

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FARROUPILHA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ESTUDO DE MELHORIA DE AREIA EÓLICA SOB A ADIÇÃO DE
SOLO DE TEXTURA FINA E ESTABILIZANTE QUÍMICO PARA
APROVEITAMENTO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Guilherme Castro da Costa

Alegrete, 2019

**ESTUDO DE MELHORIA DE AREIA EÓLICA SOB A ADIÇÃO DE
SOLO DE TEXTURA FINA E ESTABILIZANTE QUÍMICO PARA
APROVEITAMENTO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

Guilherme Castro da Costa

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IF Farroupilha, RS) e da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Bacharel em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Alegrete, RS, Brasil

2019

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha
Universidade Federal do Pampa
Curso de Engenharia Agrícola

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova o Trabalho de Conclusão de Curso II

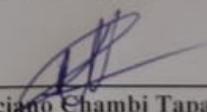
**ESTUDO DE MELHORIA DE AREIA EÓLICA SOB A ADIÇÃO DE
SOLO DE TEXTURA FINA E ESTABILIZANTE QUÍMICO PARA
APROVEITAMENTO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

Elaborado por

Guilherme Castro da Costa

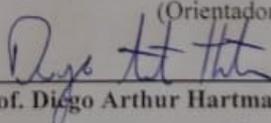
Como requisito parcial para a obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA

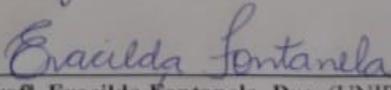


Prof. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco, Dsc. (UNIPAMPA)

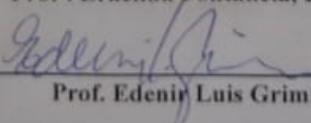
(Orientador)



Prof. Diego Arthur Hartmann, Dr. (UNIPAMPA)



Prof. Eracilda Fontanela, Dra. (UNIPAMPA)



Prof. Edenis Luis Grimm Dr. (IFFAR)

Alegrete, 09 de dezembro de 2019.

“A vitória está reservada para aqueles que estão dispostos a pagar o preço”.

Sun Tzu

RESUMO

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, RS, Brasil

Universidade Federal do Pampa, RS, Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso II

Curso de Engenharia Agrícola

ESTUDO DE MELHORIA DE AREIA EÓLICA SOB A ADIÇÃO DE SOLO DE TEXTURA FINA E ESTABILIZANTE QUÍMICO PARA APROVEITAMENTO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

AUTOR: GUILHERME CASTRO DA COSTA

ORIENTADOR: WILVER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO

Data e local da defesa: 9 de dezembro de 2019, Alegrete-RS

Na região sudoeste do Rio Grande do Sul, os locais em degradação devido à arenização, somam mais de 130 mil hectares, gerando um impacto ambiental e socioeconômico. Um outro problema são as condições precárias das rodovias rurais não pavimentadas. O presente trabalho tem o objetivo estudar o comportamento geotécnico de uma areia eólica mal graduada (SP), estabilizada com silte elástico arenoso (MH) e cal hidratada, sob diferentes proporções de mistura, 75%-25%-0%, 80%-20%-0%, 85%-15%, 75%-20%-5%, 80%-15%-5% e 85%-10%-5%. De acordo com os resultados obtidos, o tratamento areia eólica-solo fino-cal: 75%-20%-5%, se comparados com os tratamentos, apresentou a menor massa específica seca máxima, maior teor de umidade ótimo e os maiores valores de resistência à compressão simples. A adição de cal hidratada nas misturas diminuiu as massas específicas secas das amostras. Além disso, todas as misturas quando compactadas sob energia normal do Proctor, mostraram Índice de Suporte de Califórnia (ISC) aceitáveis para o aproveitamento em camadas de subleito e reforço do subleito. Finalmente, a mistura areia eólica-solo fino-cal: 75%-20%-5% apresentou ISC apto para aproveitamento em camadas de sub-base.

Palavras-chave: cal hidratada, estradas não pavimentadas, resistência à compressão simples.

ABSTRACT

Federal Institute of Education, Science and Technology Farroupilha, RS, Brazil

Federal University of Pampa, RS, Brazil

Coursework II

Course of Agricultural Engineering

STUDY OF WIND SAND IMPROVEMENT UNDER THE ADDITION OF FINE TEXTURE SOIL AND CHEMICAL STABILIZER FOR USE ON NON-PAVED ROADS

AUTHOR: GUILHERME CASTRO DA COSTA

ADVISOR: WILVER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO

Date and local of defense: 9 de dezembro de 2019, Alegrete-RS

In the southwest region of Rio Grande do Sul, the degrading sites due to sanding total over 130,000 hectares, generating an environmental and socioeconomic impact. Another problem is the poor condition of unpaved agricultural highways. The present work has the objective to study the geotechnical behavior of a graded (SP), stabilized with elastic sandy (MH) and hydrated lime, with different mixing proportions, 75% -25% -0%, 80% - 20. % -0%, 85% - 15%, 75% -20% -5%, 80% -15% -5%, and 85% -10% -5%. According to the results obtained, the treatment of sand and soil with: 75% -20% -5%, compared to the tests, shows the smallest maximum dry mass, the highest optimum sample content and the highest simple compressive strength. The addition of hydrated lime in the mixtures decreased as color specific masses. In addition, all blends when compressed under normal Proctor energy have acceptable California Bearing Ratio (CBR) for subgrade and underlay reinforcement. Finally, a fine soil-wind-sand mixture: 75% -20% -5% exhibits the appropriate CBR for sub-base tiering.

Keywords: Hydrated lime, unpaved roads, and simple compressive strength.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferentes características granulométricas de areias eólicas.....	14
Quadro 2 - Valores de massa específica dos grãos para solos eólicos de diferentes regiões. ...	15
Quadro 3 - Diferentes valores de RCS encontrados a partir da estabilização de solo eólico com diferentes aditivos químicos.	20
Quadro 4 - Valores de resistência a compressão simples para diferentes solos estabilizados com cal.....	20
Quadro 5 - Diferentes valores de ISC e expansão encontrados por Carvalho et al., (2010). ...	23
Quadro 6 - Comparação granulométrica de solos eólicos	39
Quadro 7 - Valores de massa específica de solos eólicos.....	39
Quadro 8 - Valores de teor de umidade ótimo e massas específicas secas máximas para as diferentes misturas estudadas.	41
Quadro 9 - Valores de massa específica seca máxima obtidos por diferentes autores.....	42
Quadro 10 - Valores médios de ISC e expansão para os diferentes tratamentos avaliados	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - valores mínimos de tolerância para ensaio de CBR em diferentes camadas de pavimentos.....	22
Tabela 2 - Qualidade do material em função do ISC	22
Tabela 3 - Proporção das misturas da areia com estabilizante.	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas constituintes de uma estrada não pavimentada	12
Figura 2 - Curvas de Compactação para solos eólicos da Região da Campanha Gaúcha (RS) com adição de 12 % estabilizante químico (cimento)	16
Figura 3 - Curva de compactação estabilizada com diferentes teores de cal.	16
Figura 4 - Curvas de compactação para areia do deserto com diferentes teores de cimento. ..	17
Figura 5 - (a) Curvas de compactação para mistura de areia desértica e cimento portland ordinário (OPC). (b) Curvas de compactação para a mistura de areia desértica e cinzas de forno de cimento (CBPD).....	17
Figura 6 - Prensa para perfuração.....	21
Figura 7- Área de empréstimo do material eólico - município de Manoel Viana/RS.	24
Figura 8 - Área de empréstimo do solo de textura fina - Alegrete/RS.	25
Figura 9 - Cal hidráulica marca KIDRAX.....	25
Figura 10 - (A) Jazida A, referente ao solo eólico - Manoel Viana/RS. (B) Jazida B, referente ao solo de textura fina - Alegrete/RS. (C) Acondicionamento das amostras de solo coletadas.	26
Figura 11 - Processo de secagem ao ar, das amostras coletadas.	27
Figura 12 - Processo de destorroaçãodo solo fino.	27
Figura 13 - Curva de granulometria para o solo de Manoel Viana/RS	28
Figura 14 - Curva granulométrica do solo fino	28
Figura 15 - Limite de liquidez do solo fino	29
Figura 16 - (A) Preparação das misturas; (B) Soquete e cilindro; (C) Extrator; (D) Amostra acondicionada em papel filme e saco plástico.....	31
Figura 17 - Câmara úmida alternativa	32
Figura 18 - Acondicionamento dos corpos de prova para ensaio ISC.....	32
Figura 19 - Teste de imersão por período de 4 horas do tratamento S-M: 75%-25%.....	34
Figura 20 - Teste de imersão por período de 4 horas dos tratamentos S-M: 80%-20% e S-M: 85%-15%.	34
Figura 21 - Teste de imersão por período de 4 horas do tratamento S-M-CH: 75%-20%-5%	34
Figura 22 - Teste de imersão por período de 4 horas do tratamento S-M-CH: 80%-15%-5%	35
Figura 23 - Prensa hidráulica da marca <i>Shimadzu</i> em execução do ensaio de compressão.	36
Figura 24 - (A) Corpos de prova para o ensaio ISC em cura. (B) Ensaio de expansão	37

Figura 25 - (A) Escoamento dos moldes pré-compressão. (B) Ensaio de ISC.....	38
Figura 26 - Curvas de compactação para diferentes misturas estudadas.....	40
Figura 27 - Representação gráfica comparativa de misturas estudadas x teores de umidade ótica	41
Figura 28 - Correlação entre curvas de compactação dos tratamentos estudados e RCS	43
Figura 29 - Valores de Fck para cada tratamento estudado (moldes sem imersão)	44
Figura 30 - Valores de Fck para cada tratamento estudado (moldes com imersão).....	44
Figura 31- Resultado da imersão dos CP's do tratamento S-FS-CH: 85%-10%-5%.	45
Figura 32 - Comparação entre os valores de RCS de misturas de solos eólicos com estabilizantes químicos obtidos por diferentes autores.....	45
Figura 33 - Comparação entre o tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% com diferentes solos estabilizados com cal.....	46
Figura 34 - Comparação dos valores de ISC da mistura S-M-CH: 75%-20%-5% e misturas encontradas por Carvalho et al., (2010).....	47
Figura 35 - Comparação dos valores de Expansão da mistura S-M-CH: 75%-20%-5% e misturas encontradas por Carvalho et al., (2010)	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos.....	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1 Estradas não pavimentadas	11
2.2 Solos eólicos	12
2.2.1 Caracterizações geotécnicas	13
2.2.2 Compactação do solo.....	15
2.3 Estabilização de solo.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Definições dos materiais e localização das jazidas.....	24
3.2 Atividades de Campo Desenvolvidas	26
3.3 Ensaios laboratoriais	26
3.3.1 Preparação de Amostras e ensaios de caracterização	27
3.3.2.Preparação das misturas.....	29
3.3.3 Ensaios de Compactação	30
3.3.4 Preparação de corpos de prova para ensaios de resistência.....	31
3.3.5 Ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS).....	33
3.3.6 Ensaio Índice Suporte Califórnia (ISC).....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5 CONCLUSÃO.....	49
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário desempenha um papel importante na sociedade e na economia brasileira, visto que tem sido a principal alternativa de transporte de cargas e pessoas em todo país. Todavia, para que esse transporte seja realizado de forma eficiente, faz-se necessário que o pavimento das rodovias esteja em boas condições, oferecendo economia, segurança e conforto aos usuários(CNT, 2018).

O Brasil possui 1.720.700 km de rodovias em todo seu território, englobando vias federais, estaduais, coincidentes, municipais, estaduais transitórias. Embora o país possua 213.452 km de vias pavimentadas, as estradas não pavimentadas ocupam maior parte da malha rodoviária nacional com 1.349.938,5 km (78,42 %) .Apesar da grande importância do modal rodoviário brasileiro, uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte constatou que 48,3% da extensão total das rodovias avaliadas apresentam algum tipo de problema no pavimento(CNT, 2018).

Estradas não pavimentadas, também chamadas de estradas de terra, usualmente são construídas seguindo o próprio relevo local, não obedecendo nenhum projeto geométrico específico. Geralmente, tais vias estão ligadas à infraestrutura municipal ou empresas florestais (ARRIVABENI, 2017). Desempenham uma grande função socioeconômica no país, pois possibilitam a ligação entre a zona rural e a urbana. Dessa forma, toda ou grande parte da produção agrícola que é gerada no país acaba sendo transportada de uma determinada zona rural para unidades beneficiadoras de grãos e sementes (UBS), comumente situadas em zonas urbanas.

Visser (1983) destaca que o problema que assola os municípios é a falta de recursos e, muitas vezes, conhecimento para a realização dos devidos reparos nas estradas de terra. Evidencia-se também, segundo Rosso (2015),nas áreas de estudos e pesquisas, que apesar de sua vasta extensão, as rodovias não pavimentadas, quando comparadas com as rodovias pavimentadas, carecem destes estudos e pesquisas que visam melhorar e facilitar as técnicas de construção e manutenção das mesmas.

Os solos eólicos segundo Das (2007) apud Al-Aghbari et al., (2009) não são adequados para a construção de barragens devido a sua permeabilidade relativamente alta e baixa resistência ao cisalhamento. Para melhorar o desempenho da areia do deserto, engenheiros

estabilizam com materiais de melhor qualidade e na maioria dos casos os solos estabilizados se comportam satisfatoriamente.

Para a escolha adequada do método de estabilização a ser utilizado, é importante dar ênfase em quais as propriedades do solo que precisam ser modificadas e os propósitos aos quais destinam o processo de estabilização (ARRIVABENI, 2017).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo estudar a melhoramento geotécnico de uma areia eólica sob a adição de solo fino e cal hidratada, visando o seu aproveitamento na manutenção rodovias rurais não pavimentadas.

1.1.2 Objetivos específicos

O objetivo específico deste trabalho está dividido três partes:

1. Estudar o possível ganho de resistência mecânica dos solos eólicos através da adição de solo fino.
2. Avaliar os possíveis ganhos de resistência mecânica dos solos eólicos através da adição de misturas de solo fino mais cal hidratada.
3. Correlacionar de forma comparativa parâmetros de resistência obtidos de corpos de prova compactados sobre condição dinâmica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estradas não pavimentadas

As estradas rurais de revestimento primário são as principais ligações entre as propriedades rurais a grandes centros urbanos, além de servirem de acesso às vias principais. Também podemos encontrar estradas destinadas exclusivamente à movimentação interna das propriedades rurais que possuem como principal função o trânsito de moradores, máquinas, equipamentos e produtos agrícolas até as estradas principais (GRIEBELER, M. et al 2009).

Para Mariotoni (1987) as rodovias vicinais podem ser definidas como as que funcionalmente se destinam a canalizar a produção para um sistema viário de nível superior, centros de armazenagem, consumo, industrialização, comercialização ou exportação e/ou assegurar o acesso rodoviário a núcleos populacionais carentes.

Segundo Balbo (2007) a superestrutura de uma rodovia pode estar constituída por uma camada *base*, destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego; *Sub-base*, camada de pavimentação complementar à base e com as mesmas funções desta; *Reforço de Subleito*, é o complemento da sub-base que, por sua vez, tem funções de complemento da base. Assim, o reforço do subleito resiste e distribui esforços verticais; *Subleito*, terreno de fundação preparado para receber o pavimento industrial (Figura 1).

