

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

João Victor Linch Daronco

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
RESÍDUO DE MINERAÇÃO MELHORADO COM
CIMENTO**

Porto Alegre, 2019

JOÃO VICTOR LINCH DARONCO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
RESÍDUO DE MINERAÇÃO MELHORADO COM
CIMENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento 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, 2019

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO MELHORADO COM CIMENTO

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador.

Porto Alegre, dezembro de 2019

Prof. Lucas Festugato
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Orientador

Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques
Pós-Doutorando pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Marina Bellaver Corte (UFRGS)
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Lennon Ferreira Tomasi (UFRGS)
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. pela Concordia University, Canadá

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Lucas Festugato, orientador deste trabalho, por todo o apoio, incentivo, confiança e principalmente a amizade, muito obrigado Professor Lucas por ter me dado a oportunidade de conhecer a geotecnia e pela confiança que depositou em mim desde o segundo semestre da faculdade.

Ao Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques, Co-orientador deste trabalho, por sempre estar disponível pra me auxiliar quando precisei, pelo conhecimento transmitido e pela paciência, foi de suma importância para o meu crescimento e também para a realização deste trabalho.

À minha família, em especial a minha tia Graciele, por estarem do meu lado, serem meus maiores apoiadores e dedicarem parte de suas vidas à mim. Não chegaria em lugar algum sem o apoio de vocês.

Aos meus amigos que ao longo da graduação, especialmente ao Andremir, Humberto, João Sônego e Leonardo. Obrigado por todos os momentos e conversas, por fazer com que o ambiente da faculdade fosse mais leve.

Ao meu grande amigo Pablo, por toda a parceria em diversas pesquisas e na vida, sempre com conselhos pertinentes.

À Marina Bellaver Corte, por ter sido a primeira pessoa no laboratório a me ensinar e explicar conteúdos que eu não tinha nem noção que existiam, obrigado pela paciência e todo o conhecimento transmitido.

À Helena Leon e Mariana Carretta, as 01's, muito obrigado por todo o apoio e carinho, sempre com paciência e vontade de me ensinar e me incentivando a saber mais e correr atrás de tudo, muito obrigado meninas.

Aos colegas de laboratório, principalmente ao Pasche, Gonçalo, Gustavo, Hugo, Lennon, Eclesielter, Dionatas, Renato, Paulo, David, Mozara e Bruna. Sou muito grato por toda a parceria, amizade, conversas, erros cometidos em conjunto, ferramentas emprestadas e palavras de conforto (que não foram poucas). Admiro muito todos vocês e sou muito grato pela disponibilidade de vocês em sempre me amparar sempre que precisei.

Aos demais que participaram de alguma forma da minha formação, muito obrigado!

“Eu acredito demais na sorte, e tenho
constatado que quanto mais duro eu
trabalho, mais sorte eu tenho”

Thomas Jefferson

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO MELHORADO COM CIMENTO

João Victor Linch Daronco¹; Lucas Festugato²; Sérgio Filipe Veloso Marques³;

ABSTRACT: Major environmental disasters related to tailings dams have been occurring in Brazil over the last decade, with the collapse of the mining tailings dam called "Fundão" being cited. Different methods can be used to improve the performance and geotechnical properties of a mining tailings used in the construction of dams, and one of these methods is soil improvement. With this in mind, the aspects observed this research aim to characterize and determine parameters of strength and deformability of a gold mining tailings improved with cement through tests using a Simple Shear apparatus. Consolidated Undrained (CIU) tests were performed with different percentages of cement to quantify the influence of this variable on the parameters of strength and deformability of the material studied. Besides verifying the applicability of the porosity/volume content ratio of cement (η/C_{iv}) in predicting the mechanical behavior of mixtures when facing monotonic and cyclic loads. It can be concluded that the increase in the content of cementing agent, and consequently a reduction of the parameter η/C_{iv} , causes an increase in the cohesive intercept, while the friction angle of the material is not altered the friction angle of 34° was found independent of the cement amount. Under cyclic loading conditions of controlled deformation, the higher the level of deformation, the greater the shear modulus deformation. The liquefaction phenomenon did not occur for any of the studied dosages.

Keywords: Mine Tailings, soil improvement, simple shear test, cyclic loading.

¹ Graduando de Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - joaovictorlinch@gmail.com.

² Orientador, Professor do Departamento de engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutor em engenharia civil - lucas@ufrgs.br.

