

Estudo de Três Solos
Estabilizados com uma
Emulsão Asfáltica Catiônica

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT

ESTUDO DE TRÊS SOLOS ESTABILIZADOS COM UMA
EMULSÃO ASFÁLTICA CATIONICA

Ademir Montes Ferreira
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
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRÁU DE MESTRE EM CIÊNCIAS(M.Sc.).

Aprovado por:

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

F. Bezerra
PROF. J. G. CABRERA
PRESIDENTE

Heber Carlos Ferreira
PROF. HEBER CARLOS FERREIRA
EXAMINADOR INTERNO

João Batista Q. de Carvalho
PROF. JOÃO BATISTA Q. DE CARVALHO
EXAMINADOR INTERNO

Geraldo Ramos Borba
PROF. GERALDO RAMOS BORBA
EXAMINADOR EXTERNO

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA-BRASIL
SETEMBRO - 1980

A DEUS, por ter me oferecido este caminho tão
árido mas tão gratificante.

A meus pais

A minha mãe Iracy

A meus irmãos

A minha esposa

A meu filho.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Eng^o ADEMILSON MONTES FERREIRA e ESPOSA, por toda a ajuda, dedicação e estímulo dados ao autor ao longo de todos estes anos.

Ao Eng^o RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA, pelo apoio e estímulo dados ao autor durante a realização deste trabalho.

Ao Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, residência de Patos, na pessoa do Eng^o SALVIANO SANTOS FILHO, o qual forneceu gentilmente o material empregado neste trabalho.

Ao Prof. FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA pelo apoio e incentivo dados ao autor durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Laboratorista VANILDO AMARANTE pela ajuda na realização dos ensaios, e aos funcionários ANTONIO MARCOS DE SOUZA pelo serviço datilográfico e WINDSOR RAMOS pela confecção dos desenhos.

ESTUDO DE TRÊS SOLOS ESTABILIZA
DOS COM UMA EMULSÃO ASFÁLTICA CATIONICA

Dissertação de Mestrado

por

Ademir Montes Ferreira

S U M Á R I O

A falta de uma metodologia apropriada para o dimensionamento e ensaios de laboratório para condições locais representa a maior dificuldade para o emprego eficiente de sistemas solo-emulsão asfáltica na construção de pavimentos flexíveis.

Esta investigação apresenta os resultados de um estudo de uma metodologia de cura acelerada. O processo de cura utilizado, secagem das amostras a 60°C durante 24h, mostrou-se plenamente satisfatório podendo ser utilizado no laboratório.

As variáveis investigadas foram teor de umidade de compactação e quantidade de emulsão asfáltica cationica. Estas variáveis foram estabelecidas através da medida das seguintes propriedades: peso unitário, absorção, resistência à compressão simples e resistência à tensão de tração indireta.

O trabalho mostra que o teor ótimo de umidade para máxima massa específica aparente seca foi muito aproximada do teor ótimo de umidade para máxima resistência. É também mostrado que a porcentagem ótima de emulsão asfáltica pode ser determinada usando-se somente o critério da resistência máxima, pois os valores de absorção foram muito pequenos para os casos estudados, sendo inferiores aos máximos comumente utilizados por outros investigadores.

STUDY OF THREE SOILS STABILIZED
WITH A CATIONIC ASPHALTIC EMULSION

M.Sc. Dissertation

by

Ademir Montes Ferreira

A B S T R A C T

Lack of appropriate testing procedures and design methods for local conditions are still the main drawbacks for the efficient utilization of soil-asphaltic emulsion systems in flexible pavement construction.

This investigation presents the results of an study in which an accelerated testing procedure was developed and used. Three soils from the region north east were selected as representative of the local variations and used for the study.

The variables investigated were compaction moisture content and quantity of cationic asphaltic emulsion. These variables were assessed by measuring the following selected engineering properties. Unit weight, absorption, unconfined compressive strength and indirect tensile strength.

The study shows that the optimum moisture content for maximum dry unit weight approximates very closely the optimum moisture content for maximum strength, it also shows that the optimum percentage of asphaltic emulsion may be determined using only the criterium of maximum strength since the values of absorp-

tion were in very case very small and far below of the maximum values commonly used by other investigators.

Í N D I C E

		<u>PÁG.</u>
CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	II.1. Introdução	3
	II.2. Estabilização de Solos	3
	II.2.1. Estabilização Física	3
	II.2.2. Estabilização Química	4
	II.2.3. Estabilização Físico-Química	4
	II.3. Estabilização Betuminosa	4
	II.3.1. Desenvolvimento Histó <u>r</u> ico	5
	II.4. Emulsão Asfáltica	7
	II.5. Estabilização de Solos com Emulsão Asfáltica	10
	II.5.1. Mecanismo da Estabili <u>z</u> ação com Emulsão Asfáltica	11
	II.5.2. Variáveis Mais Importantes que Influenciam a Estabilização com Emulsão Asfáltica	13
	II.5.2.1. Tipos de So <u>l</u> os	13
	II.5.2.2. Teor de Água	14
	II.5.2.3. Condição de Cura	15
	II.5.2.4. Influência do Teor de Emulsão Asfáltica	16

	<u>PÁG.</u>
	II.5.2.5. Tipo de Asfal to Base 16
	II.5.2.6. Métodos de Me didas de Re sistência 17
	II.6. Sumário 18
CAPÍTULO III	OBJETIVO DA PESQUISA 20
CAPÍTULO IV	MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA 21
	IV.1. Solos 21
	IV.1.1. Jazida Santa Rosa 23
	IV.1.2. Jazida Patos 24
	IV.1.3. Jazida Castelo 25
	IV.2. Emulsão Asfáltica 26
CAPÍTULO V	MÉTODOS DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS 27
	V.1. Introdução 27
	V.2. Massa Específica Real 27
	V.3. Análise Granulométrica 29
	V.4. Limites de Atterberg 29
	V.4.1. Limite de Liquidez 29
	V.4.2. Limite de Plasticidade 32
	V.5. Determinação do pH 32
	V.6. Ensaio de Compactação 32
	V.7. Ensaio de Área Específica 34
	V.8. Ensaios Realizados na Emulsão Asfáltica 34
	V.8.1. Ensaio de Viscosidade 34

V.8.2.	Resíduo por Destilação	36
V.8.3.	Densidade da Emulsão	36
V.9.	Estudo Limitado para Definir as Condições de Cura dos Es <p>pecimens</p>	36
V.9.1.	Compactação para o So <p>lo Puro</p>	38
V.9.2.	Compactação para Mis <p>tura Solo-Emulsão</p>	38
V.9.3.	Determinação do Tempo de Cura a 60°C	41
V.10.	Compactação do Sistema Solo- <p>Emulsão</p>	42
V.11.	Ensaio de Compressão Simples	45
V.12.	Ensaio de Tensão de Tração Indireta	46

CAPÍTULO VI

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DIS- <p>CUSSÃO</p>	54
VI.1. Introdução	54
VI.2. Resultados e Discussão	54
VI.2.1. Introdução	54
VI.2.2. Influência do Teor de Umidade na Massa Específica Aparente Seca do Sistema So- <p>lo-Emulsão</p>	55

	VI.2.3. Influência do Teor de Umidade na Resistência à Compressão Simples e à Tensão de Tração Indireta no Sistema Solo-Emulsão	55
	VI.2.4. Comportamento do Sistema Solo-Emulsão e Absorção D'Água	66
CAPÍTULO VII	CONCLUSÕES	73
CAPÍTULO VII	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE A	Valores obtidos para o ensaio do Penetrômetro de cone na determinação do limite de liquidez	81
APÊNDICE B	Método de ensaio para determinação da área específica	83
APÊNDICE C	Cálculo da constante para obtenção de tração indireta	86
APÊNDICE D	Valores obtidos na determinação do período de cura	88
APÊNDICE E	Valores obtidos para o traçado das curvas de compactação dos sistemas solo-emulsão	91

APÊNDICE F	Valores para o traçado das curvas de Resistência em função do teor de umidade para cada teor de emulsão	94
APÊNDICE G	Valores de umidade ótima para massa específica aparente seca máxima e máximas resistências	98

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

As emulsões betuminosas são usadas amplamente na conservação e construção de pavimentos, desde rodovias e aeroportos com elevado volume de tráfego, até estradas rurais e vias urbanas de baixos volumes de tráfego. Apesar de emulsões estarem disponíveis desde 1903 e serem usadas extensamente nos Estados Unidos desde os anos de 1930, problemas recentes de energia focalizaram atenção sobre o crescente uso deste material (1).

A partir de 1976 mais precisamente, foi iniciado, no Brasil, um programa de construção de rodovias de baixo custo, no qual um dos tipos de pavimentos, a ser estudado, seria o constituído de um solo estabilizado com emulsão asfáltica.

Apesar de já existirem muitas rodovias construídas com este tipo de pavimento, pode ser sentida uma deficiência muito grande, principalmente no que diz respeito à metodologia empregada para estes trabalhos, sendo a mesma, na maioria das vezes, adaptada de métodos aplicáveis a outros tipos de misturas de comportamento adverso, como por exemplo, concreto asfáltico.

É interessante portanto que se intensifique as pesquisas sobre sistemas solo-emulsão asfáltica a fim de se

estabelecer uma metodologia mais racional tanto para o dimen
sionamento, como para os estudos de laboratório, procurando-se
aproximá-los, o mais possível, das condições reais a que as
misturas, estarão sujeitas durante sua vida útil.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - Introdução

O propósito desta revisão é apresentar dados relevantes sobre os trabalhos de importância já realizados no campo da estabilização de solos, principalmente aqueles referentes à estabilização de solos com emulsões betuminosas. A maior parte desta revisão foi baseada no trabalho de Bevis(2).

II.2 - Estabilização de Solos

Denomina-se estabilização de solos ao processo de natureza física, química ou físico-química que permite obter propriedades desejáveis nestes solos. Fazendo, por exemplo, com que suas estabilidades permaneçam sob a ação de cargas externas e também sob a ação dos agentes climáticos (3).

II.2.1 - Estabilização Física

É aquela que utiliza a aplicação de uma energia externa. Este tipo de estabilização inclui, por exemplo, a

correção granulométrica de um solo ou agregado de modo que a granulometria resultante esteja enquadrada nas especificações vigentes. O exemplo mais comum de estabilização física, é o processo de compactação.

II.2.2 - Estabilização Química

É o processo que resulta na produção de produtos cimentantes através da reação química entre os minerais do solo e o material estabilizante, produzindo um material relativamente rígido.

II.2.3 - Estabilização Físico-Química

É um processo no qual um aditivo origina mudanças tanto físicas quanto químicas na estrutura do solo. O cimento, quando usado como aditivo, produz um sistema rígido, enquanto que, se o aditivo for um produto asfáltico, o mesmo irá causar o aparecimento de um sistema de natureza flexível. O asfalto atua basicamente como agente coesivo, quando em contato de solos granulares, enquanto que, quando atuando em solos coesivos, sua ação é basicamente impermeabilizante, embora possa ocorrer alguma reação química.

II.3 - Estabilização Betuminosa

Materiais betuminosos são usados em conjunto com solos (e misturas solo-agregados) para duas finalidades principais. Em uma aplicação, o material betuminoso pode fornecer coesão à mistura de solo estabilizada, como ocorre no

caso de estabilização de areias ou solos muito arenosos. Por outro lado, o material betuminoso pode ser incorporado num solo fino com o propósito de impermeabilizá-lo, isto é, o material betuminoso é adicionado para reduzir os efeitos nocivos da água que pode penetrar no solo durante sua vida útil. Em alguns casos, o material betuminoso pode cumprir ambas as funções: fornecer coesão e a necessária impermeabilização.

Um dos mais confusos aspectos da estabilização betuminosa de solos é a falta de uma terminologia adequada para descrever os tipos de misturas utilizadas sob este título. Esta falta de uma terminologia uniforme tem impedido um maior intercâmbio de informações sobre o assunto, pois muitos dos termos empregados têm significação apenas local (4).

II.3.1 - Desenvolvimento Histórico

Pode-se dizer que a estabilização do tipo solo-betume teve seu início, quando engenheiros rodoviários começaram a tratar rodovias com óleo cru. Este processo teve início, quando engenheiros rodoviários, trabalhando nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que, ao espalharem óleo cru sobre as estradas de terra que levavam a estes campos, reduziam o pó existente nas mesmas, tornando-as mais aptas para resistir aos rigores do tráfego e do tempo.

Hoje, entretanto, existem algumas controvérsias a respeito de como e quando o processo foi realmente iniciado. Alguns autores consideram que foi na Califórnia em 1904, enquanto outros, em Massachusetts, poucos anos mais cedo. Seguindo estes passos iniciais, foram desenvolvidos "cut backs" de cura rápida e média. Porém, foi descoberto que, pa

ra certos tipos de solos, tornava-se bastante difícil a distribuição dos "cutkacks". Isto provocou, por sua vez, o aparecimento das emulsões asfálticas para a estabilização dos solos, sendo usadas inicialmente por McKesson em 1930 (2).

No final de 1930, devido a iminência da Segunda Guerra Mundial, um grande interesse foi mostrado pelo potencial das estabilizações solo-betume, como um método rápido para a construção de aeroportos e pavimentos rodoviários. Também durante os anos de guerra, foram desenvolvidos muitos métodos de estabilização e foram encontradas contradições entre os resultados obtidos, basicamente devido a um entendimento inadequado das variáveis envolvidas.

Estudos de estabilização betuminosa, utilizando cal como um aditivo preparatório, foram realizados durante e imediatamente após a guerra, inicialmente por Benson e Becker, (2) notando-se que estas pesquisas foram extremamente limitadas no seu desenvolvimento.

Devido à multiplicidade dos métodos de projeto e à evolução das técnicas laboratoriais, e também a dúvidas do processo de construção, as estabilizações de solos com betume desenvolveram muito pouco entre a 2ª Guerra Mundial e o fim de 1950.

Devido à estabilização betuminosa ter sido pouco empregada após a guerra, a indústria do petróleo concentrou-se na produção de materiais com propriedades basicamente dirigidas para misturas com agregados. Muitos trabalhos de pesquisa indicaram que isto resultou em materiais betuminosos que não são necessariamente aconselháveis para misturas com solos, e isto, em parte, tem retardado o desenvolvimento da

verdadeira estabilização betuminosa (5).

II.4 - Emulsão Asfáltica

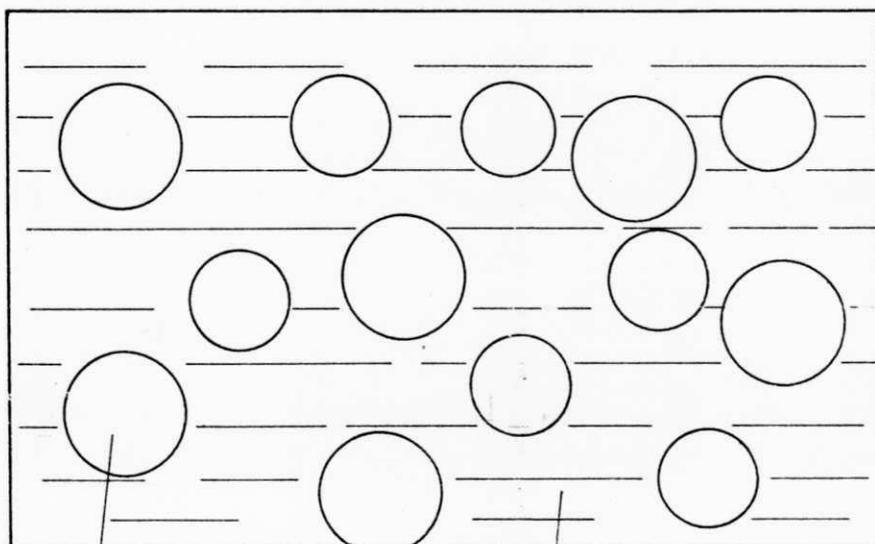
Uma emulsão pode ser definida como um sistema bifásico, constituído de dois líquidos não miscíveis, sendo um disperso no outro sob a forma de glóbulos. Tem-se adotado designações especiais para indicar qual a fase dispersa e qual a fase contínua. Emulsões óleo na água ou emulsões diretas são aquelas que têm um óleo como fase dispersa e a água como fase contínua. O inverso ocorre quando a emulsão é do tipo água no óleo ou emulsão inversa (6).

Uma emulsão asfáltica é uma mistura de asfalto e água, onde o asfalto é geralmente a fase dispersa e a água a fase contínua.

Para evitar que os glóbulos de asfalto se unam, é necessário que a emulsão contenha um agente emulsificante, o qual acha-se dissolvido na fase aquosa. Para isto, utiliza-se comumente sabões fabricados pelo próprio refinador, a partir de bases sabonosas especiais. Além do agente emulsificante, a emulsão pode conter um agente estabilizante, que torna ainda mais difícil a união das partículas. A figura 3.1 mostra a representação esquemática de uma emulsão (7).

Os dois tipos de emulsão asfáltica mais usados são: emulsão aniônica e emulsão catiônica. O tipo é determinado pelo gênero do emulsificante empregado. A parte orgânica do emulsificante adere às partículas de asfalto e transmite uma carga positiva (+) ou negativa (-) à superfície do complexo asfalto-emulsificante. Para a emulsão aniônica, a carga

FIGURA 3.1 - Representação esquemática de uma emulsão asfáltica.



ASFALTO EM FORMA
DE ESFERAS

ÁGUA COM AGENTE
EMULSIFICANTE

da superfície asfáltica é negativa, e para a emulsão catiônica a carga é positiva (8).

Os emulsificantes aniônicos são constituídos de ácidos graxos abiéticos e naftênicos, salificados por uma base forte (hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio).

Os emulsificantes catiônicos são constituídos de bases aminadas salificadas por um ácido, sendo usado geralmente o ácido clorídrico (9).

Diversos autores mostraram que as emulsões asfálticas catiônicas foram desenvolvidas com base no princípio de que a superfície carregada positivamente dos minúsculos glóbulos de asfalto seria fortemente atraída para a superfície de agregados eletronegativos. E, por outro lado, a superfície (carregada negativamente) dos minúsculos glóbulos de asfalto das emulsões aniônicas seria atraída para a superfície dos agregados eletropositivos. Desta forma, a emulsão catiônica deve desenvolver uma forte ligação em agregados, contendo grande porcentagem de sílica, e, por exemplo, quartzo; e a emulsão aniônica deve desenvolver boa aderência da película asfáltica com agregados de calcários.

Os proponentes das emulsões catiônicas indicaram que ela resolveria problemas de campo onde as emulsões aniônicas não pudessem ser empregadas devido a agregados insatisfatórios, a tempo frio, ou a condições de umidade. A tecnologia dos anos 60 já desenvolveu emulsões aniônicas e catiônicas adequadas para ambos os tipos de agregados, bem como para os tipos intermediários de misturas (1).

Geralmente o tipo de trabalho incluirá capas selantes entre camadas betuminosas, ou capas selantes so

bre pavimentos não betuminosos. Basicamente, as emulsões de ruptura rápida são instáveis, isto é, elas contêm o agente emulsificante em quantidade relativamente pequena e, devido a isso, pequenos distúrbios poderão provocar a sua rutura.

As emulsões de rutura média são usadas para misturas com agregados de graduação aberta e podem ser empregadas em trabalhos de penetração, nos quais o asfalto líquido penetra através de uma camada de agregado para capas selantes e para tratamentos superficiais. Estas emulsões são mais estáveis do que as emulsões de ruptura rápida; elas contêm mais agente emulsificante e dificilmente atingem a rutura antes que os serviços de mistura e compactação tenham sido concluídos, quando são usadas com agregados de graduação aberta.

As emulsões de rutura lenta são usadas sempre que é requerida uma mistura de alta estabilidade. Um uso muito comum das emulsões de rutura Lenta é em mistura in situ onde a emulsão é misturada com o material existente no leito da estrada, o qual pode ser granular, contendo porém muitos finos. A grande quantidade de superfície específica, apresentada pelos finos do solo, pode causar a rutura da emulsão, tanto de rutura rápida, quanto de rutura média, antes que o processo construtivo tenha sido concluído. Somente uma emulsão com a quantidade e o tipo de agente emulsificante, para produzir grande estabilidade, é adequada a este tipo de serviço(3.)

II.5 - Estabilização de Solos com Emulsão Asfáltica

O comportamento de uma estrada depende muito da

camada de base, cuja natureza é função dos agregados disponíveis, da intensidade e do tipo de tráfego previstos. Durante muito tempo foi usado pavimento do tipo macadame hidráulico. Estes tipos de camadas são bastantes caras, pois são constituídas unicamente de material britado.

Esses últimos anos, apresentaram duas evoluções: no Brasil, a tendência de usar exclusivamente agregados britados (brita graduada); fora do Brasil, os engenheiros rodoviários, aos poucos, chegaram à conclusão de que devem ser proibidos os agregados plásticos, mesmo os bem graduados. Volta-se portanto, aos defeitos dos macadames: o de ter uma coesão insuficiente. Logo, entende-se que as camadas de base, sejam exclusivamente construídas por materiais selecionados e tratados, quer por ligantes hidráulicos, quer por ligantes hidrocarbonados (10).

Além do mais, quando há escassez de agregados pétreos, é necessário usar os agregados locais e, nesse caso, é necessária a utilização das técnicas de estabilização química ou físico-química cuja finalidade é dar aos materiais, tendo granulometria ou plasticidade incorretas, propriedades pelo menos iguais àsquelas dos materiais bem graduados (10).

A tendência moderna é, portanto, para os tráfegos pesados e de alta intensidade, substituir as camadas de base de materiais não tratados, por camada tratadas com ligante hidráulico ou asfáltico (11).

II.5.1 - Mecanismo da Estabilização com Emulsões Asfálticas

Os mecanismos, através dos quais as emulsões

betuminosas estabilizam os solos, variam conforme as partículas de betume sejam carregadas positiva ou negativamente, isto é, se a emulsão é catiônica ou aniônica.

