

1       Avaliação dos parâmetros de compactação e de permeabilidade de  
2               misturas de solo argiloso com resíduos de borracha de pneus

3                       *Permeability evaluation of clayey soil mixtures with tire rubber wastes*

4                               Manuella de Moraes<sup>1</sup> Mauro Leandro Menegotto<sup>2</sup>

5       **RESUMO**

6       No intuito de avaliar a viabilidade da utilização de resíduos de borracha produzidos no  
7       processo de recauchutagem de pneus como material de reforço de solos, este trabalho estudou  
8       a influência, nos parâmetros de compactação e permeabilidade, da adição de resíduos de  
9       borracha de pneus ao solo. Assim, foram moldados e submetidos a ensaios de compactação de  
10       Proctor, corpos de prova do solo argiloso representativo da região oeste do Estado de Santa  
11       Catarina, e de misturas contendo teores de 5%, 10%, 15% e 20% de resíduos de borracha de  
12       pneus. A partir da massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo determinados na  
13       compactação, foram moldados novos corpos de prova, e estes, submetidos a ensaios de  
14       permeabilidade de carga variável. Os resultados dos ensaios de compactação demonstram que  
15       a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo das misturas sofrem redução em  
16       consequência do aumento do teor de resíduos de borracha. Já o coeficiente de permeabilidade  
17       mostrou-se crescente conforme sucedeu a adição dos resíduos de borracha. Conclui-se,  
18       portanto, com base nos parâmetros estudados, que a utilização dos resíduos de borracha de  
19       pneus misturado ao solo deve ser criteriosa, recomendada principalmente como material de  
20       enchimento leve ou em obras que possuam critérios de permeabilidade pouco restritivos.

21       Palavras-chave: Compactação do solo; Coeficiente de permeabilidade; Mistura solo-borracha.

22

23       **ABSTRACT**

24       In order to assess the feasibility of the use of rubber waste that is produced in the tire  
25       retreading process as soil reinforcement material, this work has studied the influence of the  
26       addition of tire rubber residues to soil in the compaction and permeability parameters. Thus,  
27       samples of clay soil, that are representative of the western region of the State of Santa  
28       Catarina, were molded and submitted to the Proctor compaction test, along with mixtures  
29       containing 5%, 10%, 15% and 20% of rubber residues of tires. From the specific maximum

---

<sup>1</sup> Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental, UFFS – *Campus* Chapecó. manuellademorais@gmail.com

<sup>2</sup> Professor Adjunto do curso de Engenharia Ambiental, UFFS – *Campus* Chapecó.  
mauro.menegotto@uffs.edu.br

30 dry mass and optimum moisture content that were determined in the compaction, new test  
31 samples were molded and subjected to variable load permeability tests. The results of the  
32 compaction tests demonstrate that the maximum specific dry mass and optimum moisture  
33 content of the blends are reduced as a result of the increase in the rubber residue content. On  
34 the other hand, the permeability coefficient increased as the rubber residues were added. It is  
35 concluded, therefore, on the basis of the parameters studied, that the use of the tire rubber  
36 residues mixed with the soil should be judicious, recommended mainly as light filler material  
37 or in works that have little restrictive permeability criteria.

38 Keywords: Soil compaction; Coefficient of permeability; Soil-rubber mixtures.

## 39 1. INTRODUÇÃO

40 A indústria nacional de pneus, segundo a ANIP (2016), somente no primeiro semestre  
41 de 2016, vendeu cerca de 35 milhões de unidades de pneumáticos de passeio e de carga,  
42 sendo que, aproximadamente 22 milhões de unidades serviram para abastecer somente no  
43 mercado de reposição, e, como consequência, ocorre de forma equivalente, a geração de  
44 pneus inservíveis, passíveis ou não de reforma.

45 Os pneus inservíveis, por tratarem-se de resíduos de grande volume e longo período  
46 para degradação, constituem uma grande problemática no que diz respeito a sua destinação  
47 final devido à suas características específicas, enquadrando-os como resíduos classe II-A  
48 (ABNT NBR 10.004), que agrupa resíduos que possuem combustibilidade, solubilidade em  
49 água e biodegradabilidade, aumentando mais ainda, o risco ao meio ambiente motivado pela  
50 sua disposição inadequada.

51 No Brasil, cobranças sobre a destinação adequada de pneus inservíveis existem desde  
52 o ano de 1999, por meio da Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente  
53 (CONAMA, 1999), revogada pela Resolução nº 416 (CONAMA, 2009), que dispõe sobre a  
54 prevenção da degradação ambiental causada por pneus inservíveis. A Resolução considera  
55 que “os pneus usados devem ser preferencialmente reutilizados, reformados e reciclados antes  
56 de sua disposição final adequada”, prolongando sua vida útil. A reforma de pneus emprega  
57 técnicas específicas, que utilizam “apenas 20% do material utilizado na produção de um pneu  
58 novo”, proporcionando rendimento quilométrico semelhante, com um custo até 73% menor,  
59 sendo o Brasil o 2º país no mercado mundial da reforma de pneus (ABR, 2013).

60 Para tal, podem ser empregadas técnicas como recapagem, recauchutagem e  
61 remoldagem, que consistem na substituição das estruturas que se encontram degradadas pela

62 possível ação de inúmeros fatores, podendo ser esses relacionados com a geometria veicular,  
63 estrada de rodagem, a carga e seu posicionamento no veículo, impactos em guias e buracos,  
64 entre outros (LAGARINHOS, 2011).

65 Segundo a CONAMA 419/2009, o processo de recauchutagem realiza a substituição  
66 da banda de rodagem e dos ombros do pneu, retornando-os ao mercado com aptidão para  
67 realizarem suas funções predestinadas, reduzindo, desta forma, o volume de pneus inservíveis  
68 encaminhados a destinação final. Apesar disso, a realização desses procedimentos resulta na  
69 produção de uma quantidade significativa de resíduos de borracha, aos quais deve-se manter  
70 atenção permanente no que diz respeito a sua destinação final. Oliveira e Menegotto (2014)  
71 relatam que somente no município de Chapecó, verificou-se a existência de 19 empresas  
72 reformadoras de pneus, sendo que uma delas, produz de cerca de 1 ton./mês de resíduos  
73 provenientes da recauchutagem de pneus.

## 74 **2. USO DE RESÍDUOS DE BORRACHA NA ENGENHARIA**

75 Na indústria da construção civil, a utilização direta ou indireta de pneus inservíveis e  
76 dos resíduos de borracha provenientes do mesmo, destaca-se por reduzir seu potencial  
77 poluidor mediante sua reutilização em técnicas que demandem de algumas das características  
78 físicas ou químicas encontrada nos pneus. Sua valorização energética pelo coprocessamento  
79 em fornos de clínquer, tem se tornado alternativa bastante viável às indústrias cimenteiras,  
80 devido ao grande poder calorífico encontrado nos pneus, reduzindo a queima de combustíveis  
81 fósseis não renováveis, bem como, proporcionando a destinação adequada desses resíduos  
82 (LAGARINHOS, 2011).

