

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Lucas Tittoni Rodrigues

**BANCO DE DADOS EM SIG DE SOLOS DE ARENITO DA
FORMAÇÃO BOTUCATU NO RIO GRANDE DO SUL**

Porto Alegre

2021

LUCAS TITTONI RODRIGUES

**BANCO DE DADOS EM SIG DE SOLOS DE ARENITO DA
FORMAÇÃO BOTUCATU NO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Prof.^a Dra. Wai Ying Yuk Gehling

Porto Alegre

2021

LUCAS TITTONI RODRIGUES

**BANCO DE DADOS EM SIG DE SOLOS DE ARENITO DA
FORMAÇÃO BOTUCATU NO RIO GRANDE DO SUL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Banca Examinadora.

Porto Alegre, maio de 2021

Prof.^a Wai Ying Yuk Gehling

Doutora pela Universitat Politècnica de Catalunya. Espanha
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof.^a Camila Kern (UFRGS)

Mestra pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof.^a Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)

Mestra pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Escola de Engenharia por ter proporcionado a oportunidade, estrutura e o apoio para a minha formação.

Aos professores e professoras do curso de Engenharia Civil, por todos os ensinamentos e lições ao longo da vida acadêmica, em particular à minha orientadora Prof^a Wai Gehling, quem deu a sugestão para esse trabalho.

Aos amigos e aos colegas, pela convivência diária durante todos esses anos de graduação, pela ajuda nas disciplinas difíceis e pelos muitos momentos de alegria.

Por fim, meus agradecimentos à minha família pelo suporte e pelo carinho. Em especial agradeço à minha mãe, Marta, e ao meu pai, Nelson, pela dedicação e por sempre acreditarem em mim. Muito obrigado!

RESUMO

O arenito de Formação Botucatu é um dos solos que compõem a geologia do Rio Grande do Sul, estando presente principalmente na região de encontro da Depressão Central com o Planalto Meridional e na fronteira Oeste do estado. Este solo foi extensivamente estudado em trabalhos acadêmicos, havendo uma grande gama de informações já publicadas sobre as propriedades geotécnicas desse material. O presente trabalho busca criar um banco de dados georreferenciado utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para agrupar e organizar os resultados de ensaios de amostras do arenito Botucatu coletadas em diversos locais do estado. Os dados foram obtidos de trabalhos acadêmicos publicados e o aplicativo ArcGIS foi escolhido para a elaboração de um mapa com a localização dos solos ensaiados. Observou-se, em geral, uma tendência nos resultados dos ensaios do arenito Botucatu e concluiu-se que esse solo pode ser classificado como uma areia siltosa e apresenta uma resistência ao cisalhamento de média a alta. Como resultado, obteve-se um banco de dados que contém parâmetros geotécnicos básicos do arenito de Formação Botucatu de solos provenientes de nove locais distintos do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: banco de dados, SIG, arenito, Formação Botucatu

ABSTRACT

The sandstone of the Botucatu Formation is one of the soils that make up the geology of Rio Grande do Sul, being present mainly in the region where the Central Depression meets the Southern Plateau and on the western border of the state. This soil has been extensively studied in academic works, with a wide range of information already published on the geotechnical properties of this material. The present research seeks to create a georeferenced database using a Geographic Information System (GIS) to group and organize the results of tests of samples of the Botucatu sandstone collected in different locations in the state. The data were obtained from published academic works and the ArcGIS application was chosen for the elaboration of a map with the location of the tested soils. In general, a trend was observed in the tests of the Botucatu sandstone and it was concluded that this soil can be classified as silty sand and has a medium to high shear strength. As a result, a database was obtained that contains basic geotechnical parameters of the Botucatu Formation sandstone from soils from nine different locations in Rio Grande do Sul.

Keyword: database, GIS, sandstone, Botucatu Formation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Limites da Bacia do Paraná, na qual está inserida a Formação Botucatu, retirado de Northfleet et al. (1969).....	17
Figura 2. Limites de Atterberg, de Pinto (2006)	20
Figura 3. Terminologia SUCS, de Pinto (2006).....	21
Figura 4. Forma geral das curvas de retenção, segundo Marinho (2005)	23
Figura 5. Reta de esforço normal x esforço cisalhante retirada de Pinto (2006).....	24
Figura 6. Representação vetorial, adaptado de Burrough e McDonnell (2000).....	28
Figura 7. Representação matricial, adaptado de Burrough e McDonnell (2000).....	29
Figura 8. Mapa de localização de Capela de Santana/RS, retirado do IBGE (2021)	34
Figura 9. Local de coleta das amostras, retirado de Simões (2019).....	35
Figura 10. Envoltórias de rupturas, retirado de Simões (2019).....	37
Figura 11. Mapa de localização de Timbé do Sul/SC, retirado do IBGE (2021).....	38
Figura 12. Local de retirada da amostra (Bloco AV), obtido de Silveira (2003).....	38
Figura 13. Função condutividade hidráulica, obtida de Feuerharmel (2007).....	40
Figura 14. Curva de retenção determinada por Feuerharmel (2003).....	41
Figura 15. Curva de retenção determinada por Feuerharmel (2007).....	41
Figura 16. Curva de retenção determinada por Vivian (2008)	41
Figura 17. Mapa de localização de São Sebastião do Cai/RS, retirado do IBGE (2021)	43
Figura 18. Talude estudado, imagem de Antunes (2017)	43
Figura 19. Curva de retenção, obtida de Antunes (2017)	45
Figura 20. Mapa de localização de Alegrete/RS, retirado do IBGE (2021)	46

Figura 21. Mapa de localização de Novo Hamburgo/RS, retirado do IBGE (2021)	48
Figura 22. Talude de onde foi retirado o solo no Parque dos Trabalhadores, imagem de Bastos (1999)	48
Figura 23. Mapa de localização de Santa Cruz do Sul/RS, retirado do IBGE (2021)	51
Figura 24. Foto área do platô em Malhada, retirada de Pinheiro (2000)	51
Figura 25. Mapa de localização de Alegrete/RS, retirado do IBGE (2021)	53
Figura 26. Mapa de localização de Novo Hamburgo/RS, retirado do IBGE (2021)	56
Figura 27. Solo na RS-239 em Novo Hamburgo/RS, retirado de Bastos (1999).....	56
Figura 28. Mapa de localização de São Leopoldo/RS, retirado do IBGE (2021).....	58
Figura 29. Talude onde as amostras foram coletadas, retirado de Lopes Junior (2011)	59
Figura 30. Curva de retenção determinada por Martins (2001)	62
Figura 31. Curva de retenção determinada por Medero (2001).....	62
Figura 32. Exemplo da tabela com os dados no ArcGIS	65
Figura 33. Exemplo de curva de retenção como uma imagem (raster) no ArcGIS.....	66
Figura 34. Diagrama de caixas para os limites de Atterberg	69
Figura 35. Diagrama de caixas para a granulometria	69
Figura 36. Diagrama de caixas para os parâmetros de resistência	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos, de Pinto (2006).....	19
Tabela 2. Dados disponíveis por trabalho publicado para o Arenito Botucatu	31
Tabela 3. Parâmetros de Caracterização do solo em Capela de Santa/RS, retirado de Simões (2019).....	35
Tabela 4. Parâmetros de resistência, retirados de Simões (2019)	36
Tabela 5. Parâmetros de compressibilidade. retirado de Simões (2019)	37
Tabela 6. Parâmetros de Caracterização do solo em Timbé do Sul/SC	39
Tabela 7. Parâmetros de resistência para o Colúvio em Timbé do Sul/SC	42
Tabela 8. Parâmetros de compressibilidade, retirado de Feuerharmel (2003).....	42
Tabela 9. Parâmetros de Caracterização do solo em São Sebastião do Caí/RS.....	44
Tabela 10. Parâmetros de resistência, retirados de Antunes (2017)	45
Tabela 11. Parâmetros de Caracterização do solo na VRS-306 em Alegrete/RS	47
Tabela 12. Resultados de compactação e ensaios de compressão para os solos na jazida da VRS-306	47
Tabela 13. Parâmetros de Caracterização do solo no Parque dos Trabalhadores em Novo Hamburgo/RS	49
Tabela 14. Parâmetros de resistência do solo localizado no Parque dos Trabalhadores em Novo Hamburgo/RS	50
Tabela 15. Parâmetros de Caracterização do solo em Santa Cruz do Sul/RS	52
Tabela 16. Parâmetros de resistência do Arenito Botucatu em Malhada, obtidos de Pinheiro (2000)	53
Tabela 17. Parâmetros de Caracterização do solo em São Miguel em Alegrete/RS, obtidos de Quevedo (2015) apud Dias (2018)	54

Tabela 18. Parâmetros de compactação, obtido de Quevedo (2015) apud Dias (2018).....	55
Tabela 19. Parâmetros de resistência, obtidos de Dias (2018)	55
Tabela 20. Parâmetros de Caracterização do solo na RS-239 em Novo Hamburgo/RS.....	57
Tabela 21. Parâmetros de resistência do solo na RS-239 em Novo Hamburgo/RS.....	57
Tabela 22. Parâmetros de Caracterização do solo na RS-239 na Vila Scharlau em São Leopoldo	60
Tabela 23. Parâmetros de resistência do solo na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS.....	63
Tabela 24. Parâmetros de compactação e resistência à compressão para o solo da Vila Scharlau em São Leopoldo/RS.....	64
Tabela 25. Módulo resiliente do material na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS.....	65
Tabela 26. Parâmetros de caracterização médios do Arenito Botucatu	68
Tabela 27. Parâmetros de compactação para o solo de arenito Botucatu	71

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
2	Revisão Bibliográfica	17
2.1	Formação Botucatu	17
2.2	Caracterização do Solo	18
2.2.1	Análise Granulométrica	19
2.2.2	Limites de Atterberg.....	19
2.2.4	Sistema Unificado de Classificação de Solos	20
2.3	Condutividade Hidráulica	21
2.4	Sucção e Curva de Retenção.....	22
2.5	Resistência do Solo.....	23
2.5.1	Atrito Interno	24
2.5.2	Coesão	25
2.5.3	Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb	25
2.6	Compactação	26
2.7	Sistema de Informações Geográficas – SIG	27
3	Métodos	30
3.1	Dados de Arenito da Formação Botucatu	30
3.2	Banco de Dados em SIG.....	33
4	Resultados.....	34
4.1	Aterro de resíduos em Capela de Santana/RS	34
4.1.1	Caracterização.....	35
4.1.2	Condutividade Hidráulica	36
4.1.3	Parâmetros de Resistência.....	36
4.1.4	Compressibilidade	37
4.2	Colúvio em Timbé do Sul/SC	38
4.2.1	Caracterização.....	39

4.2.2 Condutividade Hidráulica.....	39
4.2.3 Curva de Retenção.....	40
4.2.4 Parâmetros de Resistência.....	42
4.2.5 Compressibilidade.....	42
4.3 ERS-122 em São Sebatião do Caí/RS.....	43
4.3.1 Caracterização.....	43
4.3.2 Condutividade Hidráulica.....	44
4.3.3 Curva de retenção.....	44
4.3.4 Parâmetros de Resistência.....	45
4.4 Jazida na VRS-306 em Alegrete/RS.....	45
4.4.1 Caracterização.....	46
4.4.2 Compactação e Resistência.....	46
4.5 Parque dos Trabalhadores em Novo Hamburgo/RS.....	48
4.5.1 Caracterização.....	49
4.5.2 Parâmetros de Resistência.....	49
4.6 Platô em Malhada em Santa Cruz do Sul/RS.....	50
4.6.1 Caracterização.....	51
4.6.2 Condutividade Hidráulica.....	52
4.6.3 Parâmetros de Resistência.....	52
4.7 Rincão de São Miguel em Alegrete/RS.....	53
4.7.1 Caracterização.....	53
4.7.2 Condutividade Hidráulica e Compactação.....	54
4.7.3 Parâmetros de Resistência.....	55
4.8 RS-239 em Novo Hamburgo/RS.....	55
4.8.1 Caracterização.....	56
4.8.2 Parâmetros de Resistência.....	57
4.9 RS-240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS.....	58

4.9.1 Caracterização.....	59
4.9.2 Condutividade Hidráulica.....	61
4.9.3 Curva de retenção.....	61
4.9.4 Parâmetros de Resistência.....	62
4.9.5 Compactação e Resistência à Compressão.....	63
4.9.6 Módulo de resiliência.....	64
4.10 Banco de Dados em SIG.....	65
5 Considerações Finais.....	67
Referências Bibliográficas.....	72
Anexo I – Mapa de Ensaio de Arenito da Formação Botucatu.....	79

1 INTRODUÇÃO

A Geotecnia é uma área da Engenharia Civil que aplica métodos científicos e princípios de engenharia para o estudo e a compreensão dos materiais da crosta da terra. Ela busca prever o comportamento desses materiais e tornar a superfície da terra útil para a ocupação humana. A Geotecnia utiliza métodos e princípios da mecânica dos solos e das rochas para solucionar problemas de engenharia.

A boa prática de Geotecnia exige o conhecimento das características do meio físico, tanto em seus aspectos quantitativos como qualitativos. As características geotécnicas do solo são de suma importância para o planejamento de sua ocupação e o estudo de implantação de novos empreendimentos.

As características dos solos buscadas para uso em projetos de engenharia são bastante variadas, dependendo do problema a ser resolvido e das condições de campo do material. Geralmente, se tem interesse no comportamento mecânico do solo para aplicações em fundações, aterros ou taludes, mas ainda podem ser necessárias informações sobre as características de compactação do solo, sua permeabilidade ou os efeitos de sucção no material.

Os parâmetros para projetos do solo podem ser obtidos por meio de ensaios de campo e de laboratório. Os ensaios de laboratório são baseados em modelos físicos do comportamento dos materiais, assim propiciam maior fidelidade de resultados e melhor detalhamento dos parâmetros, entretanto eles têm um custo maior e exigem um tempo maior para sua realização. Os ensaios de campo, geralmente são baseados em relações empíricas para a obtenção de parâmetros, sendo assim, seus resultados são menos precisos e costumam ser limitados a solos cujas características já foram previamente estudadas e ajustadas ao modelo.

Na prática usual de engenharia o primeiro recurso é o uso de ensaios de campo para uma análise preliminar, em seguida, para o projeto definitivo, de

alguns ensaios de laboratório para validar os resultados. Apenas em obras de grande porte se observa o uso extensivo de ensaios de laboratório para obtenção dos parâmetros de resistência e deformação do solo. Em obras pequenas, todo o projeto é, muitas vezes, realizado apenas com ensaios de campo. Assim, se identifica uma grande incerteza presente em projetos e pouca utilização dos conhecimentos mais avançados da geotecnia devido a investigações do solo pouco detalhadas e falta de dados sobre solo empregado.

No âmbito acadêmico se faz extensivo uso de ensaios de laboratório em projeto de pesquisa, de forma que existem dados compreensivos sobre os parâmetros de diversos solos já estudados, cujos resultados são derivados de modelos físicos e, portanto, tem grande confiabilidade. Estes dados detalhados permitem uma boa compreensão das características do solo e a previsão do seu comportamento em variadas circunstâncias. Entretanto, é difícil encontrar essas informações agrupadas para um solo específico, uma vez que geralmente elas estão dispersas em várias publicações que analisaram uma ou duas características particulares de amostras em um local específico.

Os parâmetros obtidos em laboratório em pesquisas acadêmicas podem ser usados na prática de engenharia para a elaboração de projetos mais seguros e econômicos, uma vez que diminuem as incertezas presentes. Entretanto, os resultados dessas pesquisas raramente são aproveitados diretamente na prática, onde muitas vezes, as soluções e decisões de projeto são baseadas exclusivamente ou majoritariamente nas experiências pessoais dos profissionais envolvidos. Assim, existe uma grande disponibilidade de dados existentes que poderiam informar decisões de projeto, mas de difícil uso por estarem dispersos em entre muitos trabalhos de pesquisa com enfoques diversos e fontes variadas.