Tipicamente, um sistema estabilizado com emulsão betuminosa é obtido misturando a emulsão com solo úmido (com teor de umidade total, igual ou próximo ao ótimo para a máxima massa específica aparente seca compactada), compactando, e, em seguida, curando. Durante a mistura, a distribuição uniforme do ligante é mais fácil de ser obtida se as partículas de betume mantiverem suas identidades. Assim, a estabilidade da mistura da emulsão é importante no processo da estabilização.

No caso de emulsões aniônicas existe, após a compactação, um sistema no qual os vazios da estrutura do solo são preenchidos com as partículas de betume. Teoricamente, estas partículas devem cobrir as partículas de solo, durante a cura, sob os esforços da tensão superficial. Porém, se isto ocorrer, o processo pode tornar-se muito lento, devido ao caráter semi sólido do betume.

Quando imersos em água, após a cura, os solos estabilizados com emulsão aniônica tendem a absorver água rapidamente, com uma conseqüente perda de resistência. Também a presença do emulsificante torna certas regiões do solo cobertas de betume, susceptíveis à ação da água, devido à ação repulsiva entre o agente emulsificante e as partículas de argila, isto é, são ambos carregados negativamente, contribuindo sempre para uma maior perda de resistência e absorção d'água.

A teoria acima exposta, estabelecida por Michaels e Puzinanskas (2), apresenta-se mais realista do que a proposta por Mckesson, que estabeleceu que, durante a cura,

as esferas de betume são atraídas em filmes, ou cobrem as partículas de solo, através de forças associadas, com a evaporação de filmes de água, proporcionando filmes resistentes à água, os quais proporcionam uma estabilização permanente. A teoria de McKesson poderia ser aplicável somente a solos granulares.

Com emulsões catiônicas, as moléculas emulsificantes podem ser fortemente ligadas às partículas do solo, carregadas negativamente, fornecendo-lhes propriedades oleosas.

Isto significa que, ao contrário das emulsões aniônicas, o betume irá aderir às partículas do solo, sempre que elas estiverem úmidas. Assim, a resistência coesiva é produzida na massa do solo e a tenacidade da ligação solo-betume é melhorada contra a subsequente ação da água, de modo que, neste caso, há menos perda de resistência do que com as emulsões aniônicas, quando postas em imersão.

Entretanto, surgem outros problemas tais como a rutura precoce das emulsões catiônicas (devido à atração dos glóbulos de betume pelas partículas de argila do solo) e a existência de um teor de emulsão para o qual a rutura da emulsão ocorre por meios mecânicos (2).

II.5.2 - Variáveis mais Importantes que Influenciam a Estabilização com Emulsões Asfálticas.

II.5.2.1 - Tipos de Solos

Segundo Ferm e Borgfeldt (12) a área da superfície e a composição química dos agregados são dois parâmetros

tros de importância no estudo da estabilização de solos com emulsão asfáltica. Geralmente, quanto maior for a área superficial do agregado, maior será a dificuldade de se obter uma estabilidade suficiente para a mistura. Assim, a porosidade do agregado e sua porcentagem de finos irão influenciar o comportamento de misturas com emulsões asfálticas (12).

As emulsões asfálticas catiônicas aderem melhor com uma maior variedade de agregados de diferentes constituições químicas do que as emulsões aniônicas. Os resultados de adesão de emulsões aniônicas são, muitas vezes, fracos em misturas com agregados silicosos e com algumas misturas de agregados; melhores resultados são obtidos quando são usados agregados altamente calcários ou dolomíticos.

É, também, bastante importante em estabilização de bases com emulsões asfálticas, a adesão entre as emulsões e as superfícies dos minerais argílicos encontrados nos solos. No passado, devido à facilidade de ocorrer inchamento em muitos solos argilosos, estes solos eram impedidos de serem estabilizados com emulsões aniônicas. Geralmente estes solos eram do tipo montmorilonita, os quais, em presença da água, tornam-se bastante expansivos. Como pode ser observado no trabalho de Ferm e Borgfeldt (12), excelentes resultados foram obtidos quando se estabilizou este tipo de solo com 7% de uma emulsão asfáltica catiônica.

II.5.2.2 - Teor de Água

A água, tanto na forma de vapor quanto na forma líquida, é a maior causa de falhas de aderência ocorridas

em misturas agregado-emulsão (13).

A água é um líquido bipolar no qual os centros elétricos das cargas positiva e negativa não coincidem. Em um campo eletrostático, as moléculas de água podem ser facilmente atraídas para a superfície de uma rocha ácida para satisfazer seu desequilíbrio das cargas de superfície.

O pH da água é tido como de alguma importância no fenômeno da aderência. Majidzadeh e Brovold (13) indicaram que uma solução de pH elevado favorece a retenção de betume sobre pedras básicas e soluções de pH baixo favorecem a retenção de betume sobre pedras ácidas. Entretanto outros investigadores acham que o pH da água não tem efeito sobre a aderência do ligante no agregado (13).

Justo e Hariharan (14) encontraram efeitos consideráveis do teor de água da mistura solo-betume sobre diferentes propriedades tais como: massa específica aparente seca, absorção d'água após imersão e estabilidade.

II.5.2.3 - Condição de Cura

A cura é uma etapa necessária em trabalhos de estabilização betuminosa, pois é durante esta fase que o teor de água é reduzido, facilitando a cobertura da superfície mineral com o asfalto base (2).

Scroggin (2) considera que a máxima perda de água, durante a cura, é mais importante para a durabilidade da mistura do que a obtenção da massa específica aparente seca na compactação.

Dunn e Salen (15) encontraram um significan-

te aumento na resistência ao cisalhamento de misturas solo-e -
mulsão quando era aumentada a temperatura de cura. Porém, ao
serem atingidas temperaturas acima de 60^o, o incremento na re-
sistência ao cisalhamento tornava-se cada vez menor.

II.5.2.4 - Influência do Teor de Emulsão

A escolha do teor de Ligante adequado para a
mistura com um determinado tipo de agregado é um dos princi -
ais problemas no projeto de misturas betuminosas. Do ponto de
vista elástico é necessário encontrar o mais alto teor de li
gante que poderá ser usado, sem o risco de se atingir deforma-
ções plásticas excessivas, provocadas pelas condições atuantes
de tráfego e temperatura (6).

Para obter a máxima resistência possível à de
formação, o material deve conter o ligante suficiente para dar
coesão e para permitir a compactação adequada, muito embora de
va ser observado que este teor será geralmente mais baixo do
que aquele empregado na prática, devido a considerações de du-
rabilidade e permeabilidade (6).

II.5.2.5 - Tipo de Asfalto Base

São poucos os trabalhos que procuram estabe
lecer os efeitos do tipo de asfalto base na estabilização com
emulsão asfáltica.

McKesson (2) indicou que asfaltos duros (pene-
tração abaixo de 100) devem ser usados para estabilizar solos
coesivos, isto deve-se ao fato do betume atuar principalmente

como agente impermeabilizante. Para solos granulares, ele in dica um asfalto mole (penetração de aproximadamente 200) pois ele fornece filmes mais espessos de asfalto, os quais aumen - tam a coesão entre as partículas (2).

Haterly e Leaver (16) aconselham o uso de as faltos de penetração 180-200 ou 280-320, para emulsões nor mais, embora, em condições especiais, possa ser incorporado um fluxante volátil. Do mesmo modo, Ingles e Metcalf (17) acon selham o uso de asfalto de penetração 200 com uma viscosidade, variando entre 3 e 240 Engler.

II.5.2.6 - Métodos de Medida de Resistência

Existe muita controvérsia a respeito do método mais adequado para avaliar a resistência de misturas solo-e - mulsão, pois este se relaciona sempre com o tipo de trabalho para o qual a mistura é elaborada.

Winterkorn (17,18), discutiu o uso de resistência à compressão não confinada, usando amostras compactadas à mas sa específica seca máxima, para o teor ótimo de umidade, para vários teores de asfalto. Ele comparou a resistência seca ao ar com a resistência de amostras imersas por sete dias, e recomendou um limite mínimo de resistência de 530 kPa.

Leonard (17) usou medidas de resistência não con finada para corpos de prova, moldados em cilindros de ensaios Proctor Normal, curados ao ar e imersos por quatro dias.

Na Austrália, tem sido muito utilizado o en saio de CBR, com valores requeridos, variando em torno de 80, apesar de algumas misturas com CBR mínimo de 50, terem sido

utilizadas com sucesso.

Para o Road Research Laboratory (19), o ensaio de CBR é particularmente aconselhável para medir a estabilidade de solos tratados com betume, muito embora possam ser utilizados os ensaios do Cone de Penetração, Hubbard Field Modificado e o Flórida Bearing Value.

II.6 - Sumário

Em resumo pode ser dito que apesar dos muitos trabalhos já realizados, há ainda uma grande deficiência no campo da estabilização com emulsão asfáltica, principalmente no que se refere à metodologia empregada para o cálculo de dosagens, pois os métodos existentes baseiam-se apenas em resultados empíricos, sendo portanto necessário estabelecer estudos mais profundos para se chegar a uma metodologia mais científica sobre o assunto.

Um outro aspecto bastante caracterizado nas referências bibliográficas é que o número de variáveis envolvidas em problemas de estabilização é bastante grande, não sendo portanto, aconselhável que se generalize soluções obtidas para casos isolados, bem como não se extrapole condições e comportamentos considerados para uma certa situação.

Pode-se notar também, que muitas das soluções apontadas na bibliografia não são aplicáveis em países de clima tropical, devido à grande diferença existente em termos de temperatura e pluviosidade, e conseqüentemente nos tipos de solos.

Outro fato importante que deve ser sempre ob

servado, é que as propriedades determinadas para as misturas são sempre dependentes das condições de cura às quais estão submetidas. Por este motivo essas condições devem produzir o mais fielmente possível, as condições ambientais às quais a mistura vai estar submetida em sua vida útil.

Portanto, esta pesquisa visa estudar uma metodologia de cura acelerada, assim como algumas propriedades de misturas solo-emulsão feitas com solos da região Nordeste, a fim de obter dados mais consistentes que possam ser utilizados futuramente em trabalhos pertencentes à mesma linha de pesquisa.

CAPÍTULO III

OBJETIVO DA PESQUISA

Os órgãos rodoviários brasileiros iniciaram um programa de construção de estradas de baixo custo no ano de 1976. Uma parte deste programa inclui estabilização de solos com emulsões asfálticas. Até a presente data, são muitos os exemplos de aplicação de sistemas solo-emulsão na construção de pavimentos flexíveis, mais ainda não existe uma metodologia aceita totalmente para o dimensionamento destes sistemas solo-emulsão, nem existe uma metodologia apropriada para seu dimensionamento estrutural.

O objetivo deste trabalho é limitado aos seguintes pontos:

- 1) Verificar a validade de um processo de cura desenvolvido no laboratório para os sistemas solo-emulsão utilizados.
- 2) Determinar os teores ótimos de emulsão asfáltica a serem utilizados na estabilização dos solos estudados.
- 3) Verificar as propriedades de engenharia dos sistemas estudados: absorção d'água e resistência à tensão de tração indireta. e à compressão simples

CAPÍTULO IV

MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA

IV.1 - Solos

Para a realização deste trabalho, foram selecionados três solos de diferentes características, os quais ocorrem nas jazidas denominadas Santa Rosa, Patos e Castelo, localizadas respectivamente nas cidades de Campina Grande, Patos e Castelo; sendo as duas primeiras no estado da Paraíba, e a última no estado do Piauí (ver Figura 4.1).

As razões para a escolha destas jazidas, foram: a) jazida Santa Rosa: este material, além de constituir uma ocorrência local, é bastante empregado em serviços de pavimentação urbana, sendo portanto, muito grande o interesse para o estudo das características deste solo, quando estabilizado com emulsão asfáltica. b) Jazida Patos: a escolha desta jazida deveu-se ao fato de que o material, proveniente dela, está sendo utilizado para a construção de pavimento de baixo custo em estradas vicinais. Como um exemplo, pode-se indicar o pavimento construído com um solo, estabilizado com emulsão num trecho da Rodovia BR-110.

c) jazida Castelo: este solo está incluído na pesquisa sobre so

FIGURA 4.1 - Localização Geográfica das Jazidas dos Solos Utili-
zados.



los lateríticos, desenvolvida pelo Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus de Campina Grande, em convênio com o IPR/DNER. Devido ao fato de o mesmo não ter suas características completamente determinadas, o autor achou bastante interessante incluí-lo neste trabalho, a fim de estudar seu comportamento, quando estabilizado com emulsão asfáltica.

A seguir são indicadas as localizações das jazidas, suas características geológicas e climáticas.

IV.1.1 - Jazida Santa Rosa

Esta jazida está localizada no bairro de Santa Rosa, município de Campina Grande, pertencendo à zona fisiográfica denominada de Borborema Oriental de acordo com a divisão do estado da Paraíba, feita pelo Conselho Nacional de Geografia (20).

Esta zona pertence ao planalto da Borborema, apresentando um relevo suave ondulado e ondulado. De acordo com a classificação dada por Koppen (20) esta zona enquadra-se no tipo climático As', Quente e Úmido com Chuva de Outono-Inverno.

Caracteriza-se por apresentar chuvas de outono inverno, e um período de estiagem de 5 a 6 meses. As precipitações pluviométricas, na zona do litoral e mata, oscilam em torno de 1500 mm, decrescendo rapidamente para o interior, onde chega a atingir precipitações médias de até 700 mm.

A amplitude térmica anual é muito pequena em função da baixa latitude. As temperaturas variam muito pouco durante o ano, e as médias anuais são elevadas, com valores com

preendidos entre 22°C e 26°C (20).

A umidade relativa é bastante uniforme em toda a região com médias em torno de 80% (21).

De acordo com Gaussem (20), esta jazida está localizada na região bioclimática 3cth, Mediterrâneo Quente ou Nordeste de Seca Atenuada, apresentando índice xerotérmico, variando de 40 a 100. Entende-se por índice xerotérmico o número aproximado de dias biologicamente secos, durante o período seco. Verifica-se que as classificações feitas por Koppen e Gaussem são contraditórias, entretanto a classificação de Gaussem é considerada como mais correta, por basear-se no bioclima da região.

A formação geológica desta jazida é do tipo Pré-Cambiano (CD), formada por gnaisses e migmatitos, ocorrendo sempre associados com micaxistos e granitos, incluindo diques de quartzo (20)

IV.1.2 - Jazida de Patos

Localizada na margem esquerda da rodovia BR-110, que liga a cidade de Patos à cidade de Serra Negra do Norte. Esta jazida dista cerca de 20 Km da cidade de Patos.

A jazida está localizada na região fisiográfica, denominada Sertão de Piranhas (20). O material constituinte desta jazida é do tipo geológico Pré-Cambiano (CD), apresentando na sua litologia biotitos-sericitos-xistos, com muitas lentes de quartzo, pertencendo à formação Seridó (22).

O relevo da região, em que esta jazida está incluída, pertence à unidade morfológica, denominada Depressões Sertanejas, na qual destaca-se a superfície de pediplanação com pequenos inselbergues, contando com uma extensa superfície suavemente ondulada.

Esta superfície sofre ainda ativo processo de desnudação, na qual os detritos são carreados de maneira difusa pelos inúmeros cursos d'água intermitentes. Trata-se de um processo em que predomina o intemperismo físico, que atua, desagregando as rochas mais superficiais durante o prolongado período seco(20).

Conforme a classificação de Koppen (20), o clima desta região é do tipo Aw', Quente e Úmido com chuvas de Verão-Outono, tendo uma pluviosidade média de 800 mm, muito embora, com bastante irregularidade, havendo anos de período chuvoso quase ausente.

De acordo com a classificação de Gaussen (20), a jazida está incluída na região bioclimática do tipo Subdesértico Quente de Tendência Tropical (2b), com índice xerotérmico, variando entre 200 e 300, e a estação seca de 9 a 11 meses.

IV.1.3 - Jazida Castelo

Esta jazida encontra-se localizada no município de Castelo no estado do Piauí, e faz parte da pesquisa sobre solos vermelhos, formados por laterização, realizada pelo Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em convênio com o IPR/DNER.

Situada em região de clima semi-árido quente (BShw de Koppen), a qual possui características pluviométricas de uma estação chuvosa que tem início em novembro, aumentando de intensidade a partir de janeiro e prolongando-se até abril. O período de estiagem começa, geralmente no mês de maio, estendendo-se até outubro.

A média anual pluviométrica oscila em torno de 880 mm, sendo a temperatura média de 28^oC, com mínimos de 21^oC.

A origem deste solo é do período devoniano pertencendo à formação Cabeças. O perfil deste solo caracteriza-se por blocos de arenitos ferruginosos e de canga ferruginosa, intimamente misturados sem qualquer seleção. Apresenta uma espessura variando desde 30 cm até 7,0 m (23).

IV.2 - Emulsão Asfáltica

Neste trabalho foi empregada uma emulsão asfáltica do tipo catiônica de rutura lenta, sendo fabricada pela Indústria de Produtos Químicos e Asfaltos Emulsificados (BETUNORTE), localizada na cidade de Fortaleza, estado do Ceará.

Suas propriedades serão discutidas no capítulo seguinte.

CAPÍTULO V

MÉTODOS DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

V.1 - Introdução

Em um programa de investigação das propriedades de um solo estabilizado com emulsão asfáltica, é fundamental o conhecimento das propriedades deste solo no seu estado natural, bem como conhecer as características da emulsão empregada.

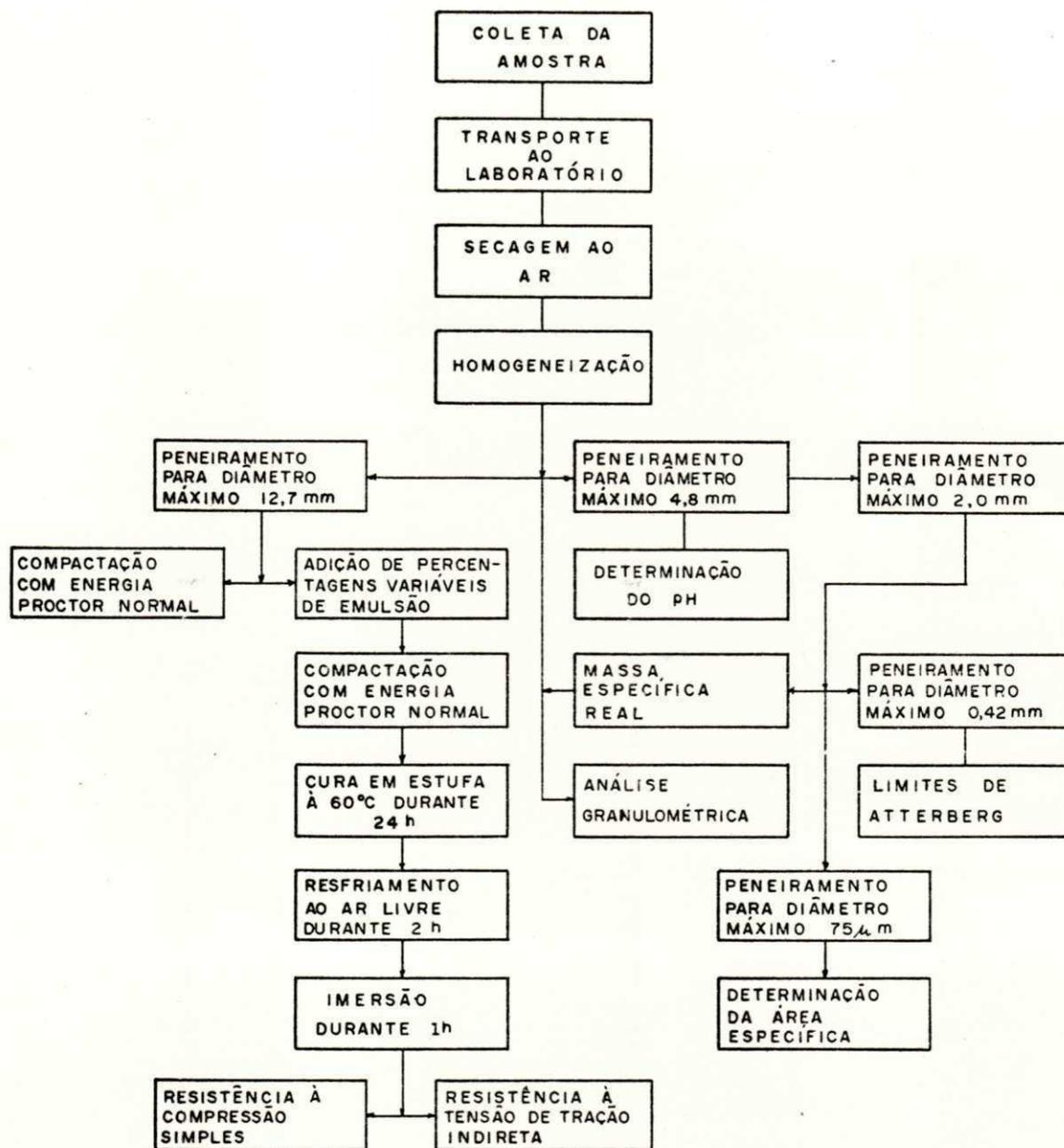
Com esta finalidade, foram realizados ensaios de caracterização sobre amostras das jazidas selecionadas, descritas no Capítulo IV. As amostras coletadas foram transportadas ao laboratório, acondicionadas em sacos de lona, de modo a não permitir alterações, na granulometria das mesmas, pela perda de material fino.

Após chegarem ao laboratório, as amostras foram secas ao ar e submetidas a uma série de ensaios, conforme é mostrado no fluxograma da Figura 5.1.

Além destes, foram também realizados alguns ensaios sobre a emulsão asfáltica empregada, assim como um estudo para definir as condições de cura dos espécimens.

V.2 - Massa Específica Real

FIGURA 5.1 - Fluxograma de Preparação e Ensaio dos Solos no Laboratório.