³ Co-orientador, Pós-Doutorando pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em engenharia civil – smarques@ufrgs.br

25 **INTRODUÇÃO**

26 A indústria de mineração consiste em um dos principais setores da economia brasileira. Na
27 mineração, após a extração e o beneficiamento do minério se tem como consequência uma
28 elevada produção de rejeitos que, na maior parte das vezes, são lançados por via aquosa em
29 reservatórios contidos em diques formando barragens (Tomasi, 2018). Essas barragens, por
30 sua vez, possuem um grande risco e um grande impacto ambiental, devido à sua
31 complexidade e grande variabilidade, tanto das características físicas como das características
32 químicas e mineralógicas (Nierwinski, 2013).

33 Grandes desastres ambientais relacionados a barragens de rejeito de mineração vêm ocorrendo
34 no Brasil na última década, podendo ser citado o rompimento da barragem de rejeitos de
35 mineração denominada “Fundão”, ocorrida na região sudeste do Brasil no dia 05 de
36 Novembro de 2015. Esta falha da barragem de Fundão ocorreu devido à drenagem
37 insuficiente, levando à liquefação do rejeito logo após um pequeno terremoto, a barragem
38 desmoronou liberando mais de 30 milhões de metros cúbicos de água e rejeitos (Agurto-
39 Detzel et al. 2016). As consequências do rompimento foram trágicas, houve a perda de pelo
40 menos treze vidas, principalmente em Bento Rodrigues o município mais próximo da
41 barragem. Dentro de um dia, a onda de rejeito chegou ao Rio Doce e percorreu 600
42 quilômetros antes de derramar no Oceano Atlântico em 21 de Novembro, destruindo parte dos
43 ecossistemas regional (Escobar 2015).

44 A partir disso, o entendimento do comportamento geotécnico desses materiais é de
45 fundamental importância para que seja possível prover a segurança necessária à sociedade e
46 ao meio ambiente, além de diminuir os riscos provenientes desse tipo de obra de engenharia.
47 Atendendo a esta premissa, diversas pesquisas foram desenvolvidas na UFRGS (Schnaid,
48 2007; Bedin, 2010; Nierwinski, 2013; Sosnoski, 2016) avaliando o comportamento dos
49 resíduos de mineração de ouro em seu estado natural – in situ. Além disso, estudos de
50 Festugato (2011) e Festugato et al. (2013, 2015) tiveram como principal foco de análise o
51 comportamento dos resíduos de mineração, quando estes foram estabilizados com cimento e
52 reforçados com fibras. Entretanto, tendo outro viés de análise, além de compreender os
53 aspectos referidos acima, é de extrema importância à busca por soluções técnicas alternativas
54 capazes de melhorar o desempenho das estruturas de contenção, especialmente daquelas que
55 já se encontram em funcionamento.

56 Tendo em vista os aspectos observados, essa pesquisa tem como objetivo caracterizar e
57 determinar parâmetros de resistência e de deformabilidade de um rejeito de mineração de ouro
58 melhorado com cimento através de ensaios utilizando o equipamento *Simple Shear*. Foram
59 realizados ensaios Consolidados Não-Drenados (CIU) para diferentes teores de cimento com
60 o propósito de quantificar a influência dessa variável nos parâmetros de resistência e de
61 deformabilidade do material estudado. Além de verificar a aplicabilidade da relação
62 porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ) na previsão do comportamento mecânico das
63 misturas frente a carregamentos monotônicos e cíclicos.

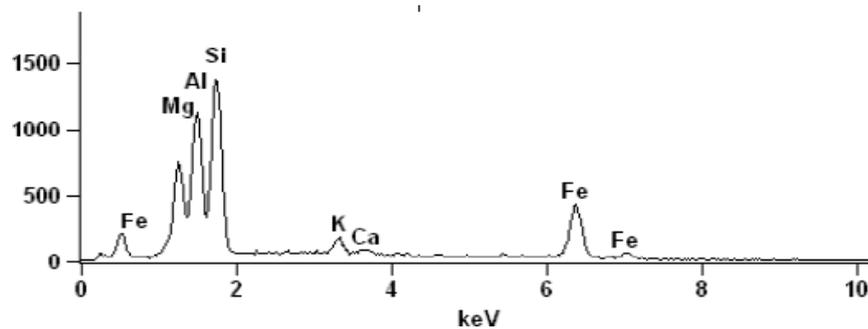
64 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

65 Segundo o Leading Practice Sustainable Development Program (2016), do governo
66 australiano, os resíduos de mineração são compreendidos como uma combinação de materiais
67 sólidos finos (tipicamente de tamanho silte, na faixa de 0,001 a 0,6 mm), remanescentes após
68 os metais e minerais recuperáveis terem sido extraídos do minério bruto, juntamente com a
69 água utilizada no método de processamento. As características físicas, químicas e
70 mineralógicas destes materiais, sob o aspecto geotécnico, são muito peculiares e altamente
71 dependentes a fatores como: tipo de minério explorado, método de beneficiamento e
72 processos químicos empregados. Estas complexidades e singularidades fazem dos resíduos de
73 mineração um material de propriedades e comportamento que podem ser distintos em relação
74 a solos naturais, por exemplo.

