

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/527

Controle Tecnológico de Terraplenagem Utilizando o DCP em Solos Residuais de Basalto da Região do Alto Uruguai/RS

Pedro Eugênio Gomes Boehl

Professor/Pesquisador e Líder do Grupo de Pesquisas de Geologia de Engenharia e Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Erechim, Erechim/RS, Brasil, pedro.boehl@uffs.edu.br

Mauro Leandro Menegotto

Professor/Pesquisador, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Chapecó, Chapecó/SC, Brasil, mauro.menegotto@uffs.edu.br

Taciano Leandro Serraglio

Engenheiro Civil Projetista de Fundações e Contenção, PAVIBRAS Engenharia de Infraestrutura, Erechim/RS, Brasil, pavibras@pavibras.eng.br

RESUMO: Este trabalho apresenta os procedimentos adotados para o controle tecnológico da compactação, em dois serviços de terraplenagem em obras industriais de médio a grande porte, utilizando solos residuais da Formação Serra Geral da região do Alto Uruguai/RS. O controle de compactação foi baseado nos resultados do cone portátil tipo *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). O equipamento fornece uma estimativa do CBR in situ e, apesar da pouca utilização no meio técnico brasileiro, mostra-se eficiente, rápido e com alta relação de custo-benefício. O ensaio com o DCP sucedeu-se, conforme a prática americana, de acordo com o preconizado na ASTM 6951/2009. A principal especificação a ser seguida nas duas obras analisadas era com relação ao CBR mínimo de 10% e grau de compactação de 90% para todas as camadas, incluindo sub-base, base e corpo do talude. Com os resultados do DCP foi possível controlar plenamente os valores especificados, com mais economia em relação ao consumo de combustível, às horas de trabalho e ao número de ensaios de laboratório e campo, quando comparado com o controle convencional utilizado na região.

PALAVRAS-CHAVE: Cone de penetração dinâmica (DCP). Serviço de terraplenagem. Controle de compactação. Ensaio de campo.

ABSTRACT: This paper presents the procedures adopted for the technological compaction control in two earthmoving services in medium to large industrial works, using residual soils from the Serra Geral Formation in the Alto Uruguai region, Rio Grande do Sul State. The compaction control was based on the results of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) tests. The equipment provides an estimate of CBR in situ and, despite its little use in Brazil, it is efficient, fast and with a high cost-benefit ratio. The test with the DCP was carried out, in accordance with American practice, in accordance with the recommendations of ASTM 6951/2009. The main specification to be followed in the two analyzed works was a minimum CBR of 10% and the degree of compaction of 90% for all layers, including sub-base, base and slope body. With the results of the DCP, it was possible to fully control the specified values, with more savings in terms of fuel consumption, working hours and the number of laboratory and field tests, when compared to the conventional control used in the region.

KEYWORDS: Dynamic Cone Penetrometer (DCP). Earthmoving service. Compaction control. Field test.

1 INTRODUÇÃO

Na prática dos serviços de terraplanagem, o índice de suporte Califórnia (ISC) ou *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), apesar de receber muitas críticas quanto a demora do ensaio, elevados custos e grande dispersão de resultados, a mais de 80 anos, é o parâmetro mais utilizado para estimativa de suporte e controle tecnológico da qualidade da compactação em serviços de terraplenagem. Por outro lado, o controle Tecnológico de Terraplenagem pode ser realizado utilizando os resultados do ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone

(*Dynamic Cone Penetrometer* - DCP). Este ensaio apresenta simplicidade operacional, grande mobilidade e baixa dispersão de resultados, o que permite realizar uma grande quantidade de ensaios e avaliar a homogeneidade das camadas do aterro, podendo-se tomar decisões rapidamente (Alves, 2002).

O precursor do penetrômetro de percussão tipo cone de penetração dinâmica foi o *ram penetrometer* criado na Alemanha, por Nicolas Goldmann, no século XVII. Kunzell, em 1936, desenvolveu um equipamento denominado *Prufstab*, seguido pelo projeto de Praproth, em 1943, que gerou a padronização em 1964 do *light penetrometer* e da normativa alemã DIN 4094 (German National Standard, 2002). Scala (1959), partindo do projeto Alemão, criou o ensaio do Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP), rapidamente difundido nos Estados Unidos e Canadá.

