

UNIJUÍ – UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA – DETEC
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO
GRANULOMÉTRICA COMO REVESTIMENTO
PRIMÁRIO DE RODOVIAS NÃO-PAVIMENTADAS**

JULIANO REIS WALLAU

Trabalho de Conclusão do Curso

Ijuí – RS, julho de 2004

JULIANO REIS WALLAU

**AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO
GRANULOMÉTRICA COMO REVESTIMENTO PRIMÁRIO
DE RODOVIAS NÃO-PAVIMENTADAS**

Trabalho de Conclusão do Curso

Trabalho apresentado ao corpo docente do Programa de Graduação em Engenharia Civil do Curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para aprovação na disciplina e formação de nível superior no curso de Engenharia Civil.

Orientador

Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht

Ijuí

2004

JULIANO REIS WALLAU

**AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO
GRANULOMÉTRICA COMO REVESTIMENTO PRIMÁRIO DE
RODOVIAS NÃO-PAVIMENTADAS**

Trabalho de Conclusão do Curso

Aprovação na disciplina e formação de nível superior no curso de Engenharia Civil

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

Aprovado em Julho de 2004

Dr. Eng. Prof. Luciano Pivoto Specht
Orientador

M. Eng. Prof. Luís Eduardo Modler
Coordenador do Curso de Engenharia Civil

M. Eng. Prof. Cristina Eliza Pozzobon
Banca Examinadora

M. Eng. Prof. Luís Eduardo Modler
Banca Examinadora

Dedico esta conquista aos meus pais, meus irmãos, minha esposa e minhas filhas que sempre se tiveram presentes me apoiando em todos momentos difíceis enfrentados neste período.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e aos meus irmãos por toda a força prestada em todos os instantes da minha vida.

Agradeço a minha esposa, e minhas filhas pelo entendimento e paciência, principalmente nos momentos em que lhes faltou com atenção.

Agradeço aos demais familiares pelo estímulo e interesse sempre demonstrado aos meus estudos.

Agradeço aos meus grandes amigos e colegas Jean Carlo, Leandro e Turíbio pela amizade fiel e principalmente pelos bons momentos compartilhados juntos.

Agradeço ao professor Luciano pela orientação deste trabalho, pelos ensinamentos e pelo seu pleno conhecimento na área de engenharia.

Agradeço a toda equipe de professores do curso de engenharia que de uma maneira ou outra se demonstraram com um grande exemplo de profissionalismo e de amizade, contribuindo para o meu crescimento profissional.

Agradeço aos laboratoristas Luiz e Sulete, pelo auxílio prestado durante o Trabalho de Conclusão de Curso.

Em especial agradeço acima de tudo a "Deus".

Se você quer, você pode

*Se você acha que está derrotado, você está
Se acha que não se atreve, não fará,
Se gosta de ganhar, mas acha que não pode, é quase
certo que não poderá.*

*Se acha que vai perder, já está perdido,
Pois neste mundo descobrimos que o sucesso começa com
a vontade da pessoa é tudo um estado de espírito.*

*Se você acha que você é inferior, você é,
Você tem que pensar alto para subir tem que ter certeza
de si mesmo, antes que você jamais possa ganhar um
prêmio.*

*As batalhas da vida, nem sempre cabem, à pessoa mais
forte ou mais rápida.
Pois mais cedo ou mais tarde, quem vence é a pessoa que
acha que – PODE!*

RESUMO

Atualmente um dos grandes problemas no Brasil é a falta de recurso para a construção e a manutenção da malha rodoviária. Com ênfase neste problema propõem-se um estudo em laboratório, com várias dosagens, utilizando-se a estabilização granulométrica como revestimento primário em rodovias não-pavimentadas, utilizando matéria-prima encontrada na região com o objetivo de diminuir custos e aumentar a qualidade de rolagem das rodovias não-pavimentadas. Para tanto foram efetuados três tipos de ensaios: Ensaio de Proctor, Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o Ensaio de Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica. A matéria prima utilizada na elaboração do estudo, foi o solo da cidade de Ijuí, a brita e o pó-de-brita extraídos de uma jazida localizada na cidade de Coronel Barros, materiais estes representativos na região do estudo. Basicamente o trabalho apresenta cinco diferentes misturas granulométricas, onde se buscou chegar a uma dosagem considerada atrativa para utilização na prática de engenharia, que atenda todos os requisitos básicos para utilização em campo, tais como boa resistência e baixa permeabilidade. Conclui-se que as misturas contendo entre 50% e 60% de agregado são as que apresentam as melhores características médias para a utilização como tratamento superficial de rodovias não-pavimentadas.

Palavras-chave: Rodovias não-pavimentadas
Estabilização granulométrica de solos
Mistura solo-agregado

SUMÁRIO

Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	11
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	12
INTRODUÇÃO	13
1.1 Delimitação do Tema	13
1.2 Formulação da Questão de Estudo	13
1.3 Definição dos Objetivos do Estudo	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 Justificativa	15
1.5 Organização do Trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Rodovias	19
2.1.1 Rodovias Não-Pavimentadas	21
2.1.2 Classificação das Rodovias	21
2.2 Pavimentos	27
2.2.1. Definição	27
2.2.2 Tipos de Pavimentos	27
2.3 Estabilização do Solo.....	29
2.3.1 Estabilização Granulométrica	29

2.3.2 Estabilização Química e Injeções	31
2.3.3 Estabilização Mecânica	32
2.4 Materiais Alternativos	33
2.4.1 Plintossolo	33
2.4.2 Saibros e Granito/Gnaiss	34
2.4.3 Bassaltos Alterados	35
2.4.4 Lateritas	36
2.4.5 Solos Arenosos Finos Lateríticos	36
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1 Planejamento do Experimento	38
3.2 Materiais Utilizados	40
3.2.1 Solo	40
3.2.2 Agregado	41
3.2.3 Água	43
3.3 Procedimentos dos Ensaios	44
3.3.1 Ensaio de Compactação	44
3.3.2 Ensaio de Califórnia Bearing Rácio (CBR)	46
3.3.3 Ensaio do Coeficiente de Condutividade Hidráulica (K)	48
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4.1 Análise do Ensaio de Compactação	52
4.2 Análise do Ensaio de Califórnia Bearing Rácio (CBR)	57
4.3 Análise do Ensaio de Coeficiente de Condutividade Hidráulica (K)	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1 Conclusões	62
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

APÊNDICE I – Fichas com Resultados dos Ensaios de Compactação	67
APÊNDICE II – Fichas com Resultados dos Ensaios de Califórnia Bearing Rácio (CBR)	74
APÊNDICE III – Fichas com os Ensaios do Índice de Suporte Califórnia (K)	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Jazida de basalto alterado, Salto do Jacuí – RS (Wallau, 2003) ...	37
Figura 2: Materiais utilizados nas misturas	39
Figura 3: Curva granulométrica das misturas	40
Figura 4: Curva granulométrica do solo do talude	42
Figura 5: Curva granulométrica do agregado com seus materiais	44
Figura 6: Equipamento utilizado para o ensaio de Compactação	46
Figura 7: Amostra de CBR pronto para ser levado à imersão	47
Figura 8: Prensa de CBR	48
Figura 9: Corpo-de-prova pronto dentro da cuba	50
Figura 10: Amostra submetida à bomba de vácuo	51
Figura 11: Aplicação de água na coluna	52
Figura 12: Organização dos grãos na amostra com 30% de solo e 70% de agregado	54
Figura 13: Curvas de compactação das amostras estudadas	55
Figura 14: Teor de umidade para as misturas	56
Figura 15: Densidade Aparente Seca máxima em função da % de agregado	57
Figura 16: Relação entre CBR e umidade	59
Figura 17: CBR em relação ao teor de agregado	60
Figura 18: Permeabilidade K em função da percentagem de agregado.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema rodoviário do Rio Grande do Sul em Km (Oliveira, 2001)	17
Tabela 2: Malha federal e estadual do Rio Grande do Sul segundo DAER-RS ...	21
Tabela 3: Rede rodoviária do Brasil (GEIPOT, 1999), apud (Baesso e Gonçalves, 2003)	22
Tabela 4: Significado inicial dos algarismos	23
Tabela 5: Granulometria indicada para saibros de granito ou gnaisse (Oliveira, 2001)	36
Tabela 6: Determinação dos teores da mistura	40
Tabela 7: Propriedades físicas do solo do talude	41
Tabela 8: Composição granulométrica da brita $\frac{3}{4}$	43
Tabela 9: Composição granulométrica do pó-de-pedra	43
Tabela 10: Ensaio obtidos em laboratório	53
Tabela 11: Resultados do ensaio de Compactação	56
Tabela 12: Resultados dos ensaios de CBR	58
Tabela 13: Resultados das umidades ótimas pelo CBR de cada mistura	60
Tabela 14: Resultados obtidos no ensaio de expansão	60
Tabela 15: Misturas com umidades ótimas e suas permeabilidades	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CP.: Corpo-de-prova

CBR: Califórnia Bearing Rácio

K.: Coeficiente de Condutividade Hidráulica

R²: coeficiente de determinação linear

mm: milímetros

cm: centímetros

m/s: metros por segundos

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

1 INTRODUÇÃO

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Visando contribuir para a solução do problema real existente nas rodovias não-pavimentadas, quanto a sua má conservação devido à ação destrutiva do tráfego e a ação ambiental, propõe-se um estudo de estabilização granulométrica de materiais alternativos regionais como tratamento primário. Este estudo será balizado através de ensaios laboratoriais.

1.2 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO

Existe viabilidade técnica na utilização de misturas estabilizadas granulometricamente como revestimento primário de estradas não pavimentadas utilizando solo residual e agregado proveniente de rocha basáltica?

1.3 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DO ESTUDO

1.3.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo estudar em laboratório a viabilidade técnica de estabilizações granulométricas produzidas com solo residual de basalto e agregado pétreo, materiais estes representativos da região em estudo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Determinar através de pesquisa laboratorial qual a influência da estabilização granulométrica nos seguintes parâmetros de compactação do solo: massa específica aparente seca máxima e umidade ótima;
- Determinar qual a influência da estabilização granulométrica na capacidade de suporte do solo medido através do Índice de Suporte Califórnia (ISC).
- Determinar qual a influência da estabilização granulométrica na permeabilidade do solo, medido através do coeficiente de condutividade hidráulica.

