10,7	8,7	7,4	1,4	1,3	1,4	10,4	8,6	8,9	2,7	2,2	3,3
110	10,9	9,8	8,8	1,9	2,5	2,3	13,5	7,5	7,1	3,2	2,9	4,1
130	11,9	10,6	10,1	3,9	4,2	4,0	5,1	3,7	4,0	5,4	3,0	4,2
150	12,9	12,1	10,5	4,4	4,2	4,6	11,3	8,0	7,2	8,6	2,0	1,7

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADES NA ÉPOCA DE SÊCA (%)											
	SEÇÃO Nº 8			SEÇÃO Nº 9			SEÇÃO Nº 10			SEÇÃO Nº 11		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	16,8	6,3	15,1	5,3	4,9	6,0	-	-	-	7,1	7,1	7,0
SUBLEITO 10	6,4	5,6	6,2	4,9	4,5	4,1	6,4	6,3	5,3	7,3	6,0	6,5
30	7,4	6,7	6,6	7,3	8,0	3,6	7,6	7,3	6,1	5,4	6,3	5,5
50	9,7	9,1	12,5	4,6	3,8	2,5	7,6	8,2	5,5	2,6	4,7	5,0
70	12,0	12,8	9,8	4,9	5,0	2,6	7,8	7,2	4,5	2,8	-	-
90	14,2	12,2	10,9	4,8	4,3	2,8	7,5	6,0	4,5	4,1	-	-
110	15,8	12,6	10,5	5,4	4,6	3,7	7,0	8,0	8,0	4,9	-	-
130	11,0	15,4	16,7	5,5	6,8	3,3	7,2	9,4	10,3	-	-	-
150	15,8	15,3	16,6	5,1	8,6	3,7	9,7	9,6	10,9	-	-	-

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADES NA ÉPOCA DE SÊCA (%)											
	SEÇÃO Nº 12			SEÇÃO Nº 13			SEÇÃO Nº 14			SEÇÃO Nº 15		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	8,3	6,4	8,0	5,6	4,0	3,6	5,9	5,1	5,0	5,9	4,3	4,7
SUBLEITO 10	8,1	6,3	5,9	5,8	3,9	3,5	5,2	5,0	4,2	5,0	4,8	4,4
30	9,8	8,5	7,4	12,9	8,1	8,1	11,3	10,0	9,1	4,1	5,8	4,7
50	15,8	16,8	9,9	9,7	9,7	15,5	9,7	10,3	8,7	13,1	12,8	4,7
70	9,7	14,7	10,6	19,8	18,9	15,3	15,4	18,0	15,1	13,6	11,4	15,0
90	11,0	14,6	9,3	17,4	17,2	18,2	15,0	15,3	16,6	11,6	12,2	10,3
110	9,1	11,0	13,6	14,9	14,6	17,1	13,1	15,8	15,6	11,7	11,5	14,7
130	9,5	7,4	11,3	13,6	13,2	-	17,3	10,6	9,4	14,6	13,0	15,2
150	9,7	10,9	18,7	-	-	-	17,7	11,1	9,2	16,9	12,5	14,7

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADES NA ÉPOCA DE SECA (%)											
	SEÇÃO Nº 16			SEÇÃO Nº 17			SEÇÃO Nº 18			SEÇÃO Nº 19		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	6,3	6,1	5,6	4,0	3,4	2,9	11,2	4,3	11,4	-	-	-
SUBLEITO 10	6,8	6,0	5,6	4,4	4,1	3,7	10,0	3,4	4,8	8,1	6,5	4,3
30	7,1	7,7	6,9	4,8	4,6	3,9	19,7	5,6	5,7	7,5	6,0	5,6
50	7,4	5,5	5,3	3,4	4,5	4,1	9,5	6,5	7,3	10,3	6,2	6,9
70	16,4	15,9	6,7	4,9	10,5	5,7	12,1	9,0	7,5	12,8	6,1	5,2
90	15,9	15,4	15,2	6,9	8,5	6,5	11,9	8,8	5,6	13,6	6,2	5,4
110	20,8	18,5	15,6	9,6	7,5	6,8	11,1	7,6	9,7	-	8,9	3,5
130	14,0	20,7	19,8	7,8	6,5	6,5	9,3	7,1	7,2	-	-	6,3
150	4,8	20,8	20,4	11,2	8,3	7,1	13,0	13,7	-	-	-	6,5

Nº 20	UMIDADES NA ÉPOCA DE SÊCAS (%)		
	BORDA	90 cm DA BORDA	CENTRO
REFORÇO	8,2	6,6	4,0
SUBLEITO			
10	9,1	7,4	4,5
30	11,4	10,4	4,1
50	26,3	22,1	4,2
70	23,6	12,4	13,1
90	27,2	22,8	10,5
110	21,2	23,1	11,7
130	20,5	18,4	13,2
150	19,7	-	18,0