O ensaio consiste na quantificação do valor de penetração de um cone no solo, através de sucessivos golpes de um martelo, que cai de uma altura padronizada. Dois operadores são suficientes para uma campanha, sendo que em alguns modelos é possível apenas um operador. A sua execução ocorre em tempo reduzido, o que se torna útil na investigação de grandes áreas, principalmente. Ainda, os dados do DCP podem ser relacionados com outras variáveis, como o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), o módulo de deformabilidade (E), o módulo de resiliência (Mr), o índice de suporte Califórnia (ISC) e a capacidade de carga dos solos

Há muito tempo, nos EUA, a avaliação da execução e dos parâmetros indicativos, como índice de suporte in situ, de uma camada compactada vem sendo realizada com o DCP. Estados como Illinois, Indiana e Minnesota, por exemplo, possuem normativas para a sua utilização. Além dos EUA, o DCP vem sendo utilizado e estudado em países como África do Sul, Israel, Argentina e Austrália. No Brasil destacam-se os trabalhos de Oliveira e Vertamati (1998a, 1998b) realizados em solos residuais. Também, Fontes (2001) propôs uma nova metodologia para investigação geotécnica com o DCP em vias urbanas. Cardoso e Trichês (2000) e Alves (2002) trabalharam, neste mesmo sentido, em obras de duplicação da BR-101 nos trechos SC/RS.

De acordo com a norma ASTM D6951/2009, o ensaio tem início posicionando-se o equipamento na vertical e, então, aplicam-se golpes com o martelo de 8 kg, fazendo com que a ponta, juntamente com a barra de 16 mm, seja cravada no solo. A altura de queda é padronizada, sendo de 575 mm. Assim, com o auxílio da regra graduada, leituras de penetração são feitas, de forma a verificar quantos milímetros são cravados a cada golpe aplicado. Tal medida resulta no índice de penetração ou penetração por golpe (DN), valor que se refere ao resultado do ensaio DCP sendo apresentado em mm/golpe. O valor de DN pode ser convertido em CBR por DCP. Na prática de campo, os dados são organizados por pontos em função da profundidade.

Segundo Alves (2002) o ensaio também pode ser realizado através da quantificação do número de golpes acumulados para uma certa profundidade. Assim é possível determinar o número estrutural, que corresponde ao número de golpes necessário para penetrar uma determinada profundidade, e obter o diagrama estrutural e o balanço estrutural, dados estes muito utilizados em projeto de pavimentos rodoviários. O autor ainda define um modelo que correlaciona o parâmetro DN com seu respectivo CBR, chamado “in situ”, e outro que correlaciona o DN com o valor de CBR obtido após a imersão, chamado de “Projeto”, que são analisados para o estabelecimento da correlação CBR por DCP para cada caso. Cardoso e Trichês (2000), Fontes (2001) e Alves (2002) reconhecem o DCP como um equipamento com vasta aplicação, das quais se destacam: avaliação de pavimentos existentes; controle de camadas estabilizadas; controle de construção de camadas de terraplanagem; rápido reconhecimento da capacidade de suporte do solo; verificação da eficiência de máquinas de compactação, entre outros.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma análise de dois casos de obras de terraplanagem para fins industriais bem-sucedidas, com aterros de solos argilo-siltosos residuais de basalto do Alto Uruguai/RS. Em ambas, o controle tecnológico da compactação foi realizado com a utilização do CBR por DCP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do local de estudo

