



**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA ÁREA URBANA  
DE CAXIAS DO SUL – RS**

Porto Alegre, 2011

SAULO BORSATTO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA ÁREA URBANA  
DE CAXIAS DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani

**Supervisor:** Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa

Porto Alegre, 2011

Borsatto, Saulo

Contribuição ao estudo geológico-geotécnico da área urbana de  
Caxias do Sul. / Saulo Borsatto. - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2011.  
[96 f]. il.

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. - Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS  
- BR, 2011.

Orientação: Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani

1. Caxias do Sul. 2. Geologia. 3. Geotécnica. 4. Mapeamento  
geológico-geotécnico. I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências - UFRGS  
Miriam Alves CRB 10/1947

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL – RS**”, elaborado por SAULO BORSATTO, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Prof. Dr. Clovis Gonzatti

---

Prof. Dr. Norberto Dani

*À minha família.*

## AGRADECIMENTOS

Citar todas as pessoas que de uma forma ou de outra colaboraram para que fosse possível a realização deste trabalho é um tanto difícil. Foram muitas pessoas que contribuíram em diferentes momentos, mas a tentativa será feita.

Antes de tudo agradeço a Deus pelo dom da vida e aos meus pais, Aleixo e Maria Roseli, e a minha irmã, Morgana, por todo amor, carinho, compreensão, apoio e dedicação prestado ao longo de minha vida.

Meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador professor Dr. Luiz Antonio Bressani, não só pela dedicação e competência profissional que demonstrou na orientação deste trabalho, mas também pela confiança depositada de que eu conseguiria executar esse trabalho com sucesso. Agradeço Também aos professores Dr. Nelson Amoretti Lisboa e Dr. Norberto Dani, por todo apoio prestado e oferecido ao longo dessa pesquisa.

Agradeço ao grupo de professores do curso que me ensinaram passo a passo a geologia, em especial aos professores coordenadores do Projeto Temático I, Projeto Temático II e Projeto Temático III. Não posso deixar de agradecer ao professor Dr. Carlos Augusto Sommer e a professora Dra. Tatiana Silva da Silva.

Também sou grato a Prefeitura Municipal de Caxias do Sul pelo suporte prestado, em especial ao Geól. Felipe Faccioni e ao motorista Paulinho.

Agradeço ao pessoal do laboratório de Mecânica de Solos da Escola de Engenharia, principalmente ao bolsista Marco Antonio Conte pela grande ajuda na execução dos ensaios geotécnicos.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul por me oferecer o privilégio de cursar e concluir um curso superior gratuito e de qualidade. Ao motorista do Instituto de Geociências da UFRGS, Armando Mendicelli Neto pelo apoio prestado no campo.

Não poderia deixar de agradecer aos meus colegas de curso Renata Dillenburg Voss, Jaques Soares Schmidt, Priscila do Santos Lourenzi, Karine da Rosa Arena, Luiz Gustavo Raser, Gabriel Kolbe Teixeira e Natalia Buckowski pelos momentos de amizade, trabalho, conversa, risada, estudo etc. Vocês, certamente, ocupam um lugar muito especial no meu coração. Ao Diego Oliveira pela grande ajuda na confecção do mapa geológico-geotécnico. Também agradeço aos demais colegas do curso que foram a minha família nos vários campos.

Para terminar, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me ajudaram nesses cinco anos de graduação, o meu mais sincero muito obrigado!

“Se você pensa que pode ou se pensa que não pode, de qualquer forma você está certo.”

Henry Ford

## RESUMO

Caxias do Sul é um município do Rio Grande do Sul localizado na encosta superior nordeste do estado, na superfície do Planalto dos Campos Gerais. A cidade apresenta alguns problemas com escorregamentos de terra, principalmente em períodos de grande intensidade de chuvas, e problemas de uso e ocupação do solo, decorrentes da dinâmica social, da geomorfologia e também devido às características dos materiais que compõem o subsolo urbano. Devido ao seu crescimento, foi necessária a ampliação dos seus limites urbanos. Para que ocorra uma ocupação segura dessas novas áreas é imprescindível à realização de um estudo geológico-geotécnico. No município, afloram rochas vulcânicas ácidas pertencentes à Formação Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu, bem como depósitos recentes de tálus e colúvios. O objetivo geral desse estudo é coletar novos dados de campo e de escritório, reinterpretar dados de geologia, geomorfologia e geotécnicos existentes para melhor compreender as propriedades e características do solo e subsolo urbano do município. Como objetivo específico, insere-se a organização de todos dados adquiridos ao longo do desenvolvimento desse trabalho na forma de um SIG. Para a obtenção de bons resultados, investiu-se em várias técnicas: análise e interpretação de fotografias aéreas (fotointerpretação geomorfológica e geológica do local de estudo); trabalho de campo para um mapeamento geológico-geotécnico; descrição de lâminas petrográficas; análise química das rochas coletadas em campo; difratometria de raios X e ensaios geotécnicos dos solos (análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e peso específico real dos grãos). Três Unidades Geotécnicas foram identificadas nas novas áreas mapeadas, semelhantes às identificadas nas áreas mais centrais da cidade. Estas unidades correspondem a grupos de solos de comportamento semelhante entre si (granulometria e plasticidade) e que são originados da mesma rocha. Os solos Caxias e Canyon apresentaram uma alta plasticidade, enquanto o solo Forqueta uma média plasticidade.

**Palavras-Chave:** Caxias do Sul. Geologia. Geotécnica. Mapeamento geológico-geotécnico.

## ABSTRACT

Caxias do Sul is a city in Rio Grande do Sul, located on the upper slopes northeast of the state on the surface of the plateau of Campos Gerais. The city has some problems with landslides, in periods of high density of rainfall, and problems of use and occupation of land, arising from social dynamics, and due to the geomorphology characteristics of materials that make up the urban underground. Because of its growth, it was necessary to expand their city limits. In order to have a safe occupation of these new areas is essential to carry out a geological and geotechnical study. In the city, acidic volcanic rocks outcrop that belong the Serra Geral formation and sandstones of the Botucatu Formation, as well as recent deposits of talus and colluviums. The overall objective of this study is to collect new data from field and office, reinterpreting data of geology; geomorphology and geotechnical existent for a better understanding the properties and characteristics of the urban soil and subsoil of the city. As a specific goal, inserted in the organization of all data acquired during the development of this work in the form of a GIS. To obtain good results it has been invested in lots of techniques: analysis and interpretation of aerial photographs (photo-interpretation of the geological and geomorphologic study site), performance of a field for geological and geotechnical mapping, petrography description of blades; chemical analysis of rocks collected in the field, X-ray diffraction and geotechnical testing of soils (granulometric analysis, liquid limit, plastic limit and specific gravity of real grains). Three units were identified in the geotechnical new mapped areas, similar to those identified in the most central areas of the city. These units corresponding to groups of soils of similar behavior to each other (grain size and plasticity) and originating from the same rock. The soils Caxias and Canyon had a high plasticity, while the Forqueta soil had a fork plasticity.

**Keywords:** Geology Caxias do Sul. Geotechnical. Geological and geotechnical mapping.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. A - DESLIZAMENTO DE TERRA NO CENTRO DE CAXIAS DO SUL (FONTE: RBS TV 10/2009); B - RUPTURA EM ESCAVAÇÃO JUNTO À AVENIDA PERIMETRAL (FONTE: BRESSANI; FLORES; NUNES, 2005).....	14 -
FIGURA 2. ILUSTRAÇÃO DO CRESCIMENTO DA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL (MODIFICADO DO SUI - SISTEMA ÚNICO DE INFORMAÇÕES, DISPONÍVEL NO SITE <a href="http://www.caxias.rs.gov.br">HTTP://WWW.CAXIAS.RS.GOV.BR</a> ). ....	15 -
FIGURA 3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DISTRIBUIÇÃO DAS PRINCIPAIS UNIDADES GEOLÓGICAS (MODIFICADO DE SIAGAS/CPRM).....	17 -
FIGURA 4. FLUXOGRAMA PROJETUAL ELUCIDANDO AS ETAPAS DO PROJETO.....	18 -
FIGURA 5. MAPA DE REGIÕES GEOMORFOLÓGICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (MODIFICADO DE RADAMBRASIL, 1986). ....	19 -
FIGURA 6. MAPA DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (MODIFICADO DE RADAMBRASIL, 1986). ....	20 -
FIGURA 7. COLUNA DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL, COM INDICAÇÃO DA ESPESURA DE CADA UNIDADE VULCÂNICA E OS RESPECTIVOS SOLOS DERIVADOS DA ALTERAÇÃO DESTAS ROCHAS (EXTRAÍDO DE BRESSANI; FLORES; NUNES, 2005). ....	24 -
FIGURA 8. DIAGRAMA DE ROSETAS DOS LINEAMENTOS DA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL. ....	25 -
FIGURA 9. MAPA INDICANDO OS SOLOS QUE OCORREM NA ÁREA DE ESTUDO (MODIFICADO DE EMATER/DIT-UFRGS/DEP. SOLOS).....	27 -
FIGURA 10. MAPA ÍNDICE DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS DA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL.....	30 -
FIGURA 11. FASES DE CONFECCÃO DE UMA LÂMINA (FONTE: <a href="http://www.dct.uminho.pt/rpmic/interactividade/index.html">HTTP://WWW.DCT.UMINHO.PT/RPMIC/INTERACTIVIDADE/INDEX.HTML</a> ).....	32 -
FIGURA 12. DIFRATÔMETRO SIEMENS D5000 COM GONIÔMETRO $\theta$ - $\theta$ DO LABORATÓRIO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS X, IGEO, UFRGS (FONTE: <a href="http://www.cpgq.ufrgs.br/arquivos/lab.htm">HTTP://WWW.CPGQ.UFRGS.BR/ARQUIVOS/LAB.HTM</a> ).....	38 -
FIGURA 13. APARELHO DE CASAGRANDE COM A RANHURA ABERTA NA PASTA DE SOLO. ....	52 -
FIGURA 14. CILINDRO COM 3 MM DE DIÂMETRO E CERCA DE 100 MM DE COMPRIMENTO.....	54 -
FIGURA 15. DIAGRAMA TAS (ÁLCALIS TOTAIS X SÍLICA), (LE BAS ET AL. 1986). CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS ROCHAS VULCÂNICAS ENCONTRADAS NA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL. ....	57 -
FIGURA 16. LÂMINA PTC 015 A; A – FENOCRISTAIS DE PLAGIOCLÁSIO E PIROXÊNIO; B – PORÇÃO SUPERIOR DA IMAGEM COM MAIOR CRISTALIZAÇÃO E PORÇÃO SUPERIOR COM DESVITRIFICAÇÃO INCIPIENTE; C E D – FRATURAS PARALELAS À ESTRUTURA DE FLUXO, PREENCHIDAS POR QUARTZO E COM ALTERAÇÃO AO LONGO DE SUA EXTENSÃO.....	59 -
FIGURA 17. LÂMINA PTC 022 A; A E B - TEXTURA GLOMEROPORFÍRICA FORMADA POR FENOCRISTAIS DE PLAGIOCLÁSIO E PIROXÊNIO; C – FENOCRISTAIS DE PLAGIOCLÁSIO EM UMA MATRIZ DE DESVITRIFICAÇÃO....	61 -
FIGURA 18. LÂMINA PTC 011 A; A E B – MATRIZ TEM TEXTURA FINA E É POSSÍVEL OBSERVAR A PRESENÇA DE MICRÓLITOS RIPIDIFORMES DE PLAGIOCLÁSIO; C – RAROS FENOCRISTAIS. ....	62 -
FIGURA 19. DIFRATOGRAMA DE RAIOS X, SOLO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. A – ROCHA TOTAL; B – FRAÇÃO < 2 MM.....	65 -
FIGURA 20. DIFRATOGRAMA DE RAIOS X, SOLO CAXIAS, AMOSTRA PTC 036 A. A – ROCHA TOTAL; B – FRAÇÃO < 2 MM. ....	66 -
FIGURA 21. DIFRATOGRAMA DE RAIOS X, SOLO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. A – ROCHA TOTAL; B – FRAÇÃO < 2 MM.....	67 -
FIGURA 22. DIFRATOGRAMA DE RAIOS X, SOLO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. A – ROCHA TOTAL; B – FRAÇÃO < 2 MM. ....	68 -
FIGURA 23. GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M.....	70 -
FIGURA 24. GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. -	72 -
FIGURA 25. GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. ....	74 -
FIGURA 26. GRÁFICO TEOR DE UMIDADE X LOG DE GOLPES (LIMITE DE LIQUIDEZ) DO SOLO SAPROLÍTICO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	77 -
FIGURA 27. GRÁFICO TEOR DE UMIDADE X LOG DE GOLPES (LIMITE DE LIQUIDEZ) DO SOLO SAPROLÍTICO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. ....	79 -
FIGURA 28. GRÁFICO TEOR DE UMIDADE X LOG DE GOLPES (LIMITE DE LIQUIDEZ) DO SOLO SAPROLÍTICO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A.....	81 -
FIGURA 29. A – FOTOGRAFIA DO DACITO/VITRÓFIRO FORQUETA COM ESTRUTURA DE FLUXO, PONTO PTC 001; B – CONTATO, AO LONGO DA VRS 834, ENTRE O DACITO/VITRÓFIRO FORQUETA E O SOLO, PONTO PTC 002. -	83 -

FIGURA 30. A – CORTE EM ESTRADA VICINAL A VRS 834, NOTA-SE A COLORAÇÃO BRUNO-AVERMELHADO DO SOLO FORQUETA, PONTO PTC 001; B – SOLO FORQUETA COM RESQUÍCIOS DA ESTRUTURA DE FLUXO, PONTO PTC 001.....	- 84 -
FIGURA 31. A – DACITO CAXIAS COM DISJUNÇÃO TABULAR VISÍVEL, PONTO PTC 013; B – VISTA GERAL DE UMA ANTIGA PEDREIRA ONDE SE OBSERVA O CONTATO ENTRE O DACITO CAXIAS E O SOLO, PONTO PTC 013..	- 85 -
FIGURA 32. DACITO CANYON COM COLORAÇÃO AVERMELHADA DEVIDO À ALTERAÇÃO, PONTO PTC 008. ....	- 86 -
FIGURA 33. A - SOLO CANYON COM COLORAÇÃO BEM AVERMELHADA, PONTO PTC 007; B – DACITO CANYON AFLORANDO NO LEITO DO ARROIO TEGA, PONTO PTC 007. ....	- 87 -

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DAS ROCHAS VULCÂNICAS ENCONTRADAS NA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL.....	- 57 -
TABELA 2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	- 69 -
TABELA 3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	- 70 -
TABELA 4. PORCENTAGEM DE FRAÇÃO DO MATERIAL PASSANTE DO SOLO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	- 71 -
TABELA 5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M.....	- 71 -
TABELA 6. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M.....	- 72 -
TABELA 7. PORCENTAGEM DE FRAÇÃO DO MATERIAL PASSANTE DO SOLO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. ....	- 73 -
TABELA 8. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A.....	- 73 -
TABELA 9. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. ....	- 74 -
TABELA 10. PORCENTAGEM DE FRAÇÃO DO MATERIAL PASSANTE DO SOLO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. ...	- 75 -
TABELA 11. ANÁLISE DO PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS DO SOLO SAPROLÍTICO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M.....	- 75 -
TABELA 12. ANÁLISE DO PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS DO SOLO SAPROLÍTICO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. ....	- 76 -
TABELA 13. ANÁLISE DO PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS DO SOLO SAPROLÍTICO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A.....	- 76 -
TABELA 14. RESULTADO DO LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO SAPROLÍTICO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	- 77 -
TABELA 15. RESULTADO DO LIMITE DE PLASTICIDADE DO SOLO SAPROLÍTICO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	- 78 -
TABELA 16. RESULTADO DO ÍNDICE DE PLASTICIDADE DO SOLO SAPROLÍTICO FORQUETA, AMOSTRA PTC 001 B, COTA 736 M. ....	- 78 -
TABELA 17. RESULTADO DO LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO SAPROLÍTICO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. ....	- 78 -
TABELA 18. RESULTADO DO LIMITE DE PLASTICIDADE DO SOLO SAPROLÍTICO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. ....	- 79 -
TABELA 19. RESULTADO DO ÍNDICE DE PLASTICIDADE DO SOLO SAPROLÍTICO CAXIAS, AMOSTRA PTC 013 B, COTA 640 M. ....	- 80 -
TABELA 20. RESULTADO DO LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO SAPROLÍTICO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. ....	- 80 -
TABELA 21. RESULTADO DO LIMITE DE PLASTICIDADE DO SOLO SAPROLÍTICO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. ....	- 81 -
-	-
TABELA 22. RESULTADO DO ÍNDICE DE PLASTICIDADE DO SOLO SAPROLÍTICO CANYON, AMOSTRA PTC 037 A. ....	- 81 -
-	-
TABELA 23. RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS ENCONTRADOS NESTE TRABALHO. ....	- 88 -

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>- 13 -</b>
1.1 PROBLEMA .....	- 15 -
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	- 16 -
1.3 OBJETIVOS .....	- 17 -
1.4 FLUXOGRAMA PROJETUAL .....	- 18 -
<b>2 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO .....</b>	<b>- 19 -</b>
<b>3 CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>4 ANÁLISE ESTRUTURAL .....</b>	<b>- 25 -</b>
<b>5 PEDOLOGIA .....</b>	<b>- 26 -</b>
<b>6 METODOLOGIA .....</b>	<b>- 28 -</b>
6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....	- 28 -
6.2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS .....	- 29 -
6.3 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO .....	- 31 -
6.4 PETROGRAFIA .....	- 31 -
6.5 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X .....	- 32 -
6.6 DIFRATOMETRIA POR RAIOS X .....	- 36 -
6.7 ENSAIOS GEOTÉCNICOS .....	- 39 -
6.7.1 <i>Análise Granulométrica</i> .....	- 39 -
6.7.2 <i>Peso Específico Real dos Grãos</i> .....	- 44 -
6.7.3 <i>Limite de Liquidez</i> .....	- 49 -
6.7.4 <i>Limite de Plasticidade</i> .....	- 53 -
<b>7 RESULTADOS .....</b>	<b>- 56 -</b>
7.1 ANÁLISE QUÍMICA .....	- 56 -
7.2 PETROGRAFIA .....	- 58 -
7.2.1 <i>Dacito Forqueta</i> .....	- 58 -
7.2.2 <i>Dacito Caxias</i> .....	- 59 -
7.2.3 <i>Dacito Canyon</i> .....	- 61 -
7.3 DIFRATOMETRIA POR RAIOS X .....	- 63 -
7.4 ENSAIOS GEOTÉCNICOS .....	- 69 -
7.4.1 <i>Granulometria por Sedimentação e Peneiramento</i> .....	- 69 -
7.4.2 <i>Peso Específico Real dos Grãos</i> .....	- 75 -
7.4.3 <i>Ensaio de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP)</i> .....	- 76 -
<b>8 DISCUSSÕES .....</b>	<b>- 82 -</b>
8.1 SOLO FORQUETA .....	- 82 -
8.2 SOLO CAXIAS .....	- 84 -
8.3 SOLO CANYON .....	- 86 -
8.4 SOLO ANA RECH .....	- 88 -
8.5 SOLO GALÓPOLIS .....	- 89 -
<b>9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>- 89 -</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>- 94 -</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O meio físico está constantemente sofrendo mudanças em suas configurações naturais pela ação do homem. Tais mudanças acompanham os interesses pela utilização e ocupação do solo que são cada vez maiores principalmente em áreas urbanas, onde o crescimento populacional acelerado exige uma ocupação imediata de novas áreas. O crescimento desordenado dos centros urbanos acarreta na redução da disponibilidade de terrenos em áreas seguras, provocando um aumento populacional em áreas de risco, o que facilita a ocorrência de desastres.

Estas condições representam um enorme desafio aos municípios que precisam formular e implementar políticas públicas relacionadas a estas situações inadequadas de uso e ocupação do solo. Sendo assim, estudos geológicos e geotécnicos constituem ótimos instrumentos de análise do meio físico e, para Pejon & Rodrigues (1987, apud NORONHA, 2007)<sup>1</sup>, a apresentação de seus resultados sob a forma cartográfica é a melhor maneira de representação das informações adquiridas, pois facilitam os seus entendimentos e usos.

Para Pasqualetto (1999), Caxias do Sul tornou-se, gradativamente, um pólo econômico, industrial e tecnológico de expressão nacional, com o desenvolvimento industrial conquistado nos últimos tempos. Adquiriu também uma importância regional pela comercialização e transporte de produtos, prestação de serviços em diversas áreas, pela estrutura comercial e pela existência de órgãos de representatividade regional. A cidade despertou novos olhares sobre o seu potencial econômico, atraindo, cada vez mais, novos investimentos e pessoas em busca de melhores condições de vida.

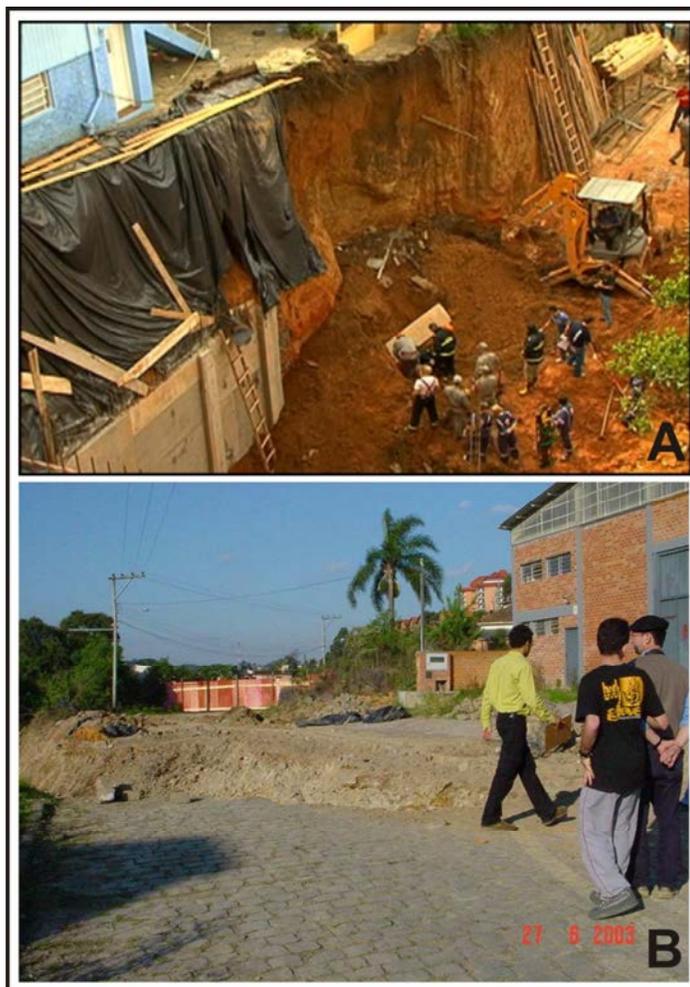
Esses fatores de atração acentuaram ao longo dos anos o processo de urbanização e hoje, o município, depois de Porto Alegre, é a segunda maior cidade gaúcha em números de habitantes, ultrapassando os 435.400 habitantes, possui um PIB de R\$ 8,1 bilhões, equivalente a 5,68% do PIB estadual e uma renda per capita de R\$ 20.485,00, o que representa 150,4% da média do estado (Fonte: <http://www.caxias.rs.gov.br>, acessado em 17/05/2011).

Seguindo a linha das grandes cidades brasileiras, Caxias do Sul não teve um planejamento urbano adequado à sua grande expansão demográfica. Segundo Nunes (2004), o fato de a cidade estar situada na borda de uma região de topografia acentuada, e substrato geológico em parte desfavorável ao assentamento urbano, gerou situações especiais, tais como pequenos deslizamentos de moradias em áreas de risco, além de problemas como rupturas

---

<sup>1</sup> Pejon, O. J. & Rodrigues, J. E. 1987. Análise geológico-geotécnico da região de Araraquara, SP. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, 5. São Paulo, Anais, ABGE, v. 2, p. 279-290.

imprevisíveis em vias urbanas e em obras de engenharia de médio e grande porte (Fig. 1). Principalmente a população de baixa renda passou a ocupar áreas sujeitas a processos de dinâmica superficial desencadeadores de risco, como as margens e planícies de inundação das drenagens e encostas de morros.



**Figura 1.** A - deslizamento de terra no centro de Caxias do Sul (Fonte: RBS TV 10/2009); B - Ruptura em escavação junto à Avenida Perimetral (Fonte: BRESSANI; FLORES; NUNES, 2005).

Segundo Nunes (2004), o município localiza-se na região denominada Encosta Superior do Nordeste e, em parte, na zona do Planalto dos Campos de Cima da Serra, conhecido na bibliografia RADAMBRASIL (1986) como Planalto dos Campos Gerais. A área do município situada na Encosta Superior do Nordeste é a maior (cerca de 70%) e a mais importante, pois abriga a sede do município.

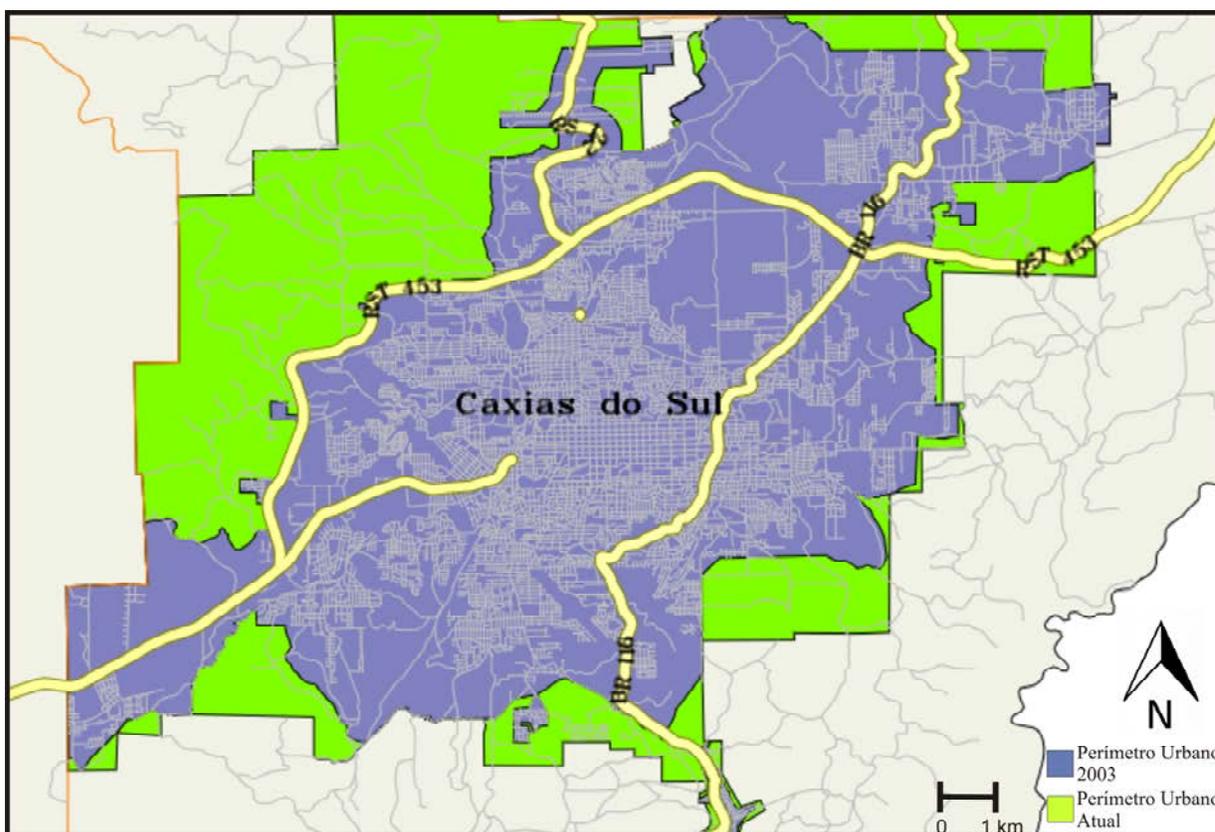
Principalmente em períodos com grande densidade de precipitação pluviométrica (verão e inverno), Caxias do Sul sofre com problemas geotécnicos decorrentes da dinâmica social, geomorfologia e também devido às características das rochas e estruturas geológicas

que compõem o subsolo urbano. Diante desta situação é imprescindível que a cidade tenha um mapeamento geológico-geotécnico de toda sua área urbana.

