

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO  
DO RIO GRANDE DO SUL - UNIJUI**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

**Curso de Engenharia Civil**

**Ricardo Klein Novroth**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE  
DIFERENTES AGLOMERANTES PARA ESTABILIZAÇÃO  
DE SOLOS**

**Ijuí - RS**

**2009**

**Ricardo Klein Novroth**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE  
DIFERENTES AGLOMERANTES PARA ESTABILIZAÇÃO DE  
SOLOS**

Professor Orientador: Luciano Pivoto Specht

**Trabalho de conclusão de curso de  
Engenharia Civil apresentado como  
requisito parcial para obtenção do  
grau de Engenheiro Civil.**

**Ijuí  
2009**

## **Folha de Aprovação**

**Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua  
forma final pelo professor orientador e pela banca  
examinadora.**

---

Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht - Orientador  
UNIJUÍ/DeTec

Banca Examinadora

---

Prof. MSc. Paulo César Rodrigues  
UNIJUÍ/DeTec

*Dedico este trabalho à minha mãe Lisete, irmãos  
Álvaro e Marcelo e namorada Josiane.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos colegas de graduação Alex R. Granich, André Luiz Bock, Diego A. Hartmann (Dieguito), Dimas A. S. Rambo, Jaélson *Polaco* Budny, Fernando *Gordo* Boeira, João H. *Nino* Pasquali, Ricardo F. Rupp e muitos outros pela convivência nestes anos de faculdade, bagunça e risadas nas aulas, laboratórios e fora dos limites da universidade. Um grande abraço pra vocês!

Deixo um agradecimento especial para Carlos *Cayto* Correia e Silva, grande amigo que ajudou muito nos ensaios de laboratório para a concretização deste trabalho. Valeu, cara!

Ao professor Luciano Pivoto Specht pela brilhante orientação neste estudo e por me transmitir um pouco de seu imenso conhecimento na sala de aula e em projetos de pesquisa que participei.

Agradeço também ao meu pai, Alfredo F. Novroth, que durante esses anos me ajudou muitas vezes de várias maneiras. Sei que estavas torcendo por mim a cada dia.

As pessoas que citarei a seguir merecem muito mais que um simples obrigado pois são pessoas importantíssimas na minha vida; pessoas diretamente responsáveis pela minha graduação; pessoas que tenho um grande e profundo amor e que as levarei no coração até o fim dos tempos. Muito obrigado por tudo, mãe Lisete, irmãos Álvaro e Marcelo e minha namorada Josiane. Amo muito vocês.

## RESUMO

O solo por ser um material abundante e de fácil obtenção em qualquer lugar do mundo, tem grandes potencialidades para ser usado como material de construção, além de ser onde as obras de engenharia estão apoiadas e descarregando seus esforços. É necessário, porém, em alguns casos, que o solo seja melhorado a fim de atender alguns requisitos, como o aumento da sua resistência. A partir dessa necessidade procurou-se definir qual o tipo e o teor de aglomerante apresenta a melhor relação custo/benefício para a estabilização química de dois tipos de solos encontrados na região do município de Ijuí-RS, o solo da formação Serra Geral e da formação Tupanciretã. Para tal foram coletadas amostras de solos em diferentes locais e ensaiadas em laboratório de acordo com as características de compactação inerentes a cada tipo de solo. Após definidas as propriedades dos solos em estudo, foram moldados CP's (corpos-de-prova) cilíndricos de 5cm de diâmetro por 10cm de altura utilizando 4 tipos de aglomerantes e 5 teores diferentes para posterior ensaio de RCS (resistência à compressão simples). Os aglomerantes utilizados foram a cal cálcica CH-I, a cal dolomítica CH-I, o cimento Portland CP-IV e o cimento Portland CP-II F32, em teores de 6%, 9%, 12%, 15% e 18%. Os resultados do ensaio de RCS foram analisados graficamente e constatou-se que a utilização das cales como agentes estabilizadores não apresentou uma boa relação custo/benefício devido à baixa resistência atingida pelos CP's; já os CP's moldados com cimento Portland atingiram elevadas resistências e conseqüentemente uma boa relação custo/benefício. Com a análise dos dados finais do estudo conclui-se que o solo da formação Serra Geral apresenta melhores resultados com este tipo de estabilização que o solo da formação Tupanciretã; e que estabilização química com as cales não pode ser utilizada por não atingir a resistência de 2100kPa aos sete dias de cura, que é o mínimo exigido para bases e sub-bases de pavimentos, visto que estes CP's não atingiram esta marca nem com os teores mais elevados de aglomerante.

**Palavras-chave:** solo-cimento; solo-cal; estabilização.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de industrialização da cal.....	18
Figura 2: Princípio de estabilização de solos argilosos com cal.....	19
Figura 3: Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul.....	26
Figura 4: Solo e aglomerante prontos para a mistura.....	28
Figura 5: Misturas prontas de solo e aglomerante em diferentes teores.....	28
Figura 6: Corpo-de-prova parcialmente desmoldado.....	29
Figura 7: Corpo-de-prova desmoldado.....	30
Figura 8: Medição de um CP com uso de paquímetro.....	31
Figura 9: ensaio RCS na prensa manual.....	32
Figura 10: CP após ensaio de RCS.....	32
Figura 11: Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cal cálcica.....	35
Figura 12: Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cal dolomítica.....	37
Figura 13: Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cimento Portland CP-IV.....	39
Figura 14: Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cimento Portland CP-II F32..	41
Figura 15: Gráfico da RCS dos CP's moldados com o solo da formação Tupanciretã	42
Figura 16: Gráfico da RCS dos CP's moldados com o solo da formação Serra Geral	43
Figura 17: Custos de todos os teores para cada metro cúbico de mistura.....	44
Figura 18: gráfico da RCS <i>versus</i> Custo para o solo da formação Tupanciretã.....	45
Figura 19: custos para cada metro cúbico de mistura.....	46
Figura 20: gráfico RCS <i>versus</i> Custo para o solo da formação Serra Geral.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Demonstrativo dos aglomerantes e respectivos teores.....	23
Tabela 2: Composição do solo da formação Serra Geral.....	24
Tabela 3: Propriedades físicas do solo da formação Serra Geral.....	24
Tabela 4: Composição do solo da formação Tupanciretã.....	25
Tabela 5: Propriedades físicas do solo da formação Tupanciretã.....	25
Tabela 6: Valores da RCS para os CP's estabilizados com cal cálcica.....	34
Tabela 7: Valores de RCS para a cal dolomítica.....	36
Tabela 8: Valores de RCS para CP's moldados com cimento Portland CP-IV.....	38
Tabela 9: Valores de RCS para CP's moldados com cimento Portland CP-II F32	40



## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

$\sigma$  = tensão

$\gamma_d$  = peso específico aparente seco

$^{\circ}\text{C}$  = graus Celsius

A = área

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

a.C. = antes de Cristo

ASTM = American Society for Testing Materials

$\text{CaCO}_3$  = carbonato de cálcio

$\text{CaO}$  = óxido de cálcio

$\text{Ca(OH)}_2$  = hidróxido de cálcio

$\text{CaSiO}_3$  = silicato de cálcio

CBR = California Bearing Ratio

cm = centímetros

$\text{CO}_2$  = dióxido de carbono

CP = corpo-de-prova

G = peso específico real dos grãos

IA = Índice de atividade

IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IP = Índice de plasticidade

kg = quilograma

kgf = quilograma força

kN = quilo Newton

kPa = quilo Pascal

LEC = Laboratório de Engenharia Civil – UNIJUÍ

LL = Limite de liquidez

LP = Limite de plasticidade

$\text{m}^3$  = metro cúbico

MG = Minas Gerais

$\text{MgCO}_3$  = carbonato de magnésio

$\text{MgO}$  = óxido de magnésio

P = carga

RCS = Resistência à compressão simples

RS = Rio Grande do Sul

SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB = Transportation Research Board

UNIJUÍ = Universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do Sul

## Sumário

<b>Item</b>	<b>Pág.</b>
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Tema da Pesquisa.....	13
1.2 Delimitação do Tema.....	13
1.3 Formulação da questão de estudo.....	13
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1 <i>Objetivo geral</i> .....	14
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	14
1.5 Justificativas.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Estabilização de Solos.....	15
2.1.1 <i>Estabilização mecânica</i> .....	16
2.1.2 <i>Estabilização granulométrica</i> .....	17
2.1.3 <i>Estabilização química</i> .....	17
3. METODOLOGIA.....	23
3.1 Classificação do estudo.....	23
3.2 Planejamento da pesquisa.....	23
3.3 Materiais.....	24
3.3.1 <i>Solos</i> .....	24
3.3.2 <i>Cimento Portland</i> .....	27
3.3.3 <i>Cales</i> .....	27
3.3.4 <i>Água</i> .....	27
3.4 Procedimentos experimentais.....	27
3.4.1 <i>Preparação das amostras</i> .....	27
3.4.2 <i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples</i> .....	30
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	33
4.1 Resistência das amostras com o uso de cal.....	34
4.1.1 <i>Cal cálcica</i> .....	34
4.1.2 <i>Cal dolomítica</i> .....	36
4.2 Resistência das amostras com o uso de cimento.....	38

4.2.1 Cimento Portland CP-IV.....	38
4.2.2 Cimento Portland CP-II F32.....	40
4.3 Resistência do solo da formação Tupanciretã.....	42
4.4 Resistência do solo da formação Serra Geral.....	43
4.5 Análise dos custos.....	44
4.5.1 Solo da formação Tupanciretã.....	44
4.5.2 Solo da formação Serra Geral.....	46
CONCLUSÕES.....	47
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXOS.....	52

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é Estabilização de Solos.

## 1.2 Delimitação do Tema

Esta pesquisa limitou-se a estudar os efeitos da estabilização química de solos encontrados na região de Ijuí-RS.

## 1.3 Formulação da questão de estudo

O solo por ser um material abundante e de fácil obtenção, é largamente usado como material de construção em qualquer lugar do mundo. Para alguns usos, porém, ele deve ser melhorado de tal forma a atender certos requisitos, como aumento da sua resistência. A partir dessa idéia foi definido o tipo e o teor de aglomerante que apresenta a melhor relação custo/benefício para estabilização de diferentes tipos de solos. Neste contexto a questão que balizou a pesquisa é: Qual o tipo de aglomerante e seu respectivo teor que apresenta os melhores resultados para estabilização de diferentes tipos de solos?

## 1.4 Objetivos

Os objetivos do estudo estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos, apresentados a seguir:

### **1.4.1 Objetivo geral**

Este trabalho teve como objetivo verificar os efeitos da estabilização química em dois solos distintos encontrados na região de Ijuí – RS.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

Foram definidos como objetivos específicos:

- Definir as características físicas dos solos em estudo, sua classificação e parâmetros de compactação;
- Determinar o tipo aglomerante e seu respectivo teor para obtenção da maior resistência à compressão simples das amostras de solo;
- Definir qual o aglomerante e seu respectivo teor que apresenta a melhor relação custo/benefício para a estabilização de solos.