O perfil geológico e o manto residual dos Município de Erechim/RS e de Sananduva/RS são muito semelhantes. Referem-se a materiais da Formação de Serra Geral (FSG), do grupo São Bento, Fácies Paranapanema. Esta formação geológica é caracterizada por rochas efusivas básicas, continentais, toleíticas,

comumente basaltos e fenobasaltos, afaniticos, escuros, normalmente, capeando as efusivas, ocorre uma sequência de rochas na composição ácida(α), constituídas por riolitos felsíticos, riolacitos felsíticos, dacitos felsíticos e seus correspondentes termos vítreos (IBGE, 2003). A mudança de solo à rocha não é repentina. Nesta fronteira há uma fina camada de alteração de rocha (A.R.), onde geralmente ocorre a impenetrabilidade da percussão da sondagem SPT, ocorrendo, geralmente, a partir deste ponto a presença do lençol freático, além da necessidade de sondagem rotativa. Neste local o maciço rochoso apresenta um comportamento heterogêneo desde o topo até o limite da perfuração. O perfil apresenta um intervalo de recuperação que varia de 25 a 100% com RQD variando de 0 a 83%, oscilando de péssimo a bom. De uma forma geral, a rocha apresenta-se muito alterada, pouco coerente e extremamente fraturada (APPI, 2021).

A região é caracterizada geotecnicamente por um manto de solo residual que cobre a formação rochosa. Este solo residual é caracterizado como uma argila-siltosa, mais próximo da superfície, alternando para silte-argiloso, muitas vezes com pedregulho, em direção a rocha sã, com espessuras de 3 a 5 m. Muitas investigações já foram realizadas no solo localizado no Campus da UFFS-Erechim/RS, que contém uma formação idêntica às do presente trabalho. Biavati (2017), a partir de ensaios de caracterização e de cisalhamento direto, obteve os seguintes resultados para o solo argiloso da Formação Serra Geral (FSG): frações de argila de 79%, silte de 11,15%, areia fina de 9%, areia média de 0,5%, areia grossa de 0,26% e pedregulho de 0,09%; teor de umidade natural de 43%; peso específico natural de 15,15 kN/m³; peso específico dos sólidos 28,9 kN/m³; índice de vazios de 1,72; limite de liquidez de 71%; índice de plasticidade de 15%; índice de atividade de 0,1; coesão de 25 kPa; e ângulo de atrito de 22°. Ainda, para o mesmo solo, Strehl (2016) obteve valores de teor de umidade ótimo de 35% e peso específico seco máximo de 14 kN/m³ em ensaios de compactação com energia de Proctor normal.

2.2 Obra industrial no Município de Erechim/RS

A área industrial de uma fábrica de doces na cidade de Erechim/RS, desde o seu início, foi compactada com solos argilo-siltosos inorgânicos, residuais da formação basáltica-riolacítica, variando em profundidade de CH(CHM) a CL(CLM), equivalente na classificação HRB como A-7-6, comuns da região do Alto Uruguai/RS. O lençol freático do local de implantação ocorre a 6,0 m de profundidade, com o solo apresentando uma consistência média apenas a partir desta profundidade. A fábrica encontra-se dentro do perímetro urbano do município e, no seu entorno, a presença de muitos loteamentos, proporcionou materiais excelentes em abundância. Todavia, dentro do próprio terreno da fábrica foram realizados diversos cortes para a construção de novas edificações. Este material também era excelente e foi utilizado nas obras de terraplenagem do local. Ensaios de compactação apresentaram valores de peso específico seco máximo de 20,7 kN/m³ e teor de umidade ótimo de 37,26%, para a aplicação de energia de Proctor normal. Na jazida o material encontrava-se em média com teor de umidade natural de 39%. O ensaio de CBR de laboratório, moldado nas condições ótimas, apresentou o valor médio de 18% e expansões menores do que 1%. Ainda, nas condições ótimas, foram moldados dois corpos de prova em cilindros de CBR, um visando o próprio ensaio CBR e outro o ensaio de DCP em laboratório.

