

# Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas de solo argiloso com resíduo de borracha de pneus

*Study on shear resistance of clayey soil mixed with waste rubber of tires*

Felipe Ogliari Bandeira<sup>1</sup>, Mauro Leandro Menegotto<sup>2</sup>

## RESUMO

Em alguns casos, o solo em sua condição natural não atende às propriedades geotécnicas necessárias para o desenvolvimento de uma obra com segurança. A utilização da borracha moída misturada ao solo apresenta-se como uma alternativa para viabilizar a realização de obras geotécnicas em solos de baixa resistência. Neste contexto, este trabalho propôs a realização de ensaios de cisalhamento direto em misturas de solo argiloso residual de basalto com resíduo de borracha de pneus, para a verificação da viabilidade de sua utilização em obras geotécnicas. A amostra de solo foi coletada na Área Experimental do *Campus* Chapecó da UFFS. O resíduo de borracha utilizado no estudo é proveniente de uma empresa de recauchutagem da região oeste de Santa Catarina, e é composto de partículas com diâmetro efetivo de 0,3 mm. Os teores de resíduo de borracha adotados foram de 0 (solo puro), 5%, 10%, 15% e 20%. Os corpos de prova foram compactados de forma que atingissem o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima, e as tensões normais adotadas nos ensaios de cisalhamento direto foram de 50, 100, 200 e 300 kPa. As misturas apresentaram, de maneira geral, maior ângulo de atrito interno e menor coesão, se comparadas ao solo puro. O teor de borracha com melhor desempenho situou-se próximo dos 10%. Embora as misturas de solo com borracha apresentem menor resistência ao cisalhamento quando comparadas ao solo puro, estas ainda possuem características de resistência que podem suprir as demandas de obras de engenharia.

Palavras-chave: Mistura Solo-borracha; Compactação; Resistência ao Cisalhamento.

---

<sup>1</sup>Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental da UFFS – *Campus* Chapecó. [bandeira.felipeog@gmail.com](mailto:bandeira.felipeog@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor Adjunto do curso de Engenharia Ambiental da UFFS – *Campus* Chapecó  
[mauro.menegotto@uffs.edu.br](mailto:mauro.menegotto@uffs.edu.br)

## 28 ABSTRACT

29 In some cases, the soil in its natural condition does not meet the geotechnical properties  
30 necessary for the development of a safe engineering work. The use of ground rubber for soil  
31 reinforcement is presented as a possible alternative to enable geotechnical works in low  
32 resistance soils. In this context, this project proposes the execution of shear resistance test of  
33 mixtures of residual basaltic clay soil with rubber tire residue, in order to verify the viability  
34 of its use as soil reinforcement. The soil sample was collected at the UFFS *Campus* Chapecó -  
35 Experimental Site. The rubber residue used in this study is coming from retread company  
36 from the west of Santa Catarina, and it is composed of particles with an effective diameter of  
37 0.3 mm. The rubber residue concentrations adopted were 0 (pure soil), 5%, 10%, 15% and  
38 20%. The specimens were compacted in a way to achieve the optimum water content and the  
39 maximum dry density, and the normal stresses adopted in the direct shear tests were 50, 100,  
40 200 and 300 kPa. The mixtures presented, in general, a greater angle of internal friction and  
41 less cohesion, if they are compared to the pure soil. The rubber content with the best  
42 performance was close to 10%. Although soil rubber mixtures presents less resistance than  
43 pure soil, they still have resistance characteristics that can supply the demands of engineering  
44 projects.

45 Keywords: Soil-rubber mixtures, Soil Compaction; Shear strength.

46

## 47 1 INTRODUÇÃO

48 A disposição final de resíduos sólidos é um problema evidente em muitas regiões do  
49 país, visto que, em diversos casos, os resíduos são dispostos de forma inadequada, tornando-  
50 se potenciais degradadores do meio ambiente, podendo comprometer a saúde pública e a  
51 qualidade ambiental em magnitudes imensuráveis.

52 Um dos resíduos que representam maior dificuldade para a disposição final adequada  
53 são os pneus, os quais ocupam grande volume e, por isso, podem comprometer a estabilidade  
54 do aterro de resíduos se não forem dispostos em condições apropriadas. Devido ao seu grande  
55 índice de vazios, os pneus podem acumular gases inflamáveis em seu interior, além de  
56 representarem focos de vetores em virtude da sua persistência no ambiente.

57 Outro problema associado é a quantidade de pneus fabricados, fato que é agravado  
58 pela insuficiência de meios de transporte de carga alternativos, como as ferrovias, por  
59 exemplo. Além disso, a concessão facilitada de créditos para a aquisição de automóveis

60 combinada com a precariedade do transporte público são fatores que ocasionaram o  
61 crescimento exponencial da frota de veículos particulares.

62 Segundo o Departamento Nacional de Trânsito (BRASIL, 2016), existem 93,071  
63 milhões de veículos registrados no país até o mês de setembro de 2016, e destes, 50,902  
64 milhões são automóveis, o que corresponde a 54,7% do total. Em setembro de 2015, o país  
65 possuía 89,710 milhões de veículos registrados, o que representa um crescimento de 3,75 %  
66 de setembro de 2015 a setembro de 2016.

67 Conforme Ramírez e Casagrande (2012), o CONAMA estabeleceu, através da  
68 Resolução nº 416/2009, que os fabricantes e importadores de pneus deveriam dar uma  
69 destinação final adequada aos pneus inservíveis. Antes da aprovação desta legislação,  
70 somente 10% destes pneus eram reciclados. Logo após a aprovação da legislação, houve um  
71 aumento expressivo do número de empresas que realizam o recolhimento e a destinação  
72 adequada de pneus inservíveis.

73 Nota-se, com isso, o aumento da preocupação acerca da disposição inadequada de  
74 resíduos, e a busca por alternativas de reutilização ambientalmente viáveis dos resíduos.  
75 Conforme Selung *et al.* (2013), a utilização de materiais recicláveis na construção civil vem  
76 aumentando nos últimos tempos. Este crescimento está relacionado, principalmente, com o  
77 intuito de promover a destinação ambientalmente correta dos resíduos e diminuir a quantidade  
78 de recursos naturais extraídos do ambiente.

79 Neste contexto, uma alternativa viável é o prolongamento da vida útil dos pneus  
80 através do processo de recapagem. No entanto, este processo também gera resíduos que, se  
81 não passarem por manejo e destinação final adequados, podem vir a degradar o ambiente, e  
82 por isso são alvo deste estudo.

83 Outra alternativa para a destinação adequada dos pneus é a trituração, processo que  
84 provoca a redução do volume do resíduo e, com isso, permite utilizá-lo em diversas  
85 aplicações, inclusive como reforço de solo. Franco (2012) ressalta que, devido à propriedade  
86 dos resíduos de pneus de possuírem baixos valores de peso específico e alta durabilidade, seu  
87 uso se torna interessante na composição de material de aterro em estruturas de contenção, e  
88 também para melhoramento dos parâmetros de resistência de solos de baixa capacidade de  
89 carga.

90 Visto que, em algumas circunstâncias, o solo em sua condição natural não atende às  
91 propriedades geotécnicas necessárias para o desenvolvimento de uma obra com segurança, a

92 utilização da borracha moída para reforço do solo apresenta-se como uma possível alternativa  
93 para viabilizar a realização de obras geotécnicas em solos de baixa resistência.

94 Entretanto, para a realização e desempenho eficaz de uma obra de engenharia que se  
95 apoie sobre o solo, torna-se indispensável o conhecimento acerca das propriedades  
96 geotécnicas do solo em questão. Diemer *et al.* (2008) destacaram que o desconhecimento das  
97 propriedades do solo pode comprometer a performance de vários empreendimentos, como  
98 estradas, barragens, taludes, edificações e aterros sanitários.

99 Comprovada a importância dos estudos realizados neste contexto, o presente trabalho  
100 propõe o estudo da resistência ao cisalhamento de misturas de solo argiloso residual de  
101 basalto com resíduo de borracha de pneus, para a verificação da viabilidade de sua utilização  
102 em obras geotécnicas.

### 103 **1.1 Utilização de pneus em obras de engenharia**

104 A Resolução CONAMA 416/09 estabelece que os pneus inservíveis (aqueles que  
105 apresentem danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à  
106 reforma) sejam destinados o mais próximo possível de seu local de geração, de forma  
107 ambientalmente adequada e segura. Diante desta necessidade, estão sendo desenvolvidos  
108 diversos estudos e técnicas para aplicação e utilização de pneus em obras de engenharia.

