Campus de São Carlos

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO E
FOSFOGESSO COM VISTAS A SUA UTILIZAÇÃO
EM RODOVIAS**

JOSE ANTONIO ORTIZ OLIVA

Orientador: Prof. Dr. ALEXANDRE B. PARREIRA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO E FOSFOGESSO COM
VISTAS A SUA UTILIZAÇÃO EM RODOVIAS**

JOSE ANTONIO ORTIZ OLIVA

**Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Transportes**

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036036

**São Carlos / SP
1997**

Class.	TESE - EESC
Curr.	4024
Tombo	T079/97

Área: Transportes.

st 0747631

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

077e Ortiz Oliva, Jose Antonio
Estudo de misturas de solo e fosfogesso com
vistas a sua utilização em rodovias / Jose Antonio
Ortiz Oliva. -- São Carlos, 1997.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.

Área: Transportes

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Benetti
Parreira

1. Estabilização de solo. 2. Fosfogesso.
I. Título

Dedicatória

A mi respetada y querida mamá Rogelia (†), por la sapiencia de sus consejos. Los frutos que hoy cosecho en la escuela de la vida, son gracias a ella.

A mi esposa Gueddi;
A mi hija Maria Fernanda;
A mi hijo, mi mejor amigo, José Ernesto.

Agradecimentos

Ao Prof. Alexandre Benetti Parreira, nosso mestre e orientador, pessoa por quem cultivo grande respeito, pela oportunidade de trabalharmos juntos e pelas lições de vida;

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, em especial ao Prof. José Bernardes Felex, Prof. João Alexandre Widmer, Prof. Manoel Henrique Alba Sória, Glauco Tulio Pessa Fabbri, pela confiança sempre manifestada, pelo apoio moral e pelo ensino adquirido durante todo estes anos;

À Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, onde tive à disposição todos os recursos materiais, computacionais e bibliográficos, e onde convivi por mais de dois anos com profissionais de alto nível;

Ao Dr. Ramzi Taha, professor do Departamento de Engenharia Civil e Engenharia Ambiental "Washington State University", pela literatura e informações facilitadas, consideradas importantes no desenvolvimento deste trabalho;

Aos funcionarios do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, em especial aos Técnicos do Laboratório de Solos, os caros amigos Antônio Carlos Gigante, Morasco e Oliveira. À secretária Heloisa Helena Morgado Belo, ao Carlos pelos serviços informáticos;

Ao Dito, funcionario do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, pela colaboração na fase laboratorial e informática do trabalho;

À CAPES, pelo apoio financeiro para minha permanência no Brasil durante a realização do curso de Pós-Graduação;

À Fosfertil, indústria de fertilizantes fosfatados que facilitou o material desta pesquisa;

Aos respeitados amigos Roberto T. Aramaki e Carlos Alexandre Bráz de Carvalho, pela permanente orientação, sugestões, apoio no convívio diário. Pessoas que serão sempre lembradas. É com orgulho, pois, que eu registro a minha gratidão;

A todos os amigos com quen tenho convivido durante esses anos , em especial à Sandra Oda, à Vânia María Pampolha, à Eliane Viviani, ao Fernando Forattini Schmitd, ao Glauco Pontes Filho, ao Jairo Salim Pinheiro de Lima, ao Mário Garrido, ao Cássio Levada, ao José Thomás Mendez, ao John Kennedy Guedes Rodrigues, ao Enrrique Reyes y esposa.

Sumário

	página
DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
SUMÁRIO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
 CAPÍTULO 1.....	 1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Natureza do problema.....	1
1.2 - Objetivos da Pesquisa.....	3
1.3 - Organização do Trabalho.....	4
 CAPÍTULO 2.....	 6
REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 - Introdução.....	6
2.2 - Tipos de Processos para a Obtenção do	
Fosfogesso.....	6
2.2.1 - Processo Di-Hidratado.....	6
2.2.2 - Processo Hemi-Hidratado.....	8
2.2.3 - Processo Anidro.....	9

2.3 - Características Físico-Químicas do Fosfogesso.....	9
2.3.1 - Estudo Mineralógico e Morfológico.....	10
2.3.2 - Análise Química.....	12
2.3.3 - Análise Física do Fosfogesso.....	13
2.4 - Fosfogesso Compactado.....	16
2.4.1 - Relações entre Massa Específica Seca e Umidade.....	17
2.4.2 - Resistência à Compressão Simples.....	18
2.5 - Misturas com Fosfogesso Compactadas.....	24
2.5.1 - Misturas de Fosfogesso e Solo.....	25
2.5.2 - Misturas de Fosfogesso e Cimento.....	31
2.5.3 - Misturas de Fosfogesso e Cinzas Volantes.....	34
2.5.4 - Misturas de Fosfogesso, Cinzas Volantes e Cal.....	37
2.5.5 - Misturas de Fosfogesso, Areia e Asfalto.....	40
2.5.6 - Misturas de Fosfogesso e Concreto Rolado.....	42
 CAPÍTULO 3.....	 45
MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 - Procedimento Geral.....	45
3.2 - Características dos materiais.....	45
3.2.1 - Fosfogesso.....	45
3.2.2 - Solo.....	51
3.3 - Método Experimental.....	54
3.3.1 - Estudo Preliminar.....	54
3.3.2 - Estudo Definitivo.....	56
3.3.2.1 - Preparação das amostras.....	56
3.3.2.2 - Dosagem e Mistura.....	58
3.3.2.3 - Compactação dos Corpos de Prova.....	59
3.3.2.4 - Cura dos Corpos de Prova.....	61
3.3.2.5 - Ensaio de Compressão Simples.....	62
3.3.2.6 - Tratamento Estatístico dos Resultados dos Ensaio de Compressão Simples.....	 64

CAPÍTULO 4.....	66
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	66
4.1 - INTRODUÇÃO.....	66
4.2 - Estudo Preliminar.....	66
4.2.1 - Alternativa 1.....	66
4.2.2 - Alternativa 2.....	67
4.2.3 - Alternativa 3.....	67
4.2.4 - Alternativa 4.....	69
4.3 Estudo Definitivo.....	73
4.3.1 - Ensaio de Compactação.....	73
4.3.1.1 - Massa Específica Seca Máxima em Função do Teor de Fosfogesso.....	73
4.3.1.2 - Umidade Ótima em Função do Teor de Fosfogesso Anidro.....	74
4.3.1.3 - Massa Específica Seca Máxima em Função do Teor de Umidade.....	75
4.3.2 - Ensaio de Compressão Simples.....	76
4.3.2.1 - Resistência em Função do Tempo de Cura e do Teor de Fosfogesso.....	80
4.3.2.2 - Resistência em Função do Desvio da Umidade Ótima.....	85
CAPÍTULO 5.....	92
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	92
5.1 - Introdução.....	92
5.2 - Principais Conclusões.....	92
5.3 - Sugestões para Futuros Trabalhos.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO A - CURVAS DE COMPACTAÇÃO DE MISTURAS DE FOSFOGESSO ANIDRO E SOLO COMPACTADAS NA ENERGIA DO PROCTOR NORMAL.....	98

ANEXO B - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS E NÃO IMERSAS, COMPACTADAS NA ENERGIA DO PROCTOR NORMAL.....	120
ANEXO C - ANÁLISE ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DA PESQUISA.....	173

Lista de Figuras

1.1 - DISTRIBUIÇÃO DO FOSFOGESSO ESTOCADO DURANTE O PERÍODO 1973-1980.....	2
2.1 - CRISTAIS ACICULARES.....	11
2.2 - CRISTAIS TABULARES.....	11
2.3 - GRANULOMETRIA DE FOSFOGESSOS PRODUZIDOS EM TRÊS DIFERENTES ESTADO AMERICANOS.....	15
2.4 - RELAÇÕES DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA SECA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO FOSFOGESSO D-H. PRODUZIDO NA INDÚSTRIA GARDINIER.....	19
2.5 - RELAÇÕES DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA SECA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO FOSFOGESSO D-H. PRODUZIDO NA INDÚSTRIA AGRICO.....	20
2.6 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE 8 FOSFOGESSOS D-H DE DIFERENTES INDUSTRIAS. COMPACTADOS NA ENERGIA DE PROCTOR MODIFICADO E ANALISADOS EM CONDIÇÕES SECAS AO AR.....	21
2.7 - RELAÇÕES DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA SECA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO FOSFOGESSO ANIDRO PRODUZIDO NA CARBOQUÍMICA CATARINENSE.....	24
2.8 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO COM DIVERSOS TEORES DE FOSFOGESSO D-H E AREIA, PARA A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO PROCTOR MODIFICADO.....	26
2.9 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E AREIA NAS PROPORÇÕES 1:2, PARA DIVERSOS TEORES DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO.....	28
2.10 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES. UMIDADE ÓTIMA E MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA, PARA DIFERENTES TEORES DE FOSFOGESSO, ARGILA E AREIA.....	31
2.11 - VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E CIMENTO.....	32
2.12 - VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E CINZAS VOLANTES.....	35
2.13 - VALORES COMPARATIVOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA DIFERENTES MISTURAS CONTENDO FOSFOGESSO D-H, CINZA VOLANTE E CAL.....	38
2.14 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H, CINZA VOLANTE E CAL, PARA O TEMPO DE CURA DE 360 DIAS.....	39

2.15 - VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E ASFALTO DE CURA RÁPIDA (RC-70)	41
2.16 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO DE CURA RÁPIDA (RC-70). QUANDO ANALISADOS EM CONDIÇÕES INUNDADAS E NÃO INUNDADAS.....	42
3.1 - COLETA DO FOSFOGESSO.....	46
3.2 - CURVA GRANULOMÉTRICA OBTIDA POR PENEIRAMENTO DO FOSFOGESSO DA FOSFERTIL.....	48
3.3 - JAZIDA DE SOLO DA REGIÃO DE UBERABA	51
3.4 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO DA REGIÃO DA FOSFERTIL.....	53
3.5 - CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO, SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO MCT (MINIATURA COMPACTADO TROPICAL)	54
3.6 - QUARTEAMENTO DO FOSFOGESSO ANIDRO.....	57
3.7 - QUARTEAMENTO DO SOLO.....	58
3.8 - PROCESSO DE MISTURA E HOMOGENEIZAÇÃO DO SOLO E FOSFOGESSO.....	59
3.9 - EQUIPAMENTO UTILIZADO DURANTE O PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	60
3.10 - CORPOS DE PROVA NO PROCESSO DE CURA.....	61
3.11 - INTERPOLAÇÃO GRÁFICA PARA A OBTENÇÃO DA "RCS" NA UMIDADE REQUERIDA.....	63
4.1 - IMERSÃO DE CORPOS DE PROVA CONTENDO SOLO E FOSFOGESSO DI-HIDRATADO (D-H).....	68
4.2 - IMERSÃO DE CORPOS DE PROVA CONTENDO SOLO E FOSFOGESSO ANIDRO.....	70
4.3 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS DIVERSAS MISTURAS DE SOLO E FOSFOGESSO ANIDRO.....	71
4.4 - MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO.....	74
4.5 - UMIDADE ÓTIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO.....	75
4.6 - MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE UMIDADE.....	76
4.7 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO ENSAIADAS SEM IMERSÃO EM ÁGUA.....	78
4.8 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, ENSAIADAS APÓS IMERSÃO EM ÁGUA.....	79
4.9 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO, ENSAIADAS SEM IMERSÃO EM ÁGUA.....	82
4.10 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO, ENSAIADAS APÓS IMERSÃO EM ÁGUA.....	83

4.11 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS.....	84
4.12 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS.....	85
4.13 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS.....	86
4.14 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS.....	86
4.15 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS.....	87
4.16 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS.....	87
4.17 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS.....	88
4.18 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS.....	88
4.19 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS.....	89
4.20 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS.....	89
4.21 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS.....	90
4.22 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS.....	90

Lista de Tabelas

2.1 - COMPOSIÇÃO E TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS EXISTENTES NO FOSFOGESSO D-H.....	13
2.2 - RESULTADOS DE ANÁLISE FÍSICA DO FOSFOGESSO D-H.....	14
2.3 - UMIDADES ÓTIMAS E MASSAS ESPECÍFICAS SECAS MÁXIMAS NA ENERGIA PROCTOR MODIFICADO, FOSFOGESSO D-H DE 8 INDÚSTRIAS DO ESTADO DA FLÓRIDA.....	17
2.4 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E 10% DE CIMENTO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURA DOS CORPOS DE PROVA E ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO.....	33
2.5 - PROPORÇÕES DA MISTURAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL DE LA PORTE-TEXAS.....	36
2.6 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DAS DIFERENTES MISTURAS ANALISADAS NA PISTA EXPERIMENTAL LOCALIZADA NOS PÁTIOS DO INSTITUTO DO FOSFOGESSO EM BARTOW-FLÓRIDA.....	43
3.1 - RESULTADOS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA (PENEIRAMENTO)...	47
3.2 - ANÁLISE FÍSICA.....	49
3.3 - ANÁLISE QUÍMICA PARA O FOSFOGESSO DA PILHA DE EXPEDIÇÃO.....	50
3.4 - RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA DO SOLO DA REGIÃO DA FOSFERTIL.....	52
4.1 - PORCENTAGEM DAS MISTURAS DE FOSFOGESSO ANIDRO DE SOLO.....	70
4.2 - MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA E TEOR DE UMIDADE ÓTIMA, PARA AS CURVAS DE COMPACTAÇÃO NA ENERGIA DO PROCTOR NORMAL DE FOSFOGESSO ANIDRO E SOLO.....	72
4.3 - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA SEM IMERSÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO E TEMPO DE CURA.....	77
4.4 - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA COM IMERSÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO E TEMPO DE CURA.....	80
4.5 - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA COM IMERSÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO E TEMPO DE CURA.....	80

Lista de Abreviaturas e Siglas

LCPC - Laboratoire Central des Pontes et Chaussées

D-H - Di-hidratado

H-H - Hemi-hidratado

ppm - Concentração por milímetro

LL - limite de liquidez

LP - limite de plasticidade

USC - Sistema de Classificação Unificado de Solos

ML - material siltooso de baixa plasticidade

HRB - Highway Research Board)

RCS - resistência à compressão simples

RC-70 - asfalto de cura rápida

RCC - concreto rolado

EESC-USP - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

IP - Índice de Plasticidade

MCT - Miniatura Compactado Tropical

STT - Sistema de Transporte e Topografia

CBR - Índice de Suporte de California

Resumo

Na região de Uberaba-MG está localizada a FOSFERTIL. Esta empresa produz, como resíduo industrial da fabricação de adubos, 2500 toneladas de fosfogesso por dia, totalizando no decorrer de 1 ano, perto de 1 milhão de toneladas. No momento, encontram-se ali estocadas 18 milhões de toneladas de fosfogesso. A estocagem desta grande quantidade de material envolve uma série de problemas entre os quais destacam-se a necessidade de dispor-se de grandes áreas para o seu armazenamento, assim como a possibilidade, por se tratar de um produto de natureza ácida, de se agredir o meio ambiente.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da adição do fosfogesso em condições anidras a solos tropicais, tendo em vista o comportamento da mistura resultante quando empregada na construção de obras rodoviárias. Espera-se que os resultados desta pesquisa possam contribuir no sentido de se oferecer uma alternativa para a construção de obras viárias a baixos custos, possibilitando ainda, o descarte do resíduo industrial em questão.

O comportamento, em termos de resistência à compressão simples, de misturas de solo e fosfogesso anidro, é satisfatório quando comparado com o comportamento de algumas misturas estabilizadas de uso corrente, como solo-cal e solo-cimento.

A adição de quantidades crescentes de fosfogesso ao solo conduz a um ganho crescente de resistência. A imersão em água provoca um decréscimo na resistência da mistura, apesar de não levar à sua desestabilização. O tempo de cura após a compactação tem efeito no ganho de resistência, sendo que a resistência cresce de forma significativa até 28 dias, mas tende a se estabilizar ou mesmo a diminuir ligeiramente após este período. Não foi possível estabelecer uma tendência única que traduzisse o comportamento do universo dos resultados no tocante à influência da umidade de compactação na resistência.

É importante ressaltar que a utilização do fosfogesso na construção de pavimentos só será possível após a realização de ensaios complementares e a verificação do seu comportamento no campo.

Abstract

FOSFERTIL INDUSTRY, is located at Uberaba-MG State, this company produce 2.500 tons per day of Phosphogypsum, as result of industrial waste, which means almost a million tons during a year. Actually, there are in stock 18 million tons of this material. To keep this increasing amount of Phosphogypsum causes many problems, among them, needs a large area to stock it, and because of its acid characteristic it can pollutes the environment.

The main objective of this research work is to evaluate the addition effect of dehydrated Phosphogypsum at tropical soils, analyzing the behavior of the resultant mixture when it is maid during roads construction. The expecting results of this research work will contribute as another low cost alternative in the road constructions, and also it will facilitate the disposal of this industrial waste.

In terms of compression strength, the mixture of soils and dehydrated Phosphogypsum, appears to be satisfactory when compared with current stabilized mixture of soil-lime and soil-cement.

The addition of crescent quantities of Phosphogypsum to the soil, will give a crescent strength to the mixture. The immersion in water will cause a strength decrease of the mixture, however, it will not carry out a instability. The curing time after compacting gives significative strength within 28 days, after this period of time there is a tendency to stabilize or at the same time slightly decrease. It was not possible to establish a unique tendency which explain the moisture influence on the compacting strength.

It is important highlight that the use of to Phosphogypsum on road constructions will be possible after of complementaries tests and verification of its field performance.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Natureza do Problema

No Brasil, como também em outros países, existem indústrias que se dedicam ao processamento químico de rochas fosfáticas com a finalidade de se obter o ácido fosfórico, o qual é utilizado como fertilizante na área agrônômica. Como consequência deste processo químico, origina-se um resíduo industrial conhecido com o nome de fosfogesso ou gesso químico. Na produção de 1 tonelada de ácido fosfórico obtém-se 4,5 toneladas de fosfogesso como material de descarte.

Em Uberaba, cidade do estado de Minas Gerais, está localizada a indústria de adubos fosfatados FOSFERTIL. Esta empresa produz 2500 toneladas de fosfogesso por dia, totalizando no decorrer de 1 ano, perto de 1 milhão de toneladas. No momento, encontram-se ali estocadas 18 milhões de toneladas de fosfogesso. A estocagem desta grande quantidade de material envolve uma série de problemas entre os quais destacam-se a necessidade de dispor-se de grandes áreas para o seu armazenamento, assim como a possibilidade, por se tratar de um produto de natureza ácida, de se agredir o meio ambiente. É importante observar que os códigos de proteção ao meio ambiente no Brasil como em todo o mundo, tornam-se cada vez mais rigorosos no tocante aos cuidados a serem observados na estocagem de materiais com estas características.

Segundo TAHA & SEALS (1991) estima-se que, anualmente nos Estados Unidos, a produção de fosfogesso seja de aproximadamente 40 milhões de toneladas, sendo que a maior produção corresponde ao estado da Flórida com 33 milhões de toneladas. De acordo com as projeções, até o ano 2000, a quantidade de fosfogesso estocada nos Estados Unidos será da ordem de 2 bilhões de

toneladas, e no estado da Flórida da ordem de 1 bilhão de toneladas. Conforme o esquematizado na Figura 1.1, no período de 1973-1980, apenas no estado da Flórida, já se encontravam estocados 180 milhões de toneladas deste material.

FIGURA 1.1 - DISTRIBUIÇÃO DO FOSFOGESSO ESTOCADO DURANTE O PERÍODO 1973-1980 (apud TAHA & SEALS, 1991)

A nível mundial, segundo CHANG & MANTELL (1990) e TAHA & SEALS (1991), o acúmulo da produção anual do fosfogesso é da ordem de 150 milhões de toneladas. Deste total, 15% é reprocessado ou reaproveitado. Os 85% restantes são estocados ao ar livre e não se dispõe, até o momento, de um programa definitivo para o aproveitamento deste resíduo.

As indústrias que se dedicam à fabricação do ácido fosfórico têm-se preocupado em encontrar aplicações para o fosfogesso e assim evitar o acúmulo desmesurado deste resíduo. Segundo MANGUIN (1978), VILLAS BOAS (1981), PRESSINOTTI (1982), RÉ (1989), dentre as aplicações a que se têm recorrido, podem-se destacar: na área da agricultura, como corretor do pH de solos básicos; na indústria química, para a produção do gesso, enxofre, sulfato de amônio, cimento, cerveja, tintas, tecidos, inseticidas, papel e detergentes. E ainda, na

construção civil é utilizado no revestimento de paredes, manufatura de painéis e de tijolos, na construção de aterros e na construção de pavimentos rodoviários.

Com respeito à utilização do fosfogesso na área rodoviária, este assunto vem sendo estudado em todo o mundo, destacando-se as pesquisas empreendidas na França no *Laboratoire Central des Pontes et Chaussées*(LCPC) por MANGUIN (1978), ANDRIEUX et al. (1978), PUIATTI (1978), PUIATTI & VIGEA (1978), nos Estados Unidos, por NANNI & CHANG (1989), CHANG et al. (1989), CHANG & MANTELL (1990), pesquisadores do *Phosphate Research Institute*. Ainda nos Estados Unidos, outros autores têm-se dedicado ao estudo do fosfogesso na construção rodoviária como, GREGORY et al. (1984), USMEN & MOULTON (1984), FIGUEROA et al. (1987), GADALLA et al. (1990), TAHA & SEALS (1991), TAHA & SEALS (1992), TAHA et al. (1992), GHAFoori et al. (1993), ONG et al. (1993), na Turquia, ERDEM & OLMES(1993), em Israel, AGASSI et al. (1990), e na Índia, SINGH et al. (1989) também pesquisaram este assunto. Diversas publicações apresentam trabalhos que tratam do comportamento do fosfogesso e de misturas de fosfogesso com cimento, cinzas volantes, soda cáustica, cal, asfalto e solos, com o objetivo de avaliar seus desempenhos como material de construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. No Brasil, MACCARINI & TRICHÊS (1988) e MACCARINI (1991) estudaram o comportamento das misturas de fosfogesso com cinzas volantes e rejeito piritoso com esta mesma finalidade.

1.2 - Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal do trabalho é avaliar o efeito da adição do fosfogesso a solos tropicais tendo em vista o comportamento da mistura resultante quando empregada na construção de obras rodoviárias. Neste sentido, pretende-se identificar a proporção de fosfogesso a ser adicionada ao solo estudado, de tal forma que proporcione à mistura, depois de compactada, o melhor comportamento em termos de resistência à compressão simples em condições inundadas e não inundadas. Espera-se que os resultados desta pesquisa possam

contribuir no sentido de oferecer uma alternativa para a construção de obras viárias a baixos custos, possibilitando ainda, o descarte do resíduo industrial em questão.