2.3 Obra industrial no Município de Sananduva/RS

Igualmente, a obra do Município de Sananduva/RS constituía-se de um aterro industrial para uma fábrica de farinhas. Para o aterro estavam previstas sobrecargas de caminhões transportando grãos e farinha. Os solos locais eram de boa qualidade, constituídos por solos argilo-siltosos inorgânicos residuais da formação basáltica-riolacítica, variando de CH (CHM) a CL(CLM) e na classificação HRB como A-7-6. O lençol freático ocorre na profundidade de 9,0 m, porém, o solo apresenta uma consistência, consideravelmente boa, a partir de 4,0 m de profundidade. A fábrica encontra-se dentro do município, porém afastado da região central. Dentro da própria obra, ocorriam materiais de excelente qualidade, que devido a cortes para a nivelamento e construção de novos prédios, foram completamente utilizados. Os ensaios de caracterização, demonstraram que os valores de peso específico seco máximo de ótimos eram de 13,45 kN/m³ e e teor de umidade ótimo de 38,34%. Na jazida o material encontrava-se em média com teor de umidade natural de 40%. O CBR de laboratório moldado nas condições ótimas apresentou o valor médio de 13%, variando entre 7 e 25%, e expansões menores do que 1%. Apesar de uma certa diferença, principalmente no peso específico seco

máximo, este solo é muito parecido mecanicamente com o encontrado na terraplenagem das fábricas de Erechim/RS.

Nesta obra o aterro havia sido iniciado pelo município em 2019, mas sem controle tecnológico. Porém, em junho de 2020, após instabilidades em taludes locais, a obra foi assumida por uma empresa especializada. Muitos trechos realizados pela prefeitura precisaram ser refeitos, devido à sua baixa capacidade de suporte. O aterro variava de 5 a 17 m de altura, com a jazida de empréstimo no próprio terreno de implantação.

2.4 Metodologia

A metodologia adotada para o controle tecnológico da terraplenagem por meio do CBR por DCP foi semelhante para as duas obras. O principal critério de controle da terraplenagem era obter na camada a ser aprovada um valor de CBR $\geq 10\%$. Este valor de CBR é considerado como ótimo para o corpo de aterros industriais. Os valores recomendados para corpo de aterro são CBR $> 2\%$ e expansão $< 4\%$, a muito tempo, adotados nos projetos admitidos pelo DNIT, DER e DAER. Portanto, o critério adotado para os aterros era bem mais conservador.

Foram estabelecidos, pela fiscalização, pontos representativos onde seriam realizados os ensaios DCP, desde a primeira camada entre 25 e 50 cm até a última camada já selada. Não obstante, eram realizados pontos extras toda vez que a fiscalização solicitava, e, da mesma forma, também, conjuntamente aos ensaios de caracterização que se repetiam, na ocasião de troca de jazidas de materiais de empréstimo. Nas duas obras já havia, previamente, jazidas liberadas para retirada de material.

O teor de umidade do material de empréstimo era controlado pelas condições ótimas, antes do início dos trabalhos e ao longo da jornada. O número de passadas do rolo compactador tipo rolo pé-de carneiro foi determinado, antes do início da terraplenagem, em um canteiro experimental dentro da própria obra, com a utilização dos materiais analisados e o DCP, visando uma ampla calibração.

Após a compactação da camada, a fiscalização solicitava a execução do DCP para a sua aprovação. Convertia-se o valor DCP em CBR. Se o CBR fosse $\geq 10\%$, o trecho estaria aprovado. Caso contrário, refazia-se o número de passadas. Na sequência, novamente o DCP, caso o CBR fosse $\geq 10\%$, aprovava-se, caso contrário, determinava-se o teor de umidade, para ver se o problema de falta de capacidade de suporte encontrado, era por excesso ou por falta de água. O excesso de água era dominante. Dois procedimentos de correção eram usados: aerava-se o material no sol ou repetia-se o número de passadas ideais sem secar. Repetiam-se os procedimentos até ser verificado o critério de aprovação. Observa-se, que apesar de o período ter sido chuvoso, poucas vezes foram necessários o umedecimento com o caminhão-pipa. A proteção das jazidas e do trecho aprovado, com selagem, lonas e camadas de sacrifício, contra as chuvas, mostraram-se eficientes. Acredita-se que a eficiência da correção da densidade através da repetição do número de passadas, seja eficiente, porque o solo se encontrava com teor de umidade na jazida muito próximo as condições ótimas, neste caso na zona de inchamento. Segundo a teoria de Hogentogloter de 1937, estando o solo na zona de lubrificação ou inchamento, o método da repetição do número de passadas é suficiente para a correção da densidade (Schlogel, 2015).

