

Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS

Geotechnical properties of residual basalt soil of Ijuí region

Francielle Diemer, Dimas Rambo, Luciano P. Specht, Cristina E. Pozzobon

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, RS

e-mail: franciellediemer@gmail.com, specht@unijui.edu.br

RESUMO: O solo é o material mais utilizado na Engenharia Civil, pois se faz presente em praticamente todos os empreendimentos, seja como material de construção ou como suporte das cargas atuantes. Sendo assim, o conhecimento das suas propriedades geotécnicas é de fundamental importância para o desenvolvimento de projetos com segurança e economia. Este trabalho, de maneira pioneira, objetiva reunir dados de oito solos que foram pesquisados no período 2003-2008 no LEC da UNIJUÍ, analisá-los e, finalmente, transformá-los em informações geotécnicas que podem orientar a tomada de decisões que envolvem projetos de Engenharia Civil. Os resultados permitem concluir que o solo residual de basalto, encontrado na cidade e na região de Ijuí/RS, é bastante poroso (com alto índice de vazios) e argiloso e é classificado como MH e A-7-5. Resultados dos ensaios de compactação, cisalhamento direto e condutividade hidráulica também estão apresentados ao longo desse trabalho, com respectivas conclusões, bem como análise do comportamento mecânico e hidráulico do solo compactado com adição de fibras de polipropileno.

ABSTRACT: Natural soil is the most used engineering material and is present in all the engineering projects, either as construction material or as support of loads. The knowledge about geotechnical properties of these materials is very importance to joint safety and economy on geotechnical design. With that motivation, this work, in a pioneering way, aim to present data of eight soils that were researched in the period 2003-2008 in the UNIJUÍ's Civil Engineering Laboratory, to analyze them and, finally, to transform them in geotechnical information that can guide decisions involving civil engineering projects. The results shown that basalt residual soil, found in Ijuí/RS area it is quite porous (with high void index), clayey and classified as MH and A-7-5. The results of the compaction, direct shear and permeability tests are also presented in the paper, with respective conclusions. The paper, none the less present analysis of mechanical / hydraulic behavior of soil-fiber mixes.

1. INTRODUÇÃO

O solo é o material mais utilizado na Engenharia Civil, pois se faz presente em praticamente todos os empreendimentos, seja como material de construção ou como suporte das cargas atuantes. Além disso, é considerado o material mais barato, dada a sua presença, em abundância, no substrato da maioria das obras de engenharia. Dessa forma, é natural adaptá-lo às condições peculiares de cada aplicação.

Para isso, entretanto, se faz necessário caracterizar adequadamente as suas propriedades geotécnicas. Essa caracterização se refere às investigações do solo que se pretende utilizar, a fim de determinar seu tipo, estratigrafia, composição e

estrutura, enfim, suas propriedades geotécnicas, de maneira a embasar os projetos de engenharia. Tal princípio é ressaltado em publicações consagradas no contexto nacional [1-4] e internacional [5-8].

Em edificações, estradas, taludes, barragens, aterros sanitários e, ainda, em outras obras de engenharia, problemas envolvendo a infraestrutura ou o desconhecimento das propriedades do solo podem comprometer a utilização ou o desempenho do empreendimento, levando a grandes prejuízos financeiros.

Para a solução de muitos desses problemas se faz necessária a melhoria das características do solo, seja para seu uso como material de fundação, ou como material de construção de aterros, barragens, etc.; de maneira a assegurar

que o solo seja capaz de suportar as cargas aplicadas sem deformação excessiva; de manter a sua resistência e estabilidade e, em alguns casos, também; de manter a sua estanqueidade.

As técnicas fundamentais de melhoria das propriedades dos materiais naturais são: drenagem, estabilização química, estabilização mecânica, estabilização granulométrica e reforço [5, 9-11].

Nesse contexto, este trabalho tem os objetivos de: contribuir com o avanço do conhecimento na área de geotecnia, sendo pioneiro, ao reunir dados de oito solos que foram pesquisados no período 2003-2008 no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ [12-20]; analisar tais dados; e, finalmente, transformá-los em informações geotécnicas que podem orientar a tomada de decisões que envolvem projetos de Engenharia Civil a serem empreendidos na região em estudo.

2. LOCAL DE ESTUDO

2.1 Caracterização geológica do local

O município de Ijuí está situado na zona de capeamento basalto-arenítico do Planalto Meridional, na região sul do Brasil [16]. O Planalto Meridional surgiu de uma vasta massa de lavas basálticas, conhecidas como “*trapp*”, que conferem certas características geológicas a essa região do país.

O basalto, principal elemento que dá origem ao solo da área em estudo, originou-se a partir dos grandes derrames eruptivos da era mezozóica. Essas sucessões de derrames formaram uma série de pseudocamadas que, trabalhadas pela erosão diferencial nas encostas, fizeram surgir uma topografia em escada [21]. Rambo [22] refere que essas foram as últimas transformações geológicas ocorridas no sul do Brasil.

O planalto de lavas basálticas triássicas apresenta, nessa região, uma série de dissecamentos primários em forma de coxilhas suaves e onduladas, sendo a drenagem do tipo regular condicionada. Conforme há maior encaixamento da drenagem, há maior dissecamento deste planalto, aparecendo, então, terrenos fortemente ondulados. Essa área foi denominada de platô dissecado transicional [23].