1.4 JUSTIFICATIVA

Levando-se em consideração que o solo é o material mais barato que existe e é encontrado em abundância no substrato da maioria das obras de engenharia, é natural adaptá-lo às condições peculiares de cada aplicação. Dentre as diversas técnicas de melhoria estão o tratamento químico, o tratamento mecânico e a estabilização.

Na construção de estradas não é diferente, pois o solo é a principal matéria prima para sua construção. No caso da região de Ijuí o solo argiloso proveniente da decomposição de basalto não tem capacidade de suporte suficiente para ser utilizado como tratamento primário tendendo a deformar-se. Como nesta região o clima é tropical e subtropical, onde os períodos de chuva são bastante agressivos às rodovias, principalmente àquelas não-pavimentadas, dificultando, assim, a locomoção de veículos.

Os efeitos combinados do carregamento causado pela passagem de veículos e das precipitações levam a problemas muito freqüentes, encontrados no dia-a-dia, como buracos, afundamento de trilho de rodas, adensamento, atoleiros, escorregamentos de taludes, erosões e muitos outros.

Segundo Oliveira (2001) a justificativa para a preocupação com a conservação das rodovias não-pavimentadas é: o alto custo do transporte para os usuários destas vias, e o alto custo de manutenção e a impossibilidade de pavimentação de todas as estradas.

A Tabela 1 apresenta a configuração atual da malha rodoviária no estado do Rio Grande do Sul, onde de um total de 153.358,49 km que constituem o sistema rodoviário, apenas 11.830,12 km encontram-se pavimentados, ou seja, uma extensão correspondente a 7,71% da atual malha rodoviária.

Tabela 1: Sistema rodoviário do Rio Grande do Sul em Km (Oliveira, 2001).

Rodovias	Em obras de Implantação	Não pavimentadas	Em obras de pavimentação	Pavimentadas	Total
Federais	-	233,80	34,80	5.146,28	5.414,88
Acessos Federais	-	-	-	47,90	47,90
Estaduais	128,93	2.447,55	908,66	4.157,11	7.642,25
Vicinais	-	22,36	-	494,50	516,86
Estaduais Transitórias	-	719,74	374,29	1.146,82	2.240,85
Acessos Estaduais	-	73,10	29,05	138,51	240,75
Municipais	-	136.556,00	-	699,00	137.255,00
Total	128,93	140.052,64	1.346,80	11.830,12	153.358,49

Nota-se que os municípios são os que possuem maior carência de estradas pavimentadas, devido às prefeituras disporem de menos recurso financeiro e o custo de execução de pavimentação ser muito elevado; confirmando-se então à importância de investir nas rodovias não-pavimentadas.

Uma alternativa seria o investimento na malha não-pavimentada, procurando sanar os problemas mais freqüentes, para que ela possa ser usada tanto quanto as pavimentadas, havendo uma preocupação quanto às intempéries e quanto à aderência, para que o tráfego possa fluir normalmente independente das condições climáticas.

As rodovias possuem um papel muito importante para o desenvolvimento do país; o Brasil é um país extremamente agrícola, com isto a maior parte de seus produtos é produzido no campo, necessitando ter acesso aos locais de comercialização, assim como ser acessível a outros produtos como fertilizantes, maquinários, etc.

As estradas municipais/vicinais são de vital importância para o desenvolvimento da economia nacional, escoando as produções das regiões onde

estão situadas, interligando as fontes de produção com as áreas onde há consumo, promovendo assim a integração demográfica e territorial e assim elevando o nível de renda não só do setor primário, mas de toda a sociedade.

As boas condições de trafegabilidade, com segurança e conforto, conferem as rodovias municipais outro papel relevante além das anteriormente destacadas, pois ensejam a população rural facilidades de acesso aos recursos instalados nas cidades, estimulando-a a permanecer na sua origem, não agravando as condições de infra-estrutura dos núcleos urbanos, que apresentaram nos últimos nove anos um crescimento de 25%, conforme dados de pesquisas dos CENSOS feitos entre (1991 - 2000), Oliveira (2001). A falta de infra-estrutura em áreas rurais estimula ainda mais o êxodo rural.

Torna-se extremamente importante que pesquisadores busquem alternativas e soluções locais para melhorar as condições de trafegabilidade de estradas não-pavimentadas, investindo em pesquisas, para obter descoberta de materiais alternativos e novas técnicas de modo tornar a pavimentação com um custo aprecivo, e de fácil execução. É importante incentivar as prefeituras lhes apresentando as vantagens e a importância da pavimentação.

Uma justificativa importante é o alto custo do barril de petróleo tornando quase impossível a sua utilização para fins de pavimentação.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O presente capítulo traz uma breve introdução sobre a pesquisa realizada, bem como a delimitação do tema abordado, a formulação da questão de estudo, as definições dos objetivos gerais e específicos, as justificativas do trabalho e sua organização.

Aborda-se, no segundo capítulo, a revisão bibliográfica pertinente ao tema do estudo, que trata dos seguintes assuntos: rodovias, pavimentos, estabilização dos solos e materiais alternativos.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização do trabalho. Contém informações sobre a classificação do estudo, planejamento da pesquisa, materiais utilizados e os métodos de ensaios utilizados.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos durante a pesquisa; são apresentadas as respostas obtidas através dos ensaios de Proctor, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o ensaio de permeabilidade. É apresentada também a análise e a discussão dos resultados.

A conclusão do trabalho está no quinto capítulo. Neste são apresentadas, também, as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final são apresentados as referências bibliográficas, a bibliografia consultada e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RODOVIAS

Na atualidade as rodovias têm muita importância para o desenvolvimento social e econômico do país. No Brasil, hoje, o transporte de cargas através do modal rodoviário é responsável por mais de 70% do movimento total das cargas internas. Quando comparando com os demais modais fica bem distanciado do segundo colocado que é o transporte ferroviário, que se serve apenas 15% do total (MELLO, 2001).

Também se vê a importância das rodovias na questão turística e cultural do país, de tal forma que esta possibilita uma ligação de povos e culturas, ajudando a desenvolver o potencial turístico brasileiro, tornando acessível às pessoas a capacidade de locomoção mais eficaz, proporcionando uma melhor segurança e comodidade.

A Tabela 2 apresenta a malha estadual e federal que envolve o Rio Grande do Sul, por distritos de jurisdição do DAER – RS, atualizado em março de 2004, mostrando a quantidade e a porcentagem em Km de rodovias pavimentadas e não pavimentadas.

Tabela 2: Malha do Rio Grande do Sul federal e estadual segundo DAER - RS

REDES ESTADUAL E FEDERAL SOB JURISDIÇÃO DO DAER (POR DISTRITO)							
Distritos Rodoviários	Rede Estadual (Km)			Rede Federal (Km)			Total
	Pavimentada	Não Pavimentada	Sub-Total	Pavimentada	Não Pavimentada	Sub-Total	
1º Esteio	430,53	104,83	535,36	183,00	0,00	183,00	718,36
2º Bento Gonçalves	716,04	182,55	898,59	276,63	0,00	276,63	1.175,22
3º Santa Cruz do Sul	398,03	352,58	750,61	321,69	0,00	321,69	1.072,30
4º Santa Maria	341,45	74,79	416,24	410,18	118,02	528,20	944,44
5º Cruz Alta	356,08	196,93	553,01	291,54	25,29	316,83	869,84
6º Passo Fundo	696,47	199,42	895,89	249,60	35,57	285,17	1.181,06
7º Pelotas	269,92	425,78	695,70	799,80	0,00	799,80	1.495,50
8º Bagé	18,89	397,97	416,86	382,19	0,00	382,19	799,05
9º Alegrete	180,89	247,88	428,77	707,62	0,00	707,62	1.136,39
10º Cachoeira do Sul	199,12	236,74	435,86	215,22	0,00	215,22	651,08
11º Lajeado	553,44	254,41	807,85	169,47	0,00	169,47	977,32
12º Santiago	91,71	327,44	419,15	326,35	0,00	326,35	745,50
13º Erechim	445,40	365,78	811,18	64,43	32,46	96,89	908,07
14º Santa Rosa	533,91	294,17	828,08	307,12	0,00	307,12	1.135,20
15º São Francisco de Paula	397,31	331,44	728,75	0,00	0,00	0,00	728,75
16º Osório	460,07	146,01	606,08	124,75	0,00	124,75	730,83
17º Palmeira das Missões	504,22	291,21	795,43	243,14	0,00	243,14	1.038,57
Sub-Total	6.593,48	4.429,93	11.023,4	5.072,73	211,34	5.284,07	16.307,4
	59,81%	40,19%		96,00%	4,00%		
Total	16.307,48						

A situação encontra-se ainda mais precária em nível de país conforme mostra a Tabela 3, onde está apresentada a situação da malha rodoviária no Brasil, definida por regiões brasileiras segundo dados do GEIPOT (1999) apud BAESSO e GONÇALVEZ (2003).

Tabela 3: Rede rodoviária do Brasil GEIPOT (1999) apud BAESSO e GONÇALVEZ (2003)

Regiões Brasileiras	Brasil (rede rodoviária Km)			Municípios brasileiros (rede rodoviária Km)		
	Pavim.	N Pavim.	Total	Pavim.	N Pavim.	Total
NORTE	12.083	91.128	103.211	1.016	63.698	64.714
NORDESTE	44.693	360.683	405.376	1.129	325.146	326.275
SUDESTE	54.216	458.207	512.423	10.636	444.487	455.123
SUL	32.441	443.648	476.089	4.012	432.705	436.717
Centro-Oeste	20.814	207.011	227.825	110	163.260	163.370
Totais	164.247	1.560.677	1.724.924	16.903	1.429.296	1.446.199

2.1.1 Rodovias Não-Pavimentadas

Nota-se, na Tabela 3, que 99% das rodovias municipais e 90% da malha federal não estão pavimentadas. Sendo que estas estão em condições precárias de conservação e muitas em abandono total, esquecidas por falta de verba e de estudos para que se encontrem métodos mais econômicos para que se possa manter estas rodovias em condições de trafegabilidade.

Uma rodovia não pavimentada é aquela que não recebe revestimento superficial, portanto não se enquadra como rodovia não-pavimentada a estrada com calçamento e a estrada com revestimento em concreto.

2.1.2 Classificação das Rodovias

Segundo Pontes Filho (1998) as rodovias podem ser classificadas em quatro formas básicas, quanto à sua posição geográfica, quanto à sua função,

quanto à sua jurisdição e quanto às suas condições técnicas, as quais serão comentadas a seguir.