### 1.1 PROBLEMA

A identificação de áreas mais suscetíveis a desastres e suas prováveis causas são de fundamental importância para previsão de acidentes, auxílio na definição de prioridades e nas tomadas de decisões ligadas a trabalhos de prevenção de desastres e de direcionamento de recursos para os locais mais afetados.

Poucos estudos foram realizados para averiguar as condições do solo e subsolo da área urbana. Com essa carência torna-se cada vez mais difícil realizar um planejamento e gerenciamento municipal adequado que supram as novas necessidades em construção, seja para fim habitacional ou não, do município, mediante o seu contínuo crescimento econômico e social (Fig. 2).



**Figura 2.** Ilustração do crescimento da área urbana de Caxias do Sul (modificado do SUI - Sistema Único de Informações, disponível no site <http://www.caxias.rs.gov.br>).

Em julho de 2010, quando o estado do Rio Grande do Sul foi atingido por uma sucessão de ondas de frio e chuvas fortes, deslizamentos de terra atingiram moradias no município. Abaixo trechos de matérias vinculadas em sites e jornais:

“...Pelo menos 20 pessoas precisaram deixar suas casas no bairro Fátima, em Caxias do Sul. No começo da madrugada desta terça-feira, o risco de deslizamentos de terra obrigou a ação do Corpo de Bombeiros em uma área de barranco na Rua Giacomio Zatti, próximo ao posto Di Trento...” (Jornal “O Pioneiro”, 20/07/2010).

“...De acordo com o tenente Hamilton José Machado, coordenador da Regional de Caxias do Sul da Defesa Civil, as casas são construções regulares, mas estão em uma área de risco...” (portal “G1.com”, 20/07/2010).

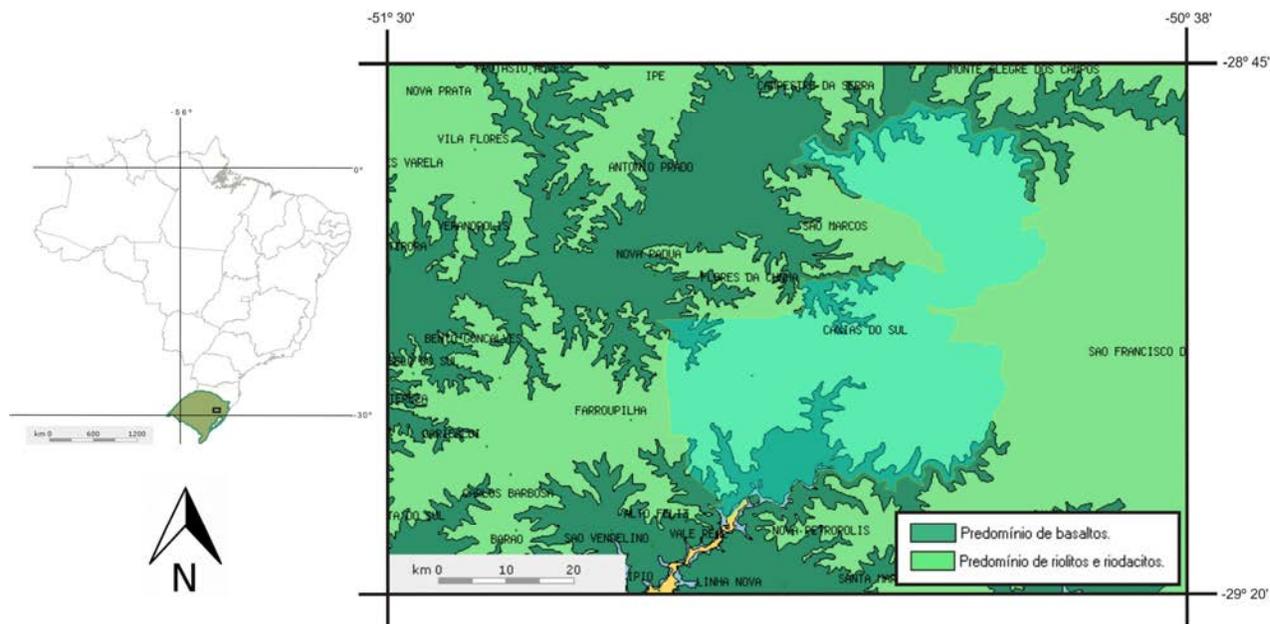
Em anos anteriores esse tipo de ocorrência também teve destaque na imprensa, como o ocorrido em fevereiro de 2003:

“...As chuvas intensas voltaram a transformar a madrugada de muitos caxienses em tormenta. Equipes da Defesa Civil trabalharam a noite inteira, fazendo a retirada de 23 famílias de suas casas e contabilizando mais de 100 chamados de atendimento, em quase 30 bairros e loteamentos. Além de problemas estruturais, os danos se agravaram porque a quantidade de chuva registrada nas 24 horas entre as manhãs de quarta e quinta-feira foi superior à média do mês...” (Jornal “O Pioneiro”, 21/02/2003).

## 1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área foco do estudo compreende a região urbana do município de Caxias do Sul que está localizada na extremidade leste da encosta superior do nordeste do estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil (Fig. 3).

O município de Caxias do Sul ocupa uma área territorial de 1.648,60 km<sup>2</sup>, que corresponde a 0,55% da área total do Estado. Limita-se a noroeste com os municípios de Flores da Cunha, São Marcos, Campestre da Serra e Monte Alegre dos Campos; a leste, com São Francisco de Paula; a sudeste, com Gramado e Canela; a sul, com Nova Petrópolis e Vale Real e a Oeste, com o município de Farroupilha. Os limites extremos do município encontram-se delimitados entre os paralelos 28° 19' e 29° 19' de latitude sul e entre os meridianos 50° 46' e 51° 91' de longitude oeste de Greenwich. Caxias do Sul situa-se a 127 km de Porto Alegre, a capital gaúcha. As principais vias de acesso são a BR 116 e a RS 122.



**Figura 3.** Localização da área de estudo e distribuição das duas principais unidades geológicas (modificado de SIAGAS/CPRM).

### 1.3 OBJETIVOS

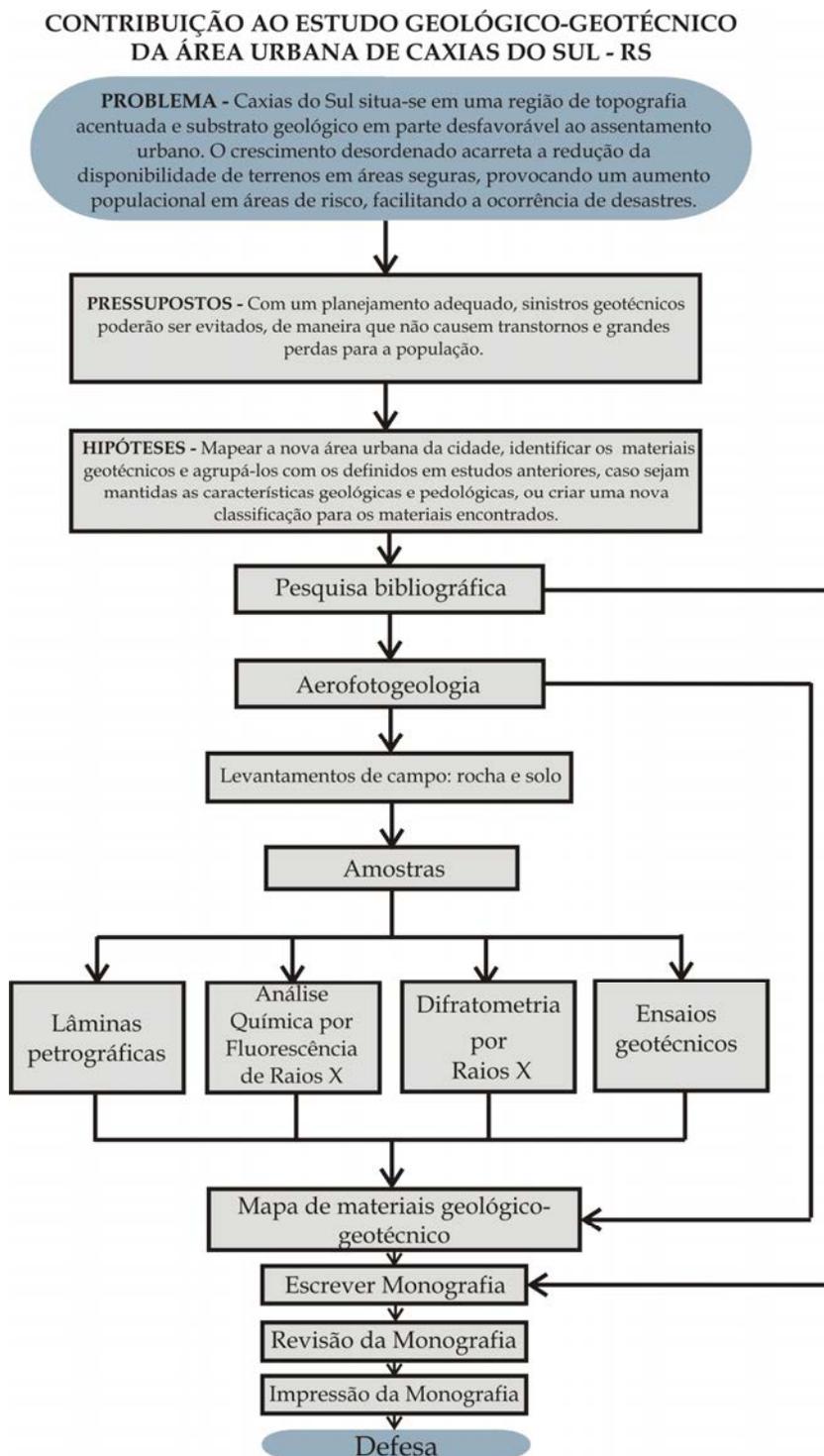
A presente pesquisa visa coletar novos dados de campo e de escritório, e reinterpretar dados de geologia, geomorfologia e geotécnica existentes, para melhor compreender as propriedades e características do solo e subsolo urbano do município de Caxias do Sul.

O **objetivo geral** é o mapeamento geotécnico de novas regiões da cidade que hoje fazem parte da área urbana do município, gerando um material com maiores informações e detalhamento sobre o solo e subsolo. Como **objetivo específico**, insere-se a organização de todos os dados adquiridos e reinterpretados ao longo do desenvolvimento desse trabalho na forma de um SIG.

Esse estudo é de suma importância para as secretarias municipais de Planejamento Urbano, Habitação, Meio Ambiente, Viação e Obras, assim como para as empresas de engenharia que, por ventura, executarão obras na cidade, e demais órgãos interessados.

### 1.4 FLUXOGRAMA PROJETUAL

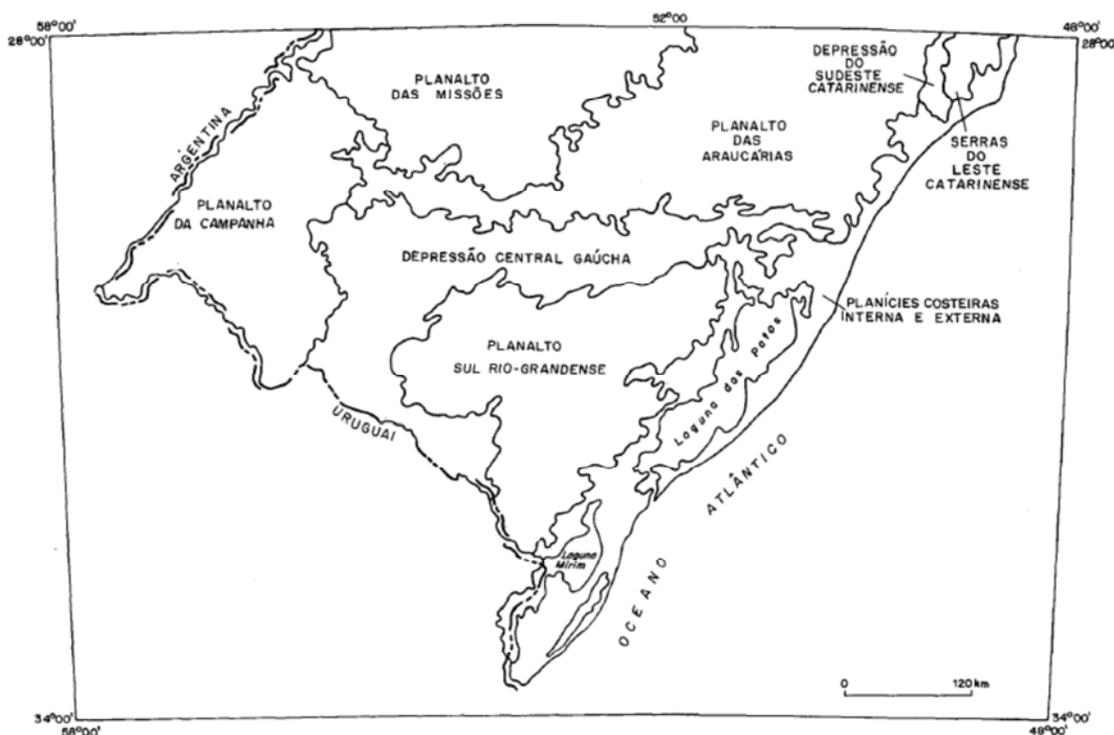
Para elucidar as fases de desenvolvimento do projeto, estimar o tempo de trabalho necessário para cada tarefa e evitar má divisão das tarefas ao longo do ano, foi desenvolvido um fluxograma projetual (Fig. 4).



**Figura 4.** Fluxograma projetual elucidando as etapas do projeto.

## 2 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

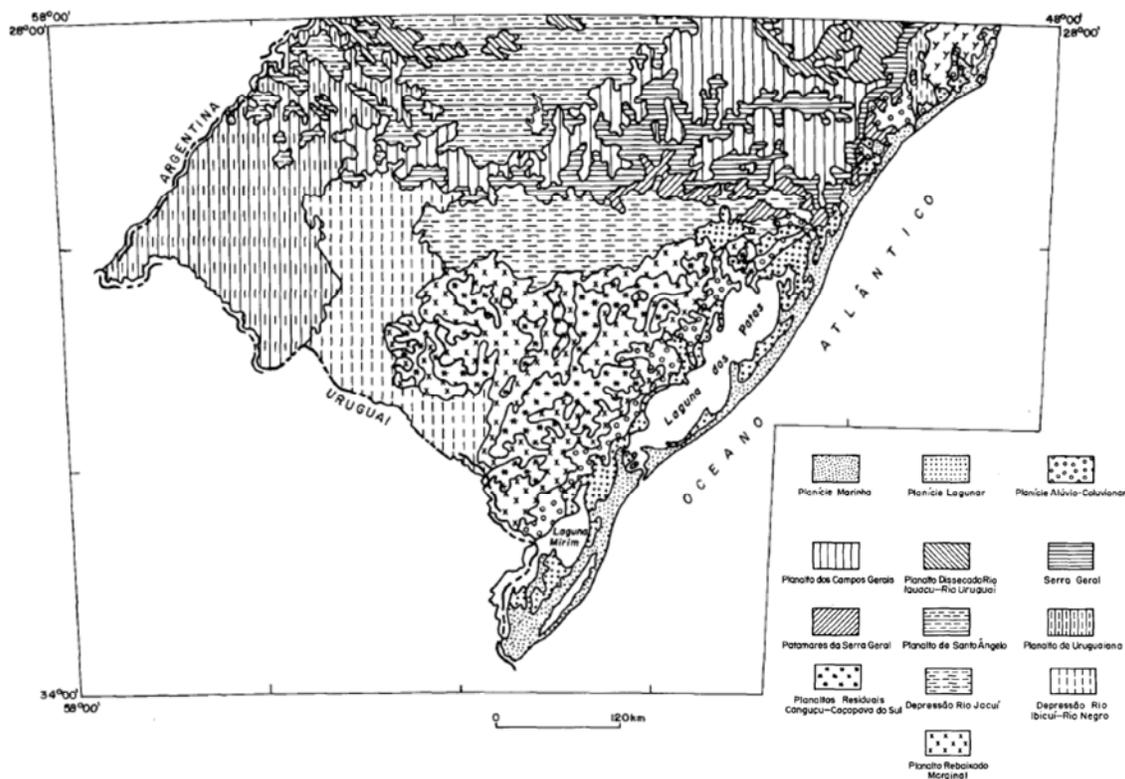
De acordo com o mapa de Regiões Geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul (Fig. 5) (RADAMBRASIL, 1986), a área estudada situa-se dentro da região geomorfológica denominada Planalto das Araucárias. As características geomorfológicas dessa região são bastante heterogêneas, com formas de relevo que variam desde amplas e aplainadas até níveis mais profundos de entalhamento na área dos Aparados da Serra.



**Figura 5.** Mapa de Regiões Geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul (modificado de RADAMBRASIL, 1986).

As formas de relevo do Planalto das Araucárias foram esculpidas em rochas efusivas ácidas da Formação Serra Geral. Em algumas áreas restritas os modelados de dissecação se desenvolvem em rochas efusivas básicas, resultando em relevos mais dissecados.

Alguns rios importantes atravessam essa região geomorfológica, como o rio Pelotas e os pertencentes à bacia de drenagem do rio Jacuí (rio Taquari, rio das Antas, rio Caí e rio dos Sinos).



**Figura 6.** Mapa de Unidades Geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul (modificado de RADAMBRASIL, 1986).

Nessa região são identificadas quatro unidades geomorfológicas (Fig. 6): Planalto Dissecado Rio Iguaçú-Rio Uruguai, Serra Geral, Patamares da Serra Geral e Planalto dos Campos Gerais, onde está inserida a área de estudo. O Planalto dos Campos Gerais caracteriza-se a oeste por um relevo relativamente plano e conservado. Desenvolveram-se por extensas áreas interfluviais dos rios Caí e das Antas e deste com o rio Pelotas. As formas de relevo revelam a existência de etapas evolutivas de dissecção, com áreas bastante conservadas de morfologia planar, outras onde a erosão alargou vales, ocasionando muitas vezes, rupturas de declive de pequenos desníveis, e em outras a erosão alargou os extensos vales, deixando resíduos de antigas superfícies de aplainamento.

A leste essa unidade caracteriza-se por formas de relevo de dissecção diferencial, profundos entalhamentos fluviais encaixados em linhas estruturais. A área de Caxias do Sul possui formas de relevo mais conservadas, remanescentes de superfície de aplainamento antiga retocada por processos erosivos atuantes na área, em meio a relevos dissecados.

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área estudada situa-se na porção sudeste da Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná é uma grande bacia intracratônica, desenvolvida sobre crosta continental sendo preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas. Segundo Nardy, Machado e Oliveira (2008) durante o Mesozóico, o supercontinente Gondwana foi palco de intensa atividade magmática fissural, resultando extensos derrames em certas regiões desse continente. Posteriormente, por meio de processos distensivos da litosfera deu-se a separação continental, com o aparecimento de novas bacias oceânicas.

Destacam-se o surgimento das Províncias Magmáticas do Karoo (sul da África) e a de Ferrar (abrangendo os continentes da Antártica, Tasmânia, e Austrália), cujos magmatismos jurássicos precederam à formação do Oceano Índico. Já as províncias cretácicas do Paraná (América do Sul) e do Etendeka (África) antecederam a formação da porção sul do Oceano Atlântico (NARDY; MACHADO; OLIVEIRA, 2008).

O maior volume de derrames da Província do Paraná-Etendeka constitui a Formação Serra Geral, que cobre praticamente toda a região meridional do Brasil, as áreas oriental do Paraguai e ocidental do Uruguai (conhecida como Formação Arapey), e a do norte da Argentina (conhecida como Membro Posadas da Formação Curuzú Cuatiá) (NARDY; MACHADO; OLIVEIRA, 2008).

A área de exposição da Formação Serra Geral no Brasil é de 120.000 km<sup>2</sup>, 1.700.000 km<sup>2</sup> em área total, e ocorre na região centro-sul, recobrando aproximadamente 75% dos constituintes sedimentares da Bacia do Paraná. Apresenta uma feição alongada com cerca de 1.700 km de extensão na direção nordeste-sudoeste e 900 km na direção leste-oeste. A espessura máxima do pacote vulcânico atinge aproximadamente 1.500 metros superposto aos arenitos eólicos jurássicos da Formação Botucatu (ROISENBERG; VIERO, 2000).

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral possuem propriedades geoquímicas regionais distintas, o que permite uma divisão em três setores (ROISENBERG; VIERO, 2000):

- a) O setor norte é representado por rochas vulcânicas básicas do tipo alto-TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>>0,3%, subordinadamente por intermediárias e ácidas.
- b) Na porção central ocorrem rochas efusivas básicas alto- e baixo-TiO<sub>2</sub> e basaltos transicionais. São registradas também intercalações com derrames ácidos.
- c) O setor sul é caracterizado por efusivas básicas do tipo baixo-TiO<sub>2</sub>. Ocorrem também derrames ácidos e em menor abundância derrames intermediários.

As idades das rochas vulcânicas da província, obtidas por meio de datações  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , revelam que o pico de atividade ígnea ocorreu num curto período, entre 133 e 130 Ma (RENNE *et al.*, 1996; TURNER *et al.*, 1994). As idades das rochas vulcânicas na porção sul da Bacia do Paraná situam-se entre 131,4±1,6 e 132,9 Ma (RENNE *et al.*, 1992, apud NARDY; MACHADO; OLIVEIRA, 2008)<sup>2</sup> enquanto que as das regiões norte e central entre 129,9±0,1 Ma e 131,9±0,9 Ma (RENNE *et al.*, 1992, apud NARDY; MACHADO; OLIVEIRA, 2008)<sup>3</sup>.

No município de Caxias do Sul, afloram rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu, bem como depósitos recentes de tálus e colúvios.

Baseados em estudos geoquímicos, as vulcânicas ácidas desta região foram classificadas como do tipo Palmas, sendo estas predominantes na região do município de Caxias do Sul e, as básicas, como do tipo Gramado (BELLIENI *et al.*, 1986; PEATE *et al.*, 1992).

Segundo Nardy *et al.* (2008), estudos preliminares de Bellieni *et al.* (1986), Peate *et al.* (1992) e Garland *et al.* (1995) sobre a geoquímica das rochas ácidas do tipo Palmas revelaram que elas não são homogêneas. Puderam-se reconhecer dois grandes grupos: (a) um deles, com baixo teor em Ti ( $\text{TiO}_2 \leq 0,87\%$ ), é formado por dois subtipos distintos, denominados Santa Maria ( $\text{P}_2\text{O}_5 \leq 0,21\%$ ) e Clevelândia ( $0,21\% < \text{P}_2\text{O}_5 \leq 0,23\%$ ); (b) o outro grupo, com alto teor em Ti ( $\text{TiO}_2 \geq 0,90\%$ ), é representado por três subtipos denominados Caxias do Sul ( $0,91\% < \text{TiO}_2 < 1,03\%$  e  $0,25\% < \text{P}_2\text{O}_5 < 0,28\%$ ), Anita Garibaldi ( $1,06\% < \text{TiO}_2 < 1,25\%$  e  $0,32\% < \text{P}_2\text{O}_5 < 0,36\%$ ) e Jacuí ( $1,05\% < \text{TiO}_2 < 1,16\%$  e  $0,28\% < \text{P}_2\text{O}_5 < 0,31\%$ ). O subtipo Caxias do Sul foi inicialmente reconhecido por Peate *et al.* (1992) e recobre uma área total de 16.000 km<sup>2</sup> e ocupa um volume de 4.832 km<sup>3</sup>.

A análise estrutural realizada por Reginato (2003) identificou a presença de fraturas, zonas de fraturas, fraturas com preenchimento, veios e diques na região de Caxias do Sul. Segundo Reginato *op. cit.* na região ocorre um padrão aproximadamente ortogonal de fraturas com uma orientação próxima a Norte-Sul e Leste-Oeste. Os veios e diques estariam alojados em estruturas que diferem do padrão ortogonal, o que corresponderia, provavelmente, a planos de cisalhamento.

---

<sup>2</sup> Renne P., Ernesto M., Pacca I.G., Coe R.S., Glen J.M., Prevót M., Perrin M. 1992: The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic- Cretaceous Boundary. *Science*, 258:975-979.

<sup>3</sup> Renne P., Ernesto M., Pacca I.G., Nardy A.J.R., Coe R.S., Glen J.M., Prevót M., Perrin M. 1992. Age and Duration of Paraná Flood Volcanism in Brazil. *EOS-AGU*, 27:531-532.

Bressani, Flores e Nunes (2005) compartimentaram a área urbana do município em 2 setores, dividindo-os internamente em 8 unidades morfoestruturais. Analisando qualitativamente as formas do relevo e as características do solo de cada unidade puderam avaliar a variação morfológica que ocorre na área estudada. As formas de relevo identificadas foram: Planalto não dissecado, Planalto rebaixado, Mesas dissecadas e Relevo densamente dissecado. Os lineamentos são abundantes nas unidades denominadas como: Matheo Gianella-Ana Rech, São Victor, Nossa Sra. da Conceição e Galópolis.