Pode-se dizer que o local em estudo se caracteriza pela ocorrência de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e de uma camada sedimentar sobreposta, pertencente à Formação Tupanciretã.

Os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas mais abundantes e sua maior ocorrência é na forma de derrames. No Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde perfazem mais de 90% das rochas vulcânicas aí existentes. Tem mineralogia essencial composta por 35 a 50% de plagioclásio cálcico (labradorita); 20 a 40% de augita; 5 a 15% de magnetita ou ilemita; e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. Sua textura é afanítica, microgranular, por vezes amigdaloidal [24].

O material geológico de sua superfície apresenta solos férteis com elevado teor de bases permutáveis, principalmente cálcio e magnésio, e é formado pela evolução das rochas efusivas básicas, principalmente basalto [21]. Os solos da Formação Tupanciretã apresentam grande fração de areia, boa drenagem e alto potencial erosivo. Já os solos residuais de basalto apresentam textura argilosa de cor vermelha escura, com uma drenagem bem desenvolvida.

A Figura 1 apresenta um mapa que delimita as províncias geomorfológicas e permite visualizar a Formação Serra Geral.

A região onde se assenta o município de Ijuí teve suas camadas estruturadas depois dos derrames eruptivos de basalto do período mezozóico, o que deu origem a um relevo ondulado e evidenciado pelo solo vermelho e roxo, característico da decomposição destas rochas. Devido ao diaclasamento, estrutura e baixo conteúdo de minerais resistentes, o solo de basalto do município de Ijuí foi fortemente intemperizado, resultando, na maior parte da área, em solos profundos [21 e 25].

Na região de Ijuí, os perfis de solos são homogêneos, classificados pedologicamente como latossolos havendo pouca diferenciação entre os horizontes, que apresentam as seguintes características morfológicas principais:

- **Horizonte A:** espesso (varia de 30 a 60cm aproximadamente), de coloração avermelhada escura, argiloso (mais de 60% de argila), com estrutura desenvolvida granular ou em blocos subangulares, poroso, friável, ligeiramente plástico e pegajoso;

- **Horizonte B:** muito espesso (mais de 200cm), de coloração vermelha escura, argiloso (com mais de 75% de argila), pouco estruturado, poroso, friável, ligeiramente plástico e pegajoso quando o material for muito trabalhado;

- **Horizonte C:** a mais de 200cm de profundidade, é espesso e composto por basalto intemperizado, possuindo maior teor de silte.

2.2 Local de coleta das amostras

A coleta das amostras se deu em oito locais distintos, no município de Ijuí (solos A, B, C, D, E) ou em áreas adjacentes (solos F, G, H), conforme mostra a Figura 2. A Tabela 1 traz as coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) de cada uma das amostras.

3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Para realização de qualquer obra de engenharia, o profissional deve conhecer o tipo de solo que irá trabalhar. Para tanto, este solo necessita ser identificado e classificado.

A classificação do solo a partir dos tamanhos das partículas é uma das formas mais comuns de classificá-lo; todavia, como a fração de argila pode diferenciar amplamente as suas propriedades físicas, essa forma de classificação (apenas pelo tamanho das partículas) é inadequada quando o solo contém finos (argilo-minerais). Então, sistemas de classificação dos solos, levando em conta os limites de Atterberg associados à granulometria tornam-se mais úteis (apresentados na Tabela 2 e na Figura 3).

A classificação dos solos apresentados neste trabalho foi baseada em três métodos: classificação granulométrica (triangular – HRB); unificada; e rodoviária. Um resumo dessa classificação está apresentado na Tabela 3.

Todos os oito solos estudados, segundo a classificação granulométrica, são argilosos, pois segundo Vargas [1], solos argilosos são aqueles que, na sua distribuição granulométrica apresentam porcentagem de argila entre 45 e 100%. Essa conclusão está representada na Figura 3.

No sistema de classificação unificado, são considerados aspectos referentes ao tamanho dos grãos e a plasticidade da fração fina. Os solos A, B, C, D, E, F e G classificam-se como MH – silte de alta compressibilidade; porém o solo H classificou-se como solo CH – argila de alta compressibilidade. Esta diferença é pouco significativa, pois há uma pequena diferença no valor de LL e IP deste solo para os demais.

No sistema rodoviário de classificação, que é baseado nos limites de Atterberg e, também, na granulometria, os solos A, B, C, D, E, F e G classificaram como A-7-5, porém, novamente o solo H saiu do padrão, classificando-se como A-7-6. Isso se dá novamente devido aos valores de LL e IP.

Encontram-se na Tabela 2, as propriedades do solo *in situ*, na qual pode ser observado o alto índice de vazios, a alta umidade (acima de 30%) e a característica de não saturação, em todas as amostras utilizadas.

4 PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO E CBR

A resistência de um solo, segundo os conceitos tradicionais de solos granulares, dependem principalmente de sua compactação e, conseqüentemente, de sua densidade. Quanto mais compacto e denso é o solo, mais resistente ele será.

Segundo Vargas [1], o estudo da compactação do solo é indispensável em obras de terra, principalmente na construção de aterros. Trata-se de um processo mecânico ou manual, realizado através da aplicação de pressão, impacto ou vibração, que visa aumentar a massa específica aparente seca do solo, expulsando os vazios de ar. Esse processo confere ao solo maior resistência ao cisalhamento, menor compressibilidade e maior impermeabilidade, resultando, conseqüentemente, na estabilidade permanente do aterro.