O ensaio de massa específica real foi realizado sobre as partículas menores que 2,0 mm, após secarem em estufa a 100°C. Os procedimentos foram de acordo com as recomendações da B.S. 1377:1975 (24).

Foram feitas três determinações para cada solo, sendo aceitas como verdadeiras, quando situadas dentro do intervalo de variação que o método especifica. O valor da massa específica real foi determinado como sendo a média entre três determinações. Os resultados estão indicados na Tabela 5.1.

V.3 - Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizada de acordo com o método proposto pelo D.N.E.R.-DPTM 51-64(25).

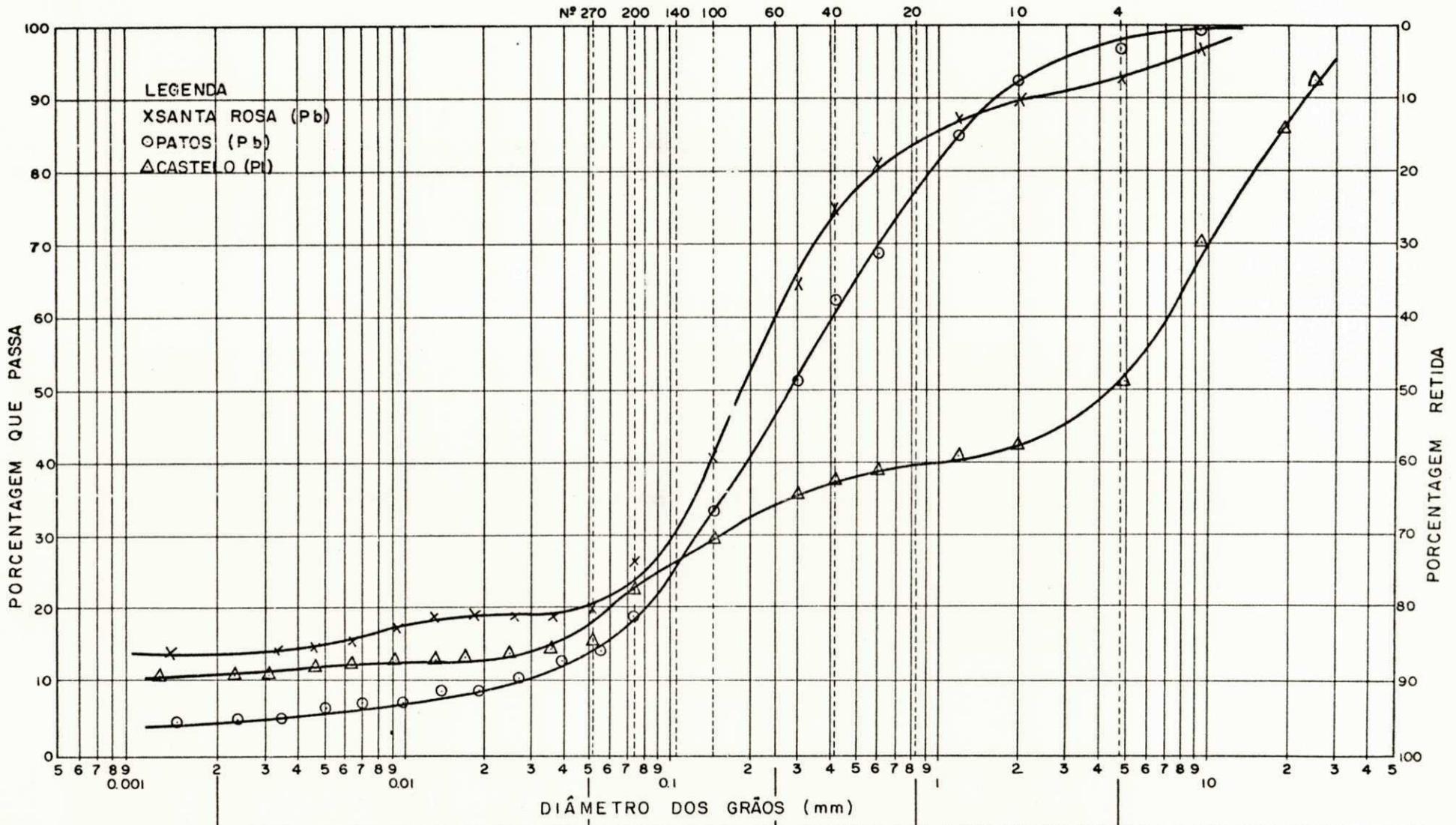
Este ensaio foi realizado com o solo seco ao ar livre, sendo feita a análise por peneiramento e sedimentação. Na Figura 5.2 são apresentados os gráficos das distribuições granulométricas com as porcentagens dos grãos representativos das amostras. Os valores quantitativos são mostrados na Tabela 5.3.

V.4 - Limites de Atterberg

V.4.1 - Limite de Liquidez

Os ensaios, para a determinação do limite de liquidez dos solos, foram realizados seguindo dois processos, ambos normalizados pelo método de B.S. 1377:1975 (24), empregando-se amostras secas ao ar livre. No primeiro processo, foi utilizado o aparelho de Casagrande, empregando-se amostras com

FIGURA 5.2 - Distribuição Granulométrica dos Solos.



CLASSIFICAÇÃO A. B. N. T.

ARGILA	SILTE	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	AREIA GROSSA	PEDREGULHO
--------	-------	------------	-------------	--------------	------------

partículas menores que 0,425 mm. O segundo método utilizado, foi o do penetrômetro de cone, que consiste, basicamente, do seguinte: uma amostra, pesando cerca de 200 g de material de diâmetro, menor que 0,425 mm, deve ser colocada em um recipiente e misturada com água destilada, usando-se para isto, uma espátula de aço. A mistura deve ser feita de modo que o produto final seja uma pasta homogênea.

Esta pasta é colocada em repouso, por um período de 24 horas, de modo a permitir que a água penetre perfeitamente através de massa de solo. Ao fim das 24 horas, a amostra será então retirada e remisturada por cerca de 10 min. Se houver necessidade, poderá ser acrescentada uma quantidade adicional de água, de modo que a primeira penetração do cone seja de aproximadamente 15 mm.

A amostra remisturada será colocada em um recipiente cilíndrico e então levada ao penetrômetro de cone, a fim de ser realizada a penetração na mesma. A penetração é feita com um cone de massa 80 gramas, caindo, em queda livre, por 5 segundos. A leitura da penetração é tomada com aproximação de 0,1 mm. A diferença entre a leitura inicial e a leitura final, é anotada como a penetração do cone. Em seguida limpa-se o cone cuidadosamente, e repete-se o processo anterior. Se a diferença entre duas penetrações for menor que 0,5 mm, a média destas duas penetrações será anotada. Se a diferença for maior que 0,5 mm e menor que 1,0 mm, será retirada a sua umidade, e anotada. Anota-se também a média das três penetrações. Se a diferença for maior que 1,0 mm, o solo é retirado do recipiente, remisturado, e o ensaio é repetido até que se obtenha resultados consistentes.

O teor de umidade, correspondendo à penetração de 20 mm, será tomado como o limite de liquidez do solo. Como discute-se, mais adiante, a penetração de 20 mm não fornece resultados satisfatórios para solos tropicais, por isso, o método da B.S. foi modificado nos cálculos baseados no trabalho de Marinho (28).

A relação entre os limites de liquidez é indicada na Figura 5.3, e os valores quantitativos são mostrados na Tabela 5.2.

V.4.2 - Limite de Plasticidade

Os ensaios, para a determinação dos limites de plasticidade dos solos estudados, foram baseados nas recomendações da B.S. 1377:1975 (24). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.3.

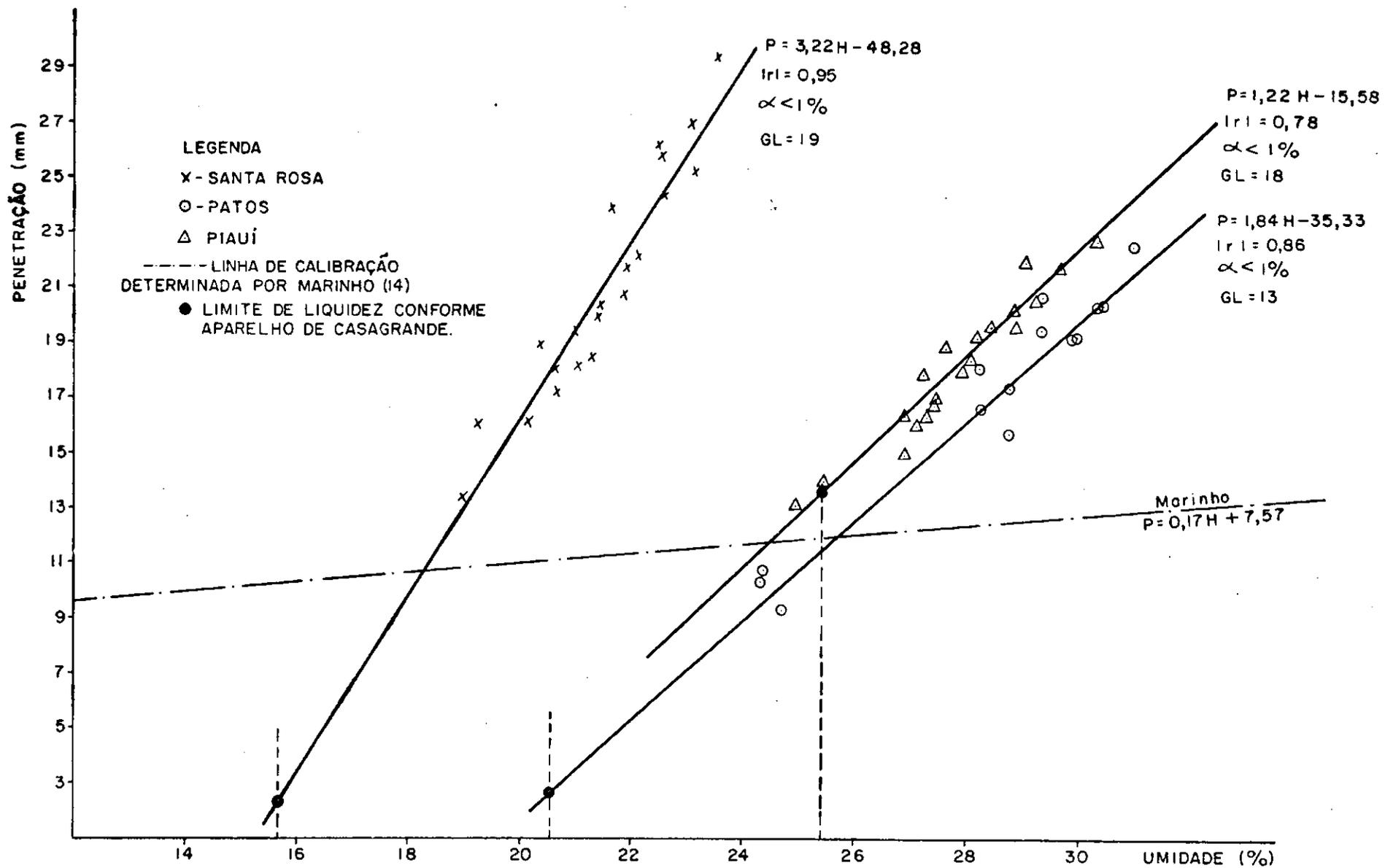
V.5 - Determinação do pH

As determinações dos valores do pH dos solos pesquisados foram realizadas, obedecendo às recomendações da B.S. 1377:1975 (24). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.3.

V.6 - Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados, sobre amostras secas ao ar livre, com partículas menores que 12,7 mm, e obedecendo às recomendações da norma B.S. 1377:1975(24),

FIGURA 5.3 - Relação entre Penetração do Cone, Teor de Umidade e o Limite de Liquidez dos Solos.



com energia equivalente ao ensaio Proctor Normal (6,08 kgf.cm/cm³).

A limitação, quanto ao diâmetro máximo dos grãos, deve-se à geometria dos moldes utilizados. Pode-se notar nos gráficos de distribuição granulométrica, que esta limitação não quebrou a representatividade granulométrica dos solos. As relações umidade versus massa específica seca estão apresentadas na Figura 5.4.

V.7 - Ensaio da Área Específica

Neste trabalho, foi utilizado o método gravimétrico, proposto por Diamond e Kinter (26), o qual considera que em condições de equilíbrio, a retenção de glicerol na superfície do material é monomolecular em espessura (26). Foram determinadas as superfícies específicas apenas para as frações menores que 75 μ m. O procedimento é indicado no Apêndice A.

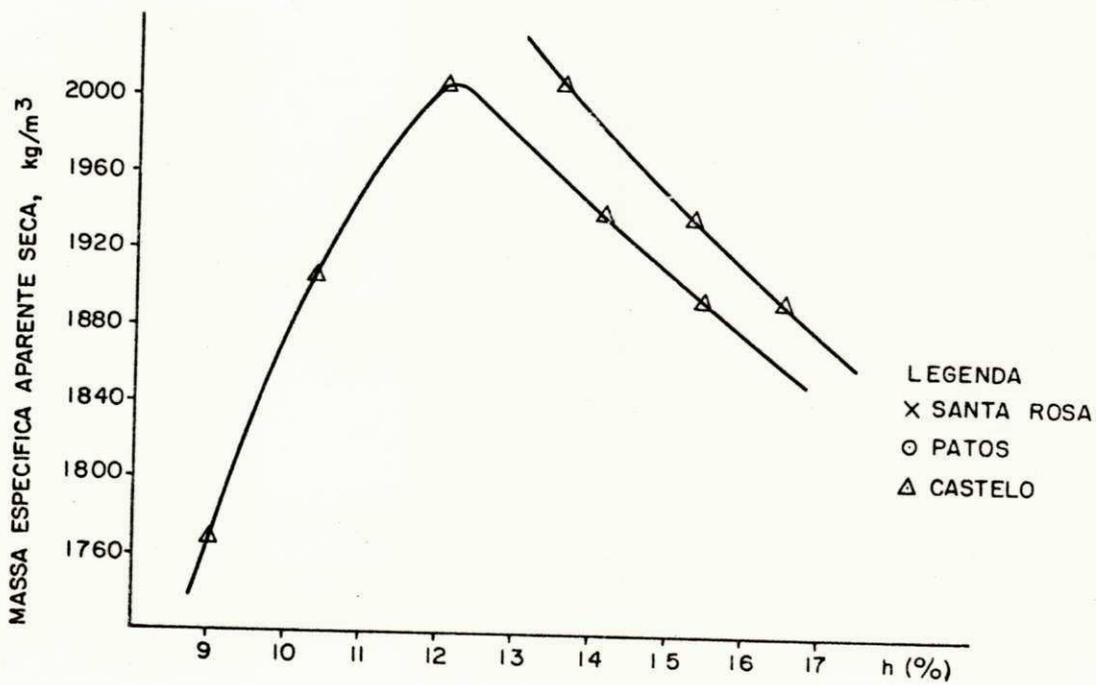
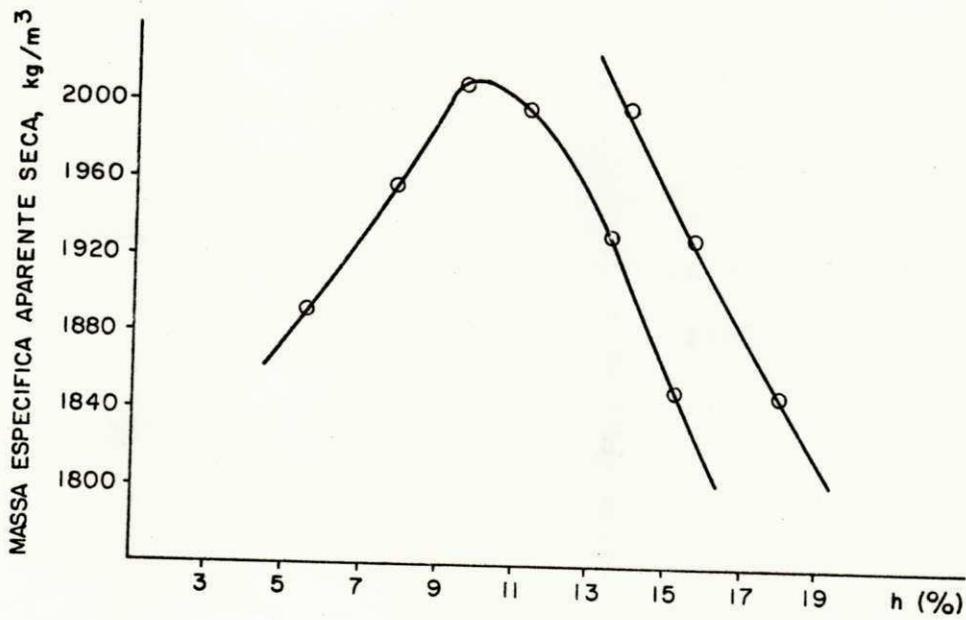
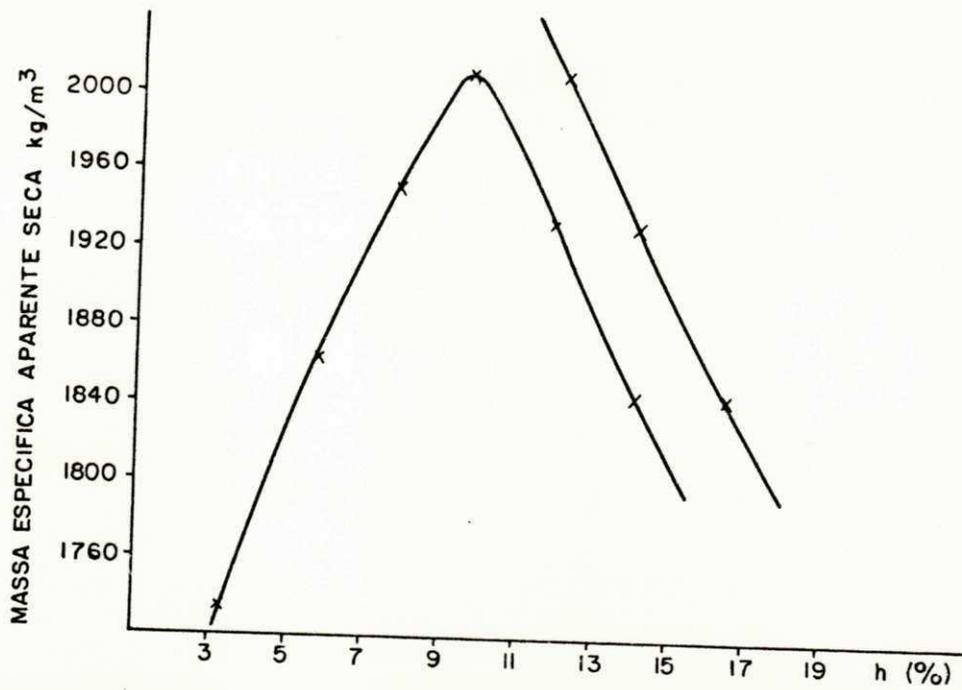
Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.3.

V.8 - Ensaio realizados na Emulsão Asfáltica

V.8.1 - Ensaio de Viscosidade

A viscosidade da emulsão betuminosa é medida através do viscosímetro Engler (16). O método utilizado foi o indicado na norma B.S. 434:1960 (6), e consiste na medida do tempo necessário para fluir 200 ml de emulsão através de um o

FIGURA 5.4 - Relação entre Umidade e Massa Específica Aparente Seca.



rificio padronizado, à temperatura de 50°C. Este tempo, em segundos, é dividido pelo tempo necessário para fluir a mesma quantidade de água destilada, na mesma temperatura. O resultado da divisão é a viscosidade em graus Engler. Na Tabela 5.4 é apresentado o resultado obtido.

V.8.2 - Resíduo por Destilação

O ensaio foi realizado de acordo com o Standard Methods Bitumen (IP, 74/57) (6). O resultado obtido é apresentado na Tabela 5.4.

V.8.3 - Densidade da Emulsão

O ensaio foi realizado de acordo com o método DNER-ME 16-24 (25). Na Tabela 5.4 é apresentado o resultado obtido.

Na Tabela 5.4 são também apresentados os resultados fornecidos pelo fabricante da emulsão.

V.9 - Estudo limitado para definir as condições de cura dos espécimens.

Sabe-se que ao se adicionar uma quantidade de emulsão asfáltica à uma mistura solo-água, as partículas minerais estarão recobertas por um filme de água, o qual irá dificultar o contato da emulsão com a partícula.

Devido à existência de forças atrativas entre a superfície mineral e a emulsão, a água será deslocada, permitindo

tindo o contato partícula-emulsão. Após mantido o contato, a emulsão sofrerá a rutura quer seja pela evaporação da fase emulsificante, quer seja pela separação das duas fases através da atração dos glóbulos de asfalto pela superfície mineral. Sendo completada a rutura, os glóbulos de asfalto irão unir-se formando um filme aderente à superfície das partículas, o qual será responsável pelo aumento na adesão e/ou da resistência aos efeitos nocivos de água.

Mesmo após a rutura ter sido completada, ocorre geralmente a presença de água na interface asfalto-agregado, dificultando esta ligação, tornando-a mais frágil.

Com a finalidade de eliminar a água que, ainda tenha permanecido na interface, bem como de acelerar a evaporação da água constituinte da emulsão e da água da mistura, foi realizado um estudo para avaliar o efeito do tempo de cura da mistura para diferentes temperaturas.

Com base em experiências anteriores (2,13,22, 27), foram selecionadas as temperaturas de 49°C e 60°C para a realização deste estudo.

Inicialmente foi realizado um estudo apenas para o solo Castelo, sendo moldados corpos de prova com o solo puro e com a mistura solo emulsão, e submetidos a uma temperatura de cura de 49°C. Para a moldagem foi empregado o método dinâmico, com energia de 6,08 kgf/cm³, equivalente ao ensaio Proctor Normal.