Com resultados de campo realizado por Bressani, Flores e Nunes (2005) podem-se definir as litologias que ocorrem no município de Caxias do Sul (Fig. 7), sendo a sequência vulcânica, da base para o topo, a seguinte:

- a)** Dacitos Galópolis: originalmente 2 derrames que ocorrem de forma bem característica na região de Galópolis, foram unificados em uma só unidade devido à declividade do local, o que proporciona uma proximidade em planta baixa, e semelhança de comportamento dos solos plásticos derivados.
- b)** Dacito Canyon: este material tem grande importância por ser altamente alterável e ocorrer em algumas áreas da cidade. Caracteriza-se pelo predomínio de estruturas de fluxo verticalizadas e granulação fina, o que favorece o desenvolvimento de um solo espesso. Seus afloramentos mais importantes e característicos são no bairro Canyon (no entorno da cota 700 m), junto à entrada do Bairro Santa Corona (cota 680 m) e nos vales ao sul da cidade (em direção a Galópolis e também ao sul do Desvio Rizzo).
- c)** Dacito Caxias (muitas vezes localmente denominado Carijó): é o de maior abrangência na região, ocupando a parte central da cidade e grande parte da área ao sul do centro. Geralmente encontra-se desde a cota 700 m até o contato com o Dacito Ana Rech (variável).
- d)** Topo do Dacito Caxias: este material se constitui da porção de topo do derrame anterior mas apresenta características vítreas tão importantes que poderia ser identificado como Vitrófito Forqueta. Sua presença mais característica é na região administrativa de Forqueta, mas ocupa diversas áreas mais planificadas da cidade que são topos de erosão como a região do aeroporto. Devido à origem, as cotas de ocorrência acompanham as do Dacito Caxias.
- e)** Dacito Ana Rech: encontra-se na região administrativa de Ana Rech e grande parte da área norte do cidade, geralmente nas cotas superiores na região (podendo atingir cota 900 m).

No mesmo trabalho foi realizado um mapeamento dos materiais geotécnicos. Foram identificados os seguintes solos derivados das rochas acima descritas:

- a) Solo Ana Rech: solos não-plásticos, de cor bruno-amarelado, originados do Dacito Ana Rech. Incluem horizontes B incipientes e solos saprolíticos.
- b) Solo Forqueta: solos plásticos, vermelhos com bandas de alteração, originados, na sua maioria, da porção superior vítrea do Dacito Caxias.
- c) Solo Caxias: solos saprolíticos pouco ou não-plásticos, cinza a levemente avermelhados, com estruturas estratificadas horizontais geralmente bem visíveis, originados da alteração da porção mediana do Dacito Caxias.
- d) Solo Canyon: solos plásticos a muito plásticos, vermelhos a bruno-avermelhados, podendo conter argilas expansivas, originados da decomposição da espessa porção superior vítrea do Dacito Canyon.
- e) Solos Galópolis: solos plásticos originados dos Dacitos Galópolis. Devido à declividade das zonas de ocorrência, encontram-se geralmente misturados com materiais transportados de cotas superiores. Em planta baixa observa-se a presença de solos do horizonte B e solos saprolíticos em grande proximidade com depósitos de colúvios.

P E R Í O D O	I D A D E Ma	UNIDADE LITOES- TRATIGRA- FICA	ROCHAS		ESPESSURA	SOLOS
			T I P O			
C R E T Á C E O  I N F.	128	FORMAÇÃO SERRA GERAL	T I P O  C A X I A S	DACITO ANA RECH	80m	ANA RECH
				DACITO CAXIAS/ CARIJÓ	170m	FORQUETA CAXIAS/CAR
				DACITO CANYON	70m	CANYON
				DACITO GALÓPOLIS	70m	GALOPOLIS
			BASALTOS E ANDESIBASALTOS TIPO GRAMADO		450m	
JURÁS- SICO	138	FORMAÇÃO BOTUCATU	ARENITOS EÓLICOS		160	

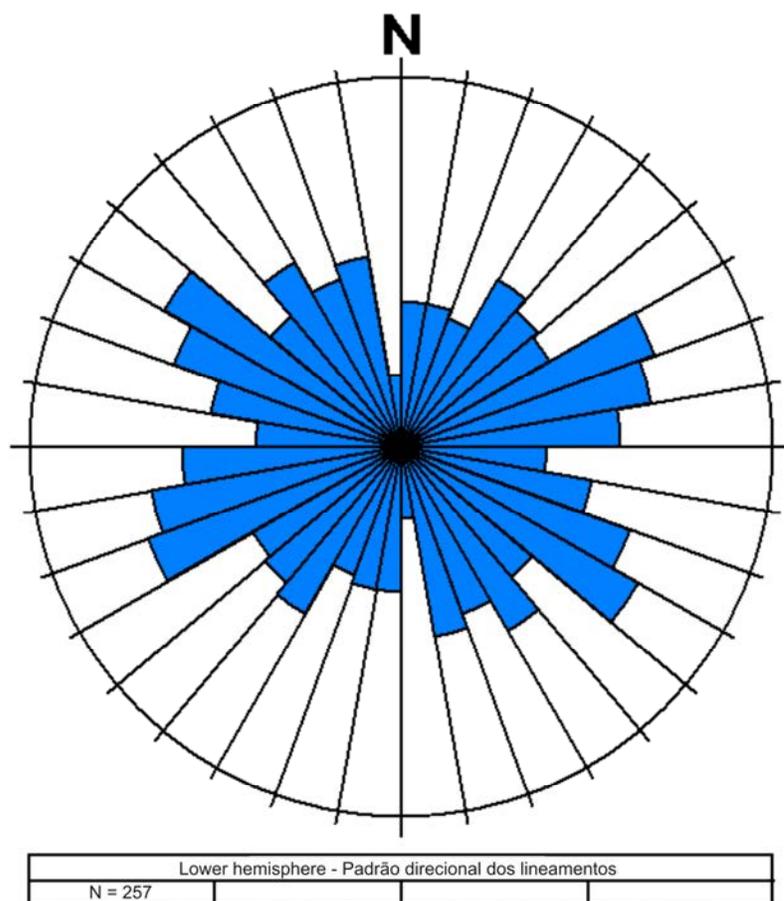
**Figura 7.** Coluna do arcabouço geológico do município de Caxias do Sul, com indicação da espessura de cada unidade vulcânica e os respectivos solos derivados da alteração destas rochas (Extraído de BRESSANI; FLORES; NUNES, 2005).

Segundo Nunes (2004), os solos encontrados tiveram características que permitiram agrupá-los em duas classificações: solos plásticos e não-plásticos. Esses solos foram

separados em dois materiais: Material Geotécnico 1 e Material Geotécnico 2, cada um representado uma das classificações, respectivamente.

#### 4 ANÁLISE ESTRUTURAL

Realizou-se uma análise estrutural dos lineamentos da área urbana de Caxias do Sul com base nas fotografias aéreas na escala 1:30.000 e 1:110.000. Esses lineamentos foram traçados durante a etapa de fotointerpretação. A figura 8 traz o diagrama de rosetas obtido a partir desses lineamentos. Nessa figura pode ser observada a ocorrência de lineamentos em diversas direções, ocorrendo um pequeno predomínio dos lineamentos do quadrante nordeste, com valores predominantes no intervalo N 60° - 80° E, e os lineamentos do quadrante noroeste com valores predominantes no intervalo N 50° - 70° W.



**Figura 8.** Diagrama de Rosetas dos lineamentos da área urbana de Caxias do Sul.

## 5 PEDOLOGIA

A formação de um solo inicia-se com o intemperismo, físico e químico, que atuam sobre a rocha originando um material residual não-consolidado conhecido por regolito saprolítico, que forma o substrato pedogenético. Este material pode permanecer *in situ* (residual ou autóctone) ou ser transportado (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

O substrato pedológico **residual** ou **autóctone** é formado diretamente no local em que ocorre a desagregação da rocha que está abaixo do perfil de solo. O substrato pedológico **transportado** ou **alóctone** recebe denominações distintas conforme o agente de transporte: coluvionar (gravidade), aluvionar (águas correntes), glacial (geleiras) e eólico (vento).

Para a pedologia os solos são denominados conforme o seu processo pedogenético (processo de formação), não considerando as características geotécnicas de comportamento dos materiais.

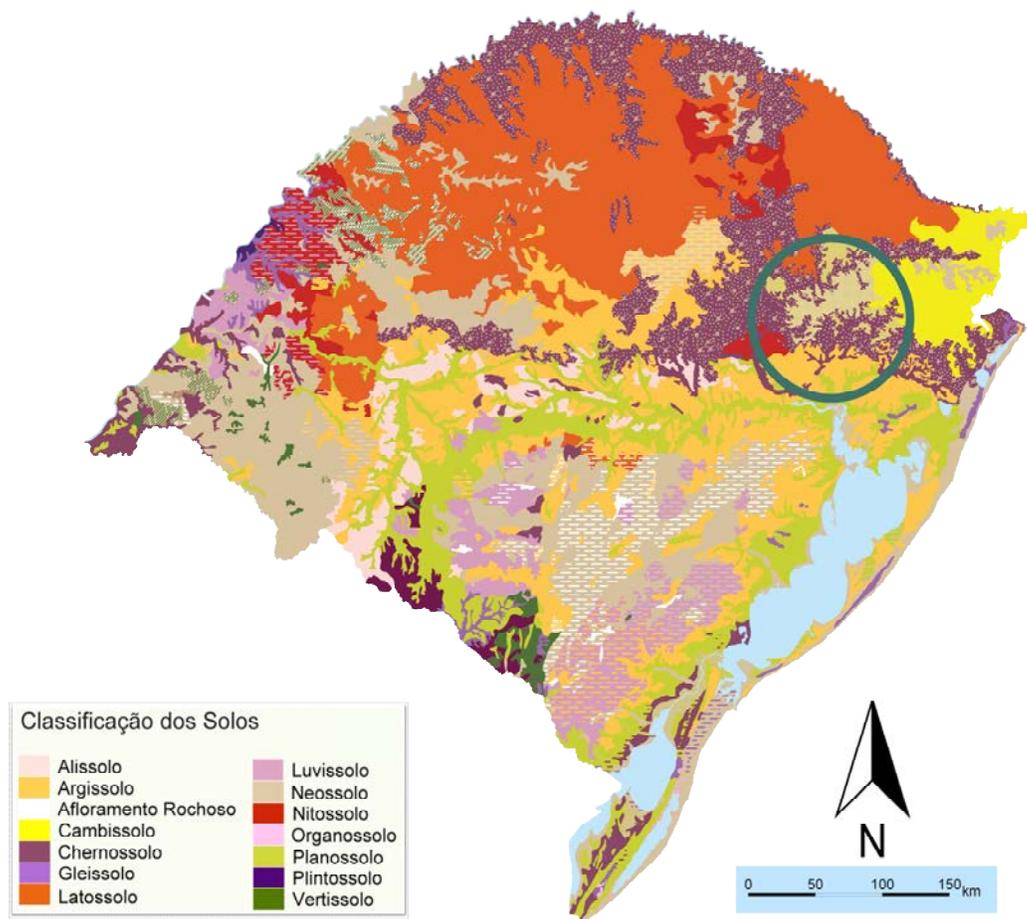
Segundo Streck *et al.* (2008), na região onde está inserido o município de Caxias do Sul, ocorrem solos pertencentes a três classes: Argissolos, Cambissolos e Neossolos.

Os Argissolos são normalmente profundos a muito profundos, apresentando um perfil A-Bt-C ou A-E-Bt-C, sendo o horizonte Bt do tipo B textural (horizonte que apresenta um incremento de argila em relação aos horizontes A ou E) (STRECK *et al.*, 2008).

Os Cambissolos são rasos a profundos, possuindo no perfil uma sequência de horizontes A-Bi-C ou O-A-Bi-C, sendo Bi do tipo B incipiente (horizonte B em formação com fragmentos de rocha < 50% do volume e cor e estruturas diferentes dos horizontes A e C) (STRECK *et al.*, 2008).

Os Neossolos são solos rasos ou profundos, pouco desenvolvidos. Tem no perfil uma sequência de horizontes A-R, A-C, A-C-R, A-Cr-R, O-R ou H-C.

Na figura 9 estão indicados os solos que ocorrem no Rio Grande do Sul e a região do município de Caxias do Sul encontra-se dentro do círculo verde.



**Figura 9.** Mapa indicando os solos que ocorrem na área de estudo (modificado de EMATER/DIT-UFRGS/DEP. SOLOS).

## 6 METODOLOGIA

Para a obtenção de bons resultados em trabalhos de pesquisa são necessários investimentos em várias técnicas que visam uma maior confiabilidade nos resultados. Nesse projeto, a metodologia definida para a sua execução é detalhada abaixo:

### 6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

O primeiro passo para a formulação do projeto foi a leitura de dois trabalhos de mapeamento geológico-geotécnico realizados em Caxias do Sul:

- Nunes (2004) realizou o trabalho de conclusão do curso de geologia do Instituto de Geociências – UFRGS, intitulado Mapeamento geotécnico preliminar da área urbana de Caxias do Sul, RS. Este foi o primeiro trabalho que tratou do assunto, identificando os diferentes solos encontrados e, por apresentarem características geotécnicas similares, agrupando-os em duas classificações: solos plásticos e não-plásticos. Esses solos foram separados em dois materiais: Material Geotécnico 1 e Material Geotécnico 2, cada um representado uma das classificações, respectivamente.

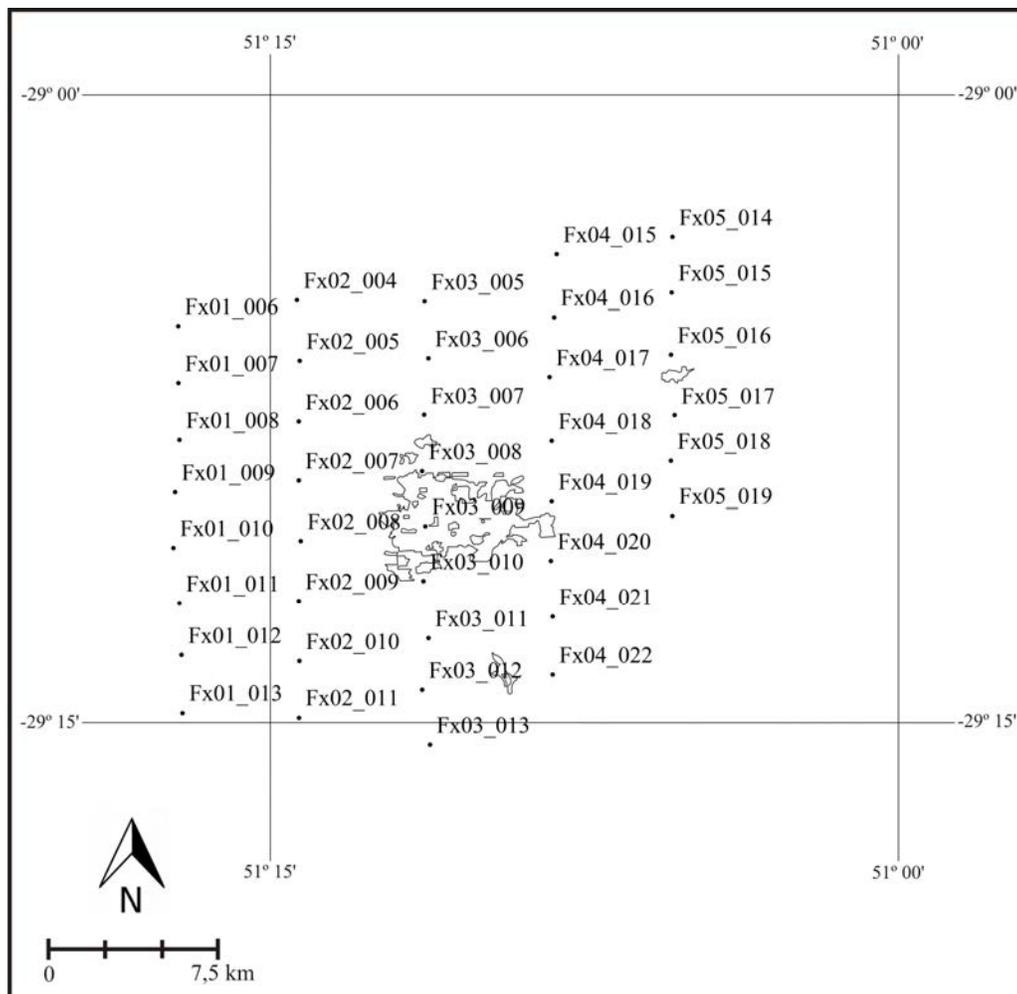
- Bressani, Flores e Nunes (2005) produziram um Relatório final para a Prefeitura Municipal de Caxias do Sul referente ao trabalho iniciado por Nunes (2004). Neste relatório, foram definidas as litologias que ocorrem no município de Caxias do Sul, sendo a sequência vulcânica, da base para o topo, a seguinte: Dacitos Galópolis, Dacito Canyon, Dacito Caxias, topo do Dacito Caxias e Dacito Ana Rech. Realizaram um mapeamento dos materiais geotécnicos, identificando os seguintes solos derivados das rochas acima citadas: solo Ana Rech, solo Forqueta, solo Caxias/Carijó, solo Canyon e solos Galópolis. Artigos também foram consultados para o melhor entendimento de alguns aspectos específicos sobre a geologia da região onde se encontra Caxias do Sul.

O material disponível para a realização desse estudo contou, além das bibliografias citadas, com duas cartas topográficas em papel na escala 1:50.000 – folhas Caxias do Sul (SH. 22-V-D-III-2) e Farroupilha (SH. 22-V-D-III-1) – cedidas pela 1ª DL; 1 Mapa Básico Geológico-Geotécnico da Área Urbana do Município de Caxias do Sul, de setembro de 2005, na escala 1:25.000, digital; 4 fotos aéreas na escala 1:110.000 resultantes de um voo de maio de 1975; 39 fotos aéreas na escala 1:30.000, resultantes de um voo de maio de 1998.

## 6.2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS

A técnica de interpretação de fotografias aéreas é de fundamental importância para trabalhos de mapeamento geológico-geotécnico, por ser um método relativamente barato, além de permitir um estudo das áreas de difícil acesso. Os estudos de fotografias aéreas inicialmente se caracterizam pela identificação de elementos da imagem (fotoleitura), análise de suas relações (fotoanálise) para finalmente chegar-se a avaliação do significado e função dos fatos constatados (fotointerpretação) através de métodos indutivos, dedutivos e comparativos dos mesmos. Quando o estudo de aerofotointerpretação envolve um número relativamente grande de fotografias, é necessário antes de iniciá-lo, elaborar-se uma carta de referência das fotos a serem utilizadas. Esta carta de referência constitui-se no Mapa Índice (Fig. 10).

Na análise de fotografias em geologia são importantes os padrões ou critérios de foto interpretação, os quais devem ser interrelacionados. São eles: formas fisiográficas, tonalidades, formas de erosão, cobertura vegetal entre outros. A interpretação das fotografias ocorre ao formarmos estereoscopia, que é obtida utilizando-se um equipamento adequado, o estereoscópio. Esse equipamento permite o recobrimento entre duas fotografias aéreas verticais sucessivas, que, quando corretamente orientadas, apresentam a ideia de relevo apenas naquela área que é comum as duas fotografias justapostas lateralmente.



**Figura 10.** Mapa Índice das fotografias aéreas na escala 1:30.000 da área urbana de Caxias do Sul.

Com esta técnica identificaram-se os lineamentos de pequeno e médio porte que ocorrem em toda região do município de Caxias do Sul, sendo esses lineamentos, vales e escarpas. Por convenção os lineamentos de médio porte são denominados como sendo falhas e os lineamentos de pequeno porte como fraturas.

Foram utilizadas primeiramente 4 fotografias com escala 1:110.000, que permitem a identificação dos lineamentos de médio porte. Em seguida realizou-se a foto interpretação das fotografias com escala 1:30.000, que permitiram a identificação dos lineamentos de pequeno porte. Também foram traçados os contatos entre os solos identificados para a confecção de um mapa geológico-geotécnico.

### 6.3 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Depois de realizar a interpretação das fotografias aéreas ocorreu a etapa de campo. Foram duas inspeções, a primeira em maio de 2011 e a segunda em agosto, totalizando 5 dias de campo. No mapeamento procurou-se cobrir toda a área para onde o limite urbano do município foi ampliado. Para o deslocamento até Caxias do Sul e dentro da cidade foi utilizado um veículo e motorista da Ufrgs na primeira inspeção e um veículo cedido pela prefeitura de Caxias do Sul na segunda.

No campo realizaram-se pequenos perfis procurando afloramentos de rochas e perfis de alteração em pedreiras, taludes naturais, cortes de encostas em obras civis, leitos de arroios e valetas de estradas não pavimentadas. Foram coletadas amostras representativas de solos e rochas para estudos laboratoriais.

### 6.4 PETROGRAFIA

Nesta etapa foram descritas as rochas encontradas na área mapeada.

#### **Macroscopia**

As amostras de mão são descritas com a utilização de uma lupa de mesa. Nesta etapa é possível apenas identificar os aspectos macroscópicos da rocha, que podem ser observados a olho nu. O principal objetivo nessa etapa é escolher as amostras mais adequadas para as análises posteriores.

#### **Microscopia**

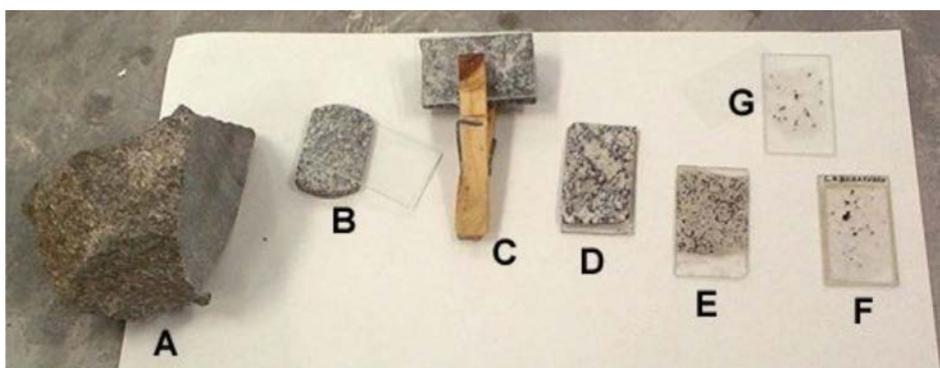
O estudo de rochas e minerais com a ajuda do microscópio petrográfico é um procedimento obrigatório para quase todos os tipos de trabalho que o geólogo desenvolve. Com este instrumento é possível observar aspectos que, devido à sua reduzida dimensão, não podem ser observados nas amostras de mão.

O microscópio petrográfico de luz transmitida possui uma fonte de luz na parte inferior do microscópio, sendo a luz conduzida por um sistema de lentes que, atravessando a amostra de rocha, permite que esta seja observada. A imagem resultante deste processo é ampliada por

um sistema de objetivas e oculares. Desta forma são observadas as características das rochas e minerais quando estes são atravessados pela luz.

Para os microscópios de luz transmitida a lâmina de rocha não pode ultrapassar os 0,03 mm, pois só assim se garante a transparência necessária à para as observações em lâmina.

A amostra é sujeita a várias fases de confecção de uma lâmina para atingirem as condições ideais para a microscopia. Na figura 11 estão representadas estas fases de confecção da lâmina petrográfica.



**Figura 11.** Fases de confecção de uma lâmina (Fonte: <http://www.dct.uminho.pt/rpmic/interactividade/index.html>).

**A** - Amostra de mão de onde foi cortada uma esquírola.

**B** - Esquírola de rocha (cerca de 0,5 cm de espessura) e lâmina de vidro onde vai ser colada a esquírola.

**C** - Colagem da esquírola à lâmina de vidro.

**D** - Amostra já colada na lâmina de vidro.

**E** - Amostra já depois de ser desgastada.

**F** - Lâmina delgada já finalizada, depois de polida e com lamela de vidro já colada.

**G** - Lâmina polida já finalizada.

## 6.5 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A radiação eletromagnética é um conjunto de campos elétricos e magnéticos oscilatórios que se propagam no espaço com velocidade da luz (300.000 km/s). Os raios X

são radiações eletromagnéticas, com comprimentos de ondas de 0,1-100 Å, podendo sofrer difração em planos cristalinos. Compreendem um segmento do espectro de radiação com propriedades específicas, como: penetram meios não transparentes à luz visível e interagem com a matéria de forma diferenciada. Os raios X também se comportam como pequenas partículas (dualidade onda-partícula), que contém uma quantidade precisa de energia, 0.1-100 keV, denominadas de fótons.

Na Fluorescência de Raios X a amostra é irradiada com um feixe de raios X provenientes do tubo de raios X, excitando os elementos presentes na amostra pela absorção do feixe primário e provocando a emissão de suas próprias linhas características de fluorescência de raios X (HOLLER; SKOONG; CROUCH, 2009).

Essa irradiação interfere em toda a eletrosfera, desencadeando um fenômeno importante para espectrometria de Fluorescência de Raios X que é a reorganização da eletrosfera depois de os fótons de raios X incidentes terem arrancado um elétron da camada mais interna. O espaço anteriormente ocupado pelo elétron interno é preenchido por um elétron de camadas mais externas da eletrosfera, sobrando uma quantidade de energia que é ejetada do átomo na forma de um fóton de raios X com energia característica daquele elemento. O número de fótons característicos ejetados é proporcional à concentração daquele elemento na amostra.

A fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva, adequada para determinações rápidas e quantitativas de todos os elementos, exceto os mais leves. Pode ser utilizada para a identificação qualitativa de elementos que possuem número atômico maior do que o oxigênio e para análises quantitativas e semiquantitativas (HOLLER; SKOONG; CROUCH, 2009). A sensibilidade de análise abrange desde concentrações maiores até traços (aproximadamente 1 ppm).

Os elementos de número atômico entre 15 (P) e 40 (Zr) possuem limites de sensibilidade mais baixos, podendo ser detectados em concentrações inferiores a 10 ppm. Já os elementos de número atômico acima de 40 e abaixo de 15 têm menor sensibilidade que os demais elementos (DUTRA, 1984).

Na Fluorescência de Raios X utilizam-se os chamados “raios X duros”, que são oriundos de elementos pesados (número atômico alto ou Z grande). Os fótons provenientes da reposição de um elétron interno de um átomo pesado por um elétron mais externo têm energias muito altas. Esses raios X não são absorvidos pelo ar, e são detectados por contadores de cintilações depois de serem difratados em cristais.