Para se alcançar este objetivo foi seguida a seguinte metodologia: compactação de corpos de prova com proporções variáveis de solo e fosfogesso, cura dos corpos de prova segundo intervalos de tempos variáveis e finalmente, a realização dos ensaios de resistência à compressão simples dos corpos de prova em condições inundadas e não inundadas.

1.3 - Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos da seguinte maneira:

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura existente, voltada para assuntos de interesse deste trabalho. Nele são abordados os processos químicos através dos quais se obtém o fosfogesso e suas características físico-químicas; o estudo do comportamento em laboratório, de misturas do material em questão com cimento, cal, asfalto, cinzas volantes, areia, pedregulho, e finalmente, a sua utilização na construção de pavimentos rodoviários.

O capítulo 3 trata da caracterização do solo e do fosfogesso selecionados para a composição das misturas. Apresenta ainda a descrição da metodologia empregada na parte experimental da investigação: preparação dos materiais, dosagem e mistura, compactação dos corpos de prova, cura dos corpos de prova, ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova em condições inundadas e não inundadas, e tratamento estatístico dos resultados destes ensaios.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos na investigação experimental. São analisadas neste capítulo a massa específica máxima seca, a umidade ótima e a resistência à compressão simples em condições inundadas e não inundadas de misturas compostas de porcentagens variáveis de solo e fosfogesso. Discutem-se ainda a influência da variação da umidade de compactação dos corpos de prova e o do tempo de cura nos valores de resistência a compressão simples obtidos.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões pertinentes aos diversos aspectos envolvidos na pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Introdução

O fosfogesso ou gesso químico é um subproduto resultante do processo de fabricação do ácido fosfórico. Quimicamente, a fórmula do fosfogesso é idêntica à do gesso natural ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O processo químico para a obtenção do ácido fosfórico é realizado através do ataque do ácido sulfúrico aos minerais da rocha fosfatada. Este processo é descrito pela seguinte equação química:

Nesta equação, o coeficiente n é função da temperatura empregada durante o processo de obtenção do ácido fosfórico. No intervalo de temperatura de 70°C a 80°C, o fosfogesso formado será di-hidratado, apresentando duas moléculas de água na sua composição ($n = 2$). Para temperaturas de 92°C a 120°C, ter-se-á o fosfogesso hemi-hidratado ($n = \frac{1}{2}$). E no caso de temperaturas superiores a 130°C, o fosfogesso será anidro ($n = 0$).

2.2 - Tipos de Processos para a Obtenção do Fosfogesso

2.2.1 - Processo Di-Hidratado

Diversos pesquisadores têm-se dedicado ao estudo das propriedades do fosfogesso, e dentre eles podem-se citar SCHRÖDTER (1991), TAHA & SEALS

(1991), CHANG & MANTELL (1990), WIRSCHING et al. (1985), BRUNO (1980), BARBOSA (1980) e MANGIN (1978). De acordo com esses autores, o processo di-hidratado (D-H) ou úmido, é o mundialmente mais utilizado para a produção do ácido fosfórico. Deste processo resulta o fosfogesso di-hidratado (D-H) ou fosfogesso úmido. As concentrações de ácido fosfórico obtidas utilizando-se este tipo de processo variam entre 28% e 30%. Em termos de produção, para a obtenção de uma tonelada de ácido fosfórico (P_2O_5) obtém-se 4,9 toneladas de fosfogesso ($CaSO_4$). Além do mais, este processo permite também extrair o urânio existente nas rochas fosfatadas.

O processo úmido apresenta vantagens e desvantagens se comparado com os outros processos utilizados na obtenção do ácido fosfórico. Dentre as vantagens podem-se citar: baixo custo para a implantação do sistema e baixo custo de produção, além de oferecer a flexibilidade de permitir a utilização de diferentes tipos de rochas fosfáticas, sejam elas de origem ígnea, sedimentar, ou orgânica.

Ainda como vantagem, a temperatura de operação durante o processo varia entre 70°C e 80°C, considerada baixa quando comparada com as temperaturas utilizadas no processo hemi-hidratado (H-H) e no processo anidro. As baixas temperaturas empregadas no processo di-hidratado (D-H) evitam problemas causados pelos efeitos de corrosão no equipamento do sistema de produção.

Quanto às desvantagens do processo di-hidratado (D-H), citam-se as impurezas que o fosfogesso apresenta, as quais contêm resíduos de ácido sulfúrico e ácido fosfórico, sendo que o ácido sulfúrico devido a suas características pode agredir o meio ambiente. A quantidade destes compostos químicos, considerados como impurezas, depende diretamente da qualidade da rocha fosfática, como também da eficiência do processo de produção. Os níveis de impureza encontrados no fosfogesso são considerados elevados quando

comparados com aqueles alcançados por meio dos processos hemi-hidratados (H-H) e anidro.

2.2.2 - Processo Hemi-Hidratado

O processo hemi-hidratado (H-H), segundo LEGAL & MYRICK apud TAHA & SEALS (1991), é realizado a temperaturas variando entre 92°C e 120°C. O ácido fosfórico obtido corresponde a concentrações que variam entre 38% e 42%. Quanto a estes valores, algumas pesquisas relatam que pode ser atingida concentrações de até 52%.

Dentre as vantagens oferecidas pelo processo hemi-hidratado, quando comparado com o processo di-hidratado, pode-se citar como as mais importantes: elevada concentração do ácido fosfórico, rápida dissolução da rocha fosfatada e rápido processo de filtração.

Quanto às desvantagens, o maior problema ocorre na etapa de filtração. Segundo SCHRÖDTER (1991), quando o fosfogesso é obtido por meio deste processo existem pequenas quantidades de partículas di-hidratadas, as quais contribuem para que as partículas em condições hemi-hidratadas sejam reidratadas novamente. Para evitar este impasse recomenda-se a utilização de temperaturas maiores durante o processo.

Em termos de desempenho do processo, segundo KOULOHERIS apud CHANG & MANTELL (1990) e WIRSCHING et al. (1985), na produção de uma tonelada de ácido fosfórico (P_2O_5) obtém-se 4,3 toneladas de fosfogesso ($CaSO_4$) como material de descarte, sendo que o fosfogesso (H-H) contém baixos teores de impurezas quando comparado com o fosfogesso D-H.

Sob o ponto de vista econômico, LEGAL & MYRICK apud TAHA & SEALS (1991) argumentam que tanto o capital de inversão quanto o de produção são

superiores quando comparados com os do processo di-hidratado (D-H). Nesse sentido, segundo eles, estes custos equilibram-se com a obtenção de um produto mais puro.

2.2.3 - Processo Anidro

O processo anidro produz fosfogesso em condições anidras, ou seja, não contém água na sua composição química. Segundo LEGAL & MYRICK apud TAHA & SEALS (1991) e SCHRÖDTER (1991), para a produção de fosfogesso utilizando este processo é preciso utilizar-se temperaturas que variam entre 120°C e 130°C, temperaturas consideradas elevadas quando comparadas com as temperaturas empregadas nos processos di-hidratado e hemi-hidratado.

O processo não é atualmente empregado pelas indústrias que se dedicam à produção do ácido fosfórico devido aos elevados níveis de energia requeridos para o funcionamento do processo, fato que o torna não econômico. Além do mais, as elevadas temperaturas empregadas durante o processo de produção expõem o equipamento industrial ao efeito da corrosão.

2.3 - Características Físico-Químicas do Fosfogesso

As características físico-químicas do fosfogesso apresentadas em seguida foram levantadas com o objetivo principal de subsidiar a análise do seu emprego como material alternativo na área da construção civil, em especial na construção de obras rodoviárias.

Com esta mesma finalidade, diversos centros de pesquisas têm-se dedicado ao estudo do comportamento do fosfogesso. Como exemplo, podem-se citar as pesquisas realizadas nos laboratórios do *Phosphate Research Institute*, nos Estados Unidos, e no *Laboratoire Central des Pontes et Chaussées (LCPC)*,

na França, contemplando aspectos como: caracterização físico-química e mineralógica, estudo radiológico, relações entre umidade e massa específica seca, resistência à compressão simples, durabilidade por molhagem e secagem, análise de fadiga, permeabilidade, compressão triaxial e módulo de resiliência do fosfogesso.

2.3.1 - Estudo Mineralógico e Morfológico

Diversos estudos foram realizados por TAHA et al. (1992), TAHA & SEALS (1991) e MANGIN (1978) quanto à forma das partículas do fosfogesso. Estes autores observaram que o material apresenta formas e características peculiares, as quais dependem do tipo de mineral encontrado nos diferentes tipos de rocha fosfática empregada na fabricação do ácido fosfórico, além do processo utilizado para a obtenção do ácido fosfórico.

Em estudos morfológicos realizados por MANGIN (1978), o fosfogesso é classificado em cristais aciculares (forma de agulhas) e cristais lamelares (forma tabular). Nessa classificação comparam-se as dimensões (L, l, e) dos cristais do fosfogesso, onde L representa a maior dimensão da partícula, l representa a menor dimensão da partícula e, finalmente, e representa a espessura da partícula. Os cristais aciculares ou de forma de agulha estão ilustrados na Figura 2.1, onde as partículas têm as seguintes variações de dimensões L: 80 a 500 μm ; l: 20 a 100 μm ; e: 5 a 10 μm . A Figura 2.2 ilustra os cristais tabulares ou de forma lamelar, os quais têm as seguintes variações de dimensões L: 40 até 200 μm ; l: 30 até 150 μm ; e: 5 até 10 μm .

FIGURA 2.1 - CRISTAIS ACICULARES (apud MANGUIN, 1978)

FIGURA 2.2 - CRISTAIS TABULARES (apud MANGUIN, 1978)

2.3.2 - Análise Química

Quanto à origem das rochas fosfáticas, segundo SILVA JR. (1980), os depósitos fosfáticos dividem-se em três grupos principais: jazidas apatíticas ou de origem magmática, jazidas de fosforitos ou de origem sedimentar e jazidas resultantes de matéria orgânica.

Devido à variação da origem da rocha fosfática utilizada para a obtenção do ácido fosfórico, é de se esperar que os resultados da análise química de fosfogessos produzidos por idênticos processos mas a partir de rochas fosfáticas de diferentes origens e em diferentes indústrias apresentem diferenças quando são comparados entre si.

A Tabela 2.1 mostra os resultados do estudo realizado por TAHA & SEALS (1991) para a determinação da composição química de fosfogesso produzidos na Lousiana e na Florida. Da análise destes resultados, observa-se variação entre os teores de arsênio (As), bário (Ba), cromo (Cr), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), selênio (Se) e prata (Ag), que compõem cada um dos fosfogessos.

Do anteriormente exposto pode-se afirmar que uma análise química de fosfogessos de diferentes indústrias, mesmo que obtidos através do mesmo processo de produção, indicam diferenças nas concentrações dos elementos químicos, e isto deve-se à variedade da origem das rochas fosfatadas utilizadas. Em análises químicas realizadas com fosfogessos da França, segundo estudos realizadas por COLOMBEL (1978), também observou-se a diferença existente quando comparados os traços dos elementos químicos existentes nos diversos fosfogessos analisados.

Quanto aos valores de pH encontrados nos diferentes fosfogessos produzidos nas indústrias americanas, segundo CHANG & MANTELL (1990), os valores encontrados variaram de 2,5 a 6,0 no estado da Flórida; de 2,8 a 5,0 no estado de Lousiana e de 2,6 a 5,0 no estado do Texas. Já nos estudos realizados por MANGUIN (1978) com fosfogessos da França, ele observou que o pH do

material apresentou valores entre 2 e 3 devido à presença de compostos químicos livres no fosfogesso tais como o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido fluorídrico (HF), dentre outros. Nota-se que geralmente os valores do pH variam de uma indústria para outra.

A acidez do fosfogesso pode ser diminuída quando lhe é adicionada quantidades adequadas de cal. COLOMBELL (1978) realizou estudos com a finalidade de reduzir o pH do fosfogesso. Resultados encontrados indicam que o fosfogesso quando neutralizado com cal apresenta um pH de 5,5 a 7,5. E quando neutralizado com soda cáustica apresenta valores de pH de 7 a 8.

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO E TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS EXISTENTES NO FOSFOGESSO D-H (apud TAHA & SEALS, 1991)

ELEMENTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO (ppm)	
	LOUISIANA	FLORIDA
As	1 - 5	2 - 8
Ba	50	< 10
Cd	0,3 - 0,4	3 - 4
Cr	2 - 5	15 - 30
Pb	2 - 10	2 - 13
Hg	0,02 - 0,05	< 0,5
Se	1	< 1
Ag	0,1 - 0,2	< 3
U ₃ O ₈	5 - 10	NA

NA: Não avaliável

2.3.3 - Análise Física do Fosfogesso

Um fato importante a ser considerado é que, da mesma maneira que os resultados obtidos nas análises químicas, os resultados obtidos nas análises físicas também apresentam diferenças quando se comparam resultados para fosfogessos provenientes de indústrias diversas. Neste sentido, TAHA & SEALS (1991) compararam os resultados de análises laboratoriais realizadas com fosfogessos de Louisiana, Texas e Flórida, conforme é apresentado na Tabela 2.2.

TABELA 2.2- RESULTADOS DE ANÁLISE FÍSICA DO FOSFOGESSO D-H (apud TAHA & SEALS, 1991)

PROPRIEDADES	VALORES		
	Lousiana	Texas	Flórida
Umidade (%)	8 - 12	20	3 - 18
Massa Específica dos Grãos (g/cm ³)	2,32 - 2,35	2,30	2,31 - 2,53
Partículas (% < # 200)	74 - 75	75	30 - 82

Na Tabela 2.2 estão apresentados os valores de massa específica dos grãos, teor de umidade e porcentagem de fosfogesso que passa na peneira número 200 (0,074 mm de abertura nominal). Podemos notar que a porcentagem de fosfogesso da Flórida que passa na peneira número 200 é muito dispersa, variando de 30% a 82%; no entanto, para os fosfogessos de Lousiana e Texas esse valor permanece entre os 74% e 75%. O mesmo acontece com os valores de umidade que podem variar de 3% a 20%. Quanto à massa específica dos grãos, os fosfogessos produzidos em Lousiana e Texas apresentaram valores de 2,30 g/cm³ até 2,35 g/cm³ respectivamente, e o fosfogesso proveniente da Flórida apresentou valores entre 2,31 e 2,53 g/cm³.

SCHAEFFNER (1978) realizou ensaios para a determinação da massa específica de grãos dos fosfogessos produzidos na França. Os resultados obtidos nestes ensaios variaram de 2,3 g/cm³ até 2,6 g/cm³. Segundo esse autor, as variações apresentadas nos diferentes ensaios devem-se à variedade da origem dos fosfogessos analisados.

Com referência à granulometria do fosfogesso, segundo diversos autores, ela também varia segundo a origem do fosfogesso, ou seja depende do processo químico empregado durante a produção do ácido fosfórico, como também da

qualidade da rocha fosfática e do desempenho do sistema durante o processamento da rocha.

Na Figura 2.3 estão apresentadas as curvas granulométricas de fosfogesso originários dos estados da Flórida, Lousiana e Texas, segundo TAHA & SEALS (1991). Pode-se notar que os diversos fosfogessos analisados apresentaram curvas granulométricas também diferentes. Estes autores sugerem que não se deve adotar uma curva padrão do fosfogesso, isto porque, para cada indústria, a distribuição granulométrica do fosfogesso é diferente.

FIGURA 2.3 - GRANULOMETRIA DE FOSFOGESSOS PRODUZIDOS EM TRÊS DIFERENTES ESTADOS AMERICANOS (apud TAHA & SEALS, 1991)

Na mesma Figura 2.3, é importante notar também que a maior parte das partículas dos fosfogessos analisados apresentaram diâmetros menores do que 0,25 mm. Esta observação coincide com os resultados dos ensaios de granulometria do fosfogesso analisado por TRICHES & MACCARINI (1988), onde a maioria das partículas corresponderam a diâmetros menores do que 0,25 mm.

Quanto à consistência do fosfogesso, segundo TAHA & SEALS (1991) e CHANG & MANTELL (1990), o fosfogesso é um material com características nada ou pouco plásticas. SCHAEFFNER (1978) quando analisou um fosfogesso proveniente de uma indústria francesa, encontrou 27% como o valor médio para o limite de liquidez (LL). Quanto ao ensaio para a determinação do limite de plasticidade (LP), foi impossível realizá-lo, e o fato deve-se à falta de propriedades coloidais do fosfogesso. O autor cita ainda, que esta falta de colóides no fosfogesso foi comprovada mediante ensaios com azul de metileno.

Segundo TAHA & SEALS (1991), os fosfogessos produzidos nos estados de Lousiana, Texas e Flórida, de acordo com a USC (*Sistema de Classificação Unificado de Solos*) enquadraram-se na classe ML (material siltoso de baixa plasticidade). Já o sistema de classificação da HRB (*Highway Research Board*) situa os fosfogessos analisados na categoria A-4, que corresponde a um material de características siltosas, à exceção de um fosfogesso de uma indústria da Flórida, que foi classificado como sendo um material do tipo A-2.

2.4 - Fosfogesso Compactado

Diversos autores têm estudado o comportamento do fosfogesso a partir do resultado de ensaios de compactação e de compressão simples. Em seguida são apresentados alguns destes resultados.

2.4.1 - Relações entre Massa Específica Seca e Umidade

HO & ZIMPFER apud TAHA & SEALS (1991), HO & ZIMPFER apud CHANG & MANTELL (1990) estudaram a relação existente entre a massa específica seca máxima e a umidade ótima, levando em consideração as energias de compactação do Proctor modificado e do Proctor normal, quando foram analisados os diferentes fosfogessos do estado da Flórida (Gardinier, Agrico, USS, Oxy, IMC, W. R. Grace, Royster, Farmland).

Esses autores observaram que, para corpos de prova moldados na mesma energia de compactação, mas empregando-se fosfogessos diversos, os resultados dos ensaios mostraram-se diferentes quando comparados entre si. A Tabela 2.3 contém os resultados de ensaios de compactação utilizando a energia do Proctor modificado. Na referida tabela, nota-se que os valores da massa específica seca máxima variaram entre 92 pcf ($1,47 \text{ g/cm}^3$) e 103,9 pcf ($1,66 \text{ g/cm}^3$) e a umidade ótima entre 15,0% e 19,5%.

Esse mesmo estudo mostra que, quando é utilizada a energia de compactação de Proctor normal, os valores obtidos de massa específica seca máxima são menores e a umidade ótima maior do que quando é empregada a energia de compactação do Proctor modificado. Segundo os autores acima citados, essa variação é de aproximadamente 7 pcf ($0,112 \text{ g/cm}^3$) para a massa específica máxima seca e de 16% a 23% para a umidade ótima.

TABELA 2.3 - UMIDADES ÓTIMAS E MASSAS ESPECÍFICAS SECAS MÁXIMAS NA ENERGIA PROCTOR MODIFICADO. FOSFOGESSO D-H DE 8 INDÚSTRIAS DO ESTADO DA FLÓRIDA. (apud CHANG & MANTELL, 1990)

ORIGEM DO FOSFOGESSO	TEOR DE UMIDADE ÓTIMA (%)	MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA (pcf)
Gardinier	17,5	96,0
Agrico	17,2	97,3
USS	15,0	103,9
OXY	19,5	92,0
IMC	17,3	99,7
W. R. Grace	15,1	99,1
Royster	16,2	93,6
Farmland	16,0	97,4

Estudos realizados por HO & ZIMPFER apud CHANG & MANTELL (1990) com corpos de prova moldados na energia de Proctor modificado utilizando fosfogesso di-hidratado (D-H) proveniente das indústrias Gardinier e Agrico, ambas do estado da Flórida, mostram massas específicas secas máximas de 96 pcf (1,54 g/cm³) para uma umidade ótima de 17,5% e 97,3 pcf (1,56 g/cm³) para uma umidade ótima de 17,2%, respectivamente para o fosfogesso de Gardinier e Agrico conforme mostrado na Tabela 2.3 e nas Figuras 2.4 e 2.5. Estas mesmas figuras ainda mostram resultados de ensaios de compressão simples que serão discutidos na seção 2.4.2.

No Brasil, resultados de ensaios de compactação realizados por MACCARINI (1991) utilizando fosfogesso di-hidratado produzido no sul do país e a energia do Proctor modificado, mostram que os valores da massa específica máxima seca máxima variaram de 1,45 g/cm³ a 1,47 g/cm³, sendo o teor de umidade ótimo da ordem de 28%, conforme pode ser visto na Figura 2.7 situada na seção 2.4.2.

2.4.2 - Resistência à Compressão Simples

CHANG (1989) determinou a resistência à compressão simples de corpos de prova compactados com os fosfogessos descritos na Tabela 2.3 e observou um comportamento semelhante ao de solos compactados, ou seja, corpos de prova na umidade ótima e com uma massa específica seca máxima seca apresentam os valores de resistência mais elevados. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram estes resultados para os fosfogessos das indústrias de Gardinier e Agrico, respectivamente.

FIGURA 2.4 - RELAÇÕES DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO FOSFOGESSO D-H. PRODUZIDO NA INDÚSTRIA GARDINIER (apud CHANG et al. 1989)

FIGURA 2.5 - RELAÇÕES DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO FOSFOGESSO D-H. PRODUZIDO NA INDÚSTRIA AGRÍCOLA (apud CHANG et al. 1989)

A Figura 2.6 apresenta conjuntamente os resultados dos ensaios descritos anteriormente para todos os fosfogessos analisados. Nota-se que os valores de resistência à compressão simples máxima estão distribuídos em três zonas bem definidas: uma em torno de 100 Psi (0,689 MPa), outra em torno de 800 Psi (5,51 MPa), sendo que grande parte dos resultados concentra-se numa região entre 300 Psi (2,06 MPa) e 500 Psi (3,44 MPa). Pode-se concluir, segundo este autor, que as amostras correspondentes a esta última zona, apesar de serem de diferentes procedências, provavelmente possuem características físico-químicas semelhantes.