2.1.2.1 Quanto à sua Posição Geográfica

A classificação das estradas federais quanto à sua posição geográfica no Brasil são antecipadas pelo prefixo BR, logo após seguido de três algarismos, onde o primeiro algarismo recebe um número que varia de 0 a 4, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Significado inicial dos algarismos

Algarismos iniciais dos prefixos	
0	Rodovias radiais
1	Rodovias longitudinais
2	Rodovias transversais
3	Rodovias diagonais
4	Rodovias de ligação

Os outros dois algarismos indicam a posição da rodovia com relação a capital federal e os limites extremos do País, de acordo com os seguintes critérios:

a) Rodovias Radiais

As rodovias radiais são as que partem do Distrito Federal, interligando as demais capitais do País e as grandes cidades. Possui uma numeração que vai de 010 até 080, sempre obedecendo ao sentido horário.

b) Rodovias Longitudinais

As rodovias longitudinais são direcionadas do sentido norte para o sul, com sua numeração variando da direita para a esquerda, girando entre 100 até 199. No Distrito Federal a numeração da rodovia é 150.

c) Rodovias Transversais

As rodovias transversais são as que apresentam a sua caracterização inicial indicada pelo algarismo 2. Possuem direção leste-oeste, variando sua numeração entre 200 para as que se situam ao norte do País e 250 as localizadas em Brasília, indo até 299 as que se posicionam no extremo sul do Brasil.

d) Rodovias Diagonais Pares

As rodovias diagonais pares possuem direção noroeste-sudeste tendo sua numeração variando com números pares entre 300 no extremo nordeste do Brasil a 398 no extremo sudoeste. Estes números são obtidos através de um processo de interpolação.

e) Rodovias Diagonais Ímpares

As rodovias diagonais ímpares possuem direção nordeste-sudeste tendo sua numeração variando com números ímpares entre 301 no extremo noroeste do Brasil a 399 no extremo sudoeste. Em Brasília o número é o 351.

f) Rodovias de Ligações

Estas rodovias se caracterizam por ligarem pontos importantes das categorias. Sua numeração varia entre 400 e 450 se esta ligação estiver ao norte do Distrito Federal.

2.1.2.2 Quanto à sua Função

A classificação funcional de uma rodovia é respondida pelo processo de agrupar as rodovias em sistemas e classes, onde estas são agrupadas quanto às funções que exercem. Dentre as funções as rodovias classificam-se como:

a) Rodovias Arteriais

As rodovias arteriais têm como principal função atender aos tráfegos de longas distâncias, independentemente de que esta seja internacional ou interestadual, estas rodovias proporcionam um alto nível de mobilidade para grandes volumes de tráfego.

b) Rodovias Coletoras

As rodovias coletoras atendem aos núcleos populacionais ou centros geradores de tráfego de menor vulto, não servido pelo Sistema Arterial. A função deste sistema é proporcionar mobilidade e acesso dentro de uma área específica.

c) Rodovias Locais

As rodovias locais são geralmente as de pequena extensão, destinadas a proporcionar acesso ao tráfego local intramunicipal, interligando áreas rurais e pequenas localidades até as rodovias de pequena importância.

2.1.2.3 Quanto à Jurisdição

a) Rodovias Federais

As rodovias federais são de responsabilidade do governo federal, tanto sua construção quanto sua manutenção, em geral são vias arteriais e são de muita importância para o país, pois interligam os estados brasileiros. O órgão gestor é o DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte.

b) Rodovias Estaduais

As rodovias estaduais têm fundamental importância dentro de um estado, pois ligam entre si cidades e capitais estaduais. São de patrimônio dos estados, com isto atendem às suas necessidades, exercem usualmente uma função de arterial ou coletora. O órgão gestor no estado do Rio Grande do Sul é o DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens.

c) Rodovias Municipais

As rodovias municipais são as construídas e mantidas pelo governo municipal. São do interesse de um município ou de municípios vizinhos aos quais sejam beneficiados, atendendo principalmente ao município que a administra.

d) Rodovias Vicinais

As rodovias vicinais são geralmente municipais, pavimentadas ou não, de uma só pista, locais, e de padrão técnico mais simples. Estas estradas promovem a integração demográfica e territorial da região da qual se situam e possibilitam a elevação do nível de renda no setor primário nestas localidades. Estas podem ser privadas do caso de suprirem interesses particulares.

2.1.2.4 Quanto às Condições Técnicas

Filho (1998) explica que as características principais geralmente consideradas neste tipo de classificação são aquelas que se relacionam diretamente com a operação do tráfego (velocidade, rampas, raios, larguras de pista e acostamento, distância de visibilidade, níveis de serviço, etc.). Estas, por sua vez, são restringidas por considerações de custos, condicionados especialmente pelo relevo.

2.2 PAVIMENTOS

2.2.1 Definição

Senço (1997) define pavimento como sendo uma estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada, técnica e economicamente, a:

- Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego a que é submetida e distribuí-los por uma maior parte da seção;
- Melhorar as condições de rolagem da rodovia quanto ao conforto e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento da pista;

Senço (1997) afirma que pavimento é um sistema com várias camadas geralmente com espessuras delgadas que se assentam sobre uma camada de base terraplenada a qual exerce uma função de fundação da estrutura, conhecida por subleito.

2.2.2 Tipos de Pavimentos

Os pavimentos geralmente são divididos em duas classes: pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos.

2.2.2.1 Pavimento Rígido

Senço (1997) apresenta uma definição abrangente, e diz que “pavimentos rígidos são aqueles pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações”.

Yoder e Witczak (1975) comentam que a principal diferença entre os dois tipos de pavimentos, flexível e rígido, é a maneira como o pavimento distribui as cargas sobre o subleito. Os pavimentos rígidos, por causa de sua rigidez e alto módulo de elasticidade, tendem a distribuir a carga sobre uma área relativamente maior. Conclui-se que nos pavimentos flexíveis ocorre o contrário, ou seja, uma concentração de esforços nos pontos de aplicação de carga. Acrescenta-se que os pavimentos rígidos atuam como placas isoladas e os flexíveis como uma estrutura contínua.

2.2.2.2 Pavimentos Flexíveis

Segundo Medina (1997), pavimento flexível é aquele “constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente”.

Segundo Yoder (1975), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas, cujas principais funções são:

- Melhorar as condições de conforto e segurança;
- Resistir e distribuir os esforços causados pelo tráfego no subsolo;
- Resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando-o mais durável à superfície de rolamento;
- Resistir às intempéries e variações climáticas.

Yoder (1975) explica ainda que pavimento flexível é aquele em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. É dimensionado normalmente à compressão e à tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga. É uma estrutura constituída de uma ou mais camadas de espessura finita, assente sobre um semi-espaço infinito, cujo revestimento é do tipo betuminoso. Em um pavimento flexível, o dimensionamento é comandado pela resistência do subleito. No caso geral, o pavimento flexível é constituído das seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

Segundo Vargas (1977) denomina-se como estabilização dos solos o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos.

2.3.1 Estabilização Granulométrica

Vargas (1977) explica que muitas vezes não é possível uma simples correção do material a ser utilizado, mas dispõe-se de solos em que predominam pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Então se vê necessário a composição artificial de solo estabilizado, usando a proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter granulometria final desejada.

Um solo é considerado estabilizado naturalmente quando a sua granulometria obedecer à curva correspondente aos solos bem graduados, isto é, quando ele for um solo dos grupos GW e SW de Casagrande, bem compactados.

Segundo Vargas quando a plasticidade da fração que passa pela peneira nº 40 for elevada, necessita-se retirar por lavagem ou peneiramento, a parte fina, proporcionando uma redução no índice de plasticidade (IP) a valores inferiores aos indicados anteriormente, ou então substituí-la por uma argila inativa, em proporções tais que se mantenha a forma bem graduada da curva.

O método utilizado para se determinar a dosagem das frações de pedregulho, areia, silte e argila, a fim de se obter uma curva bem graduada e uma plasticidade adequada deve-se ao processo análogo ao que se utiliza em qualquer proporção de material granuloso, a partir de suas respectivas curvas granulométricas.

Segundo Vargas (1977), um método muito cômodo de calcular a mistura é o de Rothfuchs. Nesse método procede-se da seguinte forma. Primeiramente são pesquisadas as jazidas de agregado grosso (pedregulho ou pedra britada), médio (areia) e fino (silte e argila). Mais do que três tipos de materiais a serem misturados resultariam em condições pouco econômicas. O ideal é que se atinja a granulometria desejada utilizando apenas dois tipos de materiais.

Estas misturas podem ser feitas em usinas, o que seria um processo ideal, porém com um custo elevado, ou com arados misturadores, na própria pista, já com a umidade ótima de compactação. É a operação que se chama comumente de estabilização mecânica ou granulométrica.

Vargas explica que há casos em que há dificuldade de se adquirir plasticidade adequada, recomenda-se então para correção deste problema adicionar ao solo um sal estabilizador, como o cloreto de cálcio. Esse sal retém a umidade do solo, diminuindo os efeitos de retração ou expansão devidos às variações climáticas.

Porém há estudos que confirmem, que a adição deste sal no solo na construção de rodovias não-pavimentadas, trazem problemas de impacto ambiental, devido ao escoando deste sal através das águas das chuvas para os leitos dos rios.

2.3.2 Estabilização Química e Injeções

A adição de agentes cimentantes é uma técnica de tratamento de solos que visa melhorar suas propriedades geotécnicas. Esta técnica esta sendo muito utilizada para pavimentação, controle de erosão, estabilização de encostas e reforço de camadas superficiais de solo.

As estabilizações químicas são geralmente obtidas através de misturas de solo com alguns componentes químicos, entre eles está a cal e cimento.

Vargas (1977) conceitua solo-cimento como o produto de uma mistura compactada de solo com cimento e água, produzindo assim um novo material, com uma alta resistência, baixa deformabilidade, durabilidade a fatores agressores como a água, aos efeitos térmicos, e as baixas temperaturas sendo, assim, muito aplicada em obras de engenharia civil.

Vargas afirma que a aplicação de solo-cal ou solo-cimento possui uma serie de vantagens quando usado como base de construção de pavimentos semi-rígidos: possui uma boa resistência com um baixo custo, diminuindo as pressões no subleito, tendendo a deforma-se pouco quando submetido a esforços de carregamento, e não perdendo sua resistência na presença d'água. Entretanto, é necessário que se leve em consideração o aspecto da reflexão de trincas no revestimento betuminoso, pois estes fatores têm desmotivado o uso destes materiais na construção de pavimentos.