109 Os pneus podem ser utilizados em obras de engenharia de diversas formas,  
110 substituindo os materiais de construção convencionais ou servindo como agregado para  
111 reforço da obra. Sandroni e Pacheco (2003) destacam algumas aplicações dos pneus nos mais  
112 variados tipos de obras: construção de muros de arrimo e obras de contenção de encostas de  
113 maneira geral; drenagem de gases em aterros sanitários; contenção da erosão do solo e outros.

114 Selung *et al.* (2013) realizaram uma avaliação da absorção e resistência à compressão  
115 de blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneu. Os  
116 resultados obtidos no estudo apontaram uma redução na massa dos blocos com o aumento do  
117 teor de resíduo, favorecendo o aspecto ergonômico para os trabalhadores. Ainda neste  
118 contexto, Pereira *et al.* (2015) realizaram uma análise da viabilidade do uso da fibra de  
119 borracha de pneu como reforço em tijolo de solo cimento, para aplicação em alvenaria sem  
120 função estrutural. Os resultados obtidos indicam a viabilidade da utilização do solo da cidade  
121 de Presidente Epitácio - SP como matéria-prima para a fabricação de tijolos de solo-cimento,  
122 e que o incremento de fibras de borracha provoca um acréscimo da resistência à compressão.

123 Estudos foram realizados com o intuito de avaliar a viabilidade da adição da borracha  
124 moída ao solo, para o melhoramento de suas propriedades mecânicas. Franco (2012) efetuou a  
125 caracterização do comportamento geotécnico de misturas de resíduo de pneus e solo laterítico  
126 sedimentar de coloração avermelhada, coletado no município de Nísia Floresta (RN). A  
127 caracterização compreendeu a determinação de parâmetros de compactação e resistência ao  
128 cisalhamento do solo puro e misturas solo-resíduos de pneus. Os desbastes de pneus utilizados  
129 neste estudo possuem formas irregulares com espessura média equivalente a 1,6 mm e  $D_{50}$   
130 igual a 1,4 mm. Os teores de desbaste de pneu adotados no presente estudo foram de 0% (solo  
131 puro), 10%, 20%, 40%, 50% e 100% (desbaste de pneu puro). Os ensaios de compactação  
132 foram realizados com adoção da energia de Proctor Normal, sem reuso do material. Os corpos  
133 de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto foram preparados via compactação, em  
134 três camadas iguais, com amostra em condição de umidade ótima e massa específica seca  
135 aparente máxima. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados sob tensões normais de  
136 50, 100 e 200 kPa.

137 Os resultados dos ensaios de compactação apontaram diminuição da massa específica  
138 seca máxima com o aumento do teor de borracha moída da mistura. Em relação aos ensaios de  
139 cisalhamento direto, os resultados obtidos pelo autor indicam um aumento no ângulo de atrito  
140 interno na comparação das misturas com o solo puro. Além disso, pôde-se perceber um  
141 aumento da resistência ao cisalhamento até o teor de resíduos de pneu de 40%, definido pelo  
142 autor como teor "ótimo" para o solo utilizado.

143 Chrusciak (2013) realizou um estudo com o intuito de verificar a viabilidade da  
144 aplicação de fragmentos de borracha para a melhoria de parâmetros de resistência de um solo  
145 argiloso da região de Brasília (DF). O resíduo de borracha utilizado neste trabalho é composto  
146 por um predomínio de partículas com tamanho nominal entre 4 e 25,4 mm. Os teores de  
147 borracha utilizados no estudo foram de 0, 2,5%, 3,75%, 5% e 7,5%. Inicialmente, foram  
148 realizados ensaios de compactação para a determinação do teor de umidade ótimo ( $w_{ótimo}$ ) e  
149 peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d \text{ máx}$ ). Os valores obtidos nestes ensaios serviram de  
150 base para a preparação dos corpos de prova submetidos ao cisalhamento, nas condições de  
151  $w_{ótimo}$  e  $\gamma_d \text{ máx}$ . Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em uma caixa de  
152 cisalhamento de dimensões médias (300 x 300 x 175 mm<sup>3</sup>), sob tensões normais de 25, 50 e  
153 80 kPa.

154 De posse dos resultados, Chrusciak (2013) concluiu que o aumento do teor de resíduo  
155 de borracha provocou um aumento no teor de umidade ótimo e uma diminuição do peso  
156 específico seco máximo, e que com o aumento do teor de borracha, ocorreu um decréscimo  
157 linear da coesão, e um acréscimo do ângulo de atrito. Além disso, observou-se que o teor  
158 "ótimo" foi de 5% de resíduos de pneus. Por fim, apesar de certa queda na resistência ao  
159 cisalhamento das misturas, Chrusciak (2013) pôde concluir que o uso dos resíduos de pneus  
160 pode ser realizado, desde que sejam levados em consideração aspectos financeiros e os  
161 possíveis impactos ambientais que a borracha possa causar ao meio.

162 Ainda neste contexto, Ramírez e Casagrande (2012) realizaram um estudo  
163 experimental de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis. O solo argiloso  
164 utilizado no estudo foi coletado no Campo Experimental II da Pontífica Universidade Católica  
165 do Rio de Janeiro, e a borracha para reforço de solo é proveniente da trituração de pneus  
166 inservíveis na composição de 50% em peso de veículos de passeio e 50% de pneus de  
167 veículos de carga. O tamanho máximo da borracha moída utilizada neste trabalho, para todas  
168 as misturas, foi de 2,0 mm, e os teores adotados foram de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de  
169 borracha moída com o solo argiloso, calculados em relação ao peso do solo seco.

170 Ramírez e Casagrande (2012) realizaram ensaios do tipo consolidado isotropicamente  
171 e drenado durante a fase de cisalhamento (CID). A amostra utilizada neste ensaio foi  
172 compactada segundo a energia de Proctor Normal. Foram aplicadas tensões efetivas de 50,  
173 100, 200 e 400 kPa em todos os casos. Os resultados obtidos pelo autor apontam que o  
174 incremento da borracha é mais efetivo para tensões de confinamento de até 200 kPa, já que  
175 para tensões maiores a presença de borracha é prejudicial. O teor ótimo de borracha,  
176 correspondente ao melhor desempenho em relação à resistência ao cisalhamento, situou-se  
177 entre 10% e 20%.

## 178 **1.2 Caracterização do solo e geologia do local**

179 A região de Chapecó/SC é composta por solos residuais de basalto, que caracterizam-  
180 se por serem solos férteis e apresentarem textura argilosa de cor vermelha escura e drenagem  
181 bem desenvolvida (DIEMER *et al.*, 2008). Estes solos são provenientes da decomposição de  
182 rochas da Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, na qual predominam rochas vulcânicas  
183 efusivas representadas por uma sucessão de derrames que cobrem cerca de 50% da superfície  
184 do estado de Santa Catarina. Destacam-se a sequência básica, constituída por basaltos de

185 coloração cinza escura a negra e com intercalações de arenitos intertrapeanos; e a sequência  
186 ácida representada por riolitos e riolacitos (SCHEIBE, 1986).

187 Menegotto *et al.* (2016) realizaram uma caracterização geotécnica do solo da Área  
188 Experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) - *Campus* Chapecó. A  
189 caracterização foi realizada por meio de ensaios de laboratório em amostras de solo  
190 deformadas, coletadas com o auxílio de um trado holandês, e compreendeu a determinação do  
191 teor de umidade natural ( $w$ ), massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), limite de liquidez (LL), limite  
192 de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e composição granulométrica do solo. Uma  
193 síntese dos resultados obtidos está apresentada na Tabela 1.

194

195 Tabela 1 - Síntese dos resultados dos ensaios de caracterização do solo da Área Experimental  
196 da UFFS - *Campus* Chapecó (MENEGOTTO *et al.*, 2016)

Prof. (m)	$w$ (%)	$\rho_s$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0,5	29,3	2,757	79	13	8	53,3	39,9	13,4

197

## 198 2 METODOLOGIA

### 199 2.1 Coleta da amostra de solo

200 O solo utilizado nos ensaios de compactação e cisalhamento direto foi coletado na  
201 Área Experimental do *Campus* Chapecó da UFFS. Esta área localiza-se nas coordenadas  
202 geográficas 27° 07' 07,9" S e 52° 42' 25,7" W e apresenta uma altitude de 603 m em relação ao  
203 nível do mar. Realizou-se a abertura de uma cava de 1,0 x 1,0 m<sup>2</sup> para a coleta do solo  
204 empregado neste estudo. O solo coletado é proveniente da camada superficial, entre 0,3 e 0,6  
205 metros de profundidade. A preparação dos corpos de prova foi realizada com o solo passante  
206 na peneira de abertura de 2 mm e seco ao ar livre.

