

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Rafael Nedel

**RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO EM AREIA
ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO
DE ASFALTO**

Porto Alegre
dezembro de 2019

RAFAEL NEDEL

**RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO EM AREIA
ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO
DE ASFALTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lucas Festugato

Porto Alegre
dezembro de 2019

RAFAEL NEDEL

**RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO EM AREIA
ARTIFICIALMENTE CIMENTADAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO
DE ASFALTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Festugato

PhD pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli

PhD pela Universidade de Oxford

Eng^o Msc. Eduardo Pasche (UFRGS)

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng^a Andressa Silva (UFRGS)

Bacharel pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho ao acaso, do qual somos todos
fruto, e o único, além de nós mesmos, capaz de
determinar o rumo de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor, e amigo, Lucas Festugato e à Andressa. Vocês foram fundamentais para que esse trabalho fosse possível.

Agradeço a minha mãe, por ter me ensinado a ser crítico, característica sem a qual nunca seria quem sou e tão pouco teria chegado onde estou.

Agradeço também aos meus irmãos, os de sangue e os de coração, que são as pessoas que mais amo nesse mundo.

O universo é completamente indiferente quanto ao que pensamos, fazemos ou acreditamos. Não há um sentido maior na vida. E isso é libertador, ainda que esta descoberta também seja aterrorizante. A partir do momento em que não estamos presos a princípios e valores que não escolhemos ter, o controle está em nossas mãos e não há nada que seja mais satisfatório na vida do que a sensação de estar no controle

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resistência à tração na flexão vs. teor de cimento	19
Figura 2 - Resistência à tração na flexão vs. porosidade.....	20
Figura 3 - Resistência à tração na flexão vs. η/Civ	21
Figura 4 - Melhores ajustes de tração na flexão e compressão diametral	22
Figura 5 - Ajustes alternativos para tração na flexão e compressão diametral.....	23
Figura 6 - Tração na flexão e compressão diametral sem RAP.....	24
Figura 7 - Comparação qualitativa entre resultados de tração na flexão com e sem RAP.....	27
Figura 8 - Gráfico de efeitos principais para tração na flexão.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da caracterização dos materias	15
Tabela 2 - Caracterização do RAP	15
Tabela 3 - ANOVA.....	28

LISTA DE SIGLAS

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement

RCD - Resistência à compressão diametral

RTF - Resistência à tração na flexão

ANOVA - Analysis of Variance

SQ - Soma dos quadrados

MQ - Média dos quadrados

LISTA DE SÍMBOLOS

η – Porosidade

Ci ou C - Teor de cimento

Civ - Teor volumétrico de cimento

Vv - Volume de vazios

Vc - Volume de cimento

Vtotal - Volume total

γ_d - Peso específico aparente seco

γ_s - Peso específico real dos grãos

q_{ff} - Resistência à tração na flexão

q_{tcd} - Resistência à tração na compressão diametral

F - Carga aplicada no ensaios de flexão

L - Comprimento entre pontos de apoio

b - Aresta do corpo de prova

h - Altura do corpo de prova

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
RESUMO.....	12
INTRODUÇÃO	12
PROGRAMA EXPERIMENTAL	14
Materiais.....	15
Métodos.....	16
Ensaio de tração na flexão	17
RESULTADOS	18
Efeito do teor de cimento e da porosidade na resistência à tração na flexão	18
Efeito da razão teor volumétrico de cimento/porosidade.....	20
Análise de Variância	27
CONCLUSÕES.....	29

Resistência à tração na flexão em areia artificialmente cimentadas com adição de resíduo de asfalto

por

Rafael Nedel¹, Lucas Festugato²

(1) Autor, graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

(2) Orientador, Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo estudar a resistência à tração na flexão em uma matriz 70% areia e 30% RAP. Para tanto, os resultados obtidos serão comparados com dados existentes na literatura sobre resistência à tração na flexão e na compressão diametral tanto em misturas areia-cimento quanto areia-cimento-RAP. Os resultados indicam a resistência à tração na flexão aumenta com o aumento do teor de cimento e diminui com o aumento da porosidade. Os resultados indicam também que a adição de RAP possui pouca influência na resistência à tração das amostras e que o parâmetro η/Civ é adequado para avaliar a resistência à tração na flexão em um solo arenoso artificialmente cimentado.

Palavras-chave: Engenharia geotécnica, geotecnia, estabilização de solos, tração na flexão, compressão diametral, areia, cimento, RAP, fresado, ANOVA

INTRODUÇÃO

Tendo em vista que o transporte rodoviário no Brasil é responsável por 45,6% do PIB do setor de transportes (IBGE, 2016) é importante ao país que as rodovias estejam em bom estado de conservação e que existam técnicas que permitam que novos projetos rodoviários sejam viáveis tanto economicamente quanto ambientalmente. De acordo com Pasche (2016), uma das formas de corrigir os conhecidos problemas existentes da malha rodoviária brasileira é a restauração, sendo empregada a fresagem do revestimento asfáltico e recomposição com um

29 novo revestimento asfáltico. O resultado é que todos os anos são geradas grandes quantidades
30 deste material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP na sigla em inglês) sem que haja
31 um destino ambientalmente adequado a este material.

32 Quando as características de um solo do local destinado à execução de um determinado
33 projeto não atendem às necessidades exigidas em projeto, pode-se recorrer tradicionalmente a
34 duas soluções: melhoramento ou substituição do material. A adição de agentes cimentantes e a
35 compactação são metodologias já muito estudadas e comprovadamente eficazes para o
36 melhoramento das propriedades de solos (ex: Mitchell, 1981, Consoli et al. 2007, Consoli et
37 al. 2010). Dentro deste contexto, torna-se particularmente interessante o uso de resíduos,
38 materiais de baixo valor agregado e que muitas vezes existe dificuldade em dar-lhes um
39 destino ambientalmente adequado. A utilização de resíduos implica também um menor
40 consumo de recursos, acarretando uma diminuição dos impactos e custos associados à
41 produção.