FIGURA 2.6 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE 8 FOSFOGESSOS D-H DE DIFERENTES INDÚSTRIAS. COMPACTADOS NA ENERGIA DE PROCTOR MODIFICADO E ANALISADOS EM CONDIÇÕES SECAS AO AR (apud CHANG et al. 1989)

CHANG et al. (1989) e CHANG & MANTELL (1990) realizaram ensaios de resistência à compressão simples empregando fosfogesso di-hidratado procedente de diferentes indústrias utilizando os métodos de compactação estático e por impacto. Segundo eles, o objetivo quando se utilizou compactação por impacto foi encontrar parâmetros que pudessem ser úteis na análise do emprego do fosfogesso na construção de camadas de pavimentos. Quando utilizada a compactação estática, o estudo pretendeu analisar seu emprego na área da construção civil, quando utilizado na fabricação de tijolos ou painéis.

O comportamento, em termos de resistência à compressão simples, das amostras de fosfogesso compactadas é muito parecida ao de solos compactados, quando analisado sob o ponto de vista da energia de compactação, ou seja, quanto mais elevada é a energia de compactação, maior é o valor da resistência à compressão simples, sendo que esse aumento de resistência ocorre devido ao aumento da massa específica seca, afirmam esses autores.

Neste mesmo estudo, CHANG & MANTELL (1990) observaram que quando foram aplicadas energias de compactação por meios estáticos da ordem de 36000 Psi (248,3 MPa). os valores de resistência à compressão simples obtidos em condições de cura ao ar livre foram de 37,93 MPa. No entanto, quando foram aplicadas pressões maiores que 248,3 MPa, os ganhos de resistência à compressão simples (RCS) foram insignificantes. Esta observação deve ser levada em consideração quando se trata de escolher o nível de energia a ser utilizada para uma determinada finalidade, pois desta forma podem-se evitar gastos desnecessários no que diz respeito aos custos de compactação por meios estáticos.

Em estudos realizados por MACCARINI (1991), foi levado em consideração o tempo de cura dos corpos de prova moldados com fosfogesso obtido em condições di-hidratadas, e posteriormente transformado em fosfogesso anidro através da elevação de sua temperatura a 130°C, durante um período mínimo de 20 horas. A energia de compactação utilizada foi a do Proctor modificado. Após a compactação, os corpos de prova foram deixados curar ao ar livre e posteriormente submetidos a ensaios de resistência à compressão simples. Neste estudo notou-se que os maiores valores de resistência à compressão simples foram obtidos nas primeiras oito horas após a compactação, e que metade dessa resistência foi desenvolvida nas primeiras duas horas.

MACCARINI (1991), ainda neste mesmo estudo, realizou outros tipos de análises. Inicialmente, os corpos de prova de fosfogesso anidro foram deixados

curar ao ar livre por um período de cinco horas. Posteriormente, alguns deles foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples, enquanto outros foram imersos em água por um período de 10 dias antes de serem ensaiados. Observa-se na Figura 2.7 que os pontos de máximo, tanto para a massa específica seca quanto para a resistência à compressão simples ocorreram na umidade de moldagem correspondente a 28%. O maior valor da resistência à compressão simples foi de 12,7 MPa para a condição não inundada. A perda de resistência à compressão simples devida à imersão correspondeu a 0,7 MPa. Análises mostraram que os corpos de prova analisados após imersos passaram a ter um grau de saturação da ordem de 100%.

Da experiência de MACCARINI (1991) pode-se concluir que o fosfogesso anidro quando em condições imersas, não experimenta quedas consideráveis na sua resistência à compressão simples quando inundado. No entanto, em estudos realizados por LIN apud CHANG & MANTELL (1990), onde corpos de prova de fosfogesso obtido em condições di-hidratadas foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples levando em consideração ciclos de molhagem e secagem (sete dias em câmara seca e outros sete dias imersos em água), observou-se que o valor da resistência à compressão simples para os corpos de prova não inundados é de aproximadamente 225 Psi (1,55 MPa), valor este que diminuiu drasticamente para 25 Psi (0,17 MPa) quando os corpos de prova foram inundados. Os valores da resistência à compressão simples retornaram à magnitude inicial de 1,55 MPa quando os corpos de prova foram levados à câmara seca e posteriormente submetidos uma vez mais ao referido ensaio.

FIGURA 2.7 - RELAÇÕES DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO FOSFOGESSO ANIDRO PRODUZIDO NA CARBOQUÍMICA CATARINENSE (apud MACCARINI, 1991)

2.5 - Misturas com Fosfogesso Compactadas

Visando à utilização do fosfogesso na construção das camadas de pavimentos, diversos autores têm-se dedicado ao estudo das misturas de

fosfogesso e outros materiais, entre os quais podemos citar: solo, pedregulho, cimento, cal, cinzas volantes e asfaltos.

2.5.1 Misturas de Fosfogesso e Solo

Segundo CHANG & MANTELL (1990) e TAHA & SEALS (1991), os primeiros estudos de misturas de solo com fosfogesso foram realizados por ZHOU (1986) e ZHOU et al. (1986) com a finalidade de analisar o comportamento destas misturas quando empregadas em construções de camadas de pavimentos rodoviários. Os estudos visaram à construção de duas pistas experimentais nos municípios de Polk e de Columbia, ambos no estado da Flórida. Os fosfogessos eram do tipo di-hidratado (D-H) e hemi-hidratado (H-H), respectivamente. Quanto ao solo empregado, este correspondeu ao existente em cada uma das localidades citadas.

A análise granulométrica destes solos mostra que ambos são arenosos e se enquadraram na categoria A-3, pela classificação da HRB. As massas específicas dos grãos dos solos de Polk e Columbia, apresentaram valores de $2,68 \text{ g/cm}^3$ e $2,63 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Os fosfogessos D-H e H-H apresentaram valores de massa específica seca máxima de $2,39 \text{ g/cm}^3$ e $2,56 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Inicialmente, foram estudadas as misturas de fosfogesso D-H e areia do município de Polk nas proporções 1:1; 1:2 e 1:3. A energia de compactação utilizada foi a do Proctor modificado. Para cada mistura encontraram-se diferentes valores da massa específica seca máxima e umidade ótima. Na Figura 2.8 estão ilustrados os resultados deste estudo, e pode-se notar que o maior valor da massa específica seca máxima, $2,02 \text{ g/cm}^3$, foi obtida para a mistura 1:2. As outras duas misturas, também representadas no mesmo gráfico, apresentaram massas específicas secas máximas de menores valores, atribuindo-

se este fato ao excesso de fosfogesso para a mistura 1:1 e à falta de fosfogesso para a mistura 1:3.

FIGURA 2.8 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO COM DIVERSOS TEORES DE FOSFOGESSO D-H E AREIA, PARA A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO PROCTOR MODIFICADO (apud CHANG et al. 1989)

Com relação aos estudos realizados com misturas nas proporções 1:1, 1:2 e 2:1 de fosfogesso hemi-hidratado (H-H) e areia do município de Columbia, também foi utilizada a energia de compactação do Proctor modificado. De acordo com os autores, a massa específica seca máxima aumenta com o aumento do teor de fosfogesso na mistura, sendo que a mistura nas proporções 2:1 teve melhor desempenho em termos deste parâmetro, que atingiu o valor de 2,07 g/cm³ para uma umidade ótima de 9,5%.

As misturas mencionadas anteriormente foram ainda submetidas a ensaios de compressão simples para que se pudesse analisar a influência na

resistência das misturas de fatores tais como, tempo de cura, energia de compactação, teor de umidade, quantidade e tipo do fosfogesso.

Como as misturas nas proporções 1:2 de fosfogesso di-hidratado (D-H) e areia de Polk mostraram os maiores valores de massa específica seca, os estudos foram focalizados para misturas nesta proporção. Inicialmente, os corpos de prova foram moldados com diferentes teores de umidade e submetidos a ensaios de resistência à compressão simples logo após a compactação. Segundo CHANG et al. (1989), os resultados destes estudos mostraram que o maior valor da resistência à compressão simples foi de 41 lb/pol² (0,28 MPa), com umidade ótima de 7,8%. Paralelamente, foi analisada a influência do tempo de cura dos corpos de prova quando submetidos a ensaios de resistência à compressão simples. A Figura 2.9 mostra que os valores de resistência à compressão simples aumentaram continuamente com o tempo de cura, e que este aumento independe do teor de umidade, ou seja, o aumento ocorre para todos os teores de umidade analisados, sendo que a mistura compactada com o teor de umidade correspondente a 7% mostrou-se com o melhor desempenho. Além do mais, o estudo mostrou que os corpos prova compostos de misturas contendo fosfogesso D-H e areia, quando imersos em água, entraram em colapso, inviabilizando, desta maneira, o ensaio de resistência à compressão simples.

FIGURA 2.9 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E AREIA NAS PROPORÇÕES 1:2, PARA DIVERSOS TEORES DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO (apud CHANG et al. 1989)

Pode-se notar na Figura 2.8 que, para a mistura nas proporções 1:2, o valor da umidade ótima é de 8,7% que corresponde à massa específica seca máxima. No entanto, na Figura 2.9, nota-se que a referida umidade não corresponde ao maior valor da resistência à compressão simples. Aparentemente, os maiores valores de resistência à compressão simples são obtidos para umidades um pouco menores que a umidade ótima, qualquer que seja a energia aplicada durante a moldagem dos corpos de prova.

Com respeito à influência do tempo de cura, misturas nas proporções 2:1 de fosfogesso hemi-hidratado (H-H) e areia apresentaram valores de resistência à compressão simples crescentes à medida que o tempo de cura aumentava. CHANG et al. (1989) observaram que os corpos de prova utilizando misturas de fosfogesso H-H e areia, ao contrário das misturas compostas com fosfogesso D-H,

quando imersos em água, não entraram em colapso, apresentando desempenho aceitável em termos de resistência à compressão simples.

Para os estudos de resistência à compressão simples, levando-se em consideração o efeito da variação da energia de compactação, foram moldados corpos de prova com misturas de fosfogesso D-H e areia na proporção 1:2, utilizando para tal finalidade as energias do Proctor modificado e do Proctor normal. Os corpos de prova foram deixados curar ao ar livre. Os resultados desta pesquisa indicaram que a energia de compactação tem uma influência marcante sobre os valores da resistência. Amostras compactadas na energia do Proctor modificado possuem maiores valores de resistência à compressão simples quando comparadas com os valores obtidos pela energia do Proctor normal.

Das construções das pistas experimentais dos municípios de Polk e Columbia. CHANG & MANTELL (1991) concluíram que:

- o equipamento empregado no processo de compactação das camadas pode ser o mesmo empregado para os solos de características argilosas;
- as fortes chuvas experimentadas durante o processo de construção não causaram danos maiores, devido ao fato de que o fosfogesso, quando compactado, não absorve grandes quantidades de água;
- na construção de pavimentos com fosfogesso, o material asfáltico pode ser utilizado como revestimento;
- as fissuras que geralmente aparecem nos pavimentos construídos em solos argilosos, não ocorreram quando foram empregadas as misturas de solo com fosfogesso;
- a estabilidade das misturas de fosfogesso e solo é superior à de solos com características argilosas.

- segundo o registro de dados deflectométricos realizados com o Dinaflex, a maior deflexão correspondente ao monitoramento das pistas foi de $1,7 \times 10^{-3}$ polegadas (0,043 mm).

Estudos de misturas compostos a partir de fosfogesso di-hidratado (D-H) foram também realizados por MAJI apud CHANG & MANTELL (1990). Esses autores moldaram corpos de prova com misturas de fosfogesso, areia e argila. Posteriormente, estes corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples.

Na composição das misturas foi mantida constante a quantidade de 1/3 de areia, variando-se as porcentagens de fosfogesso e argila. Os resultados desse estudo estão ilustrados na Figura 2.10, onde pode-se notar que os valores máximos da resistência à compressão simples e massa específica seca, são obtidos quando a proporção do fosfogesso na mistura corresponde a 1/6 (17%), com 1/3 de areia (33%) e com 1/2 de argila (50%). Para essa mistura o valor da umidade ótima foi equivalente a 9,3%.

FIGURA 2.10 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES, UMIDADE ÓTIMA E MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA, PARA DIFERENTES TEORES DE FOSFOGESSO, ARGILA E AREIA (apud CHANG et al. 1989)

2.5.2 - Misturas de Fosfogesso e Cimento

Diversos autores têm-se dedicado ao estudo deste tipo de mistura. Dentre os estudos mais completos podemos citar os de GREGORY et al. (1984), que realizaram estudos de misturas compostas com fosfogesso di-hidratado (D-H) e cimento nas porcentagens de 3%, 6% e 10%, compactadas na energia do Proctor modificado. Os resultados deste estudo estão ilustrados na Figura 2.11, podendo-se notar, de um modo geral, que os valores da resistência à compressão simples aumentam à medida que o teor de cimento e o tempo de cura aumentam.

Segundo os autores citados, nas argamassas convencionais de cimento e areia, os valores da resistência à compressão simples exigidos para um tempo de cura de 7 dias devem estar compreendidos entre 200 Psi (1,38 MPa) e 300 Psi (2,07 MPa). Observa-se, para a totalidade das misturas com o tempo de cura de 7 dias, que os valores foram superiores a 200 Psi (1,38 MPa).

FIGURA 2.11 - VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E CIMENTO (apud GREGORY et al. 1984)

LIN apud TAHA & SEALS (1991) estudou os efeitos de diferentes condições de cura nos valores da resistência à compressão simples para as misturas contendo 90% de fosfogesso e 10% de cimento. Para tal finalidade os corpos de prova foram deixados curar por um período de 28 dias levando em consideração três condições diferentes de cura : secas ao ar, envolvidas em filme

plástico, e imersas em água por um período de 48 horas previamente à realização do ensaio.

No referido estudo, os corpos de prova foram compactados na energia do Proctor normal e do Proctor modificado. Na Tabela 2.4 estão resumidos os resultados dessa pesquisa. Pode-se notar que o valor da resistência à compressão simples depende da energia de compactação, como também das condições de cura dos corpos de prova. Comparando-se os valores da resistência à compressão simples para condições de cura idênticas, mas variando-se as energias de compactação, nota-se que os corpos de prova moldados na energia do Proctor modificado têm valores de resistência à compressão simples em torno de 128% maiores que aqueles moldados na energia do Proctor normal.

Neste tipo de misturas notamos que o maior ganho de resistência corresponde aos primeiros 7 dias, a partir desta idade os valores de resistência aumentam de maneira menos acentuada. Comportamento parecido foi observado pelo mesmo autor no estudo de misturas de fosfogesso com cinzas volantes (vide Figura 2.12).

TABELA 2.4 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E 10% DE CIMENTO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURA DOS CORPOS DE PROVA E ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO (LIN apud TAHA & SEALS, 1991)

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (Psi)		
	Envolvido em filme plástico	Imerso em água	Seco ao ar livre
Normal	621	520	1.307
Modificado	841	641	1.660

TAHA & SEALS (1992, 1991, 1990) estudaram a expansão de misturas de fosfogesso e cimento para corpos de prova imersos em água durante várias semanas. Neste estudo foram utilizados diferentes tipos de cimento levando em consideração a porcentagem de tricálcio de alumínio (C3A) contido. Pode-se

notar que, à medida que o teor de C3A aumentava no cimento, os valores da expansão também aumentaram, correspondendo também uma diminuição nos valores da resistência à compressão simples. Além disso, os elevados teores de C3A contido no cimento e no fosfogesso, quando em presença da água, levaram à formação de cristais de etringite. A presença destes cristais pode causar fissuras nas camadas do pavimento, comprometendo assim a sua durabilidade.

2.5.3 - Misturas de Fosfogesso e Cinzas Volantes

Assim como o fosfogesso, as cinzas volantes têm causado preocupação nos meios técnicos devido à necessidade de grandes áreas para a sua estocagem, como também problemas de poluição ambiental. O emprego deste resíduo industrial na construção de camadas de bases e sub-base de pavimentos é uma das possibilidades de sua utilização.

De acordo com GREGORY et al. (1984) deve-se, num estudo deste tipo de misturas, levar em consideração os seguintes fatores: energia de compactação, tempo de cura, quantidade de água disponível durante o processo de hidratação, valor do pH do fosfogesso e a quantidade de cal livre na cinza volante durante o início da reação pozolânica.

Estes autores estudaram misturas de fosfogesso di-hidratado (D-H) e cinzas volantes compactadas na energia do Proctor modificado, variando o teor de cinzas volantes e o tempo de cura dos corpos de prova. Na Figura 2.12 estão ilustrados os valores de resistência à compressão simples para 0%, 10%, 15%, 20% e 30% de cinzas volantes e tempos de cura de 3, 7 e 28 dias. Observa-se que os valores das resistências à compressão simples cresceram à medida que o tempo de cura e a porcentagem de cinza volante aumentaram.

FIGURA 2.12 - VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E CINZAS VOLANTES (apud GREGORY et al. 1984)

Ainda de acordo com GREGORY et al. (1984), é fundamental levar-se em consideração a energia de compactação. Nesse sentido, recomendam que a energia de compactação no campo deva ser tal, que o valor do grau de compactação seja maior a 97%, pois a partir deste valor os ganhos de resistência à compressão simples aumentam consideravelmente.

Segundo TAHA & SEALS (1991), as reações químicas produzidas neste tipo de misturas levam à formação de cristais de estringite. A formação destes cristais deve-se à presença do óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al_2O_3) contidos na cinza volante. O valor do pH tem influência marcante nos resultados da resistência à compressão simples. Fosfogessos com características muito

ácidas não apresentam desempenhos aceitáveis em termos de resistência à compressão simples.

GREGORY et al. (1984) e SAYLAK et al. (1982) apud CHANG & MANTELL (1990) realizaram um estudo onde se analisou o desempenho de misturas de fosfogesso e cinzas volantes e também fosfogesso e cimento. Com esse objetivo, em junho de 1983, o *Instituto de Transportes do Texas* em parceria com a indústria *Mobil Chemical Company*, providenciou a construção e o monitoramento de uma pista experimental no município de La Porte, estado do Texas.

Segundo GREGORY et al. (1984) e SAYLAK et al. (1982) apud CHANG & MANTELL (1990), a pista experimental foi dividida em 7 seções de estudo; essas seções foram construídas mantendo-se o revestimento e o subleito iguais para todas as seções, variando-se a base através da constituição de suas misturas, conforme é mostrado na Tabela 2.5. Utilizou-se duas das seções como referência para o controle do desempenho das seções onde se empregou fosfogesso na composição das misturas.

TABELA 2.5- PROPORÇÕES DA MISTURAS EMPREGADAS NA CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL DE LA PORTE-TEXAS. (apud CHANG & MANTELL, 1990)

SEÇÃO	MATERIAL DE BASE
1-1	Pedra Britada (controle)
1-2	Fosfogesso + 10% Cimento Portland
11-1	Fosfogesso + 25% Cinzas Volantes
11-2	Fosfogesso + 15% Cinzas Volantes
11-3	Fosfogesso + 5% Cimento Portland
11-4	Pedra Britada (controle)
11-5	Fosfogesso + 7,5% Cimento Portland

CROCKFORD et al. apud TAHA (1991), apresentaram as seguintes conclusões referentes às observações realizadas nesta pista experimental, após monitoramento por um período de 4 anos:

- misturas estabilizadas com teores maiores que 7,5% de cimento mostraram maiores valores de deflexão, obtidas através do Dynaflect, quando comparadas com a máxima deflexão obtida para a mistura contendo 5% de cimento. Esse fato pode ser atribuído à quantidade de C_3A contida no cimento, como também a prováveis problemas durante o processo de compactação da camada; ou a uma combinação de ambas;
- fenômenos naturais que ocorreram durante o período da construção da pista tais como chuvas, variação da umidade relativa, afetam marcadamente o desempenho futuro da pista;
- outro fator importante a ser levado em consideração é o teor de umidade na mistura durante o processo de compactação, sendo esse fator relevante nos resultados do desempenho da pista.

2.5.4 - Misturas de Fosfogesso, Cinzas Volantes e Cal

De acordo com estudos realizados por LIN apud CHANG & MANTELL (1990), misturas de cal e fosfogesso não apresentaram valores aceitáveis de resistência à compressão simples, para porcentagens de cal de 1%, 3% e 5% e tempo de cura de até 84 dias. Estes autores visando a melhoria da resistência à compressão simples, adicionaram cinzas volantes a estas misturas. Foram compactados corpos de prova na energia do Proctor normal compostos de 5% de cal, variando-se as quantidades de cinzas volantes de 20%, 30%, 40% e 50% e de fosfogesso em 45%, 55%, 65% e 75%, respectivamente. Os resultados do estudo estão ilustrados na Figura 2.13. Pode-se notar que o valor da resistência à compressão simples aumenta com o aumento do tempo de cura. O maior ganho de resistência aconteceu nas primeiras 8 semanas, a partir deste tempo, os ganhos de resistência à compressão simples foram menos acentuados. Todas as misturas com tempos de cura superiores a 12 semanas mostraram valores de resistência à compressão simples superiores a 800 Psi (5,61 Mpa).

FIGURA 2.13 - VALORES COMPARATIVOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA DIFERENTES MISTURAS CONTENDO FOSFOGESSO D-H, CINZA VOLANTE E CAL (LIN apud CHANG & MANTELL, 1990)

Estudos realizados na França por ANDRIEUX et al. (1978) mostraram que misturas de fosfogesso e cinzas volantes, quando submetidas a ensaios de resistência à compressão simples, não apresentaram bom desempenho em termos de resistência à compressão simples para os tempos de cura de até 360 dias. De acordo com esses autores, quando é adicionada cal às misturas de cinzas volantes e fosfogesso, os valores de resistência à compressão simples aumentam. Nestas misturas, o ganho de resistência aumenta à medida que os tempos de cura crescem. Estes valores são apresentados no triângulo da Figura 2.14. Na

referida figura pode-se notar que o maior valor da resistência à compressão simples é de 35 MPa, o qual corresponde à mistura de 75% de cinzas volantes, 15% de cal, e 10% de fosfogesso. O tempo de cura para estas misturas foi de 360 dias.

FIGURA 2.14 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H, CINZA VOLANTE E CAL, PARA O TEMPO DE CURA DE 360 DIAS (apud ANDRIEUX et al. 1978)

VELARDE et al. apud CHANG & MANTELL (1990) pesquisaram misturas com teores de 60% e 80% de fosfogesso, e variando a relação cal/cinza volante. O maior valor de resistência à compressão simples para ambos os teores de fosfogesso correspondeu à relação cal/cinza volante igual a 0,25.