O desempenho do material utilizado na superfície de estradas não pavimentadas é diretamente ligado ao tipo e qualidade do material. Este desempenho está relacionado com os defeitos que se agravam à medida que a estrada é mais solicitada pelo tráfego. Logo, o método mais eficiente para melhorar a estrada não pavimentada, é depositar sobre o leito da superficial uma camada de material granular de espessura adequada, possuindo quantidade suficiente de solos aglutinantes (maior presença de finos) para ligar o material na compactação (ODA, 1995)

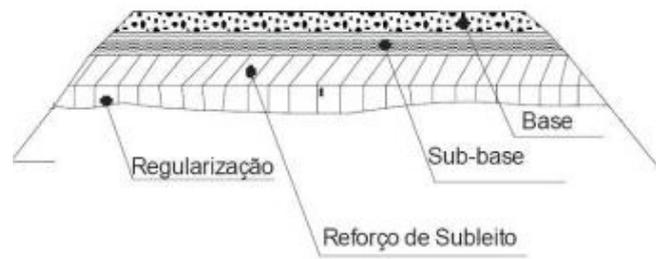


Figura 1 - Camadas constituintes de uma estrada não pavimentada

Fonte: Concurso para técnico em edificações da Prefeitura Municipal de Paranaguá – PR (2012 adaptado por Costa (2019).

2.2 Solos eólicos

Os solos eólicos são aqueles transportados pelo vento, normalmente encontrados nas regiões litorâneas, ou desertos. Os ventos sopram sobre as areias e, assim, as carregam, formando as chamadas dunas. Uma das características deste tipo de formação é a uniformidade dos grãos, pois a força do vento seleciona os pesos dos grãos que podem ser transportados a elevadas alturas e depositadas a grandes distâncias(VARGAS, 1978).

Nas regiões Sudeste, Nordeste e Sul há maior presença de solos eólicos originados pelas ações dos ventos. Solos esses que são constituídos por areia fina quartzosa bem arredondada, (MORANGON, 2008).

De acordo com os dados contidos no Atlas de Arenização editado por Verdum et al (2006) , mostram que, para o conjunto da região sudoeste gaúcha, o mapeamento feito com imagens de satélite no ano de 1992, os areais representavam 3.663 hectares, a estes ainda acrescidos 1.600 ha de áreas denominadas focos de arenização, totalizando 0,26% da área total da região sudoeste. Porém, segundo Patella (2006) o número atualmente é bem maior. Os locais em processo de degradação na região sudoeste somariam mais de 130 mil hectares.

As áreas de areias se traduzem em um sério problema ambiental, com o assoreamento dos rios, extinção dos campos e impactando na economia da região. Na verdade, aqueles solos são relativamente pobres, e os municípios da região não podem ser considerados muito ricos. Por isso, também, a arenização impacta bastante, pois tem diminuído a área utilizável para agricultura e para a pecuária (PATELLA, 2006).

2.2.1 Caracterizações geotécnicas

O ensaio de granulometria visa conhecer a distribuição granulométrica dos solos, por meio do peneiramento ou da combinação entre sedimentação e peneiramento (PAGNOSSIN, 2015). No Brasil a metodologia do ensaio é padronizada segundo normativa NBR 7181 (ABNT, 1984).

A massa específica dos grãos é a razão entre a massa dos grãos constituintes do solo e o volume ocupado por eles, desconsiderando a água que entra na composição química dos minerais (FIORI & CARMIGNAMI, 2009). O ensaio de massa específica é orientado segundo a normativa (extinta) NBR 6408 (ABNT, 1984).

Para Souza & Ribeiro (2018) os limites limite de liquidez (LL) e plasticidade (LP), são valores de umidades que separam um estado de consistência do solo de outro, variando de estado sólido, friável, plástico e viscoso. O ensaio de limite de liquidez normatizado segundo a NBR 6459 (ABNT, 1984), é executado com o emprego do aparelho de Casagrande, aplicando-se o solo no interior da concha de latão até obter uma superfície de espessura máxima de 1 cm com a ranhura no centro. À medida que a concha é golpeada contra a base e a ranhura se use, o limite de liquidez é definido.

Normatizado pela NBR 7180 (ABNT, 1984) o ensaio de plasticidade, retrata quando o solo encontra-se no estado plástico, ou seja, o mesmo perde a capacidade de fluir conservando sua forma inicial. A normativa regulamenta o cálculo do teor de umidade para o qual o solo começa a se fratura quando se tenta moldá-lo na forma de uma amostra cilíndrica de três milímetros de diâmetro. Para Pinto (2006) o índice de plasticidade é obtido a partir da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade do solo, expressado pela quantidade de água necessária para que o solo passe do estado plástico para o líquido.

Visando estudar a *Viabilidade Técnico-Econômica da Areia Eólica Estabilizada com Agentes Aglomerantes para Emprego em Pavimentações* Ruver et al. (2013) executou a caracterização granumolemétrica de duas amostras de areias eólicas, coletadas em diferentes áreas da região costeira sul do Estado do Rio Grande do Sul; a primeira amostra foi coletada no cume de uma duna, e a segunda amostra coletada em uma área de várzea.

Mohamed (2005) avaliou a possibilidade de melhorar as propriedades das areias de deserto do país de Oman utilizando estabilizante químico (cimento) para edificações. Constatou que a areia estudada, se tratava de uma areia mal graduada (SP) com as seguintes características.

Além disso, na cidade de Wahiba também no país de Oman, Al-Aghbari (2006) realizou estudos de estabilização de areia desértica, com cinzas de resíduos sólidos incinerados municipais. O autor apontou que a areia investigada apresentava 91 % de areia e 9% de finos, classificada como SP-SM de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos solos (SUCS).

No quadro 1, é apresentado diferentes valores obtidos por Mohamed (2005) e Ruver et al., (2013). Nota-se que as características granulométricas da areia eólica estudada por Mohamed apresentam a mesma classificação (areia mal graduada - SP) da areia coletada por Ruver do cume de duna. Observa-se também que a areia estudada por Al-Aghbari (2006) apresenta classificação SP-SM devido à presença 8,3% de material fino (material passante na peneira de nº 200 (0,075 mm)) semelhante a areia de várzea estudada por Ruver.

Autor	Mohamed (2005)	Ruver et al. (2013)	
Localidade	Areia de deserto	Área de várzea	Cume de duna
Pedregulho	0,0%	0,0%	0,0%
Areia	100%	90,9%	99,3%
Silte	0%	0,8%	0,7%
Argila	0%	8,3%	0,0%
Coefficiente de Uniformidade	2,47	2,30	1,30
Coefficiente de Curvatura	1,05	1,00	1,20
Classificação	SP	SP-SM	SP

Quadro 1 - Diferentes características granulométricas de areias eólicas

Fonte: Mohamed (2005); Ruver et al, (2013) adaptado por Costa (2019).

Segundo Oda (1995), para fins de pavimentação, as pedras e areias limpas, sem silte e argila, proporcionam uma boa capacidade de suporte às cargas resultantes de rodas veiculares, porém como as areias e pedregulhos não possuem ligantes na sua composição é facilmente desagregado pelas rodas.

O quadro 2 mostra diferentes valores de massa específica citados por Almeida F. et al. (2018) para solos eólicos de diferentes localidades do centro oeste do Brasil no município de Alegrete/RS e Médio Oriente. Com base no quadro 2 é possível observar que os valores de massa específica para o município de Alegrete/RS variam de 2,34 a 2,87 g/cm³.

Solo	Massa Específica (g/cm³)
Arábia Saudita	2,67
Banji-Iraque	2,70
Areia de Wahiba-Omã	2,60
Rio Grande - Brasil	2,64
Durasnal – Alegrete -BR	2,87
São João - Brasil	2,34

Quadro 2 - Valores de massa específica dos grãos para solos eólicos de diferentes regiões.
Fonte: Almeida F. et al. (2018).

Nos solos eólicos da região da campanha do estado do Rio Grande do Sul, submetidos a ensaios limite de liquidez e limite de plasticidade normatizada pela NBR 6459/84 e NBR 7180/84 respectivamente. Os valores não puderam ser determinados, em virtude de esses solos estudados apresentarem baixa coesividade e pouca ou nenhuma presença de finos (ALMEIDA, F. et al., 2018).

2.2.2 Compactação do solo

Na pavimentação a compactação é uma técnica que permite melhorar as propriedades de um solo pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão do ar (RAGHVAN & OHU, 1985). O ensaio de compactação normatizado pela NBR 7182 (ABNT, 1986), que descreve a compactação do solo através de diferentes energias mecânicas (normal, intermediária e modificada).

Ody et al. (2018) estudou o aproveitamento de areias eólicas de diferentes áreas da região da campanha gaúcha para a construção de estradas não pavimentadas sob adição de 12% de cimento. Com o estudo, concluiu que as misturas solo-cimento correspondentes às localidades do distrito de Durasnal (Alegrete/RS) e do município de Manoel Viana/RS apresentaram curvas de compactação similares. Entretanto a amostra de solo referente ao distrito São João (Alegrete/RS) apresentou um comportamento diferente (Figura 2), com a possibilidade de possuir características mineralógicas distintas.

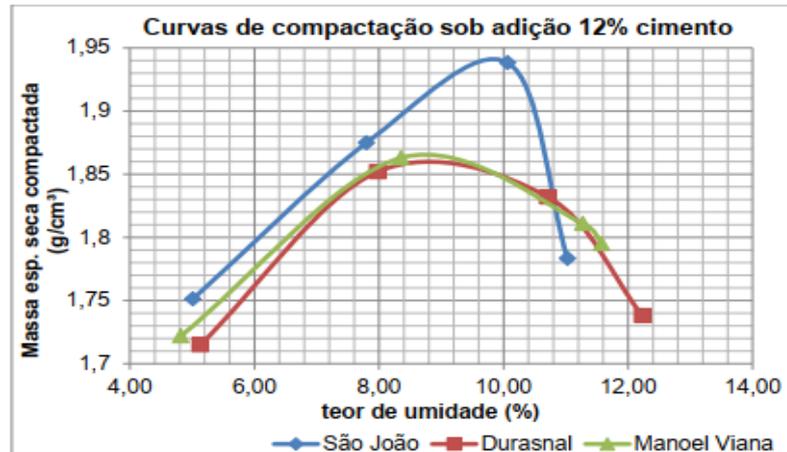


Figura 2 - Curvas de Compactação para solos eólicos da Região da Campanha Gaúcha (RS) com adição de 12 % estabilizante químico (cimento).

Fonte: (ODY, 2018).

Souza (2014), ao analisar curvas de compactação de solo classificado como Arenoso siltoso estabilizado com diferentes teores de cal (0, 6, 8 e 10%), verificou que quanto maior o teor de cal adicionado ao solo em estudo, maior foi a umidade ótima encontrada (exceto para o teor de 10% cal). Os resultados do autor podem ser observados na Figura 3.

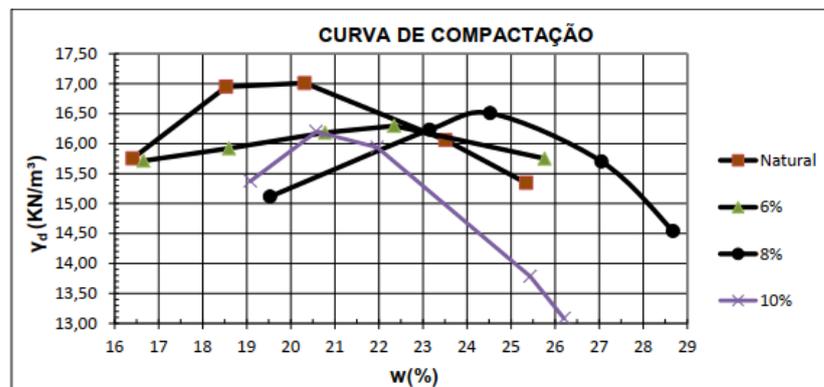


Figura 3 - Curva de compactação estabilizada com diferentes teores de cal.

Fonte: (SOUZA, 2014).

Da mesma forma, ao analisar a estabilização da areia de deserto do país de Oman, com diferentes proporções de cimento Portland (2, 4, 6, 8, 10 e 12 %), Mohamed (2005), observou que há um aumento marginal do peso seco máximo das misturas de areia e cimento, conforme o aumento do teor de cimento. Foi constatado que quanto maior teor de cimento Portland na mistura, menor foi o teor de umidade ótimo. Na figura 4 são apresentados os valores de pesos secos máximos encontrados pelo autor.

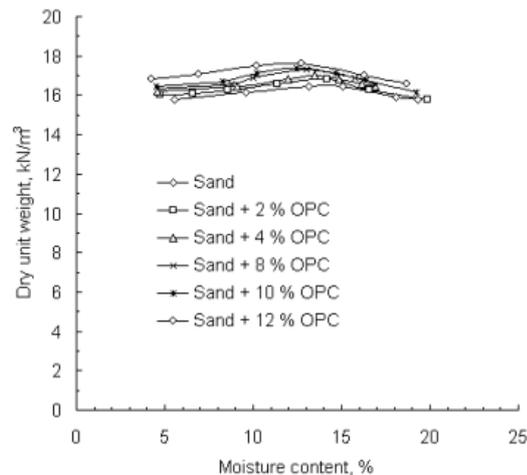


Figura 4 - Curvas de compactação para areia do deserto com diferentes teores de cimento.
Fonte: Mohamed, (2005).

Yahia et al. (2009), estudou a estabilização de areias desérticas com cimento Portland ordinário (OPC) e cinzas de forno de cimento (CBPD) em diferentes porcentagens (2, 4, 6, 8, 10 e 12 %). Os autores constataram que o aumento da densidade seca das curvas de compactação está relacionado aos valores de gravidade específica do OPC e CBPD (Figura 5), os quais resultam ser mais altos que os da areia.

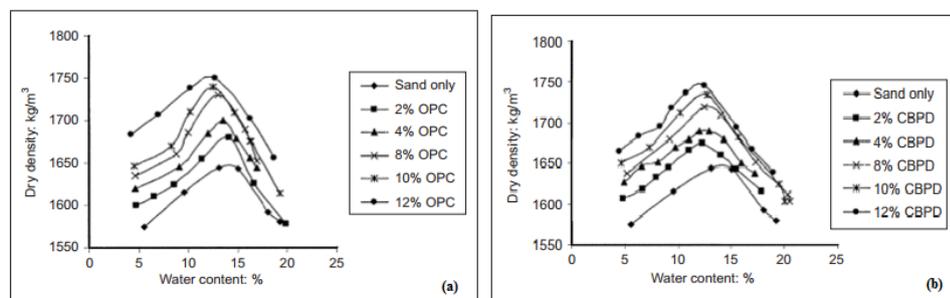


Figura 5 - (a) Curvas de compactação para mistura de areia desértica e cimento portland ordinário (OPC). (b) Curvas de compactação para a mistura de areia desértica e cinzas de forno de cimento (CBPD).