APÊNDICE C

TABELAS COM OS RESULTADOS DE UMIDADES OBTIDOS
DURANTE O PERÍODO DE CHUVAS

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADE NA ÉPOCA DE CHUVAS (%)											
	SEÇÃO Nº 3			SEÇÃO Nº 4			SEÇÃO Nº 6			SEÇÃO Nº 7		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	5,3	8,5	11,3	-	-	-	8,4	8,9	7,2	2,4	2,9	2,8
SUBLEITO 10	4,9	8,9	9,0	1,8	1,8	1,7	7,8	8,3	6,6	2,1	2,7	3,0
30	8,3	10,3	6,0	1,7	1,5	1,7	7,2	7,6	9,1	2,3	2,7	2,8
50	12,0	11,2	6,0	1,8	1,9	1,6	6,5	8,4	6,9	2,4	2,6	3,5
70	12,0	9,5	7,6	1,6	1,9	1,5	6,0	6,7	7,7	2,5	2,7	3,5
90	8,4	9,3	9,4	1,8	2,0	1,6	6,8	6,9	9,4	3,4	2,6	3,5
110	9,8	10,0	8,8	1,9	1,6	1,8	7,1	7,5	6,6	3,8	3,2	3,8
130	10,7	12,3	10,2	2,1	1,6	1,4	7,0	6,8	3,3	3,1	3,9	2,6
150	10,7	9,6	9,1	2,0	1,5	1,3	6,8	9,7	7,0	2,7	2,4	4,8

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADE NA ÉPOCA DE CHUVAS (%)											
	SEÇÃO Nº 8			SEÇÃO Nº 9			SEÇÃO Nº 10			SEÇÃO Nº 11		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	6,0	5,2	5,7	3,6	4,2	3,6	-	-	-	5,8	5,7	5,5
SUBLEITO 10	6,7	6,3	5,9	4,4	4,7	3,3	6,9	5,2	5,0	6,4	6,2	6,1
30	6,8	6,5	7,2	3,5	6,0	5,0	6,5	5,8	5,1	4,8	6,2	5,3
50	7,3	7,1	8,7	3,2	7,2	5,5	7,1	6,9	5,4	8,8	12,0	5,3
70	8,9	8,7	8,6	2,7	3,6	4,2	6,9	7,0	5,7	9,1	11,7	-
90	8,8	8,1	8,3	3,1	3,9	3,3	7,2	6,4	4,9	-	12,0	-
110	10,5	9,6	9,7	3,8	4,6	3,5	6,1	5,9	5,1	-	-	-
130	11,3	11,1	11,9	4,3	5,3	3,4	5,3	6,8	4,9	-	-	-
150	12,8	11,9	14,3	7,4	3,8	5,9	6,7	-	6,5	-	-	-

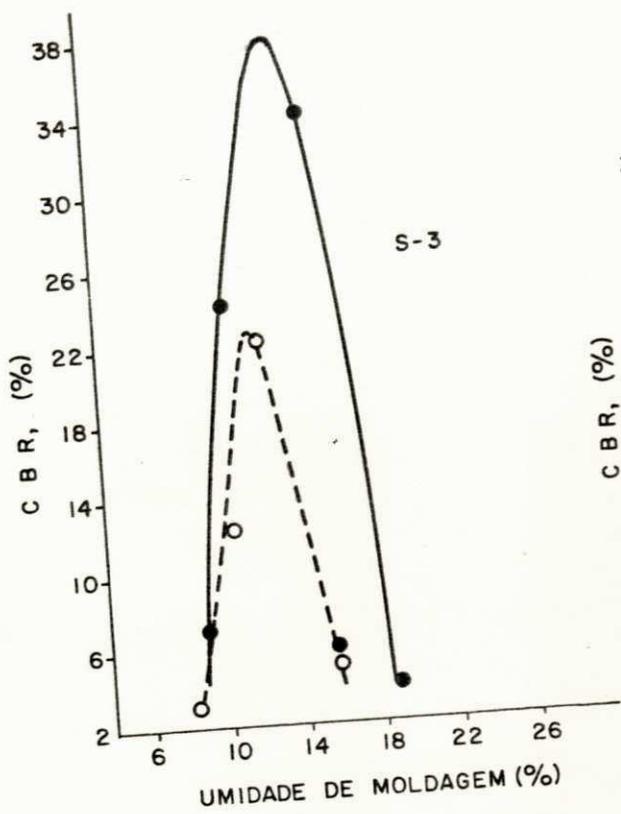
PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADES NA ÉPOCA DE CHUVAS (%)											
	SEÇÃO Nº 12			SEÇÃO Nº 13			SEÇÃO Nº 14			SEÇÃO Nº 15		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	6,8	6,9	5,2	5,7	7,8	4,7	7,0	6,3	4,0	4,8	4,2	3,6
SUBLEITO 10	7,1	6,4	6,3	10,1	4,3	3,8	10,3	3,3	5,2	4,7	4,8	4,2
30	9,7	11,7	8,4	10,4	8,9	7,7	10,8	9,7	7,3	3,5	3,1	3,8
50	6,9	11,8	8,6	19,8	14,0	14,6	15,7	14,9	11,3	8,5	12,1	7,9
70	12,2	8,2	10,1	17,1	16,7	9,7	15,6	15,6	16,9	14,8	13,0	9,6
90	10,8	14,1	10,4	17,9	12,9	15,6	17,3	17,5	16,0	14,6	9,7	11,1
110	9,4	14,1	11,2	-	-	17,6	16,4	16,6	18,4	15,9	11,8	10,2
130	9,3	12,4	11,3	-	-	-	16,5	16,6	15,3	16,1	10,0	10,0
150	9,0	13,1	16,2	-	-	-	13,0	10,3	11,3	12,6	10,5	10,3