Os raios X fluorescentes provenientes da amostra contém radiação de diversos comprimentos de onda, correspondentes aos fótons das diversas transições eletrônicas que ocorrem nos diferentes tipos de átomos contidos na amostra. Para poder distinguir as diferentes energias e poder colocar as intensidades correspondentes a cada energia em um gráfico (espectro), é necessário provocar uma dispersão no feixe de elétrons. A dispersão ocorre através de um fenômeno chamado “Difração de Raios X” em um cristal analisador.

Quando um feixe incide sobre um cristal ocorre difração de raios X. O feixe é “refletido” pelo cristal quando os comprimentos de onda e o ângulo de incidência obedecem a uma determinada relação com os espaçamentos interplanares deste cristal. Este fenômeno está formulado na “Lei de Bragg”, que se enuncia matematicamente como  $2d \sin\theta = n\lambda$ , onde  $d$  é o espaçamento interplanar do cristal,  $\theta$  é o ângulo de incidência do feixe,  $n$  é um número inteiro e  $\lambda$  é o comprimento de onda deste determinado fóton.

Na espectrometria de Fluorescência de Raios X o fenômeno da difração é utilizado para dispersar os feixes de raios X por intermédio de cristais analisadores de distância interplanar conhecida.

O equipamento de Fluorescência de Raios X consiste basicamente de um dispositivo de excitação de amostra e de um dispositivo que analisa a resposta da amostra a esta excitação. Na Fluorescência de Raios X a excitação origina-se de um tubo de raios X, que fornece os fótons de alta energia que produzem o fenômeno de fluorescência dos raios X. A análise é feita por um espectrômetro de dispersão em comprimento de onda, composto por um conjunto cristal + detector montados em um goniômetro do tipo  $\theta$ - $2\theta$ .

Os raios X produzidos na fluorescência são gerados pelos átomos que se encontram na superfície da amostra e logo abaixo dela. Essa condição exige que as radiações incidentes e resultantes atravessem uma camada significativa da amostra podendo provocar um desvio da intensidade esperada de radiação (HOLLER; SKOONG; CROUCH, 2009).

As maiores causas para o aparecimento de um efeito matriz são: as diferentes profundidades de excitação, devido ao número atômico médio ( $Z$ ); a absorção ( $A$ ) pelos elementos da matriz e o reforço de alguns elementos. A mineralogia e o tamanho dos grãos afetam principalmente a quantificação de elementos leves.

Para compensar os problemas do efeito de matriz, é preciso calibrar o equipamento com um conjunto de padrões (*standard material*). Utilizam-se padrões de rocha que tem sua composição bem determinada, tanto os óxidos maiores como os elementos traço. Isso permite determinar os coeficientes de correção de matriz para cada tipo de rocha e aplicar a correção para as amostras desconhecidas.

As condições de análise das rochas devem seguir um protocolo de preparação das amostras idêntico ao utilizado na preparação dos padrões. As rochas devem ser moídas para a mesma finura, prensadas com a mesma quantidade de cera espectroscópica ou transformadas em pastilhas vítreas com a mesma proporção de tetraborato de lítio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Estes métodos são utilizados para análise de traços e maiores respectivamente.

Em seguida devem ser determinadas as condições analíticas, obtendo-se um espectro da região da emissão dos raios X característicos do elemento de interesse e escolhem-se os pontos de leitura do *background*.

Escolhidas as condições de análise de cada elemento faz-se a leitura do pico e dos dois pontos de *background* de cada elemento para obter a intensidade resultante segundo a equação:

$$I_{\text{resultante}} = I_{\text{pico}} - I_{\text{background}}.$$

A partir das intensidades de todos os elementos e de todos os padrões calculam-se as correções de matriz. Depois desse procedimento, as intensidades dos picos de cada elemento dos diferentes padrões formam uma reta de calibração quando graficadas contra os teores desses elementos nos padrões.

Para a análise de elementos leves (maiores), os seguintes passos devem ser seguidos:

- Pesagem analítica de padrões e amostras;
- Fusão com  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (7:1 fundente: amostra) e obtenção das pastilhas vítreas de padrões e amostras;
- Calibração com padrões vítreos;
- Cálculo dos coeficientes de interferência entre os óxidos maiores dos padrões (concentração conhecida);
- Leitura das amostras desconhecidas;
- Cálculo iterativo das concentrações conforme os coeficientes calculados para os padrões, até convergência dos valores.

Para a análise de elementos pesados (traços), os seguintes passos devem ser seguidos:

- Pesagem analítica de padrões e amostras;
- Prensagem de 10g de amostra com 1g de cera;
- Calibração com padrões prensados;
- Cálculo da correção de matriz para os padrões, através da altura do background e obtenção da curva de calibração  $(I_p - I_{bg})/I_{bg} = a C$ ;
- Leitura das amostras desconhecidas;
- Correção da matriz pela intensidade do background;

- Interpolação do valor obtido na curva de calibração.

As análises foram realizadas pelo Laboratório Acme Labs Analytical Laboratories Ltda., filial em Goiânia. As amostras de rocha foram previamente cominuídas ao tamanho < 200 mesh no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS.

## 6.6 DIFRATOMETRIA POR RAIOS X

A difração de raios X é um método que permite a identificação qualitativa de compostos cristalinos. Este método é o único, dentre os analíticos, capaz de fornecer informações qualitativas e quantitativas sobre os compostos presentes em uma amostra sólida (HOLLER; SKOONG; CROUCH, 2009).

Os raios X podem se originar de transições eletrônicas na eletrosfera dos átomos (radiação característica), ou da frenagem de cargas (elétrons ou íons) com alta velocidade (radiação contínua de frenagem “*Bremsstrahlung*”).

Para os estudos analíticos de difração a amostra deve ser cominuída (grãos ~ 15 mm, corresponde a uma peneira de *sieve mesh* 1000) e os grãos devem ficar dispostos aleatoriamente no plano de foco do difratômetro. Assim, um número grande de cristais é orientado em todas as possíveis direções, permitindo que quando um feixe de raios X passa através do material um número significativo de partículas são orientadas de maneira a preencher as condições da Lei de Bragg para a reflexão de cada espaço interplanar possível (HOLLER; SKOONG; CROUCH, 2009).

A difração ocorre apenas quando a diferença entre o caminho óptico dos raios refletidos for um número inteiro de comprimentos de onda, de modo que as ondas, ao se sobreporem na saída, estejam perfeitamente em fase e sofram apenas interferência construtiva. Só contribuem para a difração dos raios X os planos cristalográficos paralelos ao plano de foco do difratômetro (normalmente coincidente com a superfície da amostra).

A identificação das fases cristalinas presentes na amostra é feita a partir da comparação dos picos observados no difratograma gerado com um banco de dados, denominado “*Powder Diffraction File*”, coletado pelo comitê internacional de espectrometria de difração de pó (*International Centre for Diffraction Data - ICDD*).

Esse banco de dados consiste de fichas, que contém diversas informações sobre o mineral, como as distâncias interplanares da fase, a simetria do cristal, a composição química, a intensidade relativa dos picos referentes a diferentes famílias de planos, etc.

Alguns fatores podem influenciar na identificação dos picos, como:

- Deformação tetragonal e ortorrômbica: sistemas cristalinos do tipo isométrico (cúbico simples, cfc, ccc e diamante) apresentam um conjunto de linhas relativamente pequeno no difratograma. Sistemas cristalinos com simetria menor apresentam dubletos e tripletos no difratograma;
- Alargamento de pico: a largura dos picos no difratograma está relacionada com o grau de cristalinidade da amostra. Quanto maior o número de defeitos do cristal, maior será o alargamento dos picos. Outro fator que contribui é a moagem excessiva (grão ~ 1 mm). Materiais sujeitos a stress deformante (não isostático) apresentam também variações nas distâncias interplanares: para menos (compressão) ou para mais (distensão), em torno da distância média das regiões não deformadas;
- Deslocamento de picos: em alguns sistemas cristalinos a substituição de um elemento por outro é possível em quantidades quaisquer e a substituição provoca apenas uma alteração nos parâmetros de rede desse sistema. Nesses casos a quantidade de substituição pode ser determinada, conhecendo-se a posição dos picos dos extremos puros e interpolando os valores obtidos da amostra desconhecida nesse intervalo. A expansão de distâncias interplanares da célula unitária da amostra, devido à expansão térmica ou à inclusão de moléculas maiores em vãos de estrutura provoca o deslocamento do pico correspondente para ângulos menores, sem alterar a largura do mesmo. A compressão isostática provoca a diminuição da célula unitária, e, portanto, provoca o deslocamento dos picos para ângulos maiores;
- Texturização: é o fator que mais influi na modificação da intensidade relativa dos picos da amostra. Ocorre quando os grãos da amostra não estão aleatoriamente orientados no plano focal do difratômetro, de modo que os picos das famílias de planos estatisticamente sub-representadas ficam com intensidade menor que a prevista pela ficha.

Os raios X monocromáticos utilizados para na Difração de Raios X são gerados no interior de um tubo de raios X, junto com radiação contínua de frenagem. O tubo pode ser constituído de quartzo ou de cerâmica, evacuado, em cujo interior se encontra um filamento de tungstênio, aquecido por corrente elétrica. Entre o filamento e o anodo de cobre ou de molibdênio (ou de outro metal conveniente) se aplica uma tensão de 40-100 kV, que acelera os elétrons extraídos do filamento contra o alvo.

O detetor utilizado é composto por um cristal cintilador (NaI dopado com tálio) acoplado a uma fotomultiplicadora e uma eletrônica de contagem que detectam e contam os pulsos de luz provocados pela passagem de raios X no cintilador.

No difratômetro do tipo Bragg Brentano o feixe incidente (tubo) e o detetor se deslocam simultaneamente por um ângulo  $\theta$  (difratômetro  $\theta - \theta$ ). O tubo e o detetor são movimentados sobre um goniômetro de grande precisão angular com passos de alguns centésimos de grau. Em cada passo é determinada a intensidade do feixe difratado nesse ângulo, fazendo-se uma contagem por determinado tempo.

A radiação é K $\theta$  em tubo de Cobre nas condições de 40kV e 25mA. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro para cada tipo de análise são:

- Amostra Orientada Natural: 2s para 0,02° de degrau do goniômetro de 2° a 28° 2  $\theta$ ;
- Amostra Orientada Glicolada: 3s para 0,02° de degrau do goniômetro de 2° a 28° 2  $\theta$ ;
- Amostra Orientada Calcinação: 2s para 0,02° de degrau do goniômetro de 2° a 28° 2  $\theta$ .



**Figura 12.** Difratômetro SIEMENS D5000 com goniômetro  $\theta$ - $\theta$  do Laboratório de Difractometria de Raios X, IGeo, UFRGS (Fonte: <http://www.cpgq.ufrgs.br/arquivos/lab.htm>).

As amostras de solo foram analisadas no Laboratório de Difractometria de Raios X, IGeo, UFRGS (Fig. 12), por dois métodos: o método do pó (rocha total) e o método da separação da fração argila.

No método do pó pulveriza-se a amostra a menos de 200 mesh, para que os grãos fiquem dispostos aleatoriamente no plano de foco do difratômetro, utilizando gral e pistilo de ágata. Em seguida, a amostra é colocada em uma lâmina de vidro de centro côncavo, e então é analisada no difratômetro.

No método da separação da fração argila extrai-se a fração  $<2 \mu\text{m}$ . A amostra é colocada em um frasco com água deionizada, a qual é colocada em um orbitador durante vinte

e quatro horas para desagregar os constituintes da amostra. Em seguida, cada amostra é colocada em uma proveta com acréscimo de água deionizada, até o volume de dois litros. Deixa-se a amostra decantar por um período de tempo condizente com a temperatura da sala e com o tamanho médio das partículas que serão separadas.

Passado esse período de tempo, utiliza-se um sifão para coletar a camada superior de água da proveta em conjunto com o material que ficou em suspensão (material com o diâmetro de partícula desejado). O material em suspensão é deixado para decantar num Becker, para depois se retirar a água em excesso. Após o material é pipetado e depositado em lâmina de vidro secando em 24-48 horas. Depois deste processo tem-se a fração  $< 2 \mu\text{m}$  orientada.

Para verificar a existência ou não de argilominerais expansivos satura-se a amostra orientada natural com etileno glicol. Os resultados obtidos são denominados de difratograma de amostra orientada glicolada (G).

Para avaliar argilominerais sensíveis ao aquecimento (argilominerais do grupo das caolinitas e das esmectitas, por exemplo) a amostra orientada é aquecida a  $550^{\circ}\text{C}$  durante duas horas. Esse processo auxilia na interpretação dos resultados, sendo resultados obtidos denominados de difratograma de amostra orientada calcinada (C).

## 6.7 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Os ensaios dos materiais geotécnicos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia/UFRGS.

### 6.7.1 Análise Granulométrica

A análise da distribuição das dimensões dos grãos, denominada análise granulométrica, objetiva determinar os tamanhos dos diâmetros equivalentes das partículas sólidas em conjunto com a proporção de cada fração constituinte do solo em relação ao peso de solo seco. A representação gráfica das medidas realizadas é denominada de curva granulométrica. Pelo fato de o solo geralmente apresentar partículas com diâmetros equivalentes variando em uma ampla faixa, a curva granulométrica é normalmente apresentada em um gráfico semi-log, com o diâmetro equivalente das partículas em uma

escala logarítmica e a percentagem de partículas com diâmetro inferior à abertura da peneira considerada (percentagem que passa) em escala linear.

O ensaio de granulometria conjunta para o levantamento da curva granulométrica do solo é realizado com base em dois procedimentos distintos:

- **Sedimentação:** os solos muito finos, com granulometria inferior a 0,074mm, são tratados de forma diferenciada, através do ensaio de sedimentação desenvolvido por Arthur Casagrande. Este ensaio se baseia na Lei de Stokes, segundo a qual a velocidade de queda,  $V$ , de uma partícula esférica, em um meio viscoso infinito, é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula. Sendo assim, as menores partículas se sedimentam mais lentamente que as partículas maiores.

- **Peneiramento:** utilizado para a fração grossa do solo (grãos com até 0,074mm de diâmetro equivalente), realiza-se pela passagem do solo por peneiras padronizadas e pesagem das quantidades retidas em cada uma delas.

Os procedimentos são realizados segundo a norma técnica ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984). Para facilitar os cálculos do ensaio, massas são expressas em g, pesos são expressos em gf, mas os resultados finais são convertidos para o Sistema de Unidades Internacional.

Os equipamentos e materiais utilizados são listados a seguir:

- Jogo de peneiras, conforme a norma técnica ABNT NBR 5734 (ABNT, 1988), desde a peneira de 50mm até a peneira de 0,075mm, com fundo e tampa;
- Balança eletrônica, com capacidade de 1500g e resolução de 0,001g;
- Provetas de vidro graduadas, com capacidade de 1000ml, na temperatura de referência de 20°C, para leituras no intervalo entre 0,995 e 1,040, com resolução de 0,001;
- Termômetro graduado no intervalo entre 0°C e 60°C, com resolução de 0,1°C;
- Dispersor, conforme norma técnica ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984);
- Cronômetro;
- Aparelho de banho-maria, munido de sistemas automáticos de aquecimento e refrigeração, com controle de temperatura por microprocessador;
- Estufa para secagem, para temperaturas entre 60°C e 110°C, com controle de temperatura por microprocessador e circulação forçada de ar.
- Bandejas de alumínio para secagem do solo;
- Almofariz e mão de gral;
- Cápsulas de porcelana, cápsulas de alumínio, espátulas, funil de vidro, béquer, bisnaga com água destilada e escova.

### **Procedimento do ensaio**

1º Passo: A amostra é seca ao ar. A seguir, a amostra é destorroada com almofariz e mão de gral, cuidando para não quebrar as partículas. Separa-se aproximadamente 1,5 kg do material seco para o ensaio;

2º Passo: Passar a amostra a ser ensaiada pela peneira de 2,0 mm, desmanchando no almofariz os torrões ainda existentes. Lavar o material retido nesta peneira, secar em estufa a 110°C e pesar com resolução de 0,01 g ( $W_g$ );

3º Passo: Do material passante na peneira 2,0 mm, determinar o teor de umidade (w), selecionar cerca de 70 g de material para o ensaio por sedimentação, pesado com resolução de 0,01 g ( $W_t$ );

4º Passo: Colocar este material em um béquer e adicionar cerca de 125 ml de uma solução de água destilada com um defloculante (em geral, hexametáfosfato de sódio na concentração de 45,7 g de sal por 100 ml de solução). Homogeneizar a suspensão obtida e deixar em repouso durante pelo menos 12 horas;

5º Passo: Derramar a suspensão no copo do dispersor, removendo com a bisnaga qualquer material retido no béquer. Introduzir o conjunto de chicanas no copo, adicionar água destilada até o nível da suspensão atingir cerca de 50 mm da borda do copo e colocá-lo no suporte do dispersor. Ligar o dispersor e esperar até que a dispersão esteja completa (mínimo de 15 minutos de dispersão);

6º Passo: Colocar a suspensão na proveta graduada, removendo com a bisnaga qualquer material retido no copo. Adicionar água destilada até atingir o volume total indicado de 1000 ml;

7º Passo: Colocar a proveta contendo a suspensão em um aparelho de banho-maria, para manter constante a temperatura de 20 °C. Esperar a homogeneização da temperatura da suspensão, agitando-a regularmente;

8º Passo: Remover a proveta do aparelho de banho-maria, tampá-la e agitá-la manualmente durante 1 minuto visando obter homogeneização adequada da suspensão. Recolocar rapidamente a proveta no aparelho de banho-maria e acionar o cronômetro;

9º Passo: Colocar o densímetro lentamente na suspensão, cuidando para não agitá-la. Realizar as leituras na parte superior do menisco adjacente à haste de densímetro, com resolução de 0,002, após os intervalos de tempo de 30 segundos, 1 minuto e 2 minutos, contados a partir do acionamento do cronômetro;

10º Passo: Medir a temperatura de suspensão, com resolução de 0,1 °C. Remover o densímetro da suspensão, cuidando para não agitá-la, e deixá-lo imerso em uma proveta com água destilada, também mantida sob temperatura constante de 20 °C no aparelho banho-maria;

11º Passo: Fazer as leituras com o densímetro depois de decorridos os seguintes intervalos de tempo, contados a partir do acionamento do cronômetro: 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 20 minutos, 40 minutos, 80 minutos, 240 minutos e 1.440 minutos;

12º Passo: Após cada leitura, medir a temperatura da suspensão, com resolução de 0,1 °C. Entre as leituras, o densímetro e o termômetro são mantidos imersos na proveta auxiliar com água destilada, a qual é mantida sob temperatura constante de 20 °C no aparelho de banho-maria;

13º Passo: Após a última leitura, lavar a suspensão através de peneira de 0,075 mm, recolhendo o material passante em uma bandeja de alumínio. Simultaneamente remover com a bisnaga qualquer material retido na proveta;

14º Passo: Levar a bandeja contendo a suspensão para a secagem em estufa, sob uma temperatura constante de 110 °C. Após a secagem da suspensão, pesá-la com resolução de 0,01 g;

15º Passo: Secar o material retido na peneira de 0,075 mm em uma estufa a 110 °C e pesá-lo com resolução de 0,01 g;

16º Passo: Passar o material obtido no passo anterior pelas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, com fundo. Pesquisar o material retido em cada peneira e no fundo, com resolução de 0,01 g;

17º Passo: Passar o material retido na peneira de 2,0 mm pelas peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm. Pesquisar o material retido em cada peneira ( $W_i$ ), com resolução de 0,01 g.

### **Formulário**

#### Peneiramento

Calcular o peso de solo seco ensaiado ( $W_s$ ).

$$W_s = \left( \frac{W_t - W_g}{1 + W} \right) + W_g$$

Calcular a porcentagem de material passante nas peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm.  $\sum W_i$  é a soma dos pesos dos materiais retidos nas peneiras de abertura igual ou maior que a peneira i.

$$\%Passante_{\#i} = \left( \frac{W_s - \sum W_{\#i}}{W_s} \right) \cdot 100$$

Plotar, em gráfico semilogarítmico, a porcentagem de material passante no eixo das ordenadas (em escala natural) e a abertura de malha das peneiras no eixo das abscissas (em escala logarítmica).

Para as leituras realizadas com o densímetro, os diâmetros equivalentes das partículas em suspensão são calculados pela equação de Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{1800\mu}{\gamma_s - \gamma_w} \cdot \frac{Z}{t}}$$

Onde:

**D** - diâmetro equivalente de partícula;

**μ** - coeficiente de viscosidade cinética da água, em g seg/cm<sup>2</sup>, obtida de tabelas em função da temperatura;

**γ<sub>s</sub>** - massa específica dos sólidos, em g/cm<sup>3</sup>;

**γ<sub>w</sub>** - massa específica da água, que é função da temperatura, em g/cm<sup>3</sup>;

**Z** - altura de queda (isto é, a distância entre a superfície da suspensão e o centro de volume do bulbo do densímetro), que é obtida a partir da curva de calibração do densímetro, em cm;

**t** - tempo decorrido do início do ensaio até o instante da leitura considerada, em s.

As correspondentes percentagens de partículas com diâmetros menores do que o diâmetro calculado, referentes ao peso total de amostra, são dadas por:

$$\%Passante = \%Passante_{(2mm)} \cdot \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \right) \cdot \left( \frac{V \cdot \gamma_w \cdot (L - L_d)}{\frac{W_t}{1 + w}} \right)$$

Onde:

**V** - volume da suspensão em cm<sup>3</sup>;

**L** - leitura do densímetro;

**w** - teor de umidade do solo ensaiado.

### 6.7.2 Peso Específico Real dos Grãos

A determinação do peso específico dos sólidos é necessária para o cálculo dos índices físicos dos materiais. Os índices físicos são grandezas que medem relações entre pesos e volumes das fases que compõem os solos. O procedimento descrito a seguir baseia-se na norma técnica ABNT NBR 6508 (ABNT, 1984).

A aparelhagem usada é a listada da abaixo:

- Picnômetro com capacidade de 500 ml, calibrado a 20°C;
- Termômetro graduado entre 0°C e 60°C, com resolução 0,1°C;
- Balança eletrônica, com capacidade de 1500g e resolução de 0,01g;
- Destilador de água;
- Estufa para secagem, para temperaturas entre 60°C e 110°C, com controle de temperatura por microprocessador e circulação forçada de ar;
- Bomba de vácuo contendo regulador de vácuo e vacuômetro, capaz de aplicar um vácuo de 88kPa;
- Cápsulas de alumínio, espátulas, funil de vidro, conta-gotas e bisnaga.

### **Procedimento do ensaio**

a) Calibração do picnômetro

1º Passo: Verificar se o picnômetro está completamente seco;

2º Passo: Determinar o peso do picnômetro vazio e seco com resolução de 0,01g;

3º Passo: Colocar água destilada no picnômetro até a base do menisco atingir a marca de referência do gargalo;

4º Passo: Colocar o picnômetro em um aparelho de banho-maria, com temperatura controlável por microprocessador entre 10°C e 50°C;

5º Passo: Esperar a homogeneização da temperatura da água contida no banho-maria e no picnômetro. Para esta verificação utilizar o termômetro;

6º Passo: Medir a temperatura da água no picnômetro, em três profundidades diferentes, com resolução de 0,1°C;

7º Passo: Pesar o picnômetro, nas condições acima, com resolução de 0,01g;

8º Passo: Tem-se assim, um par de valores de temperatura versus peso do picnômetro com água;

9º Passo: Aquecer (ou esfriar) o picnômetro mais água, até uma temperatura 5°C acima (ou abaixo) da anterior e, repetindo o procedimento acima, obter diversos pares de valores de temperatura versus peso do picnômetro com água (no mínimo 5 pontos);

10º Passo: Construir um gráfico das temperaturas de ensaio nas abscissas T(°C) versus peso do picnômetro com água  $W_{pa}$  nas ordenadas.

b) Solo coesivo

1º Passo: A amostra de solo coesivo, a ser utilizada na determinação do peso específico dos sólidos, deve ser preparada conforme a norma técnica ABNT NBR 6457 (ABNT, 1986). A preparação envolve secagem ao ar, destorroamento com almofariz e mão de gral, cuidando para não quebrar as partículas. A amostra deve ser passada pela peneira de 4,8mm, e passada no quarteador;

2º Passo: Selecionar uma amostra com peso seco mínimo de aproximadamente 50g;

3º Passo: Adicionar água destilada à amostra formando uma pasta fluida, visando facilitar a sua introdução no picnômetro com funil. Preferivelmente, deixar esta amostra fechada em saco plástico durante pelo menos 12 horas, para permitir sua hidratação;

4º Passo: Derramar a pasta fluida no copo do aparelho dispersor, tomando cuidado para não haver perda de matéria. Dispersar durante pelo menos 15 minutos;

5º Passo: Transferir a pasta fluida para o picnômetro, com o auxílio do funil de vidro. Introduzir no picnômetro um volume de solo + água destilada da ordem de 250ml;

6º Passo: Aquecer o picnômetro até a fervura, obtida a uma temperatura inferior a 100°C pela aplicação conjunta de aquecimento e vácuo (mínimo de 88kPa), em um aparelho de banho-maria, agitando-o continuamente durante pelo menos 15 minutos para expelir o ar contido nos vazios da amostra;

7º Passo: Completar com água destilada o picnômetro até sua marca de calibração. Ferver novamente o picnômetro, conforme o 6º passo, por pelo menos 5 minutos;

8º Passo: Deixar o picnômetro esfriar, sob uma temperatura constante, no interior do banho-maria até cerca de 40°C;

9º Passo: Homogeneizar bem a temperatura por todo o líquido do picnômetro e com um conta-gotas, completar o picnômetro com água destilada, até a base do menisco atingir a marca de referência no gargalo;

10º Passo: Secar a superfície externa do picnômetro e, com um papel filtro, secar a superfície interna acima da marca de referência;

11º Passo: Obter a medida da temperatura da água no picnômetro;

12º Passo: Determinar o peso do conjunto picnômetro + solo e água,  $W_{psa}$ , com resolução de 0,01g;

13º Passo: Repetir os passos 9 até 12 para, no mínimo, outras três temperaturas, dentro do intervalo de calibração do picnômetro;

14º Passo: Esvaziar completamente o conteúdo do picnômetro num recipiente de evaporação, com o máximo de cuidado para que não haja perda de solo. Secar na estufa até a completa evaporação da água;

15º Passo: Determinar o peso do solo seco  $W_s$  usado no ensaio, com resolução 0,01g.

c) Solo não coesivo

1º Passo: Introduzir no picnômetro um volume de água de aproximadamente 250ml com a ajuda de um funil;

2º Passo: Pesar uma amostra de areia seca, da ordem de 60g, e introduzir no picnômetro;

3º Passo: Aquecer o picnômetro até a fervura, obtida a uma temperatura inferior a 100°C pela aplicação conjunta de aquecimento e vácuo (mínimo de 88kPa), em um aparelho de banho-maria, agitando-o continuamente durante pelo menos 15 minutos para expelir o ar contido nos vazios da amostra;

4º Passo: Completar com água destilada o picnômetro até sua marca de calibração. Ferver novamente o picnômetro, conforme o 3º passo, por pelo menos 5 minutos;

5º Passo: Deixar o picnômetro esfriar, sob uma temperatura constante, no interior do banho-maria até cerca de 40°C;

6º Passo: Homogeneizar bem a temperatura por todo o líquido do picnômetro, e com um conta-gotas, completar o picnômetro com água destilada, até a base do menisco atingir a marca de referência no gargalo;

7º Passo: Secar a superfície externa do picnômetro e, com um papel filtro, secar a superfície interna acima da marca de referência;

8º Passo: Obter a medida da temperatura da água no picnômetro;

9º Passo: Determinar o peso do conjunto picnômetro + solo e água,  $W_{psa}$ , com resolução de 0,01g;

10º Passo: Repetir os passos 6 até 9 para, no mínimo, outras três temperaturas, dentro do intervalo de calibração do picnômetro;

11º Passo: Esvaziar completamente o conteúdo do picnômetro num recipiente de evaporação, com o máximo de cuidado para que não haja perda de solo. Secar na estufa até a completa evaporação da água;

12º Passo: Determinar o peso do solo seco  $W_s$  usado no ensaio, com resolução 0,01g.