## **1.5 Justificativas**

Tendo em vista que o solo é base de toda e qualquer obra de engenharia e também é largamente utilizado como material de construção, espera-se que este atenda às solicitações impostas com segurança; mas muitas vezes isto não ocorre, o que torna necessário algum tipo de intervenção para torná-lo apto a resistir às solicitações.

A estabilização química é uma opção muito interessante para o melhoramento de solos, visto que esta técnica é relativamente simples de ser aplicada e apresenta bons resultados se executada de forma correta.

Desta forma o estudo deste tipo de estabilização de solos se torna imprescindível, pois assim as obras poderão ser beneficiadas com maior segurança e confiabilidade, menores custos e menores ocorrências de patologias ligadas a recalques e movimentações do solo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A prática da engenharia geralmente depara-se com diversos problemas ligados diretamente ao solo, seja como fundação ou como material de construção. Esses problemas quase sempre são causados pela baixa resistência do mesmo para suportar as cargas impostas.

Como afirmado por Ingles e Metcalf (1972), o solo é um material complexo e variável, porém muito fácil de ser obtido, o que torna o seu uso interessante como material de engenharia, mas para tal, três decisões devem ser tomadas, sendo elas:

- aceitar o solo com suas características normais e projetar conforme as restrições impostas;
- substituir o solo local por outro de melhor qualidade;
- criar um novo material alterando as propriedades do solo.

Visando melhorar a qualidade do solo foram desenvolvidos vários processos que levam a atingir esse objetivo, dos quais pode-se citar a estabilização mecânica, estabilização granulométrica e a estabilização química.

A seguir será feita uma revisão bibliográfica do assunto visando o esclarecimento do mesmo.

### 2.1 Estabilização de Solos

De acordo com Caputo (1988), o termo estabilização, em sua acepção geral, designa qualquer processo ou tratamento capaz de melhorar a estabilidade de um maciço terroso ou rochoso. Já Capper e Cassie (1970) afirmam que a estabilização compreende qualquer processo que aumente ou mantenha inalterada a resistência natural do solo.

Vargas (1978) define como estabilização de solos, o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas ou à erosão por meio de compactação, correção da granulometria e da sua plasticidade e da adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de suas partículas.

### **2.1.1 Estabilização mecânica**

Objetivando um contato mais íntimo das partículas constituintes do solo pela expulsão de ar e conseqüente redução do índice de vazios, aplica-se pressão, impacto ou vibração para se obter o grau de compactação esperado, segundo Pinto (2000).

Esta técnica é caracterizada pela simples aplicação de pressão, impacto ou vibração, sem nenhum tipo de incorporação de qualquer material ao solo, o que a torna muito simples de ser executada.

Muito importante nesse tipo de estabilização é a umidade na qual o solo vai ser compactado, pois para cada solo existe um teor de umidade que trará a maior massa específica seca; Pinto (2000) afirma que em umidade baixa o atrito entre as partículas é muito grande, e não se consegue uma redução significativa do índice de vazios; por outro lado, uma umidade elevada também não consegue expulsar o ar dos vazios do solo, pois este encontra-se envolto por água.

A técnica de compactação de solos é creditada ao engenheiro americano Proctor, que em 1933 publicou seus estudos em compactação de aterros, mostrando que para uma certa energia de compactação, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Dos trabalhos de Proctor surgiu o mundialmente utilizado e padronizado Ensaio de Compactação, mais conhecido como ensaio de Proctor (Pinto, 2000).



## 2.1.2 Estabilização granulométrica

Para um solo que não tenha naturalmente boas características, este poderá ser corrigido granulometricamente, adicionando-lhe ou retirando-lhe certas quantidades de suas frações constituintes, a fim de que a curva granulométrica resultante venha a cair dentro dos limites exigidos ou tenha a mesma forma da curva de Talbot. Muitas vezes, não é possível uma simples correção, mas em solos que predominam pedregulhos, areias ou siltes e argilas, é feita uma composição artificial das frações e suas devidas proporções, a fim de se obter a granulometria final desejada, como citado por Vargas (1914).

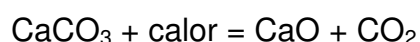
## 2.1.3 Estabilização química

Também conhecida como estabilização por adição de aglutinantes, definida pela adição de substâncias que aumentam a coesão entre os grãos do solo, empregando-se o cimento ou a cal, conforme Caputo (1988).

### 2.1.3.1 Cal

A cal é o principal produto derivado dos calcários, dolomitos e conchas calcárias. É obtida através da calcinação, que é a decomposição térmica das matérias-primas citadas, resultando em dois produtos, a cal e dióxido de carbono, conforme reação química seguinte, de acordo com Guimarães (1998).

Para os carbonatos de cálcio:



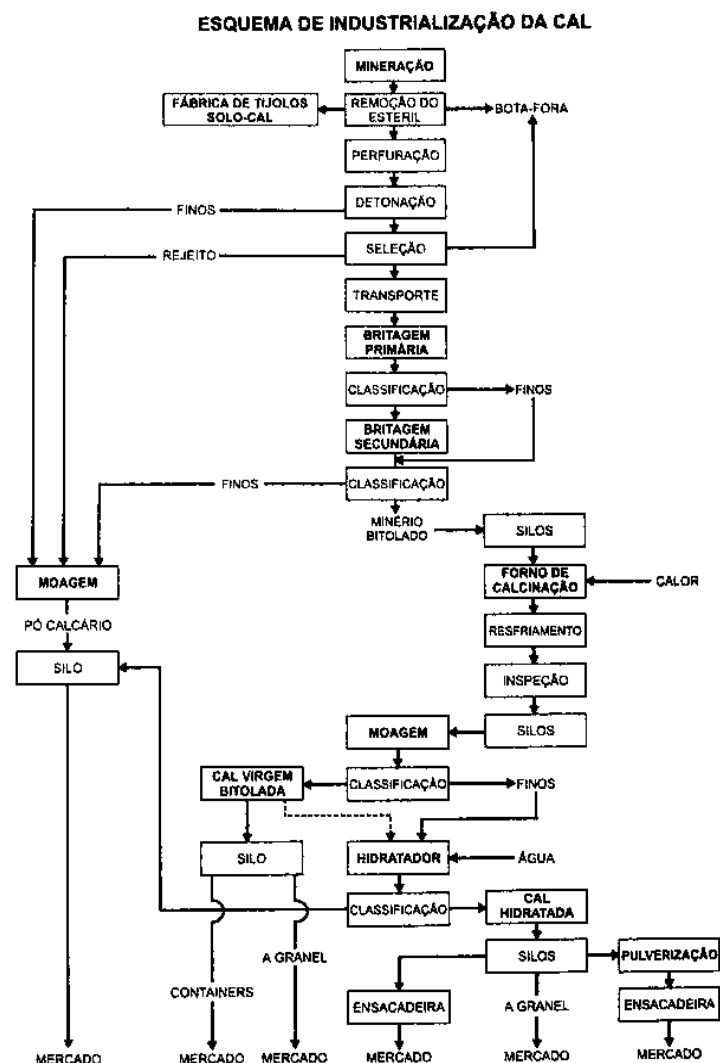
Para os carbonatos de magnésio:



Guimarães (1998) fala que o resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio são, respectivamente, os óxidos de cálcio (CaO) e de cálcio-magnésio (CaO-MgO), denominados de cal virgem, cal aérea ou cal viva.

Ainda segundo Guimarães (1998), a qualidade química do produto depende das características e impurezas contidas na rocha que lhe deu origem, assim sendo, temos a cal cálcica que contém alto teor de óxido de cálcio; a cal dolomítica, onde a relação entre os óxidos de cálcio e magnésio é balanceada; e por fim, a cal magnésiana, que possui o teor de óxido de magnésio intermediário entre a cal cálcica e a cal dolomítica.

A seguir, na Figura 1 está apresentado o esquema de industrialização da cal:



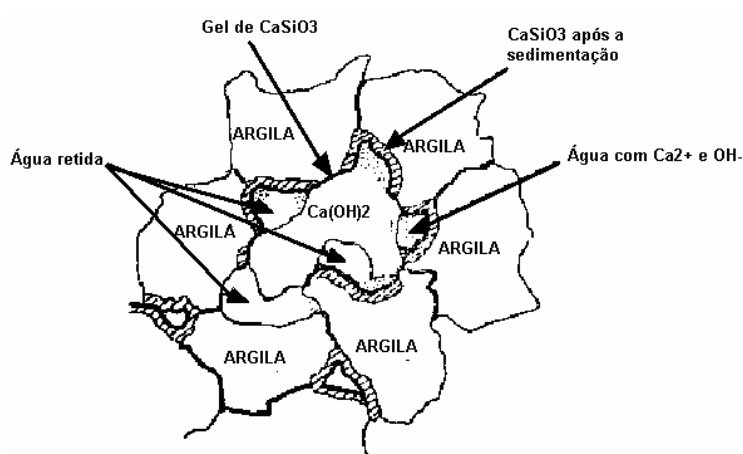
**Figura 1:** Esquema de industrialização da cal

Fonte: Guimarães (1998)

A cal hidratada resulta do prosseguimento do processo industrial que dá origem à cal virgem, e o produto final que pode ser seco ou com aspecto de creme, lama, leite ou solução saturada depende do volume de água utilizado para a reação de hidratação da cal virgem, de acordo com Guimarães (1998).

Na reação de hidratação da cal virgem ocorre uma grande liberação de calor, como na hidratação da cal cálcica, onde um quilo de cal cálcica virgem pode elevar a temperatura de 2,3 kg de água de 12° a 100°C, conforme Guimarães (1998).

Van Impe (1989) afirma que a cal traz vantagens para a estabilização de solos coesivos, tais como as argilas. Na estabilização de solos utilizando a cal, esta reage com os minerais da argila, criando um gel de silicato de cálcio insolúvel em água e que mantém as partículas de solo juntas, como nota-se na Figura 2, a seguir:



**Figura 2:** Princípio de estabilização de solos argilosos com cal

Fonte: Van Impe (1989)

Há indícios históricos muito antigos do uso da cal, como no período Paleolítico Superior, onde misturada com outras substâncias, servia de tinta para pinturas rupestres feitas pelos homens Cro-Magnon, tal como os olhos e as narinas do bisão encontrado na Gruta de Lascaux, no Vale do Vegère, ao sudoeste da França.

Embora haja evidências do uso da cal ao longo da maior parte da existência humana, apenas com a civilização egípcia que o produto começa a aparecer com frequência nas construções, e do Egito a arte de manipulá-la seguiu para Roma e depois para outras regiões mediterrâneas e circunvizinhas, segundo Guimarães (1998).

Guimarães (1998) comenta que a mais antiga aplicação da cal como aglomerante foi feita numa laje de 25 cm de espessura no pátio da Vila de Lepenke-Vir, hoje Iugoslávia, em 5600 a.C.; também pode-se citar a construção da Via Apia, em Roma em 312 a.C., que teve a sua base feita com solo-cal; e a Muralha da China completada na Dinastia Chin em 228 a.C., na qual as fundações também foram feitas com a incorporação desse material.