A partir de observações em pistas experimentais. USMEN & MOULTOM (1984) recomendam, que quando forem empregadas este tipo de mistura, é importante que as camadas do pavimento sejam executadas com um grau de

compactação maior ou igual a 100% para que se possam obter valores de resistência à compressão simples elevados, caso contrário, as misturas apresentarão valores de resistência inferiores aos esperados.

2.5.5 - Misturas de Fosfogesso, Areia e Asfalto

É sabido que misturas compactadas compostas com fosfogesso obtido em condições di-hidratadas (D-H), quando imersas em água entram em colapso. Neste sentido, foram realizados estudos por FIGUEROA et al. (1987), com a finalidade de reduzir a susceptibilidade do fosfogesso D-H aos efeitos da água, e assim, evitar que as misturas entrem em colapso.

Foram analisadas misturas de fosfogesso com diversos materiais betuminosos, e alguns desses materiais apresentaram problemas devido à impossibilidade de misturá-los adequadamente e assim se obterem misturas homogêneas. O asfalto de cura rápida (RC-70) foi o material que mostrou o melhor desempenho tanto no manuseio (durante a homogeneização da mistura), como também em termos de resistência. O RC-70 é um material betuminoso com características de cura rápida, que proporciona elevadas resistências devido a suas fortes ligações cimentantes que tornam as misturas estudadas resistentes aos efeitos causados pela água.

FIGUEROA et al. (1987) estudaram também a influência do tempo de cura na resistência destas misturas. As misturas foram compactadas na energia do Proctor modificado, variando-se as diferentes porcentagens de fosfogesso D-H, areia e RC-70. Na Figura 2.15, pode-se notar que para pequenas porcentagens de RC-70, em torno de 1% e 2%, os valores da resistência à compressão simples aumentam a medida que o tempo de cura aumenta. Além do mais, os ganhos de resistência à compressão simples continuam numa trajetória ascendente para tempos de cura superiores aos 28 dias.

FIGURA 2.15 - VALORES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, PARA MISTURAS DE FOSFOGESSO D-H E ASFALTO DE CURA RÁPIDA (RC-70) (apud FIGUEROA et al. 1987)

Outro estudo utilizando estes materiais foi realizado por LIN et al. apud CHANG & MANTELL (1990). Os autores misturaram 33% de fosfogesso e 66% de areia, juntamente com diferentes teores de RC-70. Os corpos de prova foram compactados na energia do Proctor modificado e submetidos a ensaios de compressão simples em condições inundadas e não inundadas.

Observando-se a Figura 2.16, conclui-se que para os corpos de prova ensaiados em condições não inundadas, a resistência à compressão simples diminui com o aumento da quantidade de RC-70 até a porcentagem de 3%, a partir da qual a resistência se estabiliza. Em condições inundadas, a resistência cresce inicialmente com o aumento da porcentagem de RC-70, mas também tende a se estabilizar para porcentagens maiores que 4%. As resistências desenvolvidas nesta condição são sempre inferiores às verificadas para condição não inundada.

FIGURA 2.16 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO DE CURA RÁPIDA (RC-70). QUANDO ANALISADOS EM CONDIÇÕES INUNDADAS E NÃO INUNDADAS (LIN apud CHANG & MANTELL, 1990)

2.5.6 - Misturas de Fosfogesso e Concreto Rolado

O concreto rolado é uma técnica onde se utiliza cimento, pedregulho e areia. Nesta técnica, a argamassa resultante da mistura dos materiais não deve apresentar assentamento no cone de Abrams ($\text{slump} = 0$). Uma vez obedecido este requisito, a argamassa é espalhada no lugar da obra e logo em seguida compactada por meio de rolo vibrocompactador.

CHANG (1989), NANNI & CHANG (1989), CHANG & MANTELL (1990), TAHA & SEALS (1991) relatam que a primeira experiência de concreto rolado (RCC) utilizando fosfogesso nos Estados Unidos foi realizada numa área de estacionamento localizada nos terrenos do *Flórida Institute of Phosphate Research*, Bartow, estado da Flórida.

CHANG (1989), NANNI & CHANG (1989) realizaram misturas de concreto rolado sem fosfogesso 13-0 (13% de cimento e 0% de fosfogesso) e com fosfogesso 13-14 (13% de cimento e 14% de fosfogesso). A energia de compactação utilizada foi a correspondente a do Proctor modificado.

Os resultados deste estudo são apresentados na Tabela 2.6, onde se pode notar que até 18 horas após a compactação, a mistura contendo fosfogesso (13-14) apresentou valores muito menores de resistência à compressão simples do que a mistura sem fosfogesso (13-0). No entanto, após 74 horas da compactação, esta diferença diminui drasticamente, sendo que a mistura que não contém fosfogesso (13-0) apresentou valores não superiores a 15%. Nesse sentido, os autores concluíram que o fosfogesso retarda o tempo de pega, facilitando assim a trabalhabilidade durante a construção das camadas do pavimento, sem afetar as suas propriedades de resistência mecânica.

TABELA 2.6 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DAS DIFERENTES MISTURAS ANALISADAS NA PISTA EXPERIMENTAL LOCALIZADA NOS PÁTIOS DO INSTITUTO DO FOSFOGESSO EM BARTOW-FLÓRIDA (apud CHANG et al. 1989)

TEMPO DE CURA (Hr)	RESISTÊNCIA (Psi)	
	C13 - 14	C13 - 0
4	29	72
8	38	349
18	92	1.175
74	2.809	3.207
168	3.343	3.772

Análises realizadas por CHANG (1989) mostraram que os valores de resistência à compressão simples de amostras retiradas do campo são superiores aos valores obtidos das amostras moldadas no laboratório. Como exemplo, para a mistura composta de 13% de fosfogesso, 14% de cimento e 73% de agregado, compactada utilizando-se a energia do Proctor modificado, para um tempo de cura de 28 dias, corpos de prova retirados diretamente da obra forneceram valores em torno de 3174 Psi (21,89 MPa). No entanto, os valores de resistência

à compressão simples provenientes de corpos de prova moldados em laboratório mostraram valores de 2767 Psi (19,08 MPa).

Segundo CHANG (1989), NANNI & CHANG (1989), a associação do fosfogesso ao cimento pode comprometer, em determinadas condições, a estrutura do pavimento, reduzindo sua vida útil. Este fato se dá devido à reação de íons do fosfogesso com o aluminato tricálcico adicionado ao cimento como elemento retardador de pega. Ainda segundo, a durabilidade do concreto rolado não é comprometida quando o teor de aluminato tricálcico contido no cimento é menor que 7%.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Procedimento Geral

A presente pesquisa tem como finalidade estudar o efeito, em termos de resistência à compressão simples, da adição de fosfogesso em condições anidras a um solo tropical.

A investigação experimental foi conduzida de maneira que possibilitasse o estudo da variação da resistência à compressão simples de misturas de fosfogesso em condições anidras e solo, em função dos seguintes parâmetros: teor de fosfogesso na mistura, teor de umidade durante o processo de compactação e tempo de cura dos corpos de prova compactados.

Assim sendo, o estudo dirigiu-se para a determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova compactados na energia de Proctor normal, grau de compactação de 100% e na umidade ótima, para as misturas de solo e fosfogesso nas proporções de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, e tempos de cura de 3, 7, 28 e 84 dias, após a compactação.

3.2 - Características dos materiais

3.2.1 - Fosfogesso

O fosfogesso selecionado para o estudo foi coletado no pátio de estocagem de resíduos da indústria de adubos fosfatados FOSFERTIL. Nessa indústria, o fosfogesso está organizado e dividido em setores ordenados de forma alfabética e

por ano de produção. O início da produção do fosfogesso na FOSFERTIL data do ano de 1986, sendo deste então armazenado.

Tendo-se em consideração o anteriormente exposto, procurou-se coletar um material com idade intermediária entre o fosfogesso mais antigo e o mais recente. Para tal finalidade foi recolhido o fosfogesso do lote "B", o qual corresponde à produção do período 1990-1991. Na coleta do material, selecionaram-se 500 quilogramas de fosfogesso, posteriormente acondicionados em sacos plásticos contendo, cada um, 50 quilogramas do material devidamente etiquetados para a sua identificação. A Figura 3.1 mostra o processo de coleta do fosfogesso.

FIGURA 3.1 - COLETA DO FOSFOGESSO

Uma vez coletado, o fosfogesso foi transportado para o Laboratório de Estradas da EESC-USP, onde foi armazenado. Realizaram-se neste laboratório,

os ensaios de granulometria conjunta e massa específica dos grãos do fosfogesso anidro.

a) - Granulometria

A granulometria do fosfogesso foi determinado através do ensaio de granulometria conjunta (peneiramento + sedimentação). A etapa de peneiramento foi realizada com um conjunto de 7 peneiras e o resultado encontra-se apresentado na Tabela 3.1 e na Figura 3.2. Na sedimentação observou-se indícios de alguma reação química que fez com que todas as partículas do fosfogesso precipitassem nos primeiros 15 minutos do ensaio. Tal reação, não estudada em maiores detalhes neste trabalho, fez com que o fosfogesso rapidamente adquirisse características de material cimentante e aderisse ao fundo da proveta, o que impedia a continuidade do ensaio. Este fenômeno foi observado utilizando-se hexametáfosfato de sódio ou apenas água como defloculante.

TABELA 3.1 - RESULTADOS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA (PENEIRAMENTO)

PENEIRA	DIÂMETRO (mm)	% RETIDA
4	4,76	0,00
10	2,00	0,00
16	1,19	0,00
30	0,59	0,19
50	0,297	0,56
100	0,149	21,66
200	0,074	42,74

FIGURA 3.2 - CURVA GRANULOMÉTRICA OBTIDA POR PENEIRAMENTO DO FOSFOGESSO DA FOSFERTIL

A Tabela 3.2 apresenta resultados de estudos realizados pela empresa PROGEO, sob encomenda da FOSFERTIL, para a determinação da granulometria do fosfogesso. Pode-se observar que apenas 3,59% do material analisado tem diâmetro menor que 0,074 mm (#200), em contrapartida ao fosfogesso estudado no Laboratório de Estradas da EESC-USP, que tem 57,26% das partículas menores que o referido diâmetro.

TABELA 3.2 - ANÁLISE FÍSICA (fonte: PROGEO, 1994)

GRANULOMETRIA (%)	
Pedregulho($\phi > 4,6$ mm)	0,00
Areia Grossa ($2 \text{ mm} < \phi < 4,6$ mm)	0,00
Areia Média ($0,42 \text{ mm} < \phi < 2$ mm)	0,00
Areia Fina ($0,074 \text{ mm} < \phi < 0,42$ mm)	0,29
Silte ($0,002 \text{ mm} < \phi < 0,074$ mm)	96,12
Argila ($\phi < 0,002$ mm)	3,59
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS (g/cm^3)	2,36
LIMITES DE CONSISTÊNCIA (%)	
LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)	37,80
LIMITE DE PLASTICIDADE (LP)	25,70
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)	12,00

b) - massa específica dos sólidos

Foram encontradas dificuldades para a realização do ensaio para a determinação da massa específica dos sólidos do fosfogesso. Inicialmente, na fase de extração a vácuo do ar do picnômetro, aconteceu uma queda da temperatura e uma rápida precipitação das partículas do fosfogesso. Posteriormente, ao se aquecer o picnômetro para se acompanhar a variação da densidade da mistura notou-se que esta variação foi muito pequena. Encerrado o ensaio, não foi possível extrair o fosfogesso do picnômetro, visto ter-se cimentado no seu interior. O valor encontrado nesse ensaio para a massa específica dos sólidos é de $3,22 \text{ g/cm}^3$.

Ensaio realizado pela PROGEO, vide Tabela 3.2, indicam para a massa específica dos grãos do fosfogesso o valor de $2,36 \text{ g/cm}^3$. CHANG & MANTELL (1990) encontraram para fosfogessos do estado da Flórida, valores entre $2,31 \text{ g/cm}^3$ e $2,53 \text{ g/cm}^3$. Pode-se notar que a massa específica dos sólidos determinada no Laboratório de Estradas da EESC-USP, correspondente a $3,22 \text{ g/cm}^3$, é discrepante destes valores, indicando que talvez não seja um resultado confiável.

c)- limites de consistência

Houve várias tentativas de se determinar o limite de plasticidade do fosfogesso no Laboratório de Estradas da EESC-USP, mas não se conseguiu moldar os bastonetes, segundo as especificações do ensaio. Este insucesso levou a que não se realizasse a respectiva classificação granulométrica. SCHAEFFNER (1978) observou que para alguns fosfogessos não é possível a determinação do limite de plasticidade, mas obteve para o limite de liquidez o valor de 27%. Ensaio realizado pela PROGEO, vide Tabela 3.2, indicam para os limites de liquidez e plasticidade, os valores de 37,8% e 25,7%, respectivamente.

d)- análise química

A Tabela 3.3 apresenta resultados de uma análise química do fosfogesso realizada pela PROGEO sob encomenda da FOSFERTIL.

TABELA 3.3 - ANÁLISE QUÍMICA PARA O FOSFOGESSO DA PILHA DE EXPEDIÇÃO (fonte: FOSFERTIL)

COMPOSTO	PORCENTAGEM
Água combinada	19,53%
TiO ₂	0,92%
F ⁻	0,25%
CaO	30,90%
SO ₄	52,80%
P ₂ O ₅ solúvel em água	0,15%
P ₂ O ₅ SCAN + água	0,57%
P ₂ O ₅ TOTAL	0,76%
Al ₂ O ₃	0,06%
Fe ₂ O ₃	0,20%
MgO	0,01%
BaO	0,03%
SiO ₂	1,81%
Ca	22,08%
S	17,62%

OBS.(SCAN = Solúvel em Citrato de Amônia Neutro)

Na Tabela 3.3 pode-se observar que são vários os elementos e compostos químicos que constituem o fosfogesso, sendo que predominam o óxido de cálcio (CaO) com 30,90%, e sulfatos (SO_4) com 53%, conferindo ao fosfogesso um comportamento ácido, conforme já indicado anteriormente na revisão bibliográfica.

3.2.2 - Solo

Para a composição das misturas foi utilizado um solo proveniente de uma jazida localizada no terreno da própria indústria FOSFERTIL. A coleta do solo foi realizada levando-se em consideração todos os cuidados de rotina e recomendações para este tipo de tarefa. Inicialmente foi realizado um reconhecimento preliminar do local e das possíveis jazidas de solo existentes. Após definida a jazida foram retiradas amostras deformadas, sendo que foram coletados 1000 quilogramas de material. O solo foi colocado em sacos plásticos devidamente etiquetados. O referido solo não apresentava vegetação ou qualquer outro elemento estranho. A Figura 3.3 mostra a região onde foi realizada a coleta do solo.

FIGURA 3.3 - JAZIDA DE SOLO DA REGIÃO DE UBERABA-MG

É importante ressaltar que o motivo para se-ter escolhido o solo desta região deve-se ao fato de que a indústria FOSFERTIL pretende implantar, no futuro, um pátio para estacionamento de veículos com pavimento construído com uma base onde se tenha utilizado o fosfogesso e o solo do próprio local.

a) - granulometria

Na Tabela 3.4 e na Figura 3.4 estão apresentados respectivamente, os resultados do ensaio de granulometria e a curva da distribuição granulométrica do solo. Trata-se de um material de composição granulométrica predominantemente fina (1% de pedregulho, 19% de areia, 32% de silte e 48% de argila).

TABELA 3.4 - RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA DO SOLO DA REGIÃO DA FOSFERTIL

PENEIRA	DIÂMETRO	% RETIDA
4	4,76	0,27
10	2,00	1,07
16	1,19	1,66
30	0,59	2,39
50	0,297	3,51
100	0,149	7,49
200	0,074	11,56
	0,061	19,88
	0,0434	22,24
	0,0311	26,04
	0,0222	29,84
	0,0297	23,81
	0,0214	29,05
	0,0152	30,89
	0,0112	32,98
	0,008	36,13
	0,0557	40,33
	0,004	42,51
	0,0029	46,97
	0,002	52,06

b)- massa específica dos grãos

O valor da massa específica dos grãos encontrada para o solo estudado correspondeu a $3,123 \text{ g/cm}^3$.

c)- limites de consistência e classificação geotécnica

Com relação aos ensaios para a determinação dos limites de consistência, o solo apresentou limite de liquidez $LL = 48\%$ e limite de plasticidade $LP = 33\%$. Segundo a classificação HRB (*Highway Research Board*), situa-se no grupo A-7-5, e corresponde a um solo argiloso. Já na classificação Unificada, trata-se de um solo do tipo CL, solo argiloso de baixa plasticidade. Recorreu-se também à classificação geotécnica MCT (*Miniatura Compactado Tropical*) desenvolvida para solos tropicais por NOGAMI & VILLIBOR (1981), Encontrou-se para o coeficiente c' o valor de 2,1 e para o índice e' , o valor de 1,05. Na Figura 3.5, para os valores de c' e e' encontrados observa-se que o solo pertence ao grupo LG' (solo argiloso com comportamento laterítico).

FIGURA 3.4 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO DA REGIÃO DA FOSFERTIL

umidade de compactação, adotou-se valores compatíveis com aqueles citados na bibliografia como sendo valores de umidade ótima para misturas de solo e fosfogesso.

Diante da comprovação de que os corpos de prova realmente entravam em colapso, conforme está apresentado no Capítulo 4, Seção 4.2.1. estabeleceu-se como meta verificar a eficácia do procedimento proposto por MACCARINI (1991) como medida para a estabilização de misturas compostas com fosfogessos. Este autor observou que o fosfogesso di-hidratado após um certo período de permanência em estufa passava à condição de fosfogesso anidro e se compactado nesta condição, apresentava estabilidade frente à ação da água. Foram então compactados corpos de prova com teores de fosfogesso de 15%, 30% e 50%. Quanto às condições adotadas no processo de desidratação do fosfogesso, estas estão descritas na Seção 3.3.2.1.

Constatou-se, conforme o que está apresentado no Capítulo 4, Seção 4.2.1, que os corpos de prova compactados com misturas compostas com fosfogesso anidro não entravam em colapso diante a imersão em água. Optou-se então em realizar-se o prosseguimento do estudo a partir da composição de misturas de solo e fosfogesso previamente desidratado.

Em seguida, ainda na etapa preliminar do estudo, foram compactadas misturas de solo e fosfogesso anidro nas proporções de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, cada uma delas em cinco diferentes umidades, com o objetivo de se determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima correspondentes a cada uma das diferentes composições. Quanto aos procedimentos adotados para a preparação, dosagem e mistura dos materiais, e compactação dos corpos de prova, estes encontram-se descritos no item 3.3.2, estudo definitivo, seções 3.3.2.1, 3.3.2.2 e 3.3.2.3, respectivamente.

Os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima determinados no estudo preliminar serviram como referência para a escolha

das condições em que seriam compactos os corpos de prova a serem utilizados nos ensaios de compressão simples realizados no estudo definitivo.

3.3.2 - Estudo Definitivo

Uma vez obtidos, na fase preliminar, os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótima para cada uma das diferentes composições de misturas de solo e fosfogesso, passou-se ao estudo definitivo.

Nesta etapa, para cada uma das misturas, foram compactados corpos de prova na umidade ótima e em outras 4 umidades, 2 umidades no ramo seco e 2 umidades no ramo úmido da curva de compactação. Estes corpos de prova foram curados durante períodos de tempo variáveis e posteriormente submetidos ao ensaio de compressão simples em condições inundadas e não inundadas. Em seguida, é detalhado o método empregado nesta parte da investigação experimental.

3.3.2.1 - Preparação das amostras

Inicialmente, o fosfogesso em condições di-hidratadas (D-H) era mantido em estufa a uma temperatura de 130°C durante um período de 24 horas para a sua desidratação. Após este processo, deixava-se o material ao ar por um período de 2 horas até que atingisse a temperatura ambiente, de modo a permitir o seu manuseio. Logo após era passado na peneira 10 (malha de abertura 2 mm). Durante o peneiramento observou-se que a totalidade das partículas de fosfogesso passavam através desta peneira.

Quanto ao solo, o material foi deixado secar ao ar até atingir a umidade higroscópica do meio ambiente. Posteriormente, era passado na peneira 10 (malha de abertura 2 mm). O material retido era então destorroado em

almofariz com mão recoberta de borracha e novamente peneirado. A parcela de solo retida após o destorroamento, muito pequena no caso, era descartada.

Após o peneiramento do solo e do fosfogesso, os materiais foram submetidos a um processo de quarteamento e homogeneização, logo após embalados em sacos plásticos e armazenados.

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram, respectivamente, o quarteamento do fosfogesso e do solo.

FIGURA 3.6 - QUARTEAMENTO DO FOSFOGESSO ANIDRO

FIGURA 3.7 - QUARTEAMENTO DO SOLO

3.3.2.2 - Dosagem e Mistura

Foram investigadas misturas compostas de solo e fosfogesso com teores de fosfogesso de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. As quantidades de fosfogesso e solo foram calculadas em relação ao peso seco destes materiais levando-se em consideração suas respectivas umidades higroscópicas.

A associação do solo e do fosfogesso era realizada nas suas respectivas umidades naturais, a mistura resultante era revolvida até que mostrasse um aspecto homogêneo. A água a ser acrescentada era então adicionada aos poucos e a mistura homogeneizada. A seguir, a mistura era passada na peneira número 4 (malha de abertura 4,76 mm) e homogeneizada novamente. Só então procedia-se à determinação e verificação da umidade existente na mistura. É importante ressaltar que o processo de mistura se repetia para cada uma das

umidades de compactação, não se recorrendo ao reuso dos materiais. Na Figura 3.8 está mostrado o processo de mistura e homogeneização do solo e fosfogesso.

FIGURA 3.8 - PROCESSO DE MISTURA E HOMOGENEIZAÇÃO DO SOLO E FOSFOGESSO

3.3.2.3 - Compactação dos Corpos de Prova

Para a compactação dos corpos de prova foi utilizado o equipamento de dimensões reduzidas de solo-aditivo introduzido por PINTO (1985)¹⁹⁶⁴. Os corpos de prova que resultam da utilização deste equipamento têm 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. A energia aplicada aos corpos de prova foi a energia do Proctor normal, correspondendo à aplicação de 5 golpes de cada lado do corpo de prova. A Figura 3.9 mostra o equipamento utilizado durante o processo de compactação dos corpos de prova.