Os corpos de prova foram moldados para três teores de umidade, tanto para o solo puro como para a mistura solo emulsão.

V.9.1 - Compactação para o solo puro

Os teores de moldagem para o solo puro, foram o teor de umidade ótima para massa específica aparente seca máxima, 12,19%, o teor de umidade correspondente ao extremo do ramo seco da curva umidade versus massa específica, igual a 9,50%, e o teor de umidade correspondente ao extremo do ramo úmido para a mesma curva, de valor 15,46%, obtidos no ensaio de compactação descrito no Item V.6.

V.9.2 - Compactação para a mistura solo-emulsão

Os teores de umidade para a moldagem dos corpos de prova da mistura solo-emulsão, obedeceram ao mesmo critério adotado para o solo puro. Os valores obtidos na moldagem foram: teor ótimo igual a 13,55%, teor seco igual a 11,61 e teor úmido igual a 17,09%. Foi adotado um teor de emulsão asfáltica de 7,5% baseado no peso seco do solo.

Após iniciar o período de cura, foram observados dois problemas. Devido à grande quantidade de corpos de prova utilizados, e também à falta de um sistema de ventilação interior da estufa utilizada para a secagem, a mesma apresentou grande quantidade de vapor condensado, prejudicando os valores obtidos na secagem. Além disso, o tempo necessário para se atingir uma perda de umidade em torno de 80% correspondente à expulsão de quase toda a água livre, foi bastante longo, o que tornaria este trabalho bastante demorado.

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostrados as relações entre o tempo de cura e a porcentagem de umidade, em re

FIGURA 5.5 - Relação entre o tempo de cura e a porcentagem de umidade para o solo Castelo a 49°C .

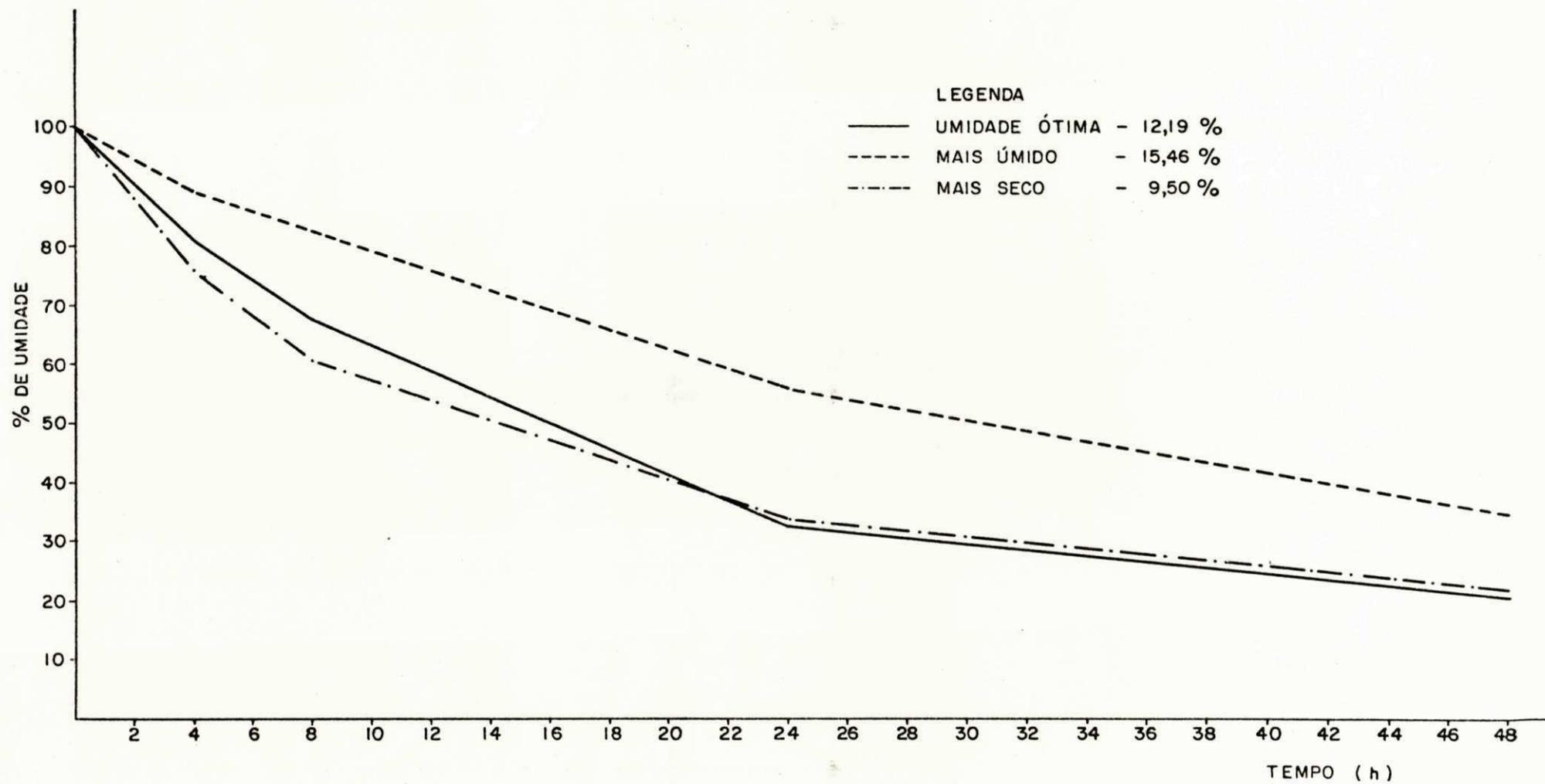
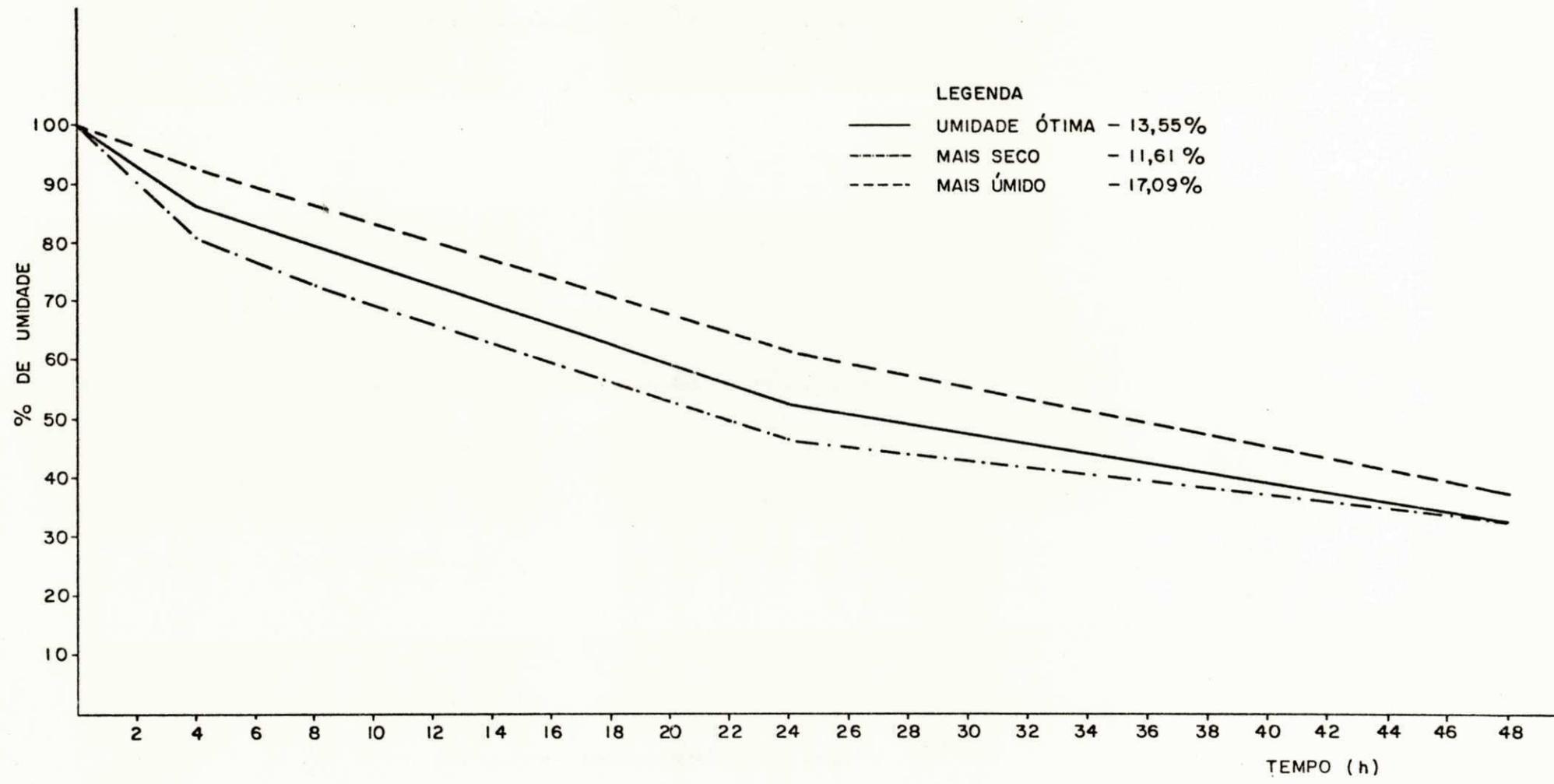


FIGURA 5.6 - Relação entre o tempo de cura e a porcentagem de umidade para o sistema solo-emulsão, jazida Castelo à 49°C.



lação à umidade de moldagem. Nas Tabelas D.1 e D.2 no Apêndice D, são mostrados os valores obtidos.

V.9.3 - Determinação do tempo de cura à 60°C.

Devido ao surgimento das dificuldades anteriores, foram adotados algumas modificações na metodologia empregada.

Foi utilizada uma estufa com sistema de ventilação interna funcionando à 60°C, escolhida de acordo com o critério citado no item V.9.2.

Os corpos de prova para os três solos, foram moldados com energia equivalente ao Proctor Normal, e com teor de emulsão de 7,5% baseado no peso seco do solo. O teor de umidade para moldagem correspondeu ao teor ótimo para massa específica aparente seca máxima, obtido no ensaio de compactação descrito no capítulo anterior. Os valores obtidos para os três solos foram: jazida Santa Rosa, 11,8%; jazida Patos 12,2%; e jazida Castelo 14,4%.

Na Figura 5.7 são apresentadas as relações entre o tempo de cura e a porcentagem de umidade referente à umidade de moldagem. Na Tabela D.3 no Apêndice D, são mostrados os valores quantitativos obtidos.

Os três solos apresentam um comportamento similar mostrando uma rápida perda de umidade para as primeiras oito horas de secagem. A partir das oito horas iniciais, a umidade diminuiu mais lentamente, com os três solos apresentando o trecho da curva com elevado grau de paralelismo, comprovando a semelhança de comportamento.

Dos resultados mostrados na Figura 5.7 pode-se ver que após 24 horas de cura os três solos utilizados alcançaram praticamente o estado de equilíbrio. Esse tempo de cura, então foi adotado para o tratamento de todos os corpos de prova.

V.10 - Compactação dos sistemas solo-emulsão.

O procedimento da compactação das misturas solo-emulsão é dado a seguir:

- a) homogenização do solo durante 1,0 min em um misturador de eixo vertical, com movimentos de rotação e translação, marca Blakeslee, mostrado na Figura 5.8;
- b) adição de água na quantidade adequada, e mistura até atingir-se uma massa homogênea (1,0 a 2,0 min);
- c) retirada do material aderente às paredes e pás do misturador, com o auxílio de uma espátula;
- d) adição da emulsão asfáltica na quantidade previamente determinada;
- e) mistura até atingir-se uma massa homogênea, tendo-se o cuidado de limpar o material aderente às paredes e pás do misturador, fazendo-se em seguida uma mistura adicional;

FIGURA 5.7 - Relação entre o tempo de cura e a porcentagem de umidade para os três sistemas solo-emulsão a 60°C .

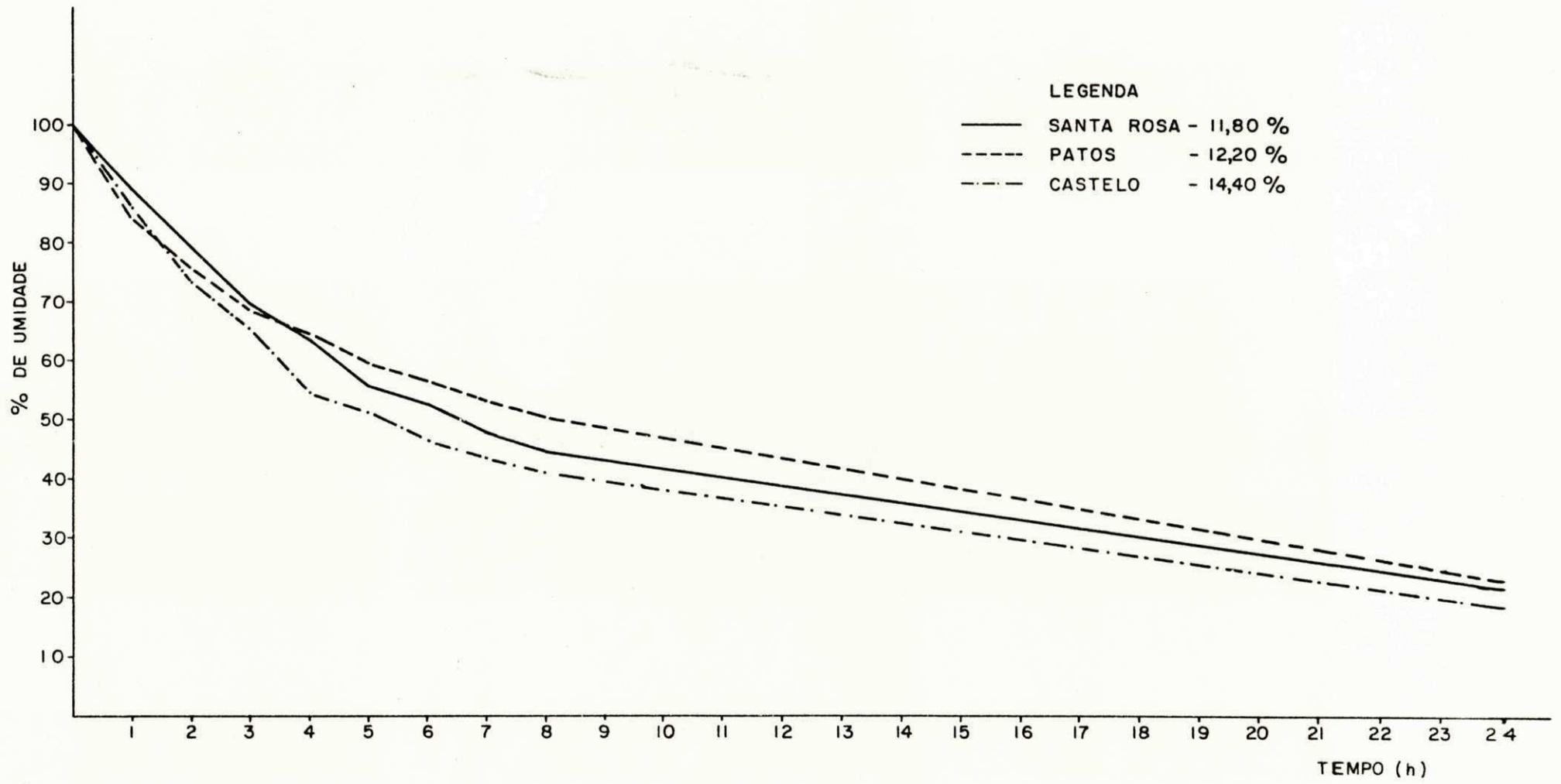
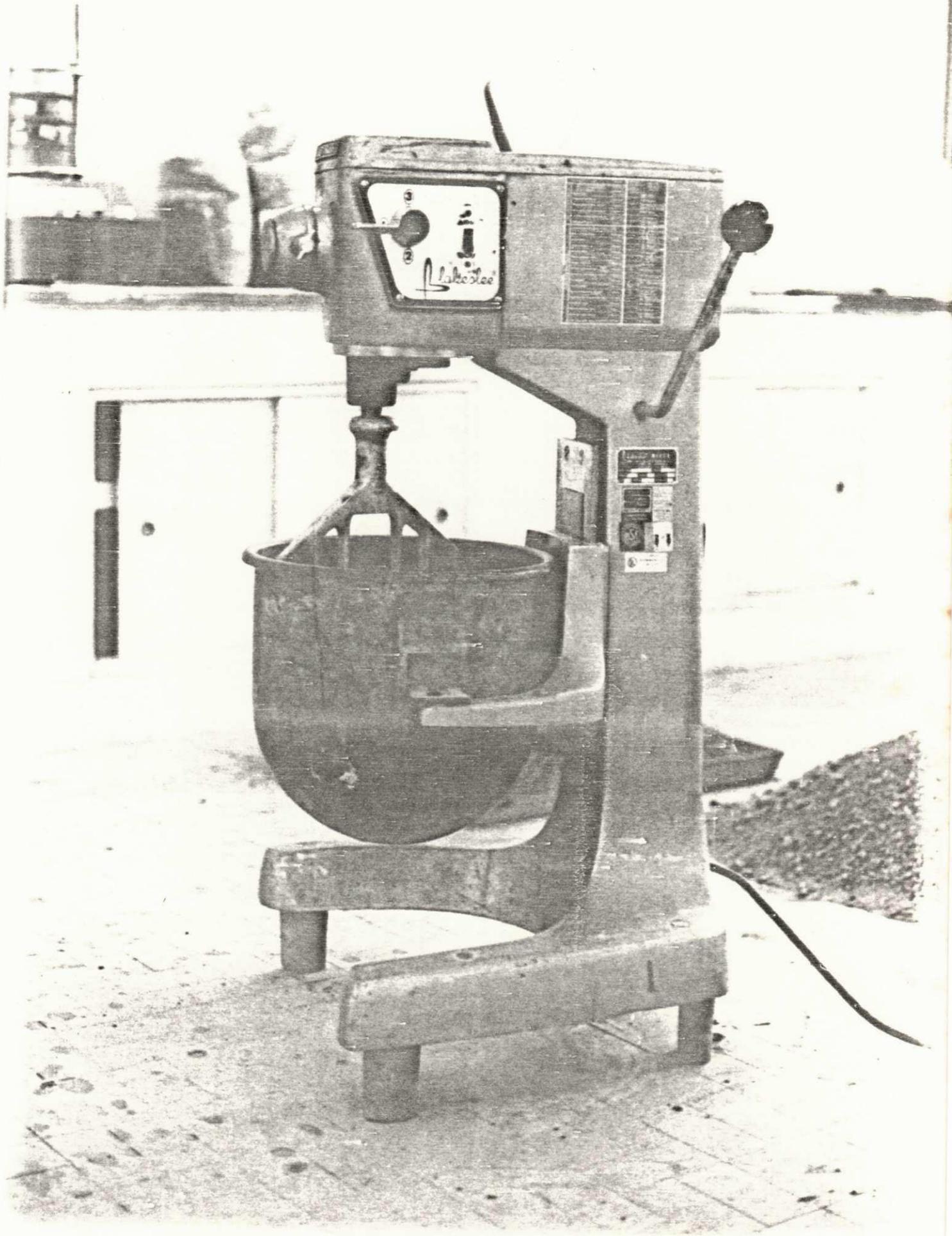


FIGURA 5.8 - Misturadora Utilizada.



- f) compactação dos espécimes para cinco teores de emulsão asfáltica e cinco teores de umidade para cada teor de emulsão. Foram con - feccionados três espécimens para cada ponto de umidade;
- g) após a moldagem, os corpos de prova foram colocados para curar a 60°C durante 24 ho - ras;
- h) depois da cura, os corpos de prova foram co - locados ao ar livre durante duas horas, sen - do em seguida colocados em imersão na água a temperatura ambiente por um período de uma hora. Após o período de imersão, é que os corpos de prova foram ensaiados a com - pressão simples e a tensão de tração indire - ta.

V.11 - Ensaio de compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram executados para cinco teores de emulsão, a cinco teores de umida - de, sendo realizados sobre três espécimens, para a determi - nação de cada valor de resistência a compressão simples.

A velocidade de aplicação de carga, segundo Bezerra (29) foi recomendada por Anagnos, sendo de 5,08mm/min (0,2"/min). Porém, devido a dificuldades técnicas com o equipamento empregado, a velocidade adotada em todos os en - saios foi reduzida para 4,06 mm/min (0,16"/min).

A prensa, utilizada na realização deste ensaio, foi uma prensa de marca Pavitest. Na Figura 5.9, pode-se observar um ensaio em andamento.

V.12 - Ensaio de Tensão de Tração Indireta

O ensaio de tensão de tração indireta, também conhecido como método Brasileiro, foi proposto inicialmente por Lobo Carneiro, e consiste na aplicação de cargas compressivas em amostras cilíndricas, no sentido diametral. A teoria de tensão neste ensaio, é aplicável somente a materiais que rompem de maneira frágil, não sendo aplicável a materiais que falham plasticamente (29).

Para este ensaio foram empregadas as mesmas prensa e velocidade utilizadas no ensaio de compressão simples. Os valores de tensão obtidos foram resultado de uma média de três espécimens, conforme estabelecido inicialmente.