42 A resistência à tração é uma propriedade mecânica utilizada para prever o comportamento de
43 bases cimentadas em projetos de pavimentação. Conforme Consoli et al. (2003), é recorrente
44 que camadas de solo-cimento compactadas sobre solos de baixa capacidade de suporte se
45 rompam por esforços de tração. Conforme Paul e Gnanendran (2016) ensaios de flexão são de
46 particular interesse à pavimentação devido às similaridades das condições de tensão deste
47 ensaio em relação às encontradas em pavimentos.

48 Sendo assim, é proposto estudar as mudanças na resistência à tração na flexão em areia
49 artificialmente cimentadas com a adição de RAP. Será avaliada a influência da porosidade e
50 do teor de cimento nas misturas, assim como a viabilidade do uso da relação porosidade/teor

51 volumétrico de cimento (η/Civ) para estimar a resistência do material, com o intuito de avaliar
52 o efeito combinado da variação do teor de cimento e da porosidade.

53 **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

54 O programa experimental foi realizado em três partes. Num primeiro momento foram
55 caracterizados os materiais. Para tanto, foram realizados ensaios de compactação (NBR
56 7182/2016), que determina a umidade ótima de compactação e γ_d máximo, ensaios de
57 peneiramento para o estudo da granulometria (ABNT NBR 7181/2016) e ensaios para a
58 determinação do peso específico real dos grãos (ABNT NBR 6458:2016). Em um segundo
59 momento determinaram-se as dosagens das amostras a serem moldadas com base nos
60 resultados obtidos nos ensaios de caracterização e tomando por referência dosagens usuais
61 com base na literatura existente (Consoli et al 2007, 2010 e 2019). Por fim, foram moldadas as
62 amostras e, após 7 dias de cura em câmara úmida, foram submetidos a ensaios de tração na
63 flexão.

64 **Materiais**65 **Tabela 1 - Resumo da caracterização dos materiais utilizados na moldagem**

Propriedades	Areia de Osório	RAP (passante na #10)	Mistura
Peso Real dos Grãos	26,5 kN/m ³	26,5 kN/m ³	-
Areia (0,06 mm < diâmetro < 2 mm)	100%	100%	100%
Silte (0,002 < diâmetro < 0,06 mm)	0%	0%	0%
Argila (diâmetro < 0,002 mm)	0%	0%	0%
Diâmetro médio (D ₅₀)	0,26 mm	0,89 mm	0,30 mm
Peso específico aparente seco (E. Normal)	-	-	17,1 kN/m ³
Peso específico aparente seco (E. Modificada)	-	-	18,2 kN/m ³
Teor de umidade ótimo	10%	-	9%
Índice de vazios máximo	0,9	-	-
Índice de vazios mínimo	0,6	-	-
Classificação UCS	SP	SP	-

66

67 O solo usado no estudo em questão foi a areia de Osório, sendo classificada como uma areia
68 fina mal graduada com partículas arredondadas (ASTM D2487-93). De acordo com Consoli et
69 al. (2010), o índice de vazios mínimo e máximo são, respectivamente, 0,6 e 0,9 e o peso
70 específico real dos grãos γ_s é 26,5 kN/m³. Análises mineralógicas mostraram que as partículas
71 da areia são formadas predominantemente por quartzo.

72 O RAP utilizado, de origem basáltica, foi coletado a partir dos serviços de conservação e
73 manutenção de pavimentos das rodovias BR-290/RS e BR-116/RS entre os municípios de
74 Guaíba e Osório, tendo sido utilizada uma minifresadora para sua coleta. Conforme Luzzi
75 (2019), o RAP possui um teor de ligante (modificado por polímero 60/85) de 4,95%, obtido
76 através de ensaio em conformidade com DNER 053/94. A caracterização do ligante e
77 granulometria do RAP, obtida de Luzzi (2019), encontram-se nas tabelas a seguir:

78 **Tabela 2** - Caracterização do ligante do RAP

Ensaio	Amostra 1	Amostra 2	Média
Recuperação Elástica	40	38	39
Ponto de Amolecimento	62	79	70,5
Penetração a 25°C	26	12	19
Teor de CAP	5	4,2	4,6
Viscosidade Brookfield 135°C	1481	5706	3593,5
Viscosidade Brookfield 150°C	648	2057	1352,5
Viscosidade Brookfield 177°C	201	548	374,5

79

80 Fonte: Luzzi, 2019

81 **Tabela 3** - Granulometria do RAP

Peneira	mm	% passante				Média
		Am1	Am2	Am3	Am4	
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	97,91	98,17	98,92	99,22	98,56
3/8"	9,5	92,60	92,98	92,88	93,81	93,07
n 4	4,8	72,66	70,19	73,33	72,06	72,06
n 10	2	41,80	34,06	38,80	30,84	36,38
n 40	0,42	4,64	3,58	3,82	3,02	3,77
n 80	0,18	1,00	0,91	0,92	0,85	0,92
n 200	0,075	0,19	0,20	0,23	0,22	0,21

82

83 Fonte: Luzzi, 2019

84 Como agente cimentante foi utilizado cimento CP V - ARI (alta resistência inicial), o que
85 permite a adoção de um tempo de cura de 7 dias. Seu peso específico real dos grãos é de 31,5
86 kN/m³. Para a execução de todos os ensaios e para a moldagem foi utilizada água destilada. O
87 teor de umidade de moldagem foi de 9%.

88 **Métodos**

89 Para os ensaios de tração na flexão conforme ASTM D1635 (ASTM, 2012), corpos de prova
90 prismáticos com seção quadrada foram moldados com lados de 4 cm e comprimento de 17
91 cm. Foram adotados os pesos específicos de 16,4 kN/m³, 17,2 kN/m³ e 18 kN/m³, teores de
92 cimento de 1%, 3%, 5%, 7% e 9%, teor de umidade de 9%, valores escolhidos a partir das

93 ensaios de compactação e com base na literatura (Consoli et al. 2007, 2010 e 2019) . Cada
94 peso específico aparente seco foi definido dividindo a massa seca das amostras pelo seu
95 volume. A partir do peso específico aparente seco chegou-se na porosidade da cada corpo de
96 prova. Como demonstrado por Consoli et al. (2016), a porosidade é função do peso específico
97 aparente seco da mistura e do teor de cimento, definido como sendo a massa de solo e adições
98 dividida pelo massa de cimento.