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADES NA ÉPOCA DE CHUVAS (%)											
	SEÇÃO Nº 16			SEÇÃO Nº 17			SEÇÃO Nº 18			SEÇÃO Nº 19		
	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO	BORDA	90 cm DA BORDA	EIXO
REFORÇO	7,0	6,8	15,9	6,6	3,6	4,5	10,8	4,4	5,2	-	-	-
SUBLEITO 10	6,2	6,2	6,2	4,1	4,8	8,2	12,6	4,6	7,4	7,3	8,2	7,3
30	7,2	5,9	5,4	5,3	5,2	4,2	7,7	5,7	8,9	7,0	7,3	6,2
50	11,4	8,7	6,1	5,1	5,5	5,3	10,0	11,9	9,1	7,6	7,0	5,6
70	17,6	17,4	14,3	7,2	5,7	5,2	7,9	9,2	8,9	8,1	6,6	7,4
90	14,4	18,6	15,6	7,2	6,2	5,9	8,9	9,6	10,1	7,1	7,7	7,3
110	16,7	18,6	19,0	6,7	8,7	6,3	19,2	13,1	10,3	10,8	6,0	6,7
130	15,7	19,6	18,5	7,5	9,4	6,8	12,2	9,9	10,2	12,4	10,8	5,7
150	12,7	15,3	18,6	8,4	6,7	8,7	13,0	9,6	9,8	10,4	11,1	6,6

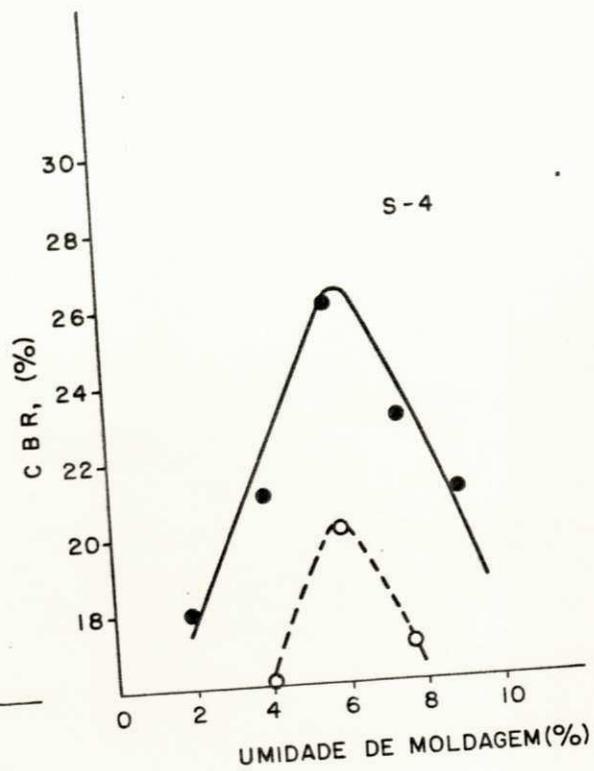
Nº 20	UMIDADES NA ÉPOCA DE CHUVAS (%)		
	BORDA	90 cm DA BORDA	CENTRO
REFORÇO	7,4	7,2	3,9
SUBLEITO			
10	17,9	6,8	6,8
30	8,6	9,0	4,9
50	8,3	6,4	4,6
70	11,6	22,4	4,4
90	13,2	23,6	16,4
110	20,9	15,3	15,6
130	19,1	23,7	14,1
150	20,3	17,9	13,8