FIGURA 3.9 - EQUIPAMENTO UTILIZADO DURANTE O PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A altura dos corpos de prova era determinada por meio de um extensômetro de marca MITUTOYO colocado no topo do pedestal do equipamento. Os corpos de prova que não apresentavam altura entre 4,9 cm e 5,1 cm eram rejeitados. A seguir, o corpo de prova que se encontrava dentro das medidas estipuladas era extraído do cilindro metálico. Posteriormente era pesado, embalado com uma película plástica e envolvido em papel alumínio, e etiquetado.

A embalagem dos corpos de prova foi realizada com a finalidade de se evitar perdas de umidade durante o tempo de cura ao qual eles eram submetidos previamente à realização dos ensaios de compressão simples.

O processo de compactação dos corpos de prova foi realizado em duas etapas de estudo, a preliminar e a definitiva. Como foi apresentado na seção

3.3.1, na etapa preliminar foram compactadas misturas contendo fosfogesso nos teores de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em cinco umidades diferentes com a finalidade de se obter a umidade ótima de compactação para cada uma destas composições. Já na etapa do estudo definitivo, uma vez conhecida a umidade ótima para cada um dos teores de fosfogesso, foram compactados 30 corpos de prova para cada uma das composições: 6 na umidade ótima; 12 no ramo seco, sendo 6 corpos de prova a 1,5% e 6 a 3% abaixo da umidade ótima; e 12 no ramo úmido, 6 a 1,5% e 6 a 3% acima da umidade ótima.

3.3.2.4 - Cura dos Corpos de Prova

FIGURA 3.10 - CORPO DE PROVA NO PROCESSO DE CURA

A Figura 3.10 mostra um dos corpos de prova já embalado, colocado em caixa de isopor para o processo de cura.

Os corpos de prova já devidamente embalados foram colocados em câmara úmida para a correspondente cura. Os tempos de cura adotados foram de 3, 7, 28 e 84 dias. Os corpos de prova contendo 100% de solo foram submetidos ao ensaio de compressão simples logo após o processo de compactação.

3.3.2.5 - Ensaio de Compressão Simples

Decorrido o tempo de cura programado, metade do conjunto dos corpos de prova era submetida ao ensaio de resistência à compressão simples após prévia imersão em água por um período de 4 horas. A outra metade era submetida ao ensaio sem imersão. Assim, para cada composição, um determinado tempo de cura e para cada umidade, foram ensaiados 1 terno de corpos de prova sem imersão e 1 terno de corpos de prova após imersão em água.

A resistência à compressão simples utilizada no estudo da influência do teor de fosfogesso na mistura e do tempo de cura correspondeu à resistência de corpos de prova moldados na umidade ótima. Para uma determinação mais correta deste valor, visto que nem sempre dispunha-se de corpos de prova compactados exatamente na referida umidade, encontrou-se esta resistência a partir de uma interpolação gráfica entre os valores de resistência obtidos a partir dos corpos de prova moldados em umidades diversas. A Figura 3.11 apresenta o procedimento adotado.

Para o ensaio de compressão simples foi utilizada uma prensa de marca WYKEHAM FARRANCE ENGLAND, modelo 10073, série 68390-1, com capacidade de 10000 kgf e velocidade da aplicação da carga controlável. Neste estudo utilizou-se a velocidade de 1 mm/min. A força aplicada era determinada através de anéis dinamométricos com capacidades de 1500 kgf e 3000 kgf

respectivamente, dependendo da resistência à ruptura prevista para os corpos de prova.

FIGURA 3.11 - INTERPOLAÇÃO GRÁFICA PARA A OBTENÇÃO DA “RCS” NA UMIDADE REQUERIDA

A força aplicada nos corpos de prova e a sua deformação durante o ensaio eram monitoradas por painéis eletrônicos e registradas por um computador que fornecia um relatório impresso de cada ensaio.

considerando-se este valor como resultado final. É desaconselhável optar-se pelo valor da média aritmética dos ternos de corpos de prova, quando os ternos apresentam valores muito diferentes entre si; sendo assim, é muito difícil determinar qual dos valores é errôneo, ou além disso, definir se os resultados estão dentro da variação experimental, como também, qual valor deveria ser descartado por ser considerado errôneo ou produto de uma aberração involuntária.

Com a finalidade de se obter maior confiabilidade nos resultados dos ensaios de compressão simples, recorreu-se ao método utilizado por DAVID, DAVIDSON e O'FLAHERTY (1961) para a análise e a eliminação de observações. O método baseia-se no pressuposto da existência de um valor de coeficiente de variação único para todo o universo de ternos.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Como se pretende utilizar as misturas de fosfogesso e solo na construção de pavimentos rodoviários, um estudo indispensável que se deve realizar, é avaliar o desempenho destas misturas quando compactadas nas condições mais desfavoráveis, ou seja, quando elas se encontram imersas em água, de maneira tal a reproduzir situações críticas que poderiam ocorrer no campo. Neste sentido, inicialmente, procurou-se avaliar o comportamento de corpos de provas compactados constituídos de misturas compostas com fosfogesso frente à imersão em água. Observou-se que estas misturas se instabilizavam nesta situação, e então foram procuradas soluções para se contornar este problema. As diversas tentativas adotadas estão descritas no item 4.2 sob o nome de Estudo Preliminar.

4.2 - Estudo Preliminar

Nesta etapa da pesquisa analisou-se o comportamento de misturas de fosfogesso di-hidratado (D-H) com solo, cimento e solo, cal e solo e finalmente fosfogesso anidro e solo. Os procedimentos adotados e os resultados destas experiências estão descritas nas alternativas de 1 a 4.

4.2.1 - Alternativa 1

Estudou-se, inicialmente, misturas compostas com 3%, 8%, 15% e 30% de fosfogesso di-hidratado (D-H) e solo. Para os primeiros três teores foi possível determinar-se uma curva de compactação típica, possibilitando que obtivessem valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo. Para

o teor mais elevado, não se observou uma curva com um ponto de máxima bem definido. SCHAEFFNER (1978) já havia constatado um comportamento semelhante quando estudou misturas de fosfogesso e solo compactadas segundo diferentes energias.

Estes corpos de prova, após a compactação, foram imersos em água, os mesmos entraram em colapso, sendo que apresentaram características efervescentes. Fato semelhante foi também observado por CHANG (1989), conforme já mencionado na revisão bibliográfica.

A Figura 4.1 apresenta estes corpos de prova após imersão em água. Para as porcentagens de 8%, 15% e 30% ocorreu o colapso em 2 minutos após serem imersos. Neste tempo, o corpo de prova de 3% de fosfogesso ainda não se estabilizou, mas isto ocorreu logo em seguida.

4.2.2 - Alternativa 2

Como tentativa de se garantir a estabilidade das misturas de fosfogesso e solo frente à imersão em água, procurou-se acrescentar às mesmas alguns aditivos químicos de uso corrente em engenharia rodoviária como cal, cimento, e calcáreo. Foram compactadas misturas de fosfogesso D-H contendo 2% de cal; 3% de cimento; e 2% de calcáreo. Foi observado que os corpos de prova provenientes dessas misturas quando imersas em água, também entraram em colapso. Como foi visto na Revisão Bibliográfica, porcentagens maiores de cimento que a adotada neste estudo, possibilitaram que misturas com fosfogesso di-hidratado (D-H) fossem estabilizadas, segundo PUIATTI (1978).

4.2.3 - Alternativa 3

Considerando-se que diversas pesquisas, segundo TRICHES & MACCARINI (1988) e MACCARINI (1991), realizadas com fosfogesso anidro mostraram que

este material proporciona misturas compactadas estáveis frente a ação da água, procurou-se desidratá-lo previamente à composição das misturas. O fosfogesso D-H foi aquecido a uma temperatura de 130°C por um período de 24 horas, e em seguida deixado ao ar livre até atingir a temperatura ambiente, de tal maneira que permitisse a sua manipulação. Cumprida esta etapa, adicionou-se água em pequena quantidade ao fosfogesso, deixando-o em repouso por um período de 24 horas. Posteriormente, compactaram-se misturas de solo e fosfogesso nos teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Observou-se que para nenhuma delas foi possível se obter os valores da massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo, pois as curvas de compactação obtidas foram atípicas, os corpos de prova também entraram em colapso quando imersos em água.

O fato das curvas de compactação serem atípicas pode ser atribuído ao processo de composição da mistura, que foi realizada com reuso do material. Quanto à constatação dos corpos de prova terem entrado em colapso quando imersos em água, provavelmente deve-se à rehidratação do fosfogesso no período de repouso de 24 horas.

FIGURA 4.1 - IMERSÃO DE CORPOS DE PROVA CONTENDO SOLO E FOSFOGESSO DI-HIDRATADO (D-H)

4.2.4 Alternativa 4

A quarta tentativa é semelhante à anterior, ou seja, procurou-se trabalhar com o fosfogesso anidro. A diferença principal reside no fato que não se acrescentava água após sua desidratação e o processo de compactação procedeu-se sem o reuso de material. O procedimento adotado aproxima-se muito do procedimento preconizado por MACCARINI (1991).

Estudos laboratoriais realizados por MACCARINI (1991) mostraram que quando o fosfogesso di-hidratado é transformado em fosfogesso anidro por meio de aquecimento à temperatura de 130°C durante um período mínimo de 20 horas, os corpos de prova de fosfogesso compactado, não apresentaram problemas de colapso quando imersos em água. Além do mais, segundo este mesmo autor, os corpos de prova atingem valores elevados em termos de resistência à compressão simples.

Referente à desidratação do fosfogesso, alguns autores como LEGAL & MYRICK apud TAHA & SEALS (1991) e SCHRÖDTER (1991) argumentam que para a sua obtenção, é preciso empregar temperaturas em torno de 120°C a 130°C , coincidindo com o procedimento laboratorial empregado por MACCARINI (1991).

Baseando-se nas experiências de MACCARINI (1991), colocou-se o fosfogesso D-H na estufa à temperatura de $130^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante um período de 24 horas com a finalidade de deixá-lo nas condições anidras. Depois de retirado da estufa, aguardava-se algum tempo para seu resfriamento à temperatura ambiente. Posteriormente, procedeu-se ao processo de composição e compactação das misturas com teores de 15%, 30% e 50% de fosfogesso anidro e solo.

Na Figura 4.2 observa-se que os corpos de prova contendo solo e fosfogesso anidro nos teores de 15%, 30% e 50%, não entraram em colapso quando imersos em água.

FIGURA 4.2 - IMERSÃO DE CORPOS DE PROVA CONTENDO SOLO E FOSFOGESSO ANIDRO

Considerando-se que a Alternativa 4 possibilitou a obtenção da estabilização das misturas de fosfogesso e solo frente à ação da água, adotou-se o procedimento correspondente no prosseguimento do estudo.

Posteriormente, no laboratório do STT (Departamento de Estradas) foram compactados corpos de prova com teores 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de fosfogesso anidro e solo, tal como indica a Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - PORCENTAGEM DAS MISTURAS DE FOSFOGESSO ANIDRO DE SOLO

FOSFOGESSO ANIDRO (%)	SOLO (%)
0	100
20	80
40	60
60	40
80	20
100	0

Para as referidas misturas, todas as curvas de compactação apresentaram forma típica, ou seja, com pontos da massa específica seca máxima bem definidos. Além do mais, constatou-se que os corpos de prova após imersão em água não entraram em colapso.

Na Figura 4.3 apresentam-se as diversas curvas de solo e fosfogesso anidro nos teores de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os valores obtidos da massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo foram utilizados como parâmetros de partida no estudo definitivo.

FIGURA 4.3 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS DIVERSAS MISTURAS DE SOLO E FOSFOGESSO ANIDRO

Já na Tabela 4.2 estão apresentados os valores interpolados graficamente da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótima para as diversas misturas.

TABELA 4.2 - MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA E TEOR DE UMIDADE ÓTIMA, PARA AS CURVAS DE COMPACTAÇÃO NA ENERGIA DO PROCTOR NORMAL DE FOSFOGESSO ANIDRO E SOLO

TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO (%)	MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA (g/cm ³)	TEOR DE UMIDADE ÓTIMO (%)
0	1,635	25,50
20	1,610	26,10
40	1,545	26,00
60	1,470	24,80
80	1,385	26,00
100	1,350	27,00

Nesta Tabela 4.2, pode-se notar que à medida que cresce a porcentagem de fosfogesso adicionado ao solo, os valores da massa específica máxima seca diminuem. Isto deve-se ao fato que as partículas do fosfogesso passam a ocupar o lugar do solo, e como o fosfogesso é material de menor massa específica dos grãos que o solo. Assim sendo, a tendência dos valores da massa específica máxima seca das misturas, é diminuir à medida que cresce a quantidade de fosfogesso. Fato similar é verificado para misturas estabilizadas de uso corrente em engenharia rodoviária, como solo-cal.

Ainda na Tabela 4.2, nota-se que as diversas misturas estudadas apresentaram valores de umidade ótima, inicialmente decrescentes e depois crescentes com o aumento do teor do fosfogesso.

O valor da massa específica máxima seca para o fosfogesso anidro encontrado por MACCARINI (1991) foi de 1,415 g/cm³, o encontrado para o fosfogesso aqui estudado correspondeu a 1,350 g/cm³. No entanto, os valores encontrados nos fosfogessos provenientes do estado da Flórida, situam-se em torno de 1,540 g/cm³. Notando-se desta maneira que estes valores variam de um

local para outro, coincidindo assim com observações já citadas na Revisão Bibliográfica.

Quanto ao teor de umidade ótima de 27% obtido para a mistura composta de 100% de fosfogesso, o valor mais próximo a este foi o obtido por MACCARINI (1991), o qual corresponde a 28%. Já os obtidos por CHANG et al. (1989) nos Estados Unidos variaram em torno de 17%.

4.3 Estudo Definitivo

Os valores dos pares de umidade ótima e massa específica seca máxima determinados no Estudo Preliminar serviram de subsídio para a escolha das condições de compactação dos corpos de prova nesta etapa da pesquisa. Estas condições encontram-se descritas no capítulo anterior, Materiais e Métodos. Em seguida são apresentados resultados provenientes dos ensaios de compactação e por último, resultados provenientes dos ensaios de compressão simples.

4.3.1 Ensaios de Compactação

As curvas de compactação para cada uma das composições das misturas de fosfogesso e solo estão apresentadas no Anexo A. Com base nestas curvas, determinaram-se o comportamento destas misturas relacionando-se entre si alguns parâmetros, como umidade ótima, massa específica seca máxima e teor de fosfogesso.

4.3.1.1 Massa Específica Seca Máxima em Função do Teor de Fosfogesso Anidro

A Figura 4.4 mostra a variação da massa específica seca máxima com a variação da porcentagem de fosfogesso na mistura compactada. A tendência

observada coincide com aquela apresentada por outras misturas estabilizadas quimicamente, solo-cal por exemplo: porcentagens crescentes de fosfogesso conduzem a valores de massa específica seca máxima decrescentes.

Para 20% de fosfogesso, o valor da massa específica seca máxima é de 1,61 g/cm³ que reduz-se para 1,35 g/cm³ no caso de 100% de fosfogesso.

FIGURA 4.4 - MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO

4.3.1.2 - UMIDADE ÓTIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO

A figura 4.5 mostra a variação da umidade ótima com a variação da porcentagem de fosfogesso na mistura compactada. Observa-se que a umidade ótima apresenta uma tendência decrescente na faixa de 20% a 60% de

fosfogesso. Esta tendência se inverte na faixa dos 60% a 100%, ou seja, o aumento da quantidade de fosfogesso na mistura conduz a valores mais elevados de umidade ótima.

FIGURA 4.5 - UMIDADE ÓTIMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO

4.3.1.3 - Massa Específica Seca Máxima em Função do Teor de Umidade.

A Figura 4.6 mostra uma combinação dos aspectos abordados nos itens 4.3.1.1 e 4.3.1.2, ou seja, a variação da massa específica seca máxima com a umidade ótima, para cada uma das composições estudadas. A massa específica seca máxima diminui concomitantemente com o decréscimo da umidade ótima na faixa de 20% a 60% e continua diminuindo na faixa de 60% a 100%, mas com um crescimento da umidade ótima.

FIGURA 4.6 - MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE UMIDADE

4.3.2 - Ensaios de Compressão Simples

As curvas da variação da resistência à compressão simples com a variação da umidade para cada uma das composições das misturas de fosfogesso e solo, considerando-se corpos de prova ensaiados em condições imersas e não imersas para os tempos de cura considerados podem ser obtidos por interpolação gráfica das Figuras B.1 a B.40 apresentadas no Anexo B. Também no referido anexo, estão apresentadas as Tabelas B.1 e B.2, com os respectivos valores já interpolados para cada teor de umidade considerado.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) dos corpos de prova compostos com 100% de solo (0% de fosfogesso) nas condições sem imersão e com imersão foram bastante baixos quando comparados com

qualquer uma das outras misturas com algum teor de fosfogesso. Na Tabela 4.3 e nas Figuras 4.7 e 4.8, estão, respectivamente registrado e ilustrados os resultados obtidos.

Estes resultados, acima citados, aliado ao fato de que em amostras compostas apenas de solo não faz sentido esperar ganho de resistência devido ao tempo de cura, justificam a não inclusão destes valores nas análises posteriores. Observa-se então que os corpos de prova foram submetidos aos ensaios logo após a sua compactação, isto é, não foi esperado qualquer tempo de cura.

TABELA 4.3 - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA SEM IMERSÃO E COM IMERSÃO PARA TEOR DE SOLO NAS PROPORÇÕES DE 100%

TEOR DE UMIDADE (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (SEM IMERSÃO) (KPA)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO À SIMPLES (COM IMERSÃO) (KPA)
22,43	447	CP Colapsaram
23,92	472	CP Colapsaram
25,46	507,5	163
26,97	386	123
28,44	118	CP Colapsaram

FIGURA 4.7 - CURVA DE COMPACTAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA CORPOS DE PROVA CONTENDO 100% DE SOLO

FIGURA 4.8 - CURVA DE COMPACTAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA CORPOS DE PROVA CONTENDO 100% DE SOLO

As tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os valores médios de resistência a compressão simples obtidos para corpos de prova moldados na umidade ótima e ensaiados em condições inundadas e não inundadas.

TABELA 4.4 - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA SEM IMERSÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO E TEMPO DE CURA

TEOR DE FOSFOGESSO (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (KPa) CORPOS PROVA SEM IMERSÃO			
	TEMPO DE CURA (DIAS)			
	3	7	28	84
20	839,00	1.047,33	1.140,00	917,33
40	1.289,00	1.473,00	1.832,00	1.329,33
60	1.600,33	2.740,33	2.646,33	2.157,00
80	2.699,67	4.537,50	5.860,00	6.080,33
100	6.431,33	6.804,33	9.783,00	5.175,33

TABELA 4.5 - VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA COM IMERSÃO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO E TEMPO DE CURA

TEOR DE FOSFOGESSO (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (KPa) CORPOS PROVA COM IMERSÃO			
	TEMPO DE CURA (DIAS)			
	3	7	28	84
20	440,67	442,33	385,67	518,33
40	741,67	771,33	969,67	899,33
60	762,67	1.663,50	2.200,33	1.546,00
80	2.327,50	3.537,50	5.223,50	5.560,00
100	3.130,00	5.081,67	8.325,33	3.031,67

4.3.2.1 Resistência em Função do Tempo de Cura e do Teor de Fosfogesso

Os valores médios obtidos dos ensaios de resistência à compressão simples provenientes dos diversos corpos de prova analisados em condições imersas ou não em água, estão apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10 respectivamente.

Estas figuras apresentam os resultados de resistência à compressão simples obtidos a partir de corpos de prova moldados na umidade ótima e ensaiados respectivamente, sem imersão e com prévia imersão em água. Pode-se observar,

em ambos os procedimentos, que a adição de quantidades crescentes de fosfogesso ao solo conduz a um ganho crescente de resistência.

Quando se analisa o efeito da imersão dos corpos de prova, nota-se uma queda da resistência quando esta é comparada com a resistência de corpos de prova ensaiados na umidade de moldagem. É importante ressaltar porém, que a desidratação do fosfogesso possibilitou que as misturas compactadas mantivessem sua estabilidade frente à ação da água.

O tempo de cura após a compactação tem efeito significativo no ganho de resistência à compressão simples de misturas compactadas de solo e fosfogesso. Nos primeiros 28 dias, o aumento de resistência é pronunciado principalmente para os teores de fosfogesso mais elevados, e após este período, a resistência tende a se estabilizar ou mesmo a diminuir ligeiramente. Não foi possível identificar o motivo da diminuição de resistência acentuada apresentada pelos corpos de prova constituídos de 100% de fosfogesso para um tempo de cura de 84 dias.

FIGURA 4.9 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO ENSAIADAS SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA 4.10 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA, ENSAIADAS APÓS IMERSÃO EM ÁGUA

As Figuras 4.11 e 4.12 baseiam-se nos mesmos valores das Figuras 4.9 e 4.10, apresentadas, neste caso, de maneira diversa, ou seja, valores da resistência à compressão simples em função do teor de fosfogesso.

FIGURA 4.11 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO, ENSAIADAS SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA 4.12 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS FOSFOGESSO-SOLO EM FUNÇÃO DO TEOR DE FOSFOGESSO, ENSAIADAS APÓS IMERSÃO EM ÁGUA

4.3.2.2 Resistência em Função do Desvio da Umidade Ótima

As Figuras de 4.13 a 4.22 mostram a relação entre a resistência à compressão simples de corpos de prova moldados com uma umidade de 2%, acima e abaixo da umidade ótima, e a resistência de corpos de provas moldados na umidade ótima. Esta relação está expressa em porcentagem; porcentagens abaixo e acima de 100% indicam resistências inferiores e superiores, respectivamente, às obtidas para a umidade ótima.

FIGURA 4.13 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS

FIGURA 4.14 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS

FIGURA 4.15 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UNIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS

FIGURA 4.16 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UNIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS

FIGURA 4.17 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UNIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS

FIGURA 4.18 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UNIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS

FIGURA 4.19 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UNIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS

FIGURA 4.20 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UNIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS

FIGURA 4.21 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS

FIGURA 4.22 - RELAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO, EM FUNÇÃO DO DESVIO DA UMIDADE ÓTIMA ($\pm 2\%$) E TEMPO DE CURA, EM CONDIÇÕES IMERSAS

Quanto à influência da variação de umidade de compactação nos valores da resistência, apesar de se ter constatado, na maioria dos ensaios, ser esta influência significativa, não foi possível estabelecer uma tendência única que traduzisse o comportamento do universo dos resultados. Assim sendo, pode-se notar que nos desvios de umidade com relação à umidade ótima, sejam estes positivos ou negativos, ora conduziam a resistências maiores e ora a resistências menores que às observadas para a umidade ótima.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Introdução

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de fosfogesso a um solo tropical de comportamento laterítico tendo em vista o comportamento da mistura resultante, depois de compactada, em termos de resistência a compressão simples.