99 Para a moldagem das amostras, procedeu-se primeiramente com a pesagem da areia, do RAP
100 e do cimento. Então, misturaram-se os três componentes até que atingissem um aspecto
101 homogêneo. Na sequência, pesou-se a água e novamente misturou-se até que fosse obtida a
102 homogeneidade, seguindo então com a compactação estática do solo em camada única dentro
103 do molde prismático, com auxílio de um macaco hidráulico. Ao serem removidas do molde,
104 as amostras foram pesadas com resolução de 0,01 g e curadas em câmara úmida com
105 temperatura de 23+-2 °C.

106 **Ensaio de tração na flexão**

107 Os ensaios de tração na flexão seguiram a norma americana. Para amostras de seções
108 transversais quadradas sob uma carga F em uma configuração de 4 pontos, na qual o
109 espaçamento entre os pontos de aplicação da carga corresponde a um terço do espaçamento
110 entre os pontos de apoio, a resistência à tração na flexão é calculada através da seguinte
111 equação:

$$112 \quad q_{tf} = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2}$$

113 Onde:

114

115 F é a carga aplicada;
116 L é a distância entre os pontos de apoio na parte inferior;
117 b é a largura da amostra;
118 h é a altura da amostra.

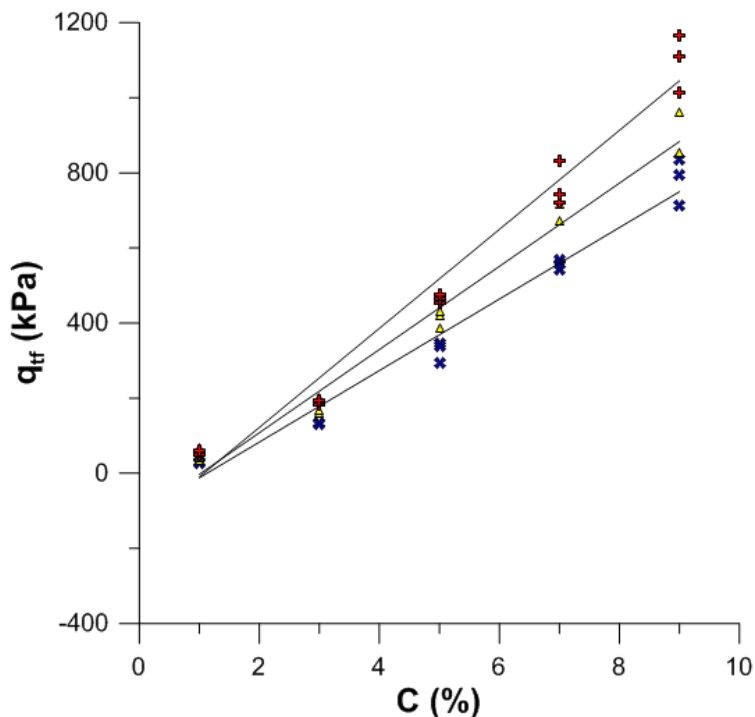
119 Uma prensa automatizada com capacidade máxima de carga de 50 kN e células de cargas com
120 capacidade para até 10 kN foi utilizada para a realização do ensaio, com exceção dos corpos
121 de prova de 1% de cimento, para os quais foi utilizada célula de carga de 5 kN devido às
122 baixas resistências serem inferior à sensibilidade da célula de 10 kN. Para o estudo em
123 questão foi utilizada uma velocidade de aplicação de carga de 1.14 mm/min. Antes dos
124 ensaios as amostras foram submergidas em água por 24h para minimizar os efeitos da sucção.
125 Conforme demonstrado por Consoli et al (2007 e 2010), este é um método adequado para que
126 se obtenham valores desconsideráveis de sucção em ensaios não confinados.

127 **RESULTADOS**

128 **Efeito do teor de cimento e da porosidade na resistência à tração na flexão**

129 Conforme demonstrado pela figura 1, a resistência à tração na flexão aumentou com o
130 aumento do teor de cimento (definido como a razão entre a massa de cimento e a massa de
131 solo seco). O ganho de resistência foi mais pronunciado para as amostras com menor
132 porosidade, resultado esperado devido ao maior número de contatos entre partículas, o que
133 promove maior quantidade de ligações efetivas entre as partículas (Woods, 1992; Moore et al.
134 1970). As linhas de tendência apresentadas demonstram que uma função do linear é adequada
135 para descrever a resistência à tração na flexão como função do teor de cimento. As equações
136 apresentadas são as de melhor ajuste.

× $\gamma_d = 16.4 \text{ kN/m}^3$ $q_{tf} = 95(C) - 107$ $R^2 = 0.97$
 ▲ $\gamma_d = 17.2 \text{ kN/m}^3$ $q_{tf} = 110(C) - 113$ $R^2 = 0.97$
 + $\gamma_d = 18.0 \text{ kN/m}^3$ $q_{tf} = 132(C) - 141$ $R^2 = 0.97$