Fonte: Yahia et al. (2009)

2.3 Estabilização de solo

A estabilização do solo é uma prática já muito utilizada em diversos lugares do mundo, e tem sido reformulada, com o decorrer dos anos, com o emprego de novas técnicas, a fim de melhorar a composição do solo. Contudo essa prática teve início a partir das

necessidades de utilizar um solo com maiores atributos em relação à resistência e trabalhabilidade, inexistente no local de execução da obra (CINCOTTO et al., 2010)

Baptista (1976) argumenta que estabilizar um solo é utilizar um processo de qualquer natureza física (mecânica), ou dependendo do produto final desejado, a utilização de físico-química, de tal forma a torná-lo resistente a cargas exteriores e ações climáticas variáveis.

De acordo com Silva (2010), cal hidratada tem sua origem a partir da imersão ou aspersão com água da cal viva. Normalmente, apresenta-se em forma de pó, e para sua elaboração seu teor de água misturado é de 17 a 19% (OLIVEIRA, 2011).

Na pavimentação rodoviária para Azevêdo (2010) a cal mais empregada é a cal hidratada. Essa substitui a cal virgem devido a facilidades no seu uso, embora esta última possua maior teor de óxidos de cálcio e magnésio, bem como menor preço comercial.

Segundo Souza (2014) a denominação correta para misturas estabilizadas com cal, que buscam somente melhorar algumas propriedades dos solos consideradas prejudiciais, é solo melhorado com cal. Quando a mistura é usada em estruturas, a exemplo do uso em bases de pavimento ou revestimento de taludes, denomina-se solo estabilizado com cal.

A estabilização solo-cal consiste em uma mistura de solo, cal e água, onde as quantidades a serem adicionadas devem ser estabelecidas a partir de ensaios laboratoriais, que gera um produto final, apto a ser utilizado em qualquer camada de pavimento, com exceção das camadas asfálticas (AZEVEDO, 2010).

Para Cristelo (2001) o uso da cal no solo resulta em diversas melhorias, tendo como principais a sua textura e estrutura, que minimizam a plasticidade e gera uma elevada resistência mecânica.

Mohamed (2005) avaliou a adição de estabilizante químico (cimento) em solo eólico próximo a Península Arábica, no país de Omã em diferentes porcentagens de estabilizante (2, 4, 8, 10 e 12 %) e tempos de cura (0, 7, 14, e 28 dias). O autor concluiu que conforme o incremento de tempo de cura da mistura solo-estabilizante, maiores valores de resistência são encontrados. A melhor proporção de solo-estabilizante foi de 12%. Da mesma forma, Al-Aghbari (2006) estudou o comportamento da areia eólica no país de Omã, através da adição de cimento Portland nas concentrações de (2, 4, 8 e 12%) e cinza de cimento nas quantidades de (12, 20, 40, 60%). Os resultados obtidos pelo autor foram melhorias em seus parâmetros de resistência com 8% de cimento Portland e a partir de 20% de cinzas de cimento.

Na Arábia Saudita, Awad & Sherif (2012), realizaram estudos em areias eólicas estabilizadas com cimento. Como resultados obtiveram um incremento significativo nos parâmetros de resistência a partir de misturas com 9% de cimento.

Ruver et al., (2013) estudou o comportamento da cal hidratada e a cal hidráulica, junto a cinzas volantes, em diferentes proporções em um solo eólico e tempos de cura, constataram que para fins de base e sub-base de pavimentos a melhor proporção de cal e cinza volante é (8,41 % de cal + 19,59 % de cinza) e com 28 dias de tempo de cura

Segundo Cezne et al., (2016), a resistência mecânica de um solo cascalho laterítico, estabilizado com 20 % de areia desértica e diferentes concentrações de cimento Portland (2, 4 e 6%). Apresentou um aumento crescente conforme o aumento da porcentagem do estabilizante químico, porém os valores obtidos a partir das dosagens sugeridas não atenderam os requisitos mínimos especificados pelo DNIT, ES 143.

Ao aprofundar os conhecimentos sobre o método de estabilização de solos com adição de cal, Corteletti (2013) verificou a influência nas características mecânicas de um solo residual coletado no município de Lageado/RS estabilizado com o aditivo nas porcentagens (5, 7, 9 e 11%). O autor concluiu que a resistência a compressão simples das misturas avaliadas apresentaram um aumento linear conforme houve o aumento da porcentagem de cal.

Na pesquisa realizada por Machado et al., (2003) na cidade de Viçosa-MG, constatava que um solo arenoso estabilizado com alcatrão e cal na proporção de 2 %, aplicado a diferentes tempos de cura (1, 7 e 28 dias), apresentou uma resistência a compressão simples maior com 28 dias de cura que os demais.

Segundo Wessenling (2002), examinou a influência do tempo de cura na resistência a compressão simples de misturas de solo-cal, usando um teor de 11% de aditivo químico. Os resultados encontrados foram de 1167 kpa correspondente a 7 dias de cura e 2232 kpa para 90 dias. Foi observado também, que todas as misturas ganharam maior resistência nos períodos de 7 a 28 dias.

Para estabilização química Kestler (2009) indica que para solos granulares, o índice de plasticidade da mistura para os solos classificados como SP (“solos eólicos) não deve exceder a proporção de 25 e a porcentagem de material fino (passante na peneira nº 200) adicionado a mistura não deve ser maior que 25% da composição total.

Segundo Bueno (2011), quando se é abordado o assunto sobre estabilização de solos, independente do estabilizante adicionado é de extrema importância à realização do ensaio de resistência a compressão. Ensaio de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal. Para tal ensaio existem diversas metodologias, porém quando se trabalha com estabilização de solo-cal, o mesmo carece de informações.

O estudo do módulo de resiliência estudado por Leviet al., (2003) para um solo arenoso estabilizado com cal e alcatrão, abordou o método de ruptura com velocidade controlada de 1 mm/min. Silva (2016) ao estudar solos lateríticos e não lateríticos estabilizados com diferentes porcentagens de cal, aplicou o modo de deformação controlada com velocidade de 1,27 mm/ min. Para Corteleti (2013) o procedimento seguido para o ensaio de resistência a compressão simples de um solo residual estabilizado com cal, foi embasada pela norma DNER 180/1990. A qual orienta a imersão dos corpos de prova por um período de 24 horas antes do rompimento, a uma velocidade constante de 1,14 mm/min.

No quadro 3, são apresentados alguns valores médios de resistência à compressão simples obtidos de misturas de solos eólicos estabilizados com diferentes aditivos químicos. É evidenciado no quadro que os solos eólicos quando estabilizados com cimento apresentam um crescimento linear em sua resistência, conforme é aumentado o teor do estabilizante químico na mistura. Porém, o mesmo não é aplicado quando se é misturado dois estabilizantes químicos em solos com maior teor de finos em sua composição (quadro 4).

Referências	Aditivo	Porcentagem (%)	RCS (Mpa)
Al-Aghbari, 2006	cinza de incinerador	2; 4; 8; 10; 12	0,05; 0,08; 0,21; 0,58; 1
Mohamedzein et al., 2009	cimento portland ordinário	2; 4; 8; 10; 12	0,15; 0,35; 0,7; 0,9; 1,1
Mohamed, 2005	cimento portland	2; 4; 8; 10; 12	0,2; 0,4; 1,3; 2,0; 2,3
Ruver et al., 2013	cimento	3; 6; 9; 12	0,15; 0,638; 1,537; 2,8
Ruver et al., 2013	cimento	3; 6; 9; 12	0,164; 0,579; 1,4; 2,54

Quadro 3 - Diferentes valores de RCS encontrados a partir da estabilização de solo eólico com diferentes aditivos químicos.

Fonte: Autor

Referências	Solo	Aditivo	Porcentagens (%)	RCS (Mpa)	
Levi et al., 2003	Arenosilto - argilosa	cal (2%) e alcatrão	0; 0,25; 0,5; 1	0; 0,25; 0,5; 1	
Silva, 2016				sem imersão	com imersão
	laterítico	cal	6	0,26	0,13
	não laterítico	cal	5; 7; 9; 11	0,23	0,12
Corteleti, 2013	solo residual	cal	5; 7; 9; 11	0,102; 0,13; 0,146; 0,169	

Quadro 4 - Valores de resistência a compressão simples para diferentes solos estabilizados com cal.

Fonte: Autor

O ensaio Califórnia Bearing Ratio (CBR) ou o Índice de Suporte Califórnia tem como objetivo estimar a resistência de um solo compactado para sua utilização em bases, sub-bases e subleitos de pavimentos (SENÇO, 2007)

Segundo a NBR 9895 (ABNT, 1987), o ensaio consiste em compactar corpos-de-prova com umidades diferentes. Onde um corpo de prova, deve estar na umidade ótima do solo/mistura. Sendo assim, os demais devem estar com 4% e 2% de umidade abaixo da umidade ótima (ramo seco), respectivamente e, conseqüentemente, outras amostras devem estar com 2% e 4% de umidade acima da umidade ótima (ramo úmido). Após isso, imergem-se os corpos-de prova em água potável para a determinação da expansão dos corpos de prova. Passado o período de imersão, o corpo de prova é levado para a prensa (Figura 6), no qual é submetido a uma tensão aplicada por um pistão cilíndrico padrão que tende a perfurar a amostra.

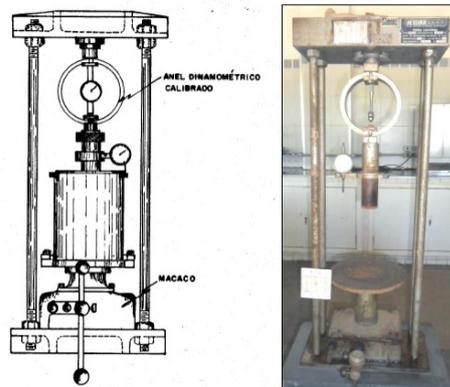


Figura 6 - Prensa para perfuração.
Fonte: DNIT (2014).

Segundo o (DNIT, 2006), a capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo ensaio Índice Suporte Califórnia (ISC), na qual as camadas de pavimentos devem apresentar os seguintes valores de ISC e Expansão mínimos (Tabela 1). Recomenda-se também a utilização de materiais de melhor qualidade para camadas finais e compor o corpo do aterro, para isso é classificado segundo valor de ISC variando de péssimo a excelente (Tabela 2).

Tabela 1 - valores mínimos de tolerância para ensaio de CBR em diferentes camadas de pavimentos

Camada	ISC (%)	Expansão (%)
Subleito	≥ 2	≤ 2
Reforço do subleito	ISC \geq Subleito	≤ 1
Sub-base	ISC ≥ 20	≤ 1
Base	ISC ≥ 80	$\leq 0,5$

Fonte: (DNIT, 2006).

Tabela 2 - Qualidade do material em função do ISC

ISC (%)	Qualidade do material
≥ 60	Excelente
20 a 60	Muito bom
10 a 20	Bom
5 a 10	Regular
2 a 5	Ruim
< 2	Péssimo

Fonte: (DNIT, 2006).

No quadro 5, são apresentados valores obtidos por Carvalho et al., (2010) referentes aos ensaios de CBR e Expansão em moldes compactados através de energia de compactação Proctor modificado, em areias de rio e argilas com coloração amarelada e vermelha. Nota-se que para areia de rio ou misturas utilizando areia, independente da argila contida o ISC apresentou os maiores valores encontrados e a menor expansão.

Referências	Solo	Porcentagem (%)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
Carvalho et al., 2010	Argila amarela	NL	25	0,13
	Argila vermelha	NL	22	0,13
	Areia	NL	29	0,03
	Areia + argila amarela	60 + 40	30	0,02
	Areia + argila amarela	70 + 30	60	0,06
	Areia + argila amarela	80 + 20	63	0,09
	Areia + argila vermelha	60 + 40	54	0
	Areia + argila vermelha	70 + 30	62	0,12
	Areia + argila vermelha	80 + 20	50	0,06

NL- nulo

Quadro 5 - Diferentes valores de ISC e expansão encontrados por Carvalho et al., (2010).

Fonte: Autoria própria.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Definições dos materiais e localização das jazidas

O solo eólico de textura granular estudado no presente trabalho foi coletado em uma jazida que se encontra em pousio, adjunto a área de pecuária (Figura 7) nas proximidades do município de Manoel Viana/RS, nas coordenadas 29°35'31.14"S e 55°22'3.76"O.



Figura 7- Área de empréstimo do material eólico - município de Manoel Viana/RS.
Fonte: Software Google Earth Pro

Com o intuito estabilizar geotecnicamente o solo eólico através da adição de solo fino, foram pesquisadas no município de Alegrete/RS e Santana do Livramento/RS, diversas áreas de empréstimo e jazidas em busca de um material de textura fina (teor de finos passantes na peneira nº 200 acima de 50% segundo a metodologia SUCS). A partir dessa pesquisa de campo (coleta de amostras e ensaios de caracterização) foi possível localizar e selecionar uma jazida para extração do solo fino. O local está situado no município de Alegrete/RS, próximo de uma antiga olaria, nas coordenadas 29°50'21.82"S e 55°47'6.22"O. A Figura 8 mostra uma vista panorâmica da jazida do solo fino, obtida do software *Google Earth Pro*.

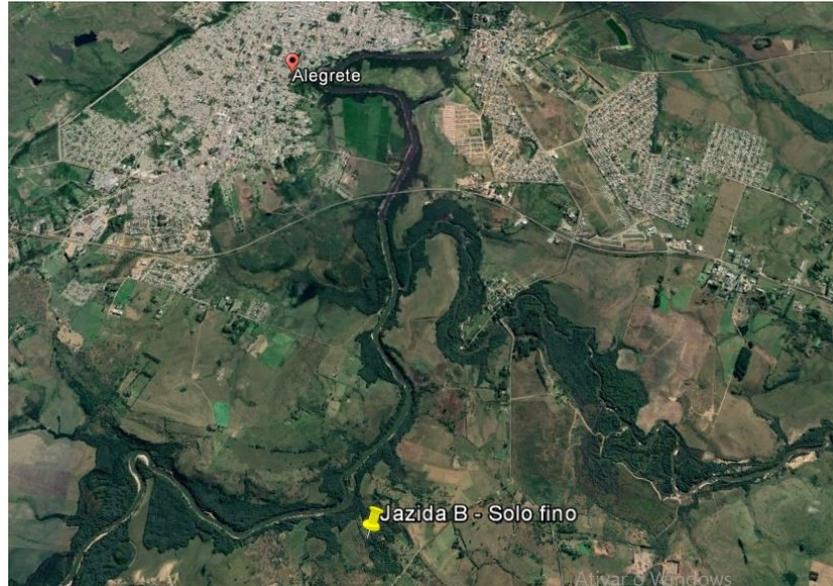


Figura 8 - Área de empréstimo do solo de textura fina - Alegrete/RS.

Fonte: Software Google Earth Pro

Para esta pesquisa utilizou-se cal hidratada do tipo CH-II (Figura 9), a qual atende aos requisitos impostos pela NBR 7175 (ABNT, 2003). O produto é da marca *Kidrax* fabricada na cidade de Pântano Grande/RS, popular e de fácil acesso no município de Alegrete/RS.