83 Ainda segundo Lagarinhos (2011), processos de pavimentação asfáltica utilizando  
84 resíduos de borracha, conhecido como “asfalto borracha”, têm sido amplamente empregados,  
85 melhorando as condições do pavimento em termos de vida útil, aparecimento de trincas,  
86 diminuição do ruído, entre outras vantagens quando comparado ao asfalto convencional.  
87 Algumas obras geotécnicas para a contenção de encostas utilizam também pneus inteiros,  
88 tendo seu núcleo preenchido com solo compactado.

89 Outras técnicas conhecidas como reforços de solo, tem por objetivo o melhoramento  
90 das propriedades mecânicas do solo utilizando-se de elementos que possuam elevada  
91 resistência à tração. A exploração das características dos resíduos de borracha provenientes da  
92 recuperação de pneus, no incremento das propriedades naturais do solo, constitui-se de uma  
93 alternativa que atualmente vem sendo bastante estudada.

94 Segundo Edinçliler *et al.* (2010 apud. RISSOLI e ARAÚJO, 2014) a grande  
95 atratividade dos fragmentos de borracha nas obras geotécnicas se deve a algumas de suas  
96 características, como grande durabilidade e baixo peso específico quando comparados a  
97 outros materiais de preenchimento de aterros. Em contrapartida, as características  
98 potencialmente negativas para seu emprego, como combustibilidade, compressibilidade e alta  
99 permeabilidade, são atenuadas ao misturar o material com o solo, possibilitando seu uso.

100 No mesmo trabalho, verificou-se que a variação das características mecânicas do solo  
101 reforçado com borracha moída, advém basicamente, da técnica de processamento, tamanho e  
102 forma das partículas de borracha adicionadas ao solo. Os diferentes agregados de borracha  
103 provenientes do processamento de pneus inservíveis, são comumente conhecidos como  
104 pedaços, lascas e migalhas, sendo seus tamanhos aproximados, 50 a 300 mm, 12 a 50 mm, de  
105 até 0,6 mm ou menor, respectivamente. Já os desbastes, advindo dos processos de reforma de  
106 pneus como a recauchutagem, são caracterizados por possuírem pequenos diâmetros na forma  
107 de fibra, tonando-se um material ideal para a composição do solo.

108 Ramírez (2012) e Szeliga *et al.* (2012) efetuaram ensaios de caracterização de solos  
109 reforçados com borracha moída de pneus inservíveis, destinados a aplicação em obras  
110 geotécnicas. Para estes estudos, utilizaram-se misturas de solo argiloso com diferentes teores  
111 de borracha moída com diâmetro médio de 1,0 mm (5%, 10% e 20% - 20%, 30% e 40%,  
112 respectivamente), as quais foram submetidas a ensaios de compactação Proctor Normal.  
113 Mediante esses ensaios, verificou-se que os teores de borracha apresentam influência sobre a  
114 umidade ótima e o peso específico seco máximo, sendo que o incremento dos teores provoca  
115 diminuição de tais parâmetros, conferindo um bom potencial para uso de borracha de pneus  
116 como material de enchimento leve.

117 Cetin *et al.* (2006) estudaram as propriedades geotécnicas de lascas de pneus com  
118 granulometrias finas (menores que 0,425 mm) e grossas (entre 2,0 mm e 4,75 mm), nos teores  
119 de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, em relação ao peso total, misturadas a um solo argiloso  
120 coesivo. As curvas de compactação, obtidas pelo ensaio normatizado pela American Society  
121 for Testing and Materials (Norma 698-00a - 2003), mostraram que a medida em que se  
122 aumenta o teor de lascas na mistura solo-lascas finas, ocorre o aumento do teor de umidade  
123 ótimo, enquanto na mistura solo-lascas grossas, o aumento do teor de lascas provoca pouca  
124 alteração do teor de umidade ótimo. Esse comportamento também foi observado por  
125 Chrusciak (2013), que ao estudar misturas de solo – resíduos de borracha de granulometria  
126 grossa, nos teores de 0%, 2,5%, 3,75%, 5% e 7,5%, verificou relações aproximadamente  
127 lineares, com comportamento crescente e decrescente, respectivamente, para o teor de

128 resíduos de borracha *versus* teor de umidade ótimo e teor de resíduos de borracha *versus* peso  
129 específico seco máximo. No que diz respeito ao teor de umidade ótimo, a redução apresentou-  
130 se pouco significativa, e quando considerada em termos práticos - onde as obras geotécnicas  
131 permitem uma variação de 2% - esta umidade permanece praticamente inalterada. Em análise  
132 aos resultados, não se observaram modificações significativas no índice de vazios do solo, não  
133 havendo mudanças em seu comportamento quando compactado em virtude da adição dos  
134 teores de resíduos de borracha.

135         Cetin *et al.* (2006) e Franco (2012) realizaram ensaios triaxiais consolidado drenado  
136 para misturas solo-borracha utilizando diferentes pressões confinantes (46, 93, 185, 287 e 370  
137 kPa – 100kPa, respectivamente). Os testes foram realizados sob condições de saturação, de  
138 modo que quando aplicadas as pressões confinantes pode-se estimar o coeficiente de  
139 permeabilidade. De maneira geral, constatou-se que o acréscimo do teor de resíduos de  
140 borracha adicionados a mistura, resulta em um aumento ao coeficiente de permeabilidade.  
141 Franco (2012) observou que o coeficiente de permeabilidade tem aumento significativo até o  
142 teor de 20% de resíduos de borracha na mistura, mantendo-se praticamente estável após este  
143 valor.

144         Desta forma, a utilização de resíduos de borracha advindos do processo de  
145 recauchutagem de pneus como material de reforço para melhoramento das propriedades de  
146 um solo, é uma alternativa que incorpora soluções econômicas, técnicas e ambientais pela  
147 redução da exploração dos recursos naturais, agregação de valor ao resíduo produzido na  
148 recauchutagem, bem como, prevenção de problemas de maior grandeza devido ao seu  
149 descarte inadequado.

150         No entanto, ainda se faz necessário aprofundar os estudos acerca de tal possibilidade  
151 frente as diferentes características que podem ser encontradas em ambos os materiais que  
152 compõe a mistura. O solo da região de Chapecó é originado do material que recobre cerca de  
153 50% do Estado de Santa Catarina (SCHEIBE, 1986) e, portanto, usualmente empregado em  
154 obras de engenharia que demandam seu uso. Dessa forma, é indiscutível a importância de  
155 estudos que aprimorem o conhecimento a respeito de suas características mecânicas em  
156 diferentes condições de seu emprego.