75 O processo de beneficiamento de minerais é definido pelas Normas Reguladoras de Minérios
76 (NRM) como o tratamento que tem por objetivo modificar a granulometria, concentrar ou
77 purificar minérios através de métodos físicos ou químicos, sem contudo, alterar a constituição
78 química dos minerais.

79 O tratamento utilizado durante o processo de beneficiamento do minério de ouro apresenta
80 algumas peculiaridades que o diferenciam dos demais tipos de tratamento. Durante o
81 processo, o material submetido ao beneficiamento é uma entidade química em sua forma
82 elementar metálica, caracterizada por altas densidades e maleabilidade. Pode-se limitar o
83 processamento de minérios de ouro a uma mera adequação granulométrica às etapas
84 hidrometalúrgicas subsequentes ou envolver, além da preparação, estágios de concentração
85 (PERES et al, 2002).

86 Segundo Bedin (2010) os principais minerais da rocha de origem do ouro são: quartzo, albita,
 87 clorita e sulfetados. Já o resíduo de mineração de ouro tem como componentes principais o
 88 ferro, o silício e em menor quantidade titânio e alumínio. Além destes componentes, a
 89 composição do resíduo possui carbono e sódio, elementos resultantes do processo de
 90 cianetação (cianeto de sódio, NaNC). A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam os resultados
 91 obtidos por Bedin (2010) e Tomasi (2018), respectivamente, para análises por microscopia
 92 eletrônica por varredura em amostras *underflow* (Mesma fração estudada neste trabalho),
 93 provenientes da Usina Fazenda Brasileiro.



94

95

Figura 1: Resultados da varredura de EDX do resíduo underflow (Bedin, 2010).

Elemento	% de Peso dos Óxidos
SiO ₂	49,43
Al ₂ O ₃	10,71
TiO ₂	1,44
Fe ₂ O ₃	15,63
MnO	0,21
MgO	3,21
CaO	7,54
Na ₂ O	2,02
K ₂ O	0,41
P ₂ O ₅	0,16
SO ₄	2,09
LOI	6,66
Total	99,50

96

97

Tabela 1: Resultados da varredura de EDX do resíduo (Tomasi , 2018).

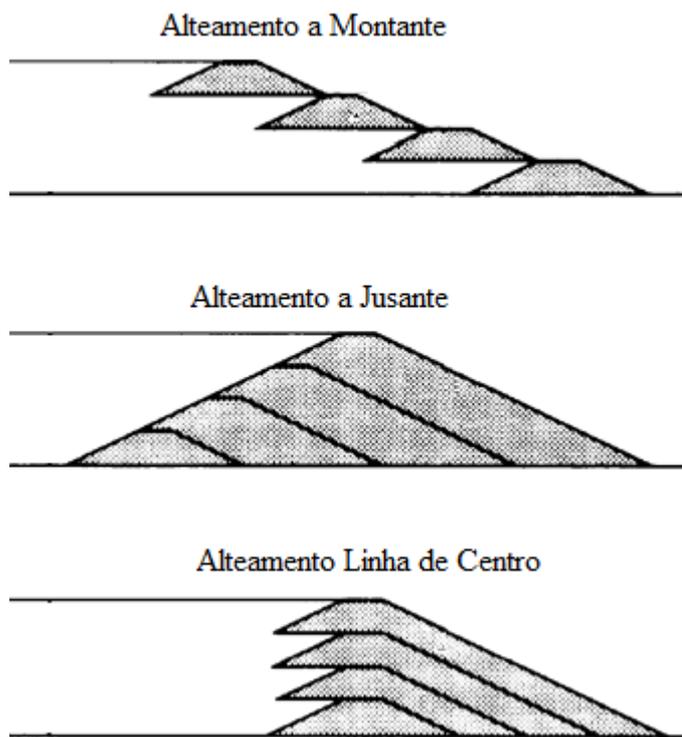
98

99

Para ser feita a disposição, os resíduos provenientes do processo de beneficiamento são, usualmente, descartados na forma de lama (mistura de água e sólidos), sendo que o transporte

100 até barragens ou diques de disposição ocorre através de tubulações com fluxo gravitacional ou
101 com auxílio de bombas (VICK, 1983). Estas barragens ou diques podem ser constituídos de
102 diferentes materiais como solo natural, concreto ou, até mesmo, o próprio rejeito. O grande
103 volume de rejeitos gerados, condicionados aos custos da disposição, faz com que seja atrativa
104 a utilização destes materiais na construção das próprias barragens de contenção (Davies e
105 Martin, 2000).