Nos laboratórios da Escola de Engenharia da UFRGS foram realizados diversos estudos aprofundados sobre vários materiais presentes no Rio Grande do Sul, dentre os quais se destaca o solo de arenito de Formação Botucatu. O

Arenito Botucatu foi extensivamente estudado, tendo suas características e seu comportamento bem definidos sob diversas condições.

O objetivo do presente trabalho é agrupar e analisar os dados existentes sobre os parâmetros geotécnicos do arenito de Formação Botucatu no Estado do Rio Grande do Sul. A partir de uma pesquisa bibliográfica em estudos realizados pela UFRGS e outras universidades no estado busca-se criar em um banco de dados em sistema SIG. Espera-se identificar e aprofundar o conhecimento sobre o arenito Botucatu, além de facilitar a consulta e o uso prático das informações sobre suas características geotécnicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORMAÇÃO BOTUCATU

A Formação Botucatu foi inicialmente descrita por Gonzaga de Campos em 1889 (apud Mantesso-Neto et al, 2004), que denominou de Grés de Botucatu os arenitos da Serra de Botucatu no Estado de São Paulo. De acordo com IBGE (1986), a Formação Botucatu abrange uma área superior a 1.300.000 km² e é parte integrante da Bacia do Paraná, a qual se desenvolve desde o Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo território no Uruguai, nordeste da Argentina e leste do Paraguai, até os Estados de Mato Grosso e Rondônia, como mostra a Figura 1.

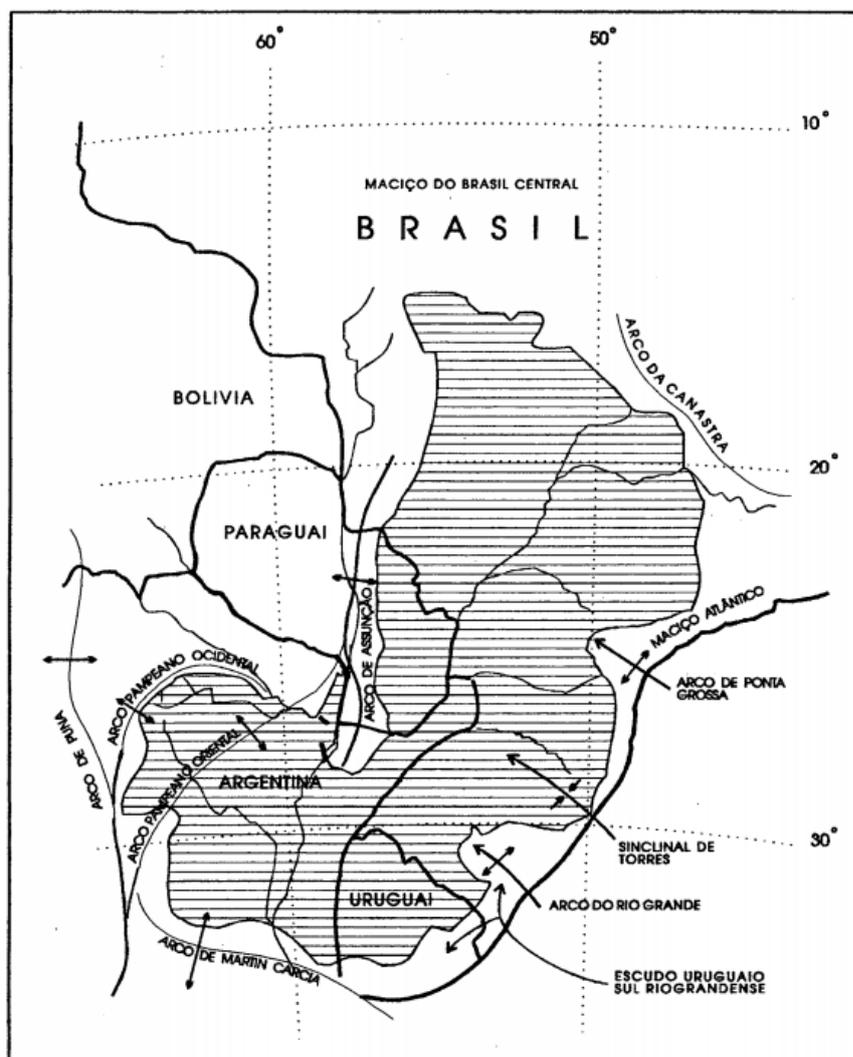


Figura 1. Limites da Bacia do Paraná, na qual está inserida a Formação Botucatu, retirado de Northfleet et al. (1969)

Para Tommasi (1972) a Formação Botucatu se caracteriza por arenitos médios, vermelhos, com estratificação cruzada, localmente com pulsação, sendo, frequentemente, na porção basal, estruturas de corte por canais fluviais, apresentando-se nesse caso mais argilosos. Segundo Mühlmann et al. (1974), ela é compreendida pela sequência de arenitos avermelhados, finos a médios, com abundante estratificação cruzada, situada imediatamente abaixo dos primeiros derrames basálticos da Formação Serra Geral. Já para IBGE (1986), a Formação Botucatu se restringe aos arenitos eólicos, avermelhados subjacentes às rochas basálticas da Formação Serra Geral.

A principal característica desses arenitos é a ausência de variação litológica, constituindo uma sucessão de corpos nos quais, geralmente, persistem as mesmas propriedades texturais, estruturais e mineralógicas, formando pilhas de cunhas que se prolongam na direção do vento e cujos estratos se cruzam em relação aos estratos de cunhas vizinhas (IBGE, 1986). Os extensos depósitos da Formação Botucatu são um registro da época de desertificação da Bacia do Paraná, ainda no continente Godwana, e, assim como desertos atuais, os depósitos dominantes são constituídos por areia transportada pelo vento e depositadas em dunas longitudinais e transversais ou barcanas piramidais, segregadas por região.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A identificação a partir de ensaios de caracterização que buscam obter propriedades intrínsecas ao material, isto é, que não dependem da configuração de esforços atuantes no momento ou do teor de umidade atual do solo. Dentre os ensaios utilizados vale ressaltar: o ensaio para a determinação do peso específico real dos grãos (γ_d), descrito na NBR 6458 (ABNT, 2016); a análise granulométrica do material, que busca determinar a curva granulométrica do solo por meios de ensaios de peneiramento e sedimentação, descritos na NBR 7181 (ABNT, 2018); e a determinação dos limites de Atterberg ou índices de consistência, cujos procedimentos constam nas NBR 7180 (ABNT, 2016) e NBR 6459 (ABNT, 2017).

2.2.1 Análise Granulométrica

Segundo Pinto (2006), um solo natural possui tamanhos de partículas diversos de difícil identificação tátil-visual, uma vez que a aglomeração dos grãos pode mascarar as areias e argilas e tais verificações práticas só permitem evidenciar maiores diferenças de tamanho das partículas.

Assim, para reconhecimento do tamanho dos grãos utiliza-se de análises granulométricas, que consistem de duas fases: peneiramento dos grãos mais grosseiros e ensaios de sedimentação das partículas finas. O peso do material para cada tamanho dos grãos é representado de forma gráfica em uma escala logarítmica, formando uma curva granulométrica. Essa curva permite identificar as frações de cada tamanho de partículas presentes no solo, que para cada faixa de tamanho recebe denominações específicas como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos, de Pinto (2006)

Fração	Limites definidos pela norma da ABNT
Matacão	de 25 cm a 1 m
Pedra	de 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	de 4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	de 2,0 mm a 4,8 mm
Areia média	de 0,42 mm a 2,0 mm
Areia fina	de 0,05 mm a 0,42 mm
Silte	de 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	inferior a 0,005 mm

2.2.2 Limites de Atterberg

Pinto (2006) afirma que apenas a curva granulométrica não é suficiente para caracterizar o comportamento do solo em suas funções de engenharia, visto que, para uma mesma fração de finos, o solo pode apresentar comportamentos muito distintos dependendo das propriedades dos seus grãos. Os limites de Atterberg, também chamados de índices de consistência, são

uma análise indireta dos efeitos dos finos nas propriedades do solo, baseados no comportamento do material na presença de água.

Os solos argilosos apresentam comportamentos bem distintos dependendo da presença de água, quando muito úmido o material se comporta como um líquido, a medida que perde água, o material se torna plástico e quando seco ele é quebradiço. Assim, os ensaios de limites de Atterberg consistem em determinar, através de ensaios de laboratório, os teores de umidade em que há uma mudança de comportamento do solo (de líquido para plástico e de plástico para quebradiço) e determinar a faixa de umidade em que o solo se comporta como um material plástico, como mostra a Figura 2.

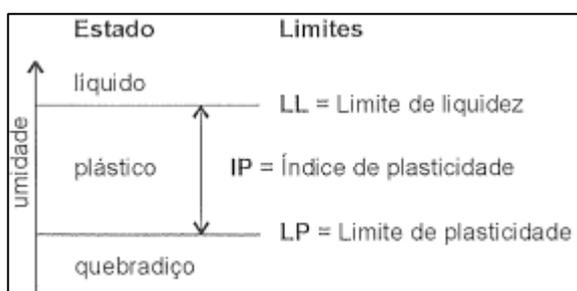


Figura 2. Limites de Atterberg, de Pinto (2006)

2.2.4 Sistema Unificado de Classificação de Solos

A grande variedade de comportamentos e propriedades dos solos e a falta de parâmetros simples que permitam prever as suas respostas para solicitações de engenharia levou a criação de grupos ou classificações para os diversos materiais estudados. Segundo Pinto (2006), o objetivo da classificação dos solos é a possibilidade de estimar ou prever o comportamento que um dado solo terá em seu uso de engenharia.

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) foi inicialmente proposto por Casagrande na década de 40 para o uso em aeroportos e, atualmente, tem seu emprego bastante generalizado. O Sistema Unificado utiliza as informações da curva granulométrica do material e dos seus limites de Atterberg para classificá-lo pelo conjunto de duas letras: a primeira

identificando o tipo principal do solo e a segunda identifica informações complementares (graduação para solo grosseiros e compressibilidade para solos finos); mais uma classe adicional para turfas, como poder ser visto na Figura 3.

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Figura 3. Terminologia SUCS, de Pinto (2006)

2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica do solo é a propriedade de um solo de permitir que a água escoe através dele, ela varia de acordo com tipo de solo, o tamanho e o arranjo dos grãos do material, sendo medida pelo coeficiente de condutividade hidráulica (K) do material. Segundo Daniel (1994 apud Cruz, 2004) o coeficiente de condutividade hidráulica não só varia dependendo do tipo de solo mas também da viscosidade do fluido, a qual depende da temperatura.

Vargas (1997 apud Cruz, 2004) afirma que nas areias, o solo pode ser considerado um material preenchido por diversos canais interconectados nos quais a água flui, havendo pouca transferência de pressões entre os grãos e a água; enquanto nas argilas esse modelo não é mais válido devido aos pequenos diâmetros dos grãos, gerando uma interação entre as fases sólidas e líquidas do material. Devido a essas características, as areias constituem solos de alta permeabilidade enquanto as argilas se configuram como solos de baixa permeabilidade.

Segundo Pinto (2006) a determinação da condutividade hidráulica dos solos é feita com o uso de permeômetros, que determinam o valor do fluxo no interior do material com base na Lei de Darcy. Os permeômetros podem ser de carga constante, geralmente utilizados para areis ou solos de alta permeabilidade ou de carga variável, utilizados para argilas ou solos de baixa permeabilidade. Ainda é possível realizar ensaios com a adaptação de equipamentos triaxiais ou por meios de ensaios de campo.

2.4 SUCÇÃO E CURVA DE RETENÇÃO

Em solos não saturados ocorre uma situação em que os vazios entre as partículas são preenchidos por uma mistura de ar e água, criando uma interface entre os dois meios. Segundo Budhu (2011) a tensão superficial da água entre as partículas gera um fenômeno chamado de sucção (*soil tension* em inglês) que causa uma atração entre as partículas. Essa atração gera uma poro-pressão negativa que aumenta a tensão efetiva presente no solo e, portanto, a sua resistência ao cisalhamento.

Marinho (2005) afirma que a sucção nos solos é dada por dois componentes, a sucção matricial e a sucção osmótica. O primeiro componente se deve à capilaridade no interior dos vazios e é representado pela diferença entre a poro-pressão do ar e a poro-pressão de água, já o segundo é devido a quantidade de sais nos poros de água do solo. Assim, a sucção pode ser representada segunda a Equação (1).

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1)$$

Onde:

Ψ = Sucção total, em kPa;

u_a = Poro-pressão de ar, em kPa;

u_w = Poro-pressão de água, em kPa;

π = Sucção osmótica, em kPa.

Segundo Marinho (2005) a caracterização hidráulica dos materiais não saturados é feita pela curva característica ou curva de retenção de água, que busca relacionar a sucção do solo com o seu teor de umidade ou a sua saturação, como mostra a Figura 4. A curva de retenção pode ser determinada utilizando-se diversos métodos, como tensiômetros ou o método do papel filtro, e permite a fácil visualização de fenômenos complexos que ocorrem no solo e a estimativa dos efeitos da sucção na resistência do material. A curva de retenção é afetada pelo umedecimento ou secagem do material, apresentando resultados diferentes para cada uma das trajetórias da água nos poros, um fenômeno chamado de histerese.

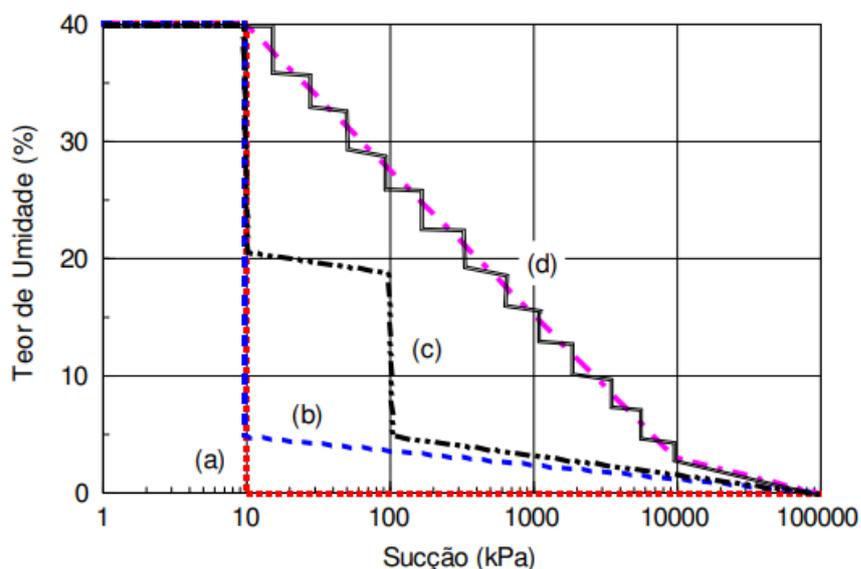


Figura 4. Forma geral das curvas de retenção, segundo Marinho (2005)

2.5 RESISTÊNCIA DO SOLO

A resistência de um solo em termos geotécnicos quase sempre se refere a resistência ao cisalhamento, visto que, exceto condições especiais, a ruptura ou escorregamento ocorrem devido ao excesso tensões cisalhantes. Segundo Pinto (2006), a resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que um solo pode suportar sem sofrer ruptura, sendo essencialmente função do atrito interno das partículas e da coesão química do solo.

2.5.1 Atrito Interno

O atrito interno é a parcela da resistência ao cisalhamento de um solo correspondente a força de atrito desenvolvida no deslizamento entre os grãos ou partículas desse solo (ABNT, 1995).

Segundo Pinto (2006), o ângulo de atrito (ϕ') entre dois corpos pode ser definido como o ângulo máximo que a força transmitida por um corpo pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento. Atingido esse ângulo a força tangencial é maior que a resistência ao deslizamento. O coeficiente de atrito é independente da área de contato entre os dois corpos ou da magnitude da força aplicada, assim a resistência ao deslizamento é diretamente proporcional à tensão normal e pode ser representado por uma linha reta, cuja inclinação é dada pelo ângulo de atrito (ϕ'), como na Figura 5.