157         Conhecendo o comportamento dos resíduos de borracha de pneus incorporado ao solo,  
158 pode-se identificar a viabilidade de sua adição e utilização como material de engenharia,  
159 assim como, os teores que propiciam a obtenção dos melhores índices, verificando na  
160 literatura, as recomendações e critérios dos parâmetros estudados para a aplicação da mistura  
161 em obras geotécnicas.

162 Sendo assim o presente estudo, pretende avaliar a viabilidade da incorporação de  
163 resíduos de borracha de pneus ao solo argiloso representativo da região oeste do Estado de  
164 Santa Catarina, por meio dos parâmetros de compactação e permeabilidade.

165

## 166 **2.1 Características Geológico-Geotécnicas do Solo da Região de Chapecó**

167 A região de Chapecó-SC possui afloramento de rochas da formação Serra Geral, do  
168 Grupo São Bento, formadas por uma sequência de derrames vulcânicos (SCHEIBE, 1986).  
169 Diemer *et al.* (2008) expõem que o solo resultante da evolução dessas rochas possui bastante  
170 fertilidade e altos teores de cálcio e magnésio. Além disso, apresenta textura argilosa,  
171 coloração vermelho escuro e drenagem bem desenvolvida.

172 Menegotto *et al.* (2016) realizaram a caracterização geotécnica preliminar do solo da  
173 Área Experimental da UFFS - Campus Chapecó. Para isso, foram coletadas amostras  
174 deformadas de solo com auxílio de um trado holandês e estas, submetidas a ensaios de  
175 composição granulométrica, massa específica dos sólidos, teor de umidade e seus limites de  
176 consistência. Para o mesmo solo, também foram realizados ensaios de compactação de  
177 Proctor e de permeabilidade de carga variável. Ainda foram realizados ensaios de  
178 cisalhamento direto com amostras indeformadas do mesmo solo.

179 Por meio do ensaio de caracterização granulométrica, realizado em conformidade com  
180 a norma NBR 7181, determinou-se, para o solo coletado na profundidade 0,5 m, que sua  
181 constituição é, em maior parte, composta de partículas finas, sendo a fração argila de maior  
182 predominância (79%), seguido de silte (13%) e areia (8%). O ensaio de massa específica dos  
183 sólidos, realizado de acordo com a NBR 6508 apresentou o valor  $2,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Para os limites  
184 de liquidez e plasticidade, obtiveram-se, pelas normas NBR 6459 e NBR 7180,  
185 respectivamente, os teores de umidade de aproximadamente 53,0% para o limite de liquidez e  
186 40,0% para o limite de plasticidade. A partir destes resultados, pode-se determinar o Índice de  
187 Plasticidade do solo, sendo este 13,4%. Com os resultados dos ensaios de caracterização,  
188 pode-se classificar o solo local por meio do Sistema Unificado de Classificação dos Solos  
189 como um silte de alta compressibilidade.

### 190 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 191 3.1 Coleta, Caracterização e Preparação do Solo

192 O solo utilizado para a realização dos ensaios foi coletado próximo a superfície, na  
193 Área Experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul - *Campus* Chapecó. Com auxílio  
194 de pás e enxadas, escavou-se uma cava de 1,0 m por 1,0 m, e coletou-se o volume de solo a  
195 ser utilizado para os ensaios, desde a profundidade de 0,35 m até 0,60 m.

196 As amostras de solo utilizadas no experimento foram preparadas de acordo com a  
197 NBR 6457 (ABNT, 1986), e para tal, foram secas ao ar até a umidade higroscópica,  
198 realizando, nesse período, o desmanche dos torrões existentes de maneira a homogeneizar o  
199 volume de solo coletado. Depois de seco, o solo foi submetido ao peneiramento de modo a  
200 uniformizar o tamanho de suas partículas. Posteriormente, separou-se do solo passante, a  
201 amostra de solo para a realização do ensaio de compactação.

#### 202 3.2 Coleta e Caracterização dos Resíduos de Borracha

203 A coleta de resíduos de borracha de pneus deu-se em uma recuperadora de pneus do  
204 município de Chapecó/SC. Após a coleta e homogeneização dos resíduos de borracha pelo  
205 peneiramento na peneira de abertura 2,0 mm, os resíduos passantes foram então submetidos  
206 aos ensaios de granulometria, massa específica unitária e massa específica.

207 O ensaio para a análise da composição granulométrica dos resíduos de borracha  
208 consistiu em fazer passar uma massa conhecida do resíduo (500,0 g) por uma série de  
209 peneiras consecutivas, de aberturas de malha estabelecidas conforme a norma NBR 7181  
210 (ABNT, 1984c). O ensaio foi realizado em duplicata e o seu resultado obtido pela média  
211 aritmética das porcentagens passantes em cada peneira, podendo assim conhecer o diâmetro  
212 aproximado dos resíduos empregados nos ensaios posteriores. Por fim, efetuou-se elaboração  
213 da curva granulométrica, que relaciona o diâmetro das peneiras, com as porcentagens  
214 passantes.

215 O ensaio que tem por objetivo determinar a massa específica de agregados miúdos é  
216 normatizado pela NBR NM 52 (ABNT, 2003), e prevê a determinação deste parâmetro por  
217 meio de um frasco aferido, com volume de 500,0 cm<sup>3</sup> e massa conhecida, ao qual foi inserida  
218 uma amostra de resíduos de borracha de massa também conhecida, e completado o volume do  
219 frasco com Álcool Etílico 95% - em substituição a água, que por ser mais densa que os  
220 resíduos de borracha, não os permite sedimentar – e posteriormente, pesado o conjunto. O  
221 resultado final do ensaio foi obtido pela média aritmética da triplicata dos ensaios.

222 A determinação da massa específica unitária, deu-se pela normatização brasileira para  
223 o ensaio NBR NM 45 (ABNT, 2006) e foi realizada utilizando um recipiente de massa  
224 conhecida e volume calibrado, o qual foi preenchido até o topo com o resíduo de borracha.  
225 Posteriormente, pesou-se o conjunto. Sendo o ensaio realizado em triplicata, o valor final  
226 obtido foi por meio da média aritmética dos ensaios.

### 227 **3.3 Ensaio de Compactação**

228 O Ensaio de Compactação de Proctor foi realizado de acordo com a normatização  
229 brasileira do ensaio, publicada pela NBR 7182 (ABNT, 1986). Para a realização do  
230 experimento, utilizou-se um conjunto base, cilindro de Proctor e colarinho, de dimensões  
231 conhecidas, nos quais foram compactadas três camadas da mistura de solo-borracha por 26  
232 golpes de um soquete metálico com massa de 2,5 kg. O número de camadas, número de  
233 golpes, bem como o modelo de soquete utilizado foram correspondentes ao emprego da  
234 energia normal.