2.3.3 Estabilização Mecânica

Segundo Vargas (1977), a compactação do solo é o processo que consiste em densificar o solo através de: equipamentos mecânicos, aplicação de pressão, e impacto ou vibração, seja este em campo ou em laboratório. No campo, geralmente usa-se um rolo compactador para obras de maior significância onde se deseja um melhor controle tecnológico, já em pequenas obras usa-se geralmente equipamentos de menor porte, como sapo e até mesmo equipamento improvisado no local como soquetes de mão.

Para se alcançar uma maior resistência do solo, é necessário se obter a maior quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, aumentando assim sua massa específica aparente. Com isto consegue-se uma melhoria da impermeabilidade do solo compactado o que, em última análise, é o fator de estabilidade.

Determina-se assim, para a energia de compactação, a melhor situação é aquela que resulta na massa específica aparente máxima, obtendo-se a menor porcentagem de vazios, com o melhor entrosamento entre as partículas.

Vargas (1977) explica que quando se pretende reduzir a porcentagem de vazios, pode-se aumentar a energia de compactação. Utilizando uma energia E' , tal que $E' > E$, tendo então uma redução na porcentagem de vazios, encontrando na curva de compactação um vértice mais elevado.

O principal objetivo do ensaio de compactação é reduzir o máximo possível o índice de vazios do solo, com isto criando uma maior intimidade entre os grãos e desta forma aumentando sua densidade. Para que se possa atingir a maior compactação possível, é necessário que se faça um umedecimento do solo a fim de diminuir o atrito entre as partículas. Quanto mais se umedece o solo, mais desliza as partículas, porém chega a um instante em que o solo é saturado pela água, fazendo

com que a água não consiga sair do solo e ocupando os interstícios de ar, onde deveria ficar os grãos de solo, formando-se o borrachudo. Vê-se, com isto que existe uma certa umidade na qual se consegue um melhor arranjo entre as partículas, chamada de umidade ótima.

Esta descoberta foi feita em 1933, por um engenheiro norte-americano chamado Proctor, que leva o nome ao ensaio, conhecido até nossos dias como "Ensaio de Proctor". Este ensaio sofreu poucas alterações até os dias de hoje, sendo adaptado no mundo conforme as normas de cada nação.

2.4 MATERIAIS ALTERNATIVOS

Oliveira (2001), coloca que a principal vantagem da utilização de um pavimento com materiais alternativos é de fazer com que este cumpra com sua função, e possibilite investimentos significativamente menores, adequando-se as especificações exigidas quanto a sua qualidade.

Oliveira (2001) caracteriza alguns tipos de materiais alternativos encontrados no Rio Grande do Sul, os quais são apresentados nos itens subseqüentes.

2.4.1 Plintossolo

O plintossolo é encontrado na planície costeira do estado, no litoral sul, muito conhecido como "barrinho", é um excelente material para ser usado como camadas de base e sub-base de um pavimento rodoviário.

É um solo de textura areno-argilosa (81% areia fina, 1% silte e 18% argila), com concentração significativa de óxido de ferro, alumínio e manganês. A matriz é de coloração amarela com mosqueados em tons alaranjados, vermelhos e acinzentados. Ocorre a profundidades em torno de 0,30 metros, com espessuras médias de 1,00 metro.

O horizonte textural plíntico ocorre sobre um horizonte arenoso e sobre uma camada de areia amarelada, em áreas de relevo plano em cotas ligeiramente superiores às do planossolos.

2.4.2 Saibros de Granito/Gnaisse

Os saibros de granito/gnaisse são uma alternativa para ser usados como base e sub-base de pavimentos, são de origem dos solos residuais do horizonte C da alteração destas rochas.

Segundo Oliveira (2001), os granitos/gnaisses ocorrem na região do Escudo Rio-Grandense, e são entre as rochas mais comuns de textura grossa, os que possibilitam solos de alteração (solo residual jovem) de melhores características técnicas. As rochas de textura grossa são as únicas capazes de dar origem a solos de alterações arenosas, de granulometria adequada para serem empregados em base de pavimentos.

Para que este material se enquadre nestas características podem ser adicionados a sua mistura, areia, pó-de-pedra ou cimento. Os saibros devem enquadrar-se na composição granulométrica apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Granulometria indicada para saibros de granito ou gnaisse
(Oliveira, 2001).

Peneiras	% que passa
3/4"	100
nº 4	60 – 95
nº 10	35 – 80
nº 40	10 – 45
nº 200	5 – 20

2.4.3 Basaltos Alterados

Os basaltos alterados são agregados resultantes de um processo de alteração de rochas vulcânicas, com grande fendilhamento. A alteração se manifesta, em geral, na forma de esfoliação esferoidal. Ocorrem em quase toda a região do derrame vulcânico do RS, abrangendo a metade norte do estado.

A Figura 1 apresenta uma jazida de basalto alterado localizado na região do Alto Jacuí no estado do Rio Grande do Sul.



Figura 1 – Jazida de basalto alterado, Salto do Jacuí – RS (Wallau, 2003)

2.4.4 Lateritas

Segundo Oliveira (2001), lateritas são materiais concrecionados, constituindo um maciço em forma de crosta ou carapaça, de aspecto vesicular, composto essencialmente de óxido de ferro e alumínio, de silicatos e de quantidades variáveis de óxidos de titânio, magnésio e outros. Apresenta coloração amarela avermelhada, variando de tom vermelho escuro ao negro.

De acordo com Oliveira (2001) este material aparece com grande concentração em toda a região das Missões (noroeste do RS), e em alguns pontos isolados do estado. As jazidas apresentam-se sob a forma de concreções ferruginosa contínuas, com espessuras médias entre 0,60 a 1,00 metro, sobre um horizonte de solo laterítico de espessura variável, em geral pouco profunda.

Os primeiros a utilizar a laterita no RS foram os jesuítas por volta do ano de 1700. Na Redução Jesuítica de São João Batista foi instalada a primeira fundição de ferro do Brasil, utilizando como matéria prima a laterita ("Itacuru" – pedra cupim em tupi guarani). Nas ruínas de São Miguel, ainda hoje, é possível encontrar os blocos de concreções lateríticas, usada na construção das históricas edificações.

2.4.5 Solos Arenosos Finos Lateríticos

De acordo com Oliveira (2001), os solos arenosos são solos caracterizados por possuir uma série de propriedades que os classificam segundo a classificação MCT (Nogami-Villibor), como solo de comportamento geotécnico laterítico.

Diferencia-se dos solos com pedregulho lateríticos que ocorrem subjacentes às crostas lateríticas, os quais apresentam tendência ao concrecionamento e endurecimento sob exposição ao ar.

Oliveira diz que os solos arenosos finos lateríticos têm uma considerável área de ocorrência no RS, abrangendo unidades pedogenéticas como Latossolos e Podzólicos, sobre tudo os escuros, cuja ocorrência esta localizada na Região do Planalto, sobre as formações Serra Geral e Tupanciretã, caracterizam-se por apresentar classificação MCT "LG – Laterítico Argiloso".

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O experimento consiste na realização de ensaios em laboratório. Foram realizados os Ensaio de Proctor, Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Ensaio de Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica, com cinco misturas utilizando diferentes proporções com três tipos de materiais, brita 3/4, pó de brita e solo. (Figura 2).



Figura 2 – Materiais utilizados na mistura.

Estas misturas foram planejadas, mudando-se a percentagem de cada material a ser utilizado, conforme apresentado na Tabela 6 e verificando-se a quantidade de agregado e de solo. O agregado é representado sempre por 30% de pó-de-brita e 70% de brita $\frac{3}{4}$, totalizando 100% deste material.

Tabela 6 – Determinação dos teores da mistura.

MISTURA					
Ensaio	10% S 90% A	20% S 80% A	30% S 70% A	40% S 60% A	50% S 50% A
Proctor	✓	✓	✓	✓	✓
Índice de Suporte Califórnia (CBR)	✓	✓	✓	✓	✓
Coefficiente de Condutividade hidráulica	✓	✓	✓	✓	✓

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas das várias misturas estudadas.

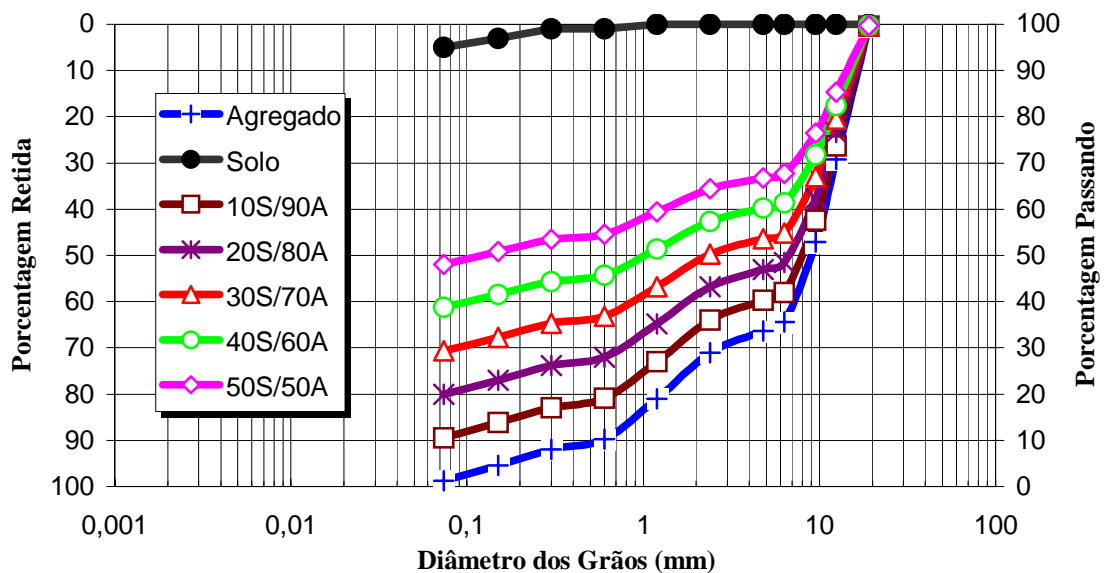


Figura 3 – Curva granulométrica das misturas.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Solo

O solo utilizado nos ensaios foi extraído de um talude localizado aos fundos do prédio do Curso de Engenharia Civil, no Campus da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí. Foram coletadas amostras suficientes para a elaboração de todas as misturas em uma única oportunidade.

Viecili (2003) apresenta a caracterização deste solo, conforme apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades físicas do solo do talude.