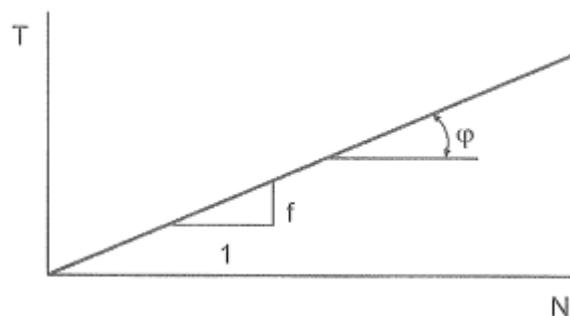


Figura 5. Reta de esforço normal x esforço cisalhante retirada de Pinto (2006)

O fenômeno de atrito nos solos, entretanto, se diferencia do fenômeno de atrito entre dois corpos. O deslizamento em solos se dá entre um grande número de grãos e existe uma significativa diferença a forma como as forças são transmitidas entre os solos arenosos e argilosos nos contatos das partículas. Nos materiais arenosos as forças são transmitidas diretamente entre as partículas de areia. Enquanto, nos materiais argilosos as forças são transmitidas através moléculas de água quimicamente adsorvidas as partículas de argila sem o contato direto das partículas (Pinto, 2006).

2.5.2 Coesão

A coesão (c') é a parcela da resistência ao cisalhamento de um solo provocada pela atração físico-química ou pela cimentação entre as partículas, sendo assim, independente da tensão efetiva atuante no solo (ABNT, 1995).

Segundo Pinto (2006) a coesão é equivalente a uma pequena parcela da resistência em solos sedimentares, porém, em solos naturalmente cimentados, como os solos evoluídos pedologicamente, pode apresentar um valor significativo com maior influência na resistência final.

2.5.3 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

Os limites para o estado de tensões em que ocorre a ruptura são representados por equações que buscam representar as condições do solo no momento de ruptura, que são chamadas de critérios de ruptura. Segundo Pinto (2006), dois critérios mais utilizados: o critério de Coulomb e o critério de Mohr, que, na prática, por facilidade de uso são combinados no Critério de Mohr-Coulomb.

O Critério de Coulomb define que a ruptura ocorre quando o estado de tensões do solo ultrapassa o valor dado por uma reta em função da coesão e do coeficiente de atrito interno do material. Já o critério de Mohr diz que a ruptura ocorrerá quando o círculo representativo do estado de tensões do solo ultrapassar uma envoltória definida experimentalmente representativa dos círculos de tensões relativos ao momento de ruptura. Como a definição e aplicação dessa envoltória é difícil de ser realizada na prática, os critérios são combinados, utilizando-se os círculos de Mohr para representar o estado de tensões do solo e o critério de Coulomb como a reta limite que esses círculos não podem ultrapassar para que não ocorra a ruptura, assim definindo-se Critério de Mohr-Coulomb, como na Equação 2.

$$\tau = c' + \sigma' \times \tan \phi' \quad (2)$$

Onde:

τ = tensão cisalhante, em kN/m²;

c' = intercepto coesivo, em kN/m²;

σ' = tensão efetiva normal no plano de ruptura, em kN/m²;

ϕ' = ângulo de atrito interno, em °.

2.6 COMPACTAÇÃO

A compactação é uma densificação do solo por meio de equipamentos mecânicos, geralmente rolos compactadores, a fim de aumentar a densidade e reduzir o índice de vazios do material (Pinto, 2006). Esse aumento de densidade causa um melhoramento de várias propriedades importantes do solo, como a sua resistência e permeabilidade, sendo assim, a compactação é amplamente empregada na maior parte das obras de engenharia que envolvem a movimentação de terras.

Na compactação o aumento do peso específico do solo se dá pela expulsão do ar dos vazios do solo, mantendo-se a quantidade de partículas sólidas e água constante, dessa forma o peso específico final depende basicamente da energia de compactação e do teor de umidade do solo (que diminui o atrito entre as partículas até certo ponto, mas depois passa a ocupar espaço entre elas). Assim, existe um peso específico máximo para cada energia de compactação e um teor de umidade necessário para que ele seja obtido em campo, os ensaios de compactação, referidos como Ensaios Proctor e descritos na NBR 7182 (ABNT, 2016), buscam justamente encontrar esse teor de umidade a partir de energias de compactação padronizadas, a saber, as energias Proctor Normal, Intermediário e Modificado, em ordem crescente de grandeza.

2.7 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG

Um sistema de informações geográficas (SIG) também conhecido em inglês por Geographic Information System (GIS) é um sistema constituído por hardware, software, informação espacial, procedimentos computacionais e recursos humanos que permite e facilita a obtenção, armazenamento, atualização, manipulação e exibição de informações geograficamente referenciadas (ESRI, 1992).

Os SIGs permitem agrupar informações de diversas fontes diferentes, como sensoriamento remoto, dados de GPS e levantamentos topográficos em mapas temáticos a fim de agilizar e facilitar a produção de mapas, além de possibilitar atualizações e revisões automáticas, assim como a realização de análises quantitativas dos dados espaciais.

Segundo Lacruz e Sousa Filho (2009), a representação espacial em um SIG poder ser realizada utilizando-se dois modelos: o vetorial que descreve o espaço a partir de objetos localizados por pares de coordenadas, e o matricial que representa a variação contínua de um fenômeno.

No modelo vetorial os dados definem bordas ou direções de feições por uma série de pontos, que quando agrupados formam linhas. Os polígonos são formados por uma série de linhas que não se interceptam e cujos primeiro e último ponto coincidem. Os pontos são codificados por um par de coordenadas geográficas e esse modelo permite a representação de todos os tipos de objetos espaciais, como pode ser visto na Figura 6.

VETOR	Pontos	Linhas	Polígonos
Feições			
Áreas			
Redes			
Amostras			
Superfícies			
Rótulos/ textos			
Símbolos			

Figura 6. Representação vetorial, adaptado de Burrough e McDonnell (2000)

No modelo matricial ou raster, a representação consiste de um conjunto de células (ou pixels) em coordenadas contíguas, formando uma matriz de duas dimensões. As células podem ter formato retangular (pixels), triangular ou hexagonal e cada uma contém um número que representa o valor do atributo, como na Figura 7. Esse modelo apresenta limitações para a representação de redes, textos, rótulos ou objetos muito pequenos (cujas dimensões aproximam-se do tamanho das células).

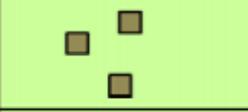
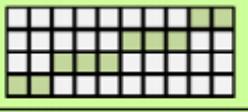
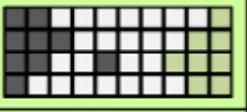
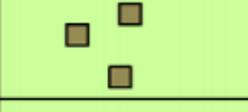
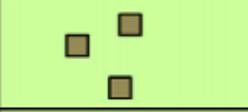
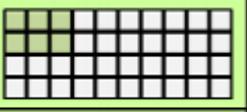
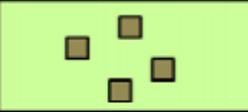
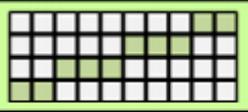
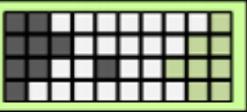
MATRIZ	Pontos	Linhas	Polígonos
Feições			
Áreas		—	
Redes	—	—	—
Amostras		—	
Superfícies		—	
Rótulos/ textos	—	—	—
Símbolos			

Figura 7. Representação matricial, adaptado de Burrough e McDonnell (2000)

3 MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os métodos utilizados para a criação do banco de dados sobre solos de arenito da Formação Botucatu usando uma plataforma SIG.

3.1 DADOS DE ARENITO DA FORMAÇÃO BOTUCATU

As informações sobre os solos de Arenito Botucatu foram coletadas a partir de diversas pesquisas acadêmicas já publicadas nas quais o material foi estudado, com um enfoque naqueles trabalhos nos quais foram realizados ensaios de laboratório no material.

A busca resultou em 37 publicações, entre as quais constam trabalhos de diplomação, dissertações e teses, obtidos dos repositórios digitais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Universidade Federal do Pampa (Unipampa), sendo que outros centros acadêmicos do estado não possuíam publicações sobre solos da Formação Botucatu.

Uma vasta gama de dados e parâmetros foram encontrados nos trabalhos disponíveis, entretanto, no presente trabalho se limitou a dados de caracterização, parâmetros hidráulicos e de resistência. Assim, 6 trabalhos foram descartados resultando ao final em 31 publicações de 27 autores, contemplando solos retirados de 9 locais distintos. O banco de dados foi organizado com base nos locais de retirada das amostras, o que resultou em 9 grupos de resultados como pode ser visto na Tabela 2.

A Tabela 2 também mostra as fontes analisadas e os dados disponíveis em cada uma delas. Foram buscadas informações de peso específico real dos grãos (γ_s), limites de Atterberg (LL/IP), análise granulométrica (AG), condutividade hidráulica (K), curva de retenção (CR), ensaios de resistência ao cisalhamento (RC) e parâmetros de compactação do solo (Comp.). Foram ainda notados outros dados disponíveis nos trabalhos consultados sobre o arenito de Formação Botucatu.

Tabela 2. Dados disponíveis por trabalho publicado para o Arenito Botucatu

Fonte	Localização	γ_s	LL/IP	AG	K	CR	RC	Comp.	Outros Dados
Simões, 2019	Aterro em Capela de Santana/RS	X	X	X	X		X		
Feuerharmel, 2003		X	X	X		X			
Silveira, 2003		X	X	X			X		Ensaio de expansão
Pereira, 2006	Colúvio em Timbé do Sul/SC						X		Resistência com sucção controlada
Feuerharmel, 2007					X	X	X		
Vivian, 2008						X			
Pereira, 2013							X		Resistência com sucção controlada
Antunes, 2017	ERS-122 em São Sebastião do Cai/RS	X		X	X	X	X		
Maronezi Jr., 2017	Jazida na VRS-306 em	X	X	X				X	Estabilização com cal e cinzas
Kanaan, 2018	Alegrete/RS		X	X				X	Estabilização com fibras
Bastos, 1999	Parque dos Trabalhadores em	X	X	X			X		Erodibilidade
Orlandini, 1991	Novo Hamburgo/RS	X	X	X			X		
Pinheiro, 2000	Malhada em Santa Cruz do Sul/RS	X	X	X	X		X		
Dias, 2018	Rincão de São Miguel em Alegrete/RS	X	X	X	X		X	X	

Fonte	Localização	γ_s	LL/IP	AG	K	CR	RC	Comp.	Outros Dados
Bastos, 1999	RS-239 em Novo	X	X	X			X		Erodibilidade
Ferreira, 1998	Hamburgo/RS			X			X		
Núñez, 1991		X	X	X				X	Estabilização com cal e cimento
Jungblut, 1993		X	X	X				X	
Martins, 1994							X		
Prietto, 1996		X	X	X			X		Estabilização com cimento
Carraro, 1997		X	X	X					Estabilização com resíduos industriais
Thomé, 1999		X	X	X				X	Estabilização com resíduos industriais
Specht, 2000							X		Estabilização com cimento e fibras
Martins, 2001	RS-240 na Vila	X	X	X		X			Microscopia ótica
Medero, 2001	Scharlau em São					X	X		
Casagrande, 2001	Leopoldo/RS						X	X	Reforço com fibras de polipropileno
Heineck, 2002		X	X	X	X		X	X	Uso em barreiras verticais
Cruz, 2004					X			X	
Foppa, 2005		X	X	X				X	Estabilização com cimento
Medero, 2005							X		
Bernardes, 2008		X	X	X				X	
Lopes Jr., 2011		X	X	X					Estabilização com cal

3.2 BANCO DE DADOS EM SIG

O banco de dados foi elaborado utilizando o programa computacional ArcGis 10.8. O ArcGIS é um dos programas SIG mais utilizados no mercado desenvolvido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) e possui diversas ferramentas para a elaboração e a realização de operações avançadas com mapas. Para o presente trabalho a simples criação de mapas georreferenciados para o uso como um banco de dados, com a adição de múltiplos atributos a cada feição desenhada, foi suficiente.

No banco de dados foi criada uma camada utilizando feições do tipo ponto para adicionar os dados de cada ensaio. O georreferenciamento dos pontos foi feito a partir das descrições da localização das áreas de estudo ou pelas coordenadas indicadas quando disponíveis, os valores para os parâmetros estudados foram adicionados em uma tabela de atributos que agrega todos os ensaios, de forma que algumas fontes nas quais foram realizados múltiplos ensaios aparecem mais de uma vez e os gráficos das curvas granulométricas e curvas de retenção quando disponíveis foram anexados com imagens *raster* à tabela.

Uma vez que o mapa abrange todo o Rio Grande do Sul e, portanto, mais de uma das zonas UTM para o uso coordenadas projetadas, ele foi elaborado utilizando o Sistema de Coordenadas Geográficas com o sistema de referência oficial do Brasil, o Datum SIRGAS 2000. Além dos parâmetros de ensaios coletados também foi adicionado ao mapa os locais onde há presença de solos de arenito de Formação Botucatu no estado, cujos dados foram obtidos do mapa geológico do Rio Grande do Sul publicado pelo Serviço Geológico do Brasil da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), obtido em formato SIG vetorial com a escala 1:750.000. Também foram utilizados os dados dos limites estaduais e municipais para a localização dos ensaios, obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e imagens de satélite disponíveis no próprio ArcGIS.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os dados coletado sobre os solos de arenito da Formação Botucatu, divididos pelo local de retirada das amostras. Cada uma das nove seções apresenta a descrição do local, a caracterização do material e os parâmetros geotécnicos obtidos pelos autores consultados.

4.1 ATERRO DE RESÍDUOS EM CAPELA DE SANTANA/RS

O local onde as amostras de Arenito Botucatu foram retiradas é um aterro de resíduos operado pela empresa Ecototal Sistema de Gestão Ltda. localizado na rodovia RS-240, nº 921, bairro Garcez, no município de Capela de Santana/RS (Figura 8), a aproximadamente 50 km de Porto Alegre. Os dados desse local foram obtidos de Simões (2019), que realizou ensaios em duas amostras indeformadas que foram retiradas de trincheiras do subsolo, como mostra a Figura 9, de uma área de ampliação do aterro para resíduos de classe II. Há disponíveis dados de caracterização do solo, condutividade hidráulica, parâmetros de resistência e compressibilidade do material.

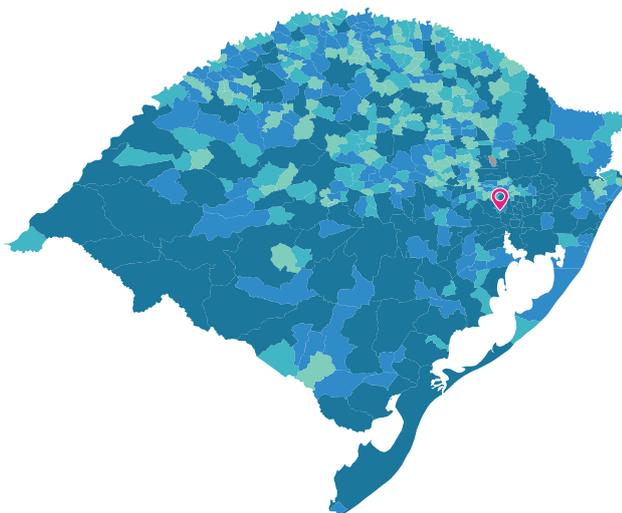


Figura 8. Mapa de localização de Capela de Santana/RS, retirado do IBGE (2021)



Figura 9. Local de coleta das amostras, retirado de Simões (2019)

4.1.1 Caracterização

As amostras ensaiadas, como mostra a Tabela 3, foram denominadas TR01 e TR02 por Simões (2019), para ambas o autor determinou o peso específico real dos grãos, a granulometria por peneiramento e sedimentação, os limites de Atterberg e classificou o solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o que determinou que ambas as amostras são uma areia argilosa (SC).