É difícil seguir a trilha deixada pela cal ao longo da evolução das civilizações, pois esta é sempre citada esporadicamente por historiadores; mas mesmo assim é inegável que a cal deixou sua marca indelével na história do homem, tanto que seu valor foi reconhecido através de um verso do gênio de Michelangelo, de acordo com Guimarães (1998):

*“Queima o calcário e da cinza nasce aquilo  
Que para sempre liga pedras numa só  
Enrijecida pelo tempo, resiste à neve e ao sol  
Tornando-se de mais valia para dias sem conta”.*

Tendo esses fatos históricos como exemplo, é evidente a participação e a importância da cal na história do homem, pois desde os primórdios das civilizações ela é utilizada amplamente como material de construção.

### 2.1.3.2 Cimento Portland

Em 1824, em Leeds na Inglaterra, o pedreiro Joseph Aspdin requereu patente sobre um novo produto cimentoso, que foi batizado de cimento Portland. Este nome foi dado devido à coloração que o produto atingia após a hidratação, muito semelhante ao calcário encontrado na Ilha de Portland. No pedido de patente constava que o calcário era moído com argila em meio úmido até se transformar em um pó impalpável. A água era, então, evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de canos com vapor, e os blocos secos eram calcinados em fornos semelhantes aos de cal e depois moídos, conta Guimarães (1998).

O cimento Portland é um dos principais produtos utilizados na construção civil, pois é usado geralmente como aglomerante em argamassas e concretos. O seu uso como estabilizante de solos remonta ao início do século 20, alguns anos após a sua invenção.

Bauer (2001) afirma que o descobrimento do solo-cimento foi mérito de um engenheiro inglês, H. E. Brook-Bradley, que aplicou o produto no tratamento de leitos de estradas para veículos de tração animal, ao sul da Inglaterra. Nos Estados Unidos da América o uso do solo-cimento acontece a partir de 1917, quando o engenheiro T. H. Amies o utilizava, e por conseqüência o material recebeu o nome de soloamies. Os primeiros estudos de solo-cimento em grande escala foram feitos por Moore-Fields e Mill, também nos Estados Unidos da América em 1932. Em 1944 a American Society for Testing Materials (ASTM) normalizava os ensaios para utilização do produto.

O solo-cimento é uma mistura íntima e bem proporcionada de solo com cimento Portland e água, promovendo uma cimentação das partículas de solo e assim melhorando as propriedades da mistura como resistência mecânica, durabilidade e a resistência à ação da água, segundo Bauer (2001).

Apesar de o solo-cimento ser um material versátil, podendo ser usado na construção de paredes monolíticas, o seu maior uso compreende a estabilização de solos como base de pavimentos rodoviários.

Qualquer cimento pode ser utilizado para a estabilização de solos, mas o mais amplamente utilizado é o cimento Portland comum; como também quase qualquer tipo de solo, a não ser aqueles solos com altos teores de matéria orgânica, de acordo com Ingles e Metcalf (1972).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Classificação do Estudo

Esta pesquisa classifica-se como quantitativa, pois amostras de solo foram coletadas em campo, preparadas e ensaiadas em laboratório e os resultados pertinentes analisados graficamente.

#### 3.2 Planejamento da Pesquisa

A coleta de dados se deu pela determinação da Resistência à Compressão Simples (RCS) de corpos-de-prova (CP's) moldados com diferentes tipos de solo, diferentes aglomerantes e em diversos teores, como exemplificado a seguir:

- 2 tipos de solos;
- 4 tipos de aglomerantes;
- 5 teores para cada aglomerante;
- 4 CP's para cada teor.

Os CP's foram moldados em diferentes teores de aglomerantes, sendo eles apresentados a seguir na Tabela 1:

**Tabela 1:** Demonstrativo dos aglomerantes e respectivos teores

Aglomerantes	Teores				
Cal dolomítica (RS)	6%	9%	12%	15%	18%
Cal cálcica (MG)	6%	9%	12%	15%	18%
Cimento Portland CP II F-32	6%	9%	12%	15%	18%
Cimento Portland CP IV	6%	9%	12%	15%	18%

### 3.3 Materiais

#### 3.3.1 Solos

Neste estudo foram utilizados dois tipos de solos distintos coletados na região do município de Ijuí – RS.

O primeiro solo, coletado no campus da Universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, pertencente à formação Serra Geral granulometricamente classificado como argila, de acordo com a TRB classifica-se como um solo A-7-5 e conforme a SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) é um silte de alta compressibilidade (MH), apresentando na sua composição granulométrica as seguintes características, de acordo com Bonafé (2004):

**Tabela 2:** Composição do solo da formação Serra Geral

<i>Tamanho do grão</i>	<i>Fração</i>
Argila	85%
Silte	10%
Areia fina	4,12%
Areia média	0,72%
Areia grossa	0,16%

Fonte: Bonafé (2004)

As propriedades físicas deste solo são apresentadas a seguir na Tabela 3:

**Tabela 3:** Propriedades físicas do solo da formação Serra Geral

<b>Propriedades</b>	<b>Valores Médios</b>
Limite de Liquidez (LL)	59%
Limite de Plasticidade (LP)	47,03%
Índice de Plasticidade (IP)	11,97%
Peso específico real dos grãos (G)	28,52 kN/m <sup>3</sup>
Índice de atividade (IA)	0,14

Fonte: Bonafé (2004)



Este solo apresenta, ainda, para a energia normal de compactação um peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) de 13,93 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima para compactação de 32,3%.

O segundo solo utilizado neste estudo foi coletado próximo ao município de Cruz Alta – RS, município vizinho ao de Ijuí – RS. Este solo, embora sua localização esteja próxima ao solo da formação Serra-geral, pertence à formação Tupanciretã, representada por um solo mais arenoso, sendo classificado granulometricamente como areia fina, segundo a TRB como um solo A-6 e pela SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) como sendo areia argilosa (SC).

A seguir, na Tabela 4, estão apresentadas as porções constituintes de cada tamanho de partículas para este solo.

**Tabela 4:** Composição do solo da formação Tupanciretã

<b>Tamanho do grão</b>	<b>Fração</b>
Argila	39,26%
Silte	9,66%
Areia fina	48,08%
Areia média	2,74%
Areia grossa	0,14%
Pedregulho	0,12%

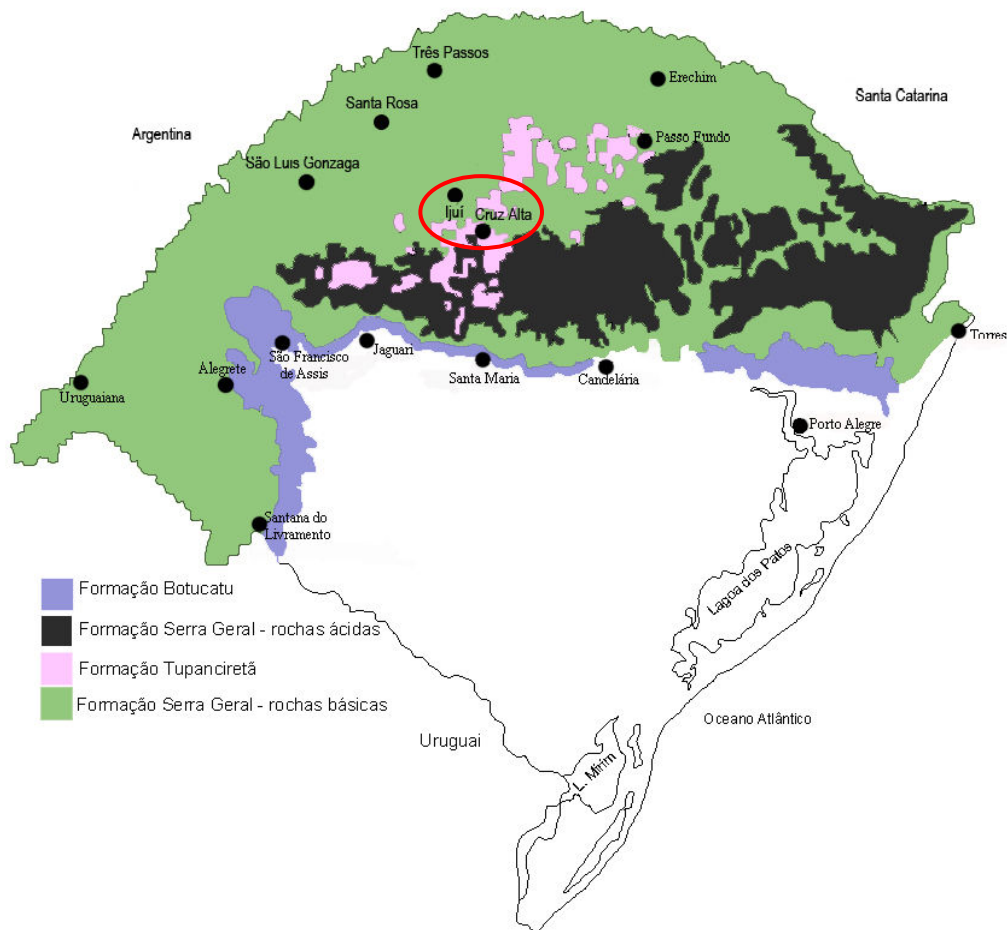
As propriedades físicas deste solo também foram definidas em ensaios de laboratório e estão abaixo, na Tabela 5:

**Tabela 5:** Propriedades físicas do solo da formação Tupanciretã

<b>Propriedades</b>	<b>Valores Médios</b>
Limite de Liquidez (LL)	36,5%
Limite de Plasticidade (LP)	17,19%
Índice de Plasticidade (IP)	19,31%
Peso específico real dos grãos (G)	24,82 kN/m <sup>3</sup>

Na energia normal de compactação este solo apresentou uma máxima densidade aparente de 17,2 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 14,5%.

O mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul está apresentado a seguir na Figura 3, onde podemos localizar as diferentes formações geológicas dos solos em estudo.



**Figura 3:** Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul

Fonte: IBGE (2008)

### **3.3.2 Cimento Portland**

Na moldagem dos CP's foram utilizados dois tipos de cimento Portland, sendo eles o cimento Portland CP-II F-32 da marca Itambé, e o cimento Portland CP-IV da Votoran, encontrados nas lojas de materiais de construção da cidade de Ijuí – RS.

### **3.3.3 Cales**

Para esse estudo, dois tipos de cales foram empregadas, ambas do tipo CH-I, uma delas é a cal encontrada no estado do Rio Grande do Sul, classificada como cal dolomítica, com os teores de óxido de cálcio e de magnésio balanceados; e a cal cálcica proveniente de Belo Horizonte-MG, na qual predomina o óxido de cálcio.

### **3.3.4 Água**

A água utilizada na moldagem dos CP's é a disponível na rede hidráulica do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) e é classificada como água potável.

## **3.4 Procedimentos Experimentais**

### **3.4.1 Preparação das amostras**

Após a coleta, o solo foi seco em estufa a 60 °C até atingir a umidade de 0% para posterior destorroamento e peneiramento na peneira ABNT 40.