235 O ensaio realizou-se com reuso de material empregando solo puro e uma mistura de  
236 solo com diferentes teores do resíduo de borracha, 5%, 10%, 15% e 20%, respectivamente.

237 Como resultado do ensaio, pôde-se obter a curva de compactação do solo, traçada pelo  
238 peso específico seco *versus* teor de umidade da amostra compactada. A interpretação da curva  
239 de compactação de cada teor de mistura possibilitou a determinação do peso específico seco  
240 máximo e o teor de umidade ótimo correspondente, utilizados posteriormente na moldagem  
241 dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade de carga variável.

### 242 **3.4 Ensaio de Permeabilidade**

243 Os ensaios de permeabilidade foram realizados com os corpos de prova compactados  
244 no teor de umidade ótimo obtido no ensaio de compactação Proctor Normal descrito no item  
245 2.3, com uma tolerância para variação de massa específica seca de  $\pm 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Por meio da  
246 normatização NBR 14545 (ABNT, 2000) para ensaios de permeabilidade a carga variável,  
247 realizou-se, pelo método B descrito na norma, a determinação do coeficiente de  
248 permeabilidade da mistura solo-borracha. O ensaio teve início, realizando a saturação do  
249 corpo de prova preparado no interior do permeâmetro, processo com duração aproximada de 1  
250 a 3 dias, aumentando conforme reduziam-se os teores de resíduo de borracha adicionados a  
251 mistura. Posteriormente, o ensaio consistiu em fazer permear uma coluna d'água sob o corpo  
252 de prova, efetuando a medição das cargas hidráulicas em um decorrido período de tempo.

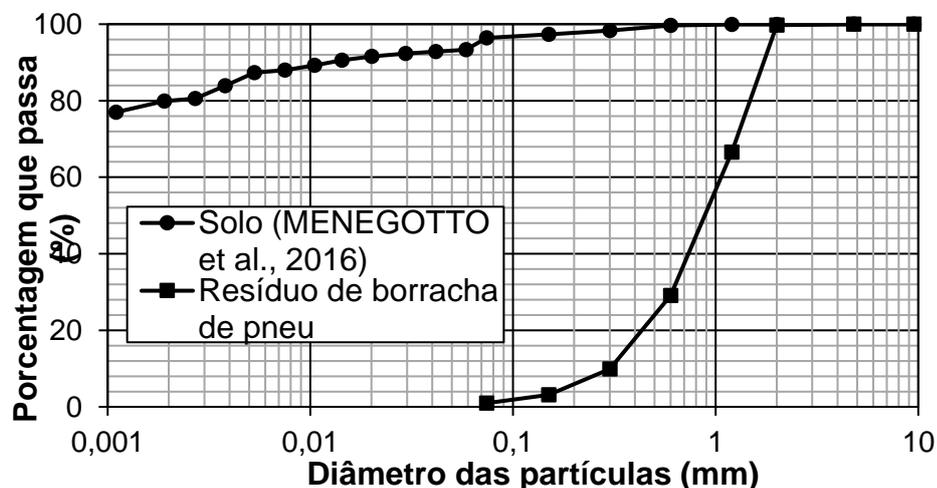
253 Esse procedimento foi efetuado nos gradientes hidráulicos médios de 7 e 10, realizando, para  
254 cada gradiente, quatro determinações do coeficiente de permeabilidade. Mediante obtenção  
255 desses dados e da temperatura da água no momento do ensaio, pôde-se determinar pela média  
256 dos resultados, o coeficiente de permeabilidade da amostra padronizado para a temperatura de  
257 20°C.

## 258 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 259 4.1 Caracterização dos Resíduos de Borracha

260 Por meio do ensaio de caracterização granulométrica efetuado com os resíduos de  
261 borracha de pneus, obteve-se a curva de distribuição granulométrica dos resíduos (Figura 1),  
262 apresentada juntamente com a curva de distribuição granulométrica do solo local, obtida nos  
263 estudos realizados por Menegotto *et al.* (2016). Pode-se observar que mais de 98% dos  
264 resíduos de borracha de pneus ensaiados, apresentaram diâmetro variando de 0,074 a 2,0 mm.  
265 Esse diâmetro de partículas, integra o intervalo correspondente a fração areia do solo, 0,02 a  
266 2,0 mm de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), coincidindo assim, com os resultados  
267 esperados quando observada a aparência fibrilar/granular dos resíduos.

268 De acordo com o obtido nos ensaios, a massa específica dos sólidos, corresponde a  
269 1,14 g·cm<sup>-3</sup>, o que condiz com os valores 1,11 g·cm<sup>-3</sup> e 1,20 g·cm<sup>-3</sup> determinados por Franco  
270 (2012) e Oliveira e Menegotto (2014), para material semelhante. Essa pequena variabilidade  
271 entre a massa específica dos sólidos em cada um dos estudos, deve-se basicamente as  
272 diferenças entre os materiais amostrados, podendo ser relacionada ao diâmetro das partículas  
273 ou até mesmo, a presença ou não de tiras de aço no volume ensaiado, fato que pode ocorrer  
274 devido à presença deste material no resíduo produzido no processo de recauchutagem.



275

276

Figura 1 - Curva de distribuição granulométrica do solo e dos resíduos de borracha de pneus.