Propriedades	Valores Médios
Limite de Liquidez (LL)	59,00 %
Limite de Plasticidade (LP)	47,03 %
Umidade Média de Campo (H)	34,53 %
Índice de Atividade (Ia)	0,14
Índice de Vazios Médio (e)	1,79
Porosidade Média (n)	0,64
Índice de Consistência (IC)	2,04

Na Figura 4 é apresentada a curva granulométrica obtida para o solo residual. Verificou-se que o material é composto por 85,0% de argila (<0,005mm), 10,0% de silte (0,005 – 0,074mm), 4,12% de areia fina (0,074 – 0,42mm), 0,72% de areia média (0,42 – 2,0mm), e 0,16% de areia grossa (2,0 – 4,8mm), não possuindo fração de pedregulho. Segundo a classificação HRB o solo pode ser classificado como A-7-5. Conforme a classificação unificada, o solo classifica-se como

MH (silte de alta compressibilidade). Observando o índice de consistência e de atividades calculados, este solo se enquadra como uma argila dura e inativa.

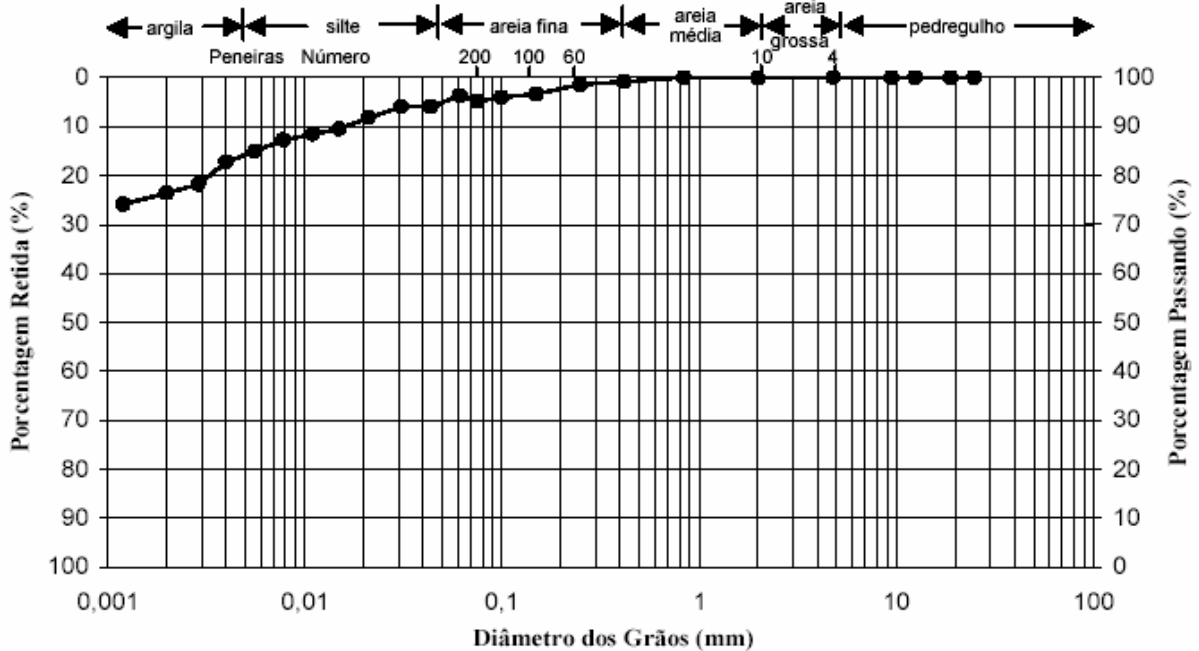


Figura 4 – Curva granulométrica do solo do talude.

3.2.2 Agregado

O agregado referido é uma mistura composta por uma rocha de origem basáltica britada, extraído de uma pedreira da região, localizada na cidade de Coronel Barros – RS, material este representativo na cidade de Ijuí. Trata-se de uma brita com uma composição granulométrica passante na peneira 3/4, como apresenta a Tabela 8, e de um pó-de-brita com sua composição 100%, passante na peneira nº 4, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 8 – Composição granulométrica da brita 3/4.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – NBR 7217								
Peneiras		1º Determinação		2º Determinação		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
nº	mm	Peso Retido	% Retida	Peso Retido	% Retida			
3/4 "	19	31,70	0,53	49,39	0,75	0,64	0,64	99,36
1/2"	12,5	2470,00	40,91	2720,00	41,34	41,13	41,77	58,24
3/8"	9,5	1570,00	26,00	1790,00	27,21	22,61	68,37	32,63
1/4"	6,3	1470,00	24,35	1510,00	22,95	23,65	92,02	7,98
nº4	4,8	185,60	3,07	163,60	2,49	2,78	94,80	5,20
nº8	2,4	123,08	2,04	127,91	1,94	1,99	96,79	3,21
Nº16	1,2	39,26	0,65	42,20	0,64	0,65	97,44	2,57
Nº30	0,6	22,70	0,38	26,30	0,40	0,39	97,83	2,18
Nº50	0,3	31,50	0,52	35,25	0,54	0,53	98,36	1,65
Nº100	0,15	30,23	0,50	32,57	0,50	0,50	98,86	1,15
Nº200	0,074	63,77	1,06	81,67	1,24	1,15	100,01	-0,01
Total		6037,84	100,01	6578,89	100,00	100,00		

Tabela 9 – Composição granulométrica do pó-de-pedra.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – NBR 7217								
Peneiras		1º Determinação		2º Determinação		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
nº	mm	Peso Retido	% Retida	Peso Retido	% Retida			
3/4"	19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,0
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/4"	6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
nº4	4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,0
nº8	2,4	79,65	10,26	85,00	11,76	11,01	11,01	88,99
Nº16	1,2	238,38	30,72	239,65	33,15	31,94	42,95	57,06
Nº30	0,6	222,02	28,61	200,20	27,69	28,15	71,10	28,91
Nº50	0,3	50,96	6,57	41,86	5,79	6,18	77,28	22,73
Nº100	0,15	83,82	10,80	70,73	9,78	10,29	87,57	12,44
Nº200	0,074	71,72	9,24	55,80	7,72	8,48	96,05	3,96
Total		776,00	96,00	723,00	96,00	96,00		

As curvas granulométricas de ambos os materiais estão, apresentadas na Figura 5 bem como a composição de 30% de pó-de-pedra e 70% de brita 3/4.

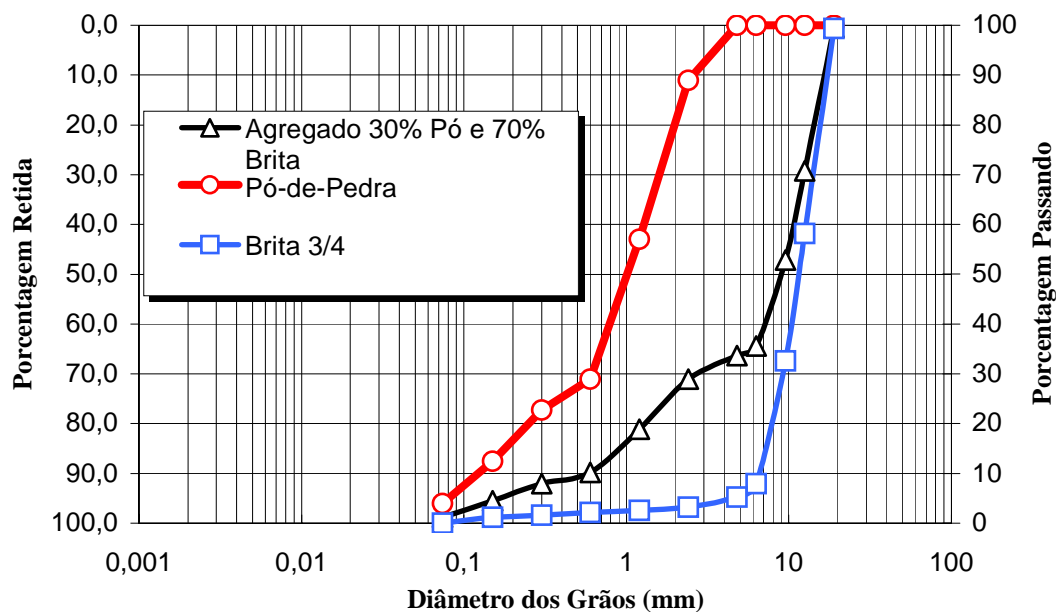


Figura 5 – Curva granulométrica do agregado e com seus materiais.

3.2.3 Água

A água utilizada nos ensaios foi extraída de poços artesianos localizados na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí) tendo sido passada pelo processo de destilação.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

3.3.1 Ensaio de Compactação

Para este ensaio foi extraído solo de um talude localizado aos fundos do prédio de engenharia civil, foi feito um destorroamento do solo, de forma que todo o material passasse pela peneira nº 4, este material foi colocado em estufa por vinte e quatro horas a uma temperatura de 60°C para perder toda a sua umidade. Após efetuar este processo foram colocados a brita 3/4 e o pó-de-brita em outra estufa por vinte e quatro horas a uma temperatura de 100°C para retirar toda a sua umidade.

Depois de todos os materiais encontrarem-se secos são feitos então as cinco misturas iguais, logo após adiciona-se na primeira mistura um teor de água conhecido, de forma que na curva de compactação defina dois pontos subindo no ramo seco e três descendo no ramo úmido, com isto são utilizados cinco amostras aumentando-se a cada uma destas um teor de 2% de umidade, procurando sempre fazer com que o primeiro ponto fique com 5% de umidade abaixo da ótima, para que sendo acrescidos de 2% em 2%, os últimos três pontos fiquem caindo. Com estes resultados traça-se então uma curva parabólica onde se consegue determinar a umidade ótima.

Por trabalhar-se com agregados graúdos optou-se então pela Energia Modificada de Compactação ou Ensaio de Proctor Modificado. Após efetuar as misturas com seus teores de umidade conhecidos, cada uma delas é colocada dentro de um cilindro com 152,4 mm de diâmetro e 182,00 mm de altura, conforme mostra a Figura 6. De cada amostra retirou-se duas cápsulas que são levadas à estufa para determinar sua umidade e sua densidade seca. Neste caso por se tratar de um material não homogêneo, optou-se por calcular a umidade teórica adicionada à mistura.

Na seqüência do ensaio, cada amostra é colocada dentro do cilindro em cinco camadas em que cada uma recebe 55 golpes de um soquete com 4,540 Kgf, caindo de uma altura de 45,72cm; posteriormente pesa-se o cilindro com a amostra de forma encontrar sua massa específica compactada. Traça-se então a curva de compactação e no ponto mais alto da curva encontra-se a umidade ótima e a densidade máxima aparente seca.