Bonafé [12] determinou os parâmetros de compactação do solo A nas três energias (normal, intermediária e modificada). Os resultados obtidos por Bonafé [12] estão apresentados na Figura 4(a).

Bernardi [16] realizou um estudo das propriedades mecânicas de quatro solos residuais de basalto, coletados na região de Ijuí (denominados de solos A, F, G e H). Para tanto, executou um conjunto de ensaios em amostras deformadas que buscavam determinar os parâmetros de compactação na energia normal (w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$) desses solos, visando utilizá-los em projetos e construções de barragens.

A Figura 4(b) mostra as curvas de compactação correspondentes a esses solos. É possível observar os valores de w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$ e perceber que há uma pequena variação nas

características dos quatro solos. A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros de compactação.

Apesar desta variação, considera-se que os valores de w_{ot} encontrados são bastante próximos (entre 28,0 e 35,0%), bem como os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (entre 13,8 e 15,1kN/m³). Também é possível verificar que a umidade ótima é inversamente proporcional ao $\gamma_{dm\acute{a}x}$, pois na medida em que aumenta a w_{ot} dos solos, diminui o valor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Essa correlação é resultante da granulometria dos solos, ou seja, quanto mais grosso for o solo, menor será sua w_{ot} e maior será sua $\gamma_{dm\acute{a}x}$.

Outra maneira muito utilizada para se aumentar a resistência de um solo é a sua estabilização granulométrica, que compreende na mistura de materiais com granulometrias distintas de maneira a aumentar a resistência natural do solos. Para tanto, os melhores materiais são aqueles que devem a sua resistência não só ao atrito interno mas também a coesão.

Pensando nisso, Wallau [15] realizou um estudo laboratorial com várias misturas (com o solo A), visando à utilização da estabilização granulométrica como revestimento primário em rodovias não-pavimentadas. Nesse estudo, efetuou ensaios de Proctor e CBR. Concluiu que as misturas contendo entre 50% e 60% do agregado apresentam as melhores características médias para utilização como tratamento superficial de rodovias não-pavimentadas. As curvas de compactação desse estudo estão apresentadas na Figura 5, onde se observa com clareza a influência do agregado. A Tabela 4 apresenta um resumo, onde se nota que, a medida em que se aumenta o teor de agregado, a umidade ótima da mistura tende a diminuir. Isso se deve ao fato do agregado possuir uma superfície específica menor que a do solo, consumindo, assim, menos água que as misturas com maior quantidade de solo.

Em relação ao CBR (*California Bearing Ratio*), nota-se uma grande variabilidade dos resultados e, de maneira geral, um aumento no CBR com o aumento da energia e/ou teor de adição de agregados.

5. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência dos solos é decorrente da ação integrada de dois fatores, denominados de atrito e de coesão. O ângulo de atrito (ϕ) do solo está

associado ao efeito de entrosamento entre as suas partículas, enquanto a coesão (c) está associada à natureza das partículas e/ou à presença de cimentação.

Como princípio geral, e prático, deve ser entendido que o fenômeno de cisalhamento é, basicamente, um fenômeno de atrito e que a resistência ao cisalhamento dos solos depende, predominantemente, da tensão efetiva normal ao plano de cisalhamento [4].

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar, sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento devido ao deslizamento entre corpos sólidos ou entre partículas do solo (resultantes principalmente do atrito e coesão). [1, 4 e 6].

Através de ensaios de cisalhamento direto, foram obtidos os parâmetros de resistência dos solos (ângulo de atrito e coesão), que são de extrema importância para qualquer obra geotécnica. A Tabela 5 mostra os valores obtidos para cada solo estudado. Nota-se que as amostras ensaiadas na condição indeformada (A-E) possuem valores de ϕ situados entre 20,50° e 24,10° (média de 22,42° e desvio padrão de 1,24°), o que possibilita a adoção desses valores em anteprojetos. Para a coesão, houve variação entre 1,22 e 38,90kPa, impossibilitando a adoção de um valor característico.

Para a técnica de estabilização mecânica, os valores encontrados de ϕ para a energia normal (solos A, E, F e G) ficaram bastante próximos (entre 30,28° e 31,89°). O incremento da energia denota a eficiência da técnica, pois o valor de ϕ passa de 30,28° na energia normal para 35,51° na energia modificada.

Outra maneira de melhorar as características do solo é adicionar micro fibras. As características almejadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito à capacidade de suporte do material. Vários outros aspectos, como maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto), queda na redução de resistência pós-pico (para o caso de materiais mais frágeis), maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, entre outros, são exemplos disso.

Diemer e Specht [17] analisaram o comportamento mecânico do solo A após realizarem ensaios de cisalhamento direto em amostras compactadas com adição de fibras de

polipropileno (com comprimento de 6, 12 e 18mm), variando os teores de adição em 0,25; 0,50 e; 0,75%. Verificaram que a adição das fibras aumenta seus parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e ϕ) em alguns casos, e noutros diminui (ver Tabela 5). Todavia, concluíram que o comportamento pós-ruptura, sem queda acentuada de resistência, torna o solo A atrativo para aplicações onde o trincamento é esperado, como *liners* em aterros sanitários.

6. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele. O coeficiente de permeabilidade é de extrema importância em diversos problemas práticos de engenharia. Trata-se de uma propriedade com enorme faixa de variação, sendo necessária a utilização de técnicas específicas para a sua determinação.

A condutividade hidráulica do solo é afetada por diversos fatores inerentes ao solo. Pode-se destacar, entre eles, o tamanho das partículas, o índice de vazios, a mistura, a estratificação e o grau de saturação do solo. A estrutura interna é uma das características mais importantes do solo que influenciam a condutividade hidráulica, essencialmente em solos finos [6].

A permeabilidade de um solo pode ser medida em laboratório ou *in situ*. Dentre os métodos utilizados em laboratório para a determinação da permeabilidade, estão o permeômetro de carga variável e o permeômetro de carga constante.

Para determinar a permeabilidade do solo em estudo, realizaram-se ensaios de condutividade hidráulica no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ e no ENVIRONGEO (Laboratório de Engenharia Geotécnica) da UFRGS.

Os ensaios foram executados em duas etapas. A primeira etapa aconteceu na UNIJUI, utilizando amostras de solo compactado de 10x20cm com e sem adições de fibras de polipropileno, em permeômetro de carga variável de parede rígida. A segunda etapa dos ensaios aconteceu na UFRGS, utilizando um permeômetro de carga variável de parede flexível, com amostras de solo indeformadas (5x10cm). Após a realização dos ensaios observa-se que este solo, em seu estado natural, apresenta um coeficiente de condutividade hidráulica (k) na ordem de 10^{-7} m/s o qual, segundo Lambe e Whitman [6], é classificado como sendo

um solo de baixa permeabilidade. Em seu estado compactado, esse mesmo solo apresenta um k na ordem de 10^{-9} m/s, que permite classificá-lo como um solo praticamente impermeável.

Os resultados encontrados para a condutividade hidráulica (k) nos ensaios com adições de fibras, com comprimentos de 6, 12 e 18mm, variando os teores de adição em 0,25, 0,50 e 0,75%, ficaram na ordem de 10^{-12} m/s, mostrando que, de maneira geral, as adições de fibras contribuem para a redução do coeficiente de condutividade hidráulica do solo argiloso utilizado neste estudo, tornando-o praticamente impermeável. De maneira geral, os solos estudados apresentam excelente potencial para utilização, quando compactados, como barreira impermeável.

7. CONCLUSÕES

Essa investigação, que trabalhou com dados geotécnicos coletados por pesquisadores do curso de Engenharia Civil da UNIJUÍ em oito solos residuais de basalto, no período 2003-2008, permitiu concluir que as propriedades físicas do solo *in situ* o caracterizam como não saturado, poroso e com IP variando entre 11 e 32%. É classificado como argiloso, pela classificação triangular, MH, pela classificação unificada, e A-7-5, pela classificação rodoviária.

Os resultados de compactação e CBR apontaram valores de w_{ot} entre 28,0 e 35,0% e de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ entre 13,8 e 15,1kN/m³, para energia normal, w_{ot} de 30% e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ 14,73kN/m³, para energia intermediária, e w_{ot} de 29% e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ de 15,03kN/m³, para energia modificada; bem como indicaram a possibilidade da utilização da técnica de estabilização granulométrica para obras geotécnicas com estes solos.

Os parâmetros de resistência dos solos estudados, que são de extrema importância para qualquer obra geotécnica, foram obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto. Os solos, quando na condição indeformada, apresentaram valores de ϕ entre 20,50° e 24,10° (valor médio de 22,42°); para a energia normal de compactação, os valores de ϕ ficaram entre 30,28° e 31,89° (valor médio de 31,31°). Tais resultados possibilitam a adoção destes valores em anteprojetos.

O coeficiente de condutividade hidráulica (k) do solo, em seu estado natural, apresentou valor

na ordem de 10^{-7} m/s e, em seu estado compactado, na ordem de 10^{-9} m/s.

A adição de microfibras ao solo apresentou-se, tanto do ponto de vista da resistência quanto da estanqueidade, como uma alternativa de interesse para projetos de engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS