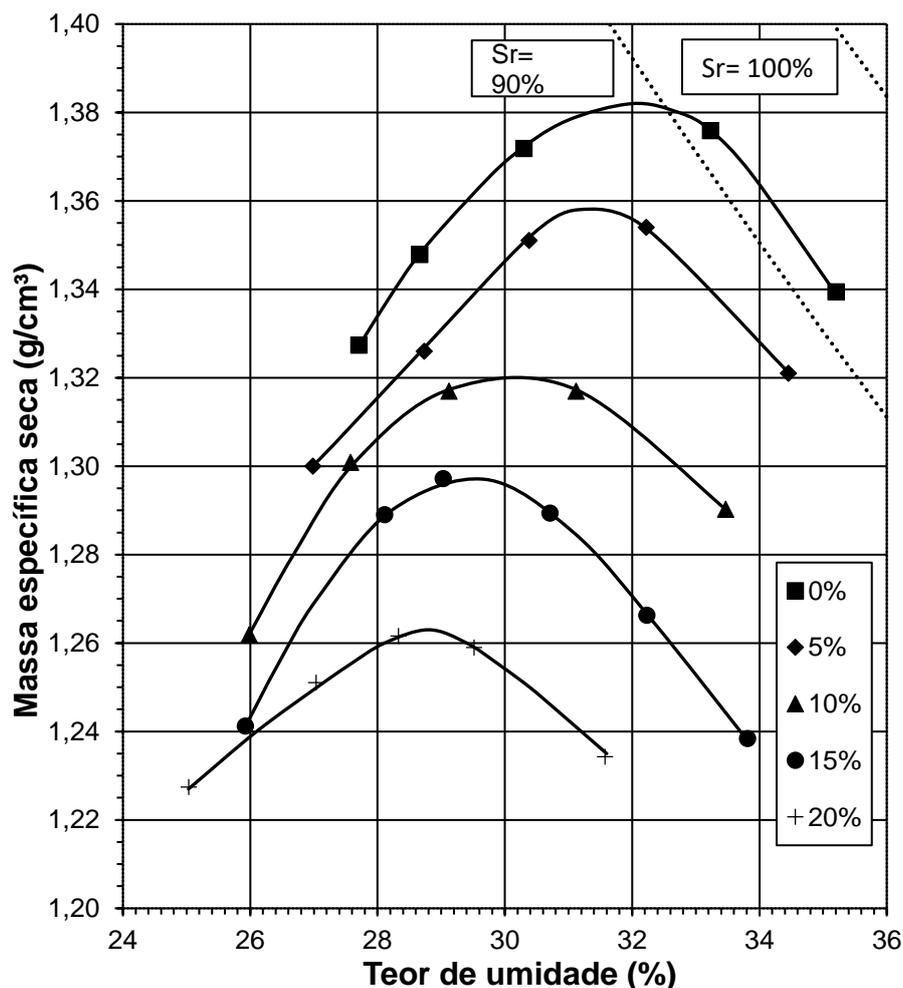
277 A massa unitária dos resíduos de borracha de pneus encontrada foi  $0,375 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , muito  
 278 próximo ao valor encontrado por Selung *et al.* (2013), correspondente a  $0,389 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  para o  
 279 mesmo tipo de material coletado na região de Chapecó/SC.

280

#### 281 4.2 Ensaio de Compactação

282 Utilizando o solo puro e misturas de solo com resíduos de borracha de pneus, nos  
 283 teores 5%, 10%, 15% e 20%, foram realizados os ensaios de compactação de Proctor na  
 284 energia normal, resultando nas curvas de compactação apresentadas na Figura 2. Na mesma  
 285 figura são apresentadas as curvas de igual grau de saturação de 90 e 100%.

286 Inicialmente, percebe-se que há redução da massa específica seca máxima e do teor de  
 287 umidade ótimo para cada curva de compactação, conforme ocorre o incremento do teor de  
 288 resíduos de borracha de pneus adicionado a mistura, mesmo comportamento observado por  
 289 Franco (2012), Szeliga (2012) e Ramírez (2012).



290

291

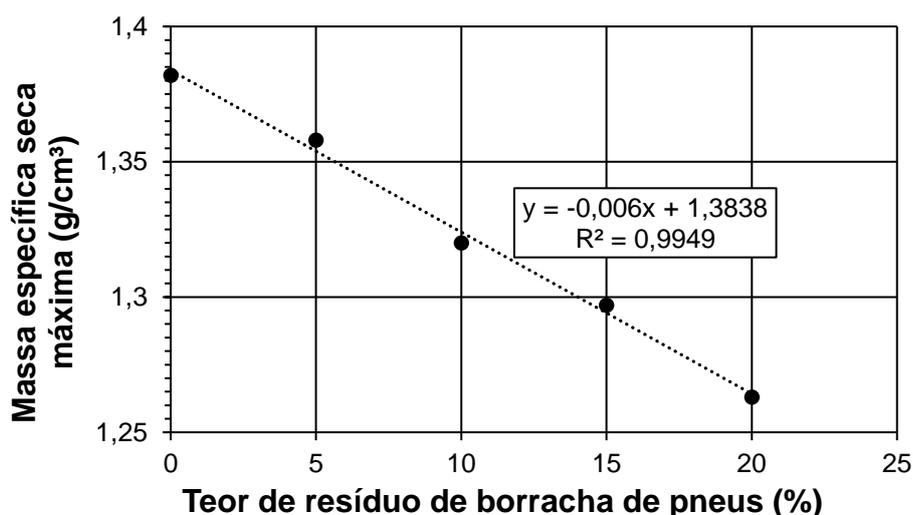
292

Figura 2 - Curvas de compactação para as amostras ensaiadas com diferentes teores de resíduos de borracha de pneus.

293 Conforme Braja (2007), o tipo de solo submetido ao processo de compactação, ou  
 294 seja, tamanho dos grãos, distribuição granulométrica, massa específica dos sólidos, entre  
 295 outros, exerce extrema influência sobre a massa específica seca máxima e o teor de umidade  
 296 ótimo obtidos ao final do processo. Quando se observam os resultados referentes aos ensaios  
 297 de caracterização efetuados para o solo e para os resíduos de borracha, pode-se verificar uma  
 298 significativa diferença entre os dois tipos de materiais. O solo, por exemplo, possui  
 299 predominância de partículas finas ( $\leq 0,002$  mm), enquanto os resíduos de borracha são, quase  
 300 que em sua totalidade, compostos de partículas grossas (0,6 a 2,0 mm). A massa específica  
 301 dos sólidos dos resíduos de borracha é aproximadamente 58,5% menor que massa específica  
 302 dos sólidos do solo. Sendo assim, a combinação gradativa desses materiais, resulta numa  
 303 modificação também gradual da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo.

304 Esse comportamento, pode ser visualizado nas Figuras 3 e 4, nas quais são  
 305 apresentadas as relações entre a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo em  
 306 função do teor de resíduo de borracha adicionado a mistura.

307 Em ambas as relações se verificam o comportamento decrescente e linear entre as  
 308 variáveis, como pode ser observado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os resíduos de  
 309 borracha de pneus, por tratarem-se de materiais mais leves que o solo, provocam a redução de  
 310 cerca de 8,6% da massa específica seca máxima para a mistura com teor de 20% de resíduos  
 311 de borracha em relação ao solo puro, condizendo com os resultados apresentados por  
 312 Chrusciak (2013) que estabeleceu a mesma relação.



313

314

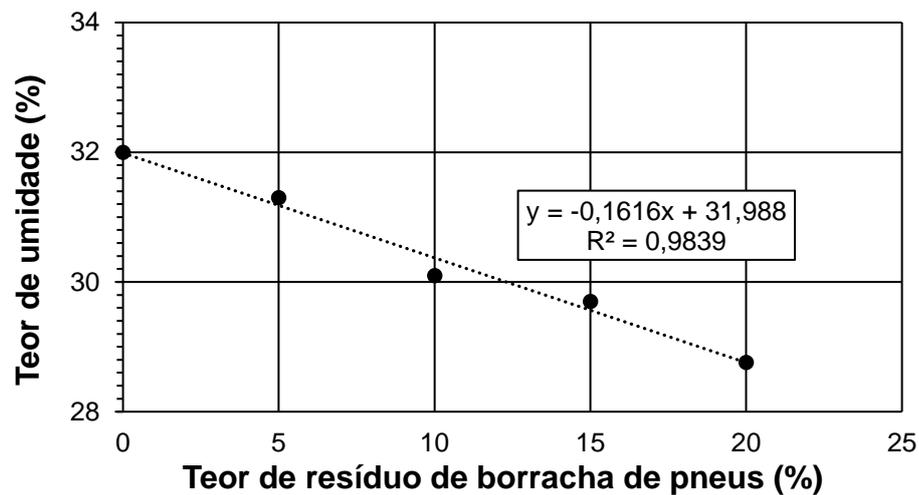
Figura 3 - Relação entre o teor de resíduos de borracha e a massa específica seca máxima.