Figura 9 - Cal hidráulica marca KIDRAX

Fonte: Autor

3.2 Atividades de Campo Desenvolvidas

A coleta de amostras deformadas de solos, embasou-se conforme a NBR 9604- (ABNT, 1986). Com o uso de pá e picareta, o local onde foram coletadas as amostras foi previamente limpo, retirando pedras e raízes. Em seguida, realizou-se a coleta de solo, identificação e acondicionamento do solo em sacolas plásticas. Partes das atividades de campo podem ser visualizadas na figura 10.



Figura 10 - (A) Jazida A, referente ao solo eólico - Manoel Viana/RS. (B) Jazida B, referente ao solo de textura fina - Alegrete/RS. (C) Acondicionamento das amostras de solo coletadas.
Fonte: Autor

3.3 Ensaiois laboratoriais

Os ensaios realizados neste trabalho foram:

- Preparação de Amostras definido pela NBR 6457 (ABNT, 1986);
- Ensaio de massa específica dos grãos, definido pela norma extinta NBR 6508 (ABNT, 1984)
- Ensaio de Granulometria definido pela NBR 7181 (ABNT, 1984);
- Ensaio de Limite de Liquidez, definido pela NBR 6459 (ABNT, 1984);
- Ensaio de Limite de Plasticidade, definido pela NBR 7180 (ABNT, 1984);
- Ensaio de Compactação, definido pela NBR 7182 (ABNT, 1986);
- Ensaio de compressão simples, definido pela NBR 12025 (ABNT, 1990);
- Índice de Suporte Califórnia ou CBR, definido pela NBR 9895 (ABNT, 1987).

3.3.1 Preparação de Amostras e ensaios de caracterização

As amostras de solo utilizadas nos ensaios foram previamente secadas até próximo de suas umidades higroscópicas (Figura 11), de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986). Na situação do solo fino, os torrões das amostras foram desmanchados utilizando almofariz e mão de grau (Figura 12). Seguidamente, para cada solo (eólico e fino) as amostras coletadas foram misturadas e homogeneizadas, para assim, obter um material mais homogêneo a ser utilizados nos ensaios de laboratório. As amostras representativas foram passadas na peneira 3" (76,2 mm) de diâmetro e, na preparação das amostras para o ensaio de compactação, os solos foram passadas na peneira N° 10 (4,75 mm) conforme orientação da NBR 6457 (ABNT, 1986).



Figura 11 - Processo de secagem ao ar, das amostras coletadas.
Fonte: Autor



Figura 12 - Processo de destorroaçodo solo fino.
Fonte: Autor

Na Figura 13 apresenta-se a curva granulométrica da areia eólica utilizada para o estudo, classificada segundo a metodologia do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como SP – Areia mal graduada e, de acordo com a metodologia TRB, foi classificada como A-3. Além disso, apresentou um coeficiente de uniformidade (C_u) de 2,08 e coeficiente de curvatura (C_c) de 1,08 (Apêndice A).

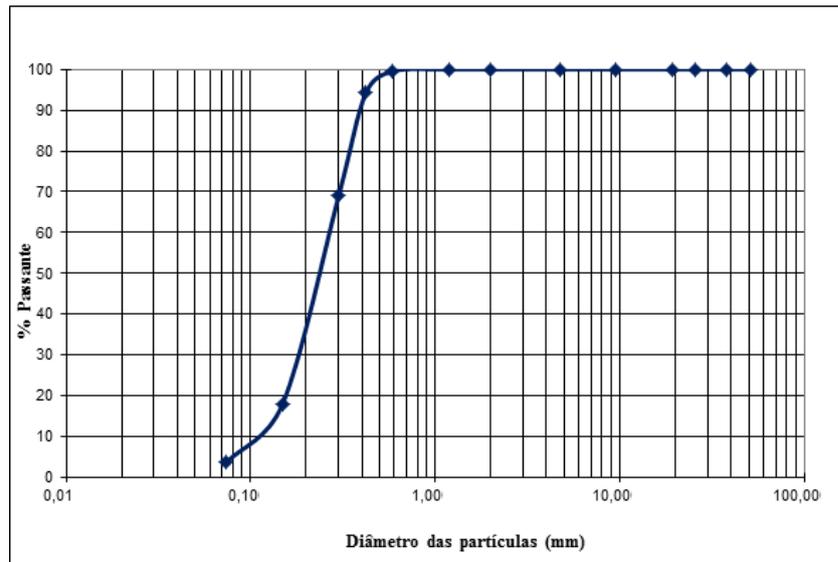


Figura 13 - Curva de granulometria para o solo de Manoel Viana/RS

Fonte: Autor

O solo fino utilizado para o tratamento do solo eólico apresentou a seguinte curva granulométrica.

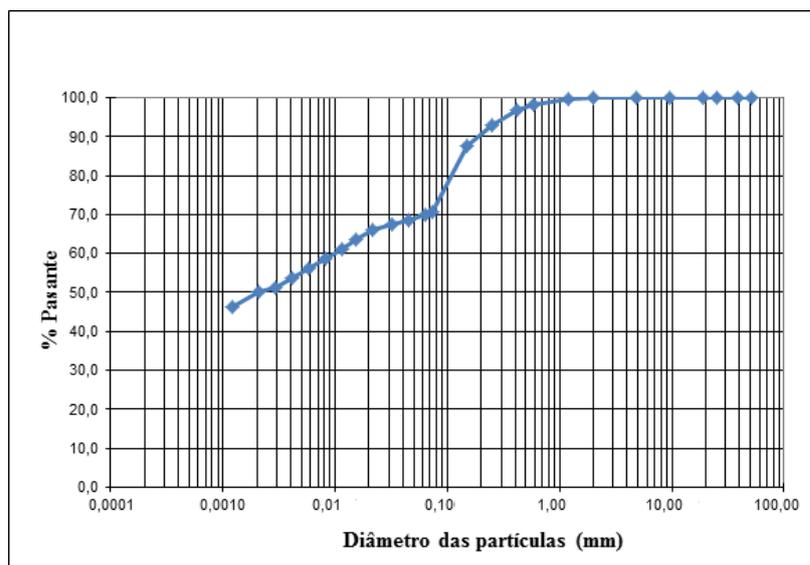


Figura 14 - Curva granulométrica do solo fino

Fonte: Autor

De acordo com a classificação SUCS o solo fino foi classificado com silte elástico arenoso (MH). Pela metodologia Transportation Research Board (TRB) foi classificada no grupo A-7-5, podendo ser altamente elástica e sujeita a elevadas mudanças de volume (Apêndice B).

A massa específica do solo eólico é de $2,66 \text{ g/cm}^3$ e para o solo fino é de $2,68 \text{ g/cm}^3$, com base nos valores apresentados no apêndice C.

Os limites de liquidez e plasticidade para o solo eólico não puderam ser determinados devido à baixa coesividade do solo. Almeida F. et al., (2018) afirma que os solos eólicos não apresentam limite de liquidez e plasticidade, isso devido a sua baixa ou nenhuma presença de material fino.

Por outro lado, conforme o apêndice D, o solo silte elástico arenoso apresentou um valor de 69,72 % de limite de liquidez (Figura 15), 37,57 % de plasticidade e 32,15 % de índice de plasticidade.

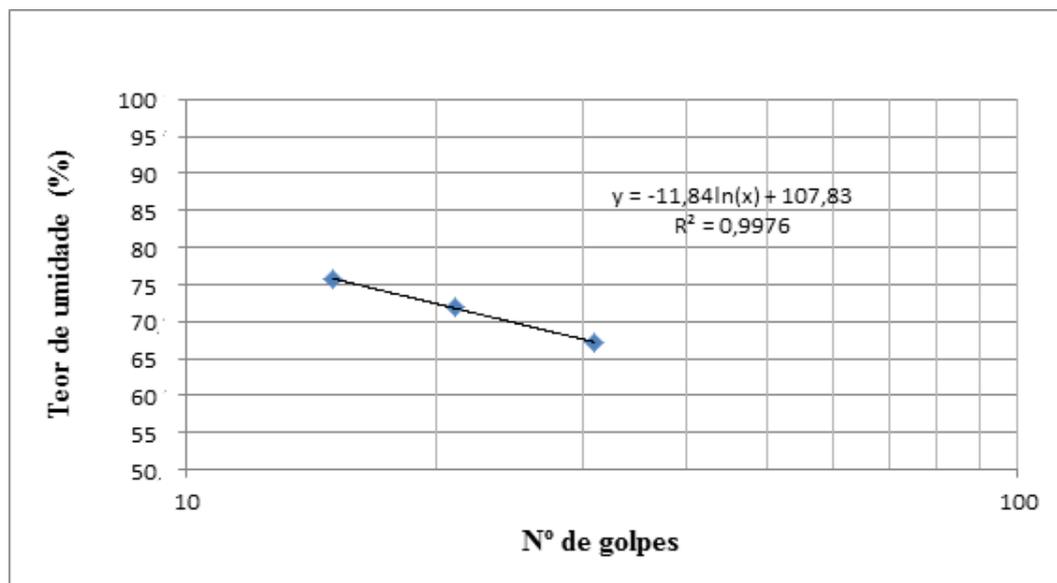


Figura 15 - Limite de liquidez do solo fino

Fonte: Autor

3.3.2. Preparação das misturas

O guia *Stabilization Selection Guide for Aggregate and Native-Surfaced Low Volume Roads* escrito por Kestler (2009), orienta que na estabilização de solos com emprego de

estabilizantes químicos, como por exemplo a cal, a porcentagem de material fino passante na peneira de nº 200 (0,075 mm) que compõe a mistura, não deve exceder os 25%.

Tomando como base as informações supracitadas no guia, foram elaboradas as diferentes misturas de solo eólico, solo fino e cal hidratada com seus respectivos pesos secos, de forma a compensar o teor de umidade higroscópico de cada componente da mistura. Na Tabela 3 apresentam-se as proporções de misturas adotadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Tabela 3 - Proporção das misturas da areia com estabilizante.

Mistura	Proporção
Areia eólica + solo fino	75% - 25%
Areia eólica + solo fino	80% - 20%
Areia eólica + solo fino	85% - 15%
Areia eólica + solo fino + cal hidratada	75% - 20% - 5%
Areia eólica + solo fino + cal hidratada	80% - 15% - 5%
Areia eólica + solo fino + cal hidratada	85% - 10% - 5%

Fonte: Autor

Para melhor identificação foi adotado diferentes siglas correspondentes para cada material constituintes das misturas, sendo para a areia eólica “S”, para o solo fino “M” e para a cal hidratada ‘CH’.

3.3.3 Ensaio de Compactação

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 1986). O método de compactação consistiu primeiramente em preparar as misturas respeitando as proporções citadas na Tabela 3 (Figura 16 A). Foi utilizado cilindro pequeno Proctor e soquete (Figura 16 B), para a compactação de cada mistura de forma uniforme. Foram compactadas três camadas de solo, através da aplicação de 26 golpes por camada, dessa forma a compactação das misturas foi realizada obedecendo à energia normal. Após compactação, os corpos de prova foram extraídos utilizando um extrator (Figura 16 C) e acondicionados em papel filme e sacos plásticos, visando conservar a umidade de cada amostra (Figura 16 D).



Figura 16 - (A) Preparação das misturas; (B) Soquete e cilindro; (C) Extrator; (D) Amostra acondicionada em papel filme e saco plástico.

Fonte: Autor

Cada mistura foi compactada através de diferentes teores de umidade, possibilitando a elaboração da curva de compactação, conseqüentemente, a determinação da massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e o teor de umidade ótimo (Wot %).

3.3.4 Preparação de corpos de prova para ensaios de resistência

Utilizaram-se como referência os valores das massas específicas secas máximas e teores de umidade ótimos, para cada mistura, foram moldados corpos prova para a realização do ensaio compressão simples e ensaio de Índice de Suporte de Califórnia (ISC). Os corpos de prova destinados ao ensaio de compressão simples foram moldados utilizando o cilindro pequeno Proctor e, para o ensaio ISC os corpos de prova foram confeccionados utilizando o cilindro maior Proctor.

A normativa NBR 12024 (ABNT, 1992) orienta que durante o período em que ocorre o processo de cura do material, o mesmo esteja acondicionado em uma câmara úmida com temperatura de 23 ± 2 °C e, que a umidade relativa do ambiente não seja inferior a 95%.

Devido ao fato de que a câmara úmida existente estava indisponível, foi adaptada uma câmara úmida alternativa. Foi colocada uma mesa de madeira dentro de uma caixa d'água

tampada (Figura 17), com uma lâmina de água de aproximadamente 20 cm. A caixa d'água foi acomodada dentro da sala da câmara úmida do laboratório do curso de Engenharia Civil.

Os corpos de prova confeccionados para o ensaio de resistência a compressão simples, permaneceram em cura na caixa d'água por 28 dias antes de seu rompimento. Os moldes compactados para o ensaio de Índice Suporte Califórnia ficaram por um período de 7 dias em cura em uma sala climatizada. Na figura 17 são ilustrados os corpos de prova para a compressão simples dentro da câmara úmida alternativa. Na Figura 18, os corpos de prova submetidos ao ensaio ISC, acondicionado em sala climatizada.



Figura 17 - Câmara úmida alternativa

Fonte: Autor



Figura 18 - Acondicionamento dos corpos de prova para ensaio ISC.

Fonte: Autor

3.3.5 Ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS)

Para a realização do ensaio de resistência, de acordo com a normativa NBR 12025 (ABNT, 1990) orienta que os moldes devem ficar submersos por um período de 4 horas antes da ruptura, a fim de tentar condicionar a pior condição possível.

Schwendler (2013) avaliou a estabilização de dois solos do município de Santa Cruz do Sul/RS com lignosulfonato submetidos a diferentes períodos de cura. O autor após deixar os moldes imersos por um período de 24 horas antes do ensaio de compressão simples, conclui que os moldes ficaram inutilizados. Da mesma forma, Silva (2016) estudou a estabilização de solos lateríticos e não lateríticos com cal. Os resultados encontrados pelo autor foram que as misturas de solos naturais e misturas estabilizadas com cal, imersas em água por um período de 4 horas imediatamente após serem compactadas, apresentaram valor nulo de resistência a compressão simples. No entanto, o autor constatou que para os períodos de 7 a 60 dias de cura, os corpos de prova estabilizados apresentaram alguma manutenção em sua integridade para a realização dos ensaios, indicando que a cal pode ter favorecido a retenção dos moldes.

Com base nas pesquisas bibliográficas supracitadas, neste trabalho, foram realizados testes de imersão para verificar se os corpos de prova das misturas estudadas (Areia eólica + solo fino + cal hidratada: 75%-25%-0%, 80%-20%-0%, 85%-15%-0%, 75%-20%-5%, 80%-15%-5%, 85%-10%-5%), ficariam ilesos após a imersão em água por 4 horas. Os corpos de prova utilizados para o teste de imersão foram os obtidos com a confecção da curva de compactação, utilizou-se o corpo de prova que apresentava parâmetros mais próximos de umidade ótima e massa específica seca de cada mistura estudada.

A seguir é ilustrado o teste de imersão realizado com amostras de solo referentes aos tratamentos S-M: 75%-25% (Figura 19), S-M: 80%-20% e S-M: 85%-15% (Figura 20). Nota-se que os moldes confeccionados a partir de misturas S-M: 80%-20 e S-M: 85%-15% apresentaram degradação total, o que impossibilitou a utilização dos mesmos para o ensaio de compressão simples. Da mesma forma, o molde referente à curva de compactação S-M: 75%-25% identificou-se degradação na sua parte superior.