Depois de seco e destorroado, o solo foi misturado com a quantidade (teor) de aglomerante calculada de acordo com a massa de solo seco para posterior adição de água, referente à umidade ótima do solo.

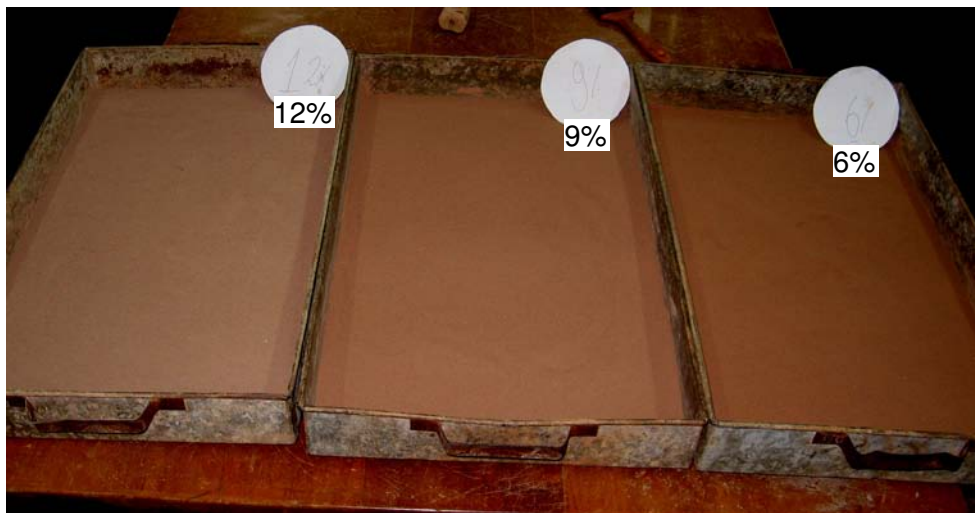
Na Figura 4 é apresentada uma imagem do solo e do aglomerante prontos para serem misturados.



**Figura 4:** Solo e aglomerante prontos para a mistura

Com a mistura do solo e aglomerante executada de forma correta, obtém-se um novo material homogêneo e de coloração diferente dos seus componentes de origem.

Na Figura 5 nota-se claramente que os materiais estão intimamente misturados, e com o aumento do teor de aglomerante há uma consequente alteração na cor da mistura.

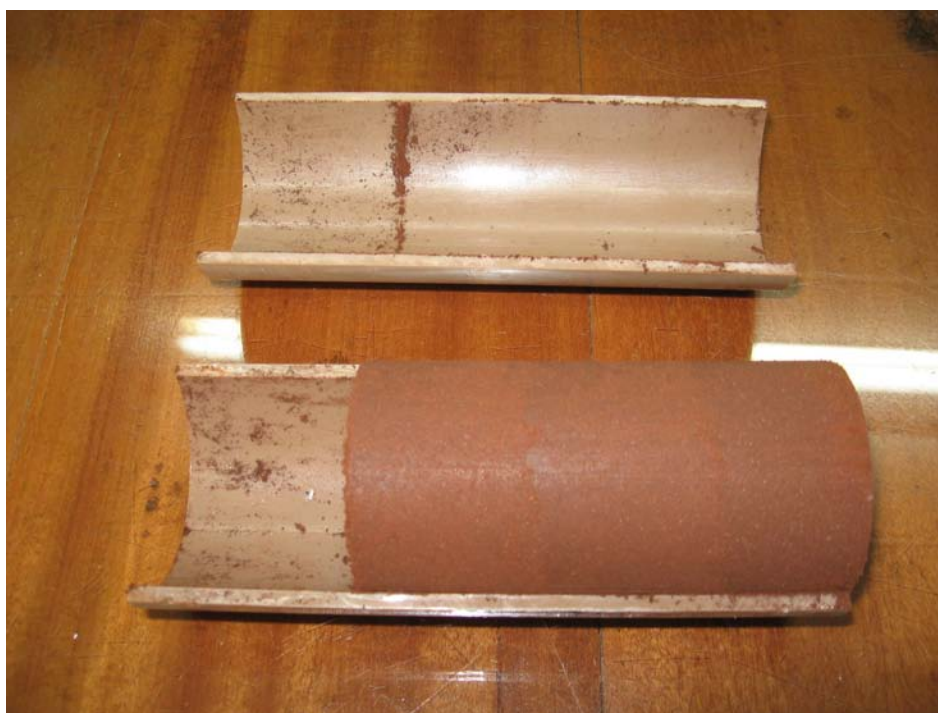


**Figura 5:** Misturas prontas de solo e aglomerante em diferentes teores

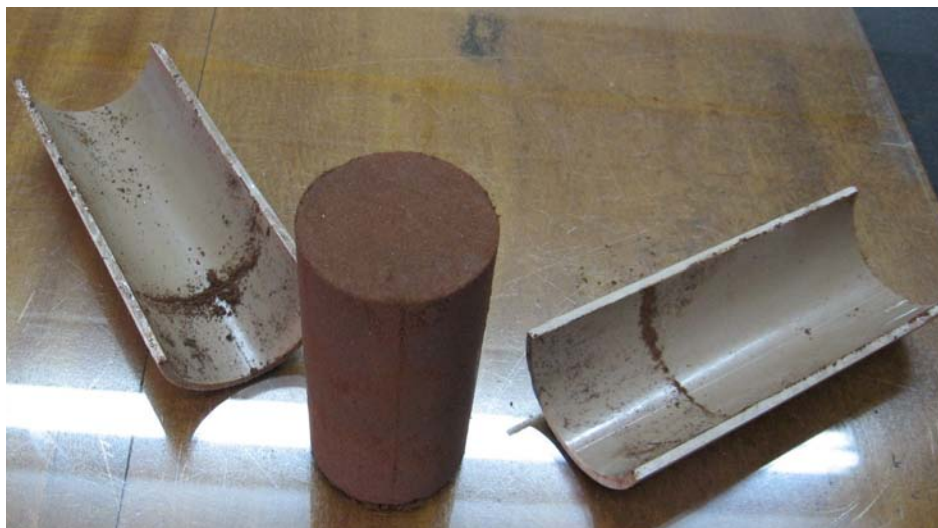
Depois de os materiais pulverulentos serem misturados, adicionou-se a água de acordo com a umidade ótima do solo que estava sendo trabalhado, e fez-se uma nova etapa de mistura a fim de se obter a mesma umidade em toda a porção.

A moldagem procedeu-se, então, pela compactação de três camadas de mesma massa dessa mistura sobrepostas, formando um CP de 10cm de altura e 5cm de diâmetro. Após a moldagem, ainda dentro dos moldes, os CP's foram colocados em sacos plásticos impermeáveis e levados para a câmara úmida, onde ficaram por 24 horas, para posterior desmoldagem.

Nas Figuras 6 e 7 a seguir, é detalhada a desmoldagem de um CP:



**Figura 6:** Corpo-de-prova parcialmente desmoldado



**Figura 7 : Corpo-de-prova desmoldado**

A cura dos CP's deu-se pelo seu armazenamento na câmara úmida do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) onde a temperatura é controlada em 25° C. Os CP's foram mantidos em sacos plásticos impermeáveis durante todo o tempo de cura, que foi de 28 dias, sendo que no vigésimo sétimo dia estes foram retirados dos sacos plásticos e imersos em água por 24 horas, completando assim 28 dias de cura.

### **3.4.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples**

Este ensaio consiste em aplicar um carregamento vertical nos CP's com uma velocidade pré-determinada pela norma ABNT NBR 12025 (1990) e com a ajuda de uma célula de carga é possível conhecer a força de tal carregamento.

A prensa utilizada para a ruptura dos CP's foi da marca SoloTest, do tipo manual, para rompimento de CBR (California Bearing Ratio), e a leitura da força pela célula de carga da marca Alfa Instrumentos modelo Z-500 de capacidade nominal de 500 kgf (quilogramas-força). No intuito de não danificar a prensa manual e a célula de carga, os CP's que excederiam a capacidade nominal desses equipamentos foram ensaiados em uma prensa elétrica para rompimento de CP's de concreto da marca Emic de capacidade de 200.000 kgf.

No ensaio de RCS é aplicado um carregamento vertical nos CP's até que estes se rompam, então com o valor da carga aplicada e a área média das faces dos CP's é possível determinar a resistência de cada um deles de acordo com a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

onde:  $\sigma$  = tensão

P = carga

A = área

Na Figura 8 a seguir vê-se a medição de um CP para posterior ensaio de RCS:



**Figura 8:** Medição de um CP com uso de paquímetro

Após a medição do diâmetro de cada face do CP e consequente cálculo da área média das faces, procedeu-se ao ensaio de RCS, como ilustrado a seguir na Figura 9:



**Figura 9:** ensaio RCS na prensa manual

Como citado anteriormente, os CP's com teor de aglomerante mais elevado foram ensaiados em uma prensa elétrica de maior capacidade que a manual, prevenindo a célula de carga bem como a própria prensa de um possível dano resultante do alto carregamento necessário para romper estes corpos-de-prova.

Na Figura 10 exibida a seguir observa-se um CP rompido no formato tronco-cônico, tipo de rompimento característico do ensaio de RCS:



**Figura 10:** CP após ensaio de RCS



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o ensaio de RCS da totalidade dos CP's fez-se a análise gráfica dos resultados de modo a determinar qual aglomerante e seu teor obteve o melhor rendimento para cada tipo de solo estudado.

As tabelas apresentadas neste capítulo contém os valores de RCS de todos os CP's como também a média e a média corrigida das resistências. O solo "T" e o solo "S" apresentados nestas tabelas, correspondem respectivamente, ao solo da formação Tupanciretã e Serra Geral.

Cada gráfico da RCS *versus* teor de aglomerante apresenta a resistência dos CP's dos dois tipos de solos estudados, sendo que os dados obtidos passaram por uma correção onde os valores que foram 10% maiores ou 10% menores do valor médio de resistência deixaram de ser considerados no cálculo, gerando uma média de valores corrigida. Logo os gráficos mostram a média normal e a média corrigida da resistência dos CP's.

Na tentativa de melhor se visualizar a diferença das resistências para os diferentes teores de aglomerantes, adicionou-se aos gráficos linhas de tendência. As linhas cheias correspondem as médias normais das resistências e as linhas pontilhadas mostram a tendência das médias corrigidas.

É importante salientar que as linhas de tendência normais e corrigidas ficaram quase que totalmente sobrepostas nos gráficos, o que demonstra que houve boa repetitividade nos procedimentos experimentais.

Além da resistência dos CP's, definiu-se também os custos das estabilizações para os diferentes aglomerantes e teores estudados para os dois tipos de solos visando apontar qual apresenta a melhor relação custo/benefício na eventual aplicação do método em obras de engenharia.