### **Formulário**

O peso específico dos sólidos  $\gamma_s$  é o quociente entre o peso de sólidos  $W_s$  e o correspondente volume de sólidos  $V_s$ .

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

O valor de  $\gamma_s$  no ensaio do picnômetro é determinado indiretamente com a equação abaixo:

Onde  $\gamma_w$  é o peso específico da água, na temperatura T(°C) do ensaio, obtida de

$$\gamma_s = \frac{W_s}{W_{pa} - W_{pas} + W_s} \cdot \gamma_w$$

tabelas. O valor de  $W_{pa}$  é obtido da curva de calibração do picnômetro, também na temperatura T(°C) do ensaio.

Realizar no mínimo três ensaios para determinação de  $\gamma_s$  e obter sua média aritmética,  $\gamma_{sm}$ :

$$\gamma_{sm} - 0,05\gamma_{sm} < \gamma_s < \gamma_{sm} + 0,05\gamma_{sm}$$

Abandonar qualquer valor de  $\gamma_s$  que esteja fora do intervalo acima.

### 6.7.3 Limite de Liquidez

O ensaio de limite de liquidez é utilizado para a caracterização e classificação dos limites de consistência das amostras de solo, portanto é o ensaio empregado neste trabalho. O procedimento de ensaio descrito a seguir baseia-se na norma técnica ABNT NBR 6459 (ABNT, 1984). Entretanto, as seguintes observações são importantes:

- a) O procedimento descrito na norma ABNT NBR 6459 (ABNT, 1984) é geralmente realizado com secagem prévia da amostra de solo ao ar, conforme método de preparação descrito na norma ABNT NBR 6457 (ABNT, 1986). Entretanto, a secagem prévia ao ar não é atualmente recomendada para alguns solos, particularmente para argilas de alta plasticidade e argilas orgânicas que nunca tenham sido secadas na natureza, pois suas características podem ser consideravelmente alteradas pela secagem prévia. Neste caso, a própria norma ABNT NBR 6457 (ABNT, 1986) sugere a realização do ensaio de limite de liquidez sem proceder à secagem prévia da amostra ao ar. Realiza-se apenas uma secagem parcial ao ar, até obter-se o teor de umidade correspondente ao primeiro ponto do ensaio

de limite de liquidez. Um procedimento alternativo de ensaio de limite de liquidez sem secagem prévia da amostra de solo é descrito pelas normas americanas ASTM D-2217-85 (1993) e ASTM D-4318-95a (1995).

- b) O procedimento de limite de liquidez descrito na norma ABNT NBR 6459 (ABNT, 1984) baseia-se na utilização do aparelho de Casagrande. Um procedimento alternativo – considerado mais prático para a determinação do limite de liquidez – baseia-se na utilização do equipamento de cone de laboratório. Este método é descrito pela norma inglesa BS 1377 (BSI, 1990).
- c) A dispersão dos resultados deste ensaio é considerada reduzida caso seja permitida a adequada homogeneização do teor de umidade da pasta antes de sua colocação na concha do aparelho de Casagrande. Sugere-se um intervalo de tempo mínimo de 12 horas para esta homogeneização, com pasta mantida em saco plástico fechado, para o primeiro ponto do ensaio.

### **Equipamento**

Aparelho e cinzel de Casagrande, gabarito do aparelho de Casagrande.

- Balança eletrônica, com capacidade de 1500 g e resolução de 0,001 g.
- Estufa para secagem, para temperaturas entre 60 °C e 110 °C, com controle de temperatura por microprocessador e circulação forçada de ar.
- Cápsulas de porcelana, cápsulas de alumínio pequenas, espátula e água destilada.

### **Calibração do aparelho de Casagrande**

Usando o gabarito do aparelho de Casagrande, com 10 mm de altura, verificar a altura do ponto em que a concha deste aparelho bate na sua base. Com a manivela do aparelho, situar a concha em sua posição mais elevada (observar que a altura mencionada não é a correspondente ao ponto mais baixo da concha, mas aquele que bate na base). Se esta altura não estiver correta, corrigi-la com o parafuso de ajuste do aparelho, apertando-o a seguir.

### **Verificação do aparelho de Casagrande**

Os itens de verificação relacionados abaixo constam da norma técnica ABNT NBR 6459 (ABNT, 1984). Caso o aparelho de Casagrande não atenda a algum destes itens, descartá-lo imediatamente para manutenção.

- Verificar se a massa do conjunto concha mais guia do excêntrico está entre 180 g e 220 g.
- Verificar se a forma do excêntrico, durante os últimos 3 mm de seu movimento, resulta em variação insignificante da altura da concha em relação à base.
- Verificar se a marca do ponto da concha que bate na base está gasta.
- Verificar se os pés de borracha da base estão gastos.
- Verificar se a resiliência dinâmica do material da base está correta: esta é verificada com uma esfera de aço de 8 mm de diâmetro, que é deixada cair de uma altura de 250 mm sobre a base; a esfera deve elevar-se entre 185 e 230 mm após o impacto.
- Verificar se as dimensões do aparelho de Casagrande e do cinzel estão corretas.

### **Procedimento do ensaio**

1º Passo: A amostra a ser ensaiada deve ser representativa (isto é, ter sido coletada em campo preservando os seus constituintes minerais e estando tanto quanto possível em condições de umidade idênticas as de campo). A preparação desta amostra para o ensaio de limite de liquidez deve atender à norma técnica ABNT NBR 6457 (ABNT, 1986);

2º Passo: Se a amostra a ser ensaiada estiver com um teor de umidade que não permita seu peneiramento, deixá-la secando ao ar;

3º Passo: Homogeneizar a amostra, triturando os agregados de solo em um almofariz com mão de gral, evitando, no entanto fragmentar as partículas sólidas;

4º Passo: Peneirar a amostra na peneira de 0,42 mm, descartando o material retido na peneira;

5º Passo: Colocar em uma cápsula de porcelana cerca de 200 g do solo que passou pela peneira de 0,42 mm;

6º Passo: Juntar água destilada à amostra, misturando-a com a espátula, de modo a formar uma pasta uniforme, relativamente consistente. Colocar a pasta em um saco plástico e deixá-lo pelo menos 12 horas na câmara úmida, visando obter a homogeneização da umidade;

7º Passo: Colocar a pasta de solo na concha do aparelho de Casagrande (Fig. 13), regularizando a superfície da pasta com a espátula, de forma a obter uma espessura da ordem de 10 mm na parte central;

8º Passo: Abrir uma ranhura na pasta ao longo do eixo de simetria da concha, utilizando o cinzel de Casagrande. É importante cuidar para que este permaneça normal à concha nos pontos de contato durante todo o movimento de abertura da ranhura;



**Figura 13.** Aparelho de Casagrande com a ranhura aberta na pasta de solo.

9º Passo: Girar a manivela do aparelho de Casagrande a duas rotações por segundo;

10º Passo: Anotar o número de golpes necessários para que as bordas da ranhura se unam ao longo de um comprimento de 13 mm;

11º Passo: Colocar imediatamente cerca de 15 g de solo coletado junto às bordas que se uniram para uma cápsula de alumínio pequena e determinar seu teor de umidade;

12º Passo: Remover o solo restante na concha, de volta para a cápsula de porcelana. Limpar e secar a concha;

13º Passo: Com a espátula, homogeneizar a amostra de solo contida na cápsula de porcelana;

14º Passo: Adicionar água destilada à amostra e homogeneizar novamente a pasta formada;

15º Passo: Repetir os passos 6 a 12 até obter pelo menos 5 pares de valores de teor de umidade versus o número de golpes do aparelho de Casagrande necessários para o fechamento da ranhura (estes golpes devem estar situados entre 15 a 35, de preferência com no mínimo 2 golpes abaixo e 2 golpes acima de 25);

16º Passo: Construir um gráfico com o número de golpes nas abscissas (em escala logarítmica) e o teor de umidade nas ordenadas (em escala aritmética), traçando a reta que melhor se ajuste aos pontos experimentais. O teor de umidade correspondente a 25 golpes, obtido do gráfico construído por interpolação, é o limite de liquidez do solo. O solo é considerado como não apresentando limite de liquidez caso seja impossível abrir a ranhura ou conseguir seu fechamento com mais de 25 golpes.

#### **6.7.4 Limite de Plasticidade**

O ensaio de limite de plasticidade é utilizado para a caracterização e classificação de amostras de solo. O procedimento de ensaio descrito a seguir baseia-se na norma técnica ABNT NBR 7180 (ABNT, 1984). Entretanto, as seguintes observações são importantes:

- a) O procedimento descrito na norma ABNT NBR 7180 (ABNT, 1984) é geralmente realizado com secagem prévia da amostra de solo ao ar, conforme método de preparação descrito na norma ABNT NBR 6457 (ABNT, 1986). Entretanto, a secagem prévia ao ar não é atualmente recomendada para alguns solos, particularmente para argilas de alta plasticidade e argilas orgânicas que nunca tenham sido secadas na natureza, pois suas características podem ser consideravelmente alteradas pela secagem prévia. Neste caso, a própria norma ABNT NBR 7180 (ABNT, 1984) sugere a realização do ensaio de limite de plasticidade sem proceder à secagem prévia da amostra ao ar. Realiza-se apenas uma secagem parcial ao ar, até obter-se o teor de umidade correspondente ao primeiro ponto do ensaio de limite de plasticidade. Um procedimento alternativo de ensaio de limite de plasticidade sem secagem prévia da amostra de solo é descrito pelas normas americanas ASTM D-2217-85 (1993) e ASTM D-4318-95a (1995).
- b) A dispersão dos resultados deste ensaio é considerada reduzida caso seja permitida a adequada homogeneização do teor de umidade da pasta antes de sua colocação na concha

do aparelho de Casagrande. Sugere-se um intervalo de tempo mínimo de 12 horas para esta homogeneização, com pasta mantida em saco plástico fechado, para o primeiro ponto do ensaio.

### **Equipamento**

- Placa de vidro esmerilhado.
- Balança eletrônica, com capacidade de 1500 g e resolução de 0,001 g.
- Estufa para secagem, para temperaturas entre 60 °C e 110 °C, com controle de temperatura por microprocessador e circulação forçada de ar.
- Cápsulas de porcelana, cápsulas de alumínio pequenas, espátula e água destilada.

### **Procedimento do ensaio**

1° ao 5° Passo: Estes passos (correspondentes à preparação da amostra) são idênticos ao ensaio de limite de liquidez;

6° Passo: Homogeneizar cuidadosamente o solo com uma espátula, juntando água destilada se necessário, formando uma pasta uniforme, relativamente consistente;

7° Passo: Formar um bola com cerca de 10 g de pasta e rotá-la com a mão sobre a placa de vidro até formar um cilindro com 3 mm de diâmetro e cerca de 100 mm de comprimento (Fig. 14);



**Figura 14.** Cilindro com 3 mm de diâmetro e cerca de 100 mm de comprimento.

8º Passo: Repetir o item anterior até que o cilindro comece a apresentar as primeiras fissuras nas dimensões especificadas acima (caso o cilindro comece a se fragmentar com um diâmetro maior que 3 mm repetir os passos 6 e 7, após acrescentar mais água à pasta);

9º Passo: Colocar o trecho fissurado do cilindro em uma cápsula de alumínio pequena para a determinação do teor de umidade;

10º Passo: Repetir os passos 6 a 9 para obter pelo menos três determinações de teor de umidade;

11º Passo: Calcular a média aritmética  $w_m$  dos teores de umidade obtidos:

$$w_m = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

12º Passo: Calcular o valor  $\Delta w$ , correspondente a 5% do valor de teor médio de umidade calculado:

$$\Delta w = \frac{5w_m}{100}$$

13º Passo: Calcular os desvios  $\Delta w_i$  dos teores de umidade em relação a média calculada. Se cada  $\Delta w_i \leq \Delta w$ , então o limite de plasticidade é considerado igual a  $w_m$ ;

14º Passo: Para qualquer  $\Delta w_i > \Delta w$ , desprezar o teor de umidade  $w_i$  correspondente:

$$w_m = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

Desprezado algum valor  $w_i$ , recalculer a média dos teores de umidades  $w_i$  (se  $i < 3$ , repetir o ensaio).

## 7 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o emprego das diferentes técnicas nos materiais, rocha e solo, verificados na área urbana do município de Caxias do Sul.

### 7.1 ANÁLISE QUÍMICA

A seguir, apresenta-se a tabela 1 com a composição química das cinco amostras de rocha sã analisadas em seus elementos maiores por Fluorescência de Raios X. Essas amostras foram coletadas em locais e cotas da região urbana de Caxias do Sul. Como primeira constatação pode-se observar uma uniformidade na composição química destas rochas, em particular, no que tange aos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ .

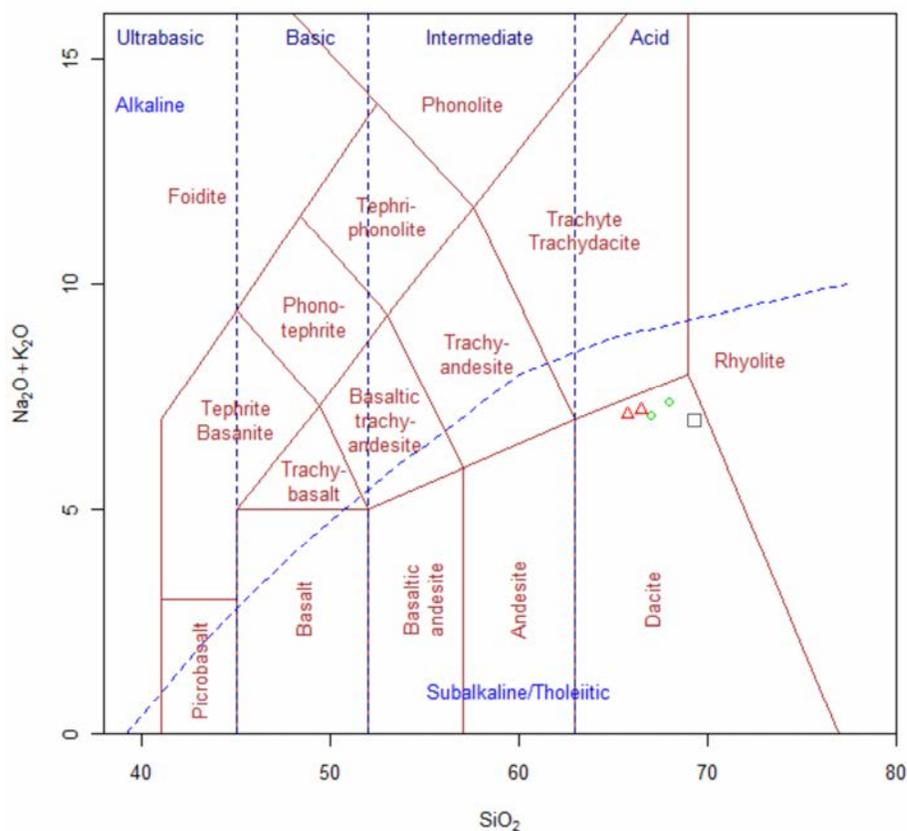
Na tabela 1 estão discriminados também os teores percentuais dos demais elementos maiores. A classificação química dessas análises pode ser apreciada na figura 15, em que nota-se que todas as amostras, segundo a classificação TAS, caem no campo dos Dacitos.

As rochas ácidas de Caxias do Sul apresentam conteúdos de  $\text{SiO}_2$  entre 63,4% e 68,1%,  $\text{TiO}_2$  entre 0,88% e 1,04% e  $\text{P}_2\text{O}_3$  da ordem de 0,20% e 0,28%. Os valores são semelhantes aos apresentados para as ácidas do tipo Palmas. Considerando-se os teores de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_3$  podemos agrupar essas rochas como pertencentes ao subtipo Caxias do Sul.

Analisando o diagrama TAS podemos separar essas rochas ácidas em três tipos: Dacito Caxias, representado por triângulos vermelhos no diagrama; Dacito Canyon, representado por losangos verdes; e o Dacito Forqueta, representado pelo quadrado preto. Essas rochas além de possuírem pequenas diferenças em suas composições químicas apresentam características petrográficas distintas, as quais são descritas na seção 7.2.

	PTC 016 A	PTC 022 A	PTC 012 A	PTC 011 A	PTC 015 A
SiO <sub>2</sub>	63,7	65,8	66,6	63,4	68,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,15	13,43	13,08	14,71	12,53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,08	6,29	6,02	7,20	5,78
MnO	0,13	0,11	0,10	0,07	0,09
MgO	1,53	1,52	1,27	0,62	1,13
CaO	3,05	3,42	2,48	0,73	2,63
Na <sub>2</sub> O	3,04	3,18	2,84	1,52	2,82
K <sub>2</sub> O	3,84	3,94	4,38	5,15	4,06
TiO <sub>2</sub>	1,04	0,96	0,95	1,00	0,88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	0,27	0,26	0,20	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,001	<0.001	<0.001	0,002	0,006
Ba	0,11	0,07	0,08	0,09	0,07
LOI	2,83	1,55	2,61	6,01	2,15
<b>Total</b>	<b>99,78</b>	<b>100,54</b>	<b>100,67</b>	<b>100,70</b>	<b>100,49</b>

**Tabela 1.** Resultados das análises químicas das rochas vulcânicas encontradas na área urbana de Caxias do Sul.



**Figura 15.** Diagrama TAS (Álcalis totais x Sílica), (Le Bas et al. 1986). Classificação química das rochas vulcânicas encontradas na área urbana de Caxias do Sul. Dacito Caxias: triângulos vermelhos; Dacito Canyon: losangos verdes; Dacito Forqueta: quadrado preto.

## 7.2 PETROGRAFIA

Nesta seção serão apresentados os dados referentes às análises macroscópicas e microscópicas das rochas.

### 7.2.1 Dacito Forqueta

Nomeado por Bressani, Flores e Nunes (2005) como Vitrófiro Forqueta, neste trabalho será tratado como Dacito Forqueta. É uma unidade litológica que ocorre, com seus aspectos mais característicos, por toda a extensão territorial da Região Administrativa de Forqueta, em cotas comumente superiores a 730 m.

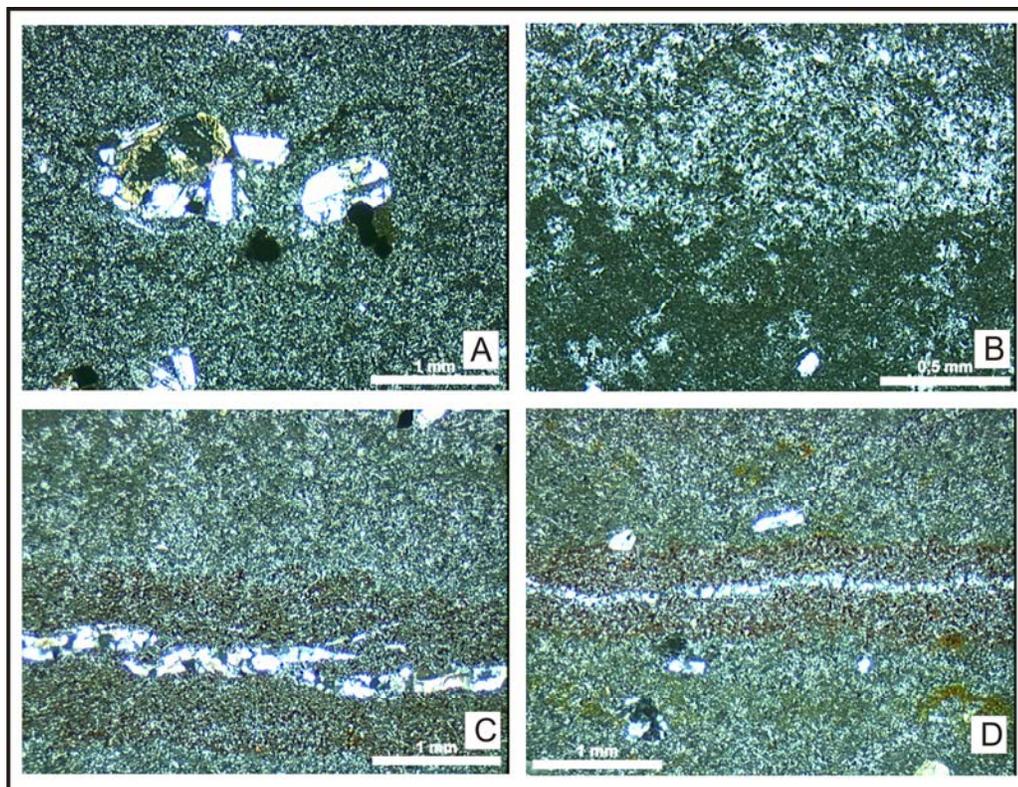
O aspecto predominante observado em campo é a existência de uma sutil estrutura de fluxo magmático, que define bandas com coloração que variam de cinza esverdeada a cinza muito escura.

#### **Lâmina PTC – 015 A e PTC 032 A**

Em lâmina delgada observa-se uma estrutura de fluxo marcada pela orientação dos micrólitos que constituem a matriz, evidenciada por forte alteração. A textura geral da rocha é microporfirítica, e de forma muito localizada ocorrem agregados glomeroporfiríticos. É constituída por uma matriz fina a semi-vítrea, em um estágio de desvitrificação que confere a rocha uma textura granofírica (Fig. 16 B), composta de micrólitos ripidiformes de plagioclásio e minerais opacos, por fenocristais de plagioclásio e piroxênio (Fig. 16 A). Ocorrem fraturas paralelas à estrutura de fluxo, preenchidas por quartzo e com alteração ao longo de sua extensão (Fig. 16 C e D).

A matriz é composta principalmente por micrólitos de plagioclásio com intercrescimento com o quartzo devido ao processo de desvitrificação. Os fenocristais ocorrem de forma disseminada na rocha, são constituídos principalmente por plagioclásio e piroxênio, ocorrendo também alguns opacos. Os fenocristais de plagioclásio possuem em média 0,5 – 1 mm, variam de subédricos a euédricos, e possuem hábito prismático e comumente apresentam macla polissindética. Os fenocristais de piroxênio ocorrem de maneira dispersa, possuem tamanho médio de 0,5 mm, são euédricos, de hábito prismático. Muitas vezes ocorrem alterados, substituídos por clorita. Os opacos ocorrem principalmente como pequenos cristais de hábito cúbico inclusos em alguns fenocristais de plagioclásio e

piroxênio. Ocorrem ainda, de forma mais rara, como fenocristais euédricos e fortemente oxidados.



**Figura 16.** Lâmina PTC 015 A; A – fenocristais de plagioclásio e piroxênio; B – porção superior da imagem com maior cristalização e porção superior com desvitrificação incipiente; C e D - fraturas paralelas à estrutura de fluxo, preenchidas por quartzo e com alteração ao longo de sua extensão.

### 7.2.2 Dacito Caxias

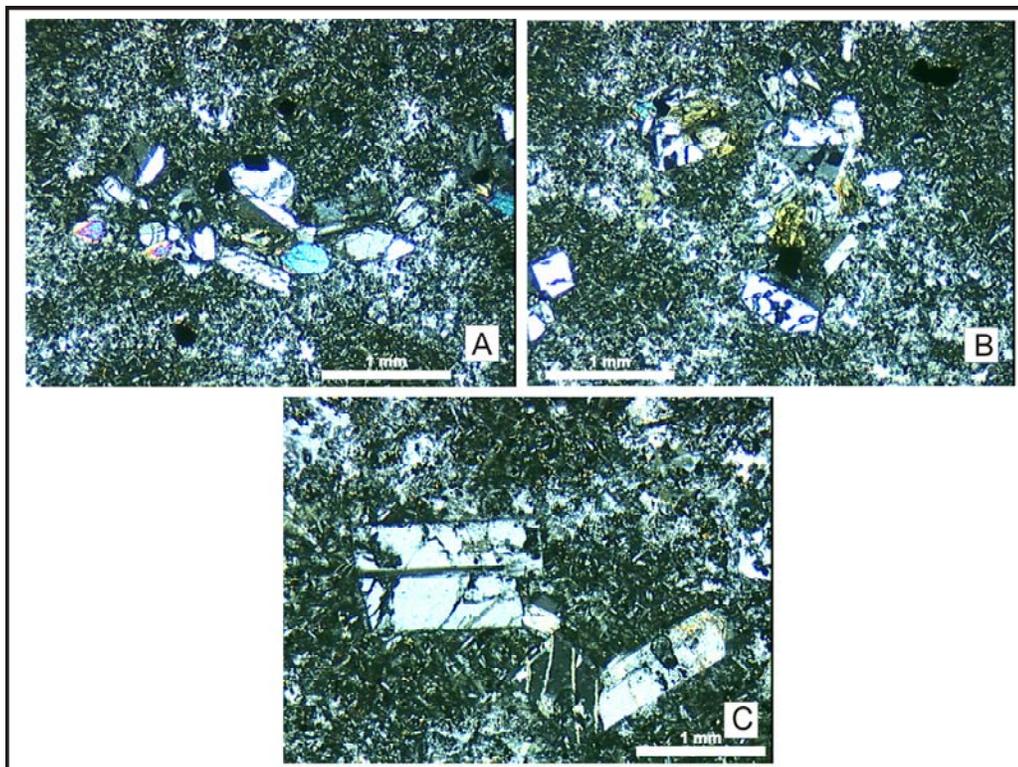
O Dacito Caxias ocorre em cotas normalmente superiores a 640 m, sendo assim nomeado por Bressani, Flores e Nunes (2005) por ocorrer em seus aspectos mais característicos na região central da cidade. Essa denominação será mantida neste trabalho.