Figura 19 - Teste de imersão por período de 4 horas do tratamento S-M: 75%-25%
Fonte: Autor



Figura 20 - Teste de imersão por período de 4 horas dos tratamentos S-M: 80%-20% e S-M: 85%-15%.
Fonte: Autor

Na figura seguinte, é realizado o mesmo teste de imersão para os tratamentos S-M-CH: 75%-20%-5% e S-M-CH: 80%-15%-5%. Observa-se que os moldes com a presença da cal hidratada em sua composição apresentaram resultados satisfatórios (sem degradação) após a imersão em água, indicando que a cal hidratada, pode ter agido como um impermeabilizante e dificultou a infiltração de água no interior dos moldes.



Figura 21 - Teste de imersão por período de 4 horas do tratamento S-M-CH: 75%-20%-5%
Fonte: Autor



Figura 22 - Teste de imersão por período de 4 horas do tratamento S-M-CH: 80%-15%-5%
Fonte: Autor

Devido aos resultados obtidos com os testes preliminares de imersão, adotou-se não executar a imersão prévia ao ensaio de resistência a compressão simples para os moldes referentes aos tratamentos sem cal hidratada em sua composição (Areia eólica + solo fino: 75%-25%; 80%-20%; 85%-15%). Para os moldes referentes aos tratamentos que envolveram o uso da cal (Areia eólica + solo fino + cal hidratada: 75%-20%-5%, 80%-15%-5%, 85%-10%-5%), optou-se pela imersão de apenas três dos seis moldes confeccionados para o ensaio de compressão simples, a fim de possibilitar a comparação com os tratamentos sem cal hidratada em sua composição que não foram submetidos à imersão prévia.

Os moldes confeccionados para elaboração da curva de compactação restantes foram submetidos ao ensaio de compressão simples, onde foi aplicada uma carga constante de 1 mm/min em uma prensa hidráulica da marca *Shimadzu* (Figura 23) com capacidade máxima de compressão de 5 kN. Os resultados obtidos com a compressão simples dos moldes referentes às curvas de compactação foram utilizados apenas para averiguar o comportamento dos mesmos junto as suas respectivas curvas.

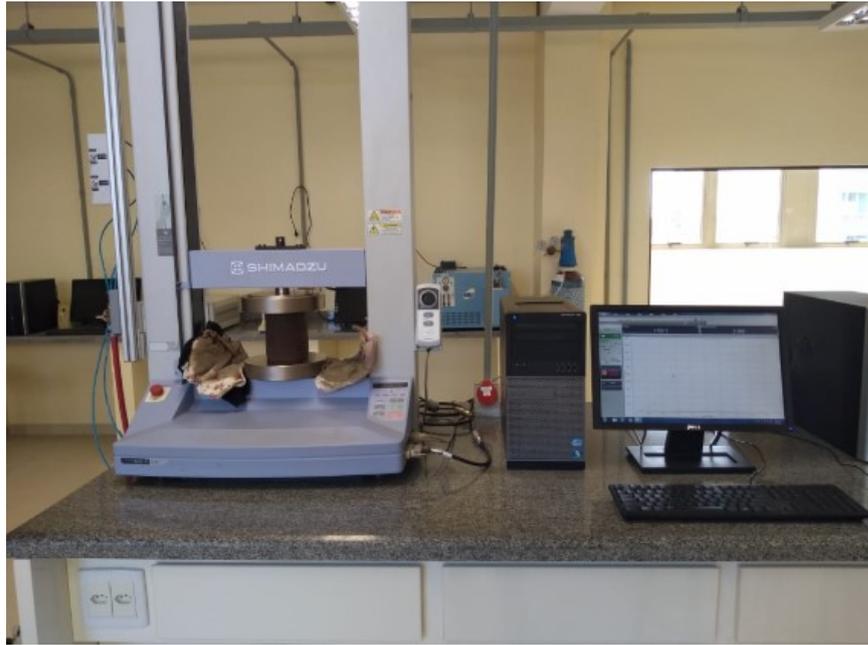


Figura 23 - Prensa hidráulica da marca *Shimadzu* em execução do ensaio de compressão.
Fonte: Autor

Os corpos de prova confeccionados próximos dos parâmetros de compactação (massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo), sob 28 dias de cura em câmara úmida alternativa referente às misturas com e sem cal hidratada na sua composição, foram submetidos ao ensaio de compressão simples.

Os corpos de prova referentes aos tratamentos sem cal hidratada em sua composição foram submetidos ao ensaio de compressão simples sem aplicação de imersão prévia. Por outro lado, para os corpos de prova referentes aos tratamentos com cal hidratada utilizou-se imersão prévia ao ensaio de compressão simples de 4 horas para três dos seis corpos de prova. A velocidade de compressão para todos os tratamentos foi de 1 mm /min.

Para a apresentação dos dados obtidos de compressão simples dos corpos de prova das diferentes misturas estudadas, foi adotado o controle estatístico do concreto por amostragem parcial disposto na normativa NBR 12655 (ABNT, 2006). Devido à normativa ser utilizada para um número de 6 a 20 repetições, a pequena quantidade de amostras confeccionadas no estudo, limitada a seis amostradas para os tratamentos sem cal hidratada e seis amostras para os tratamentos com cal (dividindo-se em três com imersão prévia e três sem imersão prévia), foi adotado para o valor de F_m prescrito na normativa, como a média aritmética dos três menores valores de resistência obtidos em ordem crescente.

3.3.6 Ensaio Índice Suporte Califórnia (ISC)

Para a execução do ensaio ISC, o mesmo foi dividido em quatro etapas:

1º Etapa: Consistiu em compactar os moldes para cada tratamento estudado com o teor de umidade ótima obtida a partir das curvas de compactação, utilizando o cilindro grande, descrito na normativa NBR 7182 (ABNT, 1986) aplicando energia normal.

2º Etapa: Após a compactação dos moldes, os mesmos foram deixados em um local climatizado por um período de 7 dias em cura, com a intenção de intensificar ainda mais sua resistência (Figura 24 A).

3º Etapa: Com a conclusão do período de cura dos moldes, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de expansão, consistindo em deixar imersos em água por um período de quatro dias, realizando as leituras diárias com o uso de extensômetro acoplado na parte superior do molde (Figura 24 B).

4º Etapa: No final do último dia de imersão, os moldes foram retirados da água e colocados para escoar por um período de 15 minutos (Figura 25 A). Posteriormente foram levados à prensa (Figura 25 B). Como a prensa de operação manual sugerida pela norma para a realização do ensaio encontrava-se fora de uso no laboratório, foi adaptado o ensaio utilizando a prensa de modelo *Emic* com capacidade de 300 kN de compressão simples, acoplada um pistão cilíndrico onde a carga da prensa era aplicada.



Figura 24 - (A) Corpos de prova para o ensaio ISC em cura. (B) Ensaio de expansão
Fonte: Autor



Figura 25 - (A) Escoamento dos moldes pré-compressão. (B) Ensaio de ISC
Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no quadro 6, pode-se observar que o solo eólico não possui pedregulho, mas pode apresentar uma pequena quantidade de material fino na sua composição (argila e silte). O solo eólico estudado apresentou classificação igual aos solos avaliados por Mohamed (2005) e Ruver et al. (2013).

Autor	Mohamed (2005)	Ruver et al. (2013)		Areia eólica
Localidade	Areia de deserto	Área de várzea	Cume de duna	Estudada
Pedregulho	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Areia	100,0%	90,9%	99,3%	96,0%
Silte	0,0%	0,8%	0,7%	0,5%
Argila	0,0%	8,3%	0,0%	3,5%
Coefficiente de Uniformidade	2,47	2,3	1,3	2,08
Coefficiente de Curvatura	1,05	1	1,2	1,08
Classificação	SP	SP-SM	SP	SP

Quadro 6 - Comparação granulométrica de solos eólicos

Fonte: Autor

O quadro 7 mostra em termos de comparação, o valor da massa específica dos grãos do solo eólico estudado, em relação a solos eólicos de outros locais. O solo eólico estudado apresenta valor próximo ao solo eólico da Arábia Saudita, bem como apresenta valor de massa específica entre os solos eólicos da fronteira centro oeste do Rio Grande do Sul.

Solo Eólico	Massa Específica (g/cm ³)
Arábia Saudita	2,67
Banji - Iraque	2,70
Areia de Wahiba - Omã	2,60
Rio Grande - Brasil	2,64
Durasnal - Alegrete - BR	2,87
São João - Brasil	2,34
Solo eólico estudado	2,66

Quadro 7 - Valores de massa específica de solos eólicos

Fonte: adaptado de Almeida et al. (2018).

Os limites de liquidez e plasticidade do solo eólico estudado não foram determinados, devido ao solo apresentar baixa presença de material fino em sua composição. Da mesma

forma, Almeida, F. et al. (2018) não pode determinar os limites de liquidez e plasticidade para diferentes solos eólicos da fronteira centro oeste gaúcha.

A figura 26 apresenta as curvas de compactação das misturas areia eólica + solo fino + cal hidratada (75%-25%-0%, 80%-20%-0%, 85%-15%-0%, 75%-20%-5%, 80%-15%-5%, 85%-10%-5%). No quadro 8 é apresentado seus respectivos valores de umidade ótima (Wot%) e massa específica seca máxima (δ_{dmax}). Observa-se que conforme há maior presença de material fino na mistura, menores são os parâmetros de massas específicas secas máximas e maiores os teores de umidade ótima. Isso é devido à mineralogia e a menor massa específica dos grãos do solo fino, somado a maior presença de água ocupante na superfície específica do solo fino.

O contraste resulta ser mais significativo quando ocorre à adição da cal hidratada. Na figura 27 são apresentados de forma comparativa os valores de umidade ótima para cada tratamento estudado. Nota-se que as misturas que possuíam cal hidratada necessitaram de uma quantidade superior de água para atingir a massa específica seca máxima, devido à cal hidratada possuir superfície específica menor que os grãos de solos presentes nas misturas. Conforme os valores de massa específica seca máxima encontrados por Ody, L. (2018), Souza (2014) e Yahia et al. (2009) apresentados no quadro 9, em diferentes misturas de solos eólicos e estabilizante químico, nota-se que os tratamentos que apresentaram semelhanças com os valores obtidos pelos autores foram: S-M-CH: 75%-20%-5%; S-M-CH: 80%-15%-5%; S-M-CH: 85%-10%-5%.

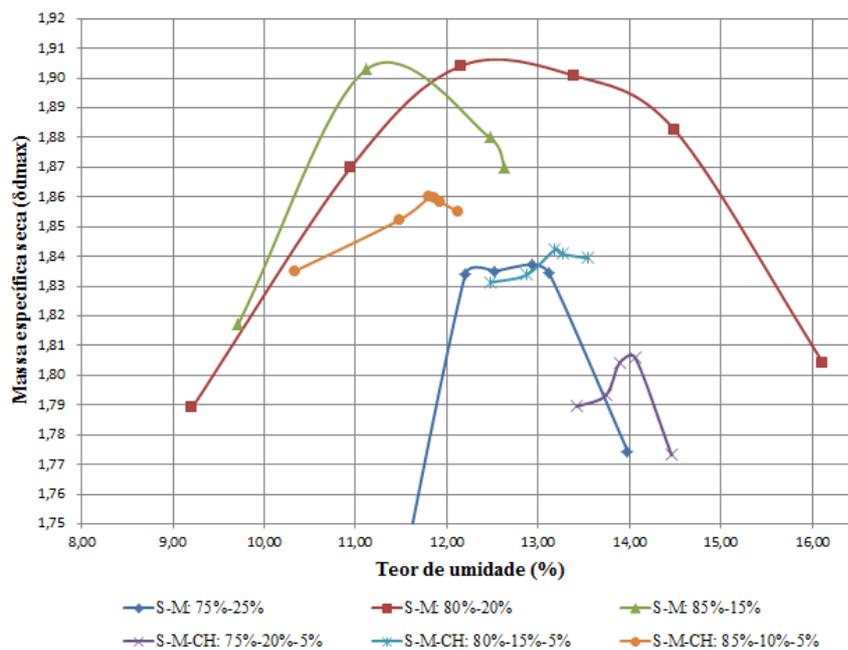


Figura 26 - Curvas de compactação para diferentes misturas estudadas
Fonte: Autor

Tratamentos	Teor de umidade ótimo (Wot%)	Massa específica seca máxima (g/cm³)
S-M: 75%-25%	13,0	1,83
S-M: 80%-20%	12,5	1,90
S-M: 85%-15%	11,4	1,87
S-M-CH: 75%-20%-5%	14,0	1,80
S-M-CH: 80%-15%-5%	13,2	1,84
S-M-CH: 85%-10%-5%	11,8	1,86

Quadro 8 - Valores de teor de umidade ótimo e massas específicas secas máximas para as diferentes misturas estudadas.

Fonte: Autor

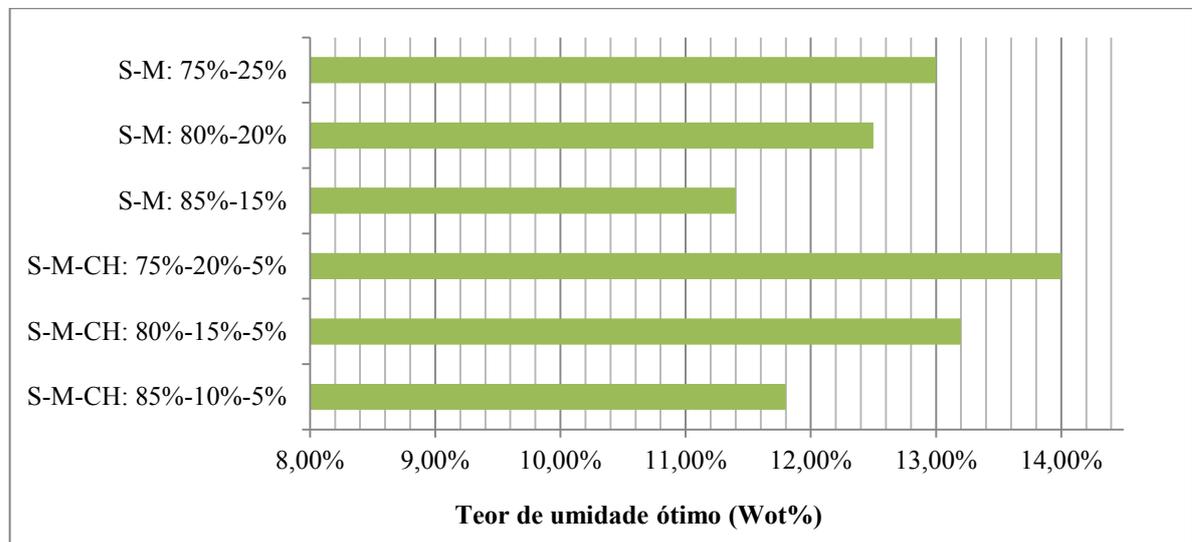


Figura 27 - Representação gráfica comparativa de misturas estudadas x teores de umidade ótima

Fonte: Autor

Autores	Solo	Estabilizante		Massa específica seca máxima (g/cm³)	
Ody, L. 2018	Solo São João	12 % cimento		1,94	
	Solo Durasnal			1,85	
	Solo Manoel Viana			1,86	
Souza, 2014	Arenoso Siltoso	0% de cal		1,73	
		6% de cal		1,63	
		8% de cal		1,68	
		16% de cal		1,53	
Yahia et al. 2009	Areia de deserto	areia	areia	1,75	1,75
		2% de OPC	2% de CBPD	1,68	1,66
		4% de OPC	4% de CBPD	1,67	1,68
		8% de OPC	8% de CBPD	1,73	1,72
		10% de OPC	10% de CBPD	1,74	1,74
		12% de OPC	12% de CBPD	1,65	1,64
S-M: 75%-25%	Solo eólico	Solo fino	Cal hidrtada	1,83	
S-M: 80%-20%				1,90	
S-M: 85%-15%				1,87	
S-M-CH: 75%-20%-5%				1,80	
S-M-CH: 80%-15%-5%				1,84	
S-M-CH: 85%-10%-5%				1,86	

Quadro 9 - Valores de massa específica seca máxima obtidos por diferentes autores

Fonte: Autor

A seguir são apresentados na figura 28 os gráficos referentes à correlação entre as curvas de compactação de cada mistura versus seus respectivos valores de resistência à compressão simples. Nota-se que há uma coerência entre as curvas de compactação e os valores de resistência. Porém no tratamento S-M-CH: 80%-15%-5% as curvas não mostram uma boa correlação, isso provavelmente ao fato dos corpos de prova ter sido rompidos sob diferentes tempos de cura. Observa-se também que os moldes com mais de 28 dias de cura, mesmo não confeccionados em umidade ótima da mistura, apresentaram valores de RCS maiores que os moldes em umidade próxima à ótima.