Para o cálculo da tensão de tração indireta, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$R_t = \frac{2p}{a \cdot h} \left(\text{sen } 2\alpha - \frac{a}{d} \right)$$

onde:

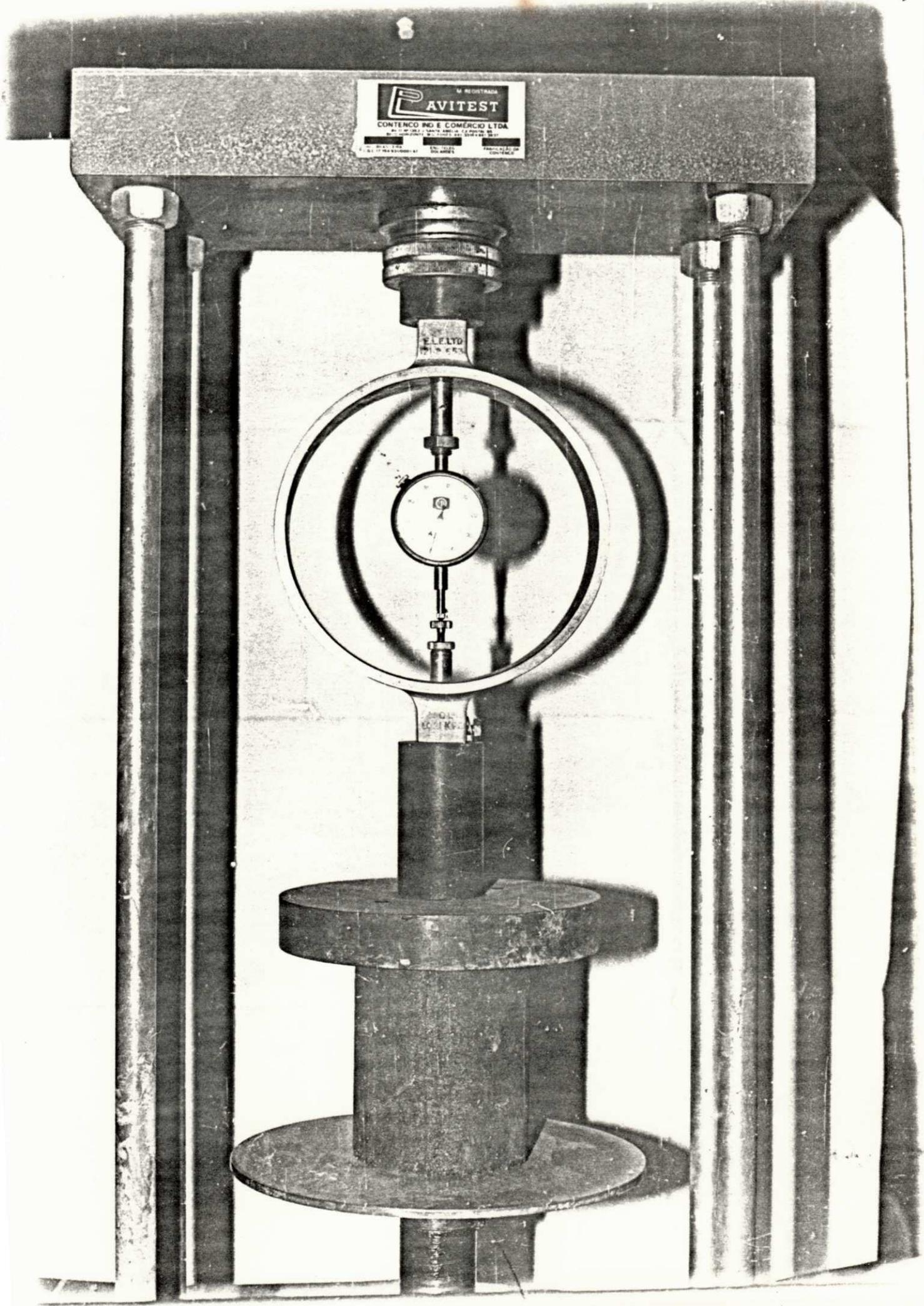
- R_t = Tensão de Tração Indireta
- p = Carga total aplicada
- a = Largura da peça
- d = Diâmetro de espécimen
- h = Altura do espécimen
- 2α = Ângulo subtendido (ver Figura 5.10.)

FIGURA 5.9 - Ensaio de Compressão Simples em Andamento

MA REGISTRADA
PAVITEST
CONTENCO IND E COMERCIO LTDA
RUA DE JESUS, S/N, SANTA ANA, C. A. S. P. 01000-000
SANTO CARLOS, S. PAULO, BRASIL

E. LEYD
S. PAULO

1000g
1000Kg



Na Figura 5.10 podem ser observados os princípios básicos do ensaio, e no Apêndice C, consta os cálculos em detalhes, para obter-se a constante de conversão da carga para a tensão de tração indireta.

A Figura 5.11 mostra a realização de um ensaio.

FIGURA 5.10 - Modelo Esquemático do Ensaio de Tensão de Tração Indireta.

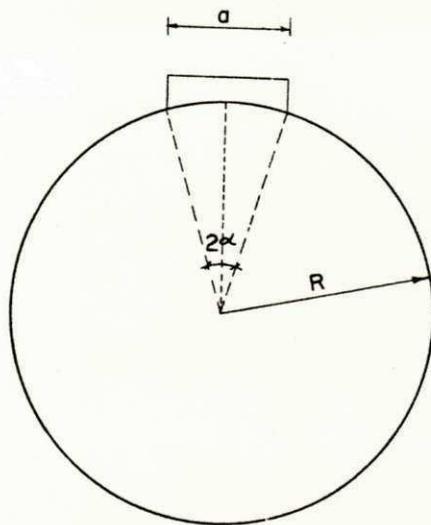
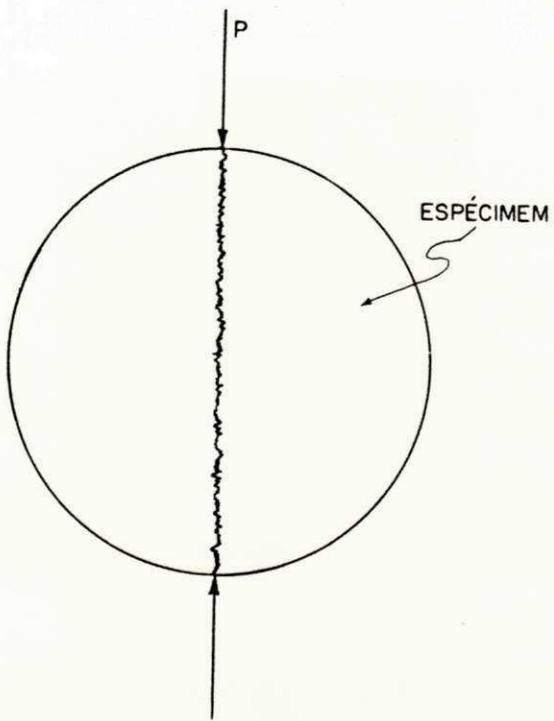
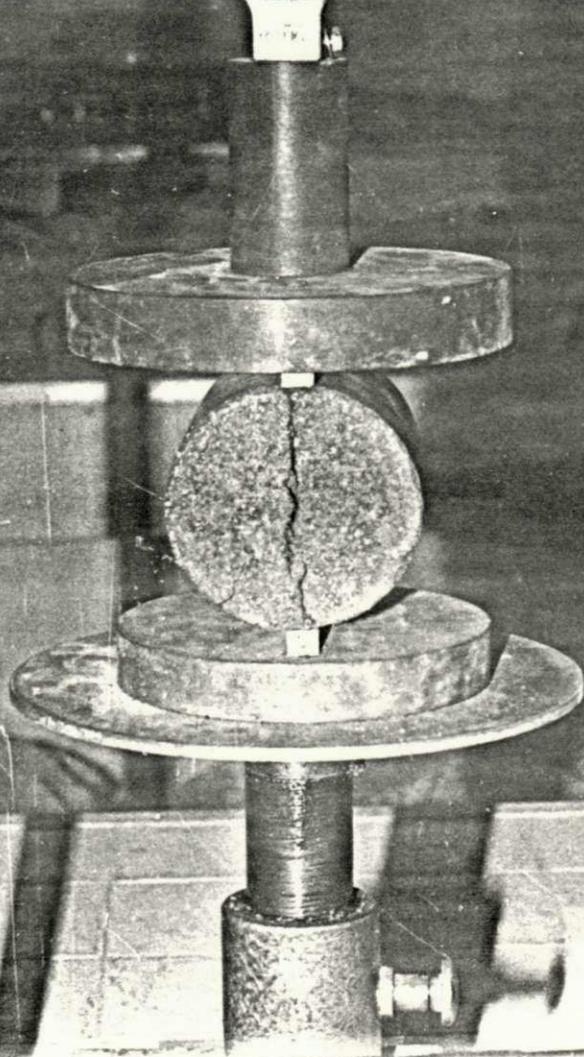
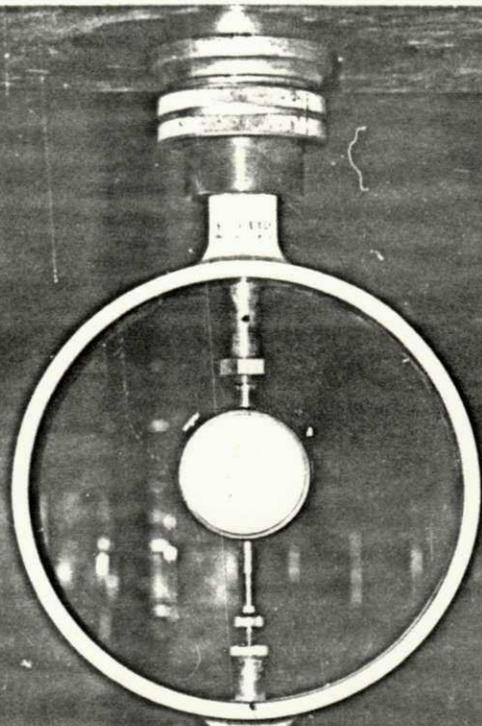


FIGURA 5.11 - Ensaio de Tensão de Tração Indireta em Andamento.

AVITEST



AVITEST

TABELA 5.1 - Resultados das Massas Específicas
Reais Solo

ENSAIO	SOLO ST ^a	ROSA	PATOS	CASTELO
1	2,663		2,768	2,760
2	2,659		2,788	2,773
3	2,662		2,762	2,747
4	2,659		2,789	2,742
MÉDIA	2,661		2,779	2,756

TABELA 5.2 - Limites de Liquidez Obtidos pelos Três
Métodos

MÉTODO	SOLO ST ^a h(%)	ROSA	PATOS h(%)	CASTELO h(%)
Casagrande	16,56		20,58	25,42
Cone de Penetração	21,20		30,10	28,80
Correlação Marinho	18,30		25,70	24,50

TABELA 5.3 - Propriedades e Classificação dos Solos

PROPRIEDADES	PROCEDÊNCIA SANTA ROSA	PATOS	CASTELO
Composição Granulométrica%			
Pedregulho (>2 mm)	21,62	9,00	57,7
Areia (2,0 - 0,06 mm)	62,07	74,74	27,0
Silte (0,06 - 0,002 mm)	4,92	9,61	4,0
Argila (<0,002 mm)	11,39	6,55	11,3
Propriedades Físicas			
Densidade Real	2,661	2,779	2,756
Limite de Liquidez %	15,65	20,58	25,42
Limite de Plasticidade %	NP	NP	17,4
Índice de Plasticidade %	NP	NP	8,02
Propriedades Químicas			
pH	4,2	5,8	3,9
Área Específica(m ² /g)	1,94	12,59	2,29
Classificações			
Casagrande	SM	SM	SC
H.R.B.	A-2-4	A-2-4	A-2-4

TABELA 5.4 - Propriedades Físicas da Emulsão Asfáltica

ENSAIOS REALIZADOS	DNER ESPEC.	E N S A I O S	
		FABRICANTE	AUTOR
Viscosidade 50°C	20 min/S.F.	95 Saybolt Furol	19,9 °Engler
Sedimentação-5 dias%	5%	2,3%	-
Peneira	Retido na 20 Retido na nº 40 Retido na nº 100	0-11%	0,03%
Resistência à Água % de Cobertura	Satis fatō- ria.	SAT.	-
Carga da Partícula	Positi va	POS.	-
pH	-	4,4%	-
Resíduo por Desti- lação % por peso mínimo	57%	60,2%	69.27
Desemulsibilidade	-	12,2%	-
Densidade	-	0,99	1,004

CAPÍTULO VI

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

VI.1 - Introdução

Este capítulo apresenta os resultados da estabilização com emulsão asfáltica para os três solos, e uma discussão destes resultados.

VI.2 - Resultados e Discussão

VI.2.1 - Introdução

Dentre os vários parâmetros determinados neste trabalho, apenas os seguintes foram considerados de maior relevância para a avaliação e discussão dos resultados obtidos: massa específica aparente seca, absorção d'água e resistências à compressão simples e à tensão de tração indireta.

As variáveis que influenciam estes parâmetros de avaliação, para qualquer tipo de solo são: a) teor de umidade de moldagem e b) o teor de emulsão asfáltica.

Entende-se que as condições de cura fixam a umidade alcançada pelo sistema antes de ser submetido à imersão.

VI.2.2 - Influência do teor de umidade na massa específica a parente seca do sistema solo-emulsão.

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, são apresentadas as relações entre teor de umidade e massa específica aparente para os três solos, para os vários teores de emulsão utilizados. Na Tabela E.1 no Apêndice E, são mostrados os valores numéricos obtidos.

Na Figura 6.4 são mostradas as relações entre as porcentagens de emulsão utilizadas e as massas específicas aparentes secas máximas encontradas. Na Tabela E.2 no Apêndice E, são mostrados os valores quantitativos correspondentes.

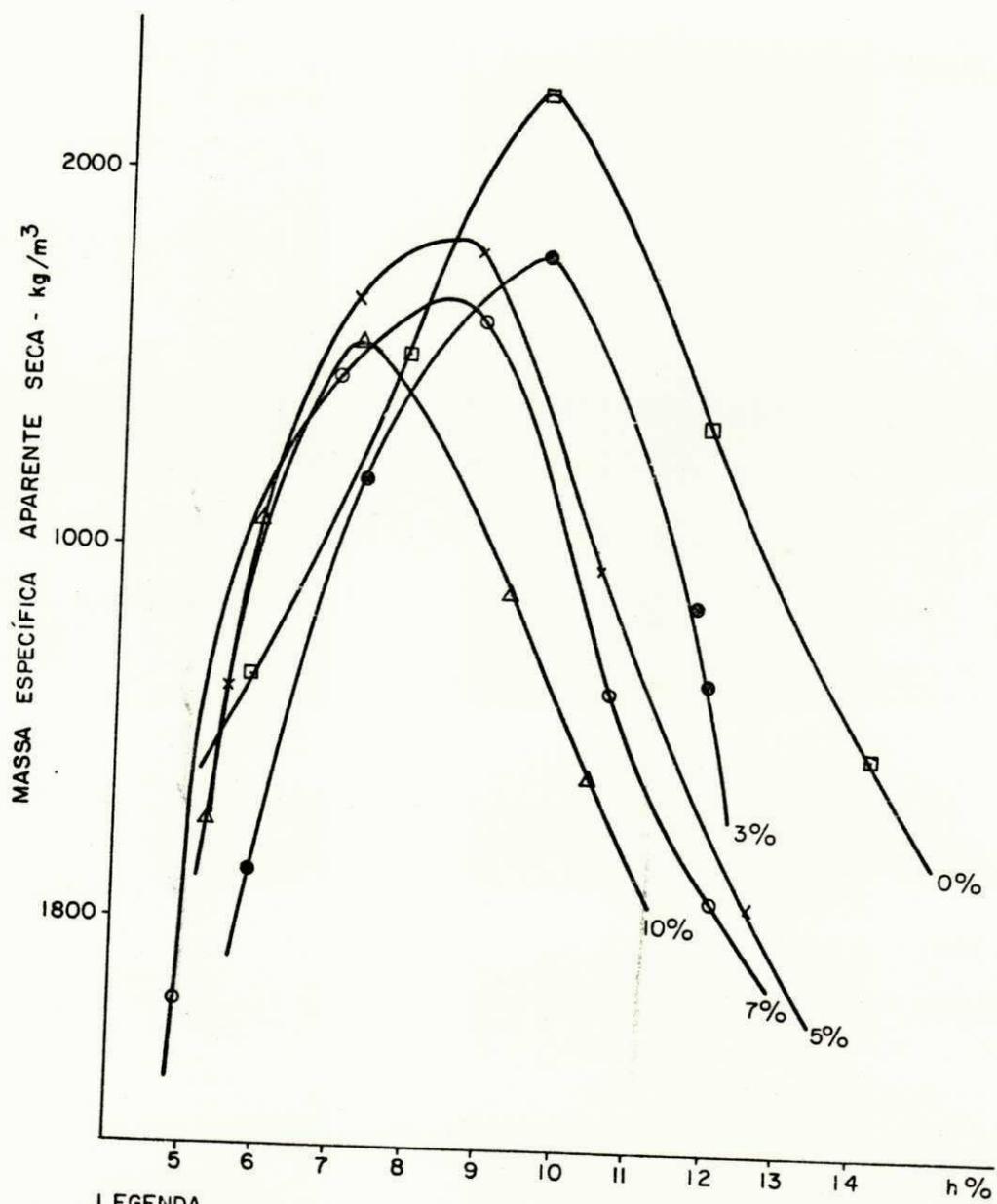
Pode-se observar que para maiores teores de emulsão, foram obtidos valores menores de massa específica a parente seca.

Este comportamento geral é bastante semelhante ao encontrado por outros investigadores, como por exemplo Katti e Davidson (17), isto é, a adição de asfalto a um sistema solo-água tem como consequência uma redução na massa e específica aparente seca.

VI.2.3 - Influência do teor de umidade na resistência a compressão simples e a tensão indireta no sistema solo-emulsão.

O comportamento do sistema solo-emulsão com referência a resistência é em geral o mesmo que o de um sistee

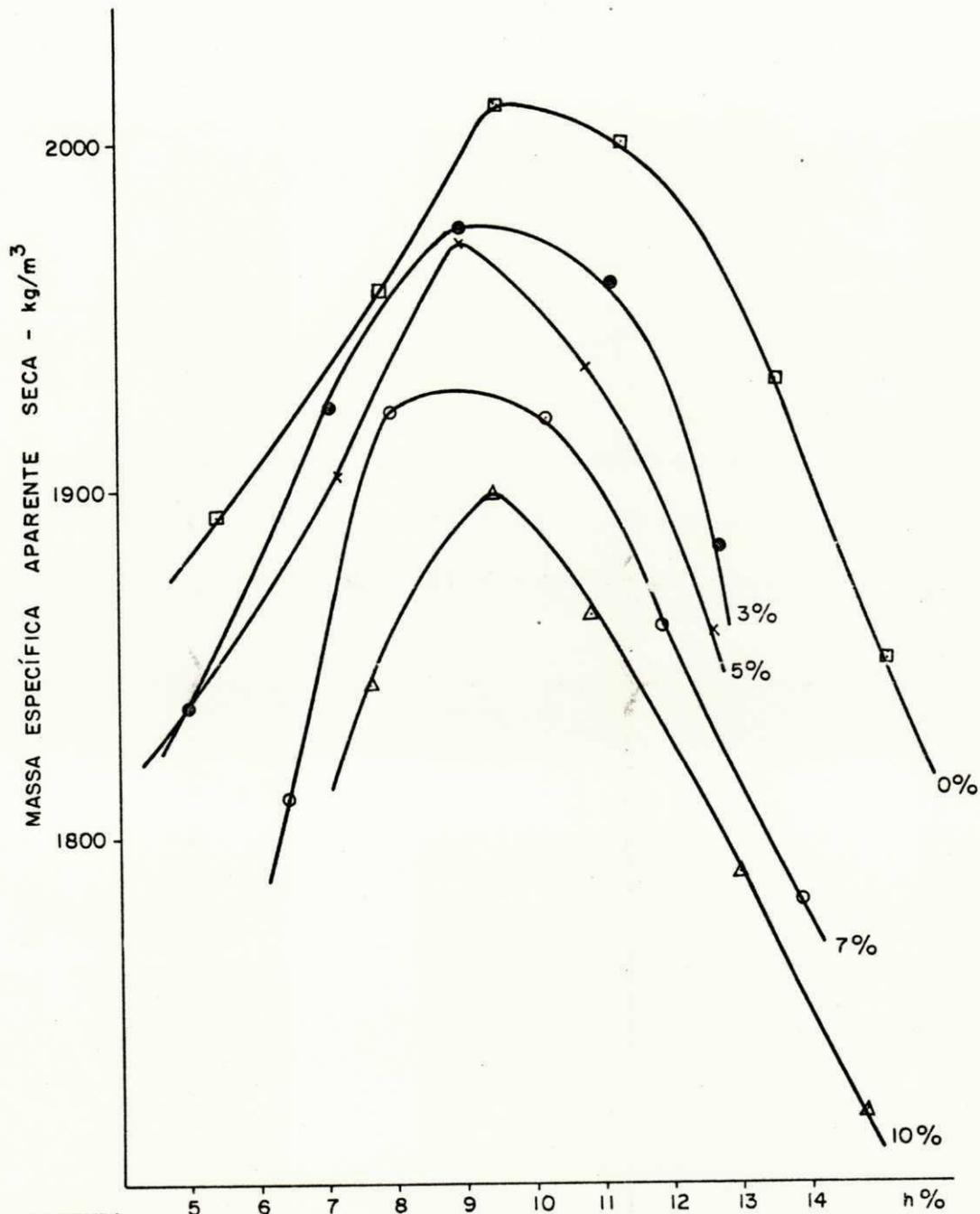
FIGURA 6.1 - Relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca para o solo Santa Rosa a vários teores de emulsão asfáltica.