- Vargas, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw Hill, 1977, 509p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto e execução de fundações*: NBR 6122. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 33p. Origem: Projeto NBR 6122/94.
- Hachich, W. *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini-ABMS/ABEF, 2. ed., 1998.
- Pinto, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- Ingles, O.G.; Metcalf J.B. *Soil stabilizations. Principles and practice*. Sydney-Melbourne-Brisbane: Butterworths, 1972, 374p.
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. *Mecânica de solos*. México: Editorial Limusa S.A., 1974.
- Head, K.H. *Manual of soil laboratory testing*. London: Pentech Press, 1986.
- Simons, N.E.; Menzies, B.K. *Introdução à engenharia de fundações*. Rio de Janeiro: Interciência, 1981.
- Yoder, E.J.; Witczak, M.W. *Principles of pavement design*. New York: John Wiley & Sons Inc., 2. ed., 1975. 711p.
- Kézdi, A. *Stabilized earth roads*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979, 327p.
- Van Impe W.F.V. *Soil improvement techniques and their evolution*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989, 125p.
- Bonafé, L. *Estudo da resistência de um solo compactado*. Relatório de Estágio Supervisionado II. Ijuí/RS: Curso de Engenharia Civil/UNIJUÍ, 2003.
- Bonafé, L. *Estudo da resistência de um solo residual de basalto estabilizado e reforçado*. 2004. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – UNIJUÍ. Ijuí/RS, 2004.
- Viecili, C. *Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto*. 2003. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – UNIJUÍ. Ijuí/RS, 2003.
- Wallau, J.R. *Avaliação da técnica de estabilização granulométrica como revestimento primário de rodovias não pavimentadas*. 2004. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – UNIJUÍ. Ijuí/RS, 2004.
- Bernardi, J. *Caracterização de jazidas de solo residual de basalto visando seu emprego em barragens de terra*. 2006. 159f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – UNIJUÍ. Ijuí/RS, 2006.
- Diemer, F.; Specht, L.P. *Análise do teor e do comprimento de fibras de polipropileno para microreforço de solos*. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, XXII, 2007, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Editora UPF, 2007.
- Diemer, F.; Specht, L.P. *Avaliação da condutividade hidráulica de solos residuais com adições de fibras de polipropileno para emprego em barreiras impermeáveis*. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, XXII, 2007, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Editora UPF, 2007.
- Specht, L.P., Bonafe, L. *Avaliação da técnica de estabilização mecânica, química e do microreforço na resistência ao cisalhamento de um solo residual*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36^a, 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2005. 10p.
- Specht, L.P., Wallau, J. *Avaliação da técnica de estabilização granulométrica como revestimento primário de estradas não-pavimentadas*. In: Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, III, 2005, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Editora UPF, 2005. 9p.
- Schwabe, M. *Formação do solo do município de Ijuí e problemas decorrentes do manejo*. 1987. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí/RS, 1987.
- Rambo, P. *A fisionomia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. Volume 6, 1956.
- INCRA. *Descrição dos recursos naturais das regiões de programação*. Vol. 2, Brasília:

- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 1997. p. 14.
24. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. *Geologia de engenharia*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p.13-38.
25. Azambuja, M.A.; Picada, D.S.; Cordeiro, A.P. *Geologia aplicada a barragens*. Porto Alegre: CEUE, 1980. 54p.
26. Capper, P.L.; Cassie, W.F. *The mechanics of engineering soils*. London, E. & F. N. Spon LTD, 1970. Tradução de João Luís da Providência Vilas Boas e Costa.
27. IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. www.ibge.gov.br/mapas, 2008.

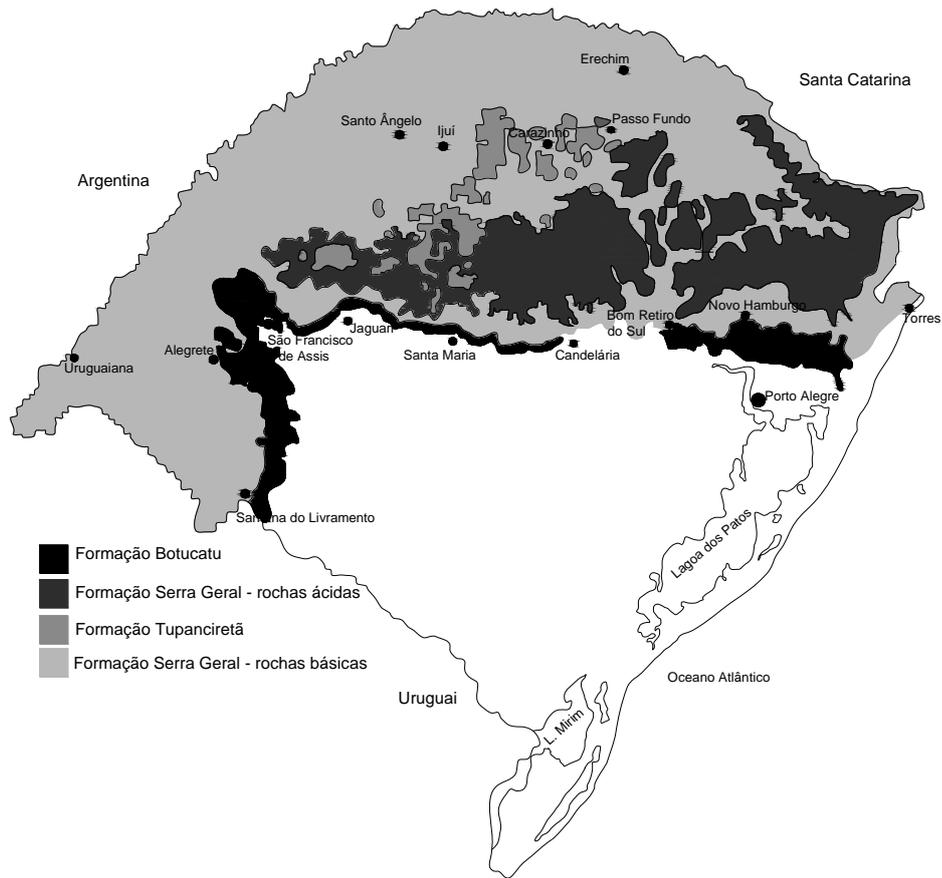


Figura 1 - Mapa com as províncias geomorfológicas (adaptado de [27])