Tabela 3. Parâmetros de Caracterização do solo em Capela de Santa/RS, retirado de Simões (2019)

Parâmetro	TR01	TR02
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	25,30	26,20
Limite de Liquidez (%)	33	33
Limite de Plasticidade (%)	21	22
Índice de Plasticidade (%)	12,0	11
Areia Grossa (%)	0,0	0,0
Areia Média (%)	19,0	28,0
Areia Fina (%)	41,0	35,0
Silte (%)	23,0	21,0
Argila (%)	17,0	16,0
SUCS	SC	SC

4.1.2 Condutividade Hidráulica

Simões (2019) ainda determinou a permeabilidade desse solo por ensaios de condutividade hidráulica realizados a partir de uma adaptação de ensaios triaxiais. O autor realizou ensaios em quatro situações distintas: com o solo saturado, após consolidação em 200 e 400 kPa, após a ruptura drenada dos corpos de prova com deformações de 10% e após ruptura não drenada para deformações maiores que 20%.

Para a condição apenas saturada o coeficiente de permeabilidade (K) variou entre $3,2 \times 10^{-7}$ m/s e $4,5 \times 10^{-7}$ m/s. Após a consolidação, houve uma redução da permeabilidade, resultando em valores de $1,57 \times 10^{-7}$ m/s para pressão de 200 kPa e $1,84 \times 10^{-7}$ m/s para 400 kPa. Finalmente para a ruptura o autor obteve uma permeabilidade de $7,32 \times 10^{-9}$ m/s para 10% de deformação e $3,56 \times 10^{-8}$ m/s para grandes deformações.

4.1.3 Parâmetros de Resistência

Os parâmetros de resistência desse material foram obtidos por Simões (2019) através de ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas e inundadas. O autor obteve a envoltória de resistência e definiu o ângulo de atrito (ϕ') e a coesão efetiva (c') para as amostra TR01 e TR02 como segue na Tabela 4 e Figura 10.

Tabela 4. Parâmetros de resistência, retirados de Simões (2019)

Amostra	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
TR01	17,1	42,8
TR02	21,1	30,4

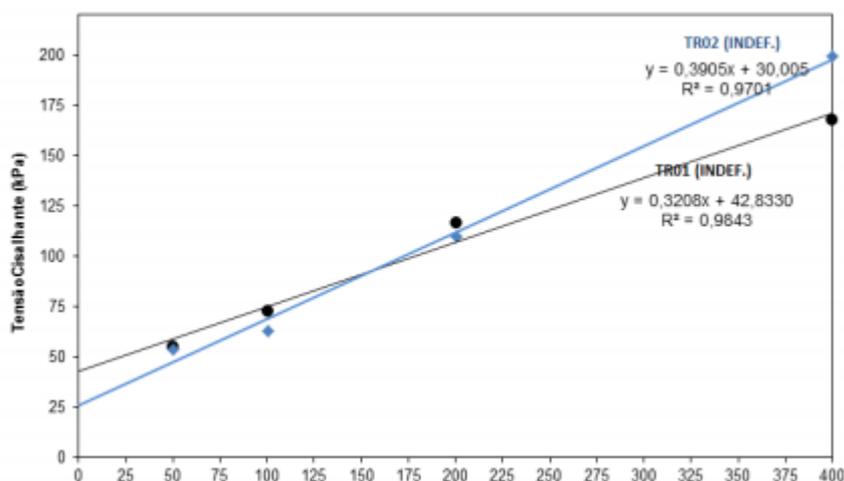


Figura 10. Envoltórias de rupturas, retirado de Simões (2019)

4.1.4 Compressibilidade

Simões (2019) realizou ensaios edométricos para caracterizar a compressibilidade do material, embora solos residuais não sigam completamente a teoria do adensamento. Assim, os parâmetros determinados são denominados virtuais porque não ocorrem no solo estudado, mas ainda fornecem informações pertinentes sobre o comportamento geomecânico do material. O autor determinou os coeficientes de compressão (C_c), recompressão (C_r), descompressão (C_d) e a tensão de pré-adensamento (σ_p) pelo método de Pacheco e Silva para seis amostras com diferentes índices de vazios (duas das quais utilizaram material remoldado) originadas dos locais de coleta das amostras TR01 e TR02 anteriores, como segue na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de compressibilidade. retirado de Simões (2019)

Amostra	C_c	C_r	C_d	σ_p (kPa)
TR01 $e=0,80$.	0,283	0,0102	0,0271	70
TR01 $e=0,60$	0,209	0,0051	0,0233	270
TR01 $e=0,81$	0,287	0,0102	0,0244	230
TR02 $e=0,74$	0,246	0,0021	0,0246	245
TR02 $e=0,74$ (remoldada)	0,252	0,0102	0,0299	110
TR02 $e=0,98$ (remoldada)	0,257	0,0046	0,0321	23

4.2 COLÚVIO EM TIMBÉ DO SUL/SC

As amostras estudadas nesse local tratam-se de um solo coluvionar das encostas da formação Serra Geral que faz parte do subsolo sob o Gasoduto Brasil-Bolívia, localizado entre os municípios de Timbé do Sul/SC e São José dos Ausentes/RS (Figura 11). O material estudado é originário de um colúvio de arenito que foi determinado ser um solo de Arenito Botucatu localizado no km 998 do gasoduto, em uma encosta de aproximadamente 150 m. O local pode ser visto na Figura 12 obtido de Silveira (2003), o qual denomina a amostra de Bloco AV.

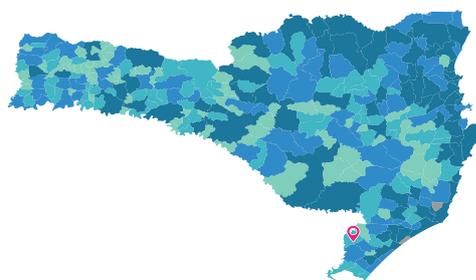


Figura 11. Mapa de localização de Timbé do Sul/SC, retirado do IBGE (2021)



Figura 12. Local de retirada da amostra (Bloco AV), obtido de Silveira (2003)

O solo nesse local foi estudado em seis trabalhos publicados por quatro autores. Feuerharmel (2003) e Silveira (2003) realizaram os ensaios iniciais de caracterização, e estudo do material foi aprofundado ainda por Pereira (2006), Feuerharmel (2007), Vivian (2008) e Pereira (2013).

4.2.1 Caracterização

Os ensaios de caracterização para esse material foram realizados por Feuerharmel (2003) e Silveira (2003), os quais determinaram o peso específico real dos grãos, a granulometria por peneiramento e sedimentação, os limites de Atterberg e classificaram o solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como mostra a Tabela 6. Ambos os autores classificaram esse solo como um silte altamente compressível (MH).

Tabela 6. Parâmetros de Caracterização do solo em Timbé do Sul/SC

Parâmetro	Feuerharmel, 2003	Silveira, 2003
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	28,0	28,0
Limite de Liquidez (%)	56,0	55,0
Limite de Plasticidade (%)	34,0	40,0
Índice de Plasticidade (%)	22,0	15,0
Areia Grossa (%)	1,0	1,0
Areia Média (%)	5,0	8,0
Areia Fina (%)	26,0	12,0
Silte (%)	15,0	25,0
Argila (%)	53,0	65,0
SUCS	MH	MH

4.2.2 Condutividade Hidráulica

A permeabilidade desse solo foi estudada por Feuerharmel (2007), a qual concluiu que o coeficiente de condutividade hidráulica (K) desse solo depende do efeito da sucção, tendo o seu valor máximo de $6,53 \times 10^{-6}$ m/s

quando o solo está saturado e diminuindo com o aumento da sucção, como mostra a Figura 13.

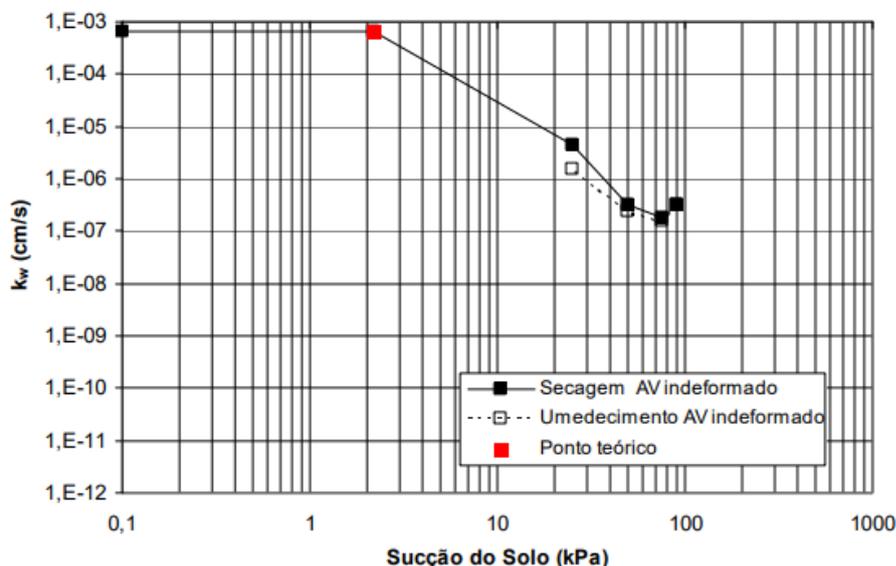


Figura 13. Função condutividade hidráulica, obtida de Feuerharmel (2007)

4.2.3 Curva de Retenção

Os efeitos da sucção nesse solo foram estudados por Feuerharmel (2003, 2007) e Vivian (2008), as quais determinaram a curva de retenção desse material utilizando o método do papel filtro.

Na Figura 14 pode-se observar a curva de retenção obtida por Feuerharmel (2003), os pontos demonstram várias condições de ensaio, mas pode-se observar o formato geral das curvas. A Figura 15 mostra outras curvas determinadas por Feuerharmel (2007) onde se observam as curvas para secagem e umedecimento. Por último, a Figura 16 mostra a curva de retenção determinada por Vivian (2008), que utilizou um método do papel filtro sem contato para o uso do estudo de solos contaminados com óleo diesel.

Curva característica Bloco Av

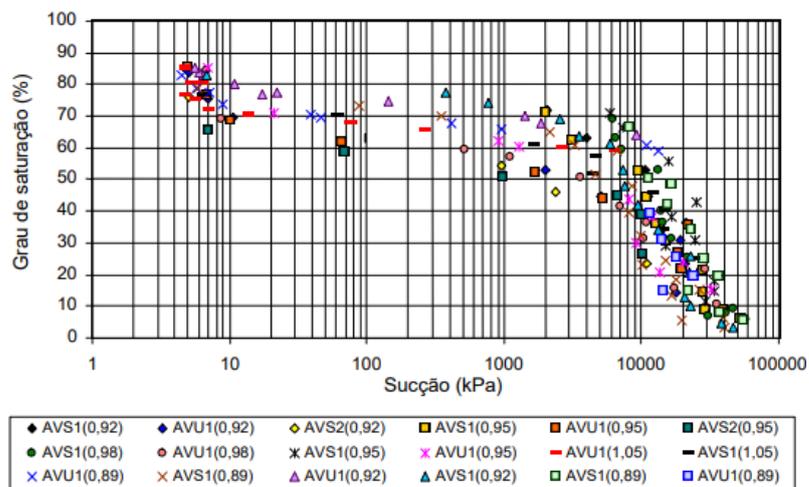


Figura 14. Curva de retenção determinada por Feuerharmel (2003)

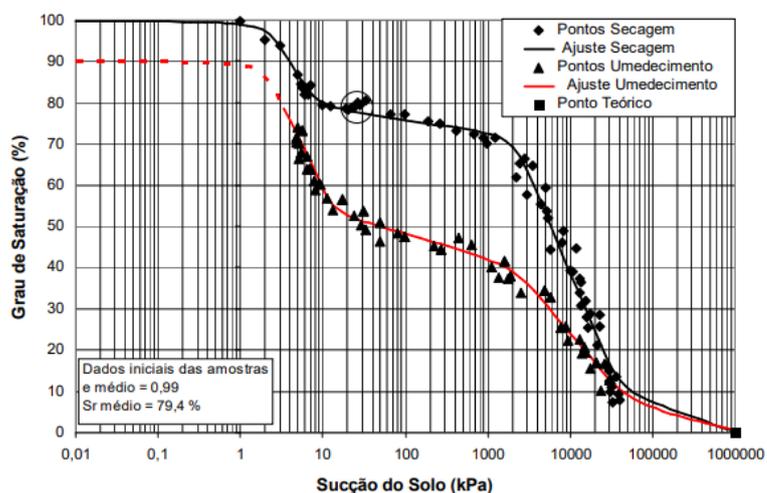


Figura 15. Curva de retenção determinada por Feuerharmel (2007)

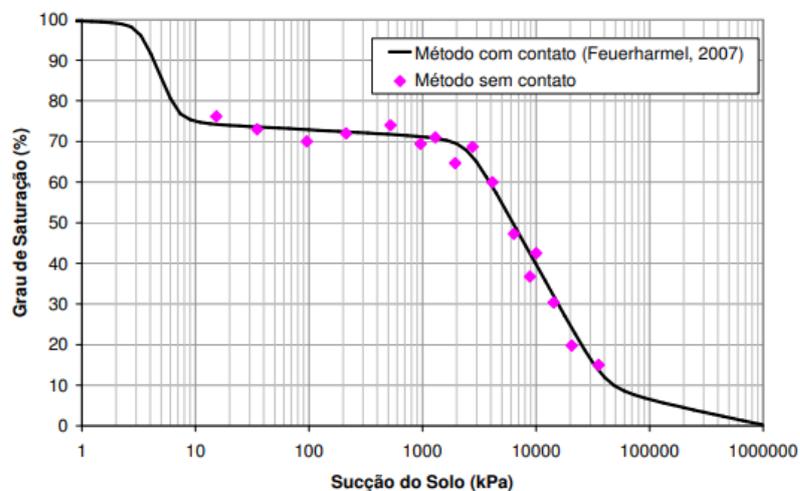


Figura 16. Curva de retenção determinada por Vivian (2008)

4.2.4 Parâmetros de Resistência

A resistência ao cisalhamento desse solo foi estudada em quatro trabalhos como mostra a Tabela 7. Silveira (2003) e Feuerharmel (2007) utilizaram ensaios de cisalhamento direto para determinar a envoltória de ruptura do material e os valores de ângulo de atrito (ϕ') e coesão efetiva (c'), enquanto Pereira (2006, 2013) utilizou ensaios triaxiais com sucção controlada para obter esses mesmos dados. A partir dos dados coletados pode-se observar que o solo nesse local possui um ângulo de átrio variando de 26,0 a 33,0° e uma coesão efetiva de 12,6 a 28,7 kPa.

Tabela 7. Parâmetros de resistência para o Colúvio em Timbé do Sul/SC

Ensaio	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
Cis. Direto (Silveira, 2003)	26,0	28,7
Triaxial (Pereira, 2006)	33,0	17,9
Cis. Direto (Feuerharmel, 2007)	27,8	12,6
Triaxial (Pereira, 2013)	31,1	17,8

4.2.5 Compressibilidade

Feuerharmel (2003) também determinou os parâmetros de compressibilidade para este solo. A autora realizou ensaios edométricos em condições de umidade natural e inundadas e obteve os coeficientes de compressão (C_c), recompressão (C_r) e a tensão de pré-adensamento (σ_p) por ambos os métodos de Casagrande e de Pacheco e Silva, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros de compressibilidade, retirado de Feuerharmel (2003)

Ensaio	C_c	C_r	σ_p Casagrande (kPa)	σ_p Pacheco e Silva (kPa)
Umidade Natural	0,276	0,043	380	360
Inundada	0,314	0,017	200	210

4.3 ERS-122 EM SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ/RS

O solo nesse local foi retirado de um talude de solo residual de Arenito Botucatu às margens da ERS-122 no município de São Sebastião do Caí/RS (Figura 17 e Figura 18). O material foi estudado por Antunes (2017) durante obras de estabilização do talude que se rompeu em 2015 após um período de chuvas intensas.