315

316

Já o teor de umidade, apresenta redução de aproximadamente 10,1% comparando a mistura de teor 20% ao solo puro. Tratando-se dos resíduos de borracha de pneus, Franco

317 (2012) determinou para resíduos de borracha de pneus a capacidade de absorção de água,  
 318 sendo esta cerca de 5,5%. Neste sentido, ao observar que inversamente proporcional à adição  
 319 dos resíduos de borracha ocorre a redução da massa de solo adicionada, que absorve  
 320 significativamente mais água que os resíduos de borracha, é justificável que ocorra a redução  
 321 do teor de umidade ótimo.

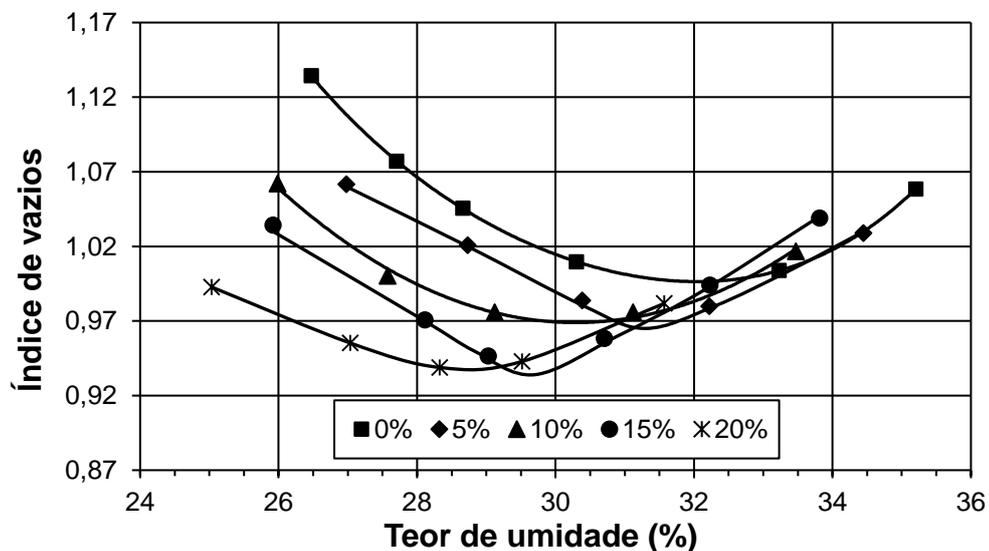


322

323

Figura 4 - Relação entre o teor de resíduo de borracha e o teor de umidade ótimo.

324 Ainda, por meio dos dados obtidos no ensaio de compactação de Proctor, pode-se  
 325 estabelecer, para cada teor de resíduo de borracha, uma relação entre o índice de vazios e o  
 326 teor de umidade, apresentada na Figura 5. Cabe salientar, que estas curvas foram  
 327 estabelecidas utilizando-se de uma massa específica dos sólidos média, calculada com base  
 328 nas massas específicas dos sólidos dos componentes solo e borracha e em suas respectivas  
 329 porcentagens de composição na amostra ensaiada.



330

331

Figura 5 - Relação entre o teor de umidade e o índice de vazios do solo.

332 Por meio das curvas, identifica-se que para todos os teores de mistura, o índice de  
 333 vazios sofre uma pequena redução até o índice de vazios mínimo, coincidindo com o teor de  
 334 umidade ótimo de cada curva, e depois volta a aumentar. No estudo realizado por Chrusciak  
 335 (2013), identificou-se o mesmo comportamento para esta relação, constatando-se assim que o  
 336 acréscimo de teores de resíduos de borracha de pneus ao solo não foi capaz de alterar a  
 337 eficiência do processo de compactação.

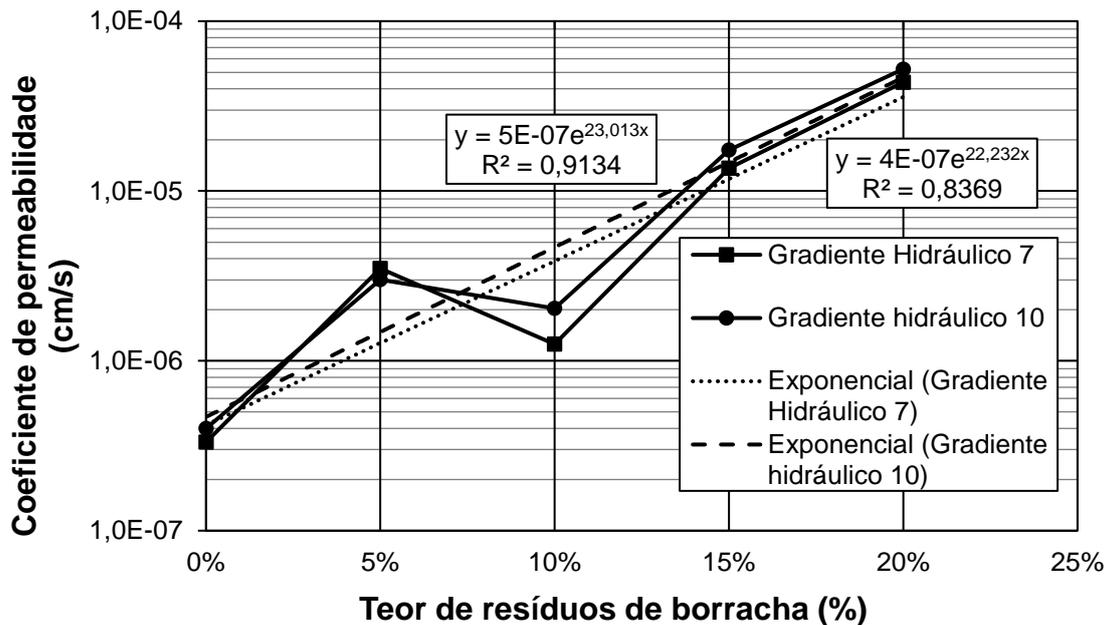
### 338 4.3 Ensaio de Permeabilidade

339 Na Tabela 1, estão apresentados os valores de massa específica seca máxima e teor de  
 340 umidade ótimo extraídos das curvas de compactação de Proctor para cada mistura de solo e  
 341 resíduos de borracha juntamente com a massa específica seca e o teor de umidade das  
 342 amostras compactadas para o ensaio de permeabilidade.