LEGENDA

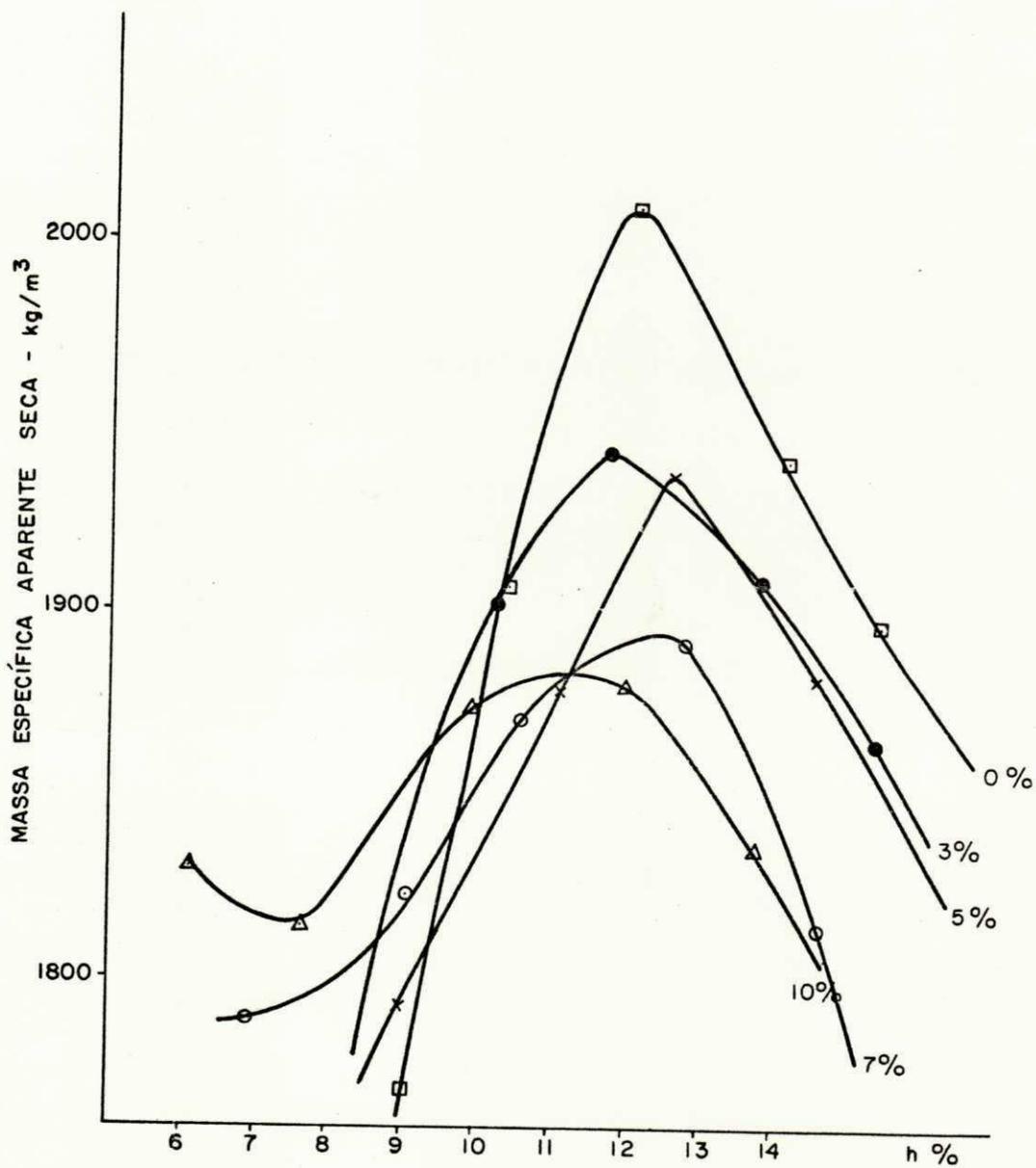
- 0 % EMULSÃO
- 3 % EMULSÃO
- × 5 % "
- 7 % "
- △ 10 % "

FIGURA 6.2 - Relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca para o solo Patos a vários teores de emulsão asfáltica.



LEGENDA
 □ 0% EMULSÃO
 ● 3% "
 × 5% "
 ○ 7% "
 △ 10% "

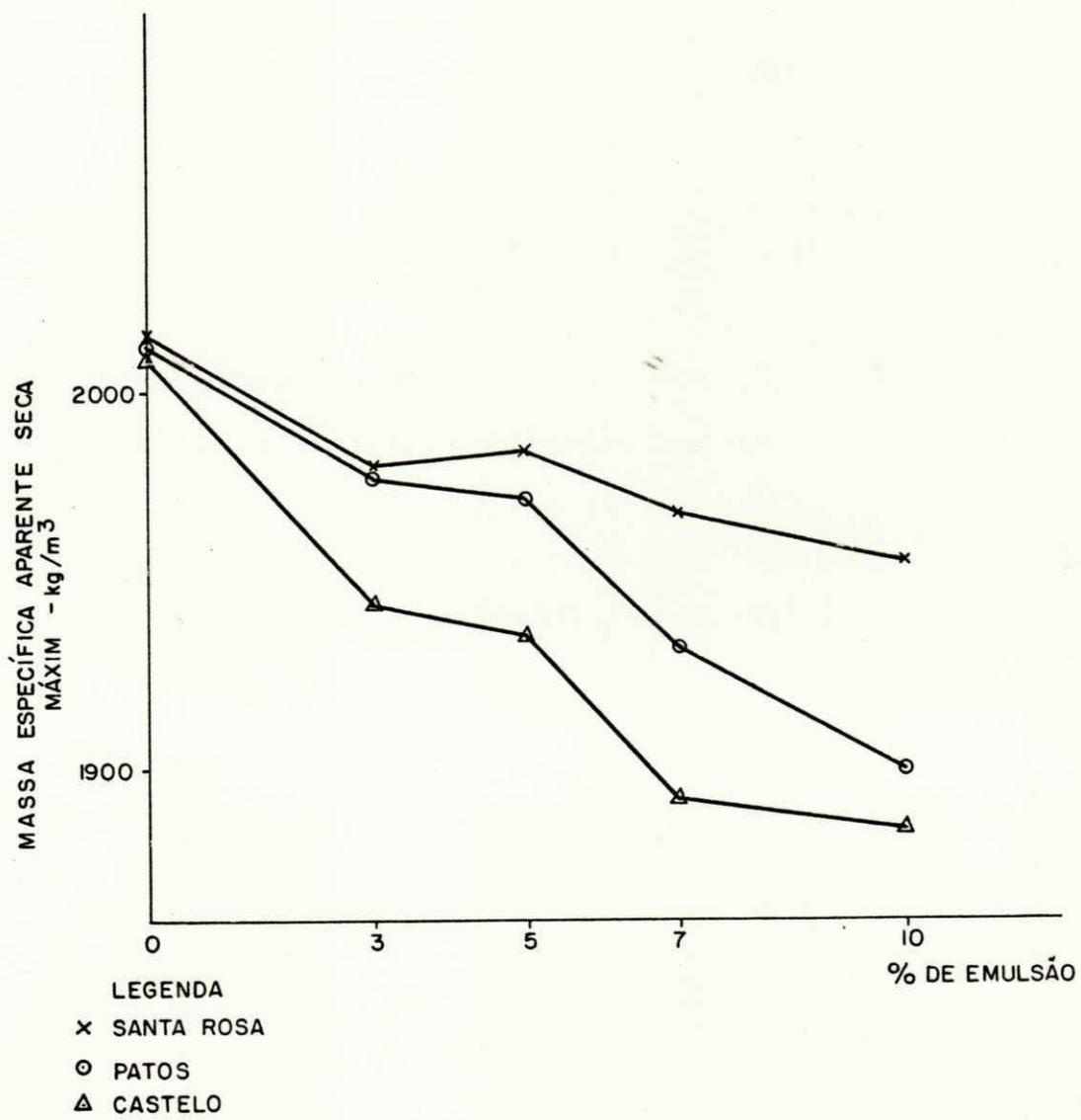
FIGURA 6.3 - Relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca para o solo Castelo à vários teores de emulsão asfáltica.



LEGENDA

- 0% EMULSÃO
- 3% "
- X 5% "
- 7% "
- △ 10% "

FIGURA 6.4 - Relação entre as porcentagens de emulsão e as massas específicas aparentes secas máximas para os três solos.



ma solo-água, isto é, existe um teor ótimo d'água para a máxima resistência.

Este teor ótimo de água é em geral um pouco maior que o teor ótimo para massa específica aparente seca máxima, mas a relação entre estas umidades ótimas que é mostrada na Figura 6.5 indica que com uma boa aproximação poderá ser usada simplesmente a umidade ótima para massa específica aparente seca máxima como a ótima para a resistência. Esta relação assim como todas as outras apresentadas neste trabalho foram tratadas através de uma análise estatística bilateral.

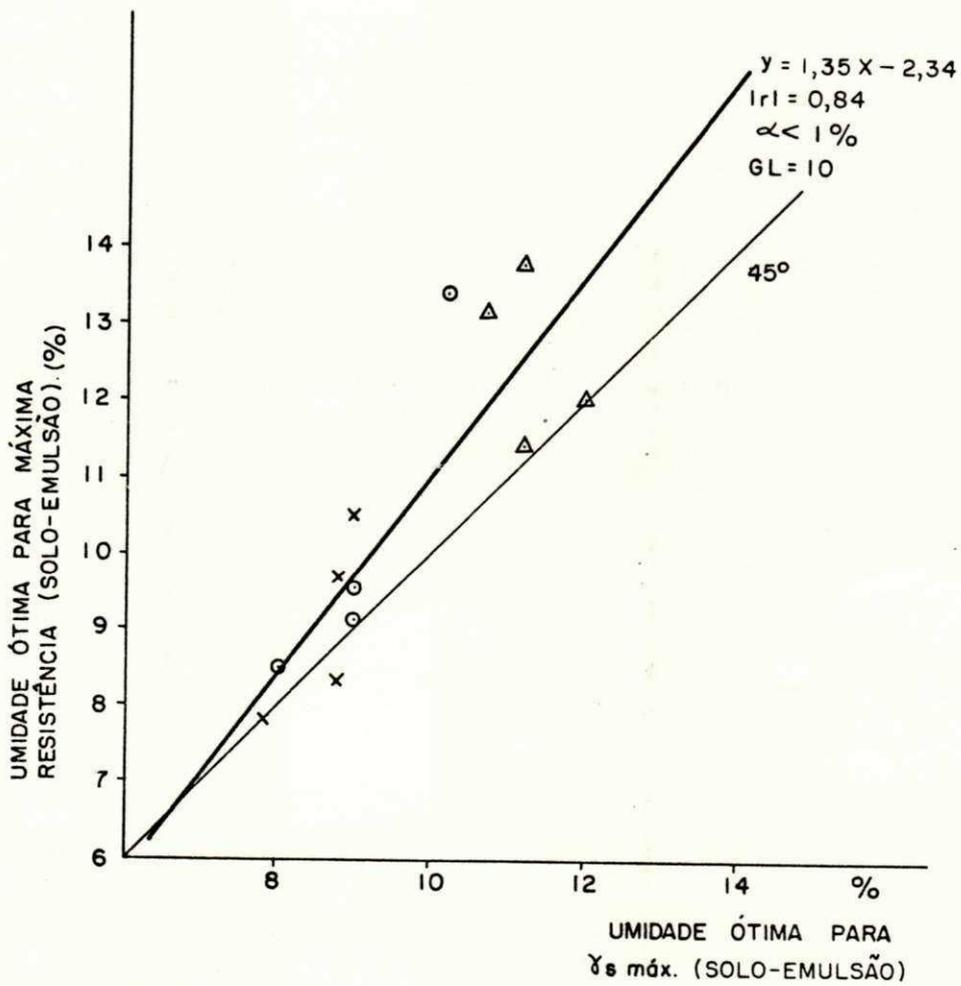
O Anexo F apresenta todos os valores numéricos da relação entre resistência e porcentagem de umidade para os três solos e todos os teores de emulsão utilizada na pesquisa.

As Figuras 6.6 e 6.7 mostram simplesmente as resistências máximas à compressão simples e tensão indireta para os três solos e para as diferentes porcentagens de emulsão. Pode-se observar que o solo de Santa Rosa não exibe um teor ótimo de emulsão no intervalo das porcentagens utilizadas. Vale ressaltar que para intervalos menores que 3% de emulsão não se conseguia misturas homogêneas devido à ruptura prévia da emulsão.

Pode-se notar também que a resistência máxima tanto à compressão simples como à tensão de tração indireta exibe um comportamento bastante semelhante ao mostrado por um solo arenoso.

Os solos de Patos e Castelo mostram uma porcentagem ótima de emulsão para a resistência máxima à compres

FIGURA 6.5 - Relação entre umidade ótima para massa específica aparente seca máxima da mistura solo-emulsão e umidade ótima para máxima resistência da mistura solo-emulsão.



LEGENDA

- x SANTA ROSA
- o PATOS
- Δ CASTELO

FIGURA 6.6 - Relação entre teor de emulsão e resistência à compressão simples.

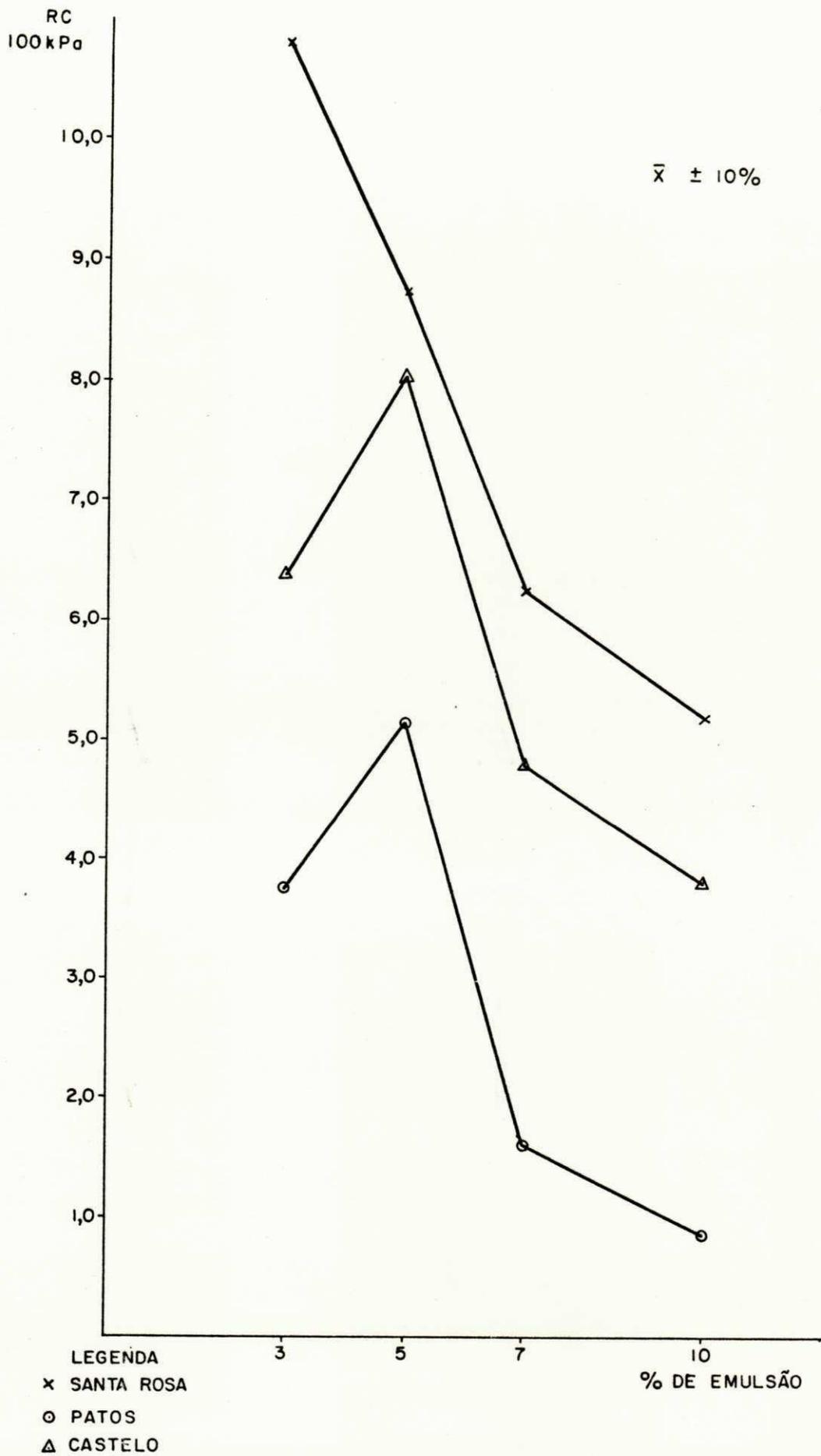
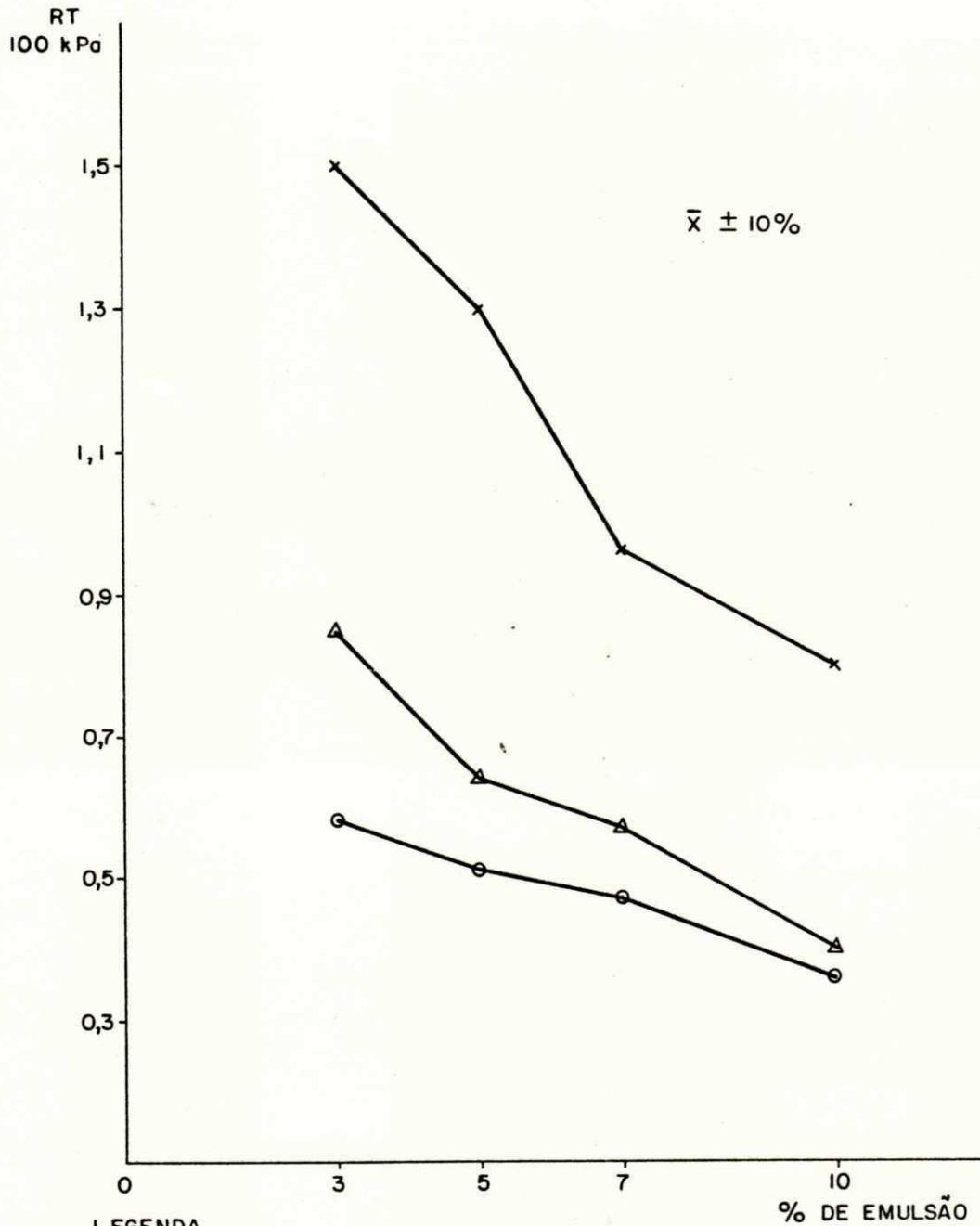


FIGURA 6.7 - Relação entre teor de emulsão e resistência à tensão de tração indireta.



LEGENDA
 x SANTA ROSA
 o PATOS
 Δ CASTELO

FIGURA 6.8 - Relação entre resistência à compressão simples e resistência à tensão de tração indireta.