137

138

Figura 1 - Resistência à tração na flexão vs. teor de cimento

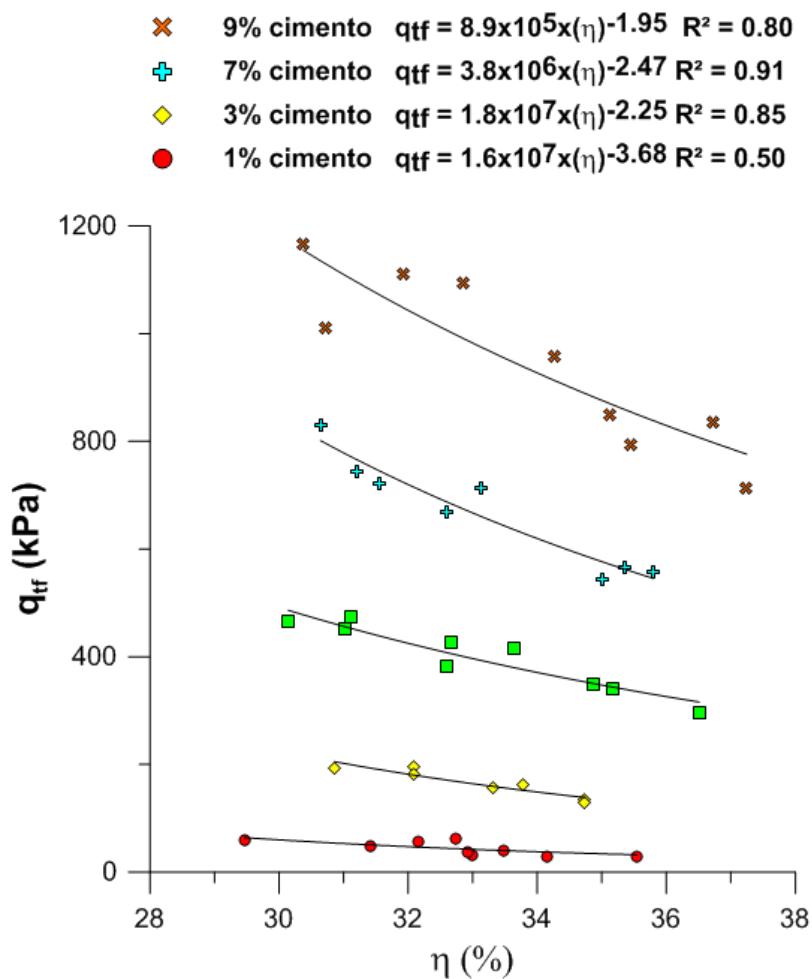
139 A figura 2 mostra como a porosidade afeta a resistência à tração na flexão das amostras.

140 Como esperado, a resistência à tração na flexão reduz com o aumento da porosidade para

141 todos os teores de cimento estudados. As linhas de tendência apresentadas demonstram que

142 uma função do tipo potência é adequada para descrever a resistência à tração na flexão como

143 função da porosidade. As equações apresentadas são as de melhor ajuste.



144

145

Figura 2 - Resistência à tração na flexão vs. porosidade

146

Efeito da razão teor volumétrico de cimento/porosidade

147

Conforme foi demonstrado pelas análises anteriormente apresentadas neste estudo, a

148

resistência à tração na flexão é influenciada tanto pela porosidade da amostra quanto pelo teor

149

de cimento. Tendo em vista que tanto a compactação do solo quanto a estabilização química

150

do mesmo são soluções interessantes do ponto de vista da geotecnia, a razão porosidade/teor

151

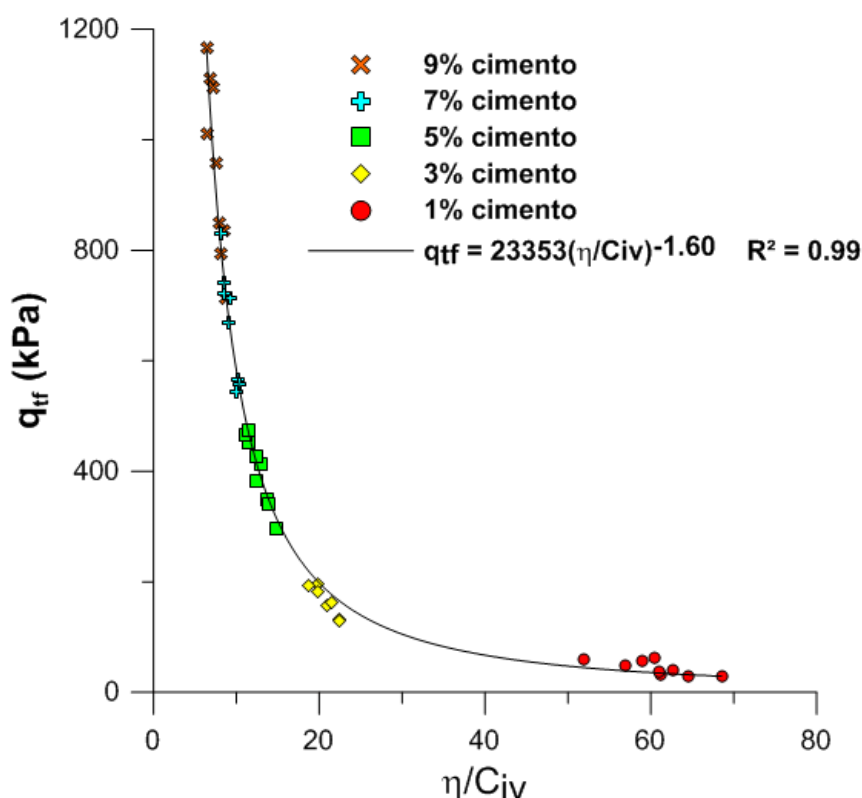
volumétrico de cimento (η/Civ) foi empregada com o intuito de avaliar o efeito combinado da

152

variação do teor de cimento e da porosidade na estimativa da resistência do material.

$$\frac{n}{C_{iv}} = \frac{\frac{V_v}{V_{total}}}{\frac{V_c}{V_{total}}} = \frac{V_v}{V_c}$$

153 A figura 3 mostra o efeito da razão teor volumétrico de cimento/porosidade na resistência.
 154 Pode-se observar que uma aumento da razão η/C_{iv} provoca diminuição de resistência,
 155 demonstrando que a metodologia pode ser aplicada a este material, conforme demonstrado por
 156 diversos autores (Consoli et al. 2007, 2010, 2019). Ao aplicar uma curva de ajuste, encontrou-
 157 se, com $R^2 = 0,99$, a equação que consta na figura 3:



158

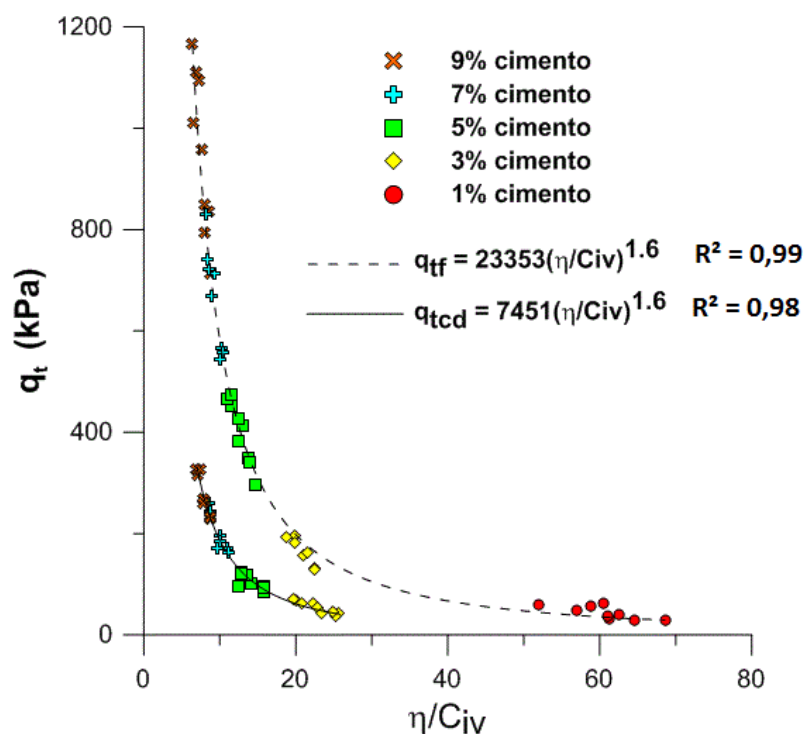
159

Figura 3 - Resistência à tração na flexão vs. η/C_{iv}

160 Analisando-se os resultados de tração na compressão diametral encontrados por Consoli et al.
 161 (2019) em estudos com a mesma mistura areia-RAP-cimento encontrou-se uma equação
 162 semelhante. Os resultados dos dois estudos estão agrupados na figura 4.

$$q_{cd}(kPa) = 7451 * \left(\frac{n}{C_{iv}}\right)^{-1.6}$$

163 Salienta-se aqui que as equações oriundas dos resultados de ambos os ensaios diferem apenas
 164 pela constante, possuindo o mesmo expoente.



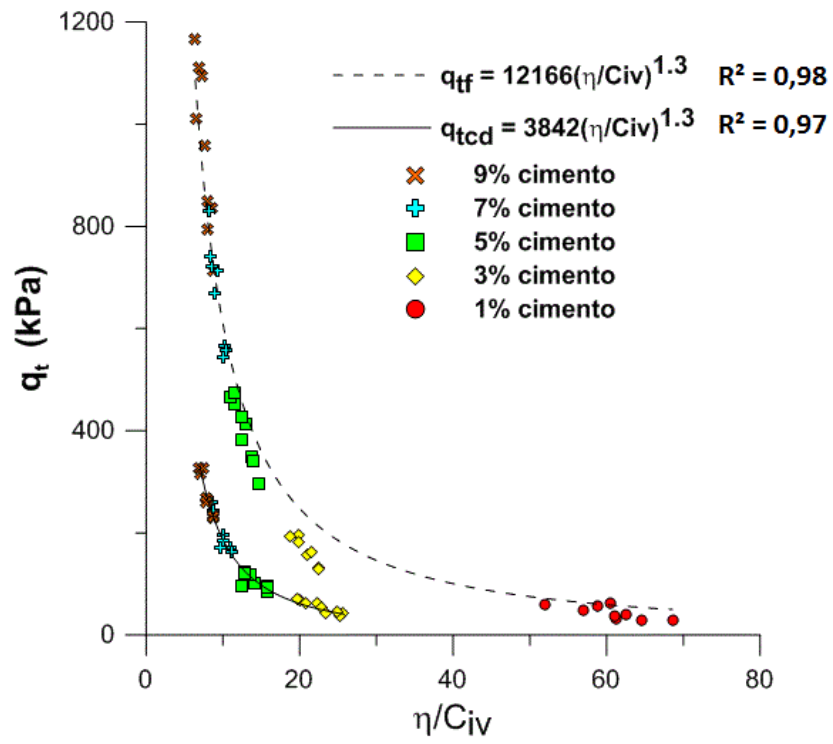
165

166 **Figura 4 - Melhores ajustes de tração na flexão e compressão diametral em areia-RAP-cimento**

167 Para efeito de comparação entre diferentes resultados, exercício fundamental para um
 168 desenvolvimento saudável do conhecimento e da ciência, os resultados encontrados pelo autor
 169 foram também analisados com ajustes alternativos, mas ainda com coeficientes de
 170 determinação apreciáveis. O gráfico com expoente forçado em -1.3 está exposto na figura 5 e
 171 apresenta a seguinte equação, com $R^2 = 0,97$:

$$q_{tf}(kPa) = 13491 * \left(\frac{n}{C_{iv}}\right)^{-1.3}$$

172 O mesmo se fez com os resultados de tração na compressão diametral, chegando aos
 173 resultados demonstrados na figura 5:



174

175

Figura 5 - Ajustes alternativos para tração na flexão e compressão diametral em areia-RAP-cimento

176 A figura 6 (adaptada de Silva, 2017) apresenta os resultados de tração na flexão encontrados
 177 pela autora com misturas de cimento - areia de Osório, sem RAP. As equações obtidas através