### 207 2.2 Caracterização do resíduo de borracha de pneus

208 Os resíduos de borracha utilizados neste estudo foram fornecidos por uma empresa de  
209 recauchutagem da região oeste de Santa Catarina. Uma amostra do resíduo de borracha está  
210 apresentada na Figura 1. Pode-se perceber que os resíduos de borracha possuem, de maneira  
211 geral, formato fibrilar.



212

213

Figura 1 - Resíduo de borracha de pneus utilizado no estudo.

214

215

216

217

218

219

220

A caracterização deste resíduo consistiu na realização dos ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica. A determinação da composição granulométrica dos agregados foi realizada seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 1984). Neste ensaio, uma amostra de solo de aproximadamente 500 g é passada por um conjunto de peneiras sucessivas de aberturas estabelecidas. O ensaio foi realizado em duplicata, e a curva granulométrica final foi elaborada a partir da média aritmética das porcentagens passantes dos dois ensaios.

221

222

223

224

225

226

227

228

229

A determinação da massa específica do resíduo se deu conforme a NBR 6508 (ABNT, 1983). Neste ensaio, uma amostra de 50 gramas de resíduo de borracha de pneus foi transferida a um picnômetro de 500 ml, previamente calibrado. Então, o volume do picnômetro foi completado com álcool etílico 95%, e determinou-se a massa do conjunto. A massa específica foi determinada a partir da diferença de massa entre o picnômetro contendo o resíduo e o valor da calibração. Além disso, adotou-se etílico 95% ao invés de água destilada, pois a utilização de água na realização do ensaio impediria a sedimentação da amostra, visto que a borracha possui baixa densidade. O ensaio foi realizado em triplicata, e o resultado final corresponde à média aritmética dos valores obtidos.

230

231

A determinação da massa unitária do resíduo de borracha seguiu as diretrizes da NBR NM 45 (ABNT, 2006). Na realização deste ensaio, um recipiente cilíndrico de massa e



232 volume conhecidos foi completamente preenchido com o resíduo de borracha, e determinou-  
233 se a massa do conjunto. A massa unitária é a razão entre a massa de borracha necessária para  
234 preencher completamente o recipiente e o volume do recipiente. Este ensaio foi realizado em  
235 triplicata, e o valor final obtido corresponde à média aritmética dos ensaios.

### 236 **2.3 Ensaios de resistência das misturas de solo com borracha**

237 As amostras de solo utilizadas neste estudo correspondem a amostras deformadas,  
238 superficiais, coletadas na Área Experimental do *Campus* Chapecó da UFFS. Para a realização  
239 dos ensaios de compactação e cisalhamento, foram adotados teores de borracha de pneu de 0  
240 (solo puro), 5%, 10%, 15% e 20%. Estes teores correspondem a proporções em massa.  
241 Portanto, para a mistura com teor de borracha de 5%, teremos uma proporção de 95 gramas de  
242 solo seco para 5 gramas de borracha; o princípio é o mesmo para os demais teores de  
243 borracha. Desta forma, o teor de resíduos de borracha de pneus ( $\beta$ ) foi definido conforme a  
244 Equação 1:

$$245 \quad \beta = \frac{M_{BS}}{M_{BS} + M_{SS}} \times 100 \quad (1)$$

246 onde  $M_{BS}$  é a massa de borracha seca, em gramas; e  $M_{SS}$  é a massa de solo seco, em gramas.

247 Os ensaios de compactação para a determinação do teor de umidade ótimo ( $w_{ótimo}$ ) e a  
248 massa específica seca máxima ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ) seguiram as orientações da NBR 7182 (ABNT, 1986a).  
249 Adotou-se a energia de compactação Proctor Normal, e os ensaios foram realizados com  
250 reuso de material, utilizando um soquete de 2,5 kg para a compactação das misturas e do solo  
251 puro. A compactação foi realizada em três camadas, com um total de 26 golpes por camada.  
252 Os cilindros utilizados no ensaio possuem diâmetro e altura aproximados de 10 cm e 12,8 cm,  
253 respectivamente.

254 As amostras utilizadas no ensaio de cisalhamento direto foram compactadas  
255 estaticamente, utilizando uma prensa de CBR (California Bearing Ratio). A compactação  
256 ocorreu em três camadas de massa aproximadamente iguais. Conhecendo as dimensões da  
257 célula bipartida e conhecendo a massa específica seca máxima previamente determinada,  
258 tornou-se possível calcular a massa de solo a ser colocado neste recipiente para que, ao final  
259 da compactação estática, a amostra possua um volume tal, que a massa de solo seco  
260 (descontado o teor de umidade higroscópica) dividida por este volume, resulte na massa  
261 específica seca máxima. Além disso, calculou-se a quantidade de água a ser acrescentada na  
262 amostra de solo para que esta se encontre na condição de teor de umidade ótimo.

263 O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em um equipamento eletrônico da marca  
264 Pavitest. O equipamento é controlado por meio de software específico, e possui dois sensores  
265 para medição de deslocamentos lineares (LVDTs), os quais medem deslocamento vertical e  
266 horizontal. Além disso, este equipamento também possui uma célula de carga para medida da  
267 força de cisalhamento.

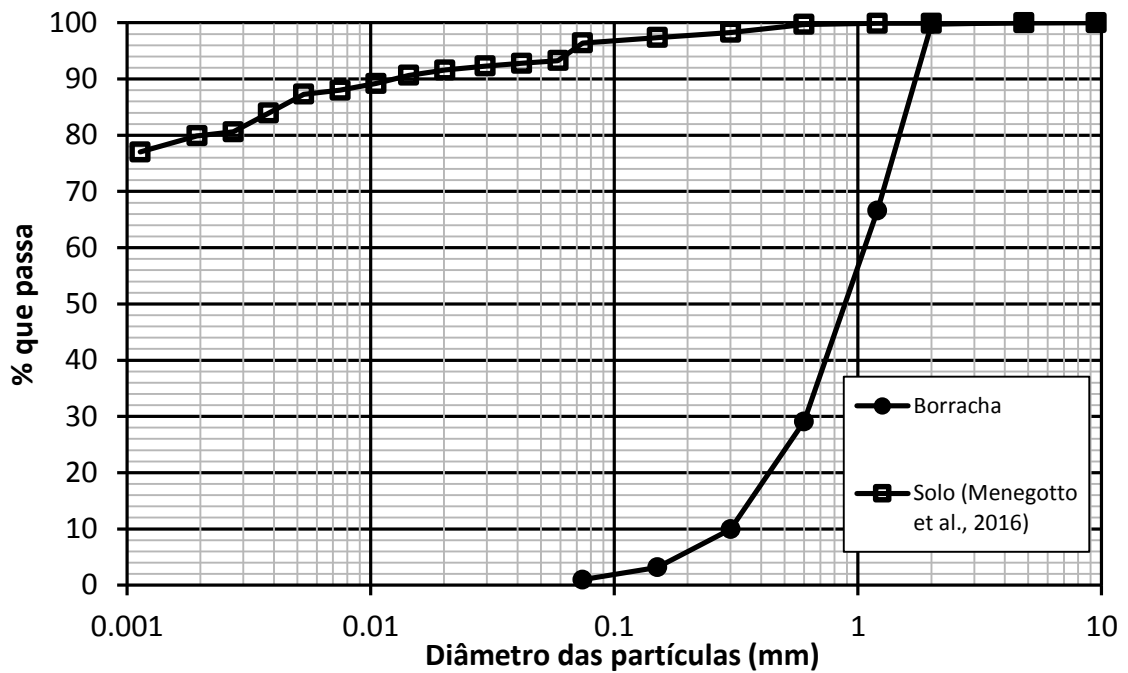
268 Foi adotada uma velocidade de cisalhamento de 0,020 mm/min para a realização dos  
269 ensaios, os quais ocorreram até a condição de deslocamento máximo de 8,0 mm. As tensões  
270 normais adotadas nos ensaios foram de 50, 100, 200 e 300 kPa.

### 271 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

272 O valor da massa específica do resíduo de borracha, correspondente à média aritmética  
273 simples de três determinações, foi de 1,142 g.cm<sup>-3</sup>. O valor obtido da massa unitária do  
274 resíduo da borracha foi de 0,375 g.cm<sup>-3</sup>, com variação menor do que 1% entre os valores que  
275 compõem a média. Os resultados obtidos são coerentes com valores encontrados por outros  
276 autores, como Fioriti, Ino e Akasaki (2007), que obtiveram valores de 1,090 g.cm<sup>-3</sup> e 0,348  
277 g.cm<sup>-3</sup> para a massa específica e massa unitária, respectivamente. Selung *et al.* (2013)  
278 encontraram valores de 1,150 g.cm<sup>-3</sup> para a massa específica e 0,389 g.cm<sup>-3</sup> para a massa  
279 unitária.