Para a execução acurada do ensaio DCP, foram realizados alguns cuidados na execução do ensaio, como: a primeira leitura de penetração do DCP era sempre desconsiderada, pois no primeiro golpe, a superfície de contato entre o cone e o solo não é a mesma dos golpes posteriores; além do operador do peso ter um ritmo regular, devia cuidar, ao elevar o peso, para não bater no limite superior da altura de queda e provocar uma movimentação ascendente do aparelho; e uma vez extraído o instrumento, era verificado se a ponta cônica estava em bom estado.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.2 Obra industrial no Município de Erechim/RS

A terraplenagem do aterro industrial tinha uma área aproximada de 20.000 m² e altura média de 10 m, variando entre 5 e 12 m, totalizando 270.000 m³ de material compactado, com distância de transporte menor do que 5 km. Esta obra faria parte da expansão do complexo industrial. O solo foi compactado com teor de umidade média de 38%, em camadas de 15 a 25 cm.

PONTO 26 -DATA: 04/09/2020						
W= % (teor de umidade)						
DCP – ASTM 6951-09, 2009.						
Faixa de Penetração (cm)		Número de golpes	Penetração (mm)	ΣPenetração (mm)	DCP (mm/golpes)	CBR
99	98,7	1	3	3	3	
90,7	97,2	1	15	10	15	14
97,2	96	1	12	30	12	18
96	94,4	1	16	46	16	13
94,4	92,1	1	23	69	23	9
92,1	90,2	1	19	88	19	11
90,2	88,9	1	13	101	13	17
88,9	86,1	1	28	129	28	7
86,1	83,5	1	26	155	26	8
83,5	80,6	1	29	184	29	7
80,6	77	1	36	220	36	5
77	74,1	1	29	249	29	7
74,1	71,1	1	30	279	30	6
71,1	68,1	1	30	309	30	6
CBR médio camada						10
Espessura da camada (cm)						30,9

* Obs: Desprezaram-se os seguintes valores: 99-98,7cm-CBR=85

CBR-ISC POR DCP - AST 6951-09,2009.

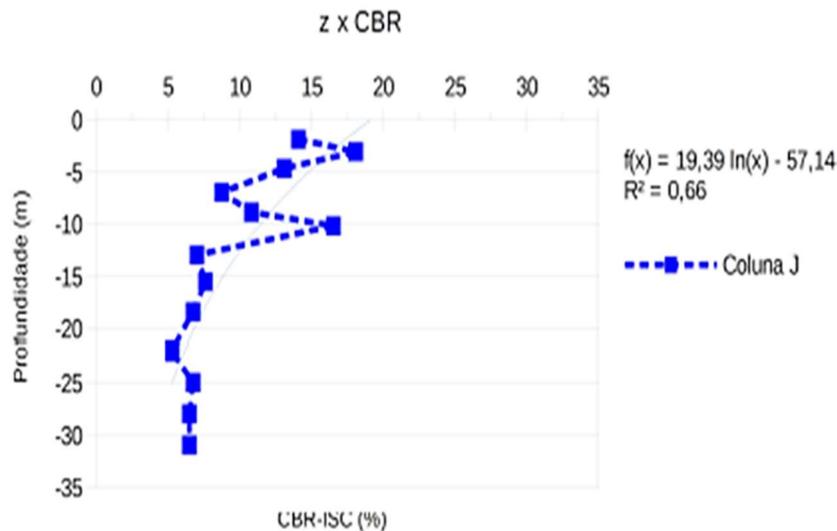


Figura 2. Dados de campo para o controle tecnológico e planilha de cálculo do CBR por DCP, distribuído pela profundidade, para o aterro industrial em Sananduva/RS. Fonte: Boehl e Serraglio (2020).