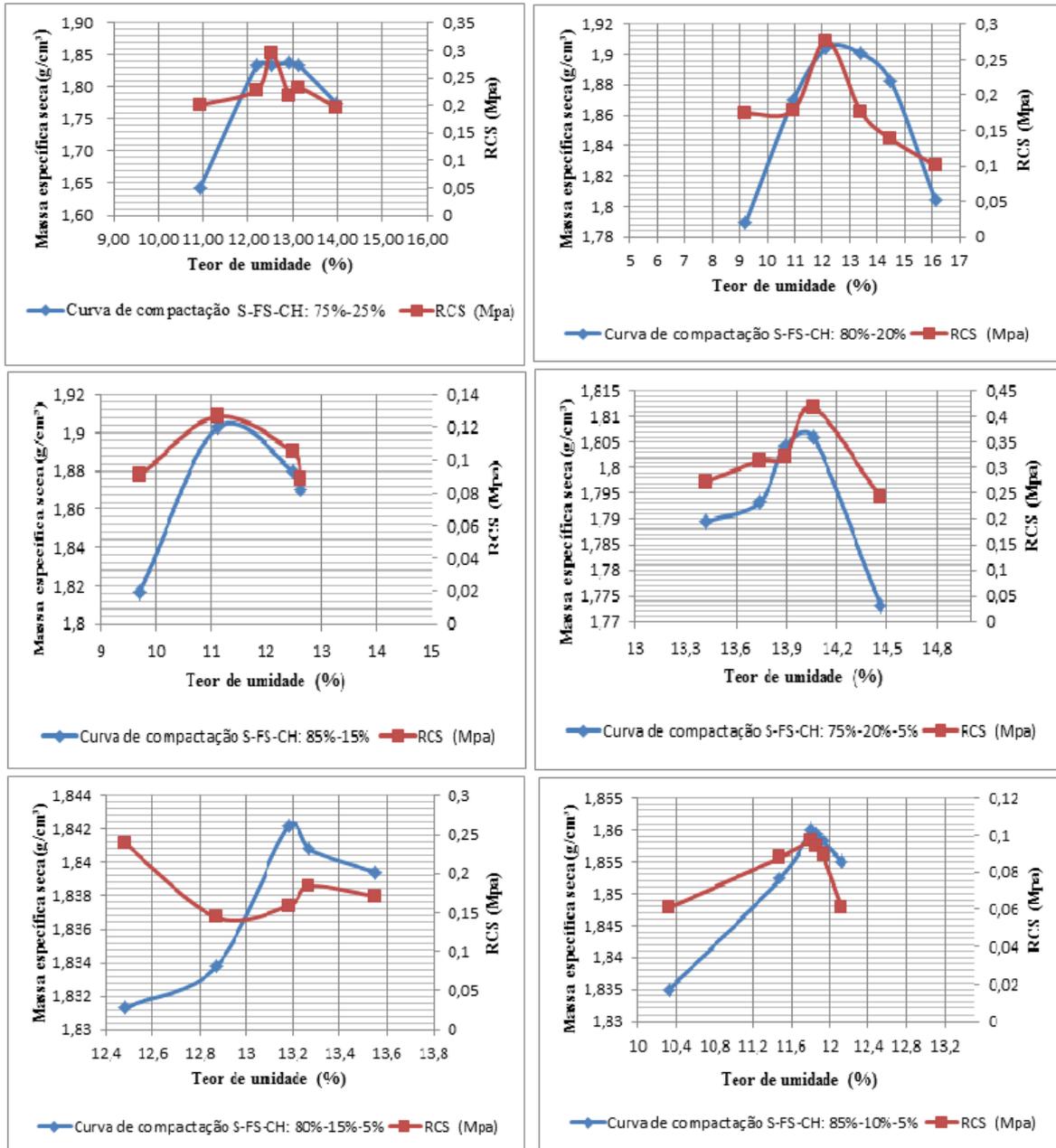


Figura 28 - Correlação entre curvas de compactação dos tratamentos estudados e RCS
Fonte: Autor

Nas figuras 29 são apresentados os resultados Fck dos corpos de prova confeccionados com a umidade ótima para cada tratamento sem imersão prévia e na figura 30 os resultados de Fck para os corpos de prova com imersão. Os dados referentes às figuras 29 e 30 podem ser observados no apêndice E. A partir das seguintes figuras, constata-se que o tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% apresentou valor de Fck maior que os demais estudados. Quando o mesmo é comparado com o tratamento S-M: 75%-25% mostra-se 77,35% mais resistente. Com a comparação é possível constatar a influência da cal hidratada no ganho de resistência dos corpos de prova.

Os valores de resistência à compressão simples obtidos do tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% tanto com imersão prévia, como sem imersão prévia foram os maiores valores encontrados dentre as misturas avaliadas.

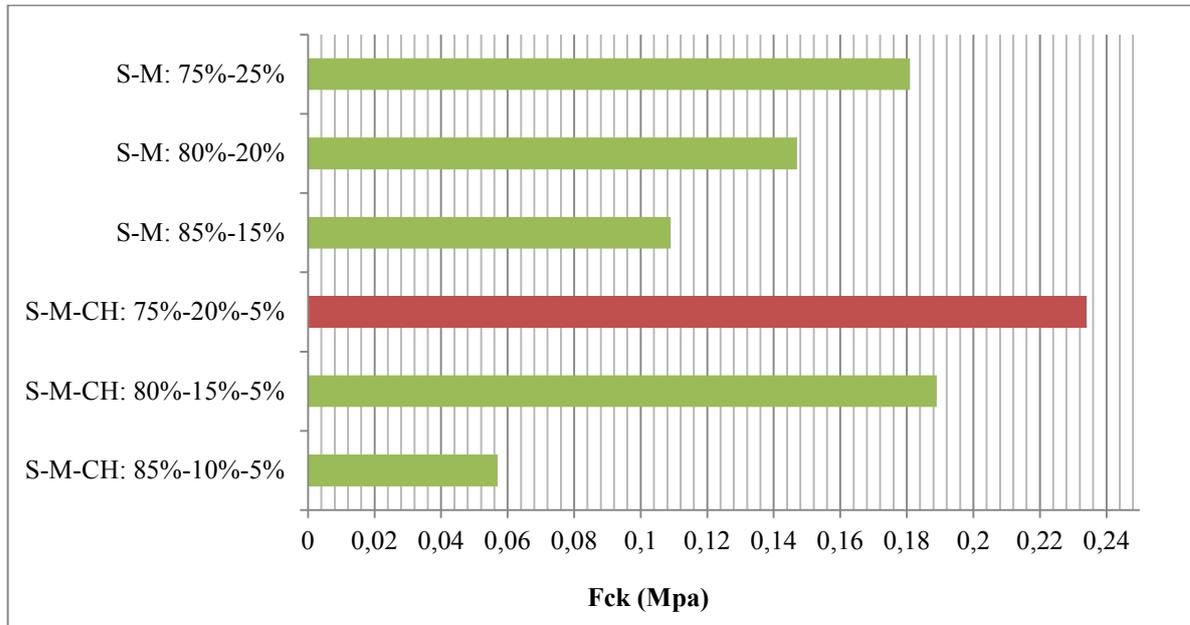


Figura 29 - Valores de Fck para cada tratamento estudado (moldes sem imersão)

Fonte: Autor

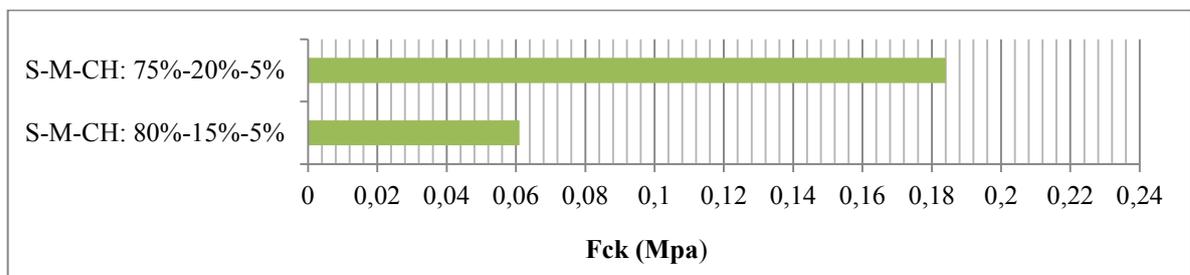


Figura 30 - Valores de Fck para cada tratamento estudado (moldes com imersão)

Fonte: Autor

Quando há presença de finos na mistura $\leq 10\%$, a cal hidratada não se mostrou benéfica. Esta afirmação é observada na comparação dos tratamentos S-M: 85%-15% e S-M-CH: 85%-10%-5%, bem como o teste de imersão dos corpos de prova referente ao tratamento S-M-CH: 85%-10%-5%, que se desintegraram (Figura 31).



Figura 31- Resultado da imersão dos CP's do tratamento S-FS-CH: 85%-10%-5%.
Fonte: Autor

A figura 32 apresenta valores RCS correspondentes as melhores misturas de solo eólico e estabilizante químico apontadas pelos autores citados no quadro 3. Observa-se que, para diferentes misturas de solo eólico e estabilizante químico, a mistura S-M-CH: 75%-20%-5% apresentou o menor valor de resistência à compressão simples. Mas, quando a mistura S-M-CH: 75%-20%-5% é comparada com misturas de diferentes solos (não eólicos) estabilizados com cal (Figura 33), a mistura estudada apresentou valores de RCS superiores aos citados por Corteleti (2013) e Silva (2016).

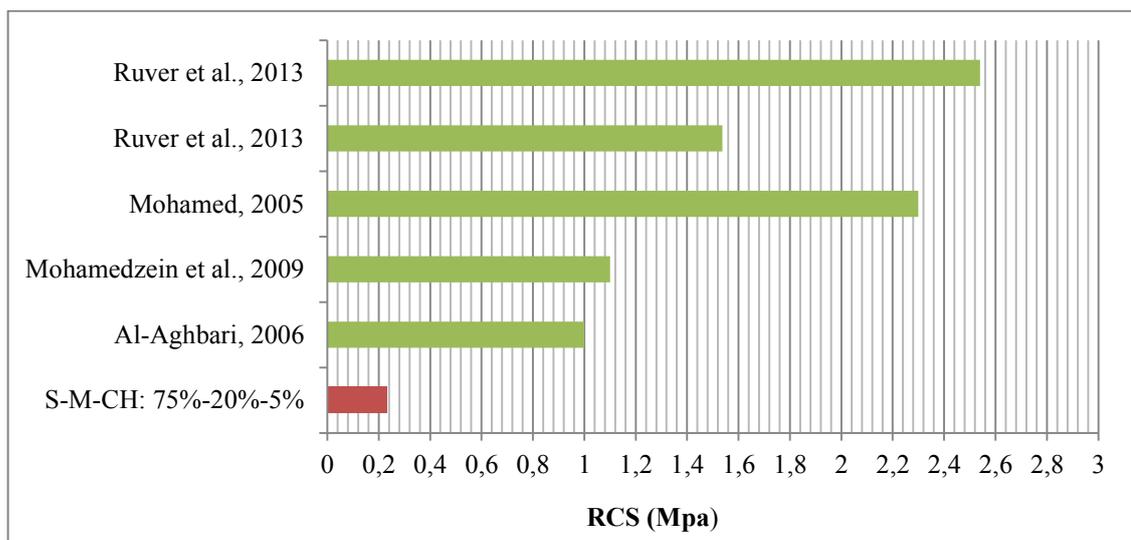


Figura 32 - Comparação entre os valores de RCS de misturas de solos eólicos com estabilizantes químicos obtidos por diferentes autores.
Fonte: Autor

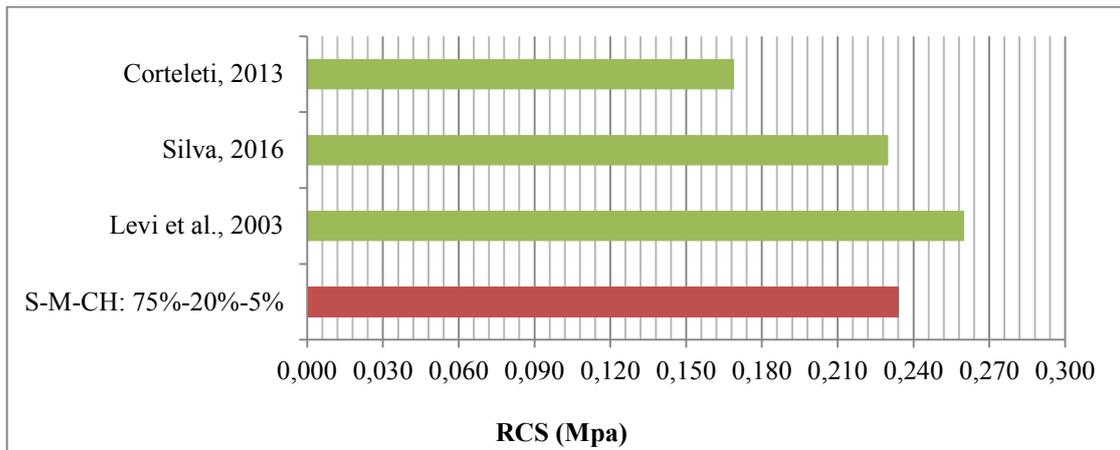


Figura 33 - Comparação entre o tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% com diferentes solos estabilizados com cal.