Figura 6 – Equipamento utilizado para o ensaio de Compactação

3.3.2 Ensaio de Califórnia Bearing R atio (CBR)

No ensaio de Califórnia Bearing R atio (CBR), também conhecido como  ndice de Suporte Califórnia (ISC), usou-se aproveitar a mesma amostra moldada para o ensaio de Proctor. Após a moldagem dos corpos-de-prova estes são imersos por 96 horas, durante este período   medida a expansão da amostra, conforme mostra a Figura 7.



Figura 7 – Amostra de CBR pronto para ser levado à imersão

Após as noventa e seis horas os corpos-de-prova são levados a uma prensa, onde se penetra um pistão na amostra conforme ilustra a Figura 8, aplica-se uma determinada carga com velocidades conhecidas, para que possa medir sua resistência.



Figura 8 – Prensa de CBR

O ensaio de CBR é um ensaio muito simples e muito utilizado na engenharia geotécnica. É sem dúvida uma das características mais aceitas para se avaliar o comportamento do solo.

Com os resultados obtidos consegue-se traçar uma curva de CBR, onde se conhece a pressão aplicada ao pistão e a sua penetração na amostra.

3.3.3 Ensaio do Coeficiente K de Condutividade Hidráulica

No ensaio usado para determinar o coeficiente K de condutividade hidráulica foram usadas cinco amostras todas elas moldadas na sua umidade ótima conhecida através do Ensaio de Proctor. Usou-se, também, a moldagem de uma amostra com 100% de solo de forma a encontrar o coeficiente K de Condutividade Hidráulica do solo, para fazer uma comparação com as demais amostras.

Este ensaio consiste em moldar o corpo de prova através de energia modificada, com suas respectivas umidades ótimas. Depois de moldado coloca-se dentro de um recipiente com água por noventa e seis horas como o do CBR, de forma a saturá-lo para que seus vazios compostos de ar sejam substituídos por água.

Depois de aguardar por noventa e seis horas o corpo-de-prova é preparado dentro de uma cuba, onde a água deve submergir a parte inferior do cilindro, como mostra a Figura 9.



Figura 9 – Corpo de prova pronto dentro da cuba.

A amostra é então submetida à pressão de vácuo conforme mostra a Figura 10. O objetivo da aplicação do vácuo é de que durante a execução do ensaio a água não encontre resistência nos caminhos por onde ela possa percolar.



Figura 10 – Amostra submetida à bomba de vácuo.

Depois de retirado todo o ar da amostra, começa-se então o ensaio, o corpo-de-prova é levado para uma coluna de água, conforme mostra a figura 11, onde se mede a altura da coluna de água até a lamina superior de água contida dentro da cuba.



Figura 11 – Aplicação de água na coluna.

Com estes dados consegue-se medir o tempo em que uma determinada quantidade de água leva para ultrapassar a minha amostra. Conhecendo então as medidas da amostra, a área do tubo de carga, o tempo de percolação e as alturas, consegue-se através da Equação 1 calcular o Coeficiente de Condutividade Hidráulica K.

$$K_T = 2,3 * ((a * L) / (A * t)) * \log (h_0 / h_1)$$

Equação 1

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A Tabela 10 mostra, de forma sucinta, os resultados das umidades aplicadas as misturas e das massas específicas aparentes máximas (γ_d max), obtidos em laboratório através do ensaio de Proctor.

Observa-se claramente que quanto maior a umidade ótima menor a massa específica máxima da mistura. No Apêndice I estão todas as fichas dos ensaios de Proctor.

Tabela 10 – Ensaios obtidos em laboratório

	10% S 90% A	20% S 80% A	30% S 70% A	40% S 60% A	50% S 50% A
Ponto	h (%) γ_d (kN/m ³)	h (%) γ_d (kN/m ³)	h (%) γ_d (kN/m ³)	h (%) γ_d (kN/m ³)	h (%) γ_d (kN/m ³)
1	3,33 22,24	4,17 20,34	6,33 20,05	6,50 19,39	10,00 18,17
2	5,33 22,43	6,17 21,42	8,33 19,86	8,50 18,97	12,00 19,45
3	7,33 22,82	8,17 22,17	10,33 21,30	10,50 20,71	14,00 19,81
4	9,33 23,41	10,17 22,54	12,33 20,60	12,50 20,81	16,00 19,40
5	11,33 22,41	12,17 21,99	14,33 20,43	14,50 19,98	18,00 18,96

Evidenciou-se ao longo dos ensaios algumas observações muito importantes para a utilização de algumas misturas. Notou-se que as misturas compostas de 90% e 80% de agregado, a medida em que recebiam o impacto do

soquete sobre a amostra, os agregados graúdos fraturavam-se devido ao grande atrito entre as partículas e a energia de compactação aplicada sobre o material; com isto acaba-se alterando as características do agregado, principalmente quanto a sua granulometria. Este fato por sua vez é presenciado também em campo quando há a ocorrência da passagem do rolo compactador sobre a pista.

A Figura 12 mostra a organização dos grãos depois de compactados e rompidos na prensa de CBR de uma amostra com 30% de solo e 70% de agregado.



Figura 12 – Organização dos grãos na amostra com 30% de solo e 70% de agregado

A Figura 13 apresenta as curvas de solo e das misturas solo-agregado além de outra comparativa contendo 100% de solo determinada por Bonafé (2003).

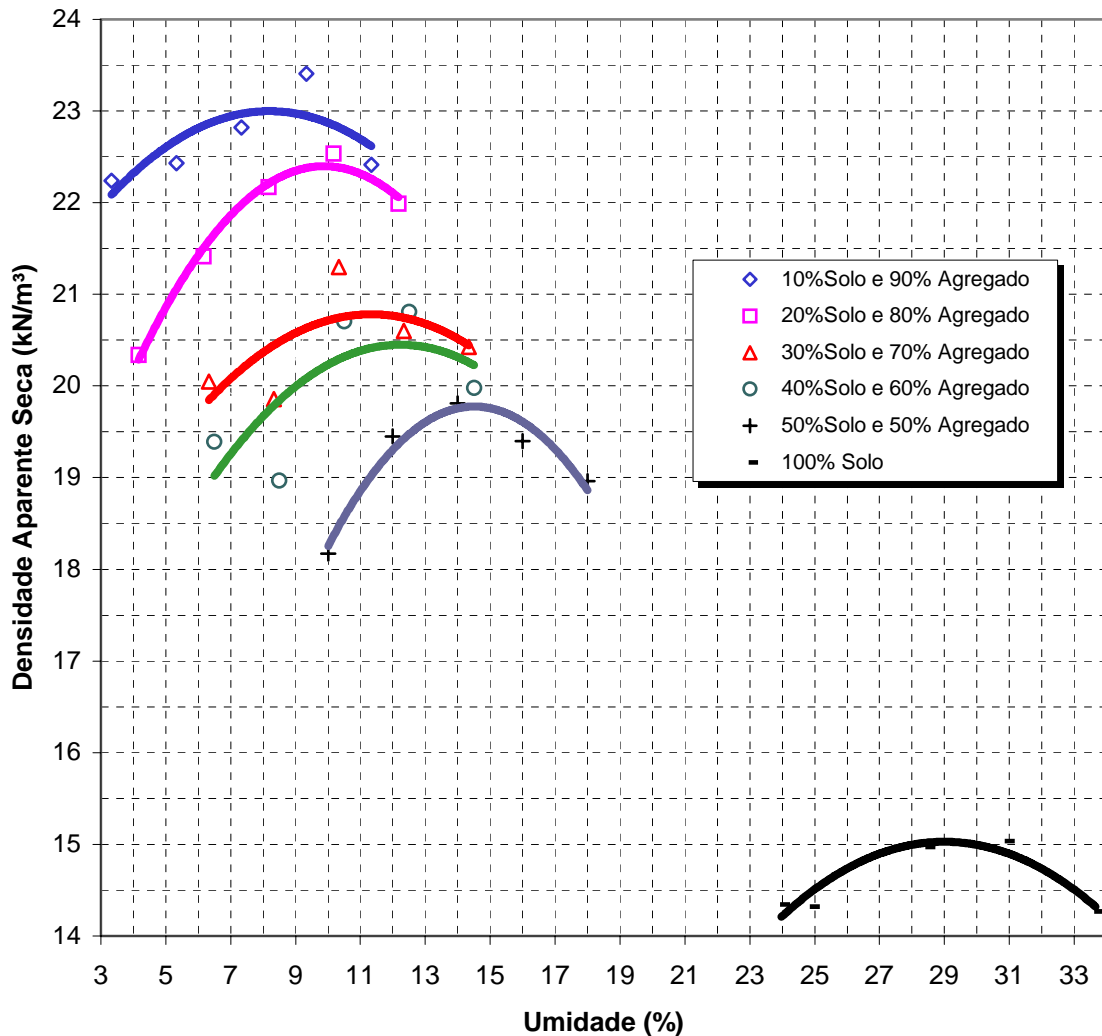


Figura 13 – Curvas de compactação das amostras estudadas.

Analisando os resultados do ensaio de compactação, verificou-se que ocorre a falta de um padrão homogêneo nas curvas, devido à natureza do ensaio e da heterogeneidade da mistura. Os materiais utilizados não possuem uma granulometria absolutamente constante e igualmente definidas, porém são bem visíveis à influência do teor de agregado na mistura.

A Tabela 11 apresenta de forma organizada os resultados do ensaio de Compactação para as misturas estudadas.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de Compactação

Mistura	h ótima	γ_d máximo
90% A 10% S	8,30	23,00
80% A 20% S	10,00	22,40
70% A 30% S	11,40	20,80
60% A 40% S	12,30	20,45
50% A 50% S	14,50	19,80

A Figura 14 mostra a influência do teor de agregado da mistura na umidade ótima obtida. Ressalta-se que o modelo possui um R^2 de 0,98, o que pode ser considerado muito satisfatório do ponto de vista estatístico, indicando que 98% da variabilidade dos resultados são aplicadas pelo modelo.