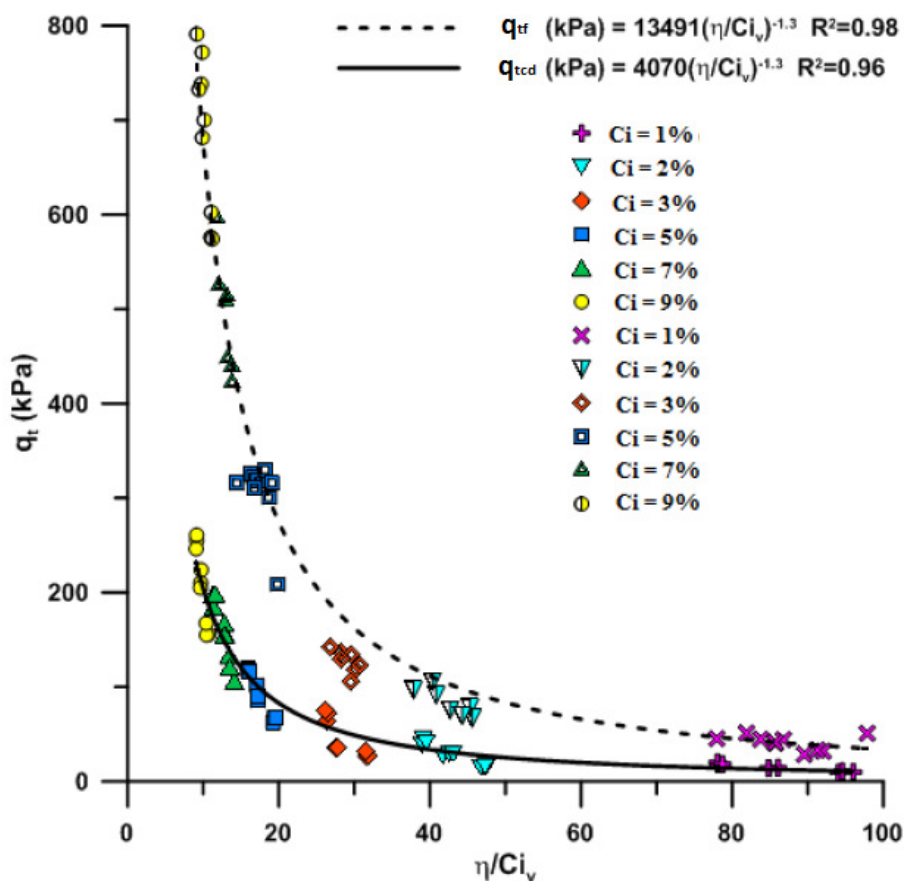


Figura 6 - Tração na flexão e compressão diametral em areia sem RAP

178 do melhor ajuste pelo autor em questão são as que seguem:

$$q_{tf}(\text{kPa}) = 13491 * \left(\frac{n}{Ci_v}\right)^{-1.3}$$

$$q_{cd}(\text{kPa}) = 4070 * \left(\frac{n}{Ci_v}\right)^{-1.3}$$

179 De posse das equações obtidas através de melhor ajuste ou forçando-se o expoente, é possível
 180 estabelecer uma relação entre os resultados para melhor avaliar a influência da adição de RAP

181 e compreender melhor as diferenças entre os resultados dos ensaios de tração na flexão e
182 tração na compressão diametral.

183 Para avaliar a influência da adição de RAP na resistência à tração na flexão, dividiu-se as
184 equações de ajustes de tração na flexão, com e sem RAP, chegando assim à uma constante:

$$\frac{12166 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}}{13491 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}} = 0,90$$

185 De forma análoga, analisou-se a influência da adição de RAP na resistência a tração na
186 compressão diametral através das equações:

$$\frac{3842 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}}{4070 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}} = 0,94$$

187 Em ambos os casos os resultados sem adição de RAP apresentaram resistências ligeiramente
188 maiores.

189 Utilizando o mesmo procedimento, analisou-se a diferença existente entre os ensaios de tração
190 na flexão e tração na compressão diametral. Para as amostras de areia-RAP-cimento dividiu-
191 se as dos resultados dos ensaios de flexão pelos de compressão diametral conforme
192 demonstrado abaixo:

$$\frac{12166 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}}{3842 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}} = 3.17$$

193 De forma análoga, para areia-cimento, com as equações de melhor ajuste:

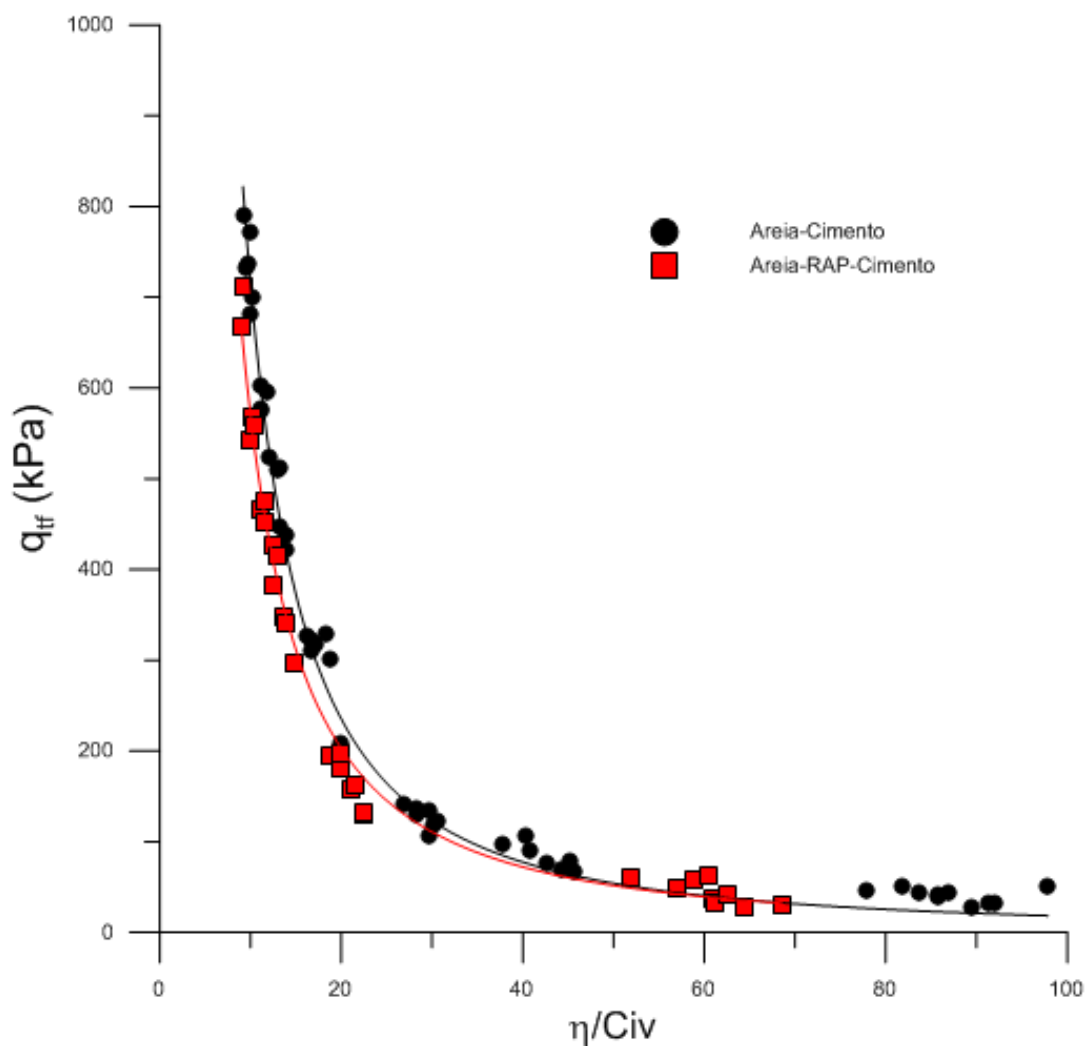
$$\frac{23353 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.6}}{7451 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.6}} = 3.13$$