343 Tabela 1 - Massas específicas secas máximas e teores de umidade ótimo determinados nos ensaios de  
 344 compactação de Proctor e nos corpos de prova submetidos ao ensaio de permeabilidade de carga variável.

Teor de resíduos de borracha de pneu	Ensaio de compactação		Corpos de prova para o ensaio de permeabilidade	
	$\rho_d$ máx (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>ótimo</sub> (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)
-				
0%	1,382	32,0	1,350	30,6
5%	1,358	31,3	1,325	31,2
10%	1,320	30,1	1,320	29,7
15%	1,297	29,7	1,286	28,7
20%	1,263	28,8	1,240	27,9

345 Na Figura 6, encontram-se as curvas que relacionam o coeficiente de permeabilidade e  
 346 o teor de resíduos de borracha de pneus bem como, as linhas de tendência para os gradientes  
 347 hidráulicos médios de 7 e 10. Identifica-se, de maneira geral, um aumento do coeficiente de  
 348 permeabilidade conforme ocorre o incremento do teor de resíduos de borracha à mistura,  
 349 comportamento semelhante ao observado por Franco (2012), que identificou acréscimo  
 350 significativo deste coeficiente até o teor de mistura 20% e variações pouco expressivas para  
 351 teores maiores ensaiados. Cetin *et al.* (2006), além de comportamento semelhante, constatou  
 352 um acréscimo no coeficiente de permeabilidade da mistura quando aumentada a  
 353 granulometria do resíduo de borracha incorporado ao solo, o que confirma o observado neste  
 354 trabalho.



355

356

Figura 6 - Coeficiente de permeabilidade para amostras com diferentes teores de resíduo de borracha.

357

No Apêndice A, estão apresentados os valores individuais e a média dos coeficientes de permeabilidade determinados para os gradientes hidráulicos médios de 7 e 10, padronizados para a temperatura de 20 °C.

360

É possível notar algumas dispersões dos coeficientes de permeabilidade dos teores de 5% e 10%. Isso se deve ao desvio do teor de umidade alcançado no momento da compactação desses corpos de prova em relação ao valor ótimo, como pode ser observado na Tabela 1, sofreu redução de até 1,37%. Tais variações ocorrem em função da temperatura local, que quando mais elevada, pode provocar uma considerável evaporação da água adicionada à mistura, resultando na diminuição do teor de umidade durante a compactação. Em consequência disso, varia-se também a massa específica seca máxima, uma vez que esta é função do teor de umidade.

368

Embora os processos de compactação dos corpos de prova tenham sido controlados por meio de uma tolerância máxima admitida para a massa específica seca máxima, é possível constatar, observando a Tabela 1, que o solo puro e as misturas com teores de 5%, 15% e 20% de resíduos de borracha tiveram suas massas específicas secas máximas reduzidas, resultando em um aumento dos coeficientes de permeabilidade dos corpos de prova. Ainda assim, verifica-se que a massa específica seca máxima de todas as amostras compactadas para o ensaio de permeabilidade, estão dentro do intervalo de variação admitido, sendo  $\pm 0,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a maior diferença observada.

375

## 376 5. CONCLUSÕES

377 Este estudo apresentou os resultados dos ensaios de compactação de Proctor e  
378 permeabilidade de carga variável realizados com objetivo de avaliar a viabilidade da  
379 incorporação de resíduos de borracha de pneus provenientes do processo de recauchutagem ao  
380 solo argiloso, representativo da região oeste do Estado de Santa Catarina.

381 Os parâmetros de compactação, teor de umidade ótimo e massa específica seca  
382 máxima, mostraram-se bastante influenciáveis pelo teor de borracha de pneus. Esses  
383 parâmetros apresentaram redução de seus valores como consequência do incremento dos  
384 teores adicionados a mistura, devendo-se, principalmente, à reduzida capacidade de absorção  
385 de água pelo resíduo de borracha de pneus e sua baixa massa específica dos sólidos.

386 O coeficiente de permeabilidade mostrou uma tendência de crescimento com o  
387 incremento do teor de borracha de pneus adicionado a mistura. Conforme verificado nos  
388 ensaios de caracterização, o resíduo de borracha de pneus possui característica granulométrica  
389 semelhante a areia, que, segundo Pinto (2006) possui menor coeficiente de permeabilidade  
390 que argilas. Desta forma, os corpos de prova comportam-se como esperado quando  
391 submetidos ao ensaio de permeabilidade de carga variável.

392 Por meio dos ensaios realizados, constata-se que emprego da mistura de solo e  
393 resíduos de borracha de pneus como material de obras de engenharia só pode ser efetivada  
394 mediante análise e estudo criterioso do comportamento da mistura nas funções pretendidas.  
395 Obras que necessitem reduzir esforços em camadas inferiores do solo empregando materiais  
396 de enchimento leves, podem utilizar com facilidade a mistura de solo e teores de resíduos de  
397 borracha de pneus, devido ao baixo peso específico seco obtido ao final da compactação. A  
398 mistura pode também ser empregada em obras que não requeiram condições de drenagem  
399 muito restritivas.

400

401

402

403

404

405

406 **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 407 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 45: Agregados –*  
408 *Determinação da massa unitária e do volume de vazios.* Rio de Janeiro, 2006.
- 409 ABNT. *NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica*  
410 *aparente.* Rio de Janeiro, 2003.
- 411 ABNT. *NBR 10004: Classificação dos resíduos sólidos.* Rio de Janeiro, 2004.
- 412 ABNT. *NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de*  
413 *caracterização.* Rio de Janeiro, 1986.
- 414 ABNT. *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.* Rio de Janeiro, 1984c.
- 415 ABNT. *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.* Rio de Janeiro, 1986a.
- 416 ABNT. *NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a*  
417 *carga variável.* Rio de Janeiro, 2000.
- 418 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SEGMENTO DE REFORMA DE PNEUS. Dados do  
419 segmento. 2013. Disponível em: <<http://www.abr.org.br/dados.html>>. Acesso em: 8 out 2016.
- 420 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. Resultados dos  
421 fabricantes nacionais de pneus: 1º semestre de 2016. São Paulo, 2016. Disponível em:  
422 <[http://www.anip.com.br/arquivos/infografico\\_anip\\_1\\_semestre\\_2016.pdf](http://www.anip.com.br/arquivos/infografico_anip_1_semestre_2016.pdf)>. Acesso em: 5  
423 out. 2016.
- 424 BRAJA, M. D. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica.* 6. ed. São Paulo: Thomson  
425 Learning, 2007.
- 426 CETIN, H., FENER, M. GUNAYDIN, O. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil  
427 mixtures as a fill material. *Engineering Geology*, n. 88, p. 110-120, nov. 2006. Disponível em:  
428 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795206002444>>. Acesso em:  
429 30 maio 2016.
- 430 CHRUSCIAK, Mariana Ramos. *Análise da melhoria do solo utilizando fragmento de*  
431 *borracha.* 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de  
432 Brasília, Brasília, 2013. Disponível em:  
433 <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13692/1/2013\\_MarianaRamosChrusciak.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13692/1/2013_MarianaRamosChrusciak.pdf)>.  
434 Acesso em: 17 maio 2016.
- 435 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 416, de 30 de setembro de  
436 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua  
437 destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Diário Oficial da República