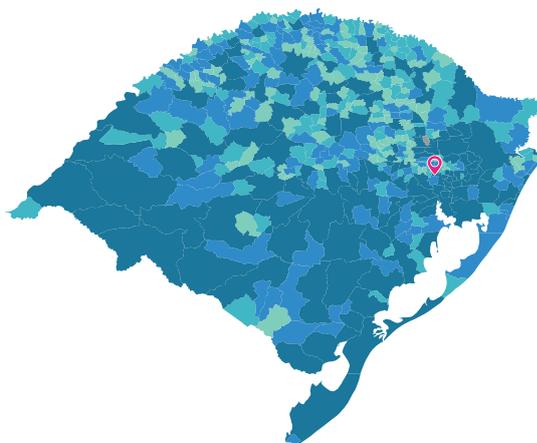


Figura 17. Mapa de localização de São Sebastião do Caí/RS, retirado do IBGE (2021)



Figura 18. Talude estudado, imagem de Antunes (2017)

4.3.1 Caracterização

Nesse material os ensaios de caracterização foram obtidos de Antunes (2017) e consistiram da determinação do peso específico real dos grãos e da sua curva granulométrica por peneiramento e sedimentação. Não foram

realizados ensaios para determinar os limites de Atterberg e, portanto, também não foi realizada a classificação do solo.

Tabela 9. Parâmetros de Caracterização do solo em São Sebastião do Cai/RS

Parâmetro	Antunes, 2017
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	26,6
Areia Grossa (%)	4
Areia Média (%)	27
Areia Fina (%)	23
Silte (%)	8
Argila (%)	37

4.3.2 Condutividade Hidráulica

A permeabilidade desse solo foi determinada por Antunes (2017) em laboratório em amostras saturadas, encontrando um coeficiente de condutividade hidráulica saturada do solo (K) de $4,31 \times 10^{-6}$ m/s para um fluxo vertical e $4,80 \times 10^{-6}$ m/s para um fluxo horizontal, sendo o parâmetro considerado isotrópico vista a pequena variação do valor entre os sentidos de fluxo.

4.3.3 Curva de retenção

Antunes (2017) ainda estudou os efeitos de sucção do Arenito Botucatu nesse local e determinou a curva de retenção utilizando o método do papel filtro, como segue na Figura 19. A Figura 19 também mostra as umidades onde foram realizados os ensaios de cisalhamento direto utilizados para determinar a resistência desse solo.

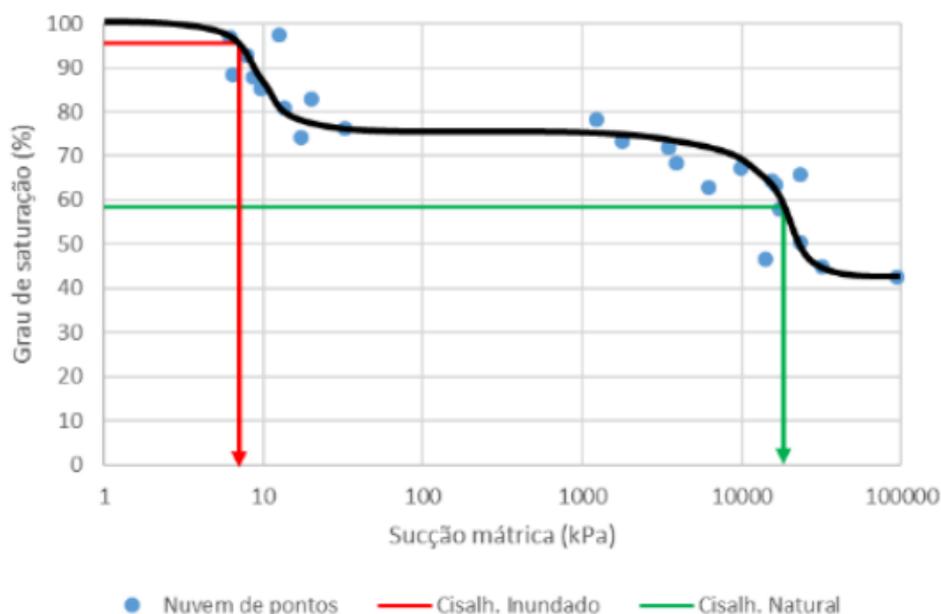


Figura 19. Curva de retenção, obtida de Antunes (2017)

4.3.4 Parâmetros de Resistência

A resistência ao cisalhamento desse talude foi determinada por Antunes (2017) utilizando ensaios de cisalhamento direto. A fim de se observar os efeitos da sucção nos parâmetros de resistência, foram realizados ensaios em condição de umidade natural e em condição de inundação para a determinação das envoltórias de ruptura, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros de resistência, retirados de Antunes (2017)

Ensaio	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
U. Natural	37,8	35,7
Inundado	28,9	0,0

4.4 JAZIDA NA VRS-306 EM ALEGRETE/RS

O solo da Formação Botucatu estudado nessa seção é oriundo de uma jazida localizada na VRS-306 em Alegrete/RS (Figura 20), nas proximidades do bairro Balneário Caverá, pertencendo à empresa Pedra Rosada. O solo do local é utilizado para obras na região e é descrito por Kanaan (2018) como um

solo arenoso que apresenta uma coloração avermelhada e baixo teor de umidade natural. Além de Kanaan (2018), o solo no local também foi estudado por Maronezi Junior (2017).

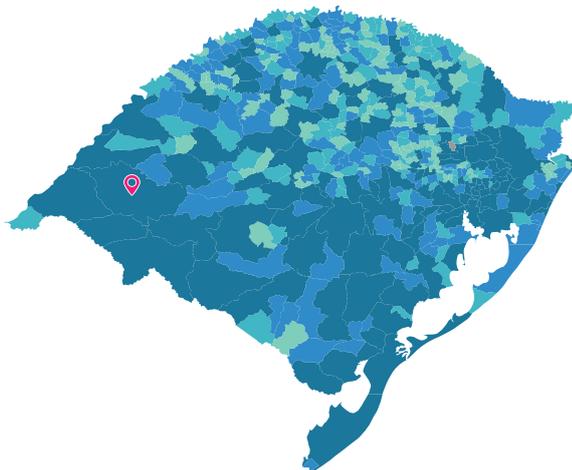


Figura 20. Mapa de localização de Alegrete/RS, retirado do IBGE (2021)

4.4.1 Caracterização

Ensaio de caracterização para esse material foram realizados por Maronezi Junior (2017) e Kanaan (2018). Apenas o primeiro autor determinou o peso específico real dos grãos para esse material, mas ambos realizaram análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, além da determinação dos limites de Atterberg, como segue na Tabela 11. Os autores ainda classificaram o material baseado na sistemas SUCS, sendo que Maronezi Junior (2017) determinou que o solo é um silte (ML) e Kanaan (2018) determinou que o solo é uma areia siltosa (SM).

4.4.2 Compactação e Resistência

Maronezi Junior (2017) e Kanaan (2018) ainda realizaram ensaios de compactação para determinar a curva de compactação desse material e obter os valores de peso específico máximo (γ_d) e a umidade ótima (w_o). Maronezi Junior (2017) realizou ensaios do tipo Mini-Proctor para determinar a curva de compactação do solo e utilizou os resultados obtidos para moldar corpos de

prova e realizar ensaios de compressão simples (RCS) e de tração à compressão diametral (RTCS) para determinar as resistências à compressão e à tração do material, respectivamente. Já Kanaan (2018) realizou os ensaios de compactação utilizando a energia Proctor Normal e realizou ensaios de compressão simples para corpos de prova com o peso específico máximo obtido. Segue a Tabela 12 com os resultados obtidos pelos dois autores.

Tabela 11. Parâmetros de Caracterização do solo na VRS-306 em Alegrete/RS

Parâmetro	Maronezi Junior, 2017	Kanaan, 2018
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	24,2	N.D.
Limite de Liquidez (%)	32	24
Limite de Plasticidade (%)	26	19
Índice de Plasticidade (%)	5	5
Areia Grossa (%)	7,82	6,00
Areia Média (%)	0,00	1,82
Areia Fina (%)	30,93	62,68
Silte (%)	9,77	10,31
Argila (%)	51,49	19,19
SUCS	ML	SM

Tabela 12. Resultados de compactação e ensaios de compressão para os solos na jazida da VRS-306

Energia	Y _d (kN/m ³)	w _o (%)	RCS (kPa)	RTCS (kPa)
Mini-Proctor (Maronezi Jr., 2017)	19,42	14,03	409,00	66,00
Proctor Normal (Kanaan, 2018)	18,05	14,25	273,01	-

4.5 PARQUE DOS TRABALHADORES EM NOVO HAMBURGO/RS

O solo nesse local foi estudado por Orlandini (1991) e Bastos (1999) e se localiza em um loteamento no Parque do Trabalhador em Novo Hamburgo/RS (Figura 21) em um talude (Figura 22) exposto à época de 4 a 5m de Arenito Botucatu na Rua Ceará próximo à esquina com a Rua Alto Uruguai. O perfil apresenta sérios problemas de erosão superficial e foi classificado por Orlandini (1991) como Podzólico Vermelho-Amarelo.

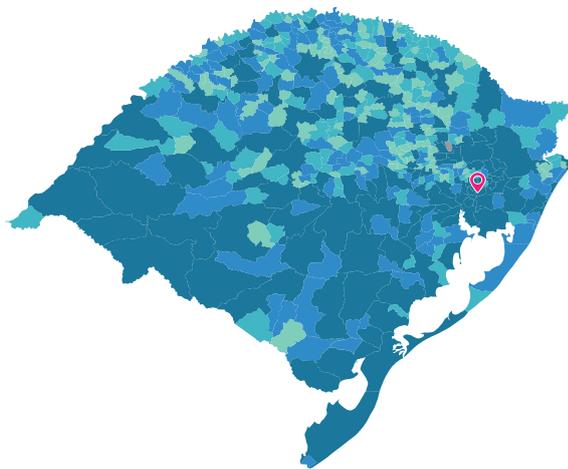


Figura 21. Mapa de localização de Novo Hamburgo/RS, retirado do IBGE (2021)

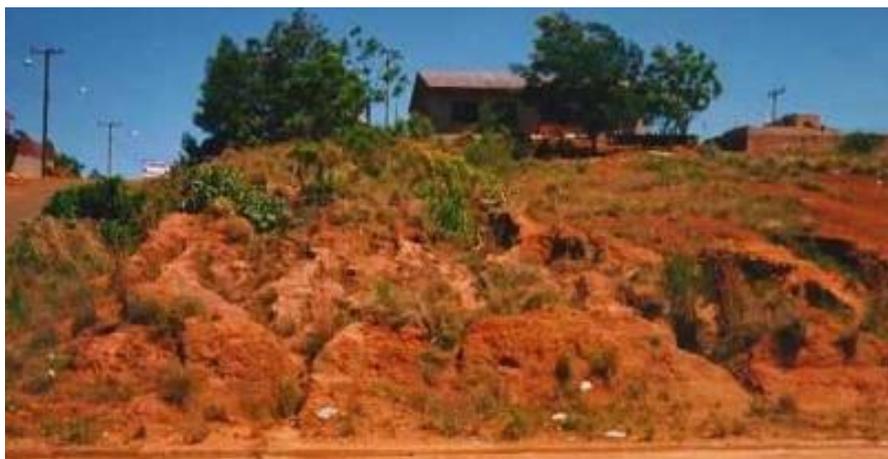


Figura 22. Talude de onde foi retirado o solo no Parque dos Trabalhadores, imagem de Bastos (1999)

4.5.1 Caracterização

Os autores Orlandini (1991) e Bastos (1999) realizaram ensaios de caracterização desse material e definiram o peso específico real dos grãos, a granulometria, os limites de Atterberg e a classificação do material pelo sistema unificado (SUCS) como mostra a Tabela 13. Ambos os autores obtiveram resultados semelhantes com uma baixa plasticidade e uma preponderância de areia fina no solo, classificando o material como uma areia siltosa/argilosa (SM-SC).

Tabela 13. Parâmetros de Caracterização do solo no Parque dos Trabalhadores em Novo Hamburgo/RS

Parâmetro	Bastos, 1991	Orlandini, 1991
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	26,5	26,5
Limite de Liquidez (%)	19	20
Limite de Plasticidade (%)	14	15
Índice de Plasticidade (%)	5	5
Areia Grossa (%)	0,0	0,0
Areia Média (%)	8,0	27,0
Areia Fina (%)	62,0	47,0
Silte (%)	18,0	26,0
Argila (%)	12,0	0,0
SUCS	SM-SC	SM-SC

4.5.2 Parâmetros de Resistência

Orlandini (1991) e Bastos (1999) também determinaram envoltórias de ruptura para esse solo a fim de obter parâmetros de resistência do material. Para isso, foram realizados ensaios de cisalhamento direto convencionais em condições de umidade natural e em condições inundadas como segue na Tabela 14. Houve uma expressiva diferença nos valores obtidos para a resistência entre os ensaios em condições de umidade natural, mas os valores

para os ensaios em condições inundados foram muito próximos. Com base nos ensaios inundados, pode-se concluir que esse solo apresenta um ângulo de atrito de aproximadamente 26° e uma pequena parcela de coesão.

Tabela 14. Parâmetros de resistência do solo localizado no Parque dos Trabalhadores em Novo Hamburgo/RS

Ensaio	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
Umidade Nat. - (Orlandini, 1991)	25,0	29,1
Inundado - (Orlandini, 1991)	26,0	6,1
Umidade Nat. - (Bastos, 1999)	38,9	24,8
Inundado - (Bastos, 1999)	27,1	2,4

4.6 PLATÔ EM MALHADA EM SANTA CRUZ DO SUL/RS

Pinheiro (2000) estudou diversos perfis de casos de instabilidade na borda sul dos Patamares da Serra geral na região de Malhada em Santa Cruz do Sul/RS (Figura 23), perto da divisa com Passo do Sobrado/RS. O local, como pode ser visto na Figura 24, de estudo consiste de um platô em um bloco em que ocorre um movimento de rastejo e dentre os vários perfis estudados pelo autor há dois que apresentam solo de Arenito Botucatu, resultando em três amostras retiradas do solo, referidas como P-2, P-4-1 e P-4-2.

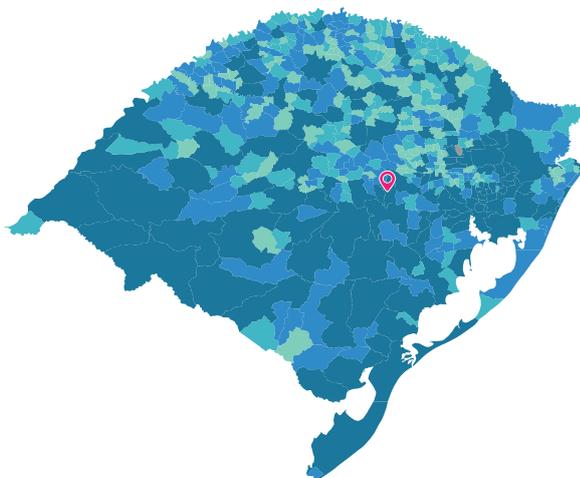


Figura 23. Mapa de localização de Santa Cruz do Sul/RS, retirado do IBGE (2021)



Figura 24. Foto área do platô em Malhada, retirada de Pinheiro (2000)

4.6.1 Caracterização

A caracterização das três amostras de Arenito Botucatu foi realizada por Pinheiro (2000), o qual determinou o peso específico real dos grãos do solo, os limites de Atterberg e a sua granulometria por ensaios de peneiramento e sedimentação, como segue na Tabela 15. O solo se mostrou não plástico para as três amostras quando o autor realizou os ensaios e, portanto, não foi possível se obter um valor de limite de plasticidade. Finalmente, o solo foi classificado pelo sistema SUCS com uma areia siltosa (SM) para as três amostras.