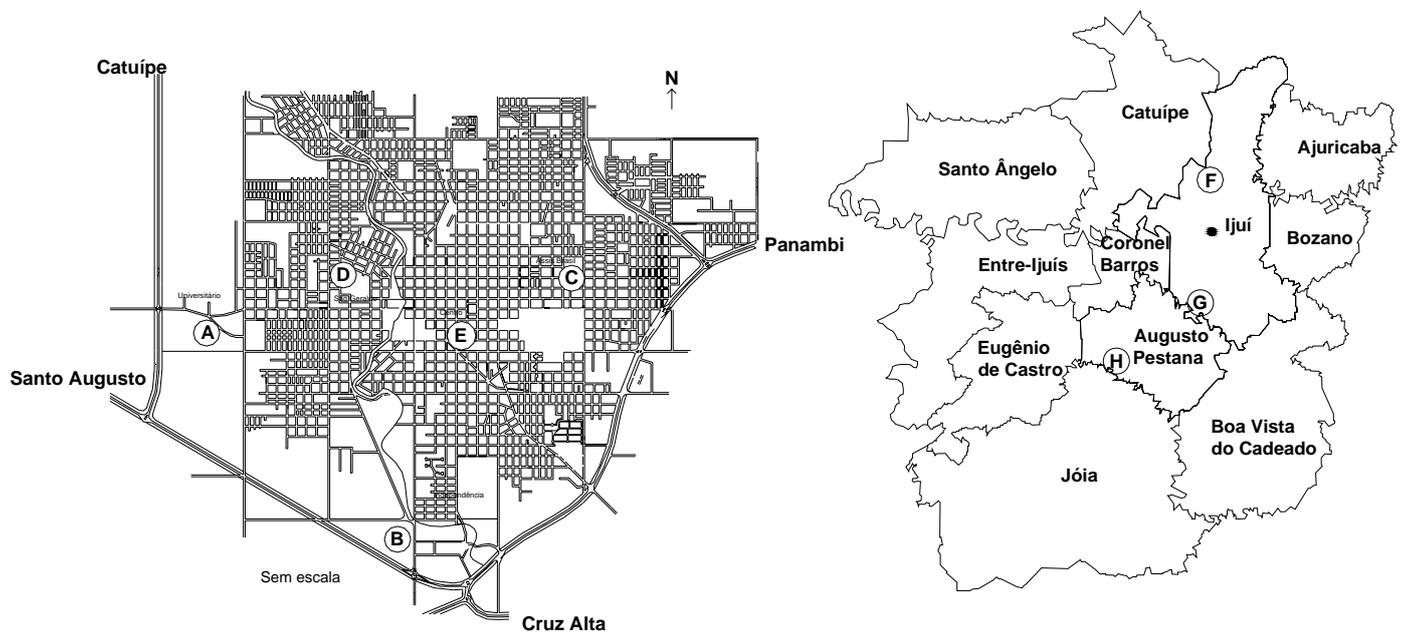


Figura 2 - Local de coleta das amostras de solo
 (a) Na cidade de Ijuí/RS
 (b) No restante da região em estudo

Tabela 1 – Coordenadas UTM do local de coleta de cada uma das amostras

Amostra	Local de coleta	Coordenadas UTM
Solo A	Campus da UNIJUÍ, no perímetro urbano do município de Ijuí/RS	211052 e 6856016
Solo B	Avenida José Gabriel, bairro Independência, município de Ijuí/RS	213843 e 6853336
Solo C	Rua Goiás, ao lado do Ginásio de Esportes Wilson Mânica, bairro Assis Brasil, município de Ijuí/RS	215467 e 6856625
Solo D	Rua Emilio Frederico Bohrer, junto ao novo Hospital Bom Pastor, bairro São Geraldo, município de Ijuí/RS	212834 e 6856742
Solo E	Rua Venâncio Aires, nº 356, bairro Centro, município de Ijuí/RS	214252 e 6855846
Solo F	Localidade de Chorão, interior do município de Ijuí/RS	214019 e 6866147
Solo G	Localidade de Barreiro, interior do município de Ijuí/RS	212587 e 6846709
Solo H	Localidade de Esquina Renz, interior do município de Augusto Pestana/RS	785030 e 6836168

Tabela 2 – Índices de consistência das amostras de solo e propriedades do solo *in situ*

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_s (kN/m ³)	w _{situ} (%)	e	S (%)
Solo A	59	48	11	28,52	34,30	1,79	54,96
Solo B	81	60	21	29,04	37,30	1,71	63,49
Solo C	75	43	32	27,65	44,71	1,68	73,80
Solo D	61	47	14	28,11	30,93	1,56	55,62
Solo E	57	25	32	28,63	30,16	1,57	54,06
Solo F	66	38	28	28,34	-	-	-
Solo G	60	36	24	28,25	-	-	-
Solo H	52	26	26	28,72	-	-	-

Nota: LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade; IP - índice de plasticidade; γ_s - peso específico real dos grãos; w_{situ} - umidade *in situ*; e - índice de vazios; S - grau de saturação