APÊNDICE D

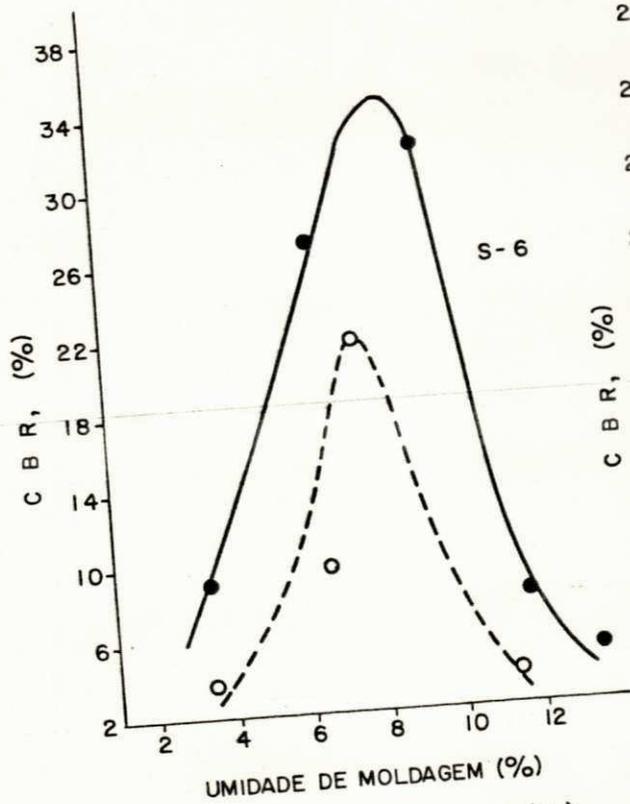
GRÁFICOS RELACIONANDO UMIDADES DE MOLDAGEM
E CBR COM E SEM IMERSÃO



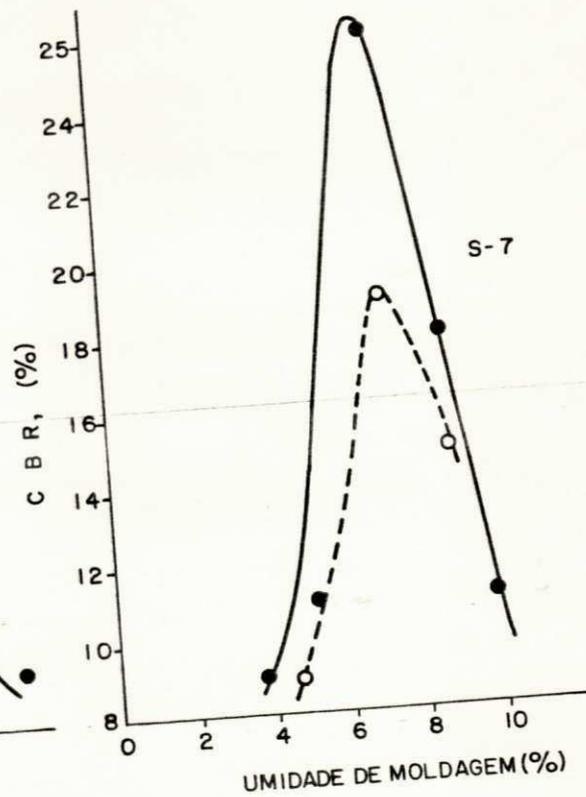
(a)



(b)