Todas as conclusões estão vinculadas ao universo em estudo e considerando-se os resultados obtidos, pode-se estabelecer as conclusões e sugestões seguintes.

5.2 Principais Conclusões

- misturas compactadas compostas de fosfogesso di-hidratado (D-H) e solo apresentaram resistências elevadas quando submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples sem prévia imersão em água, experimentando, para esta condição de ensaio, ganhos de resistência consideráveis à medida que o teor de fosfogesso D-H aumentava na mistura. No entanto, quando os corpos de prova compostos com fosfogesso D-H foram submetidos ao ensaio de compressão simples após prévia imersão em água, eles entraram em colapso, apresentando características de material efervescente.
- misturas compactadas, compostas de fosfogesso di-hidratado e solo, nas quais adicionou-se, separadamente, pequenas quantidades de cal, cimento e

calcáreo, respectivamente, 2%, 3% e 5%, também entraram em colapso após imersos em água.

- o aquecimento do fosfogesso di-hidratado a uma temperatura de 130 °C, durante 24 horas, o conduz para a condição anidra.
 - o fosfogesso desidratado ou anidro recupera as características de fosfogesso di-hidratado quando é umedecido e deixado em repouso durante 24 horas.
 - misturas compactadas compostas de fosfogesso anidro e solo conservam sua estabilidade frente a sua imersão em água.
-
- a compactação de misturas compostas de fosfogesso anidro e solo deve ser executada sem reutilização do material, caso contrario, não é possível estabelecer uma curva de compactação típica.
 - a adição de quantidades crescentes de fosfogesso anidro ao solo conduz a uma diminuição da massa específica seca máxima. Quanto à umidade ótima, observa-se uma tendência decrescente até 60%, que se inverte para teores de fosfogesso maiores.
 - a adição de quantidades crescentes de fosfogesso anidro ao solo conduz a um ganho significativo de resistência.
 - a imersão em água provoca um decréscimo na resistência da mistura de fosfogesso anidro e solo, apesar de não levar à sua instabilização.
 - o tempo de cura após a compactação tem efeito no ganho de resistência, sendo que a resistência cresce de forma significativa até 28 dias, mas tende a se estabilizar ou mesmo a diminuir após este período.

- não foi possível estabelecer uma tendência única que traduzisse o comportamento do universo dos resultados no tocante à influência da umidade de compactação na resistência.

5.3 Sugestões para Futuros Trabalhos

- utilizar outros ensaios, além do ensaios de resistência à compressão simples, como o Ensaio de Índice de Suporte de Califórnia (CBR) e ensaios dinâmicos com determinação do resiliência, para se avaliar o desempenho de misturas compostas com fosfogesso.
- avaliar a influência da adição do fosfogesso ao solo a partir de parâmetros de deformabilidade e não apenas de parâmetros de resistência.
- estender o período de análise do comportamento da mistura compactada para tempos de cura maiores que 84 dias.
- avaliar o comportamento de misturas compostas com fosfogesso di-hidratada e agentes químicos estabilizantes, por exemplo, utilizar cimento em teores maiores que o utilizado nesta pesquisa.
- realizar ensaios de microscopia para se entender aspectos do comportamento da mistura não interpretáveis a nível macroscópico.

Referências Bibliográficas

- AGASI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. (1990). Slope, aspect, and phosphogypsum effects on runoff and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, v.54, n.4, p.1102-1106, jul.
- ANDRIEX, P.; BIVERT, B.; DRON, R.; (1978) Utilisation du Phosphogypse en assises de chaussée. *Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, Numéro Spécial VII*, p.54-68, nov.
- BARBOSA, D. A. (1980). Produção de ácido fosfórico - Mecanismo e discussão vis-à-vis sua produção a partir de rochas ígneas brasileiras. *Tecnologia de Fertilizantes Fosfatados. Centro de estudos de fertilizantes Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. v.9, p.31-52.*
- BOSCOV, M.E.G. (1990). Estudo comparativo do comportamento de um solo saprolítico e de um solo laterítico estabilizados com cal. *Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*
- BRUNO, M. (1980). Caracterização básica e tecnológica de rochas fosfatadas. *Tecnologia de Fertilizantes Fosfatados. Centro de estudos de fertilizantes Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. v.9, p.53-73.*
- CHANG, W. F.; CHIN D. A.; HO R. (1990). Phosphogypsum for secondary road construction. *Phosphate Research Institute. University of Miami, Bartow, Flórida.*
- CHANG, W. F.; MANTELL M. I. (1990). Engineering properties and construction applications of phosphogypsum. *Phosphate Research Institute. University of Miami, Coral Gables, Flórida.*
- CHANG, Wen F. (1989). A demonstration projet. Roller compacted concrete utilizing phosphogypsum. *Final Report. Phosphate Research Institute. University of Miami, Bartow, Flórida.*
- COLOMBEL, J. H.; ANDRIEX, P.; BIVERT, B.; DRON, R.; (1978) Utilisation du Phosphogypse en assises de chaussée. *Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, Numéro Spécial VII, p.54-68, nov.*
- DAVID, H. T.; DAVIDSON, D. T.; O'FLAHERTY, C. A. (1961). Detecting outliers in soil-additive strenght tests. *Materials Research and Standards, Philadelphia, 1961. p.947-950.*
- FIGUEROA, J. L.; ZHOU, L.; CHANG, W. F. (1987). Use of phosphate minig waste in secondary road construction. *Transportation Research Record 1106, p.59-64.*

GADALLA, A. M.; SAYLAK, D; LINDNER A. L. (1990). Comparision of streghth development in wate industrial gypsum produced by the hemihydrate and dihydrate processes. *Journal of the American Ceramic Society*. v.73, p.2255-2260.

GHAFOORI,N.; CHANG, W. F. (1993). Investigation of phosphate mining waste for construction materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v.5, p.249-264, mai.

GREGORY, C. A.; SAYLAK, D; LEDBETTER, B. (1984). The use of by-product phosphogypsum for road bases and subbases. *Transportation Research Record* 998, p.47-51.

MACCARINI, M. (1991). Propriedades física, química e mecânica do fosfogesso da indústria carboquímica catarinense. In: *Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos - REGeo'91*. Rio de Janeiro, p.147-157.

MANGIN, S. (1978). Generalites. Le Phosphogypse, Utilisation d'un Sous-Produit Industriel en Technique Routiere. *Laboratories des Ponts et Chaussées, Paris, Numéro Spécial VII*, p.7-13, nov.

NANNI, A.; CHANG, W. F.; (1989). Phosphogypsum-based roller compacted concrete. *Concrete International: Design and Construction*, v.11, n.11, p.48-53, nov.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: *Simpósio Brasileiro sobre Solos Tropicais em Engenharia*, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Rio de Janeiro, p.30-41.

OGN, S.; METCALF, J. B.; SEALS, R. K.; TAHA, R. (1993). Unconfined compressive strength of various cement-stabilized phosphogypsum mixes. *Transportation Research Record* 1424, p.20-24.

OLMES, H.; ERDEM, E. (1989). The effects of phosphogypsum on the setting and mechanical properties of portland cement and trass cement. *Cement and Concrete Research*. v.19, p.377-384.

PINTO, C. S. (1964). Estabilização dos solos com aditivos químicos diversos. *IPR-Sudene*, Salvador, p. 1-22.

PRESSINOTTI, A. F. (1982). Aproveitamento do Gesso Natural e Gesso Residual da Produção de Ácido Fosfórico. *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT*.

PROGEO; (1994). Estudo técnico realizado nas áreas de estocagem, sob emcomenda da Fosfertil.

RE, M. I. (1989). Fosfogesso para seu aproveitamento. Centro de estudos de fertilizantes. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.

SCHAEFFNER, M. (1978). Premiers résultats relatifs aux conditions de stockage et d'utilisation du phosphogypse dans les remblais routiers. Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, Numéro Spécial VII, p.7-13, nov.

SCHRÖEDTER, K. (1991). Monophosforic acid. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, v.A19.

SILVA JR., A. F. (1980). Rochas fosfáticas brasileiras. Tecnología de Fertilizantes Fosfatados. Centro de estudos de fertilizantes Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. v.9, p.31-52.

SINGH, M.; GARD, M.; REHSI, S. S. (1989). Durability of phosphogypsum based water-resistant anhydrite binder. Cement and Concrete Research. v.20, p.271-276.

TAHA, R.; SEALS, R. (1991). Phosphogypsum Literature Review. Report No. 1-90-4, E.E.U.U., mar.

TAHA, R.; SEALS, R. (1992). Engineering properties of phosphogypsum-based slag aggregate. Transportation Research Record 1345, p.106-112.

TAHA, R.; SEALS, R.; TITTLEBAUM, M.; THORNSBERRY, W.; HOUSTON, J. (1992). Use of by-product phosphogypsum in road construction. Transportation Research Record 1345, p.28-35.

TRICHES, G.; MACCARINI, M. (1988). Misturas fosfogesso/cinza para construção rodoviária - Estudos preliminares. In: 23 Reunião anual de pavimentação - ABPv. Florianópolis-SC, p.311-328.

USMEN, M. A.; MOULTON, L. K. (1984). Construction and performance of experimental base course test sections built with waste calcium sulfate, lime, and fly ash. Transportation Research Record 998, p.52-62.

VILLAS BOAS, R. (1981). Perspectivas tecnológicas no aproveitamento do fosfogesso. II Encontro Nacional de Rocha Fosfática. Brasília, p.123-133, apr.

WIRSCHING, F.; GEBRÜDER, K. (1985). Calcium sulfate. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, v.A4.

ANEXO A

CURVAS DE COMPACTAÇÃO DE MISTURAS DE FOSFOGESSO ANIDRO E SOLO COMPACTADAS NA ENERGIA DO PROCTOR NORMAL

Nas Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11, A.12, A.13, A.14, A.15, A.16, A.17, A.18, A.19 e A.20 estão apresentadas as diversas curvas de compactação das misturas de fosfogesso anidro e solo. No gráfico superior de cada figura estão plotados os 30 pontos provenientes das duas ternas de corpos de prova analisada em condições imersas e não imersas. Já na parte inferior da figura estão apresentados os pontos correspondentes à média aritmética de cada par ordenado. A partir deste gráfico, por processo de interpolação gráfica é obtido o valor da resistência à compressão simples, tal como mostrado na Figura 3.11 da Secção 3.3.2.5.

A.1 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 3 DIAS.

A.2 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 7 DIAS.

A.3 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 28 DIAS.

A.4 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 20% DE FOSFOGESSO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 84 DIAS.

A.5 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 3 DIAS.

A.6 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 7 DIAS.

A.7 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 28 DIAS.

A.8 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 40% DE FOSFOGESSO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 84 DIAS.

A.9 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 3 DIAS.

A.10 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 7 DIAS.

A.11 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 28 DIAS.

A.12 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 60% DE FOSFOGESSO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 84 DIAS.

A.13 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 3 DIAS.

A.14 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 7 DIAS.

A.15 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 28 DIAS.

A.16 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 80% DE FOSFOGESSO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 84 DIAS.

A.17 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 3 DIAS.

A.18 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 7 DIAS.

A.19 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 28 DIAS.

A.20 - PONTOS DA CURVA DE COMPACTAÇÃO (ACIMA) E CURVA DE COMPACTAÇÃO DE VALORES MÉDIOS (ABAIXO). MISTURA CORRESPONDENTE A 100% DE FOSFOGESSO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA DE 84 DIAS.

ANEXO B

VALORES OBTIDOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS E NÃO IMERSAS, COMPACTADAS NA ENERGIA DO PROCTOR NORMAL

TABELA B.1 VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA										
ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (g/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
1	s	20	w	22,98	c 3	1,498		1.556,00		
2	s	20	w	22,98	c 3	1,499	1,500	1.478,00	1.546,33	
3	s	20	w	22,98	c 3	1,503		1.605,00		
1	s	20	w	24,48	c 3	1,552		1.232,00		
2	s	20	w	24,48	c 3	1,558	1,554	1.213,00	1.191,33	
3	s	20	w	24,48	c 3	1,551		1.129,00		
1	s	20	w	25,96	c 3	1,609		908,00		
2	s	20	w	25,96	c 3	1,608	1,609	785,00	839,00	
3	s	20	w	25,96	c 3	1,610		824,00		
1	s	20	w	27,45	c 3	1,572		880,00		
2	s	20	w	27,45	c 3	1,579	1,574	779,00	787,67	
3	s	20	w	27,45	c 3	1,572		704,00		
1	s	20	w	28,97	c 3	1,532		712,00		
2	s	20	w	28,97	c 3	1,535	1,535	682,00	683,33	
3	s	20	w	28,97	c 3	1,537		656,00		
1	s	40	w	23,00	c 3	1,493		2.631,00		
2	s	40	w	23,00	c 3	1,500	1,496	2.850,00	2.780,00	
3	s	40	w	23,00	c 3	1,494		2.859,00		
1	s	40	w	24,46	c 3	1,531		1.427,00		
2	s	40	w	24,46	c 3	1,532	1,533	1.364,00	1.360,33	
3	s	40	w	24,46	c 3	1,535		1.290,00		
1	s	40	w	25,98	c 3	1,543		1.350,00		
2	s	40	w	25,98	c 3	1,545	1,543	1.301,00	1.289,00	
3	s	40	w	25,98	c 3	1,542		1.216,00		
1	s	40	w	27,49	c 3	1,528		1.505,00		
2	s	40	w	27,49	c 3	1,531	1,529	1.295,00	1.326,67	
3	s	40	w	27,49	c 3	1,528		1.180,00		
1	s	40	w	28,99	c 3	1,502		1.335,00		
2	s	40	w	28,99	c 3	1,505	1,503	1.323,00	1.235,00	
3	s	40	w	28,99	c 3	1,503		1.047,00		
1	s	60	w	21,45	c 3	1,389		3.596,00		
2	s	60	w	21,45	c 3	1,385	1,386	3.297,00	3.380,67	
3	s	60	w	21,45	c 3	1,384		3.249,00		
1	s	60	w	22,99	c 3	1,438		827,00		
2	s	60	w	22,99	c 3	1,435	1,435	821,00	816,00	
3	s	60	w	22,99	c 3	1,433		800,00		
1	s	60	w	24,48	c 3	1,468		1.328,00		
2	s	60	w	24,48	c 3	1,472	1,470	1.512,00	1.600,33	
3	s	60	w	24,48	c 3	1,470		1.961,00		
1	s	60	w	26,16	c 3	1,460		2.077,00		
2	s	60	w	26,16	c 3	1,452	1,454	1.845,00	1.907,00	
3	s	60	w	26,16	c 3	1,451		1.799,00		
1	s	60	w	27,46	c 3	1,431		1.011,00		
2	s	60	w	27,46	c 3	1,434	1,432	772,00	850,33	
3	s	60	w	27,46	c 3	1,431		768,00		
1	s	80	w	22,96	c 3	1,355		4.297,00		
2	s	80	w	22,96	c 3	1,354	1,354	3.826,00	4.087,67	
3	s	80	w	22,96	c 3	1,354		4.140,00		
1	s	80	w	24,48	c 3	1,372		5.163,00		

TABELA B.1 VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA										
ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (g/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
2	s	80	w	24,48	c	3	1,371	1,371	3.945,00	4.160,33
3	s	80	w	24,48	c	3	1,371		3.373,00	
1	s	80	w	25,96	c	3	1,385		3.044,00	
2	s	80	w	25,96	c	3	1,388	1,386	2.764,00	2.699,67
3	s	80	w	25,96	c	3	1,385		2.291,00	
1	s	80	w	27,48	c	3	1,368		4.615,00	
2	s	80	w	27,48	c	3	1,363	1,364	3.080,00	3.704,33
3	s	80	w	27,48	c	3	1,362		3.418,00	
1	s	80	w	28,98	c	3	1,333		3.476,00	
2	s	80	w	28,98	c	3	1,335	1,333	2.954,00	2.903,00
3	s	80	w	28,98	c	3	1,332		2.279,00	
1	s	100	w	20,96	c	3	1,275		6.661,00	
2	s	100	w	20,96	c	3	1,277	1,276	6.888,00	6.718,67
3	s	100	w	20,96	c	3	1,275		6.607,00	
1	s	100	w	23,97	c	3	1,321		7.153,00	
2	s	100	w	23,97	c	3	1,320	1,321	6.389,00	7.091,67
3	s	100	w	23,97	c	3	1,323		7.733,00	
1	s	100	w	26,98	c	3	1,348		6.850,00	
2	s	100	w	26,98	c	3	1,348	1,347	6.779,00	6.431,33
3	s	100	w	26,98	c	3	1,345		5.665,00	
1	s	100	w	29,96	c	3	1,339		7.493,00	
2	s	100	w	29,96	c	3	1,340	1,341	4.945,00	5.102,33
3	s	100	w	29,96	c	3	1,345		2.869,00	4.945,00
1	s	100	w	32,99	c	3	1,322		6.488,00	
2	s	100	w	32,99	c	3	1,323	1,322	4.365,00	4.742,00
3	s	100	w	32,99	c	3	1,321		3.373,00	3.869,00
1	s	20	w	23,00	c	7	1,498		2.275,00	
2	s	20	w	23,00	c	7	1,500	1,499	2.480,00	2.505,67
3	s	20	w	23,00	c	7	1,500		2.762,00	
1	s	20	w	24,50	c	7	1,560		1.697,00	
2	s	20	w	24,50	c	7	1,560	1,559	1.698,00	1.926,67
3	s	20	w	24,50	c	7	1,558		2.385,00	
1	s	20	w	26,01	c	7	1,610		1.103,00	
2	s	20	w	26,01	c	7	1,609	1,611	1.017,00	1.047,33
3	s	20	w	26,01	c	7	1,613		1.022,00	
1	s	20	w	27,49	c	7	1,576		1.071,00	
2	s	20	w	27,49	c	7	1,576	1,576	1.154,00	1.127,00
3	s	20	w	27,49	c	7	1,575		1.156,00	
1	s	20	w	28,99	c	7	1,536		783,00	
2	s	20	w	28,99	c	7	1,536	1,536	826,00	852,33
3	s	20	w	28,99	c	7	1,535		948,00	
1	s	40	w	22,49	c	7	1,500		3.069,00	
2	s	40	w	22,49	c	7	1,501	1,499	3.522,00	3.357,33
3	s	40	w	22,49	c	7	1,495		3.481,00	
1	s	40	w	24,49	c	7	1,530		2.157,00	
2	s	40	w	24,49	c	7	1,532	1,532	917,00	1.840,33
3	s	40	w	24,49	c	7	1,533		2.447,00	2.302,00
1	s	40	w	25,99	c	7	1,543		1.631,00	
2	s	40	w	25,99	c	7	1,545	1,545	1.312,00	1.473,00
3	s	40	w	25,99	c	7	1,546		1.476,00	
1	s	40	w	27,49	c	7	1,530		1.327,00	
2	s	40	w	27,49	c	7	1,531	1,531	1.535,00	1.521,67
3	s	40	w	27,49	c	7	1,531		1.703,00	

TABELA B.1 VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA										
ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (g/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
1	s	40	w	29,00	c	7	1,502		1.652,00	
2	s	40	w	29,00	c	7	1,504	1,503	1.531,00	1.517,33
3	s	40	w	29,00	c	7	1,503		1.369,00	
1	s	60	w	21,49	c	7	1,390		3.357,00	3.314,67
2	s	60	w	21,49	c	7	1,388	1,389	3.192,00	
3	s	60	w	21,49	c	7	1,390		3.395,00	
1	s	60	w	22,99	c	7	1,436		2.943,00	
2	s	60	w	22,99	c	7	1,433	1,435	2.942,00	3.065,33
3	s	60	w	22,99	c	7	1,435		3.311,00	
1	s	60	w	24,50	c	7	1,470		2.680,00	
2	s	60	w	24,50	c	7	1,471	1,471	2.727,00	2.740,33
3	s	60	w	24,50	c	7	1,471		2.814,00	
1	s	60	w	26,03	c	7	1,455		2.492,00	
2	s	60	w	26,03	c	7	1,451	1,454	2.200,00	2.242,33
3	s	60	w	26,03	c	7	1,456		2.035,00	
1	s	60	w	27,50	c	7	1,430		2.115,00	
2	s	60	w	27,50	c	7	1,431	1,431	2.325,00	2.269,33
3	s	60	w	27,50	c	7	1,431		2.368,00	
1	s	80	w	23,01	c	7	1,355		6.716,00	
2	s	80	w	23,01	c	7	1,352	1,354	6.233,00	6.210,00
3	s	80	w	23,01	c	7	1,355		5.681,00	
1	s	80	w	24,50	c	7	1,370		6.079,00	
2	s	80	w	24,50	c	7	1,371	1,371	5.060,00	5.372,67
3	s	80	w	24,50	c	7	1,371		4.979,00	
1	s	80	w	26,00	c	7	1,385		4.885,00	
2	s	80	w	26,00	c	7	1,385	1,385	4.190,00	4.537,50
3	s	80	w	26,00	c	7	1,384			
1	s	80	w	27,50	c	7	1,362		5.424,00	
2	s	80	w	27,50	c	7	1,361	1,362	4.478,00	4.985,00
3	s	80	w	27,50	c	7	1,362		5.053,00	
1	s	80	w	28,96	c	7	1,336		5.706,00	
2	s	80	w	28,96	c	7	1,336	1,335	4.888,00	4.940,33
3	s	80	w	28,96	c	7	1,334		4.227,00	
1	s	100	w	21,06	c	7	1,272		4.713,00	
2	s	100	w	21,06	c	7	1,276	1,274	3.689,00	4.263,67
3	s	100	w	21,06	c	7	1,275		4.389,00	
1	s	100	w	24,09	c	7	1,322		3.398,00	
2	s	100	w	24,09	c	7	1,319	1,321	3.102,00	3.396,67
3	s	100	w	24,09	c	7	1,323		3.690,00	
1	s	100	w	27,10	c	7	1,352		7.871,00	
2	s	100	w	27,10	c	7	1,352	1,351	6.180,00	6.804,33
3	s	100	w	27,10	c	7	1,350		6.362,00	
1	s	100	w	30,13	c	7	1,333		4.715,00	
2	s	100	w	30,13	c	7	1,337	1,335	2.906,00	3.507,67
3	s	100	w	30,13	c	7	1,336		2.902,00	
1	s	100	w	33,10	c	7	1,319		4.520,00	
2	s	100	w	33,10	c	7	1,321	1,320	3.898,00	3.705,33
3	s	100	w	33,10	c	7	1,321		2.698,00	
1	s	20	w	22,92	c	28	1,513		1.744,00	
2	s	20	w	22,92	c	28	1,500	1,503	1.689,00	1.677,00
3	s	20	w	22,92	c	28	1,495		1.598,00	
1	s	20	w	24,42	c	28	1,554		1.190,00	