194 Ou ainda, utilizando as equações de expoente -1.3:

$$\frac{13491 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}}{4070 * \left(\frac{n}{Civ}\right)^{-1.3}} = 3.31$$

195 Os resultados obtidos acima estão próximos dos já obtidos por outros autores (Consoli et al.
196 2019) para areia artificialmente cimentada (3.31) e outros solos (silte-cimento: 4.59, areia
197 siltosa-cimento: 5.19)

198 Para uma análise qualitativa, na figura 7 estão apresentados os resultados de tração na flexão
199 com RAP e sem RAP em seus melhores ajustes. Salienta-se aqui que devido à diferença
200 existente entre os pontos de moldagem (os teores de cimento são os mesmos para ambos os
201 materiais, enquanto que os pesos específicos NÃO são iguais) foram omitidos os dados com
202 razão η/Civ inferior a 9 para uma melhor comparação dos resultados. Percebe-se que no início
203 da curva, onde os η/Civ são muito próximos a 9, a resistência é maior para as amostras sem
204 RAP. Olhando para a parte final da curva, observa-se que as resistências apresentam uma
205 tendência assintótica. Ao observar as linhas de tendências, percebe-se que a linha da areia sem
206 RAP está sempre ligeiramente acima da linha do material com RAP.



207

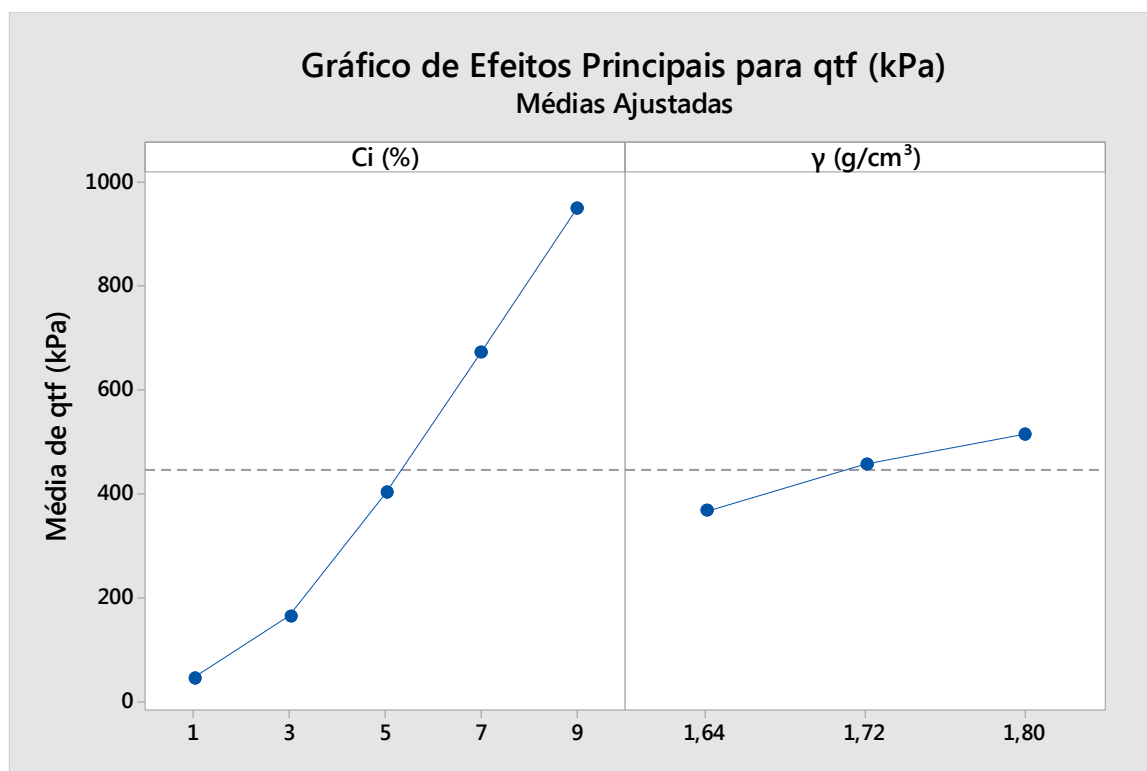
208 **Figura 7 - Comparação qualitativa entre resultados de tração na flexão com e sem RAP**209 **Análise de Variância**