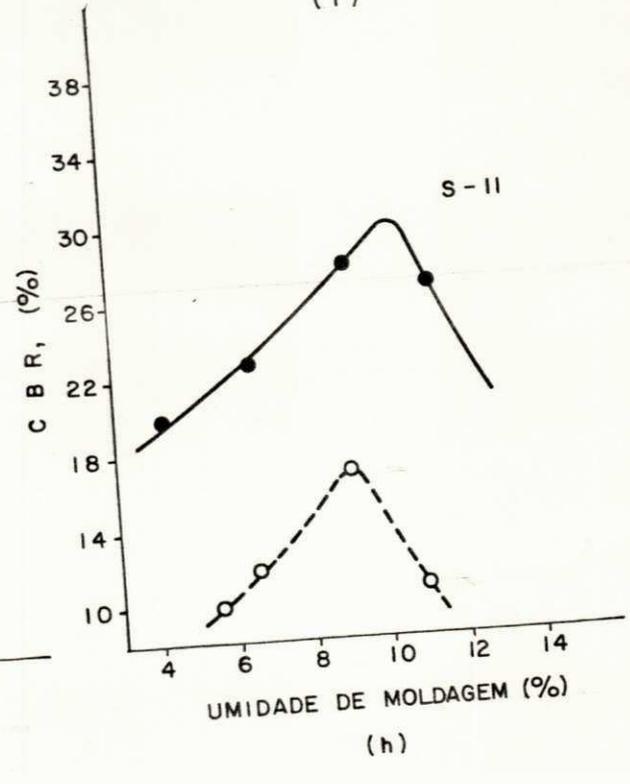
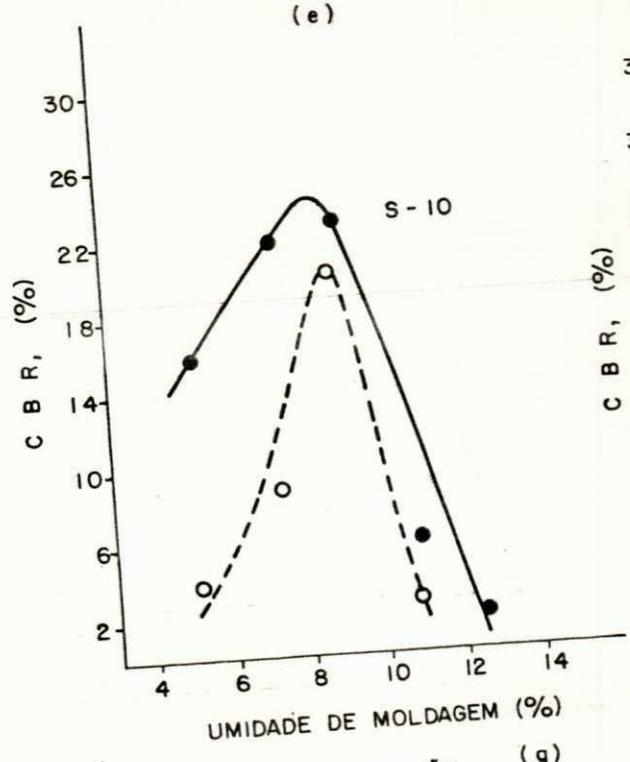
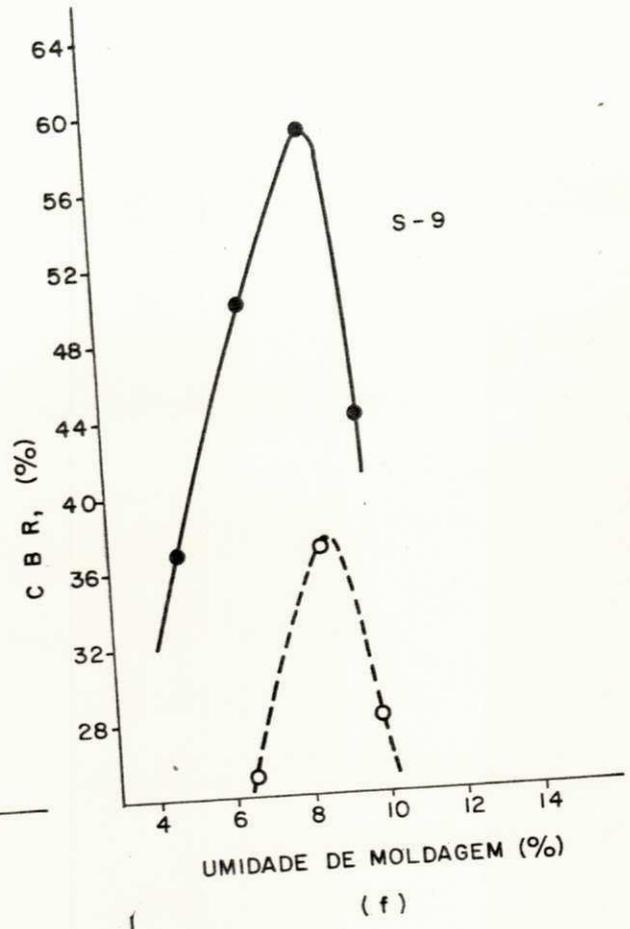
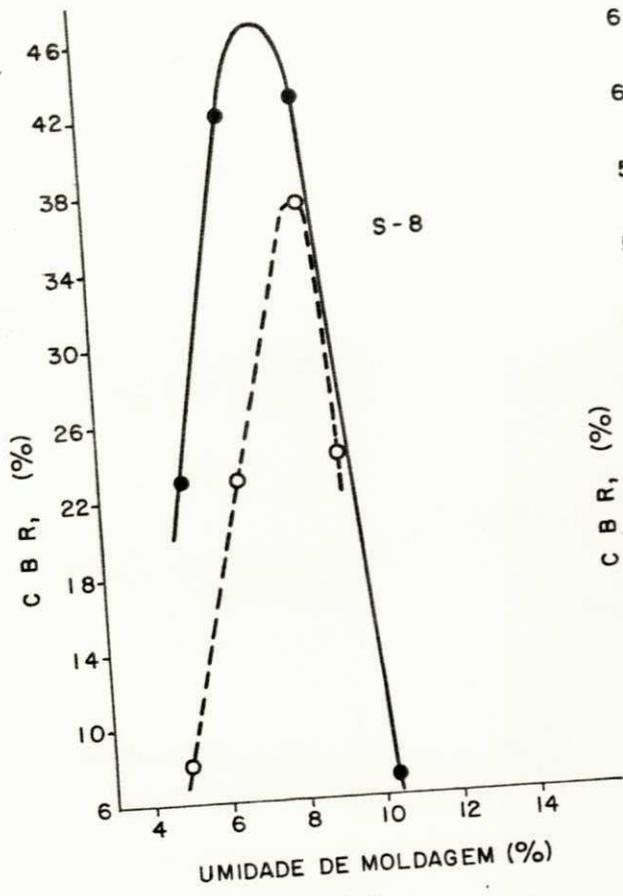