TABELA B.1 VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA										
ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (g/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
2	s	20	w	24,42	c	28	1,547	1,551	1.239,00	1.177,00
3	s	20	w	24,42	c	28	1,553		1.102,00	
1	s	20	w	26,10	c	28	1,603		1.229,00	
2	s	20	w	26,10	c	28	1,608	1,607	979,00	1.140,00
3	s	20	w	26,10	c	28	1,610		1.212,00	
1	s	20	w	27,57	c	28	1,552		662,00	
2	s	20	w	27,57	c	28	1,543	1,546	655,00	637,67
3	s	20	w	27,57	c	28	1,542		596,00	
1	s	20	w	28,92	c	28	1,544		576,00	
2	s	20	w	28,92	c	28	1,541	1,539	556,00	544,33
3	s	20	w	28,92	c	28	1,533		501,00	
1	s	40	w	23,20	c	28	1,492		1.846,00	
2	s	40	w	23,20	c	28	1,496	1,492	1.956,00	1.871,00
3	s	40	w	23,20	c	28	1,489		1.811,00	
1	s	40	w	24,56	c	28	1,531		1.487,00	
2	s	40	w	24,56	c	28	1,529	1,529	1.521,00	1.518,00
3	s	40	w	24,56	c	28	1,527		1.546,00	
1	s	40	w	26,08	c	28	1,538		1.736,00	
2	s	40	w	26,08	c	28	1,539	1,532	1.822,00	1.832,00
3	s	40	w	26,08	c	28	1,518		1.938,00	
1	s	40	w	27,48	c	28	1,526		1.087,00	
2	s	40	w	27,48	c	28	1,532	1,526	1.026,00	1.011,67
3	s	40	w	27,48	c	28	1,521		922,00	
1	s	40	w	29,09	c	28	1,504		930,00	
2	s	40	w	29,09	c	28	1,503	1,502	783,00	831,00
3	s	40	w	29,09	c	28	1,500		780,00	
1	s	60	w	21,43	c	28	1,389		3.011,00	
2	s	60	w	21,43	c	28	1,910	1,563	2.932,00	3.045,67
3	s	60	w	21,43	c	28	1,390		3.194,00	
1	s	60	w	23,12	c	28	1,433		2.150,00	
2	s	60	w	23,12	c	28	1,431	1,432	3.194,00	2.379,33
3	s	60	w	23,12	c	28	1,432		1.794,00	
1	s	60	w	24,53	c	28	1,466		2.471,00	
2	s	60	w	24,53	c	28	1,464	1,462	2.633,00	2.646,33
3	s	60	w	24,53	c	28	1,456		2.835,00	
1	s	60	w	26,15	c	28	1,449		1.527,00	
2	s	60	w	26,15	c	28	1,447	1,448	1.392,00	1.406,33
3	s	60	w	26,15	c	28	1,448		1.300,00	
1	s	60	w	27,46	c	28	1,432		1.031,00	
2	s	60	w	27,46	c	28	1,432	1,431	951,00	957,33
3	s	60	w	27,46	c	28	1,430		890,00	
1	s	80	w	23,06	c	28	1,363		1.993,00	
2	s	80	w	23,06	c	28	1,363	1,358	1.940,00	2.005,33
3	s	80	w	23,06	c	28	1,349		2.083,00	
1	s	80	w	24,50	c	28	1,368		1.875,00	
2	s	80	w	24,50	c	28	1,368	1,368	1.960,00	1.953,00
3	s	80	w	24,50	c	28	1,369		2.024,00	
1	s	80	w	26,21	c	28	1,382		6.049,00	
2	s	80	w	26,21	c	28	1,383	1,379	5.671,00	5.860,00
3	s	80	w	26,21	c	28	1,372			
1	s	80	w	27,55	c	28	1,362		2.429,00	
2	s	80	w	27,55	c	28	1,361	1,361	2.310,00	2.219,67
3	s	80	w	27,55	c	28	1,360		1.920,00	

TABELA B.1 VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA										
ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (g/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
1	s	80	w	29,18	c	28	1,333	1,944,00		
2	s	80	w	29,18	c	28	1,332	1,856,00	1,815,67	
3	s	80	w	29,18	c	28	1,346	1,647,00		
1	s	100	w	21,08	c	28	1,271	7,356,00		
2	s	100	w	21,08	c	28	1,270	5,990,00	6,480,33	
3	s	100	w	21,08	c	28	1,271	6,095,00		
1	s	100	w	24,07	c	28	1,322	2,742,00		
2	s	100	w	24,07	c	28	1,320	3,073,00	2,889,33	
3	s	100	w	24,07	c	28	1,321	2,853,00		
1	s	100	w	27,07	c	28	1,350	9,429,00		
2	s	100	w	27,07	c	28	1,351	10,201,00	9,783,00	
3	s	100	w	27,07	c	28	1,350	9,719,00		
1	s	100	w	30,05	c	28	1,338	4,704,00		
2	s	100	w	30,05	c	28	1,339	4,213,00	4,167,67	
3	s	100	w	30,05	c	28	1,336	3,586,00		
1	s	100	w	33,10	c	28	1,320	3,790,00		
2	s	100	w	33,10	c	28	1,322	2,980,00	3,429,67	
3	s	100	w	33,10	c	28	1,320	3,519,00		
1	s	20	w	22,95	c	84	1,492	1,700,00		
2	s	20	w	22,95	c	84	1,491	1,582,00	1,583,00	
3	s	20	w	22,95	c	84	1,494	1,467,00		
1	s	20	w	24,46	c	84	1,561	1,061,00		
2	s	20	w	24,46	c	84	1,565	1,083,00	1,067,33	
3	s	20	w	24,46	c	84	1,555	1,058,00		
1	s	20	w	25,90	c	84	1,605	952,00		
2	s	20	w	25,90	c	84	1,607	956,00	917,33	
3	s	20	w	25,90	c	84	1,612	844,00		
1	s	20	w	27,49	c	84	1,579	735,00		
2	s	20	w	27,49	c	84	1,581	609,00	659,67	
3	s	20	w	27,49	c	84	1,574	635,00		
1	s	20	w	29,30	c	84	1,534	662,00		
2	s	20	w	29,30	c	84	1,533	528,00	578,67	
3	s	20	w	29,30	c	84	1,521	546,00		
1	s	40	w	23,00	c	84	1,498	2,334,00		
2	s	40	w	23,00	c	84	1,497	2,339,00	2,294,67	
3	s	40	w	23,00	c	84	1,497	2,211,00		
1	s	40	w	24,57	c	84	1,519	1,695,00		
2	s	40	w	24,57	c	84	1,519	1,604,00	1,636,33	
3	s	40	w	24,57	c	84	1,519	1,610,00		
1	s	40	w	26,12	c	84	1,529	1,330,00		
2	s	40	w	26,12	c	84	1,532	1,351,00	1,329,33	
3	s	40	w	26,12	c	84	1,530	1,307,00		
1	s	40	w	27,56	c	84	1,520	1,169,00		
2	s	40	w	27,56	c	84	1,526	1,122,00	1,127,33	
3	s	40	w	27,56	c	84	1,512	1,091,00		
1	s	40	w	29,13	c	84	1,504	955,00		
2	s	40	w	29,13	c	84	1,490	839,00	875,33	
3	s	40	w	29,13	c	84	1,484	832,00		
1	s	60	w	21,48	c	84	1,389	4,019,00		
2	s	60	w	21,48	c	84	1,390	4,588,00	4,219,00	
3	s	60	w	21,48	c	84	1,387	4,050,00		
1	s	60	w	23,06	c	84	1,442	2,688,00		

TABELA B.1 VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA										
ANALISADOS EM CONDIÇÕES NÃO IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (g/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
2	s	60	w	23,06	c	84	1,436	1,437	2.910,00	2.867,00
3	s	60	w	23,06	c	84	1,432		3.003,00	
1	s	60	w	24,57	c	84	1,462		2.199,00	
2	s	60	w	24,57	c	84	1,462	1,461	2.107,00	2.157,00
3	s	60	w	24,57	c	84	1,460		2.165,00	
1	s	60	w	26,09	c	84	1,455		1.621,00	
2	s	60	w	26,09	c	84	1,460	1,459	1.423,00	1.473,00
3	s	60	w	26,09	c	84	1,461		1.375,00	
1	s	60	w	27,52	c	84	1,435		1.374,00	
2	s	60	w	27,52	c	84	1,432	1,433	1.282,00	1.237,33
3	s	60	w	27,52	c	84	1,432		1.056,00	
1	s	80	w	23,22	c	84	1,354		1.295,00	
2	s	80	w	23,22	c	84	1,352	1,353	1.177,00	1.180,33
3	s	80	w	23,22	c	84	1,352		1.069,00	
1	s	80	w	24,58	c	84	1,372		1.570,00	
2	s	80	w	24,58	c	84	1,371	1,371	1.396,00	1.407,33
3	s	80	w	24,58	c	84	1,370		1.256,00	
1	s	80	w	26,15	c	84	1,376		5.896,00	
2	s	80	w	26,15	c	84	1,375	1,377	6.118,00	6.080,33
3	s	80	w	26,15	c	84	1,381		6.227,00	
1	s	80	w	27,52	c	84	1,366		1.901,00	
2	s	80	w	27,52	c	84	1,365	1,364	1.331,00	1.463,67
3	s	80	w	27,52	c	84	1,362		1.159,00	
1	s	80	w	29,04	c	84	1,335		1.474,00	
2	s	80	w	29,04	c	84	1,332	1,333	1.083,00	1.223,67
3	s	80	w	29,04	c	84	1,333		1.114,00	
1	s	100	w	21,01	c	84	1,267		7.049,00	
2	s	100	w	21,01	c	84	1,266	1,267	5.381,00	6.528,00
3	s	100	w	21,01	c	84	1,267		7.154,00	
1	s	100	w	24,09	c	84	1,322		6.110,00	
2	s	100	w	24,09	c	84	1,321	1,321	5.505,00	5.143,67
3	s	100	w	24,09	c	84	1,321		3.816,00	
1	s	100	w	27,11	c	84	1,350		6.034,00	
2	s	100	w	27,11	c	84	1,353	1,350	5.263,00	5.175,33
3	s	100	w	27,11	c	84	1,346		4.229,00	
1	s	100	w	30,10	c	84	1,339		5.043,00	
2	s	100	w	30,10	c	84	1,339	1,338	4.260,00	4.359,67
3	s	100	w	30,10	c	84	1,335		3.776,00	
1	s	100	w	33,05	c	84	1,322		6.008,00	
2	s	100	w	33,05	c	84	1,320	1,320	5.004,00	4.971,00
3	s	100	w	33,05	c	84	1,319		3.901,00	

TABELA B.2

VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (gr/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (gr/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
1	u	20	w	22,98	c 3	1,502		293,00		
2	u	20	w	22,98	c 3	1,496	1,500	303,00	294,67	
3	u	20	w	22,98	c 3	1,502		288,00		
1	u	20	w	24,48	c 3	1,555		409,00		
2	u	20	w	24,48	c 3	1,555	1,553	404,00	384,00	
3	u	20	w	24,48	c 3	1,550		339,00		
1	u	20	w	25,96	c 3	1,608		413,00		
2	u	20	w	25,96	c 3	1,609	1,609	495,00	440,67	
3	u	20	w	25,96	c 3	1,610		414,00		
1	u	20	w	27,45	c 3	1,576		487,00		
2	u	20	w	27,45	c 3	1,575	1,574	373,00	409,33	
3	u	20	w	27,45	c 3	1,571		368,00		
1	u	20	w	28,97	c 3	1,532		402,00		
2	u	20	w	28,97	c 3	1,536	1,535	411,00	395,00	
3	u	20	w	28,97	c 3	1,536		372,00		
1	u	40	w	23,00	c 3	1,496		814,00		
2	u	40	w	23,00	c 3	1,492	1,494	771,00	769,00	
3	u	40	w	23,00	c 3	1,495		722,00		
1	u	40	w	24,46	c 3	1,530		891,00		
2	u	40	w	24,46	c 3	1,532	1,531	660,00	733,67	
3	u	40	w	24,46	c 3	1,532		650,00		
1	u	40	w	25,98	c 3	1,544		642,00		
2	u	40	w	25,98	c 3	1,545	1,544	726,00	741,67	
3	u	40	w	25,98	c 3	1,542		857,00		
1	u	40	w	27,49	c 3	1,529		943,00		
2	u	40	w	27,49	c 3	1,529	1,528	845,00	853,33	
3	u	40	w	27,49	c 3	1,525		772,00		
1	u	40	w	28,99	c 3	1,501		848,00		
2	u	40	w	28,99	c 3	1,504	1,503	790,00	779,67	
3	u	40	w	28,99	c 3	1,504		701,00		
1	u	60	w	21,45	c 3	1,388		1.236,00		
2	u	60	w	21,45	c 3	1,382	1,385	1.268,00	1.256,33	
3	u	60	w	21,45	c 3	1,386		1.265,00		
1	u	60	w	22,99	c 3	1,436		558,00		
2	u	60	w	22,99	c 3	1,437	1,435	548,00	551,67	
3	u	60	w	22,99	c 3	1,432		549,00		
1	u	60	w	24,48	c 3	1,470		835,00		
2	u	60	w	24,48	c 3	1,466	1,469	734,00	762,67	
3	u	60	w	24,48	c 3	1,471		719,00		
1	u	60	w	26,16	c 3	1,456		1.804,00		
2	u	60	w	26,16	c 3	1,455	1,454	1.321,00	1.386,67	
3	u	60	w	26,16	c 3	1,451		1.035,00		
1	u	60	w	27,46	c 3	1,430		893,00		
2	u	60	w	27,46	c 3	1,432	1,431	604,00	657,00	539,00
3	u	60	w	27,46	c 3	1,432		474,00		
1	u	80	w	22,96	c 3	1,352		2.177,00		
2	u	80	w	22,96	c 3	1,355	1,354	2.098,00	1.908,00	
3	u	80	w	22,96	c 3	1,355		1.449,00		
1	u	80	w	24,48	c 3	1,371		2.597,00		
2	u	80	w	24,48	c 3	1,372	1,371	2.506,00	2.425,00	
3	u	80	w	24,48	c 3	1,370		2.172,00		
1	u	80	w	25,96	c 3	1,386		2.570,00		

TABELA B.2

VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (gr/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (gr/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
2	u	80	w	25,96	c 3	1,387	1,386	2.085,00	1.940,67	2.327,50
3	u	80	w	25,96	c 3	1,384		1.167,00		
1	u	80	w	27,48	c 3	1,362		3.015,00		
2	u	80	w	27,48	c 3	1,365	1,364	2.197,00	2.329,00	
3	u	80	w	27,48	c 3	1,364		1.775,00		
1	u	80	w	28,98	c 3	1,334		2.245,00		
2	u	80	w	28,98	c 3	1,335	1,334	2.228,00	1.977,00	
3	u	80	w	28,98	c 3	1,332		1.458,00		
1	u	100	w	20,96	c 3	1,276		5.457,00		
2	u	100	w	20,96	c 3	1,276	1,276	5.568,00	5.371,33	
3	u	100	w	20,96	c 3	1,275		5.089,00		
1	u	100	w	23,97	c 3	1,320		6.300,00		
2	u	100	w	23,97	c 3	1,321	1,321	6.377,00	6.338,50	
3	u	100	w	23,97	c 3	1,322				
1	u	100	w	26,98	c 3	1,346		2.809,00		
2	u	100	w	26,98	c 3	1,348	1,347	3.253,00	3.130,00	
3	u	100	w	26,98	c 3	1,348		3.328,00		
1	u	100	w	29,96	c 3	1,338		4.304,00		
2	u	100	w	29,96	c 3	1,340	1,340	4.424,00	4.054,33	
3	u	100	w	29,96	c 3	1,342		3.435,00		
1	u	100	w	32,99	c 3	1,323		5.440,00		
2	u	100	w	32,99	c 3	1,322	1,322	4.493,00	4.632,67	
3	u	100	w	32,99	c 3	1,320		3.965,00		
1	u	20	w	23,00	c 7	1,501		249,00		
2	u	20	w	23,00	c 7	1,499	1,500	332,00	332,00	
3	u	20	w	23,00	c 7	1,499		415,00		
1	u	20	w	24,50	c 7	1,559		374,00		
2	u	20	w	24,50	c 7	1,559	1,560	333,00	346,33	
3	u	20	w	24,50	c 7	1,561		332,00		
1	u	20	w	26,01	c 7	1,610		457,00		
2	u	20	w	26,01	c 7	1,609	1,610	456,00	442,33	
3	u	20	w	26,01	c 7	1,610		414,00		
1	u	20	w	27,49	c 7	1,577		623,00		
2	u	20	w	27,49	c 7	1,575	1,576	538,00	566,67	
3	u	20	w	27,49	c 7	1,576		539,00		
1	u	20	w	28,99	c 7	1,535		452,00		
2	u	20	w	28,99	c 7	1,535	1,536	539,00	524,00	
3	u	20	w	28,99	c 7	1,537		581,00		
1	u	40	w	22,49	c 7	1,497		1.081,00		
2	u	40	w	22,49	c 7	1,495	1,498	1.121,00	1.107,67	
3	u	40	w	22,49	c 7	1,501		1.121,00		
1	u	40	w	24,49	c 7	1,532		1.247,00		
2	u	40	w	24,49	c 7	1,531	1,533	1.288,00	1.302,67	
3	u	40	w	24,49	c 7	1,535		1.373,00		
1	u	40	w	25,99	c 7	1,548		703,00		
2	u	40	w	25,99	c 7	1,544	1,545	866,00	771,33	
3	u	40	w	25,99	c 7	1,544		745,00		
1	u	40	w	27,49	c 7	1,532		1.367,00		
2	u	40	w	27,49	c 7	1,530	1,531	1.411,00	1.395,67	
3	u	40	w	27,49	c 7	1,531		1.409,00		
1	u	40	w	29,00	c 7	1,505		1.530,00		
2	u	40	w	29,00	c 7	1,502	1,503	1.284,00	1.269,00	
3	u	40	w	29,00	c 7	1,502		993,00		

TABELA B.2

VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (gr/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (gr/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
1	u	60	w	21,49	c 7	1,390		1.994,00		
2	u	60	w	21,49	c 7	1,389	1,389	2.160,00	1.967,00	
3	u	60	w	21,49	c 7	1,389		1.747,00		
1	u	60	w	22,99	c 7	1,438		1.996,00		
2	u	60	w	22,99	c 7	1,434	1,436	2.203,00	2.037,00	
3	u	60	w	22,99	c 7	1,435		1.912,00		
1	u	60	w	24,50	c 7	1,472		1.763,00		
2	u	60	w	24,50	c 7	1,470	1,471		1.663,50	
3	u	60	w	24,50	c 7	1,471		1.564,00		
1	u	60	w	26,03	c 7	1,455		1.871,00		
2	u	60	w	26,03	c 7	1,452	1,455	2.452,00	2.300,33	
3	u	60	w	26,03	c 7	1,457		2.578,00		
1	u	60	w	27,50	c 7	1,432		1.328,00		
2	u	60	w	27,50	c 7	1,430	1,431	1.999,00	1.774,00	
3	u	60	w	27,50	c 7	1,430		1.995,00		
1	u	80	w	23,01	c 7	1,352		4.482,00		
2	u	80	w	23,01	c 7	1,355	1,353	4.277,00	4.478,33	
3	u	80	w	23,01	c 7	1,352		4.676,00		
1	u	80	w	24,50	c 7	1,372		3.946,00		
2	u	80	w	24,50	c 7	1,371	1,371	3.608,00	3.776,33	
3	u	80	w	24,50	c 7	1,370		3.775,00		
1	u	80	w	26,00	c 7	1,386		3.406,00		
2	u	80	w	26,00	c 7	1,384	1,385	3.669,00	3.537,50	
3	u	80	w	26,00	c 7	1,385				
1	u	80	w	27,50	c 7	1,361		5.071,00		
2	u	80	w	27,50	c 7	1,362	1,361	4.011,00	4.615,33	
3	u	80	w	27,50	c 7	1,361		4.764,00		
1	u	80	w	28,96	c 7	1,335		4.842,00		
2	u	80	w	28,96	c 7	1,337	1,336	4.847,00	4.750,33	
3	u	80	w	28,96	c 7	1,335		4.562,00		
1	u	100	w	21,06	c 7	1,275		3.777,00		
2	u	100	w	21,06	c 7	1,276+	1,275	1.867,00	3.043,33	3.631,50
3	u	100	w	21,06	c 7	1,274		3.486,00		
1	u	100	w	24,09	c 7	1,320		3.487,00		
2	u	100	w	24,09	c 7	1,321	1,322	3.897,00	3.541,00	
3	u	100	w	24,09	c 7	1,325		3.239,00		
1	u	100	w	27,10	c 7	1,351		5.168,00		
2	u	100	w	27,10	c 7	1,355	1,352	4.670,00	5.081,67	
3	u	100	w	27,10	c 7	1,351		5.407,00		
1	u	100	w	30,13	c 7	1,335		3.277,00		
2	u	100	w	30,13	c 7	1,338	1,336	3.155,00	3.044,00	
3	u	100	w	30,13	c 7	1,335		2.700,00		
1	u	100	w	33,10	c 7	1,320		4.259,00		
2	u	100	w	33,10	c 7	1,320	1,321	3.566,00	3.564,00	
3	u	100	w	33,10	c 7	1,322		2.867,00		
1	u	20	w	22,92	c 28	1,517		502,00		
2	u	20	w	22,92	c 28	1,525	1,521	497,00	495,33	
3	u	20	w	22,92	c 28	1,520		487,00		
1	u	20	w	24,42	c 28	1,572		509,00		
2	u	20	w	24,42	c 28	1,556	1,563	508,00	489,67	
3	u	20	w	24,42	c 28	1,561		452,00		
1	u	20	w	26,10	c 28	1,606		369,00		
2	u	20	w	26,10	c 28	1,611	1,609	416,00	385,67	
3	u	20	w	26,10	c 28	1,609		372,00		