210 Para melhor julgamento dos efeitos provocados na resistência à tração na flexão pela adição
211 de cimento Portland e pela compactação, foi realizada uma análise de variância (ANOVA),
212 tabela 2, utilizando como fator controlável o peso específico aparente seco e o teor de cimento
213 e considerando um nível de significância de 95%, ou seja, foi considerado que alterações nos
214 valores das variáveis controladas com valor-P inferiores a 0,05 provocam alterações
215 significativas na resistência a tração na flexão. Como demonstrado pela figura 8, o teor de
216 cimento, o peso específico aparente seco e a interação entre esses dois fatores possuem
217 influência significativa na resistência. Através da comparação dos valores do Valor-F de cada

218 fator, constatamos que o fator de maior influência é o teor de cimento, seguido pelo peso
 219 específico aparente seco, e, por último, pela interação entre estes dois fatores.

220 **Tabela 3 - ANOVA**

Fator	GL	SQ (Aj.)	MQ (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ci (%)	4	4667344	1166836	505,31	0,000
γ (g/cm ³)	2	151303	75652	32,76	0,000
Interação Ci x γ	8	80867	10108	4,38	0,002



221

222

Figura 8 - Gráfico de efeitos principais para tração na flexão

223 **CONCLUSÕES**

224 A partir dos resultados apresentados neste estudo e reconhecendo tanto as suas limitações
225 quanto a importância de que qualquer estudo seja replicado para que se possa consolidar e
226 corroborar – ou não – resultados já existentes chega-se às seguintes conclusões:

227 • Para todos os pesos específicos e níveis de cimentação estudados, o aumento do teor de
228 cimento de uma amostra aumenta a resistência à tração na flexão de forma linear;

229 • Para todos os pesos específicos e para os níveis de cimentação estudados, a diminuição na
230 porosidade provoca um aumento exponencial na resistência;

231 • A razão porosidade-teor volumétrico de cimento mostrou-se um parâmetro adequado na
232 previsão da resistência à tração na flexão para misturas areia-RAP-cimento. Observou-se que
233 a resistência decresce exponencialmente com o aumento do η/Civ ;

234 • O valor encontrado para a resistência à tração de um material geotécnico varia conforme o
235 ensaio ao qual as amostra são submetidas. Os dados analisados neste estudo indicam que,
236 independentemente do teor de cimento e da porosidade, a razão entre a resistência à tração na
237 flexão e na compressão diametral é de 3,13;

238 • A substituição de 30% da matriz de areia por RAP tem baixa ou nenhuma influência sobre
239 a resistência. A comparação das equações indica uma redução de 10%, contudo, em uma

240 análise qualitativa, praticamente não há diferença entre os dados quando sobrepostos em um
241 mesmo gráfico;

242 • A análise ANOVA demonstra que o teor de cimento e peso específico aparente seco são
243 estatisticamente significantes, ou seja, possuem influência na variável de resposta: a
244 resistência a tração na flexão;

245 • O expoente da equação de melhor ajuste para ambos os ensaios de tração na flexão
246 analisados foi 1,6, fazendo com que as duas equações se diferenciam apenas pela constante
247 que multiplica o parâmetro $\eta/Civ.$

248 **REFERÊNCIAS**

- 249 ABNT - NBR 7182:2016: Solo - Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas
250 Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.
- 251 ABNT - NBR 7181:2016: Solo - Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas
252 Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.
- 253 ABNT - NBR 6458:2016: Solo - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm -
254 Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água,
255 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.
- 256 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NM 52:2009: Agregado Miúdo -
257 Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, Brasil.
- 258 ASTM D2487-11, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes
259 (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011,
260 www.astm.org
- 261 ASTM D1635 / D1635M-12, Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement
262 Using Simple Beam with Third-Point Loading, ASTM International, West Conshohocken,
263 PA, 2012, www.astm.org
- 264 Chang TS, Woods RD (1992) Effect of particle contact bond on shear modulus. J Geotech
265 Eng 118(8):1216-1233
- 266 Consoli NC, Foppa D, Festugato L, Heineck KS (2007) Key parameters for strength control of
267 artificially cemented soils. J Geotech Geoenviron Eng 133(2):197-205
- 268 Consoli, NC Cruz RC, Floss MF, Festugato L (2010) Parameters controlling tensile and
269 compressive strength of artificially cemented sand. J Geotech Geoenviron Eng
270 135(5):759-763

- 271 Consoli NC, Ferreira PMV, Tang C-S, Marques SFV, Festugato L, Corte MB (2016b) A
272 unique relationship determining strength of silty/clayey soils-Portland cement mixes. *Soils*
273 *Found* 56(6):1082-1088
- 274 Consoli NC, Silva A, Barcelos AM, Festugato L, Faretto F (2019) Porosity/Cement Index
275 Controlling Flexural Tensile Strength of Artificially Cemented Soils in Brazil. *Geotech*
276 *Geol Eng* <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01059-w>
- 277 DNER-ME (1994), Misutra betuminosas - percentagem de betume, Departamento Nacional
278 de Estradas de Rodagem, disponível em <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me053-94.pdf/view)
279 [manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me053-94.pdf/view](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me053-94.pdf/view)> Acesso em
280 11/Dez/2019
- 281 Luzzi, Felipe Cipriani (2019), Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação
282 laboratorial de misturas asfálticas produzidas. Dissertação (Mestrado em Engenharia)
283 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia,
284 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, Santa Maria
- 285 Moore RK, Kennedy TW, Houston WR (1970) Factors affecting the tensile strength of
286 cement-treated materials. *Highway Research Board* 136(5):759-763 strength of cemented
287 soils.” *Geotextiles and Geomembranes*, v. 28, p. 344-351.
- 288 Silva, Andressa da (2017), Comportamento à tração na flexão de solo arenoso cimentado
289 reforçado com fibra. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -
290 UFRGS, Porto Alegre.