(c)

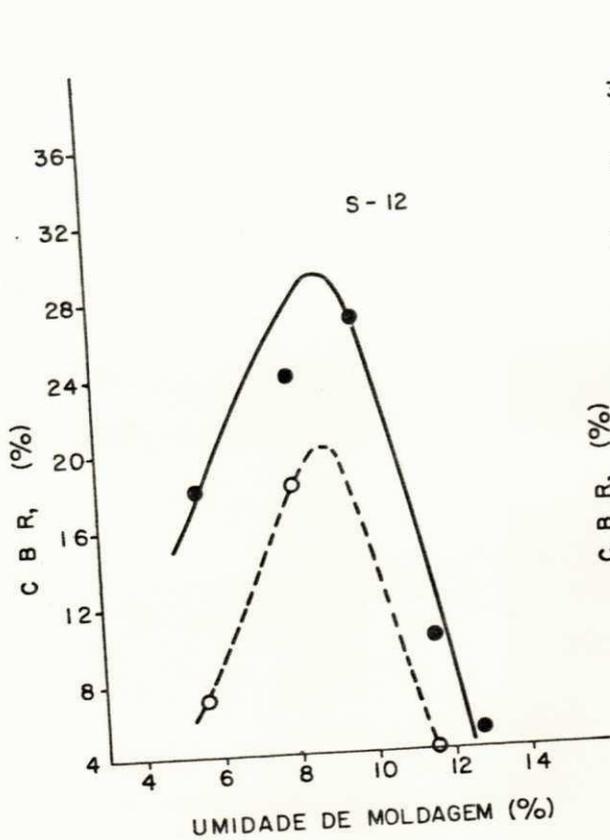


(d)