280 O resultado da análise granulométrica do resíduo de borracha está apresentado na  
281 Figura 2, juntamente com a curva granulométrica do solo caracterizado por Menegotto *et al.*  
282 (2016). Observa-se que a borracha utilizada neste estudo é composta por partículas de  
283 tamanho compreendido entre 0,07 e 2 mm, com diâmetro efetivo de 0,3 mm. A amostra de  
284 solo apresentou predominância de partículas de argila em sua composição.

285 No Apêndice A encontram-se as curvas da composição granulométrica teórica das  
286 misturas, apresentadas na Figura 9.



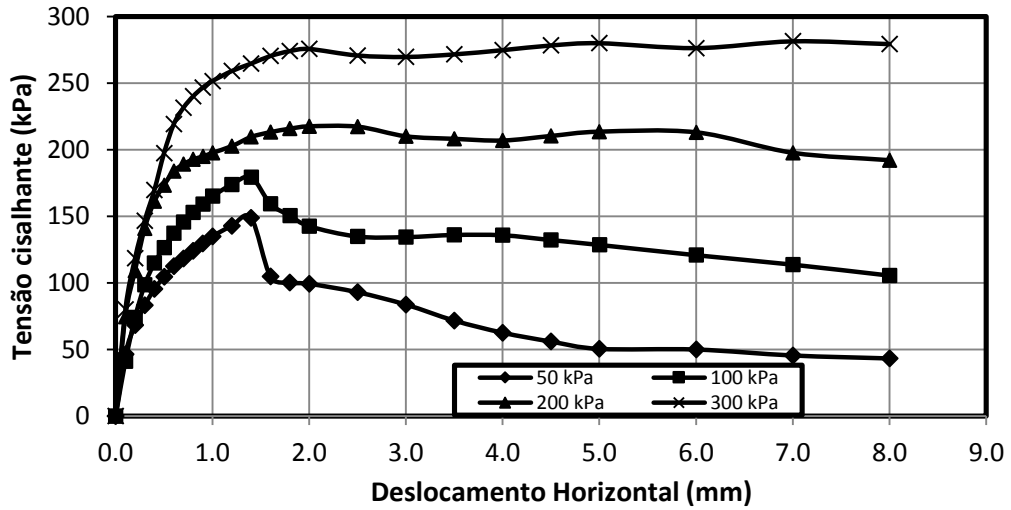
287  
288 Figura 2 - Curva granulométrica do resíduo de borracha e do solo coletado na Área  
289 Experimental do Campus Chapecó da UFFS (modificado de Menegotto *et al.*, 2016).  
290

291 Na Tabela 2, são apresentados os valores de teor de umidade ótimo ( $w_{ótimo}$ ) e massa  
292 específica seca máxima ( $\rho_{d \text{ máx}}$ ) referentes aos ensaios de compactação realizados nas  
293 amostras de solo puro e mistura de solo com borracha. Observa-se que o aumento do teor de  
294 resíduo de borracha promove uma diminuição do teor de umidade ótimo e da massa específica  
295 seca máxima, comportamento também encontrado por Ramírez e Casagrande (2012).

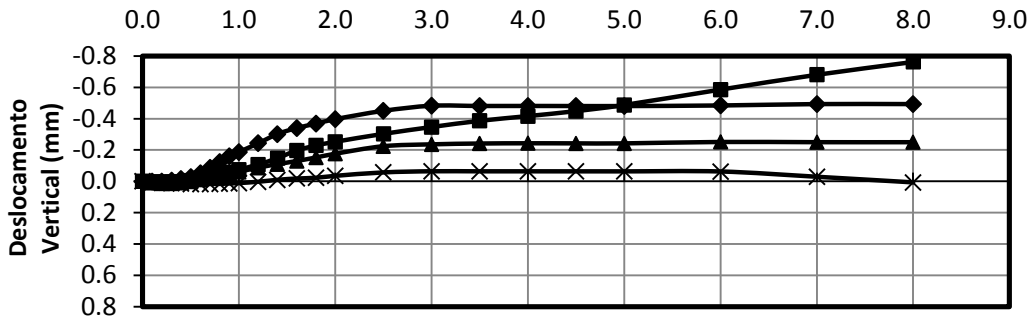
296 Tabela 2 - Resultados do ensaio de compactação realizado para o solo puro e misturas de solo  
297 com borracha.

Teor de borracha (%)	Símbolo	$\rho_{d \text{ máx}}$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$w_{ótimo}$ (%)
0	S100	1,382	32,0
5	S95/B5	1,358	31,3
10	S90/B10	1,320	30,1
15	S85/B15	1,297	29,7
20	S80/B20	1,263	28,8

298  
299 As curvas tensão cisalhante e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal  
300 obtidas nos ensaios de cisalhamento direto são apresentadas nas Figuras 3 a 7. Em relação à  
301 deformação vertical, o valor positivo refere-se à redução de volume e negativo à expansão da  
302 amostra durante o cisalhamento.



303

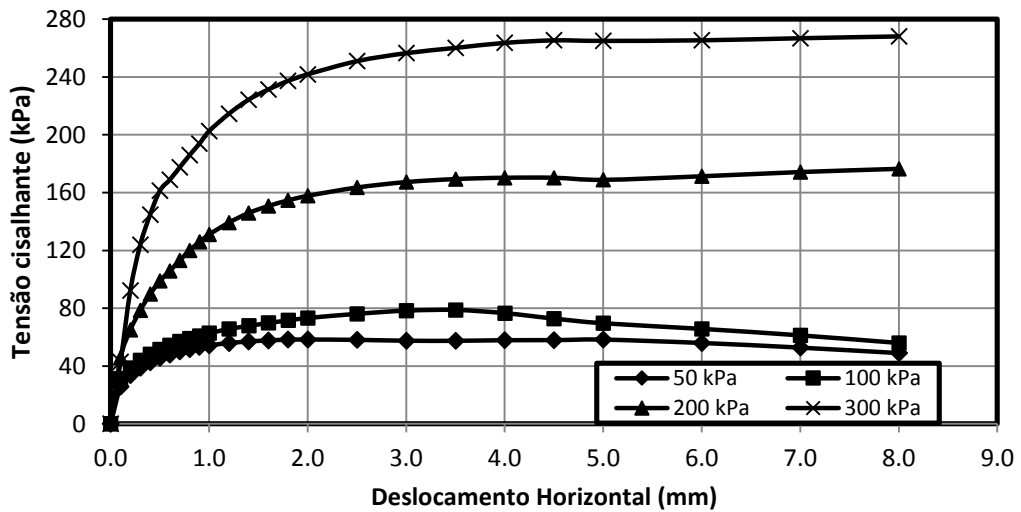


304

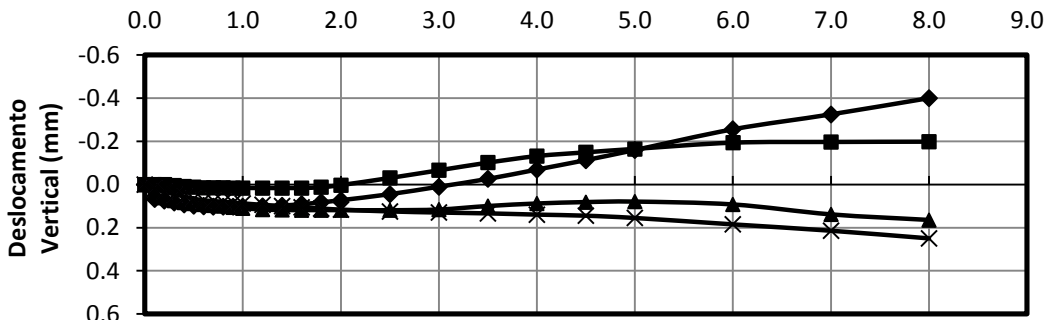
305

Figura 3 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto em amostras de solo puro (S100).