Tabela 15. Parâmetros de Caracterização do solo em Santa Cruz do Sul/RS

Parâmetro	P-2	P-4-1	P-4-2
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	26,5	26,4	26,6
Limite de Liquidez (%)	20	18	18
Areia Grossa (%)	0,0	0,0	0,0
Areia Média (%)	2,0	3,0	6,0
Areia Fina (%)	82,0	90,0	81,0
Silte (%)	10,0	3,0	7,0
Argila (%)	6,0	4,0	6,0
SUCS	SM	SM	SM

4.6.2 Condutividade Hidráulica

Pinheiro (2000) também realizou ensaios de permeabilidade utilizando piezômetros de carga variável a fim de determinar o coeficiente de condutividade hidráulica (K) do solo. Nesse caso foram realizados apenas dois ensaios: um para o perfil 2 (referente à amostra P-2) que resultou em uma condutividade de $3,35 \times 10^{-7}$ m/s e outro pra o perfil 4 (referentes às amostras P-4-1 e P-4-2) com uma condutividade de $8,66 \times 10^{-7}$ m/s.

4.6.3 Parâmetros de Resistência

Por último, Pinheiro (2000) determinou os parâmetros de resistência do Arenito Botucatu nesse local por meio de ensaios de cisalhamento direto em amostras inundadas e indeformadas. Na Tabela 16 pode-se observar os valores de ângulo de atrito (ϕ') e de coesão efetiva (c') para as envoltórias de ruptura de pico do material para as três amostras. Observa-se um valor ângulo de atrito elevado, o que implica em uma alta resistência ao cisalhamento do solo encontrado nesse local.

Tabela 16. Parâmetros de resistência do Arenito Botucatu em Malhada, obtidos de Pinheiro (2000)

Amostra	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
P-2	48,0	0,0
P-4-1	33,0	5,4
P-4-2	35,7	8,8

4.7 RINCÃO DE SÃO MIGUEL EM ALEGRETE/RS

O solo estudado nessa seção é proveniente de uma jazida na cidade de Alegrete/RS (Figura 25). A jazida está localizada no Subdistrito Rincão de São Miguel nas coordenadas 29°48'59,4" S e 55°41'10,5" W e faz parte da Formação Botucatu, sendo utilizada na região como fonte de materiais para a construção de barramentos de açudes e barragens de pequeno porte, segundo Dias (2018).

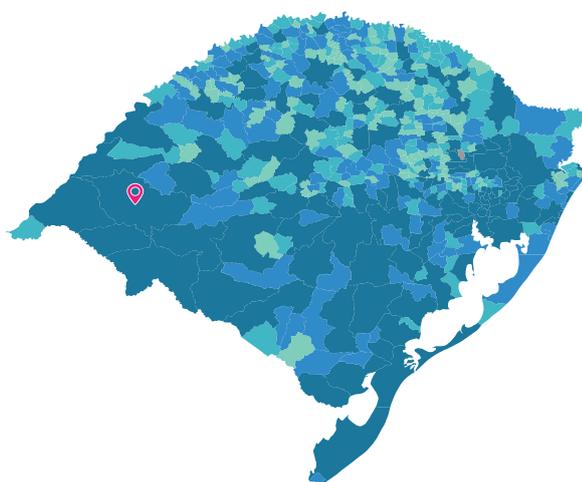


Figura 25. Mapa de localização de Alegrete/RS, retirado do IBGE (2021)

4.7.1 Caracterização

Dias (2018) apresentou dados de caracterização desse solo obtidos em ensaios realizados por Quevedo (2015), dentre os quais o peso específico dos

grãos, a granulometria, os limites de Atterberg e a classificação pelo sistema unificado (SUCS). Esse material apresentou uma predominância da fração argila e foi classificado com uma argila pouco plástica (CL).

Tabela 17. Parâmetros de Caracterização do solo em São Miguel em Alegrete/RS, obtidos de Quevedo (2015) apud Dias (2018)

Parâmetro	Quevedo, 2015
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	26,69
Limite de Liquidez (%)	41
Limite de Plasticidade (%)	26
Índice de Plasticidade (%)	15
Areia Grossa (%)	5,0
Areia Média (%)	15,0
Areia Fina (%)	18,0
Silte (%)	17,0
Argila (%)	45,0
SUCS	CL

4.7.2 Condutividade Hidráulica e Compactação

Quevedo (2015) também obteve dados de compactação e permeabilidade para o material dessa jazida. A autora realizou ensaios de compactação nas energias Proctor normal e Proctor modificado, definindo o peso específico máximo (γ_d) e a umidade ótima (w_o), como mostra a Tabela 18. O coeficiente de condutividade hidráulica (K) para esse material foi obtido a partir de ensaios de carga variável em corpos de provas compactadas à energia normal, resultando em um valor de $2,80 \times 10^{-7}$ m/s.

Tabela 18. Parâmetros de compactação, obtido de Quevedo (2015) apud Dias (2018)

Energia	γ_d (kN/m³)	w_o (%)
Proctor Normal	16,48	20,50
Proctor Modificado	17,95	16,70

4.7.3 Parâmetros de Resistência

Dias (2018) realizou ensaios de cisalhamento direto para obter valores de ângulo de atrito (ϕ') e de coesão efetiva (c') desse solo. A autora definiu as envoltórias de ruptura para corpos de prova compactados nas energias Proctor normal e Proctor modificada de acordo com os resultados de Quevedo (2015, como pode ser visto na Tabela 19.

Tabela 19. Parâmetros de resistência, obtidos de Dias (2018)

Energia	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
Proctor Normal	29,0	0,0
Proctor Modificado	31,0	24,0

4.8 RS-239 EM NOVO HAMBURGO/RS

Em Novo Hamburgo/RS (Figura 26) um solo local foi estudado por Bastos (1999) e Ferreira (1998), que identificaram o material como parte da Formação Botucatu. As amostras foram retiradas de uma jazida de empréstimo durante o asfaltamento da RS-239 a 5 km do entroncamento dessa rodovia com a BR-116. Segundo Bastos (1999) o local apresenta elevada erosão por iluviação, com a formação de ravinamentos profundos devido estratificação do arenito, como poder ser visto na Figura 27.

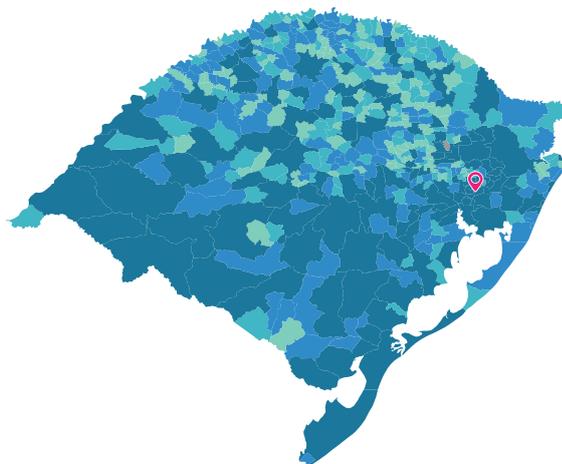


Figura 26. Mapa de localização de Novo Hamburgo/RS, retirado do IBGE (2021)



Figura 27. Solo na RS-239 em Novo Hamburgo/RS, retirado de Bastos (1999)

4.8.1 Caracterização

A caracterização desse material foi realizada por Bastos (1999) que obteve parâmetros de peso real dos grãos, limites de Atterberg e granulometria, classificado esse solo com uma are siltosa/argilosa pelo sistema SUCS. Ferreira (1998) também realizou ensaios de granulometria para o material, como mostra a Tabela 20.

Tabela 20. Parâmetros de Caracterização do solo na RS-239 em Novo Hamburgo/RS

Parâmetro	Bastos, 1999	Ferreira, 1998
Peso Específico Real dos Grãos (kN/m³)	26,4	-
Limite de Liquidez (%)	20	-
Limite de Plasticidade (%)	14	-
Índice de Plasticidade (%)	6	-
Areia Grossa (%)	0,0	0,0
Areia Média (%)	0,0	0,0
Areia Fina (%)	74,0	70,0
Silte (%)	10,0	15,0
Argila (%)	16,0	15,0
SUCS	SM-SC	-

4.8.2 Parâmetros de Resistência

Os autores Bastos (1999) e Ferreira (1998) realizaram ensaios para a determinação das envoltórias de ruptura para o material e seus parâmetros de resistência. Bastos (1999) obteve seus resultados a partir de ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova tanto em condições de umidade natural, como em condições inundadas. Já Ferreira (1998) realizou ensaios triaxiais drenados e obteve duas envoltórias de ruptura distintas, uma para baixas tensões confinantes (menores que 100kPa) e outra para altas tensões confinantes (maiores que 100 kPa), como segue na Tabela 21.

Tabela 21. Parâmetros de resistência do solo na RS-239 em Novo Hamburgo/RS

Ensaio	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
Bastos, 1999 – Umidade Nat.	50,8	15,1
Bastos, 1999 – Inundado	39,6	4,5
Ferreira, 1998 – Baixas Tensões	39,6	13,9
Ferreira, 1998 – Alta Tensões	33,9	43,0

4.9 RS-240 NA VILA SCHARLAU EM SÃO LEOPOLDO/RS

Na Vila Scharlau em São Leopoldo-RS (Figura 28) foi estudado um solo residual de arenito da Formação Botucatu cujas amostras foram coletadas de uma jazida situada às margens da RS-240. Segundo Núñez (1991), o talude escolhido (Figura 29) apresenta uma profundidade de 20 m sendo a maior parte (17 m) constituinte de um horizonte C saprolítico homogêneo e de baixa cimentação. O solo nesse local foi amplamente estudado na UFRGS, sendo as primeiras investigações desse material realizadas por Núñez (1991), mas com trabalhos subsequentes por Jungblut (1993), Martins (1994), Prietto (1996), Carraro (1997), Thomé (1999), Specht (2000), Martins (2001), Medero (2001), Casagrande (2001), Heineck (2002), Cruz (2004), Foppa (2005), Medero (2005), Bernardes (2008) e Lopes Junior (2011).

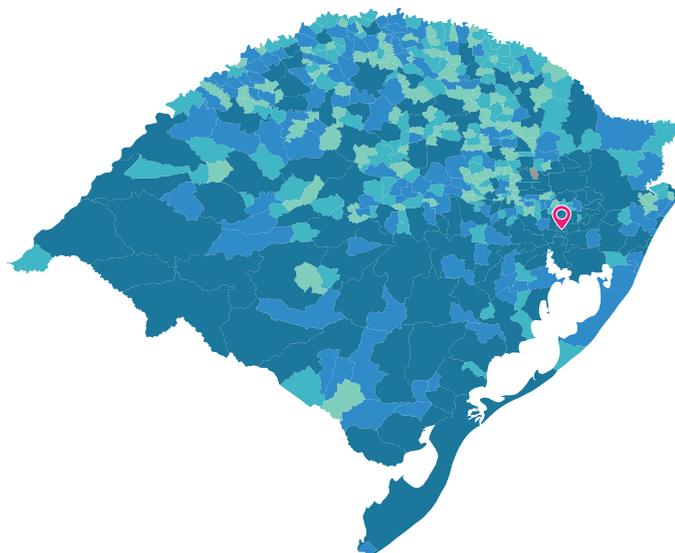


Figura 28. Mapa de localização de São Leopoldo/RS, retirado do IBGE (2021)



Figura 29. Talude onde as amostras foram coletadas, retirado de Lopes Junior (2011)

4.9.1 Caracterização

O solo nesse local foi extensivamente estudado por vários autores, os quais realizaram a caracterização desse material. A caracterização inicial foi feita por Núñez (1991) que realizou ensaios para determinar o peso específico real dos grãos, os limites de Atterberg e a granulometria do material, além de um estudo mineralógico do material. Os autores Jungblut (1993), Prietto (1993), Carraro (1997), Thomé (1999), Martins (2001), Heineck (2002), Foppa (2005), Bernardes (2008) e Lopes Junior (2011) adquiriram novos resultados de ensaios de caracterização para este material. A Tabela 22 mostra os resultados obtidos pelos autores, assim como os parâmetros médios para esse material e a classificação SUCS por esses valores médios.

No geral, os autores obtiveram resultados para os ensaios de caracterização semelhantes, com umas poucas exceções. Observa-se uma preponderância da fração areia fina no material, com exceção de Carraro (1997) que encontrou um material mais siltoso. O material apresenta uma baixa plasticidade, com Martins (2001) encontrando um material não plástico. A classificação no sistema SUCS do material foi majoritariamente de uma areia siltosa (SM), com exceção de Prietto (1993) e Carraro (1997) que classificaram o solo como um silte de baixa compressibilidade (ML).

Tabela 22. Parâmetros de Caracterização do solo na RS-239 na Vila Scharlau em São Leopoldo

Parâmetro	Núñez, 1991	Jungblut, 1993	Prietto, 1993	Carraro, 1997	Thomé, 1999	Martins, 2001	Heineck, 2002	Foppa, 2005	Bernardes, 2008	Lopes Jr, 2011	Média
Peso Específico											
Real dos Grãos (kN/m³)	26,7	26,9	27,0	26,0	26,7	26,7	26,5	25,9	26,3	25,9	26,5
Limite de Liquidez (%)	21	21	22	22	22	21	22	23,0	21,0	23	22
Limite de Plasticidade (%)	17	17	15	17	19	N.P.	19	13,0	12,0	13	16
Índice de Plasticidade (%)	4	4	7	5	3	N.P.	3	10	9	10	6
Areia Grossa (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Areia Média (%)	2,5	5,0	2,4	8,0	8,8	25,0	8,8	16,2	30,0	16,2	12,3
Areia Fina (%)	50,5	52,0	46,0	15,0	47,3	43,0	47,3	45,4	30,8	45,4	42,3
Silte (%)	33,0	33,0	32,6	57,0	29,9	27,0	38,9	33,4	32,7	33,4	35,1
Argila (%)	14,0	10,0	19,0	20,0	14,0	5,0	5,0	5,0	6,5	5,0	10,4
SUCS	SM-SC	SM	ML	ML	SM	SM-SC	SM	SM	SM	SM	SM

4.9.2 Condutividade Hidráulica

Heineck (2002) e Cruz (2004) estudaram o comportamento hidráulico desse solo a partir de ensaios de condutividade hidráulica utilizando permeâmetros de parede flexível. Heineck (2002) determinou o coeficiente hidráulico saturado (K) do material como $3,97 \times 10^{-8}$ m/s, tendo ainda estudado os efeitos da adição de bentonita para o uso desse solo em barreiras verticais. Já Cruz (2004) encontrou um coeficiente de $7,38 \times 10^{-8}$ m/s para o material, tendo este também estudado os efeitos da adição de cimento na condutividade hidráulica do material.

4.9.3 Curva de retenção

A sucção nesse solo de arenito Botucatu foi estudada por Martins (2001) e Medero (2001), as quais determinaram a curva de retenção do material, como segue na Figura 30 e na Figura 31.

Martins (2001) determinou a curva de retenção utilizando duas técnicas: o método do papel filtro e a medida direta da sucção utilizando um mini-tensiômetro. A autora também utilizou a segunda técnica para obter uma medida em campo, concluindo que há uma sucção por volta de 40 kPa no local e nas condições que a amostra foi retirada. Já Medero (2001) utilizou apenas o método do papel filtro em sua determinação da curva de retenção. Os resultados de ambas as autoras demonstram que o solo apresenta pouca ou nenhuma histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento no material.