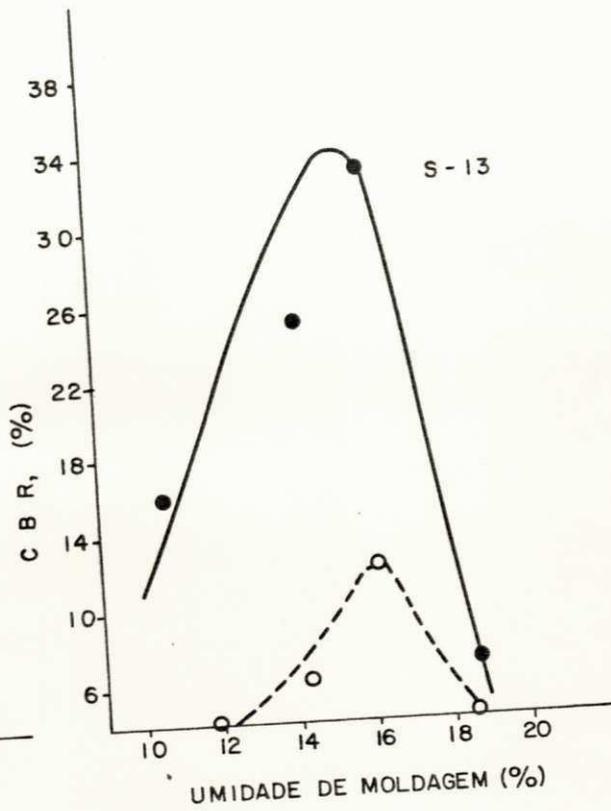
- CBR COM IMERSÃO
- CBR SEM IMERSÃO



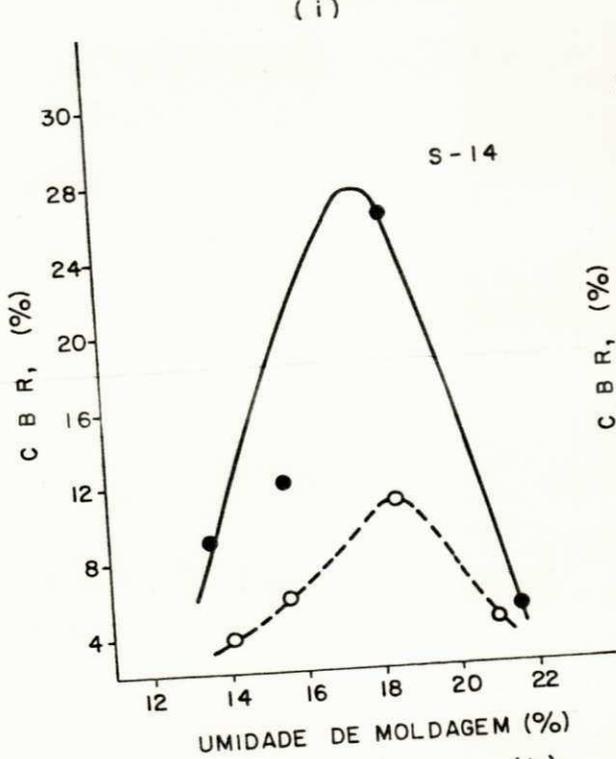
○ CBR COM IMERSÃO
● CBR SEM IMERSÃO



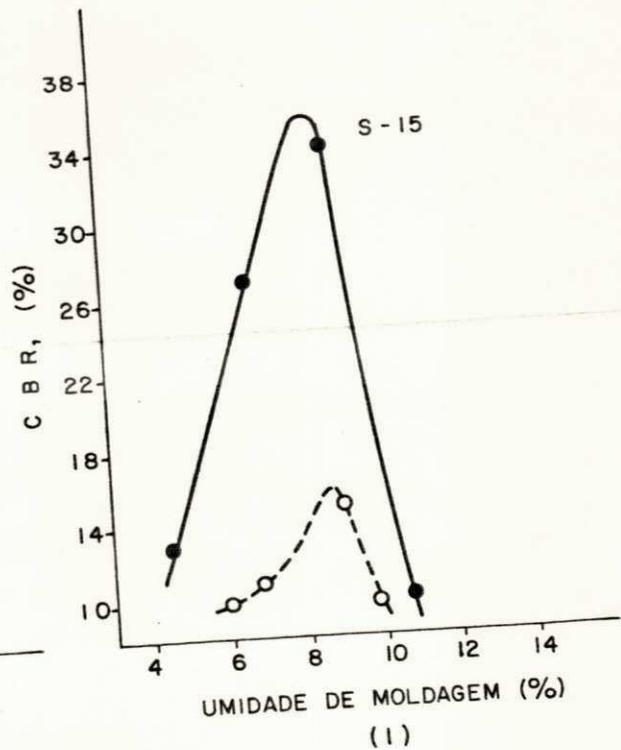
(i)



(j)

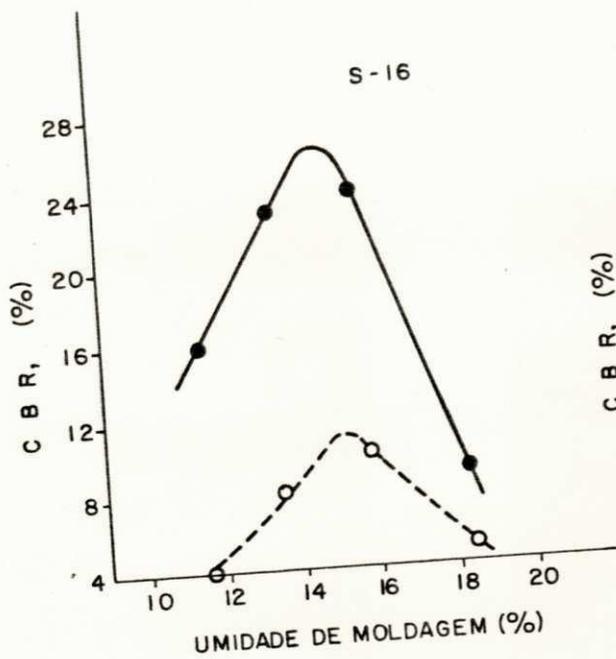


(k)

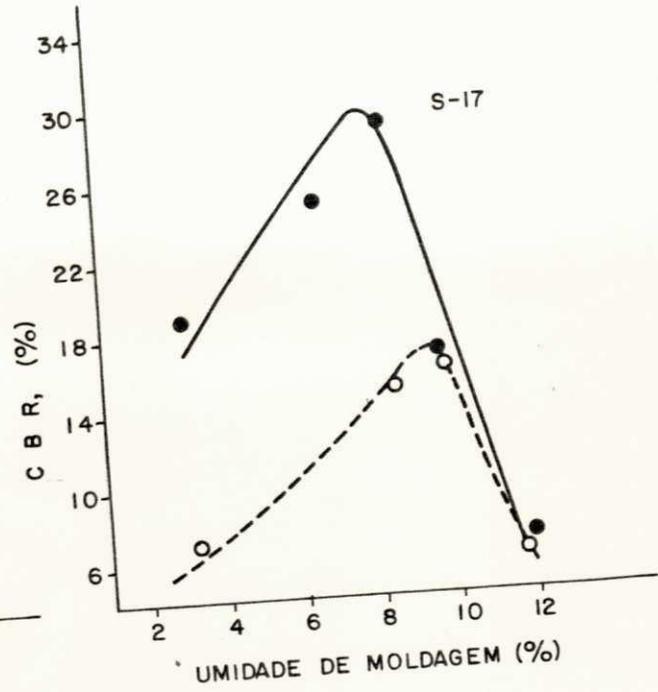


(l)