306



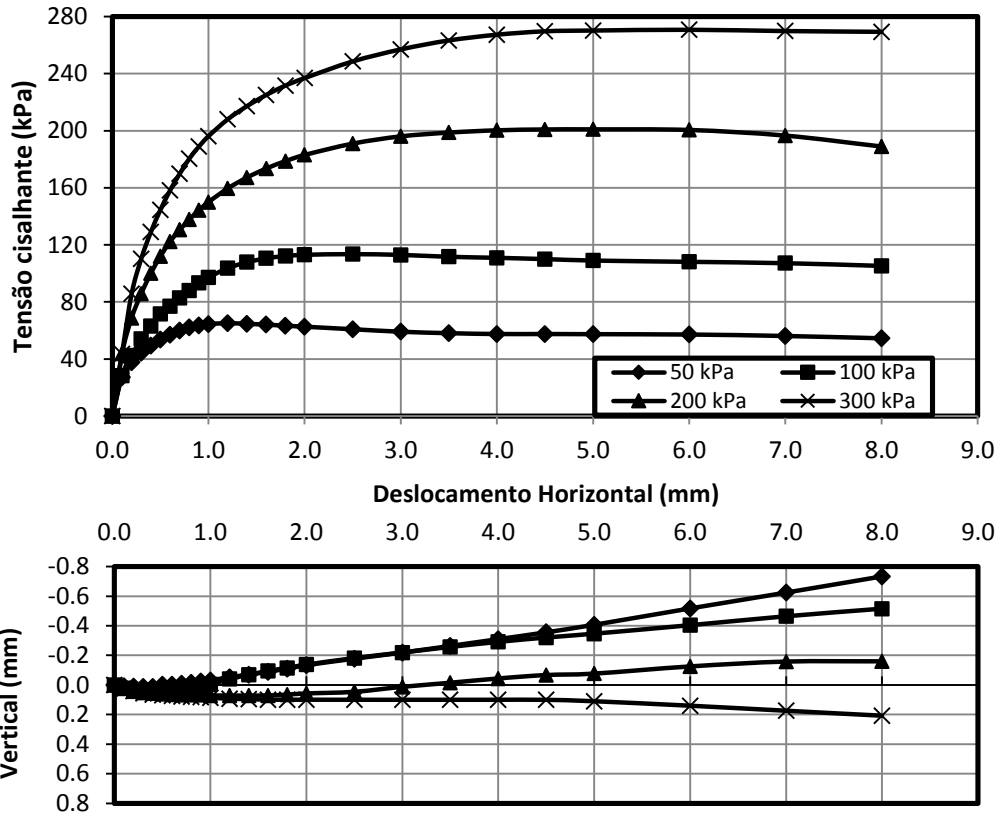
307



308

309

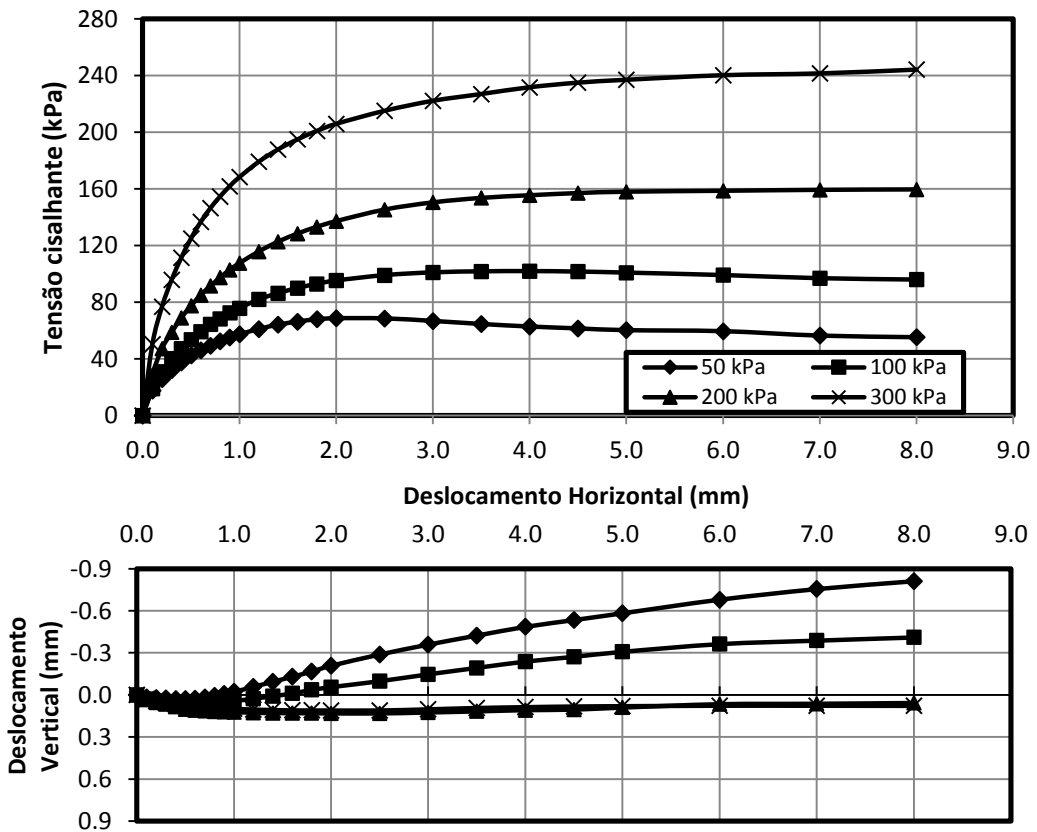
Figura 4 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto para a mistura S95/B5.



310

311  
312  
313

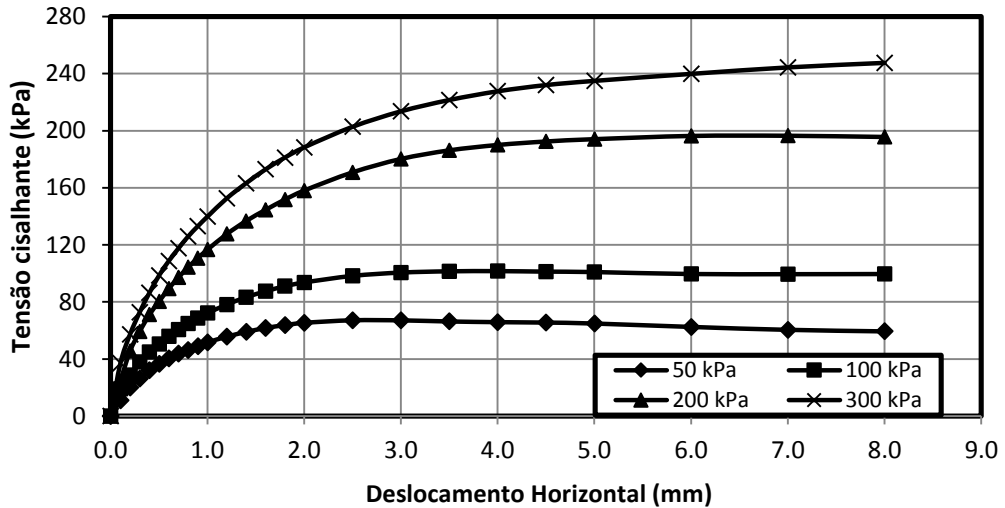
Figura 5 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto para a mistura S90/B10.



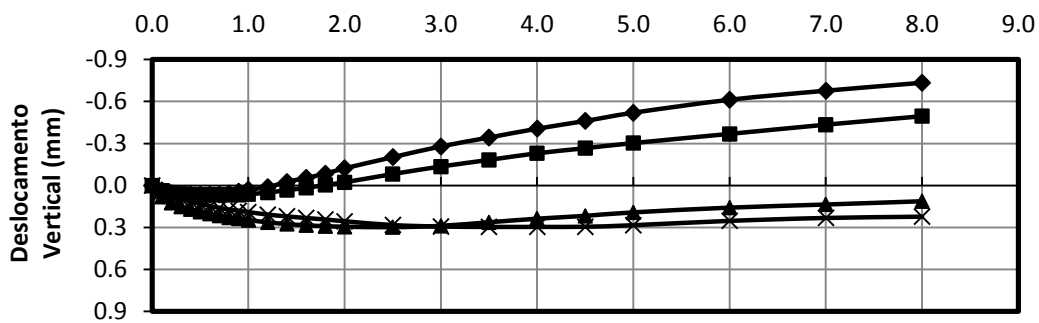
314

315  
316  
317

Figura 6 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto para a mistura S85/B15.



318



319

320

321

Figura 7 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto para a mistura S80/B20.

322

323

324

325

326

327

328

329

330

Pelos resultados obtidos, nota-se que os corpos de prova de solo puro sofreram expansão em todas as tensões normais aplicadas, com maior expansão nas condições de tensões normais menores. Já para as misturas de solo com borracha, percebe-se que, de maneira geral, todos os corpos de prova sofreram uma leve contração inicial. Ao longo do deslocamento horizontal, houve aumento do volume nas condições de tensões normais de 50 e 100 kPa, e diminuição do volume nas condições de tensões normais de 200 e 300 kPa. O aumento do volume nas condições de menores tensões normais também foi observado por Franco (2012), e pode estar relacionado com as características elásticas da borracha, que passa a exercer uma força de expansão contrária à tensão de confinamento.