- 438 Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 188, de 1/10/09, p. 64-65. Disponível em:  
439 <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- 440 CONAMA. Resolução nº 258, de 02 de dezembro de 1999. Determina que as empresas  
441 fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final  
442 ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Diário Oficial da República Federativa do  
443 Brasil, Brasília, DF, nº 230 de 02/12/1999, p. 039. Disponível em:  
444 <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=258>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- 445 DIEMER, F.; SPECHT, L. P.; STRAUSS, D. A.; POZZOBON, C. E. Propriedades  
446 geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. *Teoria e Prática da Engenharia*  
447 *Civil*, Rio Grande, n. 12, p. 25-36, 2008. Disponível em: <  
448 [http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art3\\_N12.pdf](http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art3_N12.pdf)> Acesso em: 17 out. 2016.
- 449 FRANCO, K. L. B. *Caracterização do comportamento geotécnico de misturas de resíduos de*  
450 *pneus e solo laterítico*. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária,  
451 Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <  
452 <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15988/1/KarisiaLBF DISSERT.pdf>>.  
453 Acesso em: 17 maio 2016.
- 454 LAGARINHOS, C. *Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental*  
455 *através da logística reversa*. 2011. 291f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de  
456 Engenharia Metalúrgica e de Metais, Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, SP, 2011.  
457 Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-09032012-140924/pt-](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-09032012-140924/pt-br.php)  
458 [br.php](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-09032012-140924/pt-br.php)>. Acesso em: 17 maio 2016.
- 459 MENEGOTTO, M. L.; BANDEIRA, F. O.; SARTORI, L.; MORAIS, M. Caracterização  
460 geotécnica preliminar do solo da Área Experimental da UFFS - *Campus Chapecó*. In: *XVIII*  
461 *COBRAMSEG - CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA*  
462 *GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte - MG. Anais...* São Paulo: ABMS, 2016. Disponível  
463 em: < <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CB-01-0060.pdf> >.  
464 Acesso em: 01 nov. 2016.
- 465 OLIVEIRA, C.; MENEGOTTO, M. L. *Utilização de resíduos de borracha de pneu na*  
466 *confeção de peças de concreto para pavimentação*. 2014. 16 f. TCC (Graduação) - Curso de  
467 Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2014.
- 468 PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- 469 RAMÍREZ, G. G. D. *Estudo Experimental de Solos Reforçados com Borracha Moída de*  
470 *Pneus Inservíveis*. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso 24 de Engenharia Civil,

471 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:  
472 <<http://www.maxwell.vrac.pucRio.br/21824/21824.PDF>>. Acesso em: 05 maio 2016.

473 RISSOLI, A. L. C.; ARAÚJO, G. L. S. Utilização de resíduos de pneus em obras geotécnicas.  
474 In: *XVII COBRAMSEG - CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E*  
475 *ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2014, Goiânia - GO. Anais...* São Paulo: ABMS, 2014.  
476 Disponível em:  
477 <[http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobramseg/2014/602871\\_80\\_Rissoli](http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobramseg/2014/602871_80_Rissoli)  
478 [Araujo.pdf](#)>. Acesso em: 04 maio 2016.

479 SCHEIBE, L.F. (1986). A geologia de Santa Catarina: sinopse provisória. *Geosul*, Vol. 1, n.  
480 1, p. 7-38.

481 SELUNG, C; MENEGOTTO, M.L.; MENEGOTTO, A. G. F.; PAVAN, R. C.; Avaliação de  
482 blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneu. *HOLOS*  
483 *Environment (Online)*, v. 13, n. 2, 2013. ISSN: 1519-8634 (ON-LINE). Qualis-anais: B4  
484 (nacional). Disponível em:  
485 <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/holos/article/view/6518/5704>>.  
486 Acesso em: 01 nov. 2016.

487 SZELIGA, L.; RAMIREZ, G. G. D.; CASAGRANDE, M. D. T. Estudo experimental e solo  
488 reforçado com borracha moída de pneus inservíveis para aplicação em obras geotécnicas. In:  
489 *XVI COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica,*  
490 *2012, Porto de Galinhas - PE. XVI COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos*  
491 *Solos e Engenharia Geotécnica, 2012.*  
492  
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500  
501  
502  
503  
504

505

## APÊNDICE A

506

Tabela 2 - Determinações individuais e médias dos coeficientes de permeabilidade de cada

507

teor de mistura, determinados no gradiente hidráulico médio 7

Teor de resíduo de borracha	Determinações do coeficiente de permeabilidade (cm·s <sup>-1</sup> )				Coeficiente de permeabilidade médio (cm·s <sup>-1</sup> )
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	
0%	3,31E-07	3,37E-07	3,42E-07	3,20E-07	3,32E-07
5%	3,61E-06	2,89E-06	3,84E-06	3,68E-06	3,50E-06
10%	1,62E-06	1,19E-06	1,17E-06	1,05E-06	1,25E-06
15%	1,39E-05	1,41E-05	1,35E-05	1,30E-05	1,36E-05
20%	4,37E-05	4,37E-05	4,40E-05	4,35E-05	4,37E-05

508

509

Tabela 3 - Determinações individuais e médias dos coeficientes de permeabilidade de cada

510

teor de mistura, determinados no gradiente hidráulico médio 10

Teor de resíduo de borracha	Determinações do coeficiente de permeabilidade (cm·s <sup>-1</sup> )				Coeficiente de permeabilidade médio (cm·s <sup>-1</sup> )
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	
0%	3,92E-07	3,86E-07	4,02E-07	4,19E-07	4,00E-07
5%	4,95E-06	2,17E-06	2,56E-06	2,33E-06	3,00E-06
10%	2,22E-06	1,93E-06	1,96E-06	2,05E-06	2,04E-06
15%	1,83E-05	1,74E-05	1,72E-05	1,69E-05	1,75E-05
20%	5,31E-05	5,26E-05	5,20E-05	5,12E-05	5,22E-05

511