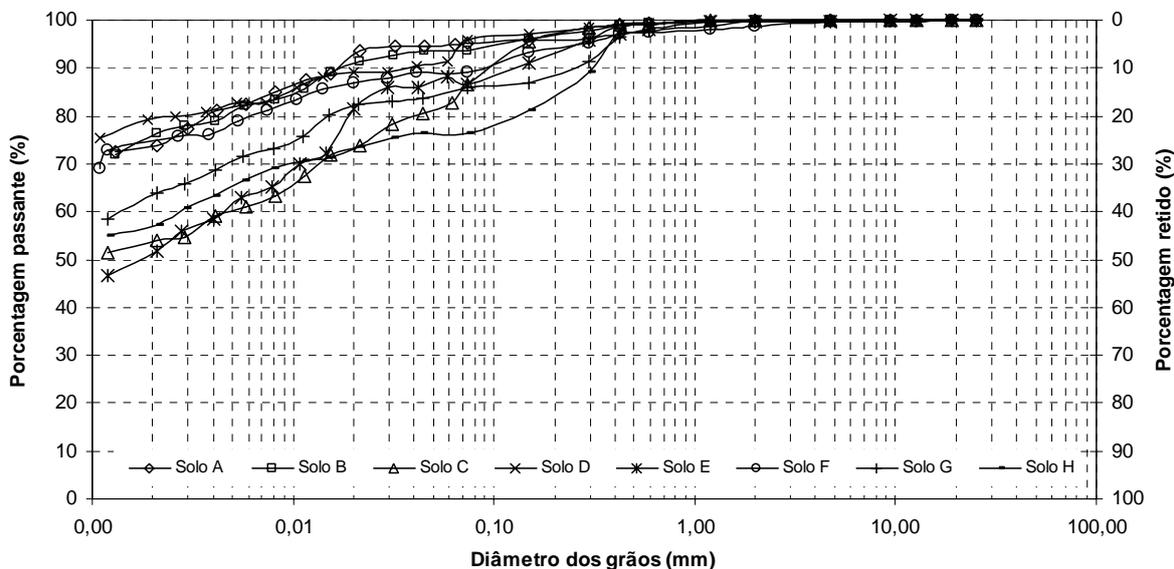


Figura 3 - Análise granulométrica

Tabela 3 – Resumo dos resultados da classificação dos solos

Amostra	Método de Classificação		
	Triangular	Unificada	Rodoviária
Solo A	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo B	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo C	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo D	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo E	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo F	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo G	Argila	MH - silte de alta compressibilidade	A-7-5
Solo H	Argila	CH - argila de alta compressibilidade	A-7-6

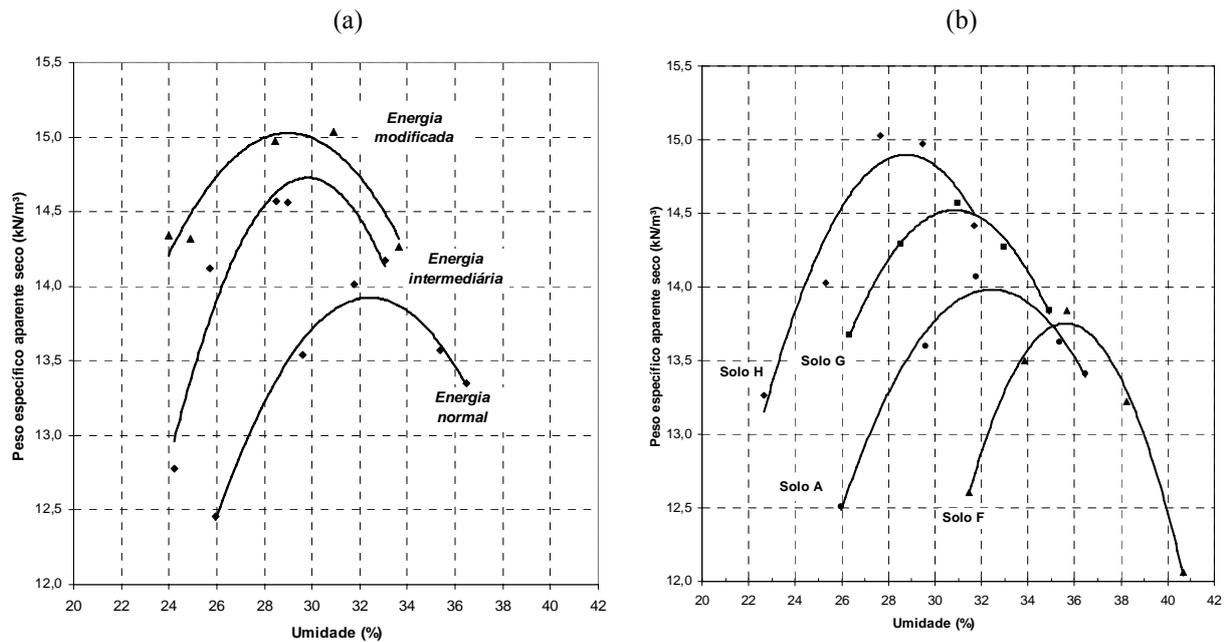


Figura 4 - Curvas de compactação

(a) Solo A - energias de compactação normal, intermediária e modificada [12]

(b) Solos A, F, G e H - energia de compactação normal [16]