## 4.1 Resistência das amostras com o uso de cal

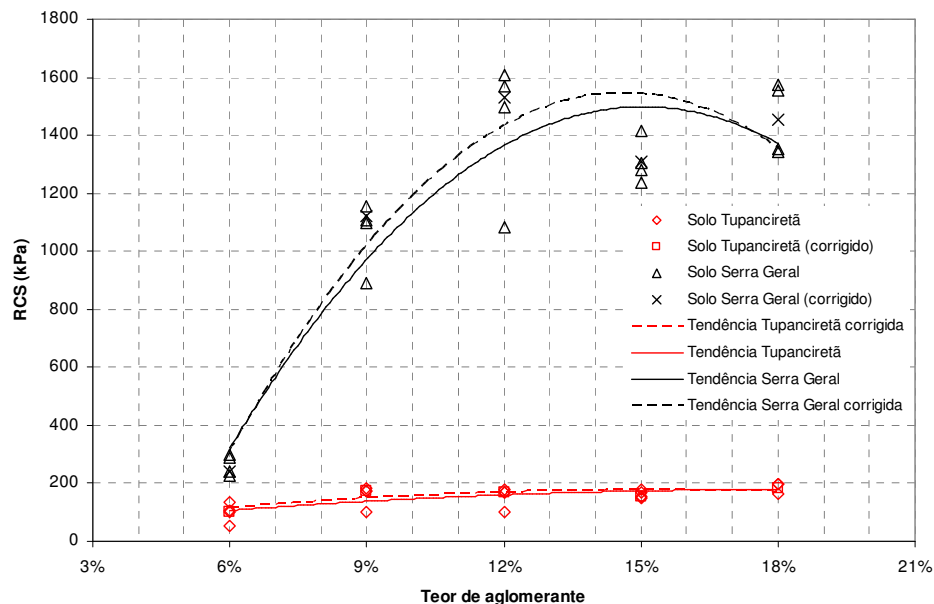
### 4.1.1 Cal cálcica

O ensaio de RCS para os CP's moldados com cal cálcica resultou nos valores apresentados na Tabela 6 a seguir:

**Tabela 6:** Valores da RCS para os CP's estabilizados com cal cálcica

Corpo de Prova	Solo	Teor	Tensão (kPa)	Média tensão (kPa)	Média corrigida (kPa)
1	T	6%	101,12	<b>97,98</b>	<b>103,29</b>
2	T	6%	51,19		
3	T	6%	134,13		
4	T	6%	105,47		
5	T	9%	174,84	<b>157,11</b>	<b>171,83</b>
6	T	9%	100,41		
7	T	9%	181,38		
8	T	9%	171,83		
9	T	12%	176,87	<b>154,55</b>	<b>169,51</b>
10	T	12%	170,11		
11	T	12%	169,51		
12	T	12%	101,72		
13	T	15%	-	<b>160,58</b>	<b>152,30</b>
14	T	15%	177,16		
15	T	15%	153,23		
16	T	15%	151,37		
17	T	18%	167,56	<b>182,20</b>	<b>182,20</b>
18	T	18%	199,44		
19	T	18%	164,96		
20	T	18%	196,83		
81	S	6%	297,42	<b>262,93</b>	<b>238,95</b>
82	S	6%	238,95		
83	S	6%	224,98		
84	S	6%	290,37		
85	S	9%	891,95	<b>1063,12</b>	<b>1120,17</b>
86	S	9%	1107,74		
87	S	9%	1098,06		
88	S	9%	1154,71		
89	S	12%	1607,94	<b>1438,61</b>	<b>1532,84</b>
90	S	12%	1568,47		
91	S	12%	1497,21		
92	S	12%	1080,82		
93	S	15%	1238,36	<b>1308,30</b>	<b>1308,30</b>
94	S	15%	1302,58		
95	S	15%	1278,59		
96	S	15%	1413,66		
97	S	18%	1572,56	<b>1455,28</b>	<b>1455,28</b>
98	S	18%	1340,51		
99	S	18%	1352,86		
100	S	18%	1555,20		

A seguir na Figura 11 é apresentado o gráfico plotado com os valores da RCS obtidos pelos CP's e suas médias corrigidas:



**Figura 11:** Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cal cálcica

Analisando o gráfico percebe-se que o uso da cal cálcica não foi satisfatório para a estabilização do solo da formação Tupanciretã, pois este não atingiu altas resistências mesmo com teores elevados do aglomerante. O solo da formação Serra Geral com o uso deste aglomerante apresentou a maior resistência.

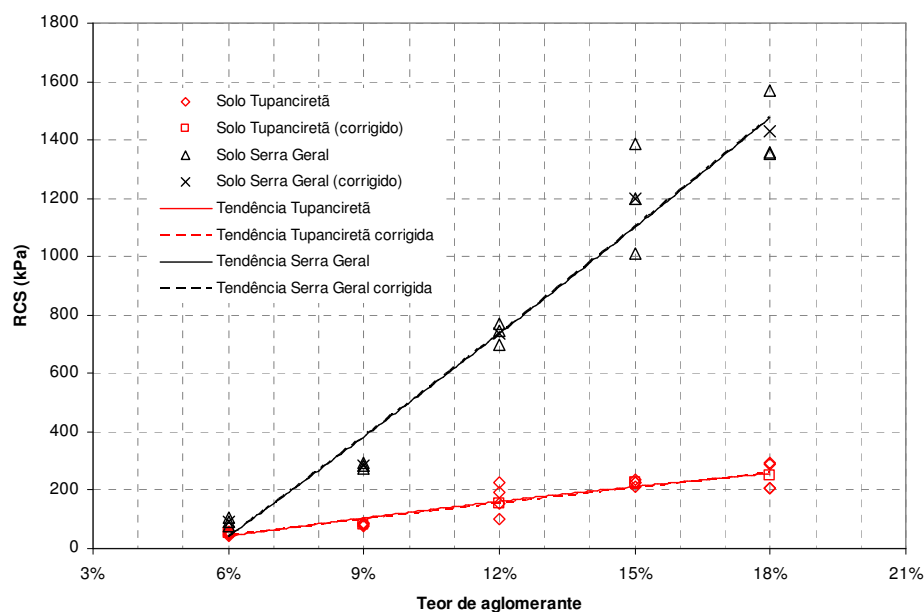
#### 4.1.2 Cal dolomítica

A Tabela 7 a seguir traz os valores da RCS dos CP's moldados com a cal dolomítica:

**Tabela 7:** Valores de RCS para a cal dolomítica

Corpo de Prova	Solo	Teor	Tensão (kPa)	Média tensão (kPa)	Média corrigida (kPa)
21	T	6%	49,84	<b>51,66</b>	<b>51,44</b>
22	T	6%	53,04		
23	T	6%	59,61		
24	T	6%	44,16		
25	T	9%	76,82	<b>83,62</b>	<b>83,62</b>
26	T	9%	87,45		
27	T	9%	83,59		
28	T	9%	86,61		
29	T	12%	225,85	<b>168,24</b>	<b>154,63</b>
30	T	12%	192,47		
31	T	12%	100,00		
32	T	12%	154,63		
33	T	15%	224,87	<b>224,39</b>	<b>224,39</b>
34	T	15%	225,52		
35	T	15%	209,58		
36	T	15%	237,60		
37	T	18%	294,27	<b>249,78</b>	<b>249,78</b>
38	T	18%	288,53		
39	T	18%	207,61		
40	T	18%	208,71		
A22	S	6%	77,14	<b>91,40</b>	<b>89,84</b>
A23	S	6%	107,23		
A24	S	6%	89,84		
A25	S	9%	282,81	<b>283,52</b>	<b>283,52</b>
A26	S	9%	291,43		
A27	S	9%	276,32		
A28	S	12%	745,87		
A29	S	12%	695,49	<b>737,78</b>	<b>737,78</b>
A30	S	12%	771,97		
A31	S	15%	1387,71		
A32	S	15%	1008,84	<b>1198,56</b>	<b>1199,13</b>
A33	S	15%	1199,13		
A34	S	18%	1569,80		
A35	S	18%	1354,56	<b>1427,99</b>	<b>1427,99</b>
A36	S	18%	1359,61		

O gráfico da Figura 12 mostra os resultados de RCS obtidos pelos com a cal dolomítica:



**Figura 12:** Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cal dolomítica

Comparando o gráfico da Figura 12 com o anterior da Figura 11 nota-se que o uso da cal cálcica (MG) ou da dolomítica (RS) não altera significativamente os valores da resistência dos CP's, tornando o uso da cal dolomítica mais racional devido ao menor custo, por não incidir o alto valor do frete considerado para a cal cálcica.

## 4.2 Resistência das amostras com o uso de cimento

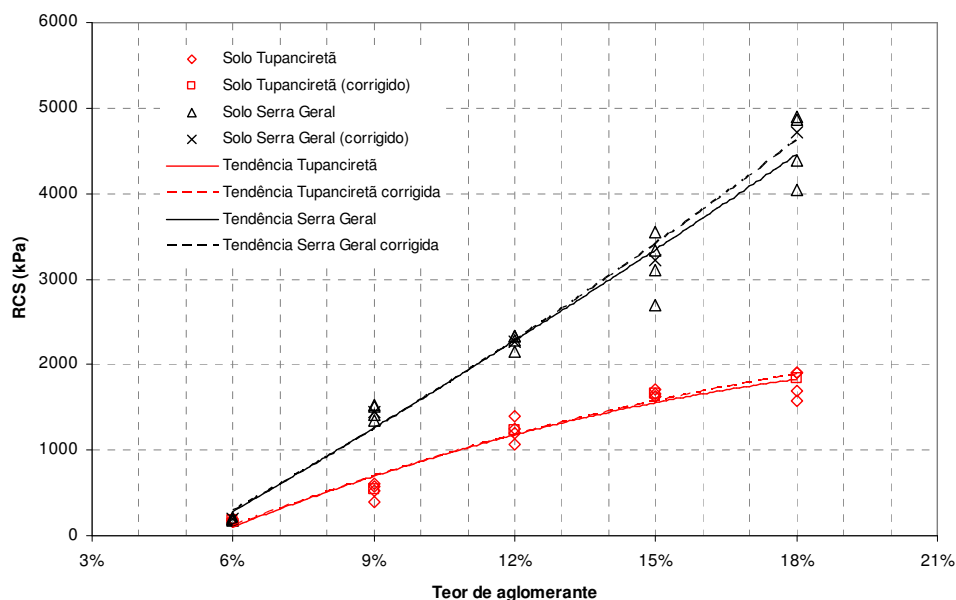
### 4.2.1 Cimento Portland CP-IV

A seguir na Tabela 8 são apresentados os valores de RCS para a moldagem com o cimento Portland CP-IV:

**Tabela 8:** Valores de RCS para CP's moldados com cimento Portland CP-IV

Corpo de Prova	Solo	Teor	Tensão (kPa)	Média tensão (kPa)	Média corrigida (kPa)
41	T	6%	179,56	<b>179,86</b>	<b>179,86</b>
42	T	6%	170,23		
43	T	6%	192,23		
44	T	6%	177,44		
45	T	9%	519,75	<b>526,09</b>	<b>547,25</b>
46	T	9%	613,12		
47	T	9%	396,75		
48	T	9%	574,74		
49	T	12%	1205,72	<b>1231,58</b>	<b>1225,12</b>
50	T	12%	1244,53		
51	T	12%	1401,54		
52	T	12%	1074,54		
53	T	15%	1631,95	<b>1658,04</b>	<b>1658,04</b>
54	T	15%	1665,43		
55	T	15%	1705,42		
56	T	15%	1629,37		
57	T	18%	1898,91	<b>1769,30</b>	<b>1833,23</b>
58	T	18%	1577,51		
59	T	18%	1902,68		
60	T	18%	1698,10		
61	S	6%	197,81	<b>191,56</b>	<b>191,56</b>
62	S	6%	206,53		
63	S	6%	177,55		
64	S	6%	184,35		
65	S	9%	1513,37	<b>1447,65</b>	<b>1447,65</b>
66	S	9%	1344,85		
67	S	9%	1524,08		
68	S	9%	1408,31		
69	S	12%	2327,34	<b>2272,89</b>	<b>2272,89</b>
70	S	12%	2151,71		
71	S	12%	2332,62		
72	S	12%	2279,87		
73	S	15%	3330,83	<b>3171,06</b>	<b>3220,90</b>
74	S	15%	3110,96		
75	S	15%	2689,88		
76	S	15%	3552,56		
77	S	18%	4036,87	<b>4548,32</b>	<b>4718,81</b>
78	S	18%	4382,02		
79	S	18%	4871,66		
80	S	18%	4902,73		

No gráfico apresentado na Figura 13 observa-se o grande ganho de resistência dos CP's comparados às cales:



**Figura 13:** Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cimento Portland CP-IV

Com o uso desse cimento a resistência dos CP's aumentou muito significativamente, tanto para o solo da formação Serra Geral como o da Tupanciretã, mas ainda o solo da formação Serra Geral obteve maiores valores de resistência comparando-o com o solo da formação Tupanciretã.

#### 4.2.2 Cimento Portland CP-II F32

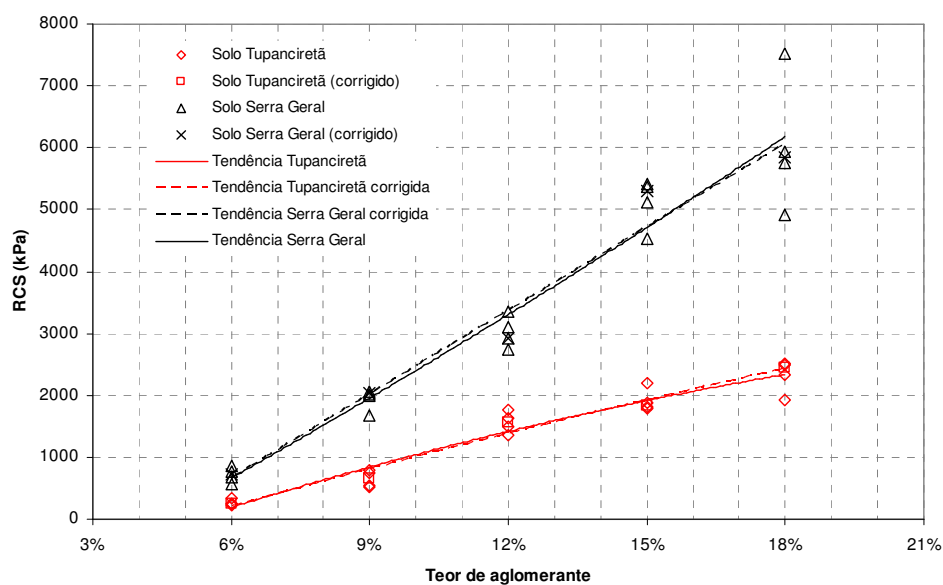
Tem-se a seguir a Tabela 9 com a apresentação dos resultados do ensaio de RCS para os CP's que tiveram o cimento Portland CP-II F32 como aglomerante:

**Tabela 9:** Valores de RCS para CP's moldados com cimento Portland CP-II F32

Corpo de Prova	Solo	Teor	Tensão (kPa)	Média tensão (kPa)	Média corrigida (kPa)
101	T	6%	258,29	<b>264,54</b>	<b>249,31</b>
102	T	6%	219,04		
103	T	6%	240,33		
104	T	6%	340,50		
105	T	9%	530,73	<b>649,00</b>	<b>649,00</b>
106	T	9%	539,52		
107	T	9%	742,40		
108	T	9%	783,37		
109	T	12%	1494,34	<b>1562,63</b>	<b>1559,12</b>
110	T	12%	1357,47		
111	T	12%	1774,82		
112	T	12%	1623,89		
113	T	15%	2187,83	<b>1922,79</b>	<b>1834,44</b>
114	T	15%	1890,51		
115	T	15%	1819,40		
116	T	15%	1793,40		
117	T	18%	1927,44	<b>2313,99</b>	<b>2442,84</b>
118	T	18%	2514,66		
119	T	18%	2488,80		
120	T	18%	2325,06		
121	S	6%	860,79	<b>722,77</b>	<b>726,54</b>
122	S	6%	577,23		
123	S	6%	766,37		
124	S	6%	686,70		
125	S	9%	1996,81	<b>1941,77</b>	<b>2030,23</b>
126	S	9%	2026,76		
127	S	9%	1676,42		
128	S	9%	2067,11		
129	S	12%	2917,57	<b>3025,34</b>	<b>2918,12</b>
130	S	12%	3346,99		
131	S	12%	2739,01		
132	S	12%	3097,79		
133	S	15%	4543,73	<b>5107,19</b>	<b>5295,02</b>
134	S	15%	5115,22		
135	S	15%	5409,98		
136	S	15%	5359,85		
137	S	18%	5946,68	<b>6034,19</b>	<b>5847,33</b>
138	S	18%	5747,99		
139	S	18%	7526,64		
140	S	18%	4915,44		



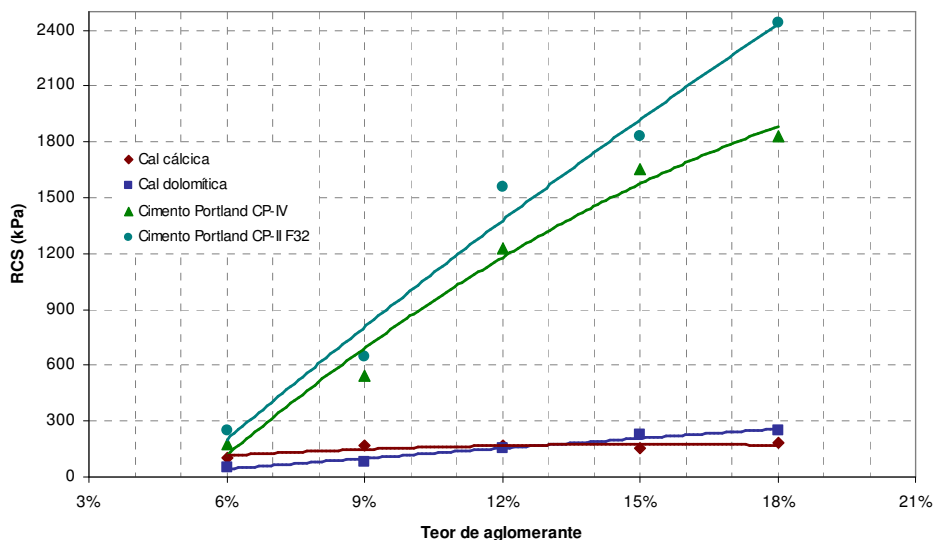
A utilização do cimento Portland CP-II F32 conferiu aos dois tipos de solos valores de resistência elevados, os maiores obtidos neste estudo, como pode-se constatar no gráfico da Figura 14:



**Figura 14:** Gráfico da RCS dos CP's estabilizados com cimento Portland CP-II F32

### 4.3 Resistência do solo da formação Tupanciretã

No gráfico da Figura 15 a seguir tem-se plotadas as médias das resistências de todos os aglomerantes e teores para o solo da formação Tupanciretã, e pode-se perceber que a utilização das cales não trouxe resultados satisfatórios para a estabilização deste tipo de solo, visto as baixas resistências atingidas pelos CP's nos ensaios de RCS; ao contrário da estabilização com o uso de cimento, seja ele o cimento Portland CP-IV ou CP-II F32, onde a resistência dos CP's foi bastante elevada, tal como diz a literatura que solos mais arenosos apresentam melhores resultados de estabilização química com cimento Portland.

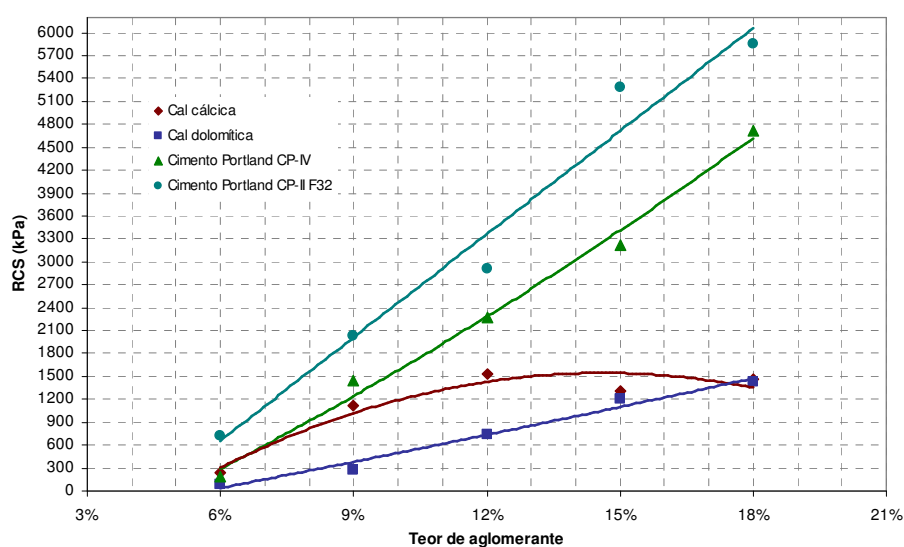


**Figura 15:** Gráfico da RCS dos CP's moldados com o solo da formação Tupanciretã

De acordo com norma ABNT NBR 11798 (1990) que prescreve uma RCS mínima de 2100 kPa aos sete dias de idade para materiais usados como sub-base ou base de pavimentos, o único aglomerante estudado para este tipo de solo que cumpre essa premissa é o cimento Portland CP-II F32 com um teor da ordem de 16%. Os outros aglomerantes, dentro da faixa de teores estudada, não atingiram a resistência para satisfazer a condição citada em norma.

#### 4.4 Resistência do solo da formação Serra Geral

Os CP's moldados com o solo da formação Serra Geral obtiveram as mais altas resistências para qualquer aglomerante utilizado, o que é facilmente observado através do gráfico da Figura 16, que mostra também que a cal cálcica apresentou bons resultados na estabilização com teores em torno de 12%.



**Figura 16:** Gráfico da RCS dos CP's moldados com o solo da formação Serra Geral

No caso do solo da formação Serra Geral, os dois cimentos estudados cumpriram a prescrição da norma ABNT NBR 11798 (1990), atingindo e ultrapassando o valor de 2100 kPa. O cimento Portland CP-II F32 atingiu esta resistência com um teor de aproximadamente 9%, e o cimento Portland CP-IV obteve essa resistência com o teor de 12,5%, conforme o gráfico da Figura 16.