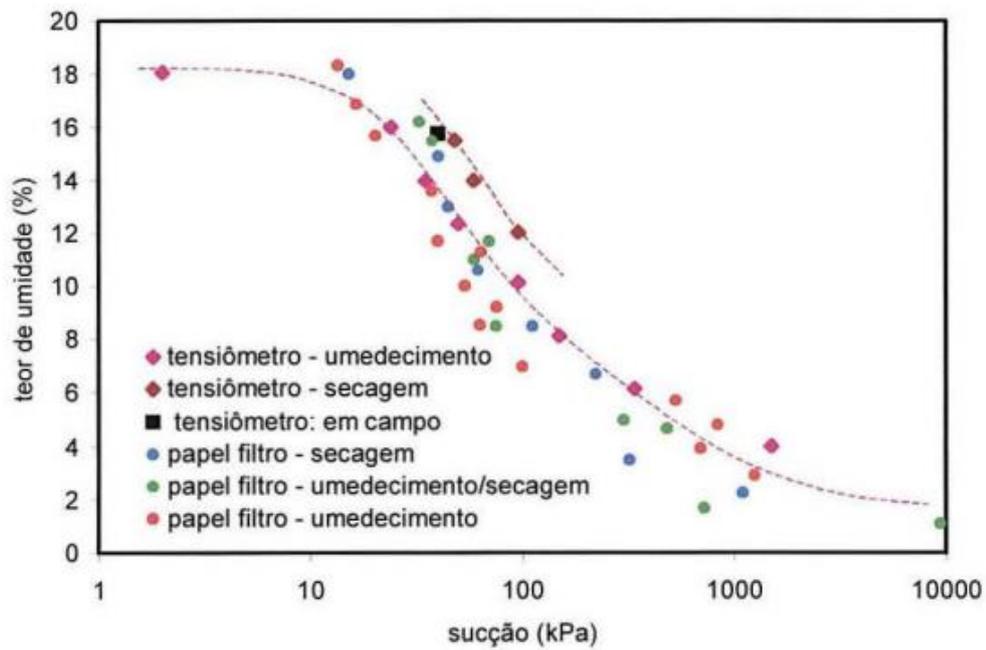


Figura 30. Curva de retenção determinada por Martins (2001)

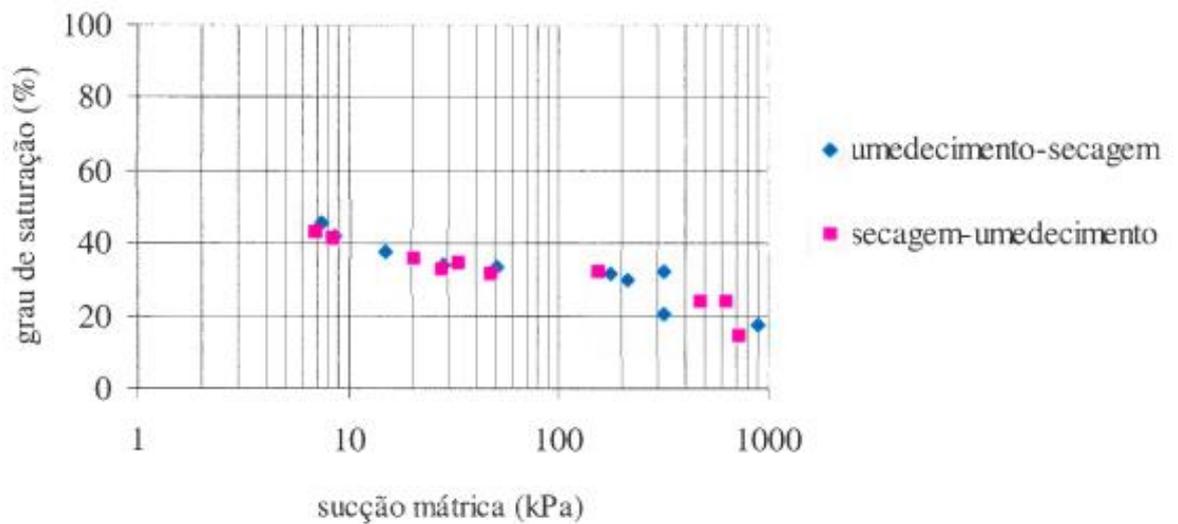


Figura 31. Curva de retenção determinada por Medero (2001)

4.9.4 Parâmetros de Resistência

A resistência ao cisalhamento do solo na Vila Scharlau foi estudada por Martins (1994), Prietto (1996), Specht (2000), Medero (2001), Casagrande (2001), Heineck (2002) e Medero (2005), como mostra a Tabela 23.

Tabela 23. Parâmetros de resistência do solo na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS

Fonte	Ângulo de Atrito (°)	Coesão Efetiva (kPa)
Martins, 1994	25,00	10,30
Prietto, 1996	35,00	9,90
Specht, 2000	35,00	5,00
Medero, 2001	34,00	0,00
Casagrande, 2001	31,93	9,71
Heineck, 2002	30,50	11,20
Medero, 2005	34,0	0,00

4.9.5 Compactação e Resistência à Compressão

A compactação e a resistência à compressão desse solo foi amplamente estudada por vários autores, de forma que há dados completos de peso específico máximo (γ_d) e umidade ótima (w_o) para todas as três energias de compactação usais em ensaio Proctor, como mostra a Tabela 24. Núñez (1991) realizou os ensaios iniciais de compactação para energias Proctor Normal e Proctor Intermediário, além de realizar ensaios de resistência à compressão simples (RCS) em corpos de prova com os parâmetros obtidos. Jungblut (1991) realizou ensaios semelhantes, mas apenas utilizando a energia normal e Thomé (1999) completou os dados ao realizar ensaios na energia Proctor Modificada. Também há dados de compactação obtidos por Casagrande (2001), Heineck (2002), Cruz (2004), Foppa (2005) e Bernardes (2008), embora nenhum desses autores tenha realizados ensaios de compressão apenas com o solo residual de Arenito Botucatu sem misturas.

Tabela 24. Parâmetros de compactação e resistência à compressão para o solo da Vila Scharlau em São Leopoldo/RS

Fonte	Proctor Normal			Proctor Intermediário			Proctor Modificado		
	γ_d (kN/m ³)	w_o (%)	RCS (kPa)	γ_d (kN/m ³)	w_o (%)	RCS (kPa)	γ_d (kN/m ³)	w_o (%)	RCS (kPa)
Núñez, 1991	17,40	15,90	190,0	18,90	13,30	470,0	-	-	-
Jungblut, 1991	17,40	16,00	121,0	-	-	-	-	-	-
Thomé, 1999	-	-	-	-	-	-	19,40	12,10	602,0
Casagrande, 2001	17,40	16,20	-	-	-	-	-	-	-
Heineck, 2002	17,40	16,20	-	-	-	-	-	-	-
Cruz, 2004	17,60	14,20	-	-	-	-	-	-	-
Foppa, 2005	17,56	14,60	-	19,13	11,00	-	19,72	7,00	-
Bernardes, 2008	18,70	12,80	-	19,30	11,30	-	-	-	-

4.9.6 Módulo de resiliência

Núñez (1991) e Bernardes (2008) realizaram também estudos do comportamento do material para pavimentação e determinaram o módulo resiliente desse material, Núñez realizou ensaios com corpos de prova compactados com as energias Proctor Normal (PN) e Intermediária (PI), enquanto Bernardes usou corpos de prova compactados com a energia Proctor Normal (PN), como pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25. Módulo resiliente do material na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS

Energia	K1 (kN/m ²)	K2	Modelo
PN – Núñez, 1991	121130	0,34	Tensão confinante
PI – Núñez, 1991	143536	0,26	Tensão confinante
PN – Bernardes, 2008	347900	0,29	Modelo composto

4.10 BANCO DE DADOS EM SIG

O banco de dados com as informações coletadas foi elaborado em projeto do ArcGIS, condensando-se esses dados em uma tabela de atributos de uma feição vetorial dos pontos de ensaio. A Figura 32 mostra um exemplo de parte da tabela. Observa-se que nos casos em que não há dados foi utilizada a entrada <Null> para fins de cálculo, pois valores em brancos geram erros em operações com os dados no ArcGIS. Os dados foram inclusos com base em cada amostra retirada para ensaio, assim, alguns trabalhos apresentam múltiplas entradas na tabela, nos casos em que o autor realizou mais de uma análise no mesmo local.

OBJECTID *	Shape *	Localização	Fonte 1	Peso Espec	Limite de Lj	Limite de Pl	Índice de Pl	Areia Gross	Areia Média
1	Point	Aterro de Resíduos em Capela de Santana/RS	Simões, 2019	25,30	33,0%	21,0%	12,0%	<Null>	19,0%
2	Point	Aterro de Resíduos em Capela de Santana/RS	Simões, 2019	26,20	33,0%	22,0%	11,0%	<Null>	28,0%
3	Point	Colúvio em Timbê do Sul/SC	Feurharmel, 2003	27,95	56,0%	34,0%	22,0%	1,0%	5,0%
4	Point	Colúvio em Timbê do Sul/SC	Silveira, 2003	27,95	55,0%	40,0%	15,0%	1,0%	8,0%
5	Point	Colúvio em Timbê do Sul/SC	Pereira, 2006	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
6	Point	Colúvio em Timbê do Sul/SC	Feurharmel, 2007	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
7	Point	Colúvio em Timbê do Sul/SC	Vivian, 2008	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
8	Point	Colúvio em Timbê do Sul/SC	Pereira, 2013	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
9	Point	ERS-122 em São Sebastião do Caí/RS	Antunes, 2017	26,61	<Null>	<Null>	<Null>	4,3%	27,4%
10	Point	Jazida na VRS306 em Alegrete/RS	Maronezi Junior, 2017	24,23	31,5%	26,1%	5,4%	7,8%	<Null>
11	Point	Jazida na VRS306 em Alegrete/RS	Kanaan, 2018	<Null>	24,0%	19,0%	5,0%	6,0%	1,8%
12	Point	Parque do Trabalhador em Novo Hamburgo/RS	Bastos, 1999	26,50	19,0%	14,0%	5,0%	<Null>	8,0%
13	Point	Parque do Trabalhador em Novo Hamburgo/RS	Oriandini, 1991	26,50	20,0%	15,0%	5,0%	<Null>	27,0%
14	Point	Plató em Malhada em Santa Cruz do Sul/RS	Pinheiro, 2000	26,50	22,0%	<Null>	<Null>	<Null>	2,0%
15	Point	Plató em Malhada em Santa Cruz do Sul/RS	Pinheiro, 2000	26,40	18,0%	<Null>	<Null>	<Null>	3,0%
16	Point	Plató em Malhada em Santa Cruz do Sul/RS	Pinheiro, 2000	26,60	18,0%	<Null>	<Null>	<Null>	6,0%
17	Point	Rincão de São Miguel em Alegrete/RS	Dias, 2018	26,69	40,5%	25,7%	14,8%	5,0%	15,0%
18	Point	RS239 em Novo Hamburgo/RS	Bastos, 1999	26,40	20,0%	14,0%	6,0%	<Null>	<Null>
19	Point	RS239 em Novo Hamburgo/RS	Ferreira, 1998	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
20	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Nunez, 1991	26,70	21,0%	17,0%	4,0%	<Null>	2,5%
21	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Jungblut, 1993	26,90	21,0%	17,0%	4,0%	<Null>	5,0%
22	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Martins, 1994	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
23	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Prietto, 1996	27,00	22,0%	15,0%	7,0%	<Null>	2,4%
24	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Carraro, 1997	26,00	22,0%	17,0%	5,0%	<Null>	8,0%
25	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Thomé, 1999	26,70	22,0%	19,0%	3,0%	<Null>	8,8%
26	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Specht, 2000	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
27	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Martins, 2001	26,70	21,0%	<Null>	<Null>	<Null>	25,0%
28	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Medero, 2001	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
29	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Casagrande, 2001	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
30	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Heineck, 2002	26,50	22,0%	19,0%	3,0%	<Null>	8,8%
31	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Cruz, 2004	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
32	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Foppa, 2005	25,90	23,0%	13,0%	10,0%	<Null>	16,2%
33	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Medero, 2005	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
34	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Bernardes, 2008	26,30	21,0%	12,0%	9,0%	<Null>	30,0%
35	Point	RS240 na Vila Scharlau em São Leopoldo/RS	Lopes Junior, 2011	25,90	23,0%	13,0%	10,0%	<Null>	16,2%

Figura 32. Exemplo da tabela com os dados no ArcGIS

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho criou um banco de dados georreferenciados para o Arenito da Formação Botucatu no Rio Grande do Sul em plataforma SIG, com base em uma revisão bibliográfica de trabalhos acadêmicos publicados anteriormente. Foi utilizado o software ArcGIS 10.8, mas as diversas opções disponíveis no mercado são compatíveis entre si, sendo possível visualizar o banco de dados em outros programas.

Da distribuição espacial dos solos estudados, nota-se uma grande concentração de muitos estudos em poucos locais, o que fornece importantes informações sobre o comportamento desse solo. Por outro lado, não permite inferir conclusões sobre a variação espacial desse comportamento. Há vários ensaios em solos na região de encontro da Depressão Central e do Planalto Meridional a norte da capital Porto Alegre, um único ponto de dados em Santa Cruz do Sul no centro do estado, algumas informações na região oeste no município de Alegrete. Por último, dados na fronteira com Santa Catarina, entre os municípios de São José dos Ausentes/RS e Timbé do Sul/SC. Destaca-se aqui o sítio da Vila Scharlau em São Leopoldo, local no qual o solo foi bem estudado, não só havendo informações completas sobre as propriedades do solo como também estudos de estabilização com os mais diversos materiais.

Os dados levantados permitem determinar uma faixa de valores e médias encontrados para os parâmetros geotécnicos do Arenito Botucatu. O peso específico real dos grãos (γ_s) ficou bem definido, com valores variando entre 24,3 e 28,0 kN/m³, um valor médio de 26,5 kN/m³ e uma mediana de 26,5 kN/m³, com um coeficiente de variação de 2,85%. Observada a baixa variação é possível afirmar com confiança que o valor médio representa bem o solo de Arenito Botucatu.

Para os limites de Atterberg do material foi observado uma maior variância: com o Limite de Liquidez (LL) variando entre 56% e 18%, uma média de 26% e uma mediana de 22 %; enquanto o Índice de Plasticidade (IP) ficou entre 22% e 0% para solo não plásticos, com uma média de 8% e uma mediana de 6%. Assim, desconsiderando os valores mais extremos, pode-se

afirmar que os solos do Arenito Botucatu geralmente se apresentam como materiais pouco plásticos.

A distribuição granulométrica do material também apresentou bastante variação entre as amostras, mas no geral houve uma tendência a preponderância de areia fina seguida de siltes e argilas. As médias das frações granulométricas desse material foram: 1,8% para a areia grossa (AG), 11,9% para a areia média (AM), 47,1% para areia fina (AF), 22,8% para siltes (Sil) e 18,6% para argilas (Arg). A classificação do material pelo Sistema Unificado (SUCS) tendeu para um material com significativa presença de finos, observando materiais classificados como areias siltosas (SM), areias argilosas (SC), silte pouco plástico (ML), silte altamente compressível (ML) e argilas pouco plásticas (CL), mas com a classificação que ocorreu na maioria das amostras sendo de uma areia siltosa (SM). A Tabela 26 mostra um resumo dos parâmetros de caracterização. A Figura 34 e a Figura 35 mostram a variação desses parâmetros.