4 CONCLUSÕES

O controle tecnológico da terraplenagem com o DCP mostrou-se viável tecnicamente para solos residuais de basalto, da Formação Serra Geral (FSG) para ambas as obras industriais na região do Alto Uruguai/RS. Da mesma forma, o controle realizado apresentou custos incomparavelmente menores do que com os métodos tracionais, devido a sua rapidez e a possibilidade de um ou dois operadores realizarem o ensaio, tornando-o uma ótima opção para controle tecnológico de aterros de solo compactado.

Os dados produzidos pelo DCP mostraram baixa dispersão e ótima correlação com o CBR, sendo promissor seu emprego, principalmente, através do estabelecimento de correlações com outras variáveis

geotécnicas. Todavia, recomenda-se um estudo mais aprofundado visando a comparação direta entre os valores de DCP e CBR, que por questões de representatividade, deveria ser do tipo CBR *in situ*.

Cabe ressaltar a atual dificuldade de reconhecimento dessas qualidades no meio técnico e de contratação de serviços de controle tecnológico da terraplenagem de obras industriais. Apesar de diversos acidentes já ocorridos na região, a maioria dos serviços executados não apresentam nenhum controle. Da mesma forma, sugere-se a produção de uma normativa nacional, levando em conta os solos tropicais, residuais e cimentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, A.B.C. (2002) *Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. PPGC-UFSC, Florianópolis. 185 p.
- American Society for Testing and Materials - ASTM (2009). D6951-09. *Standard test method for use of the Dynamic Cone Penetrometer in shallow pavement applications*. 7 p.
- Cardoso, A. C. e Trichês G. (2000) *Proposição de uma Metodologia para utilização do Penetrômetro Dinâmico de Cone no controle da execução da camada final de terraplenagem*, 32ª. Reunião Anual de Pavimentação, Brasília. p. 661-673.
- Biavati, F. (2017) *Determinação e análise dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo residual de basalto do Campus Erechim-RS em condições naturais e inundadas*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 70 f.
- Boehl, P. E. G; Serraglio, T. L. (2020) *Relatório Experimental: Controle tecnológico de aterros industriais utilizando solos residuais de basalto através do ensaio de campo Dynamic Cone Penetrometer – DCP CBR por DCP para a ampliação do parque industrial das Farinhas Sananduvás-VICATO/Sananduva/RS*. Arquivo de projetos da PAVIBRAS Engenharia Ltda Erechim/RS, 50 p.
- Boehl, P. E. G; Serraglio, T. L. (2022) *Relatório Experimental: Controle tecnológico de aterros industriais utilizando solos residuais de basalto através do ensaio de campo Dynamic Cone Penetrometer – DCP CBR por DCP para a ampliação do parque industrial da PECCIN/Erechim/RS*. Arquivo de projetos da PAVIBRAS Engenharia Ltda Erechim/RS, 50 p.
- German National Standard (2002). DIN 4094-1 Subsoil - Field investigations - Part 1: *Cone penetration tests standard* by Deutsches Institut Fur Normung E.V., 06/01/2002.
- Fontes, L. P. T. L. (2001) *Contribuição à investigação geotécnica de vias urbanas não pavimentadas através do emprego do Penetrômetro Dinâmico de Cone*, Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Eng. Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Oliveira, L. E.; Vertamati, E. (1998a) *Utilização do Cone de Penetração Dinâmica (DCP) na avaliação estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego*. 31ª. Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, v. 1, p. 616-628.
- Oliveira, L. E.; Vertamati, E. (1998b) *Comportamento de solos tropicais de natureza transicional em camadas estruturais de pavimentos*. 11º Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, v. 1, p. 657-664.
- Schlogel, C. V. (2015) *Uso do DCP para avaliação do grau de compactação de um solo na região oeste de Curitiba-PR*. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Scala, A. J. (1959) *Simple method of flexible pavement design using cone penetrometers*. Proceedings of 2nd Australian - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Zealand.
- Strehl, M. J. (2016) *Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo do campus Erechim-RS através dos ensaios de compactação tipo Proctor*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 47 f.