A rocha tem uma coloração predominantemente cinza oliva clara e granulação média. São observadas ocorrências de estratos tabulares sub-horizontais na porção basal dessa unidade com espessuras de 5 a 30 cm, que desenvolvem uma alteração esferoidal característica desse derrame.

### **Lâmina PTC – 016 A e 022 A**

A rocha tem uma textura equigranular com granulação fina a média e uma estrutura predominantemente maciça e localmente é perceptível uma intercalação de porções de textura granofírica com porções faneríticas, com as fases minerais bem diferenciadas. Ocorrem de forma dispersa na rocha, alguns agregados constituídos principalmente por fenocristais de plagioclásio e piroxênio, que caracterizam a textura do tipo glomeroporfírica (Fig. 17 A e B).

A textura dominante é microporfírica e de forma localizada ocorre textura glomeroporfírica. Apresenta intensa alteração das fases máficas. A matriz é composta principalmente por micrólitos de plagioclásio. Estes cristais possuem hábito prismático, variam de subédricos a euédricos e possuem macla polissindética. Nos espaços intersticiais existentes entre os cristais de plagioclásio que constituem a matriz, ocorrem minerais opacos residuais de hábito dendróide originados da desvitrificação. Ocorrem também alguns minerais opacos, piroxênios e plagioclásios de forma disseminada na matriz e poucos fenocristais de plagioclásio e piroxênio. Os fenocristais de plagioclásio possuem aproximadamente 1 – 1,5 mm em média, variam de subédricos a euédricos, e possuem hábito prismático (Fig. 17 C). Em muitos casos possuem uma grande alteração para mica branca. Ocorrem ainda como fenocristais alguns piroxênios, que variam entre 1 - 2 mm, são euédricos e de hábito prismático.



**Figura 17.** Lâmina PTC 022 A; A e B - textura glomeroporfírica formada por fenocristais de plagioclásio e piroxênio; C - fenocristais de plagioclásio em uma matriz de desvitrificação.

### 7.2.3 Dacito Canyon

O Dacito Canyon ocorre em cotas baixas (normalmente inferiores a 640 m), sendo assim chamado por Bressani, Flores e Nunes (2005) devido ao fato de uma das principais e mais características ocorrências dessa litologia ser encontrada no vale que define o bairro Canyon. Essa denominação será mantida neste trabalho.

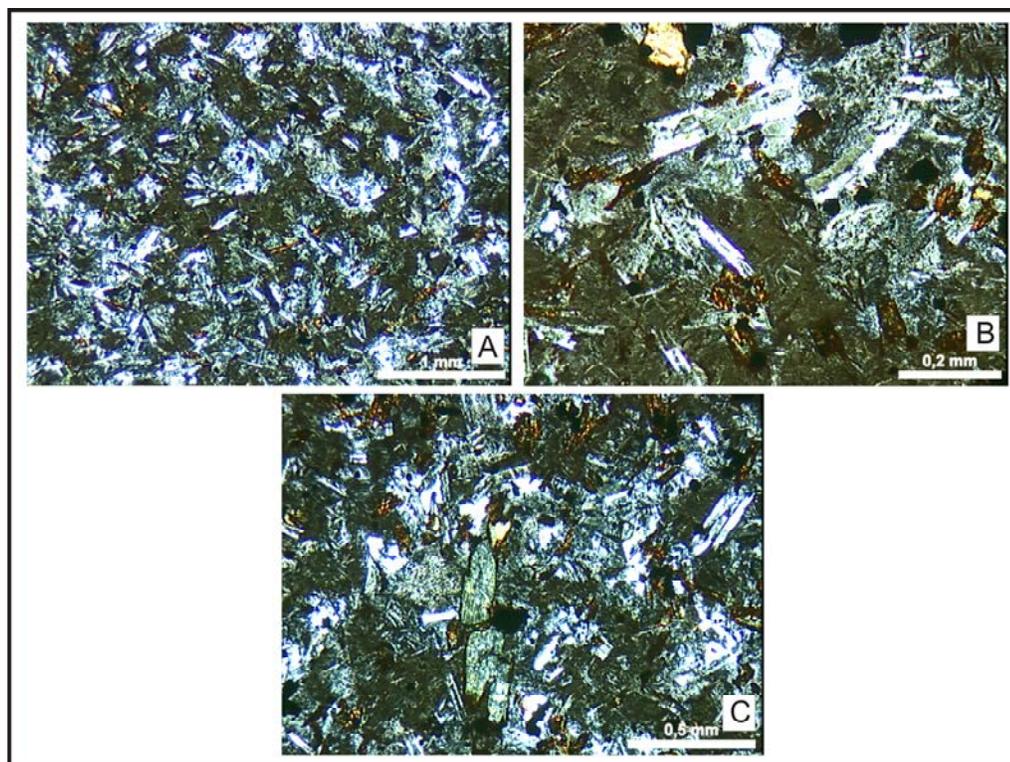
Esse derrame caracteriza-se pela presença de estruturas de fluxo subvertical, que definem bandas com coloração que variam de cinza escura a marrom-avermelhada. A diferença de coloração é relacionada ao estado de oxidação da rocha, sendo que na maior parte das vezes ela aparece alterada, e quando são tem cor cinza escura.

### Lâmina PTC – 011 A

A rocha apresenta uma forte oxidação dos minerais opacos e máficos que a compõem, adquirindo uma coloração geral avermelhada. A textura da rocha é porfírica, podendo ser chamada de felsófica por se tratar de uma matriz formada pelo intercrescimento de

plagioclásio e quartzo. A matriz tem textura fina e é possível observar a presença de micrólitos ripidiformes de plagioclásio, algum quartzo intersticial e minerais opacos residuais, que estão totalmente oxidados (Fig. 18 A e B). Ocorrem poucos fenocristais, constituídos principalmente por plagioclásio, e mais raramente piroxênio e opacos (Fig. 18 C).

A matriz é composta principalmente por micrólitos de plagioclásio. Nos espaços intersticiais existentes entre os micrólitos ocorre algum quartzo residual, e principalmente minerais opacos, que apresentam hábito dendróide a acicular, que estão totalmente oxidados, e são responsáveis pela coloração avermelhada característica da rocha. Os fenocristais de plagioclásio ocorrem de maneira disseminada na matriz e possuem em média 0,1 mm, variando de subédricos a euédricos. Os fenocristais de piroxênio ocorrem pervasivamente alterados, possuem tamanhos médios de 0,5 mm, são euédricos, de hábito prismático. Os opacos ocorrem euédricos, medindo até 0,3 mm, totalmente oxidados.



**Figura 18.** Lâmina PTC 011 A; A e B – matriz tem textura fina e é possível observar a presença de micrólitos ripidiformes de plagioclásio; C – raros fenocristais.

### 7.3 DIFRATOMETRIA POR RAIOS X

Na Difractometria por Raios X identificou-se a composição mineralógica dos solos. Os minerais podem ser separados em minerais primários e minerais secundários, sendo o conhecimento destes, importante, pois, a presença de micas, argilo-minerais e húmus determinam a plasticidade de um solo.

Os minerais primários são representados por quartzo, que é praticamente inalterável; os feldspatos, que permitem determinar um grau de evolução dos solos, quanto mais feldspatos, menos evoluídos os solos; além de minerais ferromagnesianos (MACIEL FILHO, C. L. 1997).

Os minerais secundários são os argilo-minerais, os silicatos não cristalinos, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e carbonato. Os de maior importância aqui encontrados são os minerais de argila.

Os minerais de argila têm grande importância no solo devido ao fato de serem colóides eletronegativos com capacidade de absorção, retenção de água e troca de cátions; suscetíveis de dispersão e floculação; têm poder tamponizante e possuem propriedades de plasticidade, adesividade, tenacidade no estado seco, variação do volume consoante ao teor de água (MACIEL FILHO, C. L. 1997).

Os três principais grupos de minerais de argila encontrados nestes solos são as caolinitas, esmectitas e ilitas.

A caolinita tem carga elétrica negativa e um fraco poder de retenção de água, quando comparado com os demais grupos; por praticamente não apresentar expansibilidade não tem grande importância e influência no comportamento geotécnico do solo.

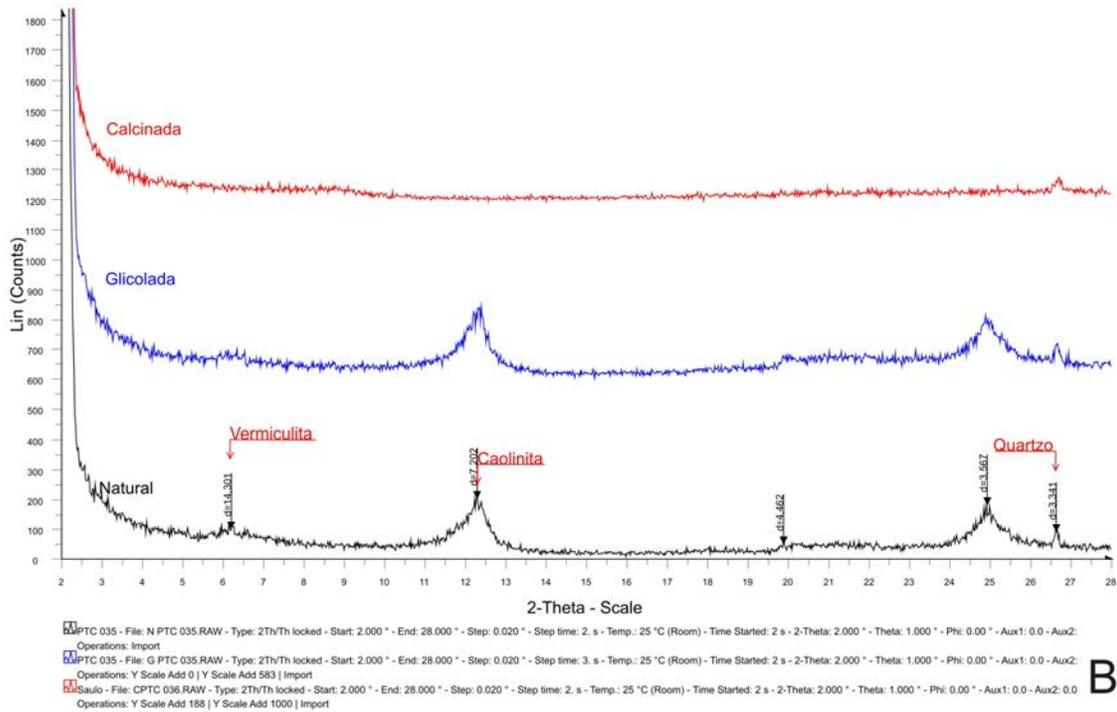
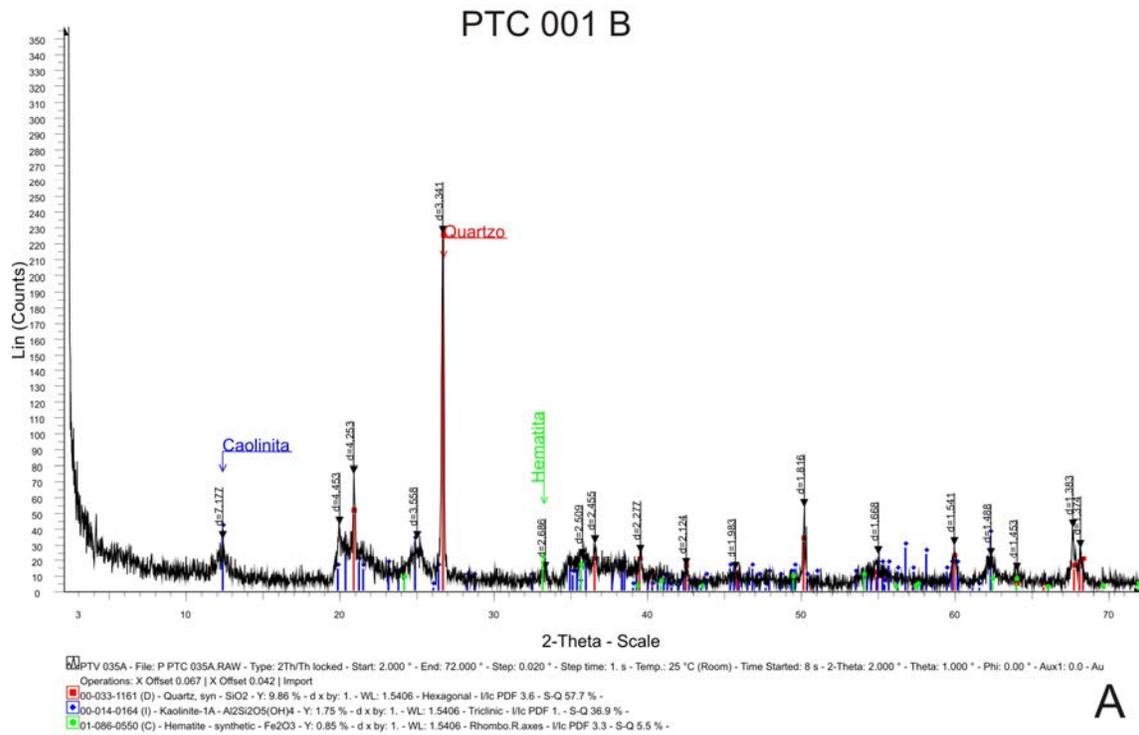
A esmectita possui carga elétrica, alto poder de retenção de água e expansibilidade elevada; por isso tem grande influência no comportamento dos solos. Caracterizam-se por apresentar em sua estrutura moléculas de água entre as unidades estruturais (2 : 1) e, como a água penetra com grande facilidade entre essas camadas, as esmectitas são de fácil dispersão na água, grande expansão e alta plasticidade.

As ilitas possuem sua unidade estrutural básica similar a das esmectitas, tendo os átomos de silício das camadas de sílica parcialmente substituídos por alumínio e cátions de K dispostos entre as unidades superpostas. Quando, nas ilitas, a substituição do silício for pequena, as ligações entre as unidades superpostas proporcionadas pelos cátions K ficam deficientes, permitindo a entrada de água, fazendo com que suas propriedades aproximem-se

as das esmectitas. A illita tem propriedades intermediárias entre a caolinita e a esmectita, adquirindo assim uma relativa importância no comportamento dos solos.

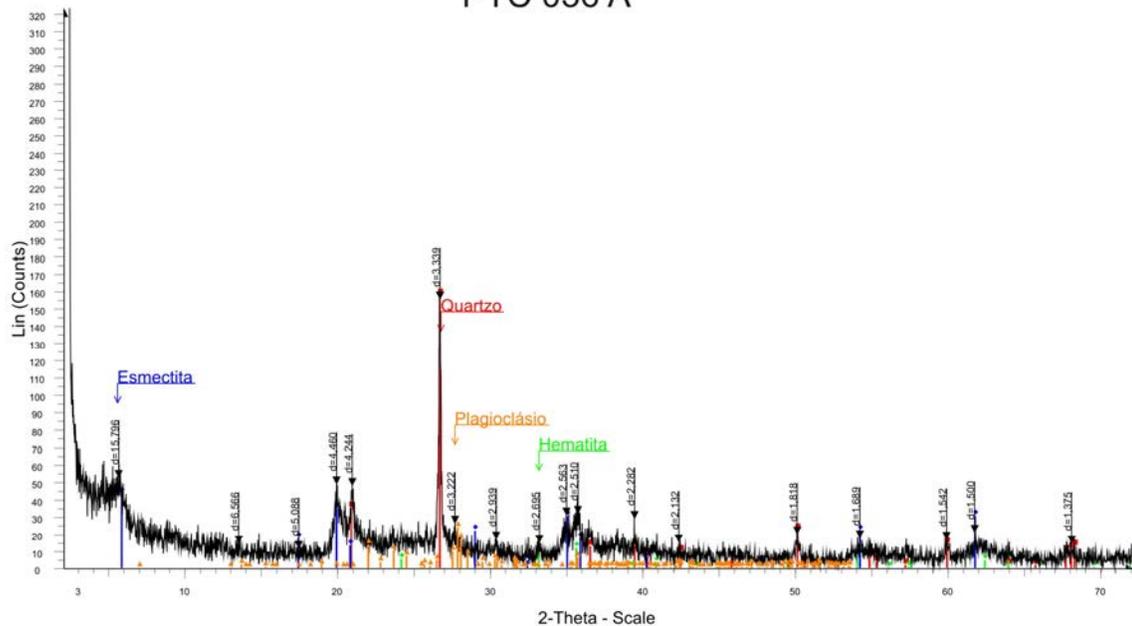
As vermiculitas também aparecem, embora sejam menos abundantes no solo, e tem estrutura semelhante à biotita, porém são hidratadas. Têm como principal característica o fato de sofrer expansão quando é submetida a temperaturas acima de 900 °C. Nessa temperatura a água de hidratação contida entre as suas lâminas (2 : 1) se transforma em vapor, expulsando-a, formando flocos. A esfoliação (piroexpansão) provoca um aumento de até 30 vezes o volume inicial.

A seguir são apresentados os difratogramas para os solos da área urbana de Caxias do Sul, figuras 19 (solo Forqueta), 20 (solo Caxias), 21 (solo Caxias) e 22 (solo Canyon).

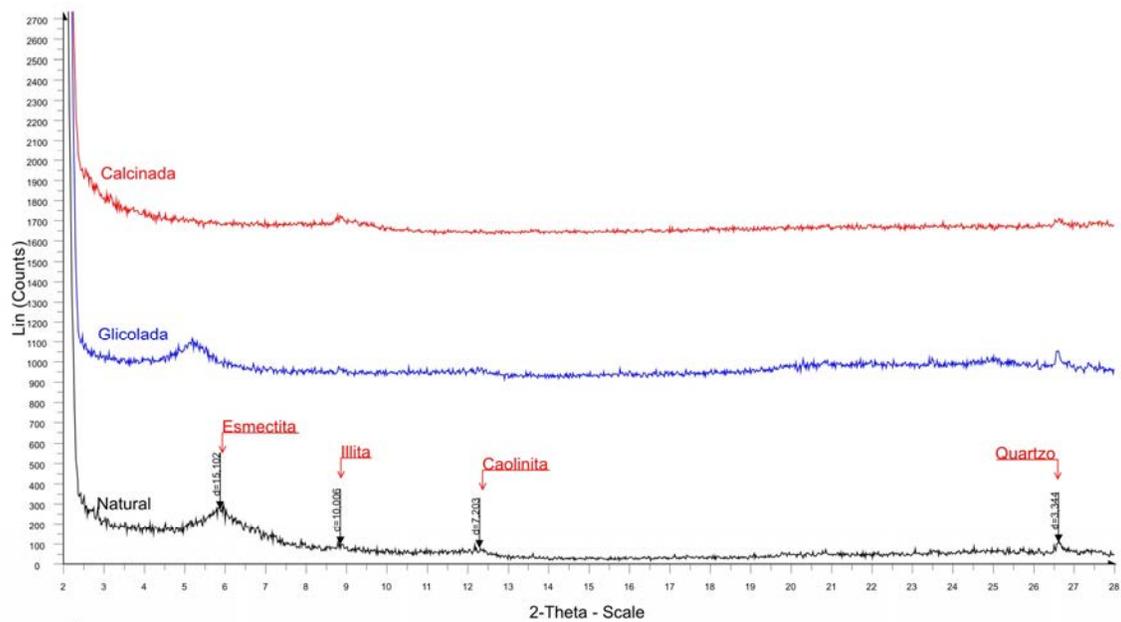


**Figura 19.** Difratoograma de Raios X, solo Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m. A – rocha total; B – fração < 2 µm.

### PTC 036 A



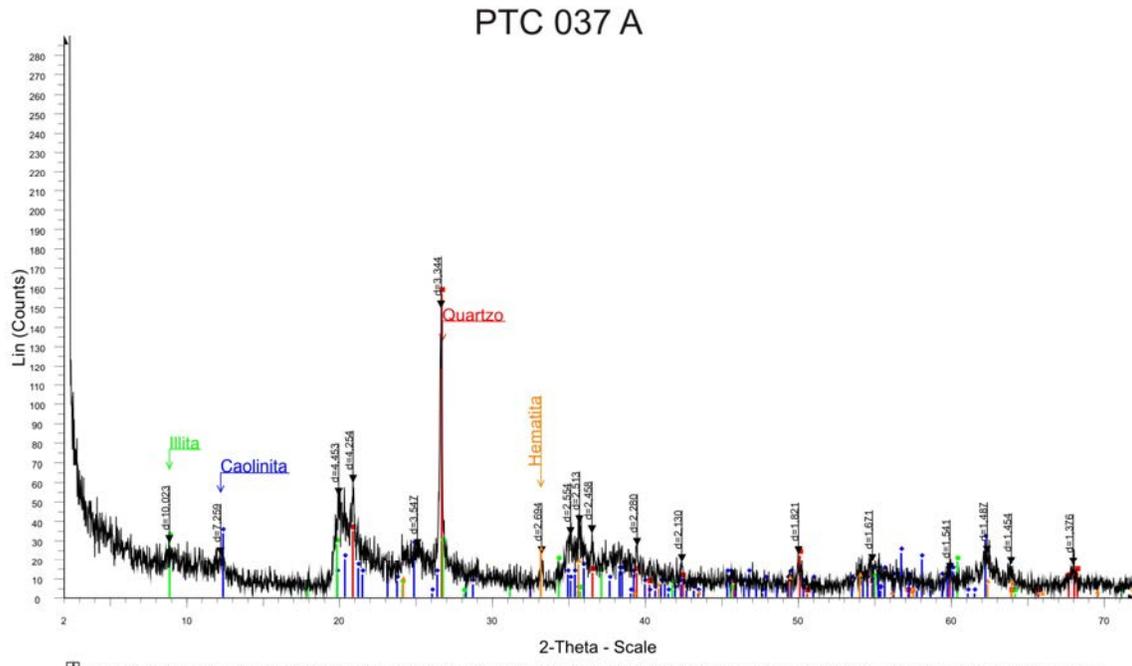
A



B

**Figura 20.** Difratoograma de Raios X, solo Caxias, amostra PTC 036 A. A – rocha total; B – fração < 2 µm.



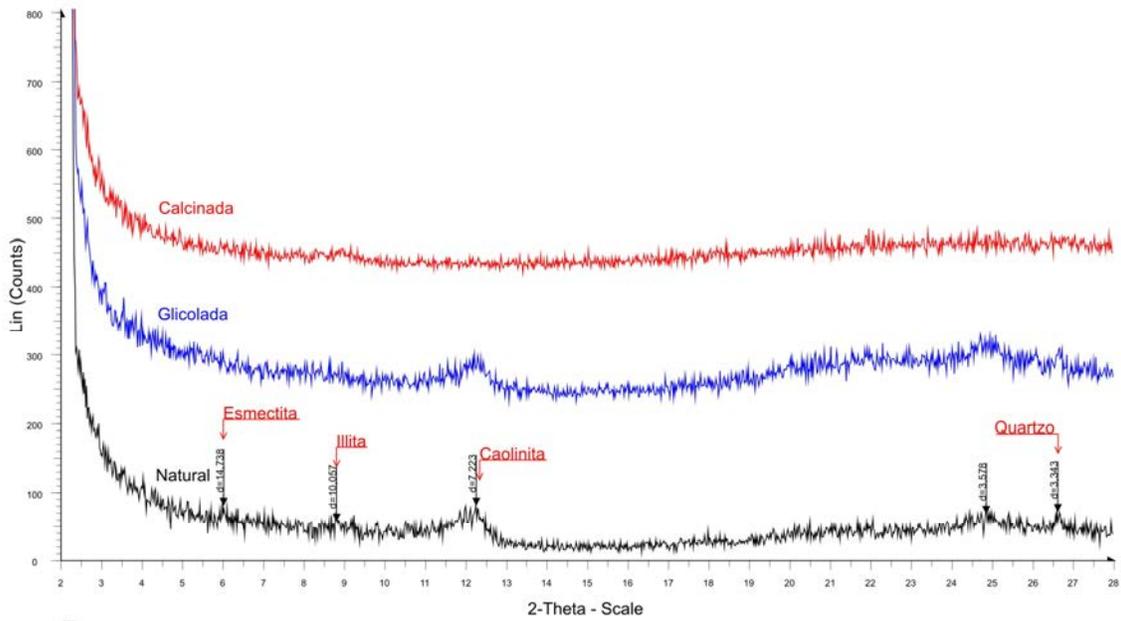


PTC 037 A - File: PPTC 038A.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 72.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.00 ° - Aux1: 0.0 - Aux2: 0.

Operations: Import

- 00-033-1161 (D) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 5.71 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - Ilc PDF 3.6 - S-Q 38.0 % -
- 00-014-0164 (I) - Kaolinite-1A - Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> - Y: 1.21 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - Ilc PDF 1. - S-Q 29.0 % -
- 00-009-0343 (D) - Illite, triclinic - K<sub>0.5</sub>(Al,Fe,Mg)<sub>3</sub>(Si,Al)MO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 1.12 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - Ilc PDF 1. - S-Q 26.8 % -
- 01-086-0550 (C) - Hematite - synthetic - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Y: 0.86 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - Ilc PDF 3.3 - S-Q 6.3 % -

A



PTC 037 A - File: N PTC 038.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 28.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 2. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.00 ° - Aux1: 0.0 - Aux2: 0.

Operations: Import

PTC 037 A - File: GPTC 038.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 28.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 3. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.00 ° - Aux1: 0.0 - Aux2: 0.

Operations: Y Scale Add 42 | Y Scale Add 167 | Import

PTC 037 A - File: C PTC 038.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 28.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 2. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Phi: 0.00 ° - Aux1: 0.0 - Aux2: 0.

Operations: Y Scale Add 42 | Y Scale Add 375 | Import

B

**Figura 22.** Difratoograma de Raios X, solo Canyon, amostra PTC 037 A. A – rocha total; B – fração < 2 μm.

## 7.4 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

São apresentados aqui os resultados dos ensaios geotécnicos realizados sobre amostras selecionadas e utilizados para classificação dos solos, conhecidos como ensaios de caracterização (ensaios de granulometria, peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ), ensaios de limite de liquidez (LL) e ensaios de limite de plasticidade (LP)).

### 7.4.1 Granulometria por Sedimentação e Peneiramento

As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios granulométricos por sedimentação e peneiramento, respectivamente, em amostra de solo saprolítico do Dacito Forqueta.