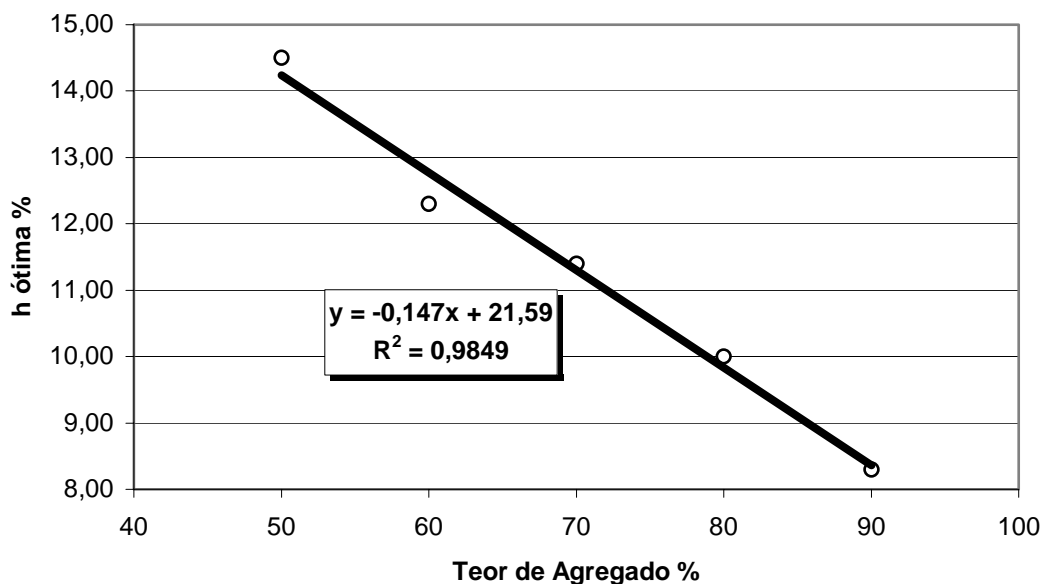


Figura 14 – Teor de Umidade para as Misturas

Nota-se que a medida em que se aumenta o teor de agregado a umidade ótima da mistura tende a diminuir, isto se deve ao agregado possuir uma

superfície específica menor que a do solo, consumindo assim menos água que as misturas com maior quantidade de solo.

Na Figura 15 apresenta-se ao gráfico expressando o γ_d máximo para cada mistura em relação ao teor de agregado.

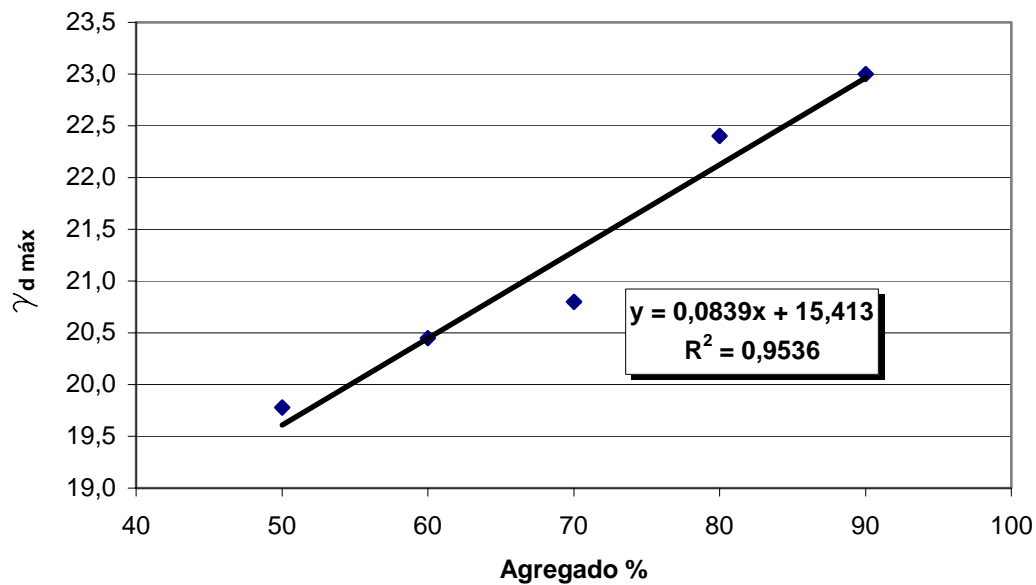


Figura 15 – Densidade aparente seca máxima em função da % de agregado

Da mesma forma observa-se que a medida em que se aumenta o teor de agregado na mistura, aumenta-se também a o γ_d da mistura, isto se deve à massa específica do agregado ser maior que a do solo. O coeficiente R^2 também apresenta um valor bastante satisfatório de 0,95.

4.2 ANALISE DO ENSAIO DO CALIFÓRNIA BEARING RÁTIIO (CBR)

A Tabela 12 mostra, para cada mistura os resultados de CBR obtidos em laboratório através do ensaio do Índice de Suporte Califórnia.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de CBR.

Ponto	10% S 90% A		20% S 80% A		30% S 70% A		40% S 60% A		50% S 50% A	
	h (%)	CBR (%)	h (%)	CBR (%)	h (%)	CBR (%)	h (%)	CBR (%)	h (%)	CBR (%)
1	3,33	15,10	4,17	6,79	6,33	6,44	6,50	5,99	10,00	8,52
2	5,33	80,25	6,17	31,65	8,33	15,15	8,50	12,13	12,00	22,28
3	7,33	32,54	8,17	35,71	10,33	29,87	10,50	23,62	14,00	24,24
4	9,33	23,42	10,17	6,59	12,33	6,29	12,50	16,06	16,00	5,28
5	11,33	50,62	12,17	2,56	14,33	4,57	14,50	3,87	18,00	1,85

Nota-se na Tabela 12 que os valores dos CBR mudam muito e não seguem uma perfeita tendência, isto se deve ao material não ser perfeitamente homogêneo e a natureza do ensaio. No momento em que é submetido à pressão no corpo-de-prova ocorre a mobilização do atrito entre os grãos do agregado graúdo, que em alguns momentos ocorrem o deslizamento e o rolamento entre os grãos, causando uma oscilação no ensaio.

Pode-se observar que algumas vezes o relógio comparador dava um repique, é neste exato momento que algumas partículas de agregado deslizam entre a massa de solo, alojando-se em algum outro lugar até encontrar resistência em outro agregado.

No Apêndice II estão contidos todas as fichas com os resultados dos ensaios de CBR.

A Figura 16 apresenta as curvas de CBR para as diferentes misturas, com seus diferentes teores de umidade.

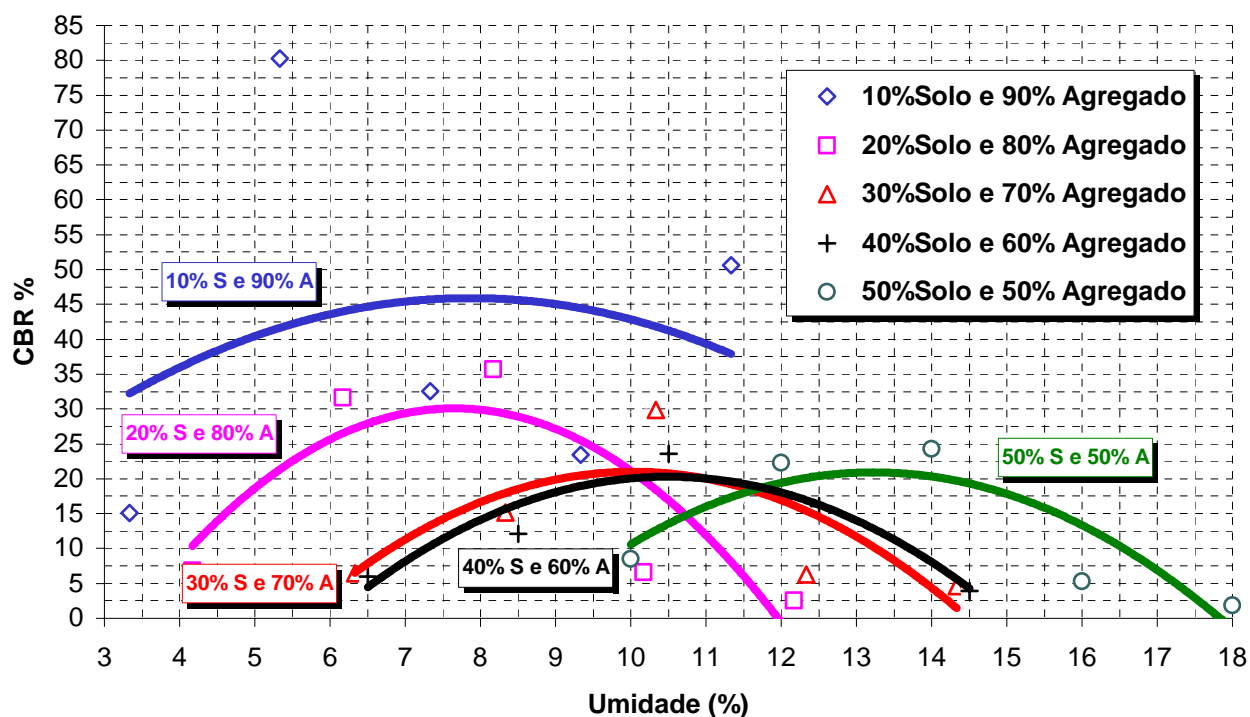


Figura 16 – Relação entre CBR e umidade

Nota-se que existe uma relação parabólica entre a umidade e o CBR.

Ressalta-se que, em campo, quando se compacta um material na umidade ótima busca-se a máxima resistência. No caso em estudo, notou-se que se compactando com a umidade um pouco abaixo da umidade ótima obtem-se o máximo valor para o CBR.

A Tabela 13 apresenta de forma organizada o valor de CBR para as umidades ótimas de cada mistura, com seus modelos e seus R^2 . Nota-se que o valor de R^2 são mais satisfatórios para as misturas com menores teores de agregado devido à homogeneidade da mistura.

Tabela 13 – Resultado da umidade ótima pelo CBR de cada mistura.

Mistura	h ótima	Modelo	R ²	CBR
90% A 10% S	8,30	$Y = -0,6662x^2 + 10,478x + 4,7112$	0,0446	45,78
80% A 20% S	10,00	$Y = -1,6243x^2 + 24,865x - 65,072$	0,7139	21,15
70% A 30% S	11,40	$Y = -1,0564x^2 + 21,196x - 85,307$	0,5949	19,03
60% A 40% S	12,30	$Y = -0,9948x^2 + 20,876x - 89,224$	0,8756	17,04
50% A 50% S	14,50	$Y = -0,9875x^2 + 26,133x - 151,98$	0,7484	19,32

A Figura 17 representa um gráfico do teor de agregado de cada mistura em função do CBR encontrado para cada uma delas. Nota-se que quanto maior a porcentagem de agregado maior é o valor de CBR, como era de se esperar.