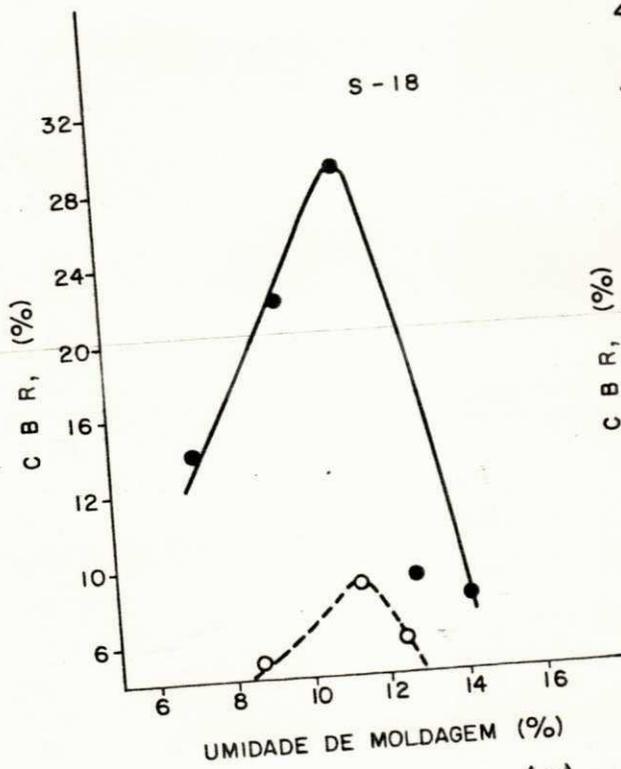
- CBR COM IMERSÃO
- CBR SEM IMERSÃO



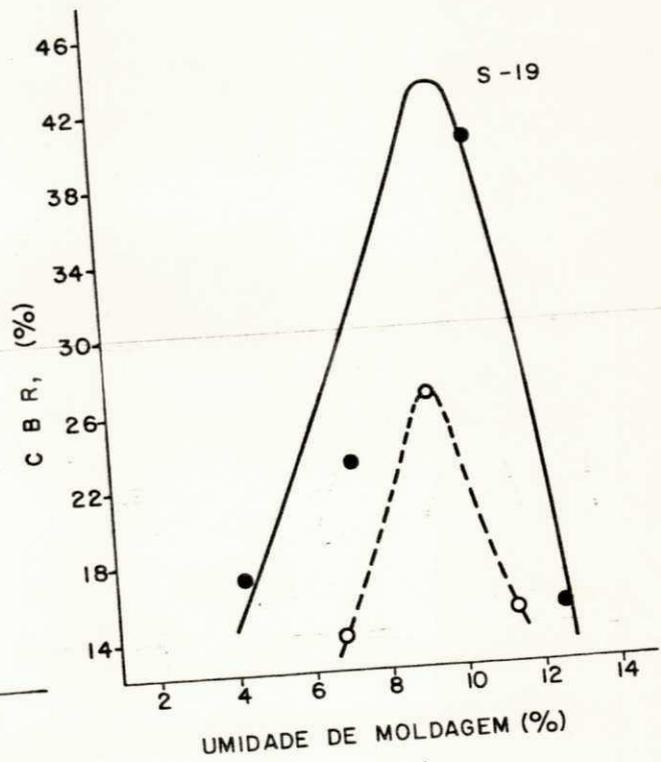
(m)



(n)

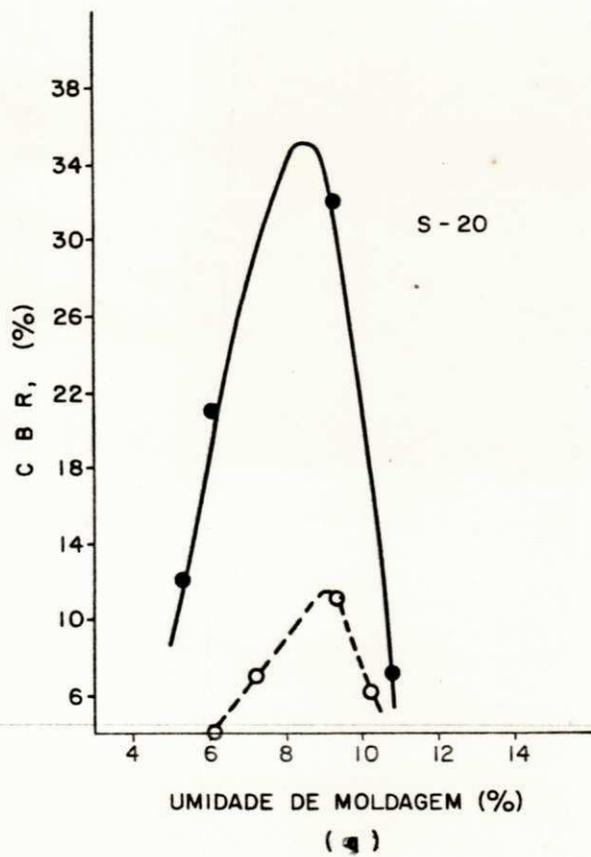


(o)



(p)

○ = CBR COM IMERSÃO
● = CBR SEM IMERSÃO



- CBR COM IMERSÃO
- CBR SEM IMERSÃO