331

332

333

334

335

336

337

Através da Figura 3, observa-se que a amostra de solo puro apresentou picos de resistência bem definidos para as tensões normais de 50 e 100 kPa, os quais ocorreram em deslocamentos horizontais próximos a 1,5 mm. Estes picos de resistência, os quais evidenciam um rompimento brusco das amostras, podem ter relação com o plano existente entre as camadas de compactação do corpo de prova, que possivelmente foi atingido durante o ensaio. Para o caso das tensões normais maiores, acredita-se que este plano de fraqueza não ficou tão evidente devido à alta tensão de confinamento, que pode ter promovido maior

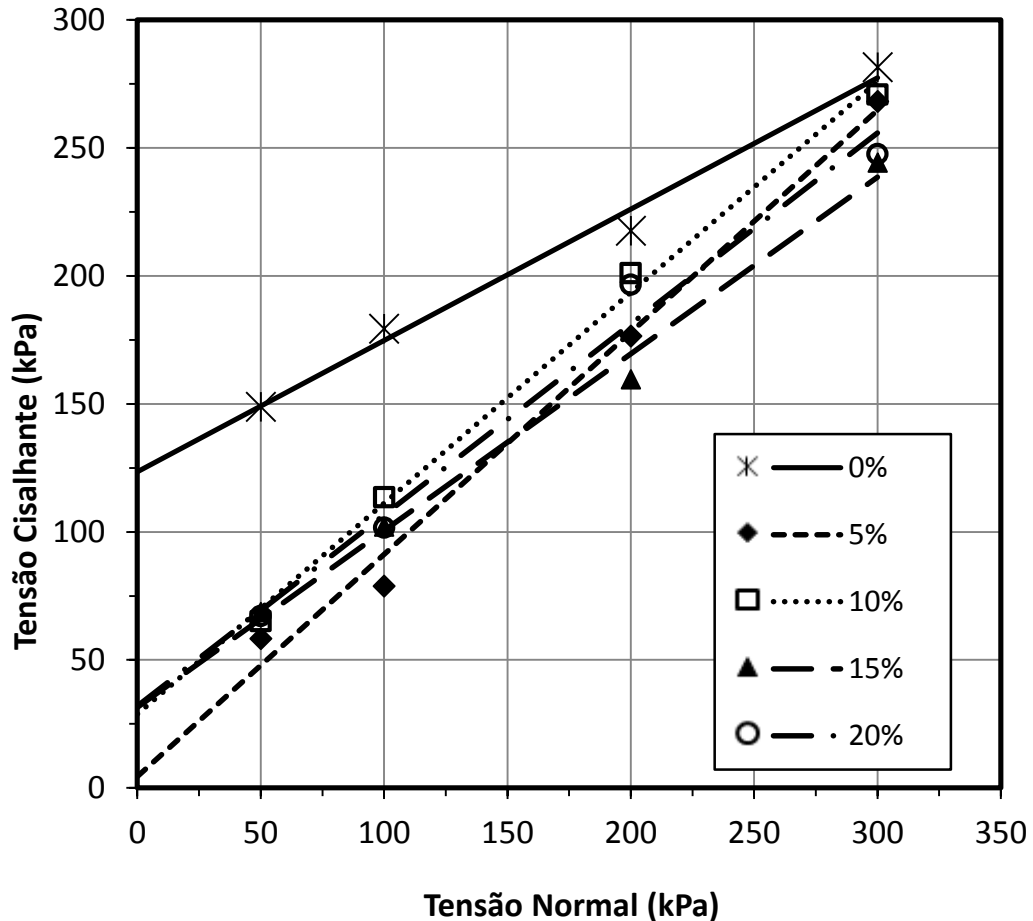
338 aderência entre as camadas de solo. Com o incremento do resíduo de borracha, as misturas  
 339 passaram a apresentar estabilização da tensão cisalhante, a partir de 3,0 mm, sem um pico de  
 340 resistência ao cisalhamento bem definido (Figuras 4 a 7) para todas as condições de tensão  
 341 estudadas, comportamento que também foi observado por Franco (2012) e Chrusciak (2013).  
 342 Uma hipótese levantada pelo segundo autor para este comportamento é de que a borracha  
 343 acrescentada ao solo acaba por absorver certa energia que é aplicada ao solo, e por serem mais  
 344 deformáveis acabam por atenuar o pico de resistência. Além disso, existe uma tendência de  
 345 aumento do deslocamento horizontal necessário para a ruptura do corpo de prova, com o  
 346 aumento do teor de borracha. Isto ocorre pois o material se torna mais deformável com o  
 347 aumento do teor de borracha. No Apêndice B encontram-se as curvas de tensão de  
 348 cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para uma mesma tensão normal, apresentadas  
 349 nas Figuras 10 a 13, e que evidenciam este comportamento.

350 Na Tabela 3, são apresentadas as tensões cisalhantes máximas dos ensaios realizados  
 351 com diferentes teores e tensões normais. Além disso, apresenta-se a porcentagem de queda da  
 352 tensão cisalhante das misturas em relação ao solo puro. Nota-se que, de maneira geral, a  
 353 porcentagem de queda diminui com o aumento da tensão normal, para cada teor de borracha.

354 Tabela 3 - Tensões cisalhantes máximas e porcentagem de queda em relação ao solo puro para  
 355 as diferentes condições de mistura e tensão normal.

Teor de borracha (%)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	% de queda em relação ao solo puro
0	50	148,9	-
0	100	179,3	-
0	200	217,6	-
0	300	281,4	-
5	50	58,3	60,8
5	100	78,8	56,1
5	200	176,4	18,9
5	300	268,1	4,72
10	50	65,1	56,3
10	100	113,5	36,7
10	200	201,0	7,6
10	300	270,8	3,8
15	50	68,7	53,9
15	100	102,0	43,1
15	200	159,6	26,7
15	300	244,2	13,2
20	50	67,1	54,9
20	100	101,6	43,3
20	200	196,5	9,7
20	300	247,6	12,0

356 Através da interpretação das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento vertical,  
 357 tornou-se possível a elaboração das envoltórias de resistência, para a condição de ruptura,  
 358 através do critério de Mohr-Coulomb. As envoltórias são apresentadas na Figura 8, e os  
 359 valores de coesão (c) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) correspondentes são apresentados na Tabela 4.



360  
 361 Figura 8 - Envoltórias de ruptura para o solo puro e misturas de solo com borracha.

362  
 363 Os resultados apresentados na Figura 7 evidenciam que o teor de borracha ótimo do  
 364 atual estudo situa-se próximo dos 10%, visto que a mistura S90B10 apresentou maior  
 365 resistência, com envoltória mais elevada, em relação às outras misturas. Nota-se, ainda, que a  
 366 partir de uma tensão normal próxima a 300 kPa, a envoltória de tensões da mistura S90B10  
 367 ultrapassa a envoltória de tensões do solo puro.

368

369

370

371



372 Tabela 4 - Síntese dos parâmetros de resistência para o solo puro e misturas de solo com  
373 borracha.

Teor de borracha (%)	Símbolo	Coesão (c) (kPa)	Ângulo de atrito ( $\phi$ ) (°)
0	S100	123,5	27,1
5	S95/B5	4,4	40,9
10	S90/B10	28,8	39,4
15	S85/B15	31,5	34,6
20	S80/B20	32,0	36,7

374

375 Pelos resultados apresentados na Tabela 3, percebe-se uma acentuada diminuição da  
376 coesão do solo puro em relação às misturas de solo com borracha. Em contrapartida, o  
377 incremento da borracha ao solo promoveu a elevação do ângulo de atrito interno, embora não  
378 possa ser definida uma tendência clara entre o teor de borracha e o ângulo de atrito. O  
379 aumento do ângulo de atrito pelo acréscimo da borracha também foi evidenciado em outros  
380 estudos, como Franco (2012) e Chrusciak (2013).

381 Tendo em vista que a massa específica seca máxima da mistura é menor do que a de  
382 solo puro, a utilização da mistura de solo com borracha em projetos de aterros que se  
383 assentem sobre solos mais deformáveis, ou de menor resistência, é uma alternativa viável, já  
384 que o incremento de borracha ao solo não promove perdas significativas de resistência, e o  
385 peso da mistura de solo com borracha é menor do que o do solo puro, o que promoverá uma  
386 tensão menor sobre o solo de base.

#### 387 4 CONCLUSÕES

388 O presente trabalho compreendeu a realização de ensaios de laboratório, com o intuito  
389 de verificar a viabilidade da utilização de borracha moída em obras geotécnicas.