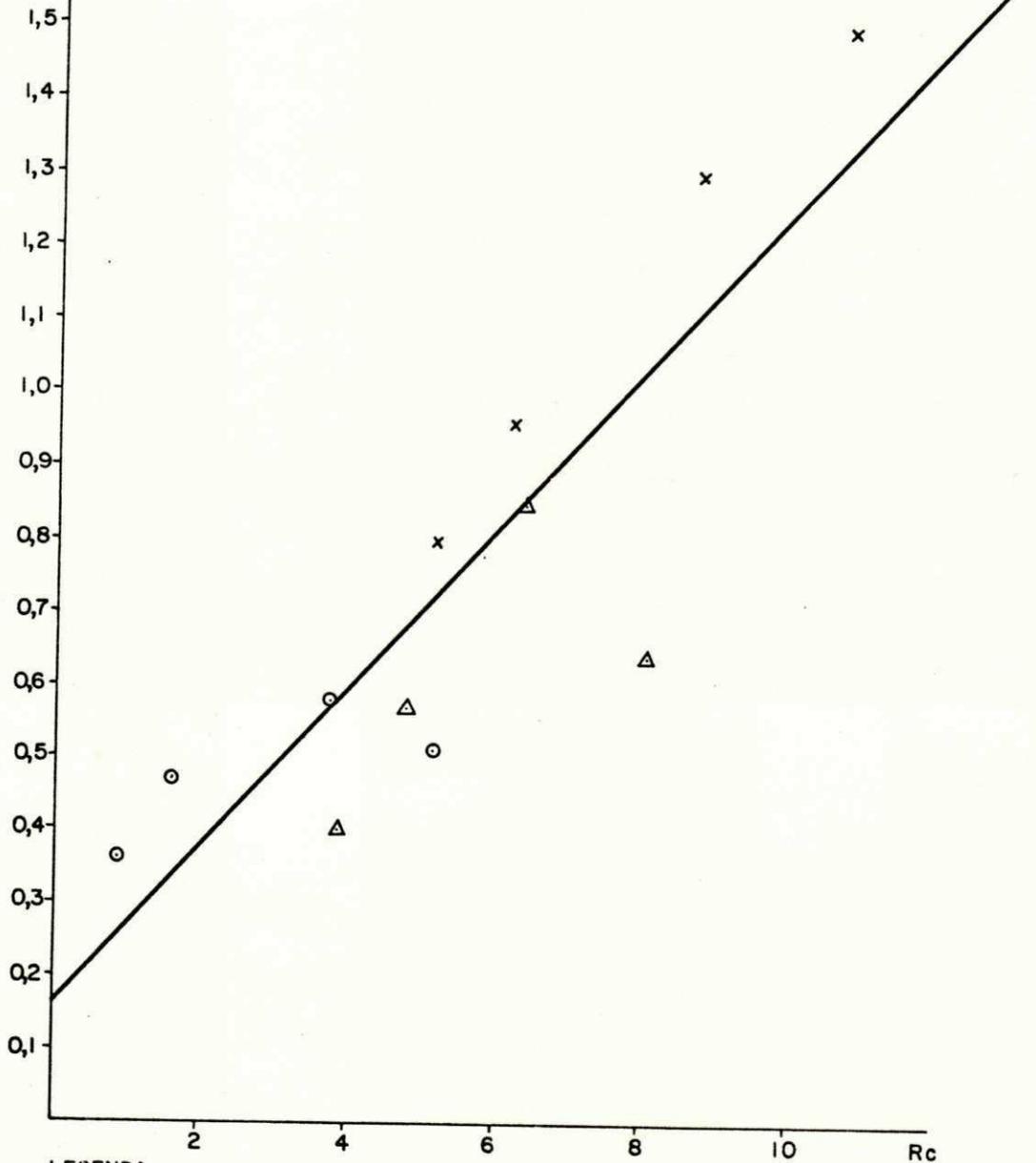
$$RT = 0,16 + 0,11 R_c$$

$$|r| = 0,86$$

$$\alpha < 1,0 \%$$

$$GL = 10$$

RESISTENCIA À TENSÃO DE TRAÇÃO
INDIRETA 100 kPa



LEGENDA
x SANTA ROSA
o PATOS
Δ CASTELO

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES 100 kPa

são simples, mas este teor ótimo não é mostrado quando a relação refere-se à tensão de tração indireta.

A Figura 6.8 mostra a relação entre resistência à compressão simples e resistência à tensão de tração indireta. A análise estatística bilateral mostrou que esta relação é altamente significativa, apresentando um coeficiente de correlação $|r|$ igual a 0,86 para um grau de significância (α) menor que 1%. A equação para esta relação é:

$$R_t = 0,16 + 0,11 R_c$$

onde R_t = Resistência à tensão de tração indireta em kg/cm^2 .

R_c = Resistência à compressão simples em kg/cm^2 .

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 98,08 \text{ kPa.}$$

Essa equação aproxima-se muito de outras relações obtidas entre resistência à compressão simples e resistência à tensão de tração indireta (26), isto é, que a resistência à tensão de tração indireta é 1/10 da resistência à compressão simples.

No estudo de sistemas solo-emulsão pensa-se que é muito importante medir o valor da resistência à tensão de tração indireta do sistema quando ele é usado como elemento estrutural de um pavimento, porque existe o perigo de que as deformações radiais possa facilmente ultrapassar o valor desta resistência.

No Brasil, o programa de pavimentos de baixo custo que está sendo desenvolvido, utiliza o sistema solo-emul-

são asfáltica como elemento estrutural, e se esse elemento não tem uma espessura calculada para reduzir as deformações radiais, então o resultado é uma rápida propagação de trincas após um curto tempo de serviço, essa situação pode ser verificada em várias rodovias de baixo volume de tráfego no Estado da Paraíba.

VI.2.4 - Comportamento do sistema solo-emulsão e absorção d'água

Na metodologia utilizada neste trabalho os corpos de prova foram submetidos à imersão por um tempo de 1 hora. Este tempo parece bastante rigoroso se for considerado que os corpos de prova tinham somente uma porcentagem de água equivalente à 20% de sua umidade de compactação.

Em geral pode-se observar que após imersão de 1 hora existe para todos os sistemas exceto para o solo de Santa Rosa, um teor ótimo de umidade de compactação para o qual o sistema contém uma porcentagem de umidade total mínima, um exemplo disto pode ser observado na Figura 6.9.

Quando traça-se a relação da porcentagem de absorção mínima contra a porcentagem de emulsão, Figura 6.10, os três solos mostram uma porcentagem mínima de absorção para uma porcentagem ótima de emulsão, mas o valor da absorção para todas as porcentagens de emulsão testadas nos três solos é muito pequena, sendo menor que os mínimos recomendados por Leonard (17), American Society Testing Materials (4) na sua norma ASTM-D 915, que sugere uma absorção máxima de 7%,

ou o valor máximo sugerido pelo Road Research Laboratory(18) para solos, de aproximadamente 10%.

Isso mostra que para o caso dos sistemas estudados e para as condições de cura no laboratório, a absorção não é um parâmetro crítico. Por isso os valores de porcentagem de emulsão para absorção mínima, não coincidem com os valores de emulsão para resistência máxima. A Tabela 6.1 mostra que com excessão do solo de Patos a porcentagem de emulsão para resistência máxima é menor que a porcentagem de emulsão para absorção mínima. Como o valor da absorção é praticamente desprezível, para os três sistemas estudados, sugere-se que a porcentagem ótima de emulsão deve ser escolhida como sendo aquela que resulta em máxima resistência, preferivelmente máxima resistência à tensão indireta.

A Figura 6.11 mostra a relação entre umidade ótima do sistema solo-emulsão para máxima resistência e umidade ótima para massa específica aparente seca máxima do solo puro. Na Tabela E.1 no Apêndice E, são mostrados os valores numéricos obtidos.

Através de análise estatística bilateral foi determinada a correlação linear entre as duas variáveis, sendo encontrada a seguinte correlação.

$$Y = 0,75X + 3,0$$

onde: Y = Umidade ótima para massa específica aparente seca máxima para o solo puro.

FIGURA 6.9 - Relação típica entre teor de umidade de compactação e porcentagem total de umidade após imersão, para as Jazidas Patos e Castelo.

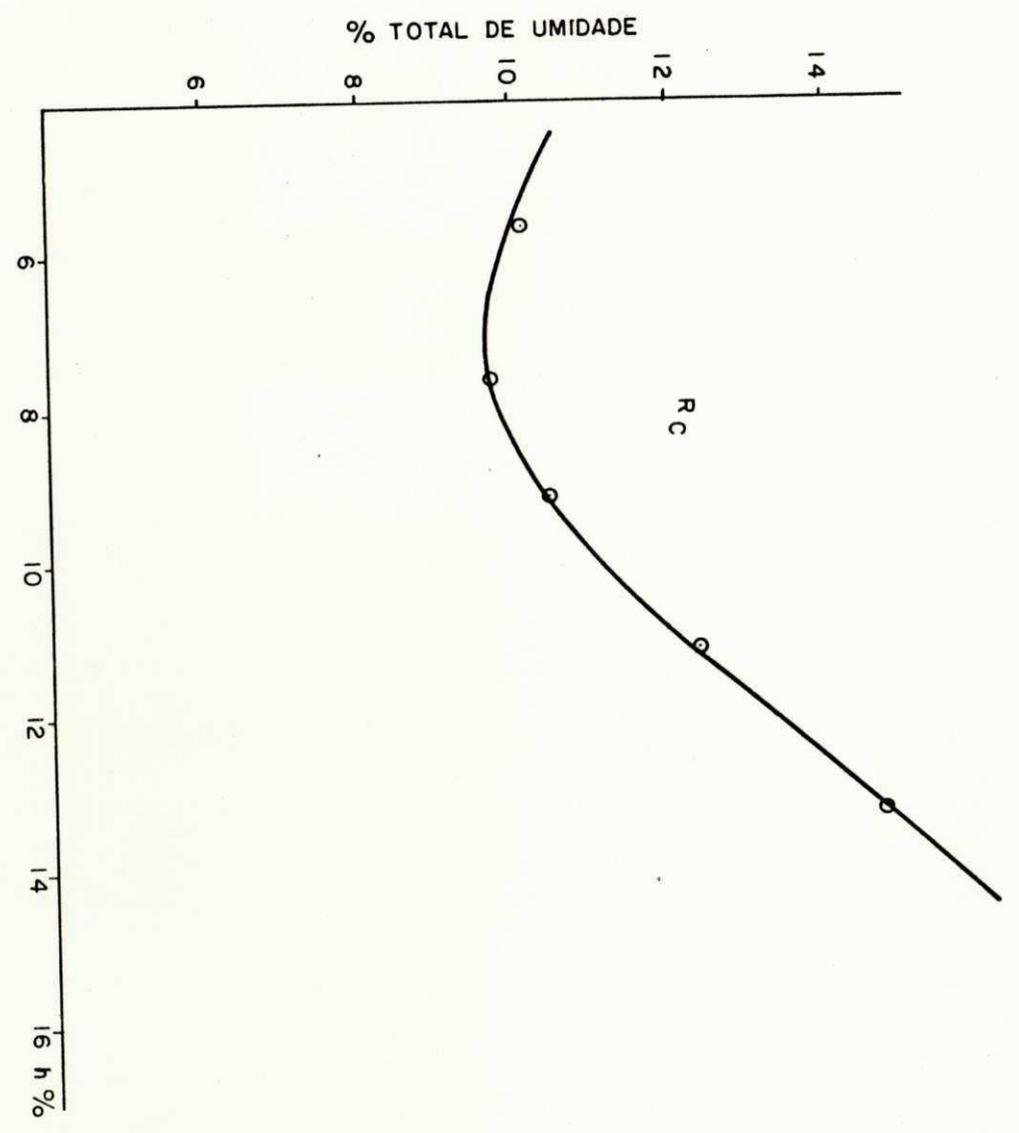
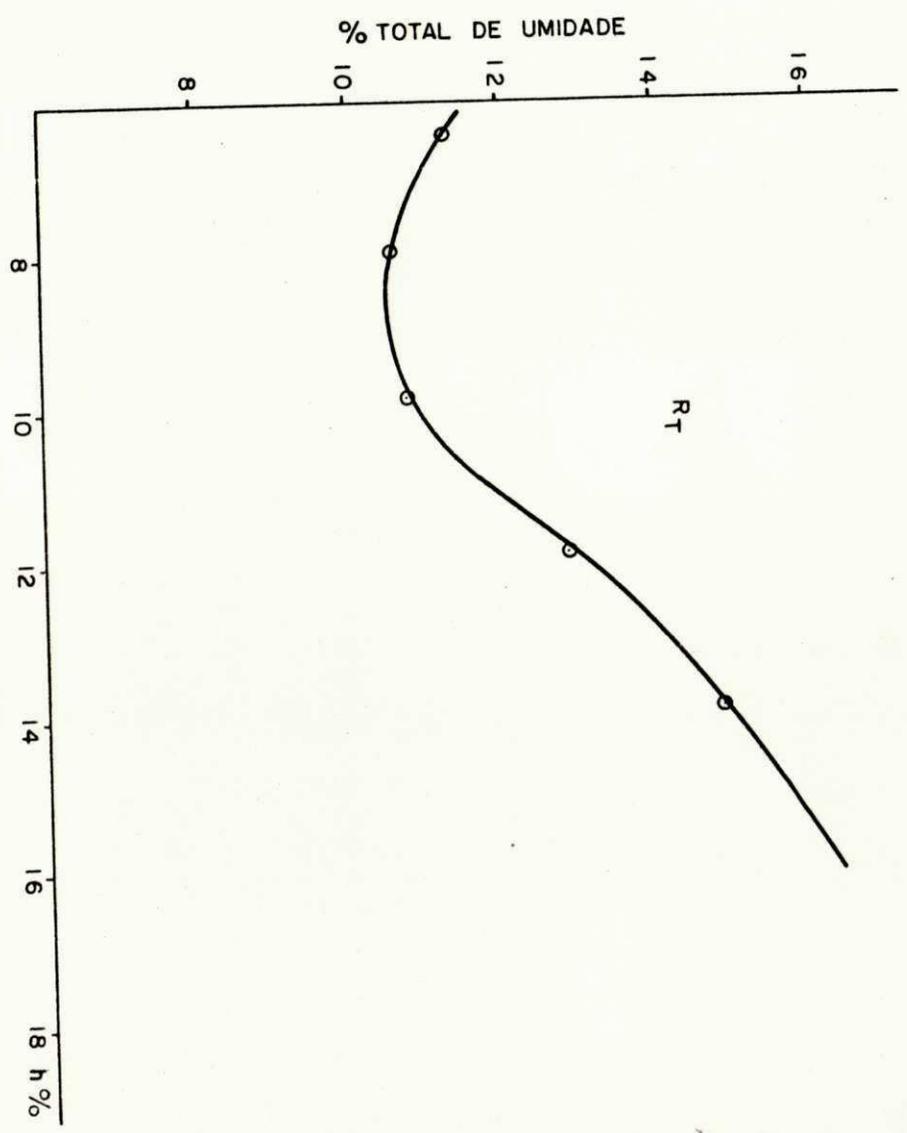


FIGURA 6.10 - Relação entre teor de emulsão e absorção d'água.

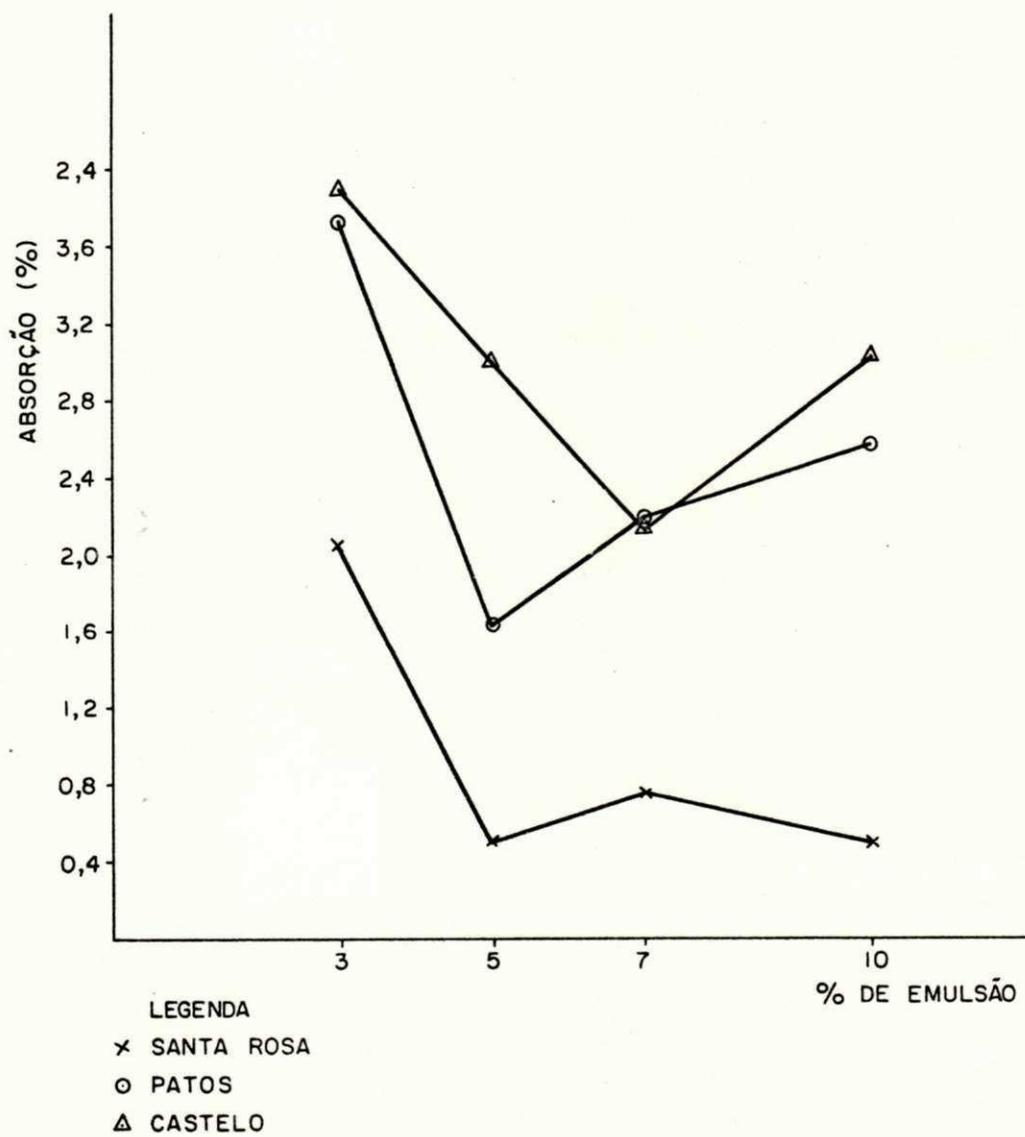


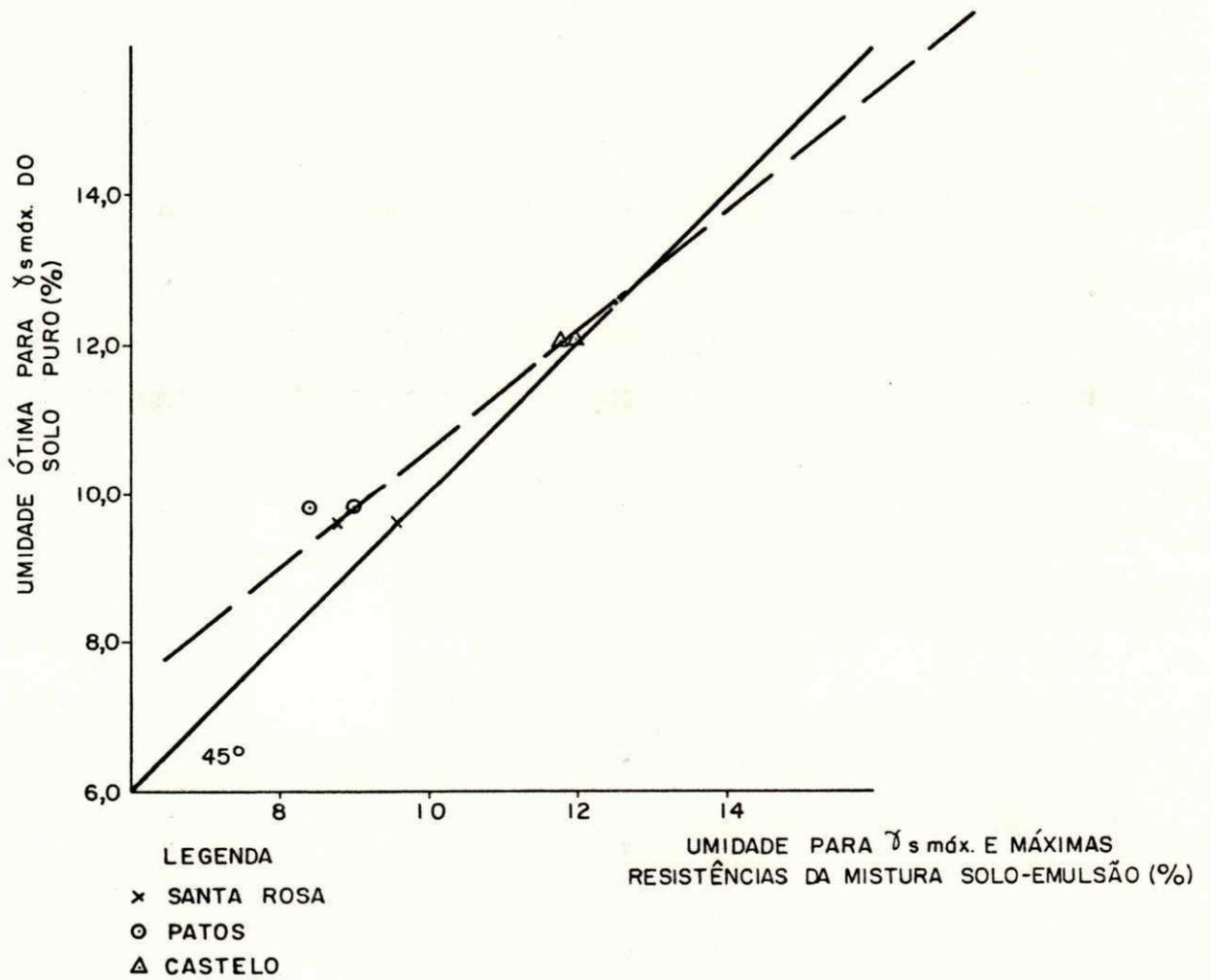
FIGURA 6.11 - Relação entre umidade \bar{o} tima para massa específica aparente seca máxima no ponto de máxima resistência da mistura solo-emulsão e a umidade \bar{o} tima para massa específica aparente seca máxima para o solo puro.

$$y = 0,75X + 3,0$$

$$r = 0,96$$

$$\alpha < 1\%$$

$$GL = 4$$



X = Umidade ótima para massa específica aparente seca máxima e máximas resistências para a mistura.

O coeficiente de correlação foi igual a 0,96, para um grau de significância menor que 1%.

Através do gráfico pode-se observar que a reta obtida é bastante próxima daquela inclinada a 45° mostrando que os valores obtidos para a mistura solo-emulsão foram bastante aproximados dos obtidos para o solo puro.