TABELA B.2

VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (gr/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (gr/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
1	u	20	w	27,57	c 28	1,572		378,00		
2	u	20	w	27,57	c 28	1,581	1,574	449,00	409,00	
3	u	20	w	27,57	c 28	1,569		400,00		
1	u	20	w	28,92	c 28	1,540		348,00		
2	u	20	w	28,92	c 28	1,548	1,545	373,00	364,33	
3	u	20	w	28,92	c 28	1,547		372,00		
1	u	40	w	23,20	c 28	1,496		879,00		
2	u	40	w	23,20	c 28	1,495	1,497	812,00	838,00	
3	u	40	w	23,20	c 28	1,501		823,00		
1	u	40	w	24,56	c 28	1,537		1.065,00		
2	u	40	w	24,56	c 28	1,530	1,533	941,00	954,33	
3	u	40	w	24,56	c 28	1,532		857,00		
1	u	40	w	26,08	c 28	1,543		1.038,00		
2	u	40	w	26,08	c 28	1,542	1,541	980,00	969,67	
3	u	40	w	26,08	c 28	1,537		891,00		
1	u	40	w	27,48	c 28	1,532		842,00		
2	u	40	w	27,48	c 28	1,536	1,532	732,00	797,00	
3	u	40	w	27,48	c 28	1,528		817,00		
1	u	40	w	29,09	c 28	1,503		1.012,00		
2	u	40	w	29,09	c 28	1,498	1,501	731,00	777,00	
3	u	40	w	29,09	c 28	1,502		588,00		
1	u	60	w	21,43	c 28	1,388		1.887,00		
2	u	60	w	21,43	c 28	1,387	1,389	1.659,00	1.666,67	
3	u	60	w	21,43	c 28	1,392		1.454,00		
1	u	60	w	23,12	c 28	1,432		1.331,00		
2	u	60	w	23,12	c 28	1,438	1,436	1.381,00	1.320,33	
3	u	60	w	23,12	c 28	1,437		1.249,00		
1	u	60	w	24,53	c 28	1,472		2.108,00		
2	u	60	w	24,53	c 28	1,468	1,470	2.167,00	2.200,33	
3	u	60	w	24,53	c 28	1,470		2.326,00		
1	u	60	w	26,15	c 28	1,455		1.213,00		
2	u	60	w	26,15	c 28	1,453	1,453	1.070,00	1.113,67	
3	u	60	w	26,15	c 28	1,451		1.058,00		
1	u	60	w	27,46	c 28	1,432				
2	u	60	w	27,46	c 28	1,433	1,432	735,00	702,00	
3	u	60	w	27,46	c 28	1,432		669,00		
1	u	80	w	23,06	c 28	1,355		1.717,00		
2	u	80	w	23,06	c 28	1,356	1,359	1.436,00	1.468,00	
3	u	80	w	23,06	c 28	1,366		1.251,00		
1	u	80	w	24,50	c 28	1,371		2.071,00		
2	u	80	w	24,50	c 28	1,372	1,371	1.609,00	1.680,67	
3	u	80	w	24,50	c 28	1,370		1.362,00		
1	u	80	w	26,21	c 28	1,384		5.136,00		
2	u	80	w	26,21	c 28	1,382	1,383	5.311,00	5.223,50	
3	u	80	w	26,21	c 28	1,383				
1	u	80	w	27,55	c 28	1,360		2.590,00		
2	u	80	w	27,55	c 28	1,362	1,362	2.139,00	2.253,67	
3	u	80	w	27,55	c 28	1,363		2.032,00		
1	u	80	w	29,18	c 28	1,335		2.093,00		
2	u	80	w	29,18	c 28	1,334	1,334	1.949,00	1.936,67	
3	u	80	w	29,18	c 28	1,332		1.768,00		
1	u	100	w	21,08	c 28	1,275		5.653,00		
2	u	100	w	21,08	c 28	1,272	1,273	3.487,00	4.456,67	

TABELA B.2

VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (gr/cm³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (gr/cm³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
3	u	100	w	21,08	c 28	1,272		4.230,00		
1	u	100	w	24,07	c 28	1,320		3.689,00		
2	u	100	w	24,07	c 28	1,321	1,320	4.005,00	3.768,67	
3	u	100	w	24,07	c 28	1,320		3.612,00		
1	u	100	w	27,07	c 28	1,352		7.380,00		
2	u	100	w	27,07	c 28	1,351	1,352	7.642,00	8.325,33	
3	u	100	w	27,07	c 28	1,352		9.954,00		
1	u	100	w	30,05	c 28	1,337		4.026,00		
2	u	100	w	30,05	c 28	1,338	1,337	3.349,00	3.941,67	
3	u	100	w	30,05	c 28	1,336		4.450,00		
1	u	100	w	33,10	c 28	1,321		4.141,00		
2	u	100	w	33,10	c 28	1,322	1,321	4.295,00	4.255,67	
3	u	100	w	33,10	c 28	1,321		4.331,00		
1	u	20	w	22,95	c 84	1,502		431,00		
2	u	20	w	22,95	c 84	1,493	1,496	430,00	440,33	
3	u	20	w	22,95	c 84	1,493		460,00		
1	u	20	w	24,46	c 84	1,550		504,00		
2	u	20	w	24,46	c 84	1,562	1,557	420,00	471,33	
3	u	20	w	24,46	c 84	1,558		490,00		
1	u	20	w	25,90	c 84	1,608		540,00		
2	u	20	w	25,90	c 84	1,613	1,608	506,00	518,33	
3	u	20	w	25,90	c 84	1,603		509,00		
1	u	20	w	27,49	c 84	1,579		404,00		
2	u	20	w	27,49	c 84	1,576	1,578	442,00	433,33	
3	u	20	w	27,49	c 84	1,579		454,00		
1	u	20	w	29,30	c 84	1,542		325,00		
2	u	20	w	29,30	c 84	1,538	1,539	359,00	362,00	
3	u	20	w	29,30	c 84	1,536		402,00		
1	u	40	w	23,00	c 84	1,490		1.002,00		
2	u	40	w	23,00	c 84	1,500	1,499	814,00	903,33	
3	u	40	w	23,00	c 84	1,507		894,00		
1	u	40	w	24,57	c 84	1,527		1.056,00		
2	u	40	w	24,57	c 84	1,534	1,529	929,00	954,67	
3	u	40	w	24,57	c 84	1,525		879,00		
1	u	40	w	26,12	c 84	1,540		928,00		
2	u	40	w	26,12	c 84	1,537	1,536	907,00	899,33	
3	u	40	w	26,12	c 84	1,531		863,00		
1	u	40	w	27,56	c 84	1,531		990,00		
2	u	40	w	27,56	c 84	1,532	1,529	935,00	894,33	
3	u	40	w	27,56	c 84	1,523		758,00		
1	u	40	w	29,13	c 84	1,500		988,00		
2	u	40	w	29,13	c 84	1,505	1,502	749,00	837,00	
3	u	40	w	29,13	c 84	1,502		774,00		
1	u	60	w	21,48	c 84	1,389		1.848,00		
2	u	60	w	21,48	c 84	1,390	1,393	1.662,00	1.788,67	
3	u	60	w	21,48	c 84	1,401		1.856,00		
1	u	60	w	23,06	c 84	1,436		2.087,00		
2	u	60	w	23,06	c 84	1,431	1,437	1.960,00	1.908,67	
3	u	60	w	23,06	c 84	1,445		1.679,00		
1	u	60	w	24,57	c 84	1,468		1.567,00		
2	u	60	w	24,57	c 84	1,469	1,467	1.567,00	1.546,00	
3	u	60	w	24,57	c 84	1,465		1.504,00		
1	u	60	w	26,09	c 84	1,456		1.600,00		
2	u	60	w	26,09	c 84	1,455	1,456	1.059,00	1.224,33	

TABELA B.2

VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS (DADOS CORRIGIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO)

FASE EXPERIMENTAL (dados corrigidos)										
RESULTADOS DOS CORPOS DE PROVA ANALISADOS EM CONDIÇÕES IMERSAS										
Identificação do Corpo de Prova						Massa Específica Seca Máxima (gr/cm ³)	Massa Específica Seca Máxima (média) (gr/cm ³)	RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	RCS (corrigidos) (KPa)
3	u	60	w	26,09	c 84	1,458		1.014,00		
1	u	60	w	27,52	c 84	1,431		1.111,00		
2	u	60	w	27,52	c 84	1,430	1,431	1.080,00	1.068,33	
3	u	60	w	27,52	c 84	1,432		1.014,00		
1	u	80	w	23,22	c 84	1,356		1.771,00		
2	u	80	w	23,22	c 84	1,354	1,354	1.627,00	1.626,00	
3	u	80	w	23,22	c 84	1,352		1.480,00		
1	u	80	w	24,58	c 84	1,371		1.983,00		
2	u	80	w	24,58	c 84	1,370	1,371	2.050,00	1.975,33	
3	u	80	w	24,58	c 84	1,371		1.893,00		
1	u	80	w	26,15	c 84	1,384		5.468,00		
2	u	80	w	26,15	c 84	1,383	1,383	5.486,00	5.560,00	
3	u	80	w	26,15	c 84	1,382		5.726,00		
1	u	80	w	27,52	c 84	1,365		1.721,00		
2	u	80	w	27,52	c 84	1,364	1,364	1.717,00	1.689,33	
3	u	80	w	27,52	c 84	1,364		1.630,00		
1	u	80	w	29,04	c 84	1,335		1.411,00		
2	u	80	w	29,04	c 84	1,332	1,333	1.468,00	1.415,33	
3	u	80	w	29,04	c 84	1,332		1.367,00		
1	u	100	w	21,01	c 84	1,256		3.861,00		
2	u	100	w	21,01	c 84	1,263	1,261	3.363,00	3.405,33	
3	u	100	w	21,01	c 84	1,263		2.992,00		
1	u	100	w	24,09	c 84	1,320		3.891,00		
2	u	100	w	24,09	c 84	1,317	1,319	3.197,00	3.386,33	
3	u	100	w	24,09	c 84	1,319		3.071,00		
1	u	100	w	27,11	c 84	1,342		3.075,00		
2	u	100	w	27,11	c 84	1,340	1,341	2.947,00	3.031,67	
3	u	100	w	27,11	c 84	1,340		3.073,00		
1	u	100	w	30,10	c 84	1,332		2.575,00		
2	u	100	w	30,10	c 84	1,324	1,327	2.368,00	2.437,00	
3	u	100	w	30,10	c 84	1,326		2.368,00		
1	u	100	w	33,05	c 84	1,321		3.359,00		
2	u	100	w	33,05	c 84	1,320	1,321	2.948,00	3.154,00	
3	u	100	w	33,05	c 84	1,321		3.155,00

FIGURA B.1 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.2 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.3 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.4 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.5 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.6 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.7 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.8 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 20% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 80% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.9 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.10 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.11 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.12 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.13 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.14 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.15 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.16 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 40% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 60% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.17 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.18 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.19 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.20 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.21 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.22 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.23 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.24 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 60% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 40% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.25 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.26 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.27 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.28 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.29 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.30 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.31 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.32 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 80% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 20% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.33 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.34 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 3 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.35 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.36 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 7 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.37 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.38 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 28 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.39 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, SEM IMERSÃO EM ÁGUA

FIGURA B.40 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES COM A VARIAÇÃO DA UMIDADE. MISTURA CONTENDO 100% DE FOSFOGESSO ANIDRO E 0% DE SOLO. TEMPO DE CURA REFERENTE A 84 DIAS, COM IMERSÃO EM ÁGUA

ANEXO C

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DA PESQUISA

B - Aplicação do Método Estatístico

A teoria estatística do método pressupõe a existência de um valor de coeficiente de variação único e constante para todo o universo de ternos dos corpos de prova analisados. Entende-se como coeficiente de variação de uma observação a dispersão a que a ela está sujeita dividida pelo valor verdadeiro que ela supostamente estimará.

Para a avaliação do coeficiente de variação de todo o universo de ternos, calcula-se inicialmente o coeficiente r , definido abaixo, para cada terno:

$$r = (X_{\max} - X_{\min})/X_{\text{med}}$$

$X_{\max}$ =	maior valor do terno
$X_{\min}$ =	menor valor do terno
X_{med} =	valor médio do terno

Em um nomograma proposto pelos autores, representam-se valores de r (escala A) em função da porcentagem de resultados menores ou iguais a r (escala B), obtendo-se a “linha CV”. O coeficiente de variação geral é o valor da escala A correspondente a 24% na escala B. Nas Tabelas C.1 e C.2 estão apresentados os valores de r para os corpos de prova analisados em condições imersas e não imersas.

A porcentagem desqualificadora da investigação, fator t , é o valor da escala A correspondente à interseção entre a “linha CV” e uma horizontal traçada a partir do valor do número de ternos na escala D.

Para cada terno determinam-se os valores U e V , dados respectivamente, por:

$$U = (X_{\max} - X_{\text{med}})/X_{\text{med}}$$

$$V = (X_{\text{med}} - X_{\min})/X_{\text{med}}$$

Dado um terno, se o valor de U exceder t , descarta-se $X_{\max}$, e se V for maior que t , elimina-se $X_{\min}$.

Na Tabela C.3 encontram-se os valores de CV e t obtidos nesta pesquisa. Seguidamente, nas Tabelas C.4 e C.5 estão apresentados os ternos de corpos de prova com observações eliminadas e os valores novos calculados para as condições sem imersão e com imersão, respectivamente.

TABELA C 1 APLICAÇÃO DO MÉTODO ESTATÍSTICO AOS VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA SEM IMERSÃO

r (SEM IMERSÃO)					
NÚMERO DE TERNAS	ESCALA "A"	ESCALA "B"	NÚMERO DE TERNAS	ESCALA "A"	ESCALA "B"
97	0,02342	0,51546	48	0,18051	51,03093
96	0,03309	1,54639	47	0,18425	52,06186
95	0,03310	2,57732	46	0,18651	53,09278
94	0,03887	3,60825	45	0,18952	54,12371
93	0,04158	4,63918	44	0,18977	55,15464
92	0,04182	5,67010	43	0,19101	56,18557
91	0,04265	6,70103	42	0,19147	57,21649
90	0,05561	7,73196	41	0,19359	58,24742
89	0,05578	8,76289	40	0,19436	59,27835
88	0,06124	9,79381	39	0,20381	60,30928
87	0,06919	10,82474	38	0,20474	61,34021
86	0,07131	11,85567	37	0,21079	62,37113
85	0,07542	12,88660	36	0,21656	63,40206
84	0,07629	13,91753	35	0,21930	64,43299
83	0,07750	14,94845	34	0,22312	65,46392
82	0,07891	15,97938	33	0,22344	66,49485
81	0,08195	17,01031	32	0,22931	67,52577
80	0,08201	18,04124	31	0,23157	68,55670
79	0,08211	19,07216	30	0,23320	69,58763
78	0,08213	20,10309	29	0,23617	70,61856
77	0,08602	21,13402	28	0,24017	71,64948
76	0,08646	22,16495	27	0,24497	72,68041
75	0,08706	23,19588	26	0,24710	73,71134
74	0,10071	24,22680	25	0,24852	74,74227
73	0,10264	25,25773	24	0,25700	75,77320
72	0,10350	26,28866	23	0,26826	76,80412
71	0,10396	27,31959	22	0,27160	77,83505
70	0,10987	28,35052	21	0,27333	78,86598
69	0,11149	29,38144	20	0,27548	79,89691
68	0,11456	30,41237	19	0,27892	80,92784
67	0,11522	31,44330	18	0,28577	81,95876
66	0,11640	32,47423	17	0,29062	82,98969
65	0,12038	33,50515	16	0,29937	84,02062
64	0,12209	34,53608	15	0,31953	85,05155
63	0,13487	35,56701	14	0,34877	86,08247
62	0,13493	36,59794	13	0,35709	87,11340
61	0,13778	37,62887	12	0,41233	88,14433
60	0,14052	38,65979	11	0,41438	89,17526
59	0,14578	39,69072	10	0,42386	90,20619
58	0,14660	40,72165	9	0,43025	91,23711
57	0,14719	41,75258	8	0,44599	92,26804
56	0,14728	42,78351	7	0,49172	93,29897
55	0,16141	43,81443	6	0,51687	94,32990
54	0,16310	44,84536	5	0,53674	95,36082
53	0,16358	45,87629	4	0,58840	96,39175
52	0,16667	46,90722	3	0,65690	97,42268
51	0,16701	47,93814	2	0,83137	98,45361
50	0,17191	48,96907	1	0,90625	99,48454
49	0,17311	50,00000			

TABELA C 2 APLICAÇÃO DO MÉTODO ESTATÍSTICO AOS VALORES OBTIDOS DOS CORPOS DE PROVA COM IMERSÃO

r (SEM IMERSÃO)					
NÚMERO DE TERNAS	ESCALA "A"	ESCALA "B"	NÚMERO DE TERNAS	ESCALA "A"	ESCALA "B"
95	0,01813	2,57732	47	0,17897	52,06186
94	0,02547	3,60825	46	0,18229	53,09278
93	0,03028	4,63918	45	0,18541	54,12371
92	0,03153	5,67010	44	0,18582	55,15464
91	0,03611	6,70103	43	0,18608	56,18557
90	0,04075	7,73196	42	0,18854	57,21649
89	0,04222	8,76289	41	0,18955	58,24742
88	0,04465	9,79381	40	0,20039	59,27835
87	0,05090	10,82474	39	0,20812	60,30928
86	0,06000	11,85567	38	0,20996	61,34021
85	0,06559	12,88660	37	0,21132	62,37113
84	0,06813	13,91753	36	0,21271	63,40206
83	0,06862	14,94845	35	0,21376	64,43299
82	0,07136	15,97938	34	0,21795	65,46392
81	0,07228	17,01031	33	0,22967	66,49485
80	0,07948	18,04124	32	0,24215	67,52577
79	0,07995	19,07216	31	0,24394	68,55670
78	0,08494	20,10309	30	0,24618	69,58763
77	0,08910	21,13402	29	0,24760	70,61856
76	0,08918	22,16495	28	0,24962	71,64948
75	0,08950	23,19588	27	0,25519	72,68041
74	0,09050	24,22680	26	0,25941	73,71134
73	0,09080	25,25773	25	0,25980	74,74227
72	0,09672	26,28866	24	0,26886	75,77320
71	0,09721	27,31959	23	0,27932	76,80412
70	0,09873	28,35052	22	0,28554	77,83505
69	0,09997	29,38144	21	0,29072	78,86598
68	0,10428	30,41237	20	0,30735	79,89691
67	0,10846	31,44330	19	0,30918	80,92784
66	0,11538	32,47423	18	0,31744	81,95876
65	0,11641	33,50515	17	0,31839	82,98969
64	0,11963	34,53608	16	0,32849	84,02062
63	0,11964	35,56701	15	0,37824	85,05155
62	0,12127	36,59794	14	0,38155	86,08247
61	0,12187	37,62887	13	0,39057	87,11340
60	0,13031	38,65979	12	0,39808	88,14433
59	0,13802	39,69072	11	0,42186	89,17526
58	0,13918	40,72165	10	0,42317	90,20619
57	0,14286	41,75258	9	0,47863	91,23711
56	0,14503	42,78351	8	0,48601	92,26804
55	0,15000	43,81443	7	0,50000	93,29897
54	0,15160	44,84536	6	0,53242	94,32990
53	0,15210	45,87629	5	0,54569	95,36082
52	0,16781	46,90722	4	0,55457	96,39175
51	0,17359	47,93814	3	0,62760	97,42268
50	0,17503	48,96907	2	0,63775	98,45361
49	0,17526	50,00000	1	0,72295	99,48454
48	0,17822	51,03093			

TABELA C.3 VALORES DE CV E t PARA CORPOS DE PROVA COM E SEM IMERSÃO

CORPOS DE PROVA	CV	t
Sem Imersão	16,00 %	0,365
Com Imersão	15,20 %	0,345

TABELA C.4 - OBSERVAÇÕES ELIMINADAS PARA CORPOS DE PROVA SEM IMERSÃO

VALORES QUE DEVEM SER CORRIGIDOS (Segundo o Método Estatístico)													
CORPOS DE PROVA SEM IMERSÃO													
Identificação do Corpo de Prova						RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	u	v	t	u>t	v>t	RCS (Eliminado) (KPa)
1	s	100	w	29,96	c 3	7.493,00	5.102,33	0,469	0,438	0,365	VERDADEIRO	VERDADEIRO	7.493,00
2	s	100	w	29,96	c 3	4.945,00							4.945,00
3	s	100	w	29,96	c 3	2.869,00							2.869,00
1	s	100	w	32,99	c 3	6.488,00	4.742,00	0,368	0,289	0,365	VERDADEIRO	FALSO	6.488,00
2	s	100	w	32,99	c 3	4.365,00							3.869,00
3	s	100	w	32,99	c 3	3.373,00							
1	s	40	w	24,49	c 7	2.447,00	1.840,33	0,330	0,502	0,365	FALSO	VERDADEIRO	2.302,00
2	s	40	w	24,49	c 7	2.157,00							
3	s	40	w	24,49	c 7	917,00							917,00

TABELA C.5 OBSERVAÇÕES ELIMINADAS PARA CORPOS DE PROVA COM IMERSÃO

VALORES QUE DEVEM SER CORRIGIDOS (Segundo o Método Estatístico)														
CORPOS DE PROVA COM IMERSÃO														
Identificação do Corpo de Prova						RCS (KPa)	RCS (média) (KPa)	U	V	t	U>t	V>t	RCS (Eliminado) (KPa)	RCS (Novo) (KPa)
1	u	60	w	27,46	c 3	893,00	657,00	0,359	0,279	0,345	VERDADEIRO	FALSO	893,00	539,00
2	u	60	w	27,46	c 3	604,00								
3	u	60	w	27,46	c 3	474,00								
1	u	80	w	25,96	c 3	2.570,00	1.940,67	0,324	0,399	0,345	FALSO	VERDADEIRO		2.327,50
2	u	80	w	25,96	c 3	2.085,00								
3	u	80	w	25,96	c 3	1.167,00							1.167,00	
1	u	100	w	21,06	c 7	3.777,00	3.043,33	0,241	0,387	0,345	FALSO	VERDADEIRO		3.631,50
2	u	100	w	21,06	c 7	3.486,00								
3	u	100	w	21,06	c 7	1.867,00							1.867,00	