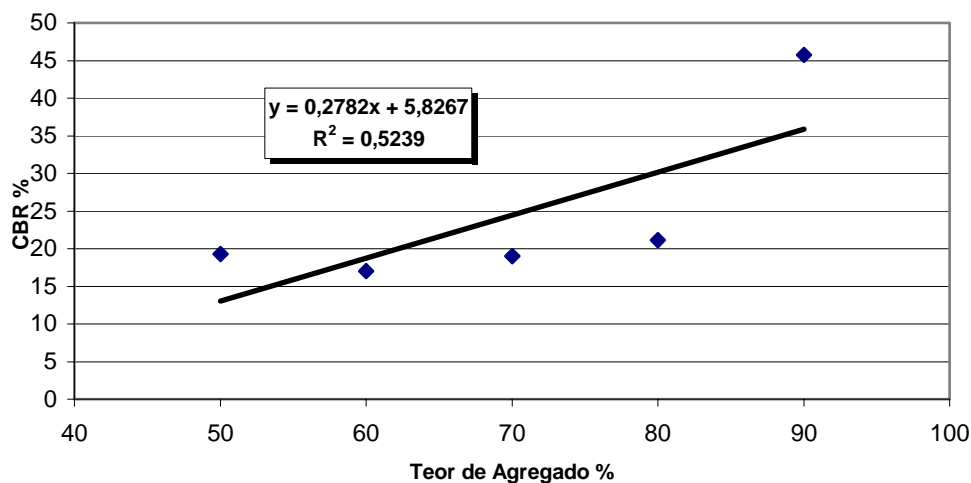


Figura 17 – CBR em relação ao teor de agregado.

Na Tabela 14 são apresentados todos os resultados de expansão do CBR para cada mistura, e estas com seus teores de umidades diferenciados.

Tabela 14 – Resultados obtidos no ensaio de expansão

Mistura	Expansão				
	1º Ponto	2º Ponto	3º Ponto	4º Ponto	5º Ponto
90% A 10% S	0,18	0,25	0,38	0,44	0,38
80% A 20% S	0,03	0,33	0,33	0,34	0,40
70% A 30% S	0,07	0,18	0,24	0,25	0,19
60% A 40% S	0,80	0,28	0,19	0,20	0,19
50% A 50% S	0,03	0,18	0,14	0,17	0,26

Os resultados obtidos no ensaio são bastante satisfatórios, pois estão absolutamente aceitos dentro das Normas do DAER e do DNER, que não podem ser superior a 1% para ser utilizado como camada de reforço e de 2% para ser utilizado como regularização de subleito (DAER, 1998). O solo estudado não apresenta problemas de expansão quando aplicado em pista.

Os problemas ocasionados por solos expansíveis são variáveis, pois o solo ganha volume ocasionando trincas, fissuras na parte superior do pavimento, fazendo com que haja a penetração de água nas camadas de base, podendo ocasionar fissuras superficiais na pista.

4.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)

Na Tabela 15 e na Figura 18 estão apresentados os resultados médios obtidos nos Ensaio de Determinação do Coeficiente de Condutividade Hidráulica em laboratório.

Tabela 15 – Misturas com umidades ótimas e suas permeabilidades

Mistura	h ótima (%)	K (m/s)
90% A 10% S	8,30	8,40E-06
80% A 20% S	10,00	9,20E-08
70% A 30% S	11,40	7,47E-08
60% A 40% S	12,30	4,32E-08
50% A 50% S	14,50	3,55E-08
100% Solo	29,00	1,09E-09

No Apêndice III estão contidas todas as fichas, com os resultados dos ensaios do Coeficiente de Condutividade Hidráulica K.

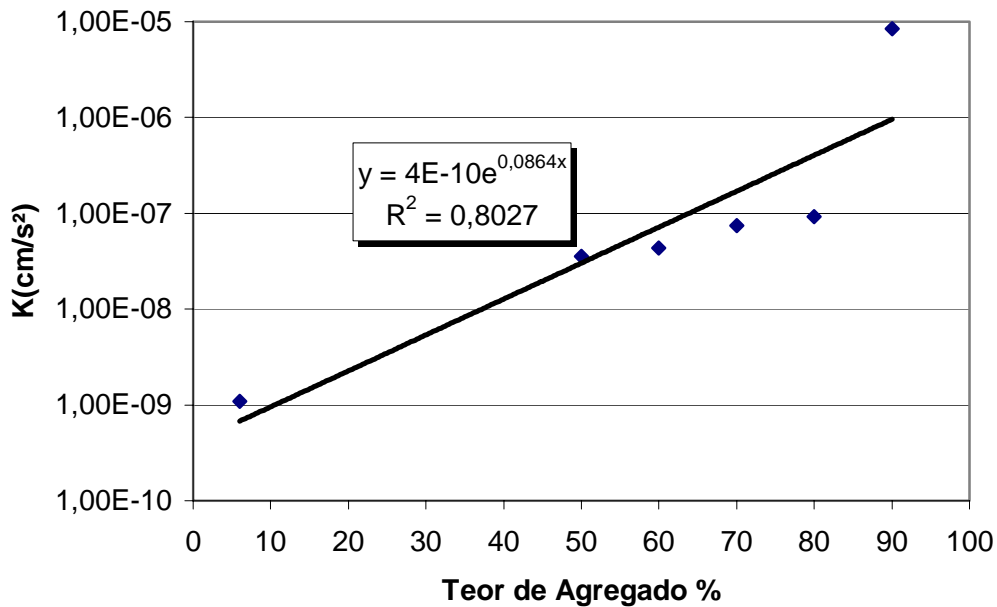


Figura 18 – Permeabilidade K em função da percentagem de agregado

Existe entre 50% e 80% uma variação sensível do K, entre 80% e 90%, um aumento substancial nos valores de K medidos. Este fato deve-se a mistura de 90% de agregado possuir pouco material fino que tenham a função de selar esta estrutura.

O reflexo deste alto valor de K é que a água poderá passar através desta camada atingindo substratos inferiores da rodovia. Outro fato importante é o aumento do potencial erosivo desta mistura com alta percentagem de agregado.

Considerando que foi apresentado sobre os valores de resistência medidas através do CBR, e da permeabilidade medida através do Coeficiente de Condutividade Hidráulica, nota-se que as misturas contendo entre 50% e 60 % de agregado são as que conseguem aliar características técnicas e um custo atrativo para aplicação na prática de engenharia rodoviária.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com o término deste trabalho obtiveram-se as seguintes conclusões:

Os ensaios feitos indicam que há uma grande alteração nas propriedades das misturas à medida que se modificam os teores de agregado. A medida em que se aumenta a percentagem de agregado consegue-se uma melhor resistência, mas isso torna o material mais permeável. Buscando-se aliar capacidade de suporte, baixa permeabilidade e custo atrativo, indica-se as misturas que contenham entre 50% e 60% de agregado.

Analisando os resultados obtidos na pesquisa, notou-se que existe uma grande influência da estabilização granulométrica nos parâmetros de compactação do solo, massa específica aparente máxima e a umidade ótima, sendo que a medida em que se aumenta o teor de agregado em uma mistura, diminui a umidade ótima e aumenta a massa específica aparente máxima da amostra.

Observando a influência da estabilização granulométrica na capacidade de suporte do solo medido através do Índice de Suporte Califórnia (ISC), notou-se que à medida que se aumenta o teor de agregado a mistura consegue-se um aumento de resistência na capacidade de suporte do solo. Isto se deve a mistura se aproximar de 100% do teor de agregado onde há um teórico CBR de 100%.

Ao determinar a influência da estabilização granulométrica na permeabilidade da amostra, através do ensaio do Coeficiente de Condutividade Hidráulica, constatou-se que quanto maior o teor de agregado adicionado à mistura, maior a permeabilidade do material, devido a pouca quantidade de ligante, função esta representada pelo solo.

Enfim, é admitido usar estes dados em locais com solo e rocha com as mesmas características físicas, granulométricas do material estudado, não se indica o uso deste estudo para locais com materiais de características diferentes. No caso da utilização de novos materiais indica-se a execução dos mesmos ensaios utilizados no presente estudo, de forma obter a capacidade de suporte do novo material e seu Coeficiente de Condutividade Hidráulica K.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como tema para trabalhos futuros e continuidade ao presente trabalho sugere-se:

→ Analisar outros tipos de materiais alternativos, como utilização de basalto em decomposição e outros tipos de solos com diferentes percentagens de areia.

→ Adicionar a esta mistura materiais cimentantes, tais como cimento e cal.

→ Refazer o presente estudo fazendo uso de teores mais baixo de agregado, menos de 50%.

→ Utilizar a adição de fibras não poluentes como fator de resistência da camada superficial.

→ Realizar a construção de trechos experimentais em escala real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO JÚNIOR, F. *Estradas Vicinais de Terra*. 2.ed. São Paulo: [Pini], 1988.

BEASSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. *Estradas Rurais, Técnicas Adequadas de Manutenção*. 1.ed. Florianópolis: [s.ed.], 2003.

BONAFÉ, L. *Relatório de Estágio Supervisionado II*. Curso de Engenharia Civil. Ijuí. UNIJUÍ, 2003.

MEDINA, J. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MELLO, J. C. *Transportes: Presente e Futuro*. 33^a Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, 2001.

OLIVEIRA, J. A. *Revista Estradas pesquisa de materiais alternativos de pavimentação*. A necessidade de praticá-los. 2001. p.42-7.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/Carlos de Sousa Pinto*. – São Paulo: Oficina de Textos, 2000-02-15.

PONTES FILHO, G. *Estradas de Rodagem Projeto Geométrico*. São Carlos. 1998.

SENÇO, W. *Manual de Técnicas de Pavimentação*.– Obras de Terra. 6º edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

VARGAS, M. *Introdução à Mecânica dos Solos*. 1º edição, São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1977.

VIECILI, C. *Determinação dos Parâmetros de Resistência do Solo de Ijuí Apartir do Ensaio de Cisalhamento Direto*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Ijuí. UNIJUÍ, 2003.

WALLAU, J. R. *Relatório de Estágio Supervisionado II*. Curso de Engenharia Civil. Ijuí. UNIJUI, 2003.

YODER, E. J. ; WITCZAK, M. W. W. *Principles of Pavement Design*. Nova Iorque: John Willey e Sons, INC, 1975.