Tabela 26. Parâmetros de caracterização médios do Arenito Botucatu

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
γ_s (kN/m³)	24,2	28,0	26,5	26,5
LL (%)	18	56	26	22
IP (%)	0	22	8	6
AG (%)	0,0	7,8	1,8	0,0
AM (%)	0,0	30,0	11,9	8,0
AF (%)	12,0	90,0	47,1	46,0
Sil (%)	3,0	57,0	22,8	23,0
Arg (%)	0,0	65,0	18,6	14,0

O solo de residual arenito Botucatu é comumente encontrado em estado não saturado no campo, assim, foram coletados dados sobre o efeito da sucção na forma de curvas de retenção do material. As curvas de retenção foram obtidas para solos em três locais distintos e apresentaram formas similares: observa-se pouca ou nenhuma sucção para altas saturações, seguido de um pequeno aumento da sucção com o aumento da saturação até

que um patamar onde há um rápido aumento da sucção para uma pequena diminuição da saturação, finalmente com um ramo final onde a saturação decresce rapidamente sem grande ganhos para a sucção. As curvas de Timbé do Sul/SC e São Sebastião do Caí/RS apresentam esse patamar de grande aumento da sucção para altos graus de saturação, em torno de 80% de saturação. Já o solo da Vila Scharlau em São Leopoldo/RS apresenta uma sucção de grandeza menor e ocorrendo para saturações menores, em torno de 40% de saturação.

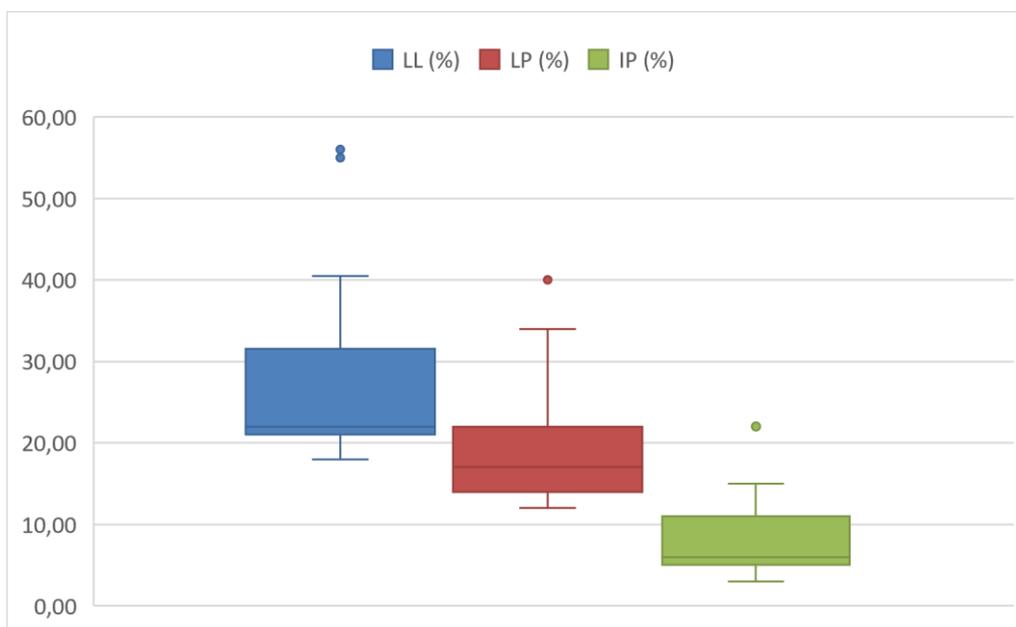


Figura 34. Diagrama de caixas para os limites de Atterberg

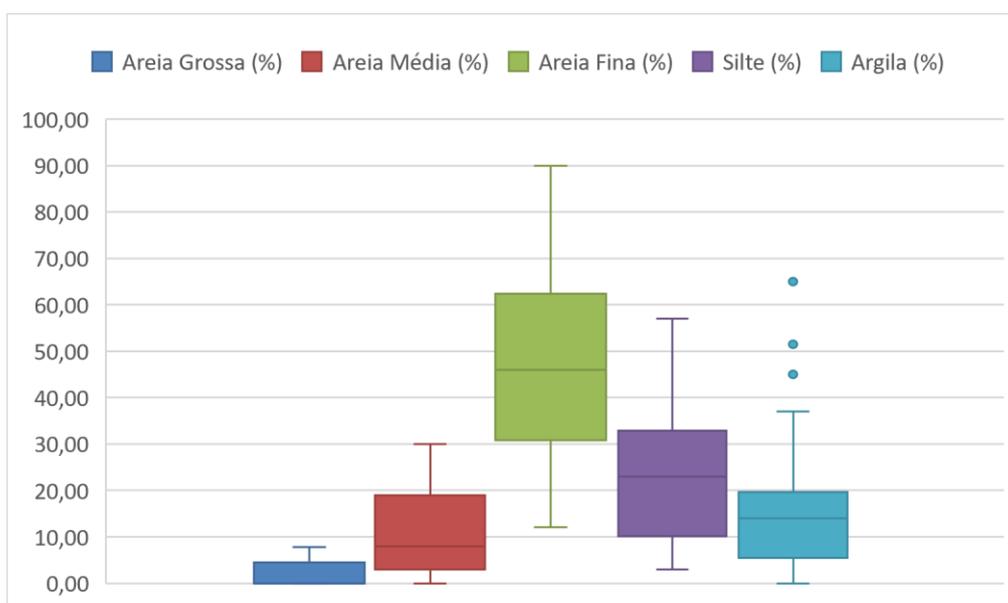


Figura 35. Diagrama de caixas para a granulometria

O arenito Botucatu apresentou uma permeabilidade baixa típica de siltes, inferior ao encontrado em areias finas, mas não tão baixa quanto argilas, o que é coerente com a sua classificação predominante como uma areia siltosa. A condutividade hidráulica do solo variou entre $3,97 \times 10^{-8}$ a $6,53 \times 10^{-6}$ m/s, apresentando um valor médio de $1,41 \times 10^{-6}$ m/s e um valor mediano de $3,93 \times 10^{-7}$ m/s.

A resistência ao cisalhamento do solo foi observada pelos seus valores ângulo de atrito e coesão em ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. O ângulo de atrito variou entre $17,1^\circ$ e $48,0^\circ$, o que delimita uma grande amplitude e pouco representa o seu comportamento, mas esses foram valores extremos e a maioria dos ensaios resultaram em parâmetros mais semelhantes entre si, sendo média de $31,1^\circ$ e a mediana de $31,5^\circ$ para o ângulo de atrito do material, com um desvio padrão de $6,8^\circ$. A coesão do material foi observada entre 0,0 e 42,8 kPa, apresentando um valor médio de 13,5 kPa e um valor mediano de 10,1 kPa. Sendo o arenito de Formação Botucatu um solo residual, a coesão está quase sempre presente como uma parcela pequena da resistência do material, mas é o ângulo de atrito que governa esses efeitos. A Figura 36 mostra a variação dos parâmetros de resistência para o arenito Botucatu.

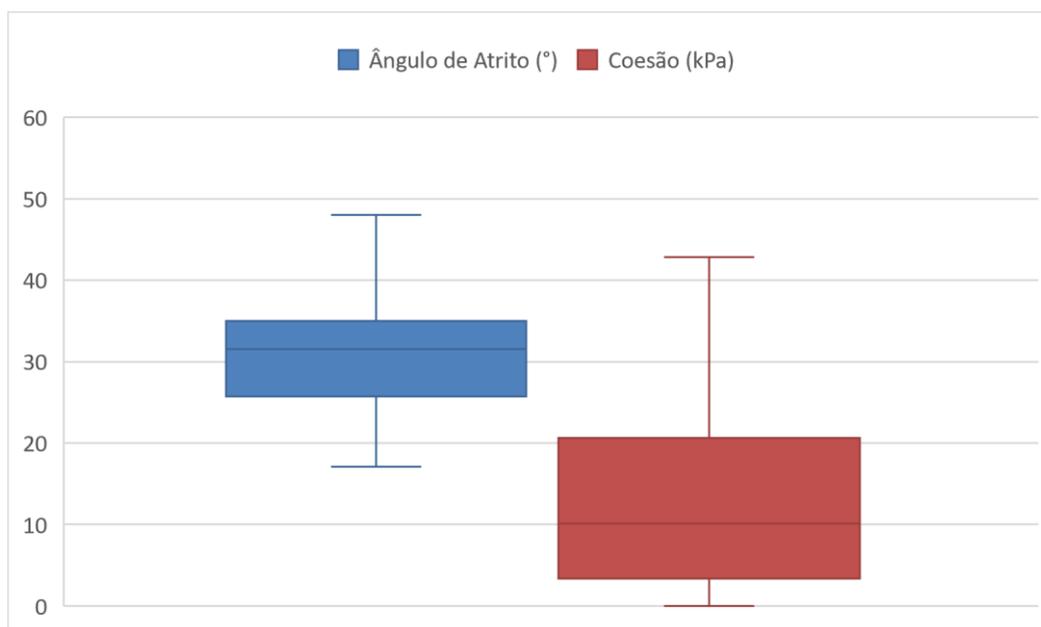


Figura 36. Diagrama de caixas para os parâmetros de resistência

A compactação do arenito da Formação Botucatu foi estudada para todas as energias de compactação usualmente empregadas e foram determinados o peso específico aparente seco máximo (γ_d) e umidade ótima (w_o), assim como a resistência a compressão simples (RCS) de corpos de prova moldados para tais condições. Os parâmetros de compactação para a energia Proctor Normal estavam disponíveis em quantidade suficiente para se analisar a tendência central dos dados: para o peso específico aparente seco máximo observou-se um valor médio de 17,55 kN/m³ e um valor mediano de 17,40 kN/m³, com uma umidade ótima correspondente de 15,6% para a média e 15,9% para a mediana. Os valores encontrados para os outros parâmetros podem ser observados na Tabela 27.

Tabela 27. Parâmetros de compactação para o solo de arenito Botucatu

Energia de Compactação	γ_d (kN/m³)	w_o (%)	RCS (kPa)
Proctor Normal	16,48 a 18,70	12,8 a 20,5	121 a 273
Proctor Intermediário	17,95 a 19,30	11,0 a 16,7	470
Proctor Modificado	19,40 a 19,72	7,0 a 12,1	602
Mini-Proctor	19,42	12,0	409

O objetivo do trabalho foi atendido: criou-se um banco de dados com uma vasta gama de informações sobre o arenito Botucatu que facilitará consultas futuras. Identificou-se uma tendência geral e concluiu-se que esse solo pode ser classificado como uma areia siltosa que apresenta uma resistência ao cisalhamento média a alta.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõem-se continuar a alimentar o banco de dados com novas informações publicadas e ampliar o escopo do banco de dados. A ampliação poderia compreender ou a inclusão de outros solos comuns e bem estudados do estado do Rio Grande do Sul, e/ou a inclusão informações de solos com a mesma formação geológica de outros estados do Brasil onde a Formação Botucatu pode ser encontrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. 2006.

ANTUNES, Anays Mertz. **Análise de um Talude Rompido em Solo Residual de Arenito: ERS122/São Sebastião do Caí**. 2017. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6.458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6.459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro. ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7.180: Solo – Determinação do limite de plasticidade-** 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7.181: Solo – Análise granulométrica**. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação**. 2016

BASTOS, Cezar Augusto Burker. **Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

BERNARDES, Juliana de Azevedo. **Desenvolvimento de um Equipamento Hollow Cylinder Torsional para Solos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

BUDHU, Muni. **Soil Mechanics and Foundations**. 2011. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. 2011.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Oxford Press University Press. 2000. 333p.

CARRARO, João Antonio Harb. **Utilização de Residuais Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibars de Polipropileno Visando o Uso como Base de Fundações Superficiais**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

CRUZ, Rodrigo Caberlon. **Condutividade Hidráulica em Solos Contaminados Encapsulados**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

DIAS, Bianka Nóra. **Estudo de Resistência ao Cisalhamento de Solos Utilizados na Construção de Barramentos de Pequeno Porte**. 2018. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2018.

ESRI. **Understanding GIS: The Arc/Info Method**. Redlands, CA: Environmental System Research Institute (ESRI), 1992.

FERREIRA, Pedro Miguel Vaz. **Estudo de um Solo Residual de Arenito da Rodovia RS239 - Ensaios Triaxiais Servo-controlados**. 1998.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

FEUERHARMEL, Carolina. **Aspectos do Comportamento Não Saturado de dois Solos Coluvionares - gasoduto Bolívia-Brasil**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

FEUERHARMEL, Carolina. **Estudo da resistência ao Cisalhamento e da Condutividade Hidráulica de Solo Coluvionares Não Saturados da Formação Serra Geral**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

FOPPA, Diego. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

HEINECK, Karla Salvagni. **Estudo do Comportamento Hidráulico e Mecânico de Materiais Geotécnicos para Barreiras Horizontais Impermeáveis**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento de Recursos Naturais. Folha SH.22 Porto Alegre e Parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso Potencial da Terra. Volume 33**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 1986.

JUNGBLUT, Mauro. **Estudo de Solos Subtropicais Visando o Emprego na Construção de Habitações de Baixo Custo**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1993.

KANAAN, Saed Hassan Husein. **Análise da Resistência a Compressão de um Solo Arenoso com a Adição de Fibras Provenientes**

de Garrafa PET. 2018. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2018.

LACRUZ, Maria Sílvia Pardi; SOUZA FILHO, Manoel de Araújo de. **Desastres Naturais e Geotecnologias – Sistemas de Informação Geográfica: Caderno Didático nº4.** São José dos Campos: Inpe, 2009.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

MANTESSO-NETO, Virgínio; BARTORELLI, Andrea; CARNEIRO, Celso Dal Ré; BRITO NEVES, Benjamim Bley de. **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** São Paulo: Beca, 2004.

MARINHO, Fernando Antônio Medeiros; **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados.** 2005. 200f. Texto (Concurso de Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MARONEZI JUNIOR, Lauder. **Estudo da Estabilização de um Solo da Formação Botucatu com Adição de Cal e Cinza Volante.** 2017. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.

MARTINS, Flávia Burmeister. **Automatização do Equipamento Triaxial Visando o Estudo de Solos Tropicais Cimentados.** 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

MARTINS. Flávia Burmeister. **Investigação do Comportamento Mecânico de um Solo Naturalmente Estruturado.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

MEDERO, Gabriel Maluf. **Análise do Comportamento Mecânico de um Material Colapsível**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

MEDERO, Gabriel Maluf. **Comportamento de um Solo Colapsível Artificialmente Cimentado**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

MÜHLMANN, M. et al. **Revisão estratigráfica da bacia do Paraná**. Ponta Grossa, PETROBRÁS-DESUL, 1974. 186p. Relatório Técnico Interno, 444).

NORTFLEET, A. A., et al. **Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná**. Boletim Técnico da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 1969. 12 (3): 291-346, jul./set.

NÚÑEZ, Washington Peres. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu Visando o seu Emprego na Pavimentação**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

ORLANDINI, R. **Unidades geotécnicas dos municípios de Novo Hamburgo e Campo Bom/RS e caracterização geomecânica de perfis típicos de solos de arenito**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

PEREIRA, Álvaro. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: análise experimental e teórica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

PEREIRA, Álvaro. **Comportamento Mecânico saturado e não saturado de um solo coluvionar de arenito**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa. **Estudo de Alguns Casos de Instabilidade da Encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul.** 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado.** 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

QUEVEDO, Juliana C. **Estudo do comportamento hidráulico de solos compactados para uso em barramentos de pequeno porte.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola). Alegrete: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha/Universidade Federal do Pampa, 2015.

SILVEIRA, Rodrigo Moraes da. **Propriedades Geotécnicas dos Solos Coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul/SC.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

SIMÕES, Eduardo Bonow. **Análise da Fundação de um Aterro de Resíduos no Município de Capela do Santana/RS.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

SPECHT, Luciano Pivoto, **Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra Submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos Visando a Pavimentação.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

TOMMASI, E. **Geologia da parte central do Rio Grande do Sul.** s.l. PETROBRÁS/DEX-PRO/DIVEX, 1977. 21p. (Relatório Técnico Interno)

THOMÉ, Antônio. **Comportamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Aterros Estabilizados com Resíduos Industriais.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

VIVIAN, Juliana Baum. **Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Contaminado com Óleo Diesel.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

**ANEXO I – MAPA DE ENSAIOS DE ARENITO DA FORMAÇÃO
BOTUCATU**

Mapa de Ensaios de Arenito de Formação Botucatu no RS