Fonte: Autor

Conforme mencionado na metodologia no subitem 3.3.4, os corpos de prova compactados para o ensaio de Índice Suporte Califórnia com teor de umidade ótimo obtido em cada tratamento foram submetidos a um período de 7 dias de cura.

No quadro 10 obtido a partir do apêndice F, destacam-se os dados médios de ISC e expansão para cada tratamento estudado. É observado que o tratamento que apresentou a maior média de ISC, foi tratamento S-M-CH: 75%-20%-5%. Para os tratamentos S-M: 75%-25%; S-M: 80%-20% e S-M: 85%-15% não apresentaram $ISC \geq 10\%$, por outro lado, os tratamentos realizados com a presença de cal hidratada, apresentam valores de ISC superiores a 10%. Para os valores médios de expansão obtidos dos tratamentos analisados, o que apresentou maior expansibilidade foi tratamento S-M: 75%-25%, devido a presença de maior quantidade de finos em sua composição.

Ao comparar os valores mínimos de ISC e expansão para pavimentos flexíveis definidos pelo DNIT (2006), todos os tratamentos podem ser utilizados em camadas de subleito e reforço do subleito. De acordo com a tabela 2 o tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% estudado apresentou qualidade do material “muito bom” e o tratamento S-M-CH: 80%-15%-5% e S-M-CH: 85%-10%-5% apresentaram “bons”, os demais tratamentos classificam-se como “regular”.

Para o emprego em outras camadas de pavimentos, apenas o tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% apresentou valor suficiente de ISC para ser empregado somente em sub-base.

Quando comparado o valor de ISC e expansão do tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% obtido por este estudo com os valores encontrados por Carvalho et al. (2010) (Figura 34 e 35),

nota-se que o tratamento estudado apresentou valor de ISC superior aos tratamentos sem misturas de solos (areia, argila vermelha e argila amarela), porém quando observado os valores de misturas desses solos, o mesmo apresenta valores inferiores. Os valores de ISC baixos obtidos por esse estudo, podem estar relacionados ao pouco tempo de cura aplicado, pois como mencionado anteriormente a cal apresenta maiores valores de resistência aos seus 28 dias de cura.

Na figura 35 apresentam-se os valores de expansão da mistura S-M-CH: 75%-20%-5% de forma comparativa com valores de Carvalho et al (2010).

Tratamento	ISC (%)	Expansão (%)
S-M: 75%-25%	8,09	0,91
S-M: 80%-20%	7,54	0,06
S-M: 85%-15%	8,09	0,06
S-M-CH: 75%-20%-5%	35,46	0,07
S-M-CH: 80%-15%-5%	13,75	0,17
S-M-CH: 85%-10%-5%	18,31	0,04

Quadro 10 - Valores médios de ISC e expansão para os diferentes tratamentos avaliados
Fonte: Autor

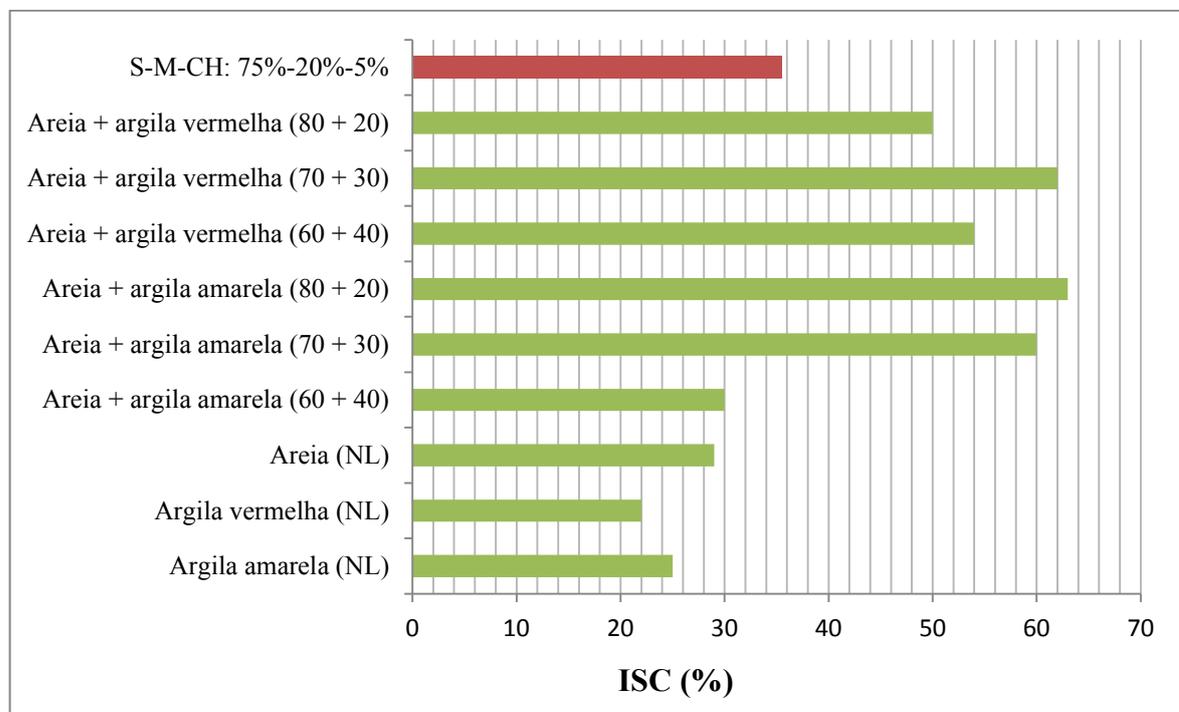


Figura 34 - Comparação dos valores de ISC da mistura S-M-CH: 75%-20%-5% e misturas encontradas por Carvalho et al., (2010)

Fonte: Autor

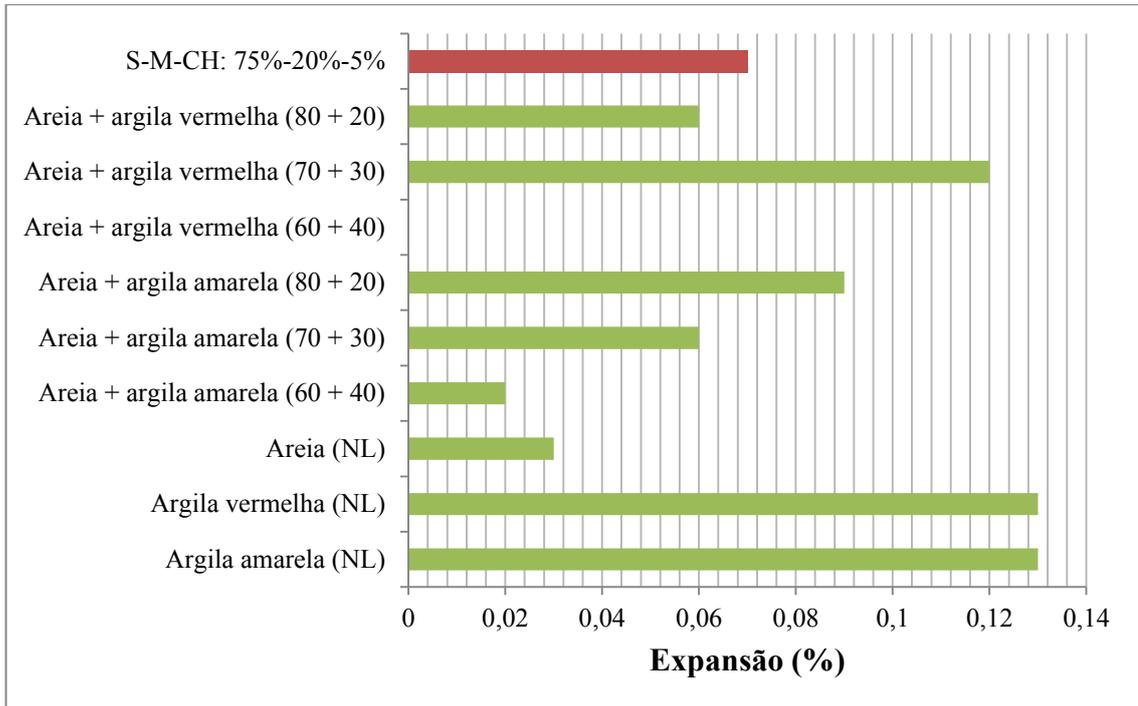


Figura 35 - Comparação dos valores de Expansão da mistura S-M-CH: 75%-20%-5% e misturas encontradas por Carvalho et al., (2010)

Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Com os ensaios de caracterização realizados no estudo, os solos classificam-se segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como areia mal graduada (SP) e silte elástico arenoso (MH).

As curvas de compactação confeccionadas para cada tratamento estudado apresentaram comportamentos semelhantes em relação ao teor de umidade ótimo, pois a medida que a proporção de solo fino na mistura diminui o teor de umidade ótimo também diminui. Para os tratamentos com a presença de cal hidratada em sua composição destaca-se a diminuição das respectivas massas específicas secas máximas. Isso se dá ao fato que a cal hidratada possui densidade específica menor que os solos contidos nas misturas.

A partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples aplicados às misturas de solo eólico estabilizado com solo fino + cal hidratada, pode-se concluir que a cal hidratada através da adição de 5%, mostrou-se eficaz quando estabilizada em conjunto com as porcentagens de 15 e 20% de solo fino, isso devido aos valores de F_{ck} superiores aos tratamentos estudados sem cal. Para o valor de 10% de solo fino contido na mistura, a cal hidratada não influenciou no ganho de resistência, sendo os valores de resistência a compressão simples obtidos no tratamento S-M-CH: 85%-10%-5% menores que todos os tratamentos estudados.

O tratamento S-M-CH: 75%-20%-5% comparado com os tratamentos de 12% de estabilizante químico e solo eólico estudados por Al-Aghbari (2009), Mohamedzein et al., (2009) e Mohamed, Y. (2005) apresentou valor inferior de resistência à compressão simples. Por outro lado, quando comparado com os valores obtidos a partir da estabilização de solos não eólicos com estabilizante químico (cal) por Levi et al., (2003), Silva (2016) e Corteleti (2013) nas proporções de (2 %, 6 % e 11% de cal hidratada) respectivamente, o tratamento se mostrou superior aos encontrados por Levi et al. (2003) e Corteleti (2013) e inferior ao valor obtido por Silva (2016).

Todas as misturas estudadas apresentaram valores ISC que atendem os requisitos para o aproveitamento em camadas de subleito e reforço do subleito. O tratamento S-FS-CH: 75%-20%-5% apresentou melhor qualidade de material segundo a tabela 2, com classificação “muito bom” e pode ser empregado em camadas de sub-base.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A fim de responder questões que surgiram do desenvolvimento do presente trabalho, são sugeridos estudos que contemplem:

- I. A avaliação dos efeitos de diferentes tempos de cura empregados nas misturas propostas por esta pesquisa.
- II. Realizar os ensaios de compactação dinâmica com aplicação de outras energias de compactação listadas na normativa NBR 7182 (ABNT, 1986).
- III. Avaliar a resistência à compressão simples da estabilização do solo eólico do município de Manoel Viana/RS com maiores teores de cal hidratada incorporados na mistura.

Sugere-se também a continuação dos estudos realizados com misturas solo-cal, bem como, desenvolver métodos padrões normatizados para seu uso. A falta de normalização nacional para o emprego da cal no solo para fins rodoviários resulta na sua baixa procura como material estabilizador.

REFERÊNCIAS

AL-AGHBARI et al., **Stabilisation of Desert Sands using Portland Cement and Cement Dust**. Issue GI3 (2009).

AL-AGHBARI. **Stabilization of deserts sands using municipal solid waste incinerator ash**. **Geotechnical and Geological Engineering**. Sultanate of Oman. (2006).

ALMEIDA, F. et al., **Melhorias de Solos Eólicos da Região da Campanha Gaúcha**. Sob. 16º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia e Ambiental. (2018).

ARRIVABENI, B. **Alternativas para Estabilização Granulométrica**. Minas Gerais, Brasil (2017).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 12655 – **Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle e Recebimento – Procedimento**. (2006).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6457 – **Amostras de Solo – Preparação de Ensaios de Compactação e Caracterização** (1986).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6459 – **Determinação do Limite de Liquidez**(1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6508 **Grãos de Solo que passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica** (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7175 – **Cal hidratada para argamassas – Requisitos** (2003).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7180 – **Determinação do Limite de Plasticidade**(1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7181 – **Ensaio de Granulometria** (1984).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7182 – **Ensaio de Compactação** (1986).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 9895 – **Índice Suporte Califórnia**. (1987).

AWAD, K. & SHERIF, M. **Improving Geotechnical Properties of Dune Sands Through Cement Stabilization**. Journal of Engineering and Computer Sciences Qassim University. (2012).

AZEVEDO, A. L. **Estabilização de solos com adição de cal – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. Ouro Preto: Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto (2010).

BALBO, T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração**. São Paulo: Oficina de Textos (2007).

BAPTISTA, C. **Pavimentação. Compactação de Solos no Campo; Camadas de Base; Estabilização de Solos**. Porto Alegre/RS: Editora Globo (1976).

BUENO, S. **Estudo de alguns fatores que podem afetar a durabilidade de misturas solo-cal**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2011).

CARVALHO, et al., **Correção Granulométrica de Solos para Aplicações em Estradas Florestais: Estudo de Caso com Solos da Cenibra**. Revista Árvore, p.1085-1090 (2010).

CEZNE et al., **Estudo de Dosagem de Areia e Cimento para Estabilização de um Solo Tropical**. GOIÁS: Universidade Federal de Goiás (2016).

CINCOTTO et al., **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Org.) (2010).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte rodoviário**. Brasília: 160 p.: il. color. ; gráficos (2018).

CORTELETI, E. **Melhoramento do Solo Residual de Lajeado com a Adição de Cal**. Lajeado/RS: Centro Universitário Univates (2013).

CRISTELO, C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho (2001).

DAS, B. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. CaliforniaStateUniversity - Sacramento: 6º Ed. (2007).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER. **Solos Estabilizados com Cinza Volante e Cal Hidratada- Determinação da Resistência a Compressão Simples**. (1994).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE (DNIT) – **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro (2006).

FIORI, A. P.; CARMIGNAMI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2. Ed. rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009. 604p.

GRIEBELER, M. et al. **Controle da erosão em estradas não pavimentadas**. Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica (pp. 166-215). UFV (2009).

HERRIN, R., & MITCHELL, H. **Lime-Soil Mixtures**. **Highway Research Board Bulletin**. Washington, D. C. (1961).

KESTLER, A. **Stabalization Selection Guide for Aggregate and Native Surfaced Low-Volume Roads**. U.S Department of Agriculture. (2009).

LEVI, et al., **Módulo de Resiliência de um Solo Arenoso e de suas Misturas com Alcatrão Fracionado e Cal**. Viçosa-MG: Sociedade de Investigações Florestais (2003).

MACHADO, et al. **Módulo de Resiliência de um Solo Arenoso e de suas Misturas com Alcatrão Fracionado e Cal**. (2003).