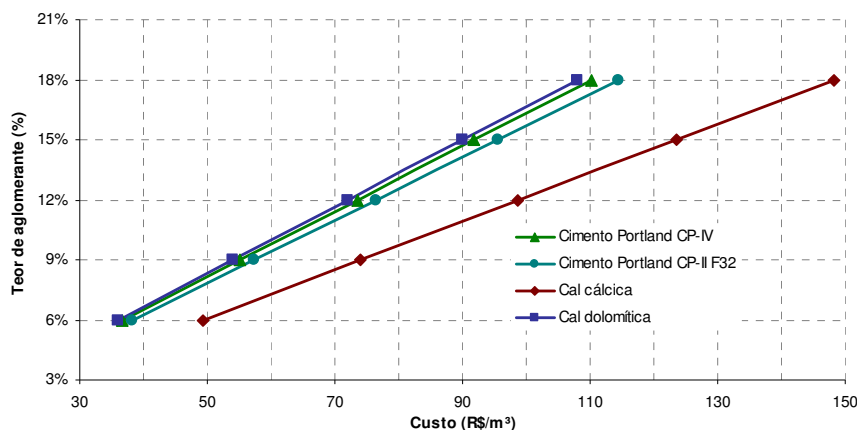
## 4.5 Análise dos custos

A análise de custos levou em consideração apenas o valor dos aglomerantes necessários para a execução da técnica de estabilização química de solos, não estando contabilizadas as despesas com mão-de-obra e maquinário. Pressupõe-se que tais custos sejam praticamente constantes variando o tipo de solo ou aglomerante.

A cal cálcica por não ser originária do nosso estado teve adicionado em seu custo o valor do transporte da cidade de Belo Horizonte – MG para Ijuí – RS, que de acordo com empresas de transporte consultadas é de aproximadamente R\$3.500,00 para uma carga de 27.000 kg. Os outros aglomerantes tiveram seu preço consultado em lojas de materiais de construção da cidade.

### 4.5.1 Solo da formação Tupanciretã

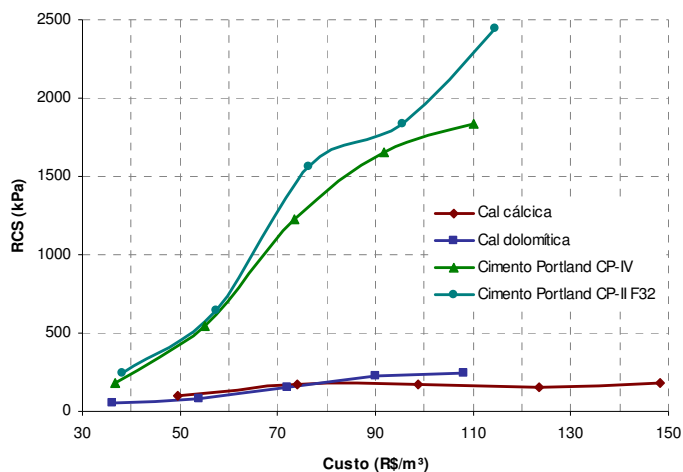
A seguir no gráfico da Figura 17 são apresentados os custos dos aglomerantes necessários para executar um metro cúbico de mistura com todos os teores estudados visando uma estabilização do solo da formação Tupanciretã.



**Figura 17:** Custos de todos os teores para cada metro cúbico de mistura

De acordo com o gráfico da Figura 17 a cal cálcica teve o maior custo que os outros aglomerantes estudados, isto se deu pelo preço de transporte considerado.

O gráfico da Figura 18 mostra a RCS *versus* Custo (R\$/m<sup>3</sup>) e está apresentado a seguir:



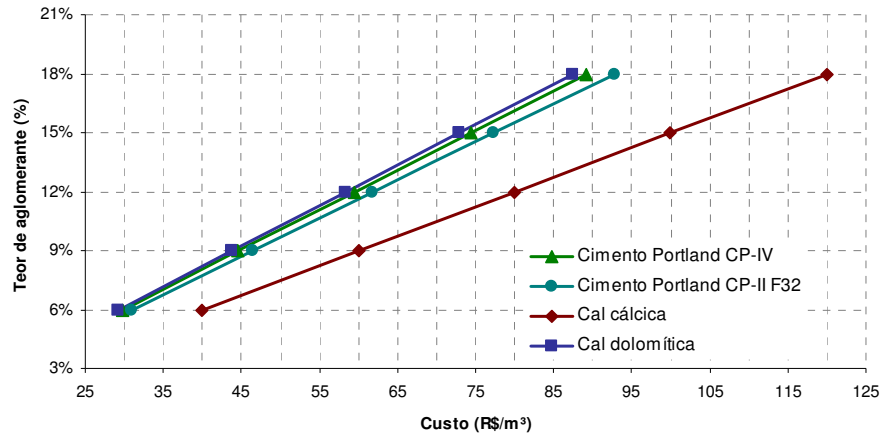
**Figura 18:** gráfico da RCS *versus* Custo para o solo da formação Tupanciretã

Analisando o gráfico da Figura 18 constata-se que a relação custo/benefício apresentada pelas estabilizações de solos com as cales é muito ruim, pois estas não conferem altas resistências além de terem um custo elevado, principalmente a cal cálcica.

É importante salientar que as cales sofrem uma grande influência com a mudança na temperatura de cura, e que a modificação desse parâmetro pode alterar significativamente os resultados do ensaio de RCS.

#### 4.5.2 Solo da formação Serra Geral

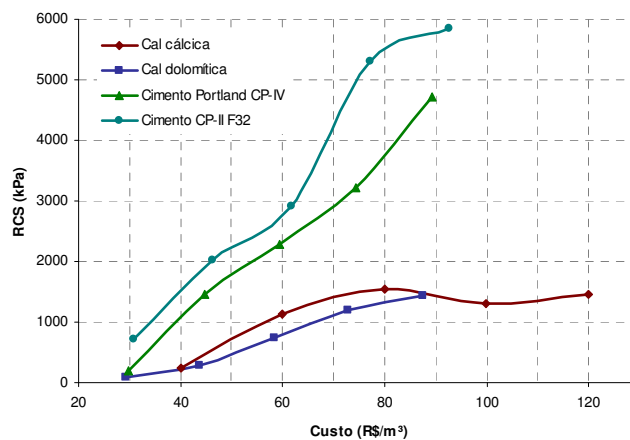
A seguir no gráfico da Figura 19 estão plotados os valores dos aglomerantes para mistura de cada metro cúbico com o solo da formação Serra Geral:



**Figura 19:** custos para cada metro cúbico de mistura

Como visto no gráfico da Figura 19 a estabilização do solo da formação Serra Geral com a cal cálcica é a de valor mais elevado, ainda devido ao alto preço do transporte do aglomerante que não é encontrado em nosso estado.

No gráfico da Figura 20 a seguir, tem-se os valores dos aglomerantes para 1m<sup>3</sup> de mistura considerando também a resistência.



**Figura 20:** gráfico RCS versus Custo para o solo da formação Serra Geral

## CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos deste estudo que eram: definir as características físicas dos solos em estudo, sua classificação e parâmetros de compactação; determinar o tipo aglomerante e seu respectivo teor para obtenção da maior resistência à compressão simples das amostras de solo e definir qual o aglomerante e seu respectivo teor que apresenta a melhor relação custo/benefício para a estabilização de solos, as seguintes conclusões foram tecidas:

- Para os CP's que foram moldados com a cal cálcica CH-I, o maior valor de resistência alcançado foi do solo da formação Serra Geral, bastante argiloso, com teor de 12% de aglomerante chegando a aproximadamente 1600kPa, corroborando com a afirmação de que as cales trazem vantagens para a estabilização de solos argilosos, de acordo com Van Impe (1989). O solo da formação Tupanciretã não alcançou altos valores de resistência ficando no máximo em 190kPa;
- A cal dolomítica fez o solo da formação Serra Geral atingir resistências elevadas, em torno de 1600kPa com um teor de 18% de aglomerante. Para o solo da formação Tupanciretã houve um ganho de resistência em comparação com o uso da cal cálcica, de 190kPa para cerca de 240kPa, mas mesmo assim os valores ainda foram baixos;
- O cimento Portland CP-IV conferiu aos dois tipos de solos resistências elevadas mesmo com teores baixos. As resistências máximas atingidas foram aproximadamente 1800 kPa e 4700kPa, para os solos da formação Tupanciretã e Serra Geral, respectivamente;
- Os CP's que foram moldados com o cimento CP-II F32 obtiveram as maiores resistências deste estudo, alcançando em torno de 2400kPa para o solo da formação Tupanciretã e 5800kPa para o solo da formação Serra Geral;

- Para o solo da formação Tupanciretã o único aglomerante capaz de conferir uma resistência de 2100kPa, que é o mínimo exigido para bases e sub-bases de pavimentos, foi o cimento Portland CP-II F32;
- Com o solo da formação Serra Geral, a RCS de 2100 kPa foi atingida pelos dois tipos de cimentos Portland estudados, mas o melhor custo/benefício é do cimento Portland CP-II F32
- Analisando os gráficos dos custos das misturas percebe-se claramente que a utilização da cal cálcica traz a pior relação custo/benefício, pois além de não apresentar altas resistências, as despesas com o transporte desse aglomerante elevam demasiadamente o valor do seu preço final;
- A cal dolomítica, mesmo conferindo uma resistência semelhante à cal cálcica para ambos os solos, também não apresentou uma boa relação custo/benefício, por causa exclusivamente das baixas resistências conferidas ao solo;
- Esperava-se que as cales confeririam altos valores de RCS aos CP's moldados com o solo da formação Serra Geral (mais argiloso) como também esperava-se que o solo da formação Tupanciretã alcançassem valores elevados de RCS com a adição de cimento Portland, mas isso não aconteceu.
- O tipo de solo que obteve os maiores valores de RCS foi o solo da formação Serra Geral, alcançando valores superiores ao solo da formação Tupanciretã com todos os aglomerantes estudados.
- Os maiores valores de RCS para a estabilização de solos foram alcançados com o cimento Portland CP-II F32, o que contribuiu para que este aglomerante obtivesse a melhor relação custo/benefício.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar outras temperaturas de cura para os CP's moldados com cal;
- Estudar tempos de cura diferentes;
- Estudar a RCS de CP's com outras energias de compactação;
- Fazer o estudo da influência de outros aglomerantes, como o cimento Portland CP-V ARI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798: Materiais para sub-base ou base de solo-cimento** – Comissão de estudo de pavimentação em solo-cimento – Comitê brasileiro de construção civil, Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025: Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos** – Comissão de estudo de pavimentação em solo-cimento – Comitê brasileiro de construção civil, Rio de Janeiro, 1990.

BONAFÉ, L. **Estudo da resistência de um solo residual de basalto estabilizado e reforçado**. 2004. 101 p. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Civil. Universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Volume 2**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001. 951 p.