TABELA 6.1

SOLO	PORCENTAGEM DE EMULSÃO (%)	ABSORÇÃO MÍNIMA (%)	RESISTÊNCIA À COMP. SIMPLES (kg/cm ²)	RESISTÊNCIA À TENS. INDIR. (kg/cm ²)
1	3	2,06	10,60	1,50
	5	0,50	8,80	1,30
	7	0,76	6,25	0,96
	10	0,50	5,20	0,80
2	3	3,74	3,80	0,58
	5	1,64	5,03	0,51
	7	2,20	1,60	0,47
	10	2,58	0,85	0,36
3	3	3,90	6,40	0,85
	5	3,0	8,1	0,64
	7	2,14	4,80	0,57
	10	3,40	3,90	0,40

1 - Jazida Santa Rosa 1 kg/cm² = 98,08 kPa

2 - Jazida de Patos

3 - Jazida Castelo

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

O trabalho limitado da presente pesquisa permite apresentar as seguintes conclusões:

- 1) O processo de cura utilizado com a finalidade de eliminar a água existente na interface asfalto-agregado, bem como de acelerar a evaporação da água utilizada na mistura e da água existente na emulsão (secagem a 60°C durante 24h), mostrou-se plenamente satisfatório, podendo ser indicado para trabalhos futuros.
- 2) Os três solos prestam-se à estabilização com emulsão asfáltica com porcentagens que estão dentro do nível prático em termos de economia, isto é, 3% de emulsão asfáltica para o solo Santa Rosa, 5% de emulsão asfáltica para o solo de Patos e 5% de emulsão asfáltica para o solo de Castelo.
- 3) A relação entre umidade para massa específica aparente seca e umidade para resistência máxima confirma resultados de outros pesquisadores, isto é, que existe um teor de umidade ótimo de moldagem para massa específica seca máxima e resis-

tência máxima. O mais interessante é que estes teores de um
idade estão muito próximos um do outro de maneira que para so
los do tipo dos estudados nesta pesquisa sugere-se que a por
centagem ótima de umidade de moldagem a utilizar, deve ser
a correspondente à massa específica aparente seca máxima. Isso
significa uma grande simplificação de trabalho e de metodolo-
gia no laboratório.

- 4) A porcentagem de absorção de água dos sistemas testados foi sempre menor que os valores máximos sugeridos na bibliografia consultada. Desde que a importância da absorção é somente sua influência na resistência do sistema solo emulsão, para o ca
so desta pesquisa sugere-se que a absorção não seja considera-
da para a determinação da porcentagem ótima de emulsão.
- 5) A relação entre resistência à compressão simples e resistên-
cia à tensão de tração indireta mostrou que, com validade es
tatística, o valor desta tensão é aproximadamente 1/10 da com
pressão simples. Desde que a tensão de tração indireta tem um
valor que em geral pode ser considerada baixo, sua obtenção é
importante visto existir o perigo de que na utilização de sis
temas solo-emulsão como elemento estrutural, as tensões ra
diais induzidas possam ultrapassar o valor desta resistência,
provocando fissuras no pavimento.

CAPÍTULO VIII

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Considerando que este trabalho foi limitado somente a três solos sugere-se a continuação da pesquisa seguindo a linha indicada nos seguintes itens:

- 1) Verificar a metodologia desenvolvida no laboratório para cura acelerada dos corpos de prova. É possível que o tempo de imersão não seja suficientemente grande, desde que o peso específico aparente seco do sistema solo-emulsão parece ter grande predominância no comportamento do material.
- 2) Os sistemas foram compactados somente a um nível de energia. Deve-se continuar estudos de laboratório com o objetivo de verificar se um aumento de energia poderá resultar num decréscimo de emulsão asfáltica sem prejuízo de redução das resistências.
- 3) O cimento asfáltico usado na emulsão foi de penetração (180 200). Existe indicações na literatura de que cimentos asfálticos de menor viscosidade podem resultar em sistemas com melhor comportamento. Por isso deve-se ampliar a pesquisa para a utilização de emulsões asfálticas fabricadas com cimento asfáltico de menor penetração.

- 4) O objetivo final de um programa de estabilização de solos com emulsões asfálticas deveria ser produzir um sistema de classificação de solos que pudessem ser eficientemente estabilizados com emulsões asfálticas. A continuação da pesquisa então deveria incluir grande número de solos que represente a variabilidade de solos da região e que finalmente permita produzir um sistema de classificação para solos potencialmente susceptíveis a ser eficientemente estabilizados com emulsões asfálticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Emulsões Betuminosas para Pavimentos Rodoviários, Divisão de Informãtica Técnico Científica, Rio de Janeiro, 1977.
- 2 - Bevis, P.I. Bituminous Stabilization, Importance of the Soil-Clay Fraction and the Influence of the Orthofosforic Acid as a Secondary Additive, Tese de Ph.D., Universidade de Leeds, 1973.
- 3 - Baptista, C.N. Pavimentação, Tomo II, Editora Globo, 1976.
- 4 - Ritter, Jr., L.J. e Paquette, R.J. Highway Engineering , Ronald Press Company, New York, Terceira Edição, 1967.
- 5 - O'Flaherty, C.A. Higways, Vol. 2, Segunda Edição, Arnold, Londres, 1974.
- 6 - Road Research Laboratory, Bituminous Materials in Road Construction, Her Majesty's Stationery Office, Londres, 1962.
- 7 - Martin, J. R. e Wallace, H.A., Pavimentos Asfálticos, Proy-ecto y Construcccion, Aguilar, Madrid, 1962.
- 8 - Krebs, J.C. e Walker, R.D. Higways Materials, McGraw Hill Book Company, 1971.

- 9 - Vallin, P.H. A Emulsão Asfáltica e Suas Aplicações, 1º Encontro Sobre Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, 1976.
- 10 - Vogt, J.C. Estabilização Betuminosa, 1º Encontro Sobre Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, 1976.
- 11 - Dumas, M.J. Algumas Observações e Reflexões Sobre o Emprego de Misturas Betuminosas, 1º Encontro Sobre Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, 1976.
- 12 - Ferm, R.L. e Borgfeldt, M.J. Cationic Mixing-Grade Asphaltic Emulsions, Highway Research Board, 41º Annual Meeting, 1962.
- 13 - Majidzadeh, K. e Brovold, F.N. Effect of Water Bitumen - Aggregate Mixtures, Highway Research Board, Special Report nº 98, 1968.
- 14 - Justo, E.C.G. e Hariharan, P. Importance of Mixing Water Content in Stabilization of Soils Using Cutback Bitumen, University of Roorkee Research Journal, Vol. IX, nºs. 1 e 2, 1966.
- 15 - Dunn, C.S. e Salem, M.N. Temperature and time effects on the shear strength of sand stabilized With Cationic Bitumen Emulsion, Highway Research Record nº 442, 1973.
- 16 - Hatherly, L.W. e Leaver, P.C. Asphaltic Road Materials, Edward Arnold, Londres, 1967.
- 17 - Ingles, O.G. e Metcalf, J.B. Soil Stabilization Principles and Practice, John Wiley e Sons, 1973.

- 18 - Winterkorn, H.F. e Fang, H.Y. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
- 19 - Road Research Laboratory, Soil Mechanics for Road Engineers, Her Majesty's Stationery Office, Londres, 1957.
- 20 - Ministério da Agricultura/SUDENE, Levantamento Exploratório, Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba, Boletim nº 15, Rio de Janeiro, 1972.
- 21 - ATECEL/CINEP, Projetos Geométricos e Geotécnico do Distrito Industrial de Campina Grande, Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior, Campina Grande, 1972.
- 22 - Ferreira, J.A.M. e Albuquerque, J.P.T. Sinótese da Geologia do Seridó, SUDENE, Série Geologia Regional nº 18, 1969.
- 23 - Filho, J.S. Geologia da Folha Castelo do Piauí, SUDENE, Série Geologia Regional nº 15, 1970.
- 24 - British Standards, Institution, Methods of Testing for Soils for Civil Engineering Purposes, BS 1377:1975, The Institutions London, 1975.
- 25 - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Métodos de Ensaio, Divisão de Pesquisas Tecnológicas, Rio de Janeiro, 1971.
- 26 - Lucena, F.B. A Natureza e Propriedades de Solos Vermelhos do Estado da Paraíba, Tese M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1976.
- 27 - Darter, M.I. Ahfield, S.R. Wilkey, P.L., Devos, A.J. e Wasill, R.G. Design of Emulsified Asphalt-Aggregate Bases for Low Volume Roads, Low Volume Roads: Second International Conferen-

ce, Transportation Research Record nº 702, National Academy of Sciences, 1979.

- 28 - Marinho, R.L. Estudo da Variabilidade Estatística de Ensaios de Classificação de Solos, Tese M.Sc., Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, Campina Grande, 1976.
- 29 - Bezerra, R.L. A Durabilidade de Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento e Aditivos, Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, Campina Grande, 1976.
- 30 - Justo, E.C.G. e Hariharan, P. Laboratory Investigation on Stabilization of Soils Using Cutback Asphalt, University of Roorkee, 1966,
- 31 - McKesson, C.L. Soil Stabilization, With Emulsified Asphalt. Proceedings of the Highway Research Board, 15, 1935.

APÊNDICE A - Valores obtidos para o ensaio do penetrômetro de cone na determinação do limite de liquidez.

P A T O S		SANTA ROSA		CASTELO	
h%	Pen (mm)	h%	Pen (mm)	h%	Pen (mm)
24,37	10,65	20,65	17,15	26,78	16,30
24,32	10,33	20,99	19,40	27,19	17,80
24,70	9,30	21,28	18,45	28,03	18,35
27,37	12,50	22,57	24,25	28,78	20,15
29,27	20,60	23,05	26,87	27,60	18,80
28,69	17,35	18,98	13,35	28,15	19,17
29,33	19,40	20,14	16,15	28,37	19,60
28,73	15,70	21,06	18,10	25,46	13,93
29,83	19,13	21,43	19,90	27,26	16,25
30,40	20,40	22,75	26,10	27,47	16,95
30,96	22,43	23,16	25,10	27,11	15,95
28,21	18,00	19,25	16,00	27,92	17,85
28,18	16,63	20,36	18,90	28,85	19,50
29,86	19,20	21,96	21,63	29,01	21,83
30,31	20,25	22,12	22,05	24,94	13,05
-	-	21,86	20,75	26,89	14,95
-	-	20,64	18,00	27,41	16,75
-	-	21,45	20,35	29,19	20,45
-	-	21,64	23,80	29,57	21,60

APÊNDICE B - Método para determinação da área específica

1.0 - APARELHAGEM e MATERIAIS

1.1 - Cápsulas de alumínio

1.2 - Glicerol

1.3 - Estufas

1.4 - Bastão de vidro

1.5 - Cronômetro

1.6 - Água destilada

1.7 - Balança com precisão de 0,0001 g

2.0 - EXECUÇÃO DO ENSAIO

2.1 - Colocar glicerol em uma estufa a 110°C para saturação2.2 - Colocar as cápsulas de alumínio em outra estufa a 110°C verificando a constância de peso.2.3 - Colocar aproximadamente 0,2 g de amostra na cápsula de alumínio e levar a estufa a 110°C por 48 horas.

2.4 - Verificar a constância de peso da cápsula com a amostra em intervalos de pesagem de 4 horas.

2.5 - Preparar solução glicerol a 2% com água destilada.

2.6 - Adicionar 3 ml da solução do item 2,5 ao conjunto cápsula mais amostra.

2.7 - Com o auxílio do bastão de vidro homogeneizar bem a amostra.

2.8 - Colocar mais 2 ml da solução de glicerol na cápsula com solo, aproveitando para limpeza do bastão de vidro.

2.9 - Colocar o conjunto na estufa saturada com glicerol (item 2.1).

2.10- Pesar o conjunto de 4 em 4 horas até constância de peso. As pesadas devem ser realizadas no mesmo espaço de tempo (aproximadamente 20 segundos).

3.0 - CÁLCULO DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

$$\text{Glicerol} = \text{H}_8\text{C}_3\text{O}_3 = 92 \text{ g}$$

$$92 \text{ g} = 6.02 \times 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$X \text{ (peso absorvido)} = y \text{ moléculas}$$

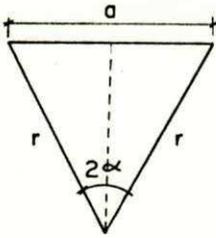
$$1 \text{ molécula} - 26,9 \times 10^{-20} (\text{m}^2/\text{g})$$

$$y \text{ moléculas} - A \text{ m}^2/\text{g}$$

$$1.0 \text{ g (glicerol)} - 1760,2 \text{ m}^2/\text{g}$$

$$X \text{ (glicerol absorvido)} - y$$

APÊNDICE C - Cálculo da constante para obter tensão de tração indireta.



$$a = 1,27 \text{ cm}$$

$$d = 10,13 \text{ cm}$$

$$h = 12,88 \text{ cm}$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{a}{2r} = \frac{1,27}{10,13} = 0.1253702$$

$$\text{Cos } \alpha = \sqrt{1 - (0.1253702)^2} = 0.992110$$

$$F_t = \frac{2p}{ah} \left(2 \text{ Sen } \alpha \text{ Cos } \alpha - \frac{a}{d} \right)$$

$$F_t = \frac{(2 \times 0.1253702 \times 0,992110 - \frac{1,27}{10,13}) 2p}{3,1416 \times 1,27 \times 12,88}$$

$$F_t = \frac{0.123392}{51.389036} \times 2p$$

$$F_t = 0,004802 \times P \text{ kg/cm}^2$$

OBS: $1 \text{ kg/cm}^2 = 98,08 \text{ kPa}$

APÊNDICE D - Valores obtidos na determinação do período de cura.

TABELA D.1 - Solo puro a 49°C - Jazida Castelo

Tempo Horas	PONTO MAIS SECO		UMIDADE ÓTIMA		PONTO MAIS ÚMIDO	
	1	2	1	2	1	2
0	9,50	100,0	12,19	100,0	15,46	100,0
4	7,20	75,80	9,80	75,96	13,83	89,45
8	5,75	60,52	8,20	67,27	12,70	82,15
24	3,20	33,70	3,95	32,40	8,64	55,89
48	2,00	21,05	2,55	20,92	5,38	37,80
96	1,53	16,10	1,26	10,34	1,88	12,16

TABELA D.2 - Solo Emulsão a 49°C - Jazida Castelo

Tempo Horas	PONTO MAIS SECO		UMIDADE ÓTIMA		PONTO MAIS ÚMIDO	
	1	2	1	2	1	2
0	11,60	100,0	13,55	100,0	17,08	100,0
4	9,40	81,03	11,67	86,12	15,91	94,14
8	8,48	73,10	10,89	80,37	14,80	86,65
24	5,40	46,55	7,15	52,77	10,57	61,88
48	3,81	32,84	4,46	32,91	6,48	37,94
96	1,74	15,00	1,68	12,40	3,10	18,15

1 - Umidade (%)

2 - Porcentagem da Umidade Inicial. (%)

TABELA D.3 - Solo-emulsão a 60°C para a umidade ótima de compactação.

Tempo Horas	SANTA ROSA		P A T O S		C A S T E L O	
	1	2	1	2	1	2
0	11,79	100,0	12,18	100,0	14,42	100,0
1	10,57	89,65	10,32	84,72	12,41	86,06
2	9,37	79,64	9,22	75,69	10,59	73,44
3	8,17	69,29	8,38	68,80	9,39	65,12
4	7,47	63,36	7,90	64,86	7,91	54,85
5	6,58	55,81	7,24	59,44	7,37	51,11
6	6,17	52,33	6,91	56,73	6,72	46,60
7	5,66	48,00	6,47	43,12	6,26	43,41
8	5,30	44,95	6,12	50,24	-	-
24	2,55	21,62	2,80	22,99	2,72	18,86

1 - Umidade (%)

2 - Porcentagem da Umidade Inicial.(%)

APÊNDICE E - Valores obtidos para o traçado das curvas de com
pactação dos sistemas solo-emulsão.

TABELA E.1.

		0%		3%		5%		7%		10%	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
ROSA		5,77	1863	5,85	1813	5,50	1863	4,88	1778	5,30	1827
		7,77	1952	7,24	1919	7,10	1967	6,84	1946	5,91	1909
		9,58	2013	9,66	1980	8,78	1980	8,79	1962	7,19	1956
		11,84	1935	11,78	1887	10,48	1896	10,63	1863	9,25	1889
		14,15	1847	11,91	1866	12,57	1806	12,04	1807	10,40	1840
SANTA		5,43	1893	5,02	1838	4,92	1837	6,44	1811	7,69	1845
		7,78	1958	7,10	1924	7,21	1904	7,98	1923	9,44	1900
		9,51	2011	9,00	1976	9,00	1971	10,23	1921	10,58	1865
		11,37	2000	11,20	1960	10,83	1936	11,89	1861	13,00	1790
		13,57	1923	12,73	1884	12,62	1860	13,91	1782	14,79	1720
CASTELO		9,00	1769	7,90	1726	6,86	1745	6,86	1789	6,10	1830
		10,36	1907	10,29	1902	9,00	1793	9,05	1823	7,69	1814
		12,06	2009	11,82	1943	11,13	1878	10,63	1871	9,94	1874
		14,14	1941	13,86	1908	12,63	1937	12,80	1891	11,99	1880
		15,48	1897	15,40	1864	14,60	1882	14,67	1814	13,80	1836

1 - Teor de Umidade (%)

2 - Massa Específica Aparente Seca (kg/m^3).

TABELA E.2.

SANTA ROSA		P A T O S		C A S T E L O	
1	2	1	2	1	2
0	2014	0	2012	0	2008
3	1980	3	1977	3	1944
5	1984	5	1972	5	1934
7	1968	7	1932	7	1892
10	1955	10	1900	10	1884

1 - Porcentagem de Emulsão (%)

2 - Massa Específica Aparente Seca Máxima kg/m^3 .

APÊNDICE F - Valores para o traçado das curvas de resistência em função do teor de umidade para cada teor de emulsão.

TABELA F.1.

Resultados obtidos para o solo de Santa Rosa.

3%		5%		7%		10%	
1	2	1	2	1	2	1	2
7,6	10,55	5,90	5,35	6,0	4,30	8,00	2,35
9,7	10,75	8,30	9,75	7,8	6,25	9,00	3,65
11,7	8,65	9,80	6,90	9,9	5,80	9,70	4,00
13,8	7,30	12,10	6,10	11,7	5,35	10,5	5,20
		13,30	5,0	13,7	4,75	11,4	3,20

3%		5%		7%		10%	
1	3	1	3	1	3	1	3
7,25	0,93	5,50	0,73	4,90	0,47	5,30	0,37
9,65	1,50	7,10	1,06	6,85	0,79	5,90	0,51
11,80	1,18	8,80	1,30	8,80	0,96	7,20	0,80
11,90	0,96	10,50	1,09	10,60	0,93	9,25	0,67
		12,60	0,86	12,05	0,95		

1 - Umidade (%)

2 - Resistência à Compressão Simples (kg/cm^2)3 - Resistência à Tensão Indireta (kg/cm^2).OBS: $1 \text{ Kg/cm}^2 = 98,08 \text{ kPa}$

TABELA F.2.

Resultados obtidos para o solo de Patos.

3%		5%		7%		10%	
1	3	1	3	1	3	1	3
7,10	0,26	7,20	0,29	6,35	0,20	7,70	0,26
9,00	0,55	9,00	0,51	8,00	0,24	9,45	0,32
11,20	0,58	10,82	0,45	10,22	0,47	10,80	0,35
12,75	0,44	12,60	0,41	11,90	0,35	13,00	0,35
-	-	-	-	13,90	0,28	14,80	0,26

3%		5%		7%		10%	
1	2	1	2	1	2	1	2
6,60	1,30	5,70	1,40	5,60	1,00	6,20	0,80
8,80	2,20	6,50	1,80	7,60	1,45	7,60	0,85
10,80	2,50	9,50	5,15	9,10	1,60	9,70	0,80
13,40	3,75	11,00	4,30	11,15	0,95	11,45	0,50
15,40	3,20	13,30	3,20	13,30	0,85	13,30	0,55

1 - Umidade %

2 - Resistência à Compressão Simples (kg/cm^2)3 - Resistência à Tensão Indireta (kg/cm^2)OBS: $1 \text{ kg/cm}^2 = 98,08 \text{ kPa}$

TABELA F.3.

Resultados obtidos para o solo de Castelo.

3%		5%		7%		10%	
1	2	1	2	1	2	1	2
9,40	4,80	8,80	2,30	7,00	1,25	6,40	1,80
11,40	6,40	10,60	5,90	8,90	3,40	7,70	2,00
13,50	4,10	12,05	8,05	10,70	4,10	9,90	2,00
14,70	4,40	13,80	3,50	13,15	4,80	11,80	2,70
				14,45	3,30	13,80	3,85

3%		5%		7%		10%	
1	3	1	3	1	3	1	3
10,30	0,39	9,00	0,23	9,10	0,35	9,80	0,27
11,80	0,85	11,10	0,64	10,60	0,57	12,60	0,40
13,90	0,63	12,60	0,47	12,80	0,50	13,60	0,28
15,40	0,41	14,60	0,33	14,60	0,29	16,00	0,22

1 - Umidade (%)

2 - Resistência à Compressão Simples (kg/cm^2)3 - Resistência à Tensão Indireta (kg/cm^2)OBS: $1 \text{ kg/cm}^2 = 98,08 \text{ kPa}$

APÊNDICE G - Valores de umidade ótima para densidade aparente,
seca máxima e máximas resistências.

TABELA G.1

	SANTA ROSA	PATOS	CASTELO
1	9,60	9,80	12,05
2	8,80	8,40	11,80
3	9,60	9,00	12,00

- 1 - Umidade ótima para massa específica aparente seca máxima para o solo puro. (h%)
- 2 - Umidade ótima para máxima resistência à tensão indireta. (h%)
- 3 - Umidade ótima para máxima resistência à compressão simples. (h%)