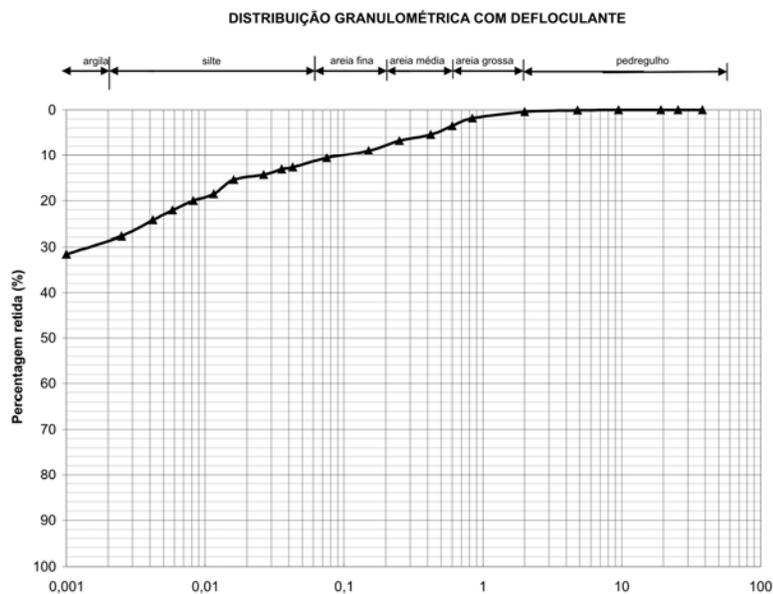
Amostra:		PTC 001 B		UMIDADE					
		Com defloculante		$W_{c+s+w}$ (gf)	65,05	65,05			
		Proveta 02- com defloculante: a = -185x + 201.83 (1 <sup>as</sup> três leituras) a' = -184.15x + 200.12 (demais leituras)		$W_{c+s}$ (gf)	63,86	63,86			
				$W_c$ (gf)	21,48	21,48			
				w (%)	2,808	2,808			
		Densímetro 5842/05 - com defloculante: y = -5E-06x <sup>2</sup> - 0.00002x + 1,0061		$w_{média}$ (%)	2,808	2,808			
SEDIMENTAÇÃO									
P. Espec. R. dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> ):			2,707	Peso úmido (gf):		77,72	Peso seco (gf):		75,6
Tempo Decorrido		Temperatura (°C)	Viscosidade (g.s/cm <sup>2</sup> )	Densidade L	Correção L <sub>d</sub>	Altura Queda (cm)	Diâmetro (mm)	(%) < Diâmetro	
45	s	26	8,93564E-06	1,044	1,0022	8,69	0,0427	87,29	
1,08	min	26	8,93564E-06	1,0438	1,0022	8,73	0,0356	86,87	
2	min	26	8,93564E-06	1,0432	1,0022	8,84	0,0263	85,62	
5	min	26	8,93564E-06	1,0427	1,0022	8,11	0,016	84,57	
10	min	26	8,93564E-06	1,0412	1,0022	8,38	0,0115	81,44	
20	min	26	8,93564E-06	1,0405	1,0022	8,51	0,0082	79,98	
40	min	26	8,93564E-06	1,0395	1,0022	8,7	0,0058	77,89	
80	min	25,6	9,01594E-06	1,0386	1,00231	8,86	0,0042	75,78	
240	min	25	9,13853E-06	1,0371	1,00248	9,14	0,0025	72,29	
1444	min	25,5	9,0362E-06	1,0351	1,00234	9,51	0,001	68,41	

**Tabela 2.** Análise granulométrica por sedimentação do solo Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

PENEIRAMENTO					
W <sub>t</sub> #10 (gf):		77,72	W <sub>t</sub> #4 (gf):		784,41
W <sub>s</sub> #10 (gf):		75,6	W <sub>s</sub> #4 (gf):		762,99
Peneiras		Mat. Retido (gf)	Material que passa (gf)		(%)
Nº	mm		Parcial	Total	Passante
1 1/2"	38,1	0		0	100
1"	25,4	0		0	100
3/4"	19,1	0		0	100
3/8"	9,5	0		0	100
4	4,8	0,49		762,5	99,94
10	2	2,92		759,58	99,55
20	0,84	1,07	74,53		98,14
30	0,6	1,26	73,27		96,48
40	0,42	1,46	71,81		94,56
60	0,25	1,05	70,76		93,18
100	0,15	1,67	69,09		90,98
200	0,075	1,22	67,87		89,37

**Tabela 3.** Análise granulométrica por peneiramento do solo Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

Na figura 23 apresenta-se a curva de distribuição granulométrica obtida a partir dos dados das tabelas 2 e 3. A curva de distribuição granulométrica revela o notório predomínio da fração argila no solo Forqueta.



**Figura 23.** Gráfico da distribuição granulométrica do solo Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

A tabela 4 apresenta os valores das percentagens das frações do material passante do solo Forqueta. Esta tabela foi obtida através da análise da curva de distribuição granulométrica do material (Fig. 23).

(%) PASSANTE	
Argila:	71,5
Silte:	17
Areia Fina:	3,5
Areia Média:	3
Areia Grossa:	4
Pedregulho:	1

**Tabela 4.** Porcentagem de fração do material passante do solo Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados dos ensaios granulométricos por sedimentação e peneiramento, respectivamente, em amostra de solo saprolítico do Dacito Caxias.

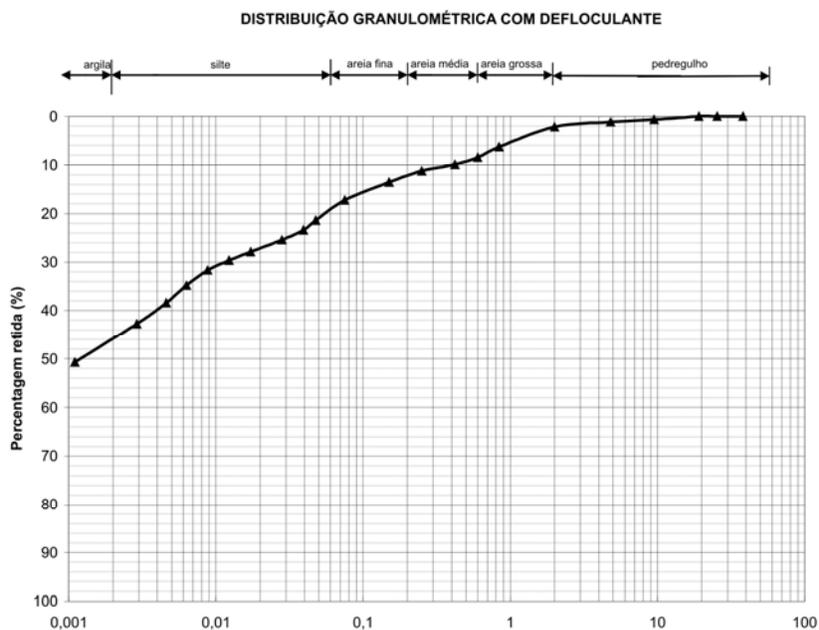
Amostra:	PTC 013 B		UMIDADE					
	Com defloculante		$W_{c+s+w}$ (gf)	64,64	52,16			
Provetta 02- com defloculante: a = -185x + 201.83 (1 <sup>ª</sup> três leituras) a' = -184.15x + 200.12 (demais leituras)		$W_{c+s}$ (gf):	62,94	50,01				
		$W_c$ (gf):	23,17	21,48				
		w (%) :	4,275	7,536				
Densímetro 5842/05 - com defloculante: $y = -5E-06x^2 - 0.00002x + 1,0061$		$W_{média}$ (%) :	4,275	7,536				
SEDIMENTAÇÃO								
P. Espec. R. dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> ):		2,637	Peso úmido (gf):		81,12	Peso seco (gf):	77,79	
Tempo Decorrido	Temperatura (°C)	Viscosidade (g.s/cm <sup>2</sup> )	Densidade L	Correção L <sub>d</sub>	Altura Queda (cm)	Diâmetro (mm)	(%) < Diâmetro	
40	s	26	8,936E-06	1,041	1,0022	9,25	0,0477	78,6
1	min	26	8,936E-06	1,04	1,0022	9,43	0,0393	76,58
2	min	26	8,936E-06	1,039	1,0022	9,62	0,0281	74,55
5	min	26	8,936E-06	1,0378	1,0022	9,01	0,0172	72,12
10	min	25,8	8,976E-06	1,037	1,00226	9,16	0,0123	70,38
20	min	25,8	8,976E-06	1,036	1,00226	9,34	0,0088	68,35
40	min	25,6	9,016E-06	1,0345	1,00231	9,62	0,0063	65,21
80	min	24,9	9,159E-06	1,0329	1,0025	9,91	0,0046	61,59
205	min	24	9,349E-06	1,031	1,00274	10,26	0,0029	57,25
1448	min	23,8	9,392E-06	1,0271	1,00279	10,98	0,0011	49,25

**Tabela 5.** Análise granulométrica por sedimentação do solo Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

PENEIRAMENTO						
W <sub>t</sub> #10 (gf):		81,12	W <sub>t</sub> #4 (gf):		923	
W <sub>s</sub> #10 (gf):		77,79	W <sub>s</sub> #4 (gf):		858,32	
Peneiras	Nº	mm	Mat. Retido (gf)	Material que passa (gf)		Material que passa (%)
				Parcial	Total	
	1 1/2"	38,1				100
	1"	25,4				100
	3/4"	19,1				100
	3/8"	9,5	5,73		852,59	99,33
	4	4,8	4,46		848,13	98,81
	10	2	8,44		839,69	97,83
	20	0,84	3,28	74,51		93,71
	30	0,6	1,72	72,79		91,54
	40	0,42	1,16	71,63		90,08
	60	0,25	1,06	70,57		88,75
	100	0,15	1,83	68,74		86,45
	200	0,075	2,94	65,8		82,75

**Tabela 6.** Análise granulométrica por peneiramento do solo Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

Na figura 24 apresenta-se a curva de distribuição granulométrica obtida a partir dos dados das tabelas 5 e 6.



**Figura 24.** Gráfico da distribuição granulométrica do solo Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

A tabela 7 apresenta os valores das percentagens das frações do material passante do solo Caxias. Esta tabela foi obtida através da análise da curva de distribuição granulométrica do material (Fig. 24).

(% ) PASSANTE	
Argila:	54
Silte:	27
Areia Fina:	7
Areia Média:	3
Areia Grossa:	7
Pedregulho:	2

**Tabela 7.** Percentagem de fração do material passante do solo Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

As tabelas 8 e 9 apresentam os resultados dos ensaios granulométricos por sedimentação e peneiramento, respectivamente, em amostra de solo saprolítico do Dacito Canyon.

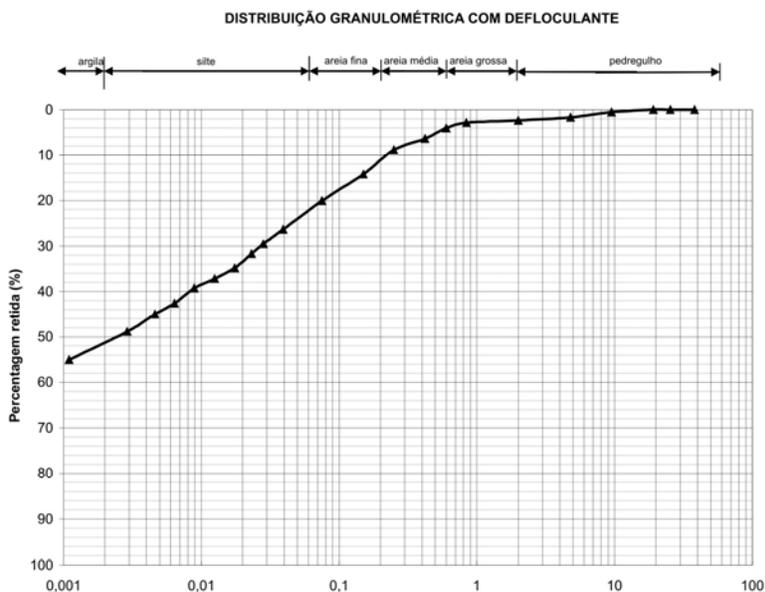
Amostra:	PTC 037 A Com defloculante		UMIDADE									
			$W_{c+s+w}$ (gf)	67,12	57,99	$W_{c+s}$ (gf)	65,06	55,87	$W_c$ (gf)	33,58	22,47	w (%)
Proveta 02- com defloculante: a = -185x + 201.83 (1 <sup>ª</sup> três leituras) a' = -184.15x + 200.12 (demais leituras)		Densímetro 5842/05 - com defloculante: y = -5E-06x <sup>2</sup> - 0.00002x + 1,0061	$W_{média}$ (%)	6,446								
SEDIMENTAÇÃO												
P. Espec. R. dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> ):		2,692	Peso úmido (gf):		78	Peso seco (gf):		73,28				
Tempo Decorrido	Temperatura (°C)	Viscosidade (g.s/cm <sup>2</sup> )	Densidade L	Correção L <sub>d</sub>	Altura Queda (cm)	Diâmetro (mm)	Diâmetro (%)					
60	s	27,5	8,64423E-06	1,0365	1,00177	10,08	0,0393	73,62				
2	min	27,5	8,64423E-06	1,035	1,00177	10,36	0,0282	70,44				
3	min	27,5	8,64423E-06	1,034	1,00177	10,54	0,0232	68,32				
5	min	27,5	8,64423E-06	1,0325	1,00177	9,99	0,0175	65,14				
10	min	27,2	8,70132E-06	1,0315	1,00186	10,17	0,0125	62,83				
20	min	27,2	8,70132E-06	1,0305	1,00186	10,35	0,0089	60,71				
40	min	27	8,7397E-06	1,029	1,00192	10,63	0,0064	57,4				
80	min	26,8	8,77835E-06	1,0279	1,00197	10,83	0,0046	54,96				
205	min	26,1	8,91574E-06	1,0263	1,00217	11,13	0,0029	51,15				
1440	min	26	8,93564E-06	1,0234	1,0022	11,66	0,0011	44,94				

**Tabela 8.** Análise granulométrica por sedimentação do solo Canyon, amostra PTC 037 A.

PENEIRAMENTO					
W <sub>t</sub> #10 (gf):		78			W <sub>t</sub> #4 (gf): 623,26
W <sub>s</sub> #10 (gf):		73,28			W <sub>s</sub> #4 (gf): 585,52
Peneiras		Mat. Retido (gf)	Material que passa (gf)		(%)
Nº	mm		Parcial	Total	Passante
1 1/2"	38,1				100
1"	25,4				100
3/4"	19,1				100
3/8"	9,5	3,33		582,19	99,43
4	4,8	6,67		575,52	98,29
10	2	3,86		571,66	97,63
20	0,84	0,39	72,89		97,11
30	0,6	0,88	72,01		95,94
40	0,42	1,73	70,28		93,63
60	0,25	1,85	68,43		91,17
100	0,15	4,07	64,36		85,75
200	0,075	4,37	59,99		79,92

**Tabela 9.** Análise granulométrica por peneiramento do solo Canyon, amostra PTC 037 A.

Na figura 25 apresenta-se a curva de distribuição granulométrica obtida a partir dos dados das tabelas 8 e 9.



**Figura 25.** Gráfico da distribuição granulométrica do solo Canyon, amostra PTC 037 A.

A tabela 10 apresenta os valores das percentagens das frações do material passante do solo Canyon. Esta tabela foi obtida através da análise da curva de distribuição granulométrica do material (Fig. 25).

(% ) PASSANTE	
Argila:	49
Silte:	29
Areia Fina:	11
Areia Média:	7
Areia Grossa:	1,5
Pedregulho:	2,5

**Tabela 10.** Porcentagem de fração do material passante do solo Canyon, amostra PTC 037 A.

#### 7.4.2 Peso Específico Real dos Grãos

O ensaio de peso específico real dos grãos é uma etapa necessária para a determinação da curva granulométrica dos solos (Fig. 23, 24 e 25). Nas tabelas 11, 12 e 13 são apresentados os valores das leituras dos ensaios de determinação do peso específico em amostras dos solos Forqueta, Caxias e Canyon, respectivamente.

Picnômetro N° (1 ou 2)		2	2	2	2	2
Temperatura do Pic. + Solo + Água (°C)	T	31,5	26,8	18	15,2	26
Solo Úmido (gf)	W <sub>h</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Picnômetro + Água (Calibração) (gf)	W <sub>w</sub> = f(T)	640,72	641,41	642,36	642,57	641,52
Picnômetro + Água + Solo (gf)	W <sub>ws</sub>	675,61	676,43	677,57	677,87	676,59
Solo Seco (gf)	W <sub>s</sub>	55,58	55,58	55,58	55,58	55,58
Água Deslocada	W <sub>w</sub> + W <sub>s</sub> - W <sub>ws</sub>	20,69	20,56	20,37	20,28	20,51
Peso Específico da água em T (g/cm <sup>3</sup> )		0,9953	0,9967	0,9987	0,9992	0,9969
Peso Específico Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s = W_s \cdot \rho_a / (W_w + W_s - W_{ws})$	2,673	2,694	2,725	2,739	2,702
Média $\rho_s$ (kN/m <sup>3</sup> )		26,54				
Picnômetro 01	Picnômetro 02	2,707				
y = -0.0028x <sup>2</sup> + 0.0185x + 627.63	y = -0.0029x <sup>2</sup> + 0.0222x + 642.9					

**Tabela 11.** Análise do peso específico real dos grãos do solo saprolítico Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

Picnômetro N° (1 ou 2)		2	2	2	2	2	2	2
Temperatura do Pic. + Solo + Água (°C)	T	31,5	29	20,2	17,2	14,9	13,9	29,2
Solo Úmido (gf)	W <sub>h</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Picnômetro + Água (Calibração) (gf)	W <sub>w</sub> = f(T)	640,72	641,10	642,17	642,42	642,59	642,65	641,08
Picnômetro + Água + Solo (gf)	W <sub>ws</sub>	673,28	673,81	674,76	675,23	675,33	675,45	673,97
Solo Seco (gf)	W <sub>s</sub>	52,65	52,65	52,65	52,65	52,65	52,65	52,65
Água Deslocada	W <sub>w</sub> + W <sub>s</sub> - W <sub>ws</sub>	20,09	19,94	20,06	19,84	19,91	19,85	19,76
Peso Específico da água em T (g/cm <sup>3</sup> )		0,9953	0,9961	0,9983	0,9988	0,9992	0,9993	0,9960
Peso Específico Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s = W_s \cdot \rho_a / (W_w + W_s - W_{ws})$	2,608	2,629	2,621	2,650	2,643	2,651	2,654
Média $\rho_s$ (kN/m <sup>3</sup> )		25,85						
Picnômetro 01	Picnômetro 02	2,637						
$y = -0.0028x^2 + 0.0185x + 627.63$	$y = -0.0029x^2 + 0.0222x + 642.9$							

**Tabela 12.** Análise do peso específico real dos grãos do solo saprolítico Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

Picnômetro N° (2 OU 6)		6	6	6	6	6	6	6
Temperatura do Pic. + Solo + Água (°C)	T	41,0	36,2	33	21,3	18,5	16,1	25,2
Solo Úmido (gf)	W <sub>h</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Picnômetro + Água (Calibração) (gf)	W <sub>w</sub> = f(T)	654,77	655,66	656,19	657,76	658,05	658,26	657,30
Picnômetro + Água + Solo (gf)	W <sub>ws</sub>	686,29	687,28	687,75	689,27	689,63	689,87	688,84
Solo Seco (gf)	W <sub>s</sub>	50,14	50,14	50,14	50,14	50,14	50,14	50,14
Água Deslocada	W <sub>w</sub> + W <sub>s</sub> - W <sub>ws</sub>	18,62	18,52	18,58	18,63	18,56	18,53	18,60
Peso Específico da água em T (g/cm <sup>3</sup> )		0,9919	0,9937	0,9948	0,9980	0,9986	0,9990	0,9971
Peso Específico Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s = W_s \cdot \rho_a / (W_w + W_s - W_{ws})$	2,670	2,691	2,684	2,686	2,698	2,703	2,687
Média $\rho_s$ (kN/m <sup>3</sup> )		26,39						
Picnômetro 06	Picnômetro 02	2,692						
$y = -0.0022x^2 - 0.0146x + 659.07$	$y = -0.0029x^2 + 0.0222x + 642.9$							

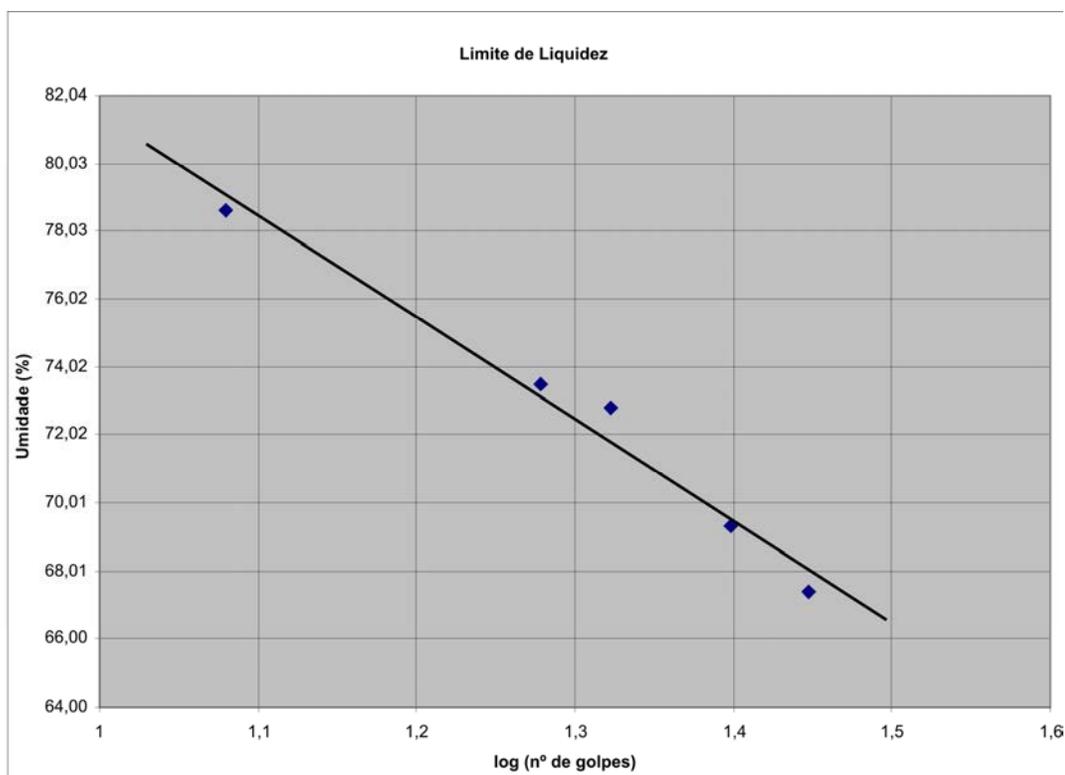
**Tabela 13.** Análise do peso específico real dos grãos do solo saprolítico Canyon, amostra PTC 037 A.

### 7.4.3 Ensaio de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP)

Nas tabelas 14 e 15 são apresentados os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) em amostra do solo Forqueta. A figura 26 é a representação gráfica dos valores especificados na tabela 14, em que se apresenta a reta que define a relação entre os teores de umidade e o número de golpes necessários para o fechamento da ranhura no solo no equipamento de Casagrande.

Limite de Liquidez					
Nº de golpes	28	25	19	21	12
Nº da cápsula	64	104	17	74	8
Peso total úmido (gf)	44,46	36,82	37,44	37,52	34,25
Peso total seco (gf)	40,08	31,46	31,09	31,47	29,28
Peso da cápsula (gf)	33,58	23,73	22,45	23,16	22,96
Peso da água (gf)	4,38	5,36	6,35	6,05	4,97
Peso do solo seco (gf)	6,5	7,73	8,64	8,31	6,32
Umidade (%)	67,38	69,34	73,50	72,80	78,64

**Tabela 14.** Resultado do Limite de Liquidez do solo saprolítico Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.



**Figura 26.** Gráfico Teor de Umidade x log de Golpes (Limite de Liquidez) do solo saprolítico Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

Limite de Plasticidade							
Nº da cápsula	6	64	8	74	75		
Peso total úmido (gf)	24,65	34,65	24,13	24,29	34,73		
Peso total seco (gf)	24,09	34,26	23,7	23,86	34,19		
Peso da cápsula (gf)	23,17	33,58	22,96	23,16	33,28		
Peso da água (gf)	0,56	0,39	0,43	0,43	0,54		
Peso do solo seco (gf)	0,92	0,68	0,74	0,7	0,91		
Teor de Umidade (%)	<b>60,87</b>	<b>57,35</b>	<b>58,11</b>	<b>61,43</b>	<b>59,34</b>		
				w média	59,42	w máximo	62,39
				nº dados	5	w mínimo	56,45

**Tabela 15.** Resultado do Limite de Plasticidade do solo saprolítico Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

A tabela 16 apresenta os valores do Índice de Plasticidade referente ao solo Forqueta, obtidos a partir dos resultados alcançados nos Limites de Liquidez e Plasticidade.

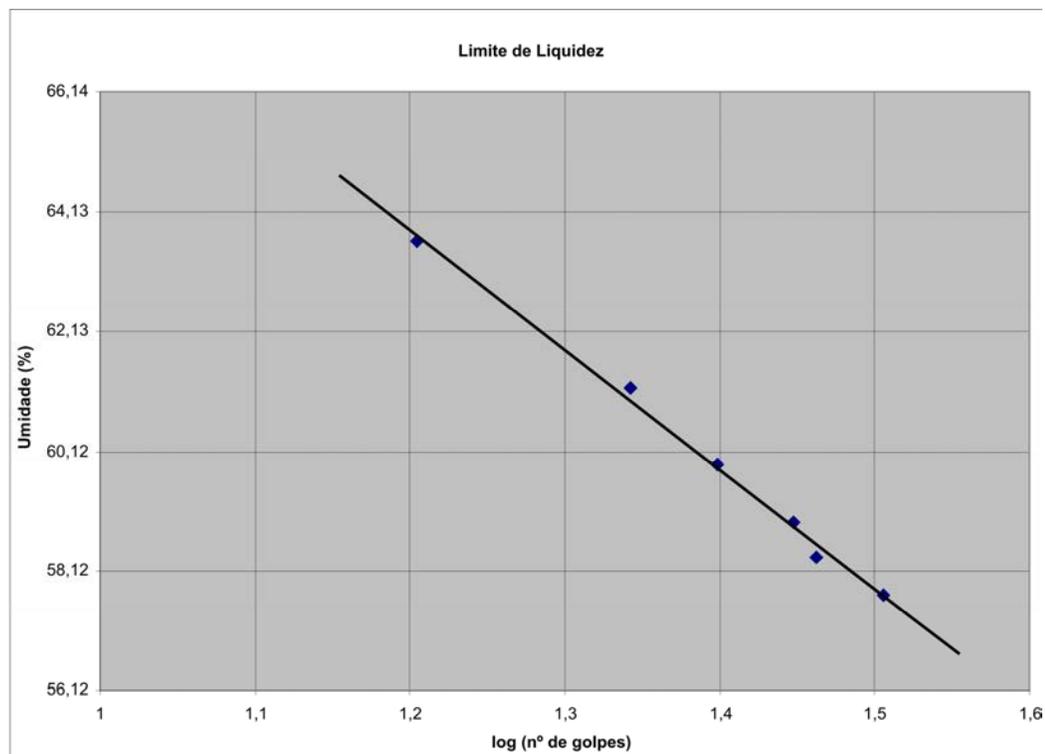
Limite de Plasticidade (%)	<b>59,4</b>
Limite de Liquidez (%)	<b>69,5</b>
Índice de Plasticidade (%)	<b>10,1</b>

**Tabela 16.** Resultado do Índice de Plasticidade do solo saprolítico Forqueta, amostra PTC 001 B, cota 736 m.

Nas tabelas 17 e 18 são apresentados os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) em amostra do solo Caxias. A figura 27 é a representação gráfica dos valores especificados na tabela 17, em que se apresenta a reta que define a relação entre os teores de umidade e o número de golpes necessários para o fechamento da ranhura no solo no equipamento de Casagrande.