CAPPER, P. L. and CASSIE, W. F. **The Mechanics of Engineering Soils**. London, E. & F. N. Spon LTD, 1970. Tradução de João Luís da Providência Vilas Boas e Costa.

CAPUTO H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Mecânica das Rochas – Fundações – Obras de Terra**. 6 ed. rev. e at. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988. 498 p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998. 285 p.

INGLES O. G. and METCALF J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sydney – Melbourne – Brisbane: Butterworths, 1972. 374 p.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica do Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos. 2000. 247 p.

VAN IMPE, W. F. **Soil Improvement: Techniques and their Evolution**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers. 1989. 125 p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1978. 509 p.

## **ANEXOS**

## Análise Granulométrica de Solos

Solo da formação Tupanciretã

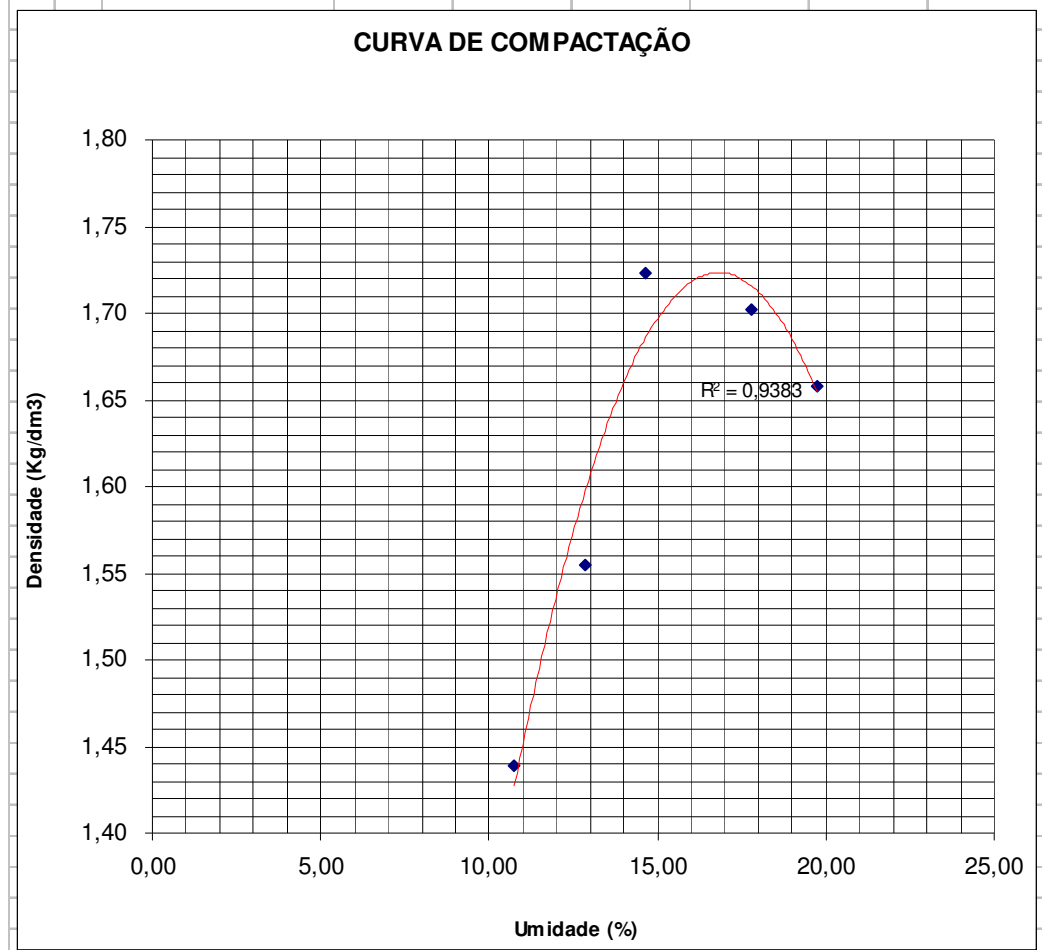
Data: 26/6/2009

Sedimentação								
Massa Esp.sólidos (g/cm <sup>3</sup> ):		2,906	Peso úmido (g):		75,3	Peso seco (g):		73,11
Tempo Decorrido	Temperatura (°C)	Viscosidade (g.s/cm <sup>2</sup> )	Densidade L	Correção Ld	Altura Queda (cm)	Diâmetro (mm)	(%) Amost. Total < Diâm.	
30 seg	21	1,00268E-05	1,0270	1,00397	14,81	0,0684	47,81	
1 min	21	1,00268E-05	1,0260	1,00397	14,99	0,0486	45,73	
2 min	21	1,00268E-05	1,0250	1,00397	15,18	0,0346	43,65	
4 min	21	1,00268E-05	1,0250	1,00397	14,08	0,0236	43,65	
8 min	21	1,00268E-05	1,0240	1,00397	14,26	0,0168	41,58	
15 min	20	1,02701E-05	1,0230	1,00415	14,45	0,0125	39,13	
30 min	20	1,02701E-05	1,0220	1,00415	14,63	0,0089	37,05	
1 hora	20	1,02701E-05	1,0220	1,00415	14,63	0,0063	37,05	
2 hora	19	1,05228E-05	1,0220	1,00432	14,63	0,0045	36,7	
4 hora	18	1,07853E-05	1,0210	1,00449	14,82	0,0032	34,27	
8 hora	18	1,07853E-05	1,0210	1,00449	14,82	0,0023	34,27	
24 hora	15	1,16382E-05	1,0200	1,00492	15	0,0014	31,3	

Peneiramento					Teor de Umidade (w)			
Ph #10 (g):		77,47	Ph #4 (g):		1076	Ps+t+agua (g):	104,62	132,85
Ps #10 (g):		75,22	Ps #4 (g):		1044,76	Ps + tara (g):	102,23	129,54
Peneiras N°	mm	Mat. Retido (g)	Material que passa (g)		(%) Passante	tara (g):	19,08	23
			Parcial	Total		w (%):	2,87	3,11
	25				100	w média (%):	2,99	
	19				100	<b>Percentagens</b>		
	12,5				100	Argila: 39,26%		
	9,5			1050,58	100	Silte: 9,66%		
	4	4,8	1,3	1049,13	99,86	Areia Fina: 48,08%		
	10	2	1,45	1045,72	99,54	Areia Média: 2,74%		
	16	1,18			99,88	Areia Grossa: 0,14%		
	30	0,6	0,23	74,99	99,24	Pedregulho: 0,12%		
	40	0,42	1,84	73,15	96,8			
	50	0,3	3,63	69,52	92			
	100	0,105	3,35	66,17	87,56			
	200	0,075	20,14	46,03	60,91			

## Curva de compactação do solo da formação Tupanciretã

Densidade máxima aparente (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,72		Peso da amostra (g) :.....	2.500,00		
Umidade ótima (%) : .....	14,5		Molde nº.: .....	01.	Peso (g): .... 2.210,00	
Observações : .....			Volume (dm <sup>3</sup> ) : .....	0,99738		
			Esforço de compactação: .....	26 golpes		
<b>ENSAIO</b>						
<b>Ponto nº.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Peso da amostra compactada mais peso cilindro	3.800,00	3.960,00	4.180,00	4.190,00	4.210,00	
Peso da amostra compactada - g	1.590,00	1.750,00	1.970,00	1.980,00	2.000,00	
Densidade do solo úmido (Kg/dm <sup>3</sup> ) :	1,59	1,75	1,98	1,99	2,01	
<b>DETERMINAÇÃO DE UMIDADE</b>	Cápsula nº. :	1	2	3	4	5
	Peso do solo úmido + cápsula (g)	18,34	15,26	18,57	21,93	15,40
	Peso do solo seco + cápsula (g)	17,13	14,14	16,90	19,22	13,93
	Peso da água (g)	1,21	1,12	1,67	2,71	1,47
	Peso da cápsula (g)	5,88	5,41	5,48	5,48	5,67
	Peso do solo seco (g)	11,25	8,73	11,42	13,74	8,26
	Porcentagem de umidade (%)	10,76	12,83	14,62	19,72	17,80
Densidade do solo seco (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,44	1,56	1,72	1,66	1,70	



## LIMITES FISICOS

**Interessado:**

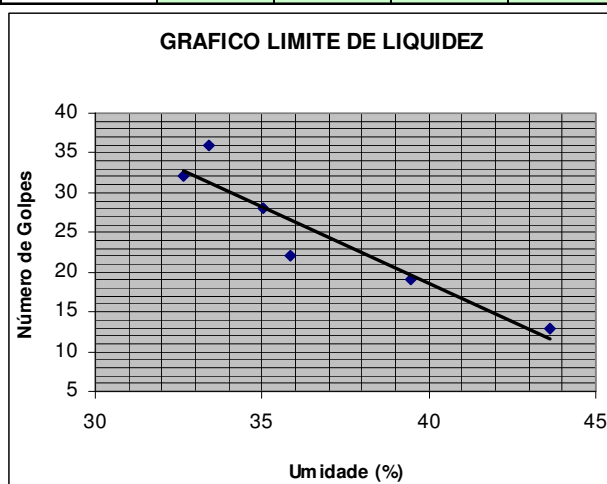
**Amostra:** Solo Tupãciretã

**Data:** 16/6/2009

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

Limite de liquidez	36,50
Limite de plasticidade	17,19
Índice de plasticidade	19,31

LIMITE DE LIQUIDEZ							
Cápsula	nº	1	2	3	4	5	6
C + S + A	g	11,69	8,86	9,20	9,09	10,78	12,25
C + solo	g	10,14	8,08	8,23	8,23	9,28	10,16
Água	g	1,55	0,78	0,97	0,86	1,50	2,09
Cápsula	g	5,50	5,69	5,46	5,83	5,48	5,37
Solo	g	4,64	2,39	2,77	2,40	3,80	4,79
Umidade	%	33,41	32,64	35,02	35,83	39,47	43,63
GOLPES		36	32	28	22	19	13



MASSA ESPECÍFICA REAL		
Temp. °C		
Pic. Nº	1	2
Pic. + água	618,16	617,90
Pic+s+a g	779,61	791,96
Pic+solo g	398,71	423,75
Pic g	128,33	132,16
M.esp.real	2,482	2,481
Média g/m³	2,482	

ÍNDICE DE PLASTICIDADE	
Limite de liquidez	36,50
Limite de plasticidade	17,19
Índice de plasticidade	19,31

LIMITE DE PLASTICIDADE							
CÁPSULA Nº	1	2	3	4	5	6	7
C+S+A	g	4,81	3,95	4,71	4,99	4,01	3,33
C+solo	g	4,56	3,73	4,45	4,65	3,79	3,23
Água	g	0,25	0,22	0,26	0,34	0,22	0,10
Cápsula	g	2,93	2,36	3,00	2,94	2,83	2,32
Solo	g	1,63	1,37	1,45	1,71	0,96	0,91
Umidade	%	15,34	16,06	17,93	19,88	22,92	10,99
<b>LIMITE DE PLASTICIDADE:</b>		17,19	(menos 5%)	16,33	(mais 5%)	18,05	