390 Os resultados apresentados permitem concluir que o teor de borracha exerce influência  
391 direta na curva de compactação das misturas de solo com borracha, de maneira que quanto  
392 maior o teor de borracha, menor a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo.

393 As amostras de solo puro ensaiadas sob tensões normais mais baixas apresentaram  
394 picos de resistência bem definidos, que evidenciam um rompimento brusco das amostras. Este  
395 comportamento pode ter relação com o plano existente entre as camadas de compactação do  
396 corpo de prova, que possivelmente foi atingido durante o ensaio. Por outro lado, as misturas  
397 de solo com borracha não apresentaram um pico de resistência bem definido, ocorrendo  
398 estabilização da tensão cisalhante a partir de deslocamentos horizontais maiores.

399 Em relação à variação do volume, pôde-se perceber que as misturas de solo com  
400 borracha sofreram, de maneira geral, aumento do volume ao longo do ensaio, para as  
401 condições de tensões normais baixas (50 e 100 kPa), e diminuição do volume ao longo do  
402 ensaio, para as condições de tensões normais altas (200 e 300 kPa). Este comportamento pode  
403 estar relacionado com as características elásticas da borracha, que após sofrer contração, passa  
404 a exercer uma força de expansão contrária à tensão de confinamento.

405 As misturas apresentaram, de maneira geral, maior ângulo de atrito interno e menor  
406 coesão, se comparadas ao solo puro. O teor de borracha com melhor envoltória de resistência  
407 situou-se próximo dos 10%.

408 Observou-se que, com um pequeno incremento de borracha ao solo, houve grande  
409 diminuição do intercepto de coesão. Este fato pode estar relacionado com as características da  
410 borracha, que comporta-se como um material granular no interior do solo, fazendo com que as  
411 misturas assumam comportamento similar ao de solos arenosos.

412 Embora as misturas de solo com borracha apresentem menor resistência do que o solo  
413 puro, estas ainda possuem características de resistência que podem suprir as demandas de  
414 obras de engenharia, como em aterros rodoviários, aterros sobre solos deformáveis ou de  
415 baixa resistência, e outros. Desta forma, o incremento da borracha moída do presente estudo  
416 ao solo, de maneira a atingir um teor de borracha próximo a 10%, apresenta-se como uma  
417 alternativa viável à utilização em obras geotécnicas, pois promove a redução do peso próprio  
418 do material, ao mesmo tempo em que permite a destinação final adequada de um resíduo.

419 Nota-se que o tamanho, o formato e a posição dos resíduos de borracha no corpo de  
420 prova exerceram influencia direta sobre os parâmetros de resistência, podendo inclusive  
421 promover a diminuição da resistência de pico por favorecer deslizamento entre os planos de  
422 resistência, devido ao seu formato fibrilar. Por isso, sugere-se a realização de estudos  
423 utilizando resíduo de borracha de pneus de maior granulometria, o que possivelmente  
424 resultaria em um maior ângulo de atrito das misturas de solo com borracha.

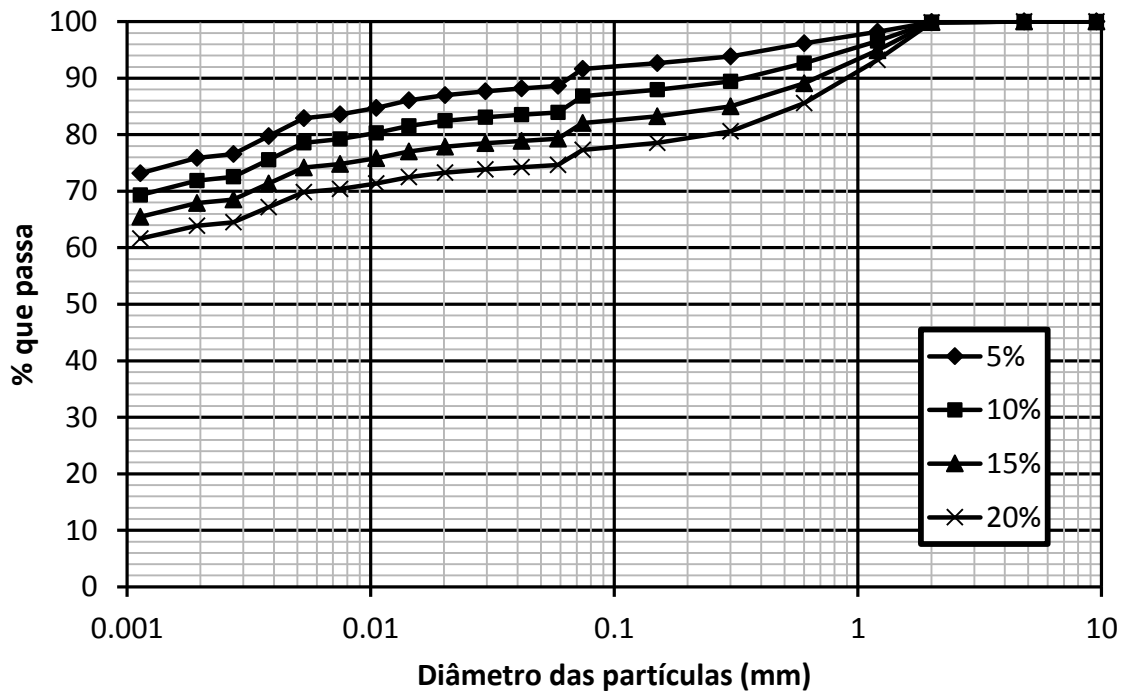
425 Ressalta-se, ainda, a importância da realização de estudos que mensurem o impacto  
426 ambiental que o incremento da borracha provoca no solo, a qual pode exercer influência direta  
427 nas características do solo, interferindo na retenção de água, lixiviação e contaminação do  
428 lençol freático, bem como dos organismos que o habitam, podendo influenciar  
429 toxicologicamente o meio.



- 460 FRANCO, K. L. B. *Caracterização do comportamento geotécnico de misturas de resíduo de*  
461 *pneus e solo laterítico*. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade  
462 Federal do Rio Grande do Norte, Curso de pós-graduação em Engenharia Sanitária, Centro de  
463 Tecnologia, Natal, 2012.
- 464 MENEGOTTO, M. L.; BANDEIRA, F. O.; SARTORI, L.; MORAIS, M. Caracterização  
465 geotécnica preliminar do solo da Área Experimental da UFFS - *Campus Chapecó*. In: *XVIII*  
466 *COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica,*  
467 *2016, Belo Horizonte - MG. Anais...* São Paulo: ABMS, 2016.
- 468 PEREIRA, A. M.; FAZZAN, J. V.; FREITAS, V. de. Análise da viabilidade do uso da fibra  
469 de borracha de pneu como reforço em tijolo de solo cimento. *Revista Nacional de*  
470 *Gerenciamento de Cidades*, São Paulo, v. 3, n. 20, p. 53-65, 2015.
- 471 RAMÍREZ, G. G. D.; CASAGRANDE, M. D. T. *Estudo Experimental de Solos Reforçados*  
472 *com Borracha Moída de Pneus Inservíveis*. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em  
473 Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de  
474 Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.
- 475 SANDRONI, M.; PACHECO, B. A. V. *Os destinos dos pneus inservíveis*. NIEAD/UFRJ.  
476 2003. Disponível em: < <http://www.jorplast.com.br/jpout03/pag08.html>>. Acesso em: 02 jun  
477 2016.
- 478 SELUNG, C; MENEGOTTO, M. L.; MENEGOTTO, A. G. F.; PAVAN, R. C.; Avaliação de  
479 blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneu. *HOLOS*  
480 *Environment (Online)*,v. 13, n. 2, p. 212-223, 2013. ISSN: 1519-8634 (ON-LINE). Qualis-  
481 anais: B4 (nacional). Disponível em:  
482 <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/holos/article/view/6518/5704>>.  
483 Acesso em: 26 jul. 2016.
- 484 SCHEIBE, L.F. (1986) A geologia de Santa Catarina: sinopse provisória. *Geosul*, Vol. 1, n. 1,  
485 p. 7-38.
- 486
- 487
- 488

489

### APÊNDICE A - Curvas da composição granulométrica teórica das misturas



490

Figura 9 - Curvas da composição granulométrica teórica das misturas de solo com borracha.