Limite de Liquidez						
Nº de golpes	32	29	28	25	22	16
Nº da cápsula	8	104	75	64	16	17
Peso total úmido (gf)	33,48	35,94	47,57	43,75	39,8	34,33
Peso total seco (gf)	29,63	31,44	42,27	39,94	34,93	29,71
Peso da cápsula (gf)	22,96	23,73	33,28	33,58	26,97	22,45
Peso da água (gf)	3,85	4,5	5,3	3,81	4,87	4,62
Peso do solo seco (gf)	6,67	7,71	8,99	6,36	7,96	7,26
Umidade (%)	57,72	58,37	58,95	59,91	61,18	63,64

**Tabela 17.** Resultado do Limite de Liquidez do solo saprolítico Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.



**Figura 27.** Gráfico Teor de Umidade x log de Golpes (Limite de Liquidez) do solo saprolítico Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

Limite de Plasticidade					
Nº da cápsula	31	16	30	1	
Peso total úmido (gf)	24,11	28,24	24,36	24,01	
Peso total seco (gf)	23,71	27,92	23,99	23,73	
Peso da cápsula (gf)	22,47	26,95	22,86	22,85	
Peso da água (gf)	0,4	0,32	0,37	0,28	
Peso do solo seco (gf)	1,24	0,97	1,13	0,88	
Teor de Umidade (%)	<b>32,26</b>	<b>32,99</b>	<b>32,74</b>	<b>31,82</b>	
		w média	32,45	w máximo	34,07
		nº dados	4	w mínimo	30,83

**Tabela 18.** Resultado do Limite de Plasticidade do solo saprolítico Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

A tabela 19 apresenta os valores do Índice de Plasticidade referente ao solo Caxias, obtidos a partir dos resultados alcançados nos Limites de Liquidez e Plasticidade.

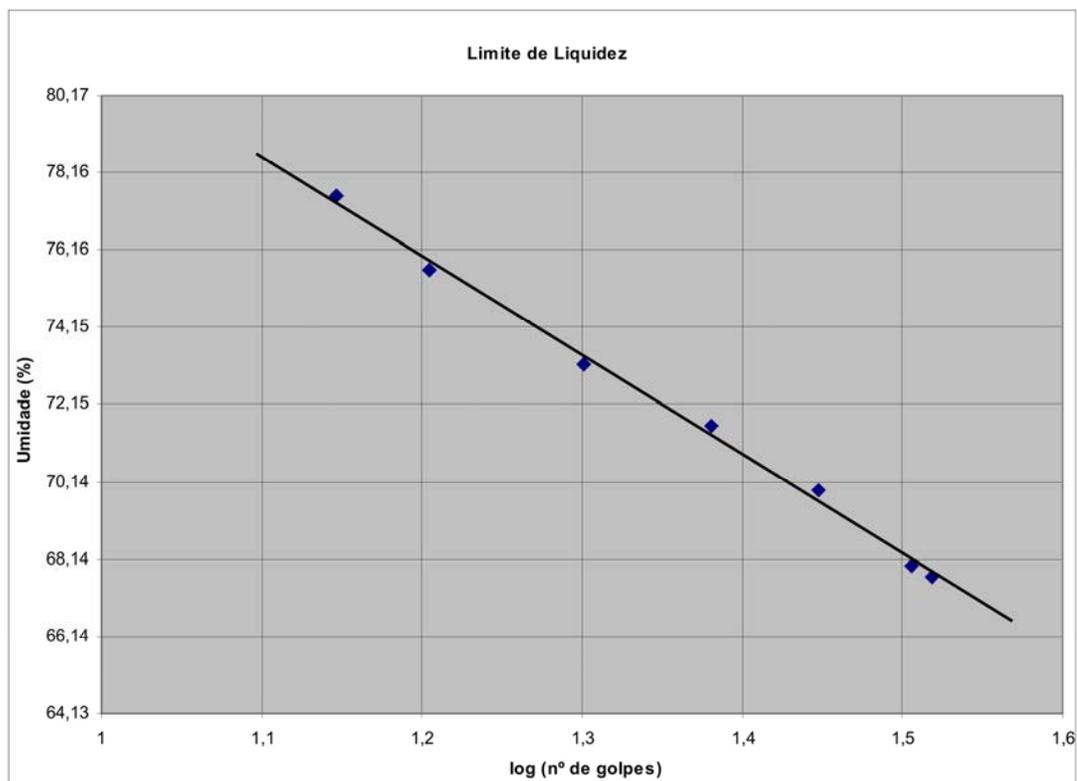
Limite de Plasticidade (%)	32,5
Limite de Liquidez (%)	59,9
Índice de Plasticidade (%)	27,4

**Tabela 19.** Resultado do Índice de Plasticidade do solo saprolítico Caxias, amostra PTC 013 B, cota 640 m.

Nas tabelas 20 e 21 são apresentados os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) em amostra do solo Canyon. A figura 28 é a representação gráfica dos valores especificados na tabela 20, em que se apresenta a reta que define a relação entre os teores de umidade e o número de golpes necessários para o fechamento da ranhura no solo no equipamento de Casagrande.

Limite de Liquidez							
Nº de golpes	33	32	28	24	20	16	14
Nº da cápsula	8	75	17	1	2A	104	64
Peso total úmido (gf)	35,47	42,25	31,78	35,79	33,94	35,24	46,31
Peso total seco (gf)	30,42	38,62	27,94	30,39	28,64	30,27	40,75
Peso da cápsula (gf)	22,96	33,28	22,45	22,85	21,4	23,7	33,58
Peso da água (gf)	5,05	3,63	3,84	5,4	5,3	4,97	5,56
Peso do solo seco (gf)	7,46	5,34	5,49	7,54	7,24	6,57	7,17
Umidade (%)	67,69	67,98	69,95	71,62	73,20	75,65	77,55

**Tabela 20.** Resultado do Limite de Liquidez do solo saprolítico Canyon, amostra PTC 037 A.



**Figura 28.** Gráfico Teor de Umidade x log de Golpes (Limite de Liquidez) do solo saprolítico Canyon, amostra PTC 037 A.

Limite de Plasticidade				
Nº da cápsula	30	31	74	
Peso total úmido (gf)	24	23,57	24,32	
Peso total seco (gf)	23,64	23,23	23,96	
Peso da cápsula (gf)	22,86	22,47	23,16	
Peso da água (gf)	0,36	0,34	0,36	
Peso do solo seco (gf)	0,78	0,76	0,8	
Teor de Umidade (%)	<b>46,15</b>	<b>44,74</b>	<b>45,00</b>	
	w média	45,30	w máximo	47,56
	nº dados	3	w mínimo	43,03

**Tabela 21.** Resultado do Limite de Plasticidade do solo saprolítico Canyon, amostra PTC 037 A.

A tabela 22 apresenta os valores do Índice de Plasticidade referente ao solo Canyon, obtidos a partir dos resultados alcançados nos Limites de Liquidez e Plasticidade.

Limite de Plasticidade (%)	45,3
Limite de Liquidez (%)	70,9
Índice de Plasticidade (%)	25,6

**Tabela 22.** Resultado do Índice de Plasticidade do solo saprolítico Canyon, amostra PTC 037 A.

## **8 DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão agrupados e discutidos os resultados expostos no capítulo anterior de acordo com os solos identificados.

### **8.1 SOLO FORQUETA**

O solo Forqueta ocorre em áreas mais planificadas da cidade, como a região do aeroporto e na região administrativa de Forqueta, de onde saiu sua denominação pela sua presença mais característica nessa localidade (BRESSANI, FLORES E NUNES, 2005). Esse solo é originado da alteração do Dacito Forqueta, considerado como topo do Dacito Caxias por Bressani, Flores e Nunes (2005), mas que nesse trabalho será tratado como um outro derrame por apresentar diferenças texturais, estruturais e composicionais (capítulo 7) importantes para a geotécnica.

O Dacito Forqueta apresenta uma estrutura de fluxo (Fig. 29) que causa uma aceleração do intemperismo químico, alterando o material para um solo de coloração bruno-avermelhado com bandas de alteração (Fig. 30). É composto mineralogicamente por quartzo, hematita, caolinita e por argilo-minerais expansivos como a vermiculita (Fig. 19).



**Figura 29.** A – fotografia do Dacito Forqueta com estrutura de fluxo, ponto PTC 001; B – contato, ao longo da VRS 834, entre o Dacito Forqueta e o solo, ponto PTC 002.

A curva de distribuição granulométrica do solo Forqueta (Fig. 23) revela o notório predomínio da fração argila nesse material, com um percentual de cerca de 71,5% de material de granulometria argila e apenas 17% de fração silte e 11,5% de fração maior ou igual a areia. Em relação aos parâmetros de plasticidade se obteve para esse solo valores de 69,5% de limite de liquidez e 59,4% de limite de plasticidade. Esses dados podem ser comparados na tabela 23.

O solo Forqueta é um solo argiloso e apresentou uma plasticidade média, provavelmente devido à ocorrência dos argilo-minerais expansivos.



**Figura 30.** A – corte em estrada vicinal a VRS 834, nota-se a coloração bruno-avermelhado do solo Forqueta, ponto PTC 001; B – solo Forqueta com resquícios da estrutura de fluxo, ponto PTC 001.

## 8.2 SOLO CAXIAS

O solo Caxias tem uma extensa área de ocorrência, recobrindo principalmente a região central da cidade e grande parte da área ao sul do centro. Sua nomenclatura foi definida anteriormente por Bressani, Flores e Nunes (2005) e será mantida neste trabalho.

Esse solo tem coloração que varia do cinza a levemente avermelhados, com estruturas estratificadas horizontais geralmente visíveis. É originado da alteração da porção mediana do Dacito Caxias, derrame que apresenta como características principais estratos tabulares sub-horizontais na porção basal, que variam de 5 a 30 cm de espessura (Fig. 31), e, por vezes, desenvolvem uma alteração esferoidal.

O solo Caxias é composto mineralogicamente por quartzo, plagioclásio, caolinita, cristobalita e hematita além de argilo-minerais expansivos como esmectita, ilita e vermiculita (Fig. 20 e 21).



**Figura 31.** A – Dacito Caxias com disjunção tabular visível, ponto PTC 013; B – vista geral de uma antiga pedreira onde se observa o contato entre o Dacito Caxias e o solo, ponto PTC 013.

A curva de distribuição granulométrica do solo Caxias (Fig. 24) mostra que esse material possui um percentual de cerca de 54% de material de granulometria argila e 27% de fração silte e 19% de fração maior ou igual a areia. Em relação aos parâmetros de plasticidade

se obteve para esse solo valores de 59,9% de limite de liquidez e 32,5% de limite de plasticidade. Esses dados podem ser comparados na tabela 23.

O solo Caxias é um solo argilo siltoso e apresentou uma plasticidade alta, provavelmente devido à ocorrência dos argilo-minerais expansivos.

### 8.3 SOLO CANYON

O solo Canyon recobre uma área bastante extensa da região de Caxias do Sul. Sua nomenclatura foi definida anteriormente por Bressani, Flores e Nunes (2005) em virtude de seus afloramentos mais característicos ocorrerem na base do vale que define o bairro Canyon. Este solo é originado da alteração do Dacito Canyon (Fig. 32).

O solo tem coloração que varia de vermelhos a bruno-avermelhados e um perfil de solo característico espesso (5 a 8 metros) (Fig. 33). Pode conter em sua composição mineralógica argilas expansivas como illita e esmectita, além de caolinita, quartzo e hematita (Fig. 22). A plasticidade deste solo está diretamente relacionada com a presença desses argilo-minerais expansivos.



**Figura 32.** Dacito Canyon com coloração avermelhada devido à alteração, ponto PTC 008.

A curva de distribuição granulométrica do solo Canyon (Fig. 25) mostra que esse material possui um percentual de cerca de 49% de material de granulometria argila e 29% de fração silte e 11% de fração maior ou igual a areia. Em relação aos parâmetros de plasticidade se obteve para esse solo valores de 70,9% de limite de liquidez e 45,3% de limite de plasticidade. Esses dados podem ser comparados na tabela 23.

O solo Canyon é um solo argilo siltoso que apresentou uma alta plasticidade devido à presença dessas argilas provavelmente originadas da alteração da porção vítrea superior do Dacito Canyon. Esse solo tem grande importância para o mapeamento, pois diversos acidentes geotécnicos já ocorreram em áreas recobertas por esse material.



**Figura 33.** A - Solo Canyon com coloração bem avermelhada, ponto PTC 007; B – Dacito Canyon aflorando no leito do arroio Tega, ponto PTC 007.

AMOSTRA	GRANULOMETRIA (%)			ÍNDICES DE PLASTICIDADE (%)			IP/ (% argila)
	ARGILA	SILTE	≥ 0,06mm	LL	LP	IP	
<b>Solo Forqueta</b>	71,5	17	11,5	69,5	59,5	10,0	0,10
<b>Solo Caxias</b>	54,0	27	19	60,0	32,5	27,5	0,51
<b>Solo Canyon</b>	49,0	29	22	71,0	45,5	25,5	0,52

**Tabela 23.** Resumo dos resultados dos ensaios geotécnicos dos solos encontrados neste trabalho.

Segundo Bressani, Flores e Nunes (2005), outros dois tipos de solos são encontrados na área urbana de Caxias do Sul (solos Ana Rech e Galópolis). Tais materiais não foram abrangidos neste trabalho por encontrarem-se em cotas que não foram mapeadas nos trabalhos de campo realizados.

#### 8.4 SOLO ANA RECH

O solo Ana Rech ocorre em grande parte da área norte da cidade, principalmente em regiões com cotas entre 780 m e 900 m. Seus afloramentos mais característicos ocorrem na região administrativa de Ana Rech.

Esse solo é originado do Dacito Ana Rech e inclui a presença de horizontes B incipientes e solos saprolíticos. Tem características arenosas a granulares grosseiros com predominância da fração areia e silte. Por ocorrer em regiões aplainadas de cotas bastante elevadas ocorre um favorecimento na oxidação do material, formando solos de cor Bruno-amarelados com excelente resistência ao cisalhamento.

O solo Ana Rech tem comportamento não-plástico, apresentando problemas geotécnicos somente nas transições com o solo Forqueta, posicionado abaixo na topografia. Nesses locais a topografia torna-se ligeiramente íngreme ocorrendo risco geotécnico devido a baixa resistência do material inferior.

## 8.5 SOLO GALÓPOLIS

Os solos Galópolis ocorrem em vales de cotas inferiores, entre 470 m e 600 m, principalmente ao sul de Caxias do Sul. Sua ocorrência mais típica é na localidade de Galópolis.

Esse solo é originado dos Dacitos Galópolis, e suas áreas de ocorrência são zonas de grande declividade, encontrando-se geralmente misturado com materiais transportados de cotas superiores. O solo Galópolis tem cor Bruno-avermelhado e comportamento plástico. Há a presença de solos do horizonte B e solos saprolíticos próximos aos depósitos de colúvios. Apresentam um grau de intemperismo acentuado, tanto por apresentarem uma mineralogia especial quanto pelas condições favoráveis de umidade que ocorrem nestas regiões de cotas baixas.

## 9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método de mapeamento de unidades geotécnicas, baseado no cruzamento dos dados adquiridos com a análise qualitativa da geologia, geomorfologia e pedologia, mostrou-se adequado para a área urbana de Caxias do Sul. Nesse trabalho foram mapeadas três Unidades Geotécnicas, das cinco que ocorrem na área, que correspondem a grupos de solos de comportamento semelhante entre si (granulometria e plasticidade) e originados da mesma rocha.

Os contatos entre os materiais foram estabelecidos a partir da análise de fotografias aéreas. Em campo pode-se observar alguns contatos bem nítidos entre os materiais de origem, no entanto, observou-se alguns contatos transicionais por variação no intemperismo, o que impediu uma definição clara do mesmo.

Os materiais de origem desses solos são rochas vulcânicas dacíticas com composições químicas similares, que apresentam algumas importantes diferenças estruturais. O Dacito Forqueta apresenta uma estrutura de fluxo bem marcada, evidenciada por bandas de diferente coloração; o Dacito Caxias apresenta estratos tabulares sub-horizontais na sua porção basal; e o Dacito Canyon é comumente encontrado com uma coloração avermelhada devido à oxidação dos minerais opacos e quando não alterado pode-se observar uma estrutura de fluxo subvertical, que definem bandas com coloração distinta.

Os solos observados e mapeados, originários desses dacitos, apresentaram resultados bem definidos nos ensaios de limites de liquidez e plasticidade. Os solos Caxias e Canyon apresentaram uma alta plasticidade, enquanto o solo Forqueta uma plasticidade baixa. Estas diferenças têm reflexo direto no comportamento de engenharia dos solos, sendo importante sua consideração na execução de obras de arrimo, escavações urbanas e fundações. Cabe salientar que para se ter um estudo geológico-geotécnico profundo da área necessita-se de um maior número possível de informações sobre o meio físico, tornando possível o controle sobre as diversas variáveis que envolvem o processo de caracterização geotécnica dos materiais.

Assim, recomenda-se que sejam incorporadas a pesquisa apresentada, informações referentes a estudos sobre parâmetros geotécnicos específicos como permeabilidade, deformabilidade e resistência ao cisalhamento e estudos hidrogeológicos e pedológicos em escalas compatíveis. Inspeções de campo, com uma maior coleta de amostras e análise desses materiais por diferentes métodos, a fim de detalhar mais as suas composições e processos atuantes sobre sua geração, associadas a uma detalhada investigação do subsolo, através de métodos diretos e indiretos.

## REFERÊNCIAS

ABNT; 1984. Solo – análise granulométrica. **Norma Técnica NBR 7181**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ABNT; 1984. Solo – determinação do limite de liquidez. **Norma Técnica NBR 6459**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ABNT; 1984. Solo – determinação do limite de plasticidade. **Norma Técnica NBR 7180**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ABNT; 1986. Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. **Norma Técnica NBR 6457**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ABNT; 1988. Peneiras para ensaio com tela de tecido metálico. **Norma Técnica NBR 5734**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ASTM; 1993. Standard Practice for Wet Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. **Designation D 2217-85**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

ASTM; 1995. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. **Designation D 4318-95a**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.R.; PAPATRECHAS, C.; PICCIRILLO, E.M.; ROISEMBERG, A.; STOLFA, D.; 1986. Petrogenetic Aspects of Acid and Basaltic Lavas from the Paraná Plateau (Brazil): Geological, Mineralogical and Petrochemical Relationships. *Journ. of Petrol.*, 27(4):915-944.

BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F.; 2005. **Desenvolvimento de Estudos de Engenharia Geotécnica/Geologia com Vistas à Geração de Relatório e Mapa Geotécnico dos Solos e Rochas Superficiais da Área Urbana da Cidade de Caxias do Sul**. Relatório final, Prefeitura Municipal de Caxias do Sul.

BSI; 1990. Soils for civil engineering purposes. Part 1. Classification tests. **British Standard Method BS 1377: Part 7**. British Standards Institution, London.

DUTRA, C. V.; 1984. A Fluorescência de Raios-X na Geologia. In: GOMES, C. B. **Técnicas Analíticas Instrumentais aplicadas à Geologia**. São Paulo, Edgard Blücher LTDA. p. 84-120.

- GARLAND, F.; HAWKESWORTH, C.J.; MANTOVANI, M.S.M.; 1995. Description and Petrogenesis of the Paraná Rhyolites, Southern Brazil. *J.Petrol.*, 36(5):1193-1227.
- HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R.; 2009. **Princípios de análise instrumental**. Tradução Celio Pasquini, Jarbas José Rodrigues Rohwedder, Ivo Milton Raimundo Jr., Solange Cadore, Isabel Cristina Sales Fontes Jardim . 6 ed. Porto Alegre: Bookman. 1056 p.
- MACIEL FILHO, C. L.; 1997. **Introdução à geologia de engenharia**. 2 ed. Santa Maria: Editora da UFSM; Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 284 p.
- NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F.; 2008. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. **Revista Brasileira de Geociências**. 38(1): 178-195.
- NORONHA, F. L.; 2007. **Estudo geológico-geotécnico da área urbana de Santa Cruz do Sul – RS**. Trabalho de conclusão do curso de geologia do instituto de geociências – UFRGS. 104 páginas.
- NUNES, L. F.; 2004. **Mapeamento geotécnico preliminar da área urbana de Caxias do Sul – RS**. Trabalho de conclusão do curso de geologia do instituto de geociências – UFRGS. 100 páginas.
- PASQUALETTO, A. L.; 1999. **A evolução urbana de Caxias do Sul**. Trabalho de conclusão de curso de bacharelado em geografia do instituto de geociências – UFRGS. 69 páginas.
- PEATE, D.W.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M.M.S.; 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (S. America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volc.*, 55:119-139.
- RADAMBRASIL. 1986. **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**. Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 33.
- ROISENBERG, A. & VIERO, P.; 2000. O vulcanismo mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: **Holz, M. & De Ros, L. F. (eds.) Geologia do Rio Grande do Sul, UFRGS-Cigo**, Porto Alegre. P. 355-374.
- REGINATO, Pedro Antônio Roehe. 2003. **Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas – RS**. 2003. 254 f. Tese de doutorado, PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RENNE, P.R.; DECKART, K.; ERNESTO, M.; FÉRRAUD, G.; PICCIRILLO, E.M.; 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and implications to Paraná flood volcanism. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 144:199-212.

SALOMÃO, F. X. T. & ANTUNES, F. S.; 1998. solos em pedologia. In: **OLIVEIRA, A. M. S. & ALVES DE BRITO, S. N. (eds.) Geologia de engenharia.** São Paulo: ABGE. 586 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S.; 2008. **Solos do Rio Grande do Sul.** 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS – ASCAR. 222 p.

TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKSWORTH, C.; MANTOVANI, M.M.S.; 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 121:333-348.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1 – TABELA DE PONTOS

PONTO	UTM		COTA	ALTÍMETRO	LITOLOGIA	AMOSTRA
PTC 001	472122	6772844	736	737	FORQUETA	A (FORQUETA), B (SOLO)
PTC 002	472099	6773235	729	725	FORQUETA	A (FORQUETA), B (FORQUETA)
PTC 003	472033	6773519	715	714	FORQUETA	A (FORQUETA)
PTC 004	472013	6773900	717	715	FORQUETA	A (FORQUETA)
PTC 005	473500	6775728	655	656	FORQUETA	A (FORQUETA), B (FORQUETA), C (FORQUETA)
	473617	6775789	647	648	FORQUETA	
PTC 006	473724	6775838	633	631	CAXIAS	A (CAXIAS, ROCHA ALTERADA)
PTC 007	474512	6776053	550	552	CANYON	A (CANYON), B (SOLO), C (CANYON)
PTC 040	473700	6775824	638	638		
PTC 041	473925	6775894	614	614		
PTC 042	473953	6775909	609	608	CAXIAS/CANYON	
PTC 008	474005	6775929	600	601	CANYON	A (CANYON)
PTC 009	474070	6776037	583	584	CANYON	
PTC 010	475489	6775155	590	591	CANYON	A (CANYON)
PTC 011	475103	6775674	570	569	CANYON	A (CANYON)
PTC 012	480022	6779087	607	610	CAXIAS	A (CAXIAS)
PTC 043	480024	6779064	640	642	CAXIAS	
PTC 044	479806	6779185	627	629	CAXIAS	
PTC 013	479368	6779223	640	641	CAXIAS	A (CAXIAS), B (SOLO)
PTC 014	478873	6779783	612	612	CAXIAS/CANYON	
PTC 015	478980	6779620	621	622	FORQUETA	A (FORQUETA)
PTC 016	489061	6777791	777	724	CAXIAS	A (CAXIAS), B (SOLO)
PTC 017	489730	6777515	741	730	CAXIAS	A (CAXIAS)
PTC 018	490009	6777483	732	736	FORQUETA	A (FORQUETA)
PTC 019	490166	6777491	733	732	FORQUETA	A (FORQUETA)
PTC 020	490255	6777530	728	729	CAXIAS	A (CAXIAS)
PTC 021	490304	6777584	727	726	CAXIAS	A (CAXIAS)
PTC 022	491160	6777238	711	711	CAXIAS	A (CAXIAS)
PTC 023	491014	6777074	696	696	CAXIAS	A (CAXIAS)
PTC 024	491410	6776681	683	684	CAXIAS/CANYON	

PTC 025	491356	6776539	674	675	CANYON	A (CANYON)
PTC 026	491406	6776293	657	656	CANYON	A (CANYON), B (SOLO)
PTC 027	487274	6769101	736	737		A (CAXIAS)
PTC 028	487216	6769763	746	746		B (CAXIAS)
PTC 029	486586	6771158	677	677	CAXIAS	
PTC 030	475218	6770030	749	748	PC ESTRADA	
PTC 031	475288	6770064	746	746	FORQUETA	
PTC 032	475240	6769954	733	732	FORQUETA	A (FORQUETA)
PTC 033	474668	6769061	752	753	FORQUETA	
PTC 034	474156	6768666	755	755	PC ESTRADA	
PTC 035	473647	6775806				
PTC 036	473949	6775913			CONTATO CAXIAS/CANYON	A (SOLO)
PTC 037	480471	6778273			CONTATO CAXIAS/CANYON	A (SOLO)
PTC 038	481030	6768023	707		CAXIAS	
PTC 039	479499	6763531	446	479	CONTATO CAXIAS/CANYON	

APÊNDICE 2 – MAPA DE UNIDADES GEOTÉCNICAS

MAPA DE UNIDADES GEOTÉCNICAS  
ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL (RS)