MARIOTONI, M. **Rodovias Vicinais: Conceituação e Importância**. Dissertação de Mestrado. . São Paulo: Escola Politécnica .Universidade de São Paulo (1987).

MOHAMED, Y. **Suitability of Desert Sand Cement Mixes for Base Courses in Highway Pavements**. Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Hamirpur – 177005, India. Sultanate of Oman (2005).

MORANGON, M. **Geotecnia de Fundações** (2008).

ODA, S. **Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (1995).

ODY, L. **Estudo de Correlação Granular e Geotécnica dos Areais da Campanha Gaúcha e os Solos Eólicos de Outras Regiões**. 16º Congresso Brasileiro de Geologia (2018).

OLIVEIRA, H. M. **Aglomerantes**. Rio de Janeiro: BAUER, L. A. Falcão. (Coord.) (2011).

PAGNOSSIN, M. **Estudo da Estabilização de um Solo Laterítico, sob adição de Cal e Silica da Casca de Arroz para Edificação de Barragens**. Alegrete/RS, (2015).

PATELLA, L. **As areias do pampa**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul (2006).

PINTO, C. D. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: 3ª Edição Oficina de Textos (2006).

PREFEITURA MUNICIPAL DE PARANAGUÁ – **Concurso para Técnico em Edificações**. (2012)

RAGHAVAN, J., & OHU, O. **Prediction of the static equivalent pressure of proctor compaction blows**, (1985).

ROSSO, L. T. **Estudo de Aplicabilidade dos Métodos de Dimensionamento e Avaliação Condicional de Serventia para Rodovias Não Pavimentadas da Região da Fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA. Alegrete. (2015).

RUVER et al., **Viabilidade Técnica-Econômica da Areia Eólica Estabilizada com Agentes Aglomerantes para Emprego em Pavimentação**. Rio Grande/RS: Universidade Federal do Rio Grande- (FURG) (2013).

SCHWENDLER D. **Estabilização de Dois Solos do Rio Grande do Sul com Lignosulfonato de Cálcio para fins Rodoviários**. Santa Cruz do Sul/RS (2013).

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: 2ª Edição Pini (2007).

SILVA, M. **Estuda da Estabilização com Cal de um Solo Laterítico e um Solo não Laterítico**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos (2016).

SILVA, M. F. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. Nova Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Dissertação (Mestre em Engenharia) (2010).

SOUZA, A. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário**. Brasília: FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS (2014).

SOUZA, L.; RIBEIRO, K. **Limites de Atterberg e sua Correlação com a Granulometria e Matéria Orgânica dos Solos**. (2018).

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, SP, 1978. 509 p.

VERDUM et al., **A arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (2006).

VISSER, A. T. **Performance, Design and Maintenance Relations for Unpaved Low-Volume Roads**. Third International Conference on Low-Volume Roads (pp. 164 – 174.). Washington, D.C., USA: Record 898 (1983).

WESSELING, D. **Influência do Tempo de Cura na Resistência de Um Solo Estabilizado Com Cal**. Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (2002).

YAHIA et al., **Stabilization of desert sands using Portland cement and cement-by-pass dust**. Ground Improvement 162 Issue G13 (2009).

APÊNDICES

Apêndice A -Granulometria do solo eólico

Umidade higroscópica							
Capsula N°	103	13	67	Massa total para análise de granulometria:			
Tara (g)	14,40	15,90	14,00	Mt =		5000 g	
Tara + SH (g)	49,90	59,70	50,20	Massa do material úmido submetido a			
				Peneiramento fino: Mh = 120 g			
Tara + SS (g)	49,75	59,50	50,00				
Umidade (%)	0,42	0,46	0,56				
		w (%):	0,48				
Massa da amostra seca ao ar M _t (g) =			1000	Massa total da amostra seca			
				M _s (g) =		995,23	
Peneiramento Grosso							
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)			% de material que passa	
2"	50,8	0,00	0,00			100,0000	
1 1/2"	38,1	0,00	0,00			100,0000	
1"	25,4	0,00	0,00			100,0000	
3/4"	19,1	0,00	0,00			100,0000	
3/8"	9,5	0,00	0,00			100,0000	
4	4,76	0,00	0,00			100,0000	
10	2,00	0,00	0,00			100,0000	
Peneiramento Fino							
Peneira	Abertura(mm)	Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)			% de material que passa	
16	1,19	0,00	0,00			100,0	
30	0,59	1,00	1,00			99,2	
40	0,42	4,40	5,40			95,5	
48	0,30	27,90	33,30			72,1	
100	0,149	65,20	98,50			17,5	
200	0,074	16,00	114,50			4,1	

Apêndice B – Granulometria do solo fino

d (mm)	% mat. passa	% mat.ret.	2° CAMADA	% do material
			MATERIAL*	
50,80	100,0	0,0	20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0
38,10	100,0	0,0		
25,40	100,0	0,0		
19,10	100,0	0,0	6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0
9,52	100,0	0,0		
4,76	100,0	0,0	2,0<Pedregulho fino<6,0	0,0
2,00	100,0	0,0		
1,190	99,5	0,5	0,6<Areia grossa<2,0	1,6
0,590	98,3	1,7	0,2<Areia média<0,6	8,0
0,420	96,7	3,3		
0,250	92,9	7,1		
0,149	87,7	12,3	0,06<Areia fina<0,2	20,7
0,074	70,6	29,4		
0,0628	69,8	30,2	0,002 <Silte< 0,06	18,4
0,0446	68,6	31,4		
0,0316	67,6	32,4		
0,0216	66,1	33,9		
0,0154	63,6	36,4		
0,0114	61,2	38,8		
0,0081	58,7	41,3		
0,0058	56,2	43,8		
0,0041	53,8	46,2		
0,0029	51,3	48,7		
0,0021	50,1	49,9		

Continuação...

0,0012	46,4	53,6		
				100,0

Apêndice C – Massa específica dos grãos do solo eólico

Preparo de amostra: Seca em Umidade Higroscópica							
Ensaio executado conforme a Norma (extinta) ABNT NBR 6508/84							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos			
				Ensaio com picnômetro:			
Capsula N°	7	18	79	Picnômetro N°	1	2	3
cap. (g)	12,10	10,60	7,50	massa do solo úm. Utilizado (g)	60	60	60
cap. + SH (g)	76,00	78,30	37,00	Temperatura (°C)	24,0	24,0	24,0
cap. + SS (g)	75,70	77,90	36,90	Pic. + água (g)	634,20	611,90	651,50
Umidade (%)	0,47	0,59	0,34	Pic. + água + solo(g)	671,30	649,00	688,70
		w (%):	0,47	Mass. Esp. Água (g/cm ³)	0,99730	0,99730	0,99730
				G (g/cm ³)	2,656	2,656	2,668
						G_s:	2,660

Preparo de amostra: Seca em Umidade Higroscópica							
Ensaio executado conforme a Norma (extinta) ABNT NBR 6508/84							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos			
				Ensaio com picnômetro:			
Capsula N°	8	11	19	Picnômetro N°	50	50	50
cap. (g)	10,20	10,30	11,20	massa do solo úm. Utilizado (g)	24,0	24,0	24,0
cap. + SH (g)	20,60	23,60	22,60	Temperatura (°C)	634,20	611,90	651,50
cap. + SS (g)	19,80	22,60	21,70	Pic. + água (g)	664,70	640,90	680,50
Umidade (%)	8,33	8,13	8,57	Pic. + água + solo(g)	0,9973	0,9973	0,9973

Continuação...

	8,34	Mass. Esp. Água (g/cm ³)	2,941	2,684	2,684
		G (g/cm ³)		2,684	
				G_s :	2,684

Apêndice D – Limite de liquidez e limite de plasticidade do solo fino

Descrição	Limite de Liquidez								
	31			21			15		
Nº de golpes	31			21			15		
nº capsula	29	16	113	33	38	1	41	65	25
Peso da capsula (g)	6,81	7,09	7,83	6,63	7,14	7,05	7,18	6,8	7,56
Peso da capsula + M. úmida (g)	11,92	11,1	13,63	12,18	11,44	13,25	11,85	11,29	11,27
Peso da capsula + M. seca (g)	9,87	9,5	11,3	9,85	9,64	10,66	9,84	9,37	9,66
Peso da água (g)	2,05	1,6	2,33	2,33	1,8	2,59	2,01	1,92	1,61
Peso amostra seca (g)	3,06	2,41	3,47	3,22	2,5	3,61	2,66	2,57	2,1
Teor de umidade (%)	66,99	66,39	67,15	72,36	72,00	71,75	75,56	74,71	76,67
Teor de umidade médio (%)	67,07			72,04			75,65		
Valor do Limite de liquidez (%)	69,72								

Limite de plasticidade			
Descrição	1		
	Nº capsula	21	b91
Peso da capsula (g)	6,8	7,3	7,3
Peso da capsula + M. úmida (g)	10,8	9,8	9,1
Peso da capsula + M. seca (g)	9,7	9,1	8,6
Peso da água (g)	1,1	0,7	0,5
Peso amostra seca (g)	2,9	1,8	1,3
Teor de umidade (%)	37,93	38,89	38,46
Teor de umidade médio (%)	38,43		
Limite de Plasticidade (%)	37,57		
Índice de Plasticidade (%)	32,15		

Apêndice E – Dados referentes ao ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova.

Tratamento S-M: 75%-25%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	RCS (Mpa)	W % pós
10/out	08/out	CP 1	1,84	13,3	0,2	13,24
10/out	08/out	CP 2	1,841	13,2	0,187	13,00
10/out	08/out	CP 3	1,846	13,17	0,197	13,11
10/out	08/out	CP 4	1,832	13,23	0,184	13,14
10/out	08/out	CP 5	1,843	13,08	0,232	13,06
10/out	08/out	CP 6	1,85	12,93	0,213	12,98

Tratamento S-M: 80%-20%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	RCS (Mpa)	W % pós
04/out	01/nov	CP 1	1,851	12,61	0,173	12,32
04/out	01/nov	CP 2	1,866	12,51	0,181	12,64
04/out	01/nov	CP 3	1,853	12,47	0,179	12,14
04/out	01/nov	CP 4	1,854	12,44	0,16	11,96
04/out	01/nov	CP 5	1,859	12,41	0,185	12,38
04/out	01/nov	CP 6	1,863	12,44	0,148	11,85

Tratamento S-M: 85%-15%

Dataconf.	DataRomp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	RCS (Mpa)	W % pós
04/out	01/nov	CP 1	1,864	11,31	0,0912	11,62
04/out	01/nov	CP 2	1,864	11,32	0,12	11,31
04/out	01/nov	CP 3	1,857	11,19	0,113	11,59
04/out	01/nov	CP 4	1,8617	11,18	0,106	12,02
04/out	01/nov	CP 5	1,865	11,25	0,112	11,61
04/out	01/nov	CP 6	1,877	11,08	0,112	11,54

Tratamento S-M-CH: 75%-20%-5%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	RCS (Mpa)	W % pós
11/out	08/nov	CP 1 I	1,781	14,19	0,196	14,64
11/out	08/nov	CP 2 I	1,805	14,37	0,235	15,07
11/out	08/nov	CP 3 I	1,786	14,16	0,198	14,51
11/out	08/nov	CP 4	1,787	14,13	0,272	13,81
11/out	08/nov	CP 5	1,793	14,02	0,259	14,34

Continuação...

11/out	08/nov	CP 6	1,77	13,83	0,228	13,66
--------	--------	------	------	-------	-------	-------

Tratamento S-M-CH: 80%-15%-5%

Data conf.	DataRomp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	RCS (Mpa)	W % pós
15/out	12/nov	CP 1 I	1,799	13,36	0,092	13,85
15/out	12/nov	CP 2 I	1,811	13,43	0,0675	13,5
15/out	12/nov	CP 3 I	1,833	12,89	0,134	13,17
15/out	12/nov	CP 4	1,833	13,15	0,193	13,51
15/out	12/nov	CP 5	1,831	13,31	0,188	13,62
15/out	12/nov	CP 6	1,831	13,28	0,195	13,57

Tratamento S-M-CH: 85%-10%-5%

Data conf.	DataRomp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	RCS (Mpa)	W % pós
15/out	12/nov	CP 1 I	NC	NC	NC	NC
15/out	12/nov	CP 2 I	1,846	11,82	0,096	12,01
15/out	12/nov	CP 3 I	NC	NC	NC	NC
15/out	12/nov	CP 4	1,857	11,71	0,0814	12,58
15/out	12/nov	CP 5	1,842	11,5	0,0667	12,59
15/out	12/nov	CP 6	1,831	11,76	0,0596	11,93

NC- nãoconsta.

Apêndice F - Dados referentes ao ensaio Índice Suporte Califórnia (ISC)

Tratamento S-M: 85%-25%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	ISC %	Expansão %	W % pós
18/out	29/out	CP 1	1,875	12,87	7,92	1,4	13,68
18/out	29/out	CP 2	1,857	12,43	7,11	0,569	14,1
18/out	29/out	CP 3	1,85	13,21	9,13	0,964	14,71
18/out	29/out	CP 4	1,851	13,35	8,23	0,74	14,2

Tratamento S-M: 80%-20%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	ISC %	Expansão %	W % pós
18/out	29/out	CP 1	1,883	12,71	5,16	0,1	13,2
18/out	29/out	CP 2	1,887	12,54	9,32	0,043	13,54
18/out	29/out	CP 3	1,884	12,74	8,84	0,087	13,1
18/out	29/out	CP 4	1,87	12,93	6,85	0,043	13,37

Tratamento S-M: 85%-15%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	ISC %	Expansão %	W % pós
17/out	28/out	CP 1	1,821	11,58	7,92	0,105	12,74
17/out	28/out	CP 2	1,838	11,51	7,11	0,043	12,56
17/out	28/out	CP 3	1,837	11,24	9,13	0,087	12,44
17/out	28/out	CP 4	1,83	11,7	8,23	0,043	13,07

Tratamento S-M-CH: 75%-20%-5%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	ISC %	Expansão %	W % pós
31/out	11/nov	CP 1	1,776	14,07	35,93	0,087	14,53
31/out	11/nov	CP 2	1,78	14,2	47,77	0,087	14,35
31/out	11/nov	CP 3	1,77	14,51	32,54	0,043	14,76
31/out	11/nov	CP 4	1,766	14,39	25,6	0,087	14,71

Tratamento S-M-CH: 80%-15%-5%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	ISC %	Expansão %	W % pós
31/out	11/nov	CP 1	1,823	13,32	11,15	0,17	13,52
31/out	11/nov	CP 2	1,791	13,39	12,16	0,043	13,76
31/out	11/nov	CP 3	1,802	13,39	20,77	0,13	13,55
31/out	11/nov	CP 4	1,807	13,11	10,95	0,35	13,36

Tratamento S-M-CH: 85%-10%-5%

Data conf.	Data Romp.	Nº CP	ρ_{dmax}	W %	ISC %	Expansão %	W % pós
11/nov	22/nov	CP 1	1,864	11,73	19,84	0	11,89
11/nov	22/nov	CP 2	1,851	11,69	12,53	0,0351	12,23
11/nov	22/nov	CP 3	1,852	11,55	16,78	0,0438	11,69
11/nov	22/nov	CP 4	1,865	11,88	24,1	0,0904	12,05