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros de compactação

Amostra	Energia	Teor de agregado (%)	w _{ót} (%)	γ _{d máx} (kN/m³)	CBR (%)
Solo A	Normal	-	32,30	13,93	12
Solo A	Intermediária	-	30,00	14,73	12
Solo A	Modificada	0	29,00	15,03	22
Solo A	Modificada	50	14,50	19,78	19
Solo A	Modificada	60	12,30	20,45	17
Solo A	Modificada	70	11,40	20,78	19
Solo A	Modificada	80	10,00	22,40	21
Solo A	Modificada	90	8,30	23,00	45
Solo F	Normal	-	36,00	13,80	-
Solo G	Normal	-	31,50	14,60	-
Solo H	Normal	-	28,50	15,10	-

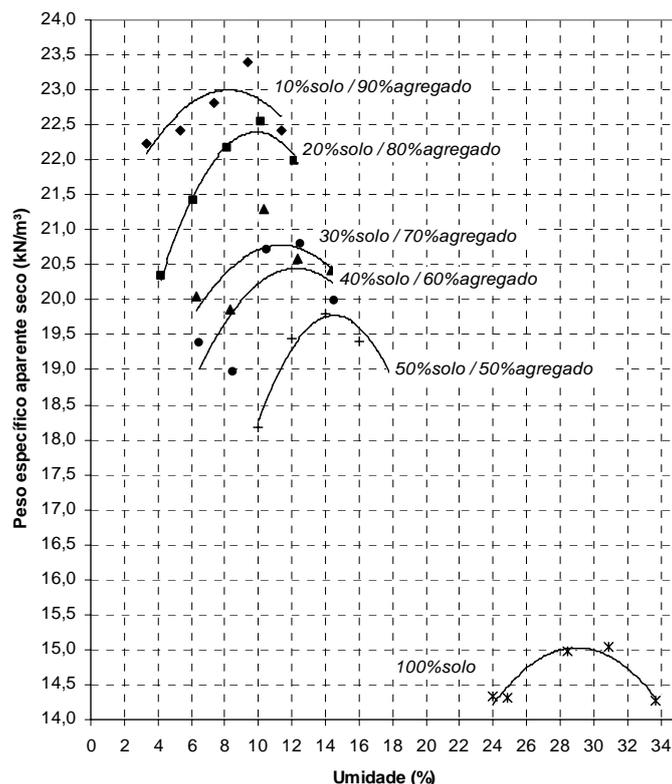


Figura 5 - Curvas de compactação com adições de agregado [15]

Tabela 5– Valores de ângulo de atrito e coesão dos solos

Amostra	Situação	Condição	Ângulo de atrito (ϕ) °	Coesão (c) kPa
Solo A	indeformada	inundada	24,27	15,8
Solo A	compactada / EN	inundada	30,28	26,06
Solo A	compactada / EI	inundada	32,48	36,68
Solo A	compactada / EM	inundada	35,51	41,16
Solo B	indeformada	inundada	22,60	38,90
Solo C	indeformada	inundada	21,30	1,22
Solo D	indeformada	inundada	23,60	6,68
Solo E	indeformada	inundada	20,50	1,63
Solo F	compactada / EN	inundada	31,87	19,63
Solo G	compactada / EN	inundada	31,20	21,70
Solo H	compactada / EN	inundada	31,89	23,58
Solo A + 0,25% fibra – 6mm	compactada / EI	inundada	35,20	17,44
Solo A + 0,50% fibra – 6mm	compactada / EI	inundada	23,88	23,00
Solo A + 0,75% fibra – 6mm	compactada / EI	inundada	26,64	15,91
Solo A + 0,25% fibra – 12mm	compactada / EI	inundada	38,98	20,68
Solo A + 0,50% fibra – 12mm	compactada / EI	inundada	31,29	31,55
Solo A + 0,75% fibra – 12mm	compactada / EI	inundada	39,42	19,55
Solo A + 0,25% fibra – 18mm	compactada / EI	inundada	32,34	43,41
Solo A + 0,50% fibra – 18mm	compactada / EI	inundada	17,17	8,58
Solo A + 0,75% fibra – 18mm	compactada / EI	inundada	22,61	41,14

Nota: EM – energia normal de compactação; EI - energia intermediária; EM - energia modificada

Tabela 6 – Valores dos coeficientes de condutividade hidráulica (k) dos solos

Amostra	Situação	Permeâmetro / percolado	k (m/s)
Solo A	indeformada	Parede flexível / água	$6,69 \times 10^{-7}$
Solo A	compactada / EN	Parede rígida / água	$8,21 \times 10^{-9}$
Solo F	compactada / EN	Parede rígida / água	$2,19 \times 10^{-10}$
Solo G	compactada / EN	Parede rígida / água	$2,52 \times 10^{-10}$
Solo H	compactada / EN	Parede rígida / água	$2,54 \times 10^{-10}$
Solo A + 0,25% fibra – 6mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$1,43 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,50% fibra – 6mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$1,38 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,75% fibra – 6mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$2,45 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,25% fibra – 12mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$9,47 \times 10^{-13}$
Solo A + 0,50% fibra – 12mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$3,11 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,75% fibra – 12mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$2,15 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,25% fibra – 18mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$2,46 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,50% fibra – 18mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$2,97 \times 10^{-12}$
Solo A + 0,75% fibra – 18mm	compactada / EI	Parede rígida / água	$2,72 \times 10^{-12}$

Nota: EN – energia normal de compactação; EI - energia intermediária; EM - energia modificada