491

492

493

494

495

496

497

498

499

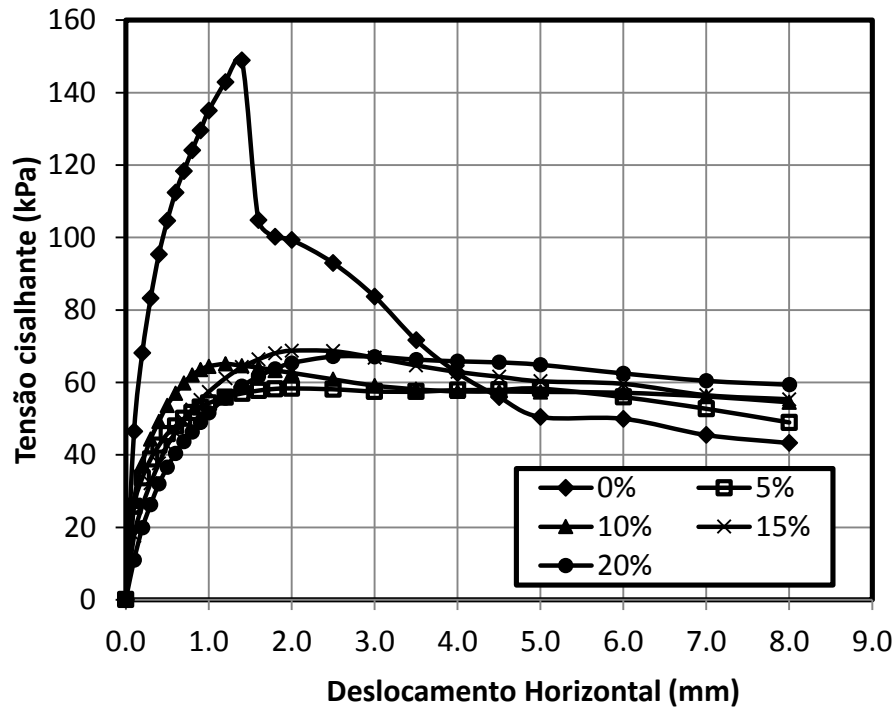
500

501

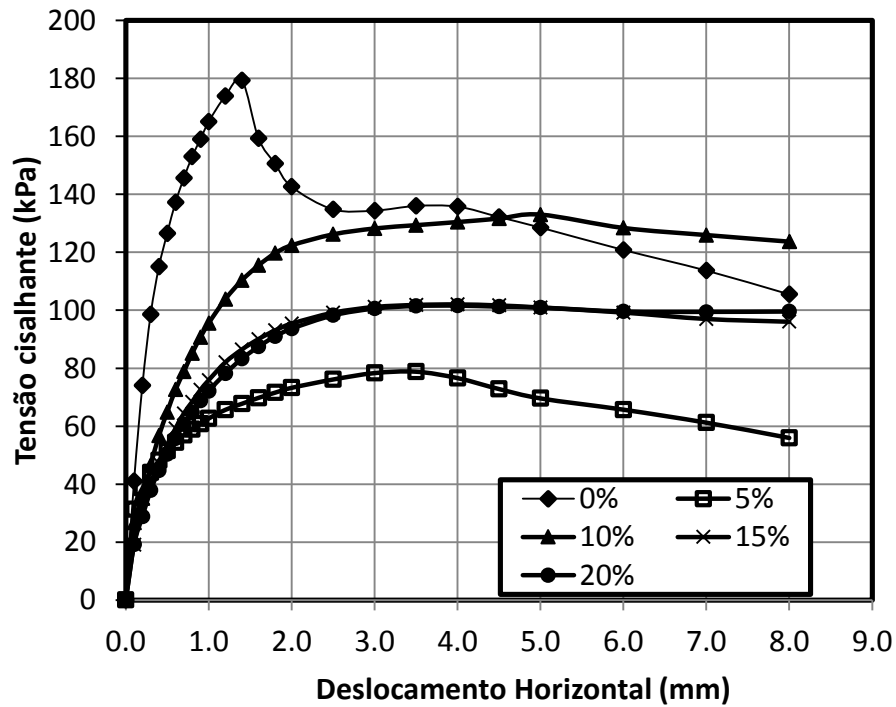
502

503

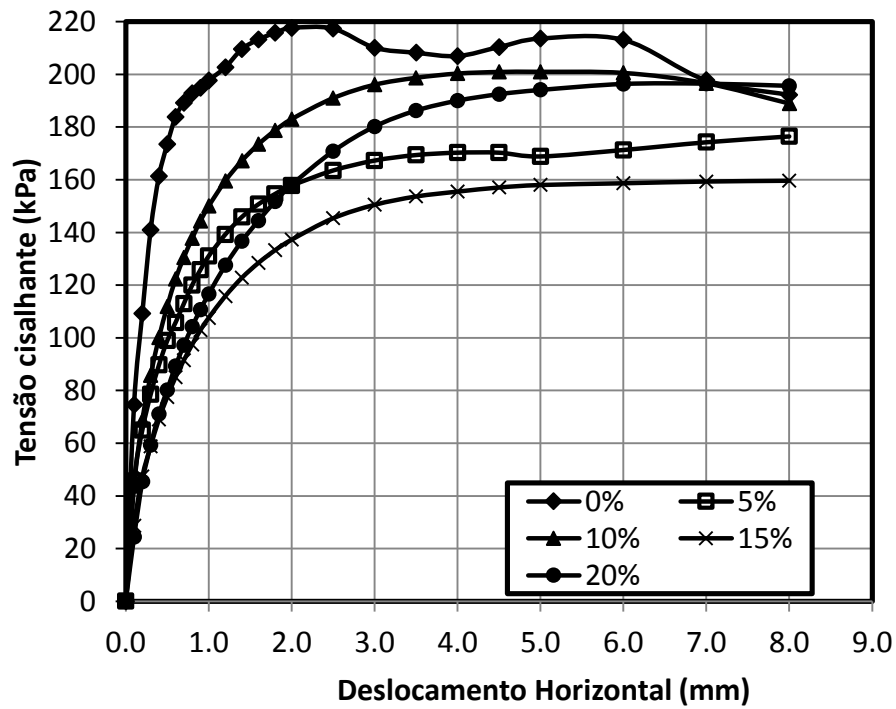
504 APÊNDICE B - Curvas de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para  
 505 uma mesma tensão normal.



506  
 507 Figura 10 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo puro e misturas, para  
 508 tensão normal de 50 kPa.  
 509

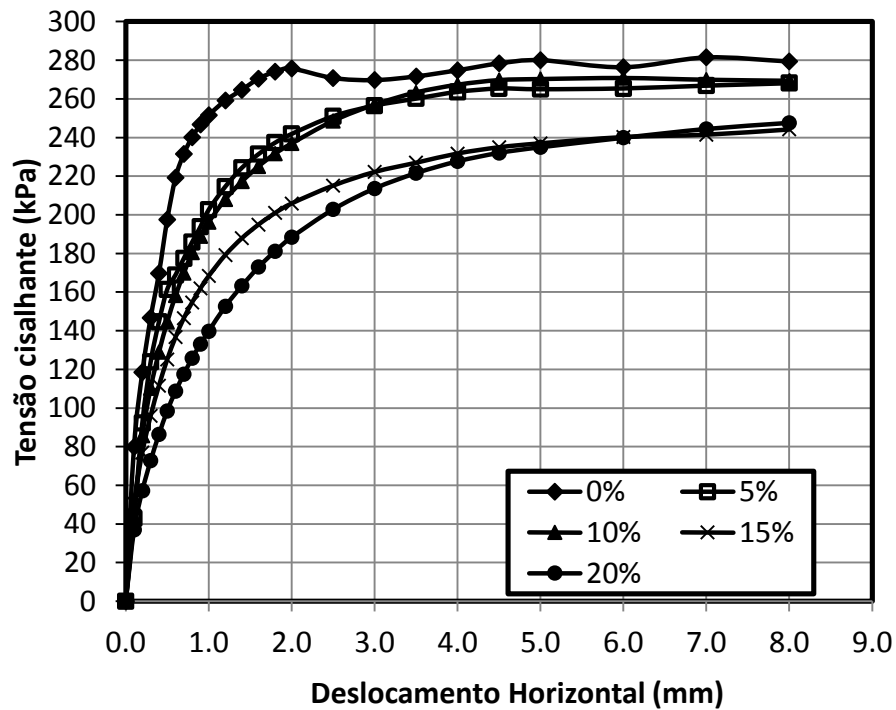


510  
 511 Figura 11 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo puro e misturas, para  
 512 tensão normal de 100 kPa.  
 513



514  
515  
516  
517  
518

Figura 12 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo puro e misturas, para tensão normal de 200 kPa.



519  
520  
521  
522  
523

Figura 13 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo puro e misturas, para tensão normal de 300 kPa.