106 Os alteamentos destas barragens podem ser executados de diferentes formas: método a
107 montante, método a jusante e método de linha de centro. Esta denominação é dada de acordo
108 com o deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante as etapas de alteamento, em
109 relação ao dique de partida. As etapas construtivas de cada método estão representadas na
110 Figura 2.



111

112 Figura 2: Etapas construtivas dos métodos de alteamento (Adaptado de Vick, 1983).

113 Diferentes métodos podem ser utilizados para a melhoria do desempenho e das propriedades
114 geotécnicas de um rejeito de mineração utilizado na construção de barragens, e um desses
115 métodos é o melhoramento do solo. Segundo Casagrande (2005), o termo melhoria de solos
116 está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço
117 está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes.

118 O melhoramento de solos é empregado quando a substituição do material *in situ* ou aplicação
119 de outras técnicas são impraticáveis devido a condições físicas, ambientais ou de custo. De
120 acordo com o Ground Improvement Methods (2006), algumas das principais funções são:

- 121 a) Aumentar a capacidade de carga ou resistência friccional;
- 122 b) Aumentar a densidade;
- 123 c) Controlar as deformações;
- 124 d) Aumentar a resistência à liquefação.

125 Segundo Tomasi (2018), o cimento Portland é o material mais comumente empregado para
126 melhoramento de solos em todo o mundo. A adição desse material, e a melhoria das
127 propriedades geotécnicas de um solo advindas dessa inclusão, constitui-se uma solução
128 consagrada em projetos de engenharia.

129 O mecanismo de melhoramento de solos com a inserção de cimento consiste em um total de
130 quatro passos: a hidratação do agente cimentante, reação de troca iônica, formação de
131 produtos de hidratação do cimento e formação dos produtos de reações pozolânicas (CDIT,
132 2002). A Figura 3 apresenta a sequência dos mecanismos de estabilização utilizando cimento.

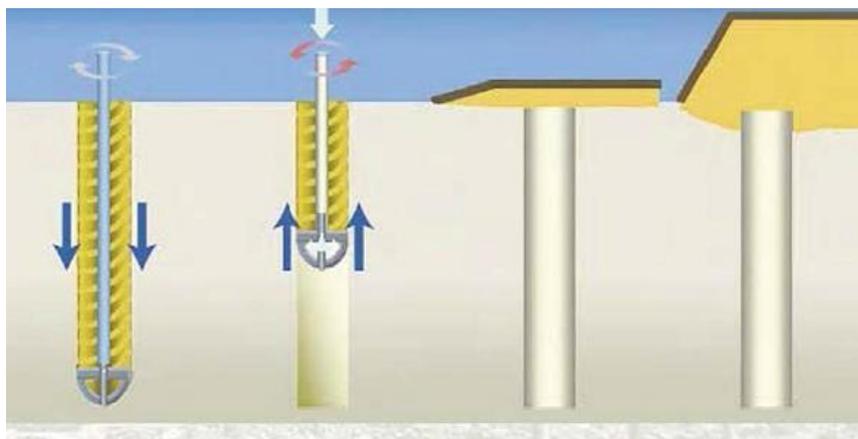


133
134 Figura 3: Evolução Temporal dos mecanismos de estabilização de solos com cimento (CDIT,
135 2002).

136 Nas últimas décadas, vêm sendo desenvolvidas diversas técnicas de melhoramento de solos e
137 grande parte dessas técnicas já se encontram em prática nas mais diversas obras de
138 engenharia. Dentre elas, as técnicas de injeção (*grouting*) são consideradas as de maior
139 crescimento mundial (Tomasi, 2018).

140 Dentre as técnicas de *grouting* destaca-se o *Deep Soil Mixing* (DSM), que é uma técnica cujo
141 objetivo é misturar reagentes ao solo mecanicamente, com a finalidade de melhorar as
142 propriedades e comportamento do material *in situ* sem que haja a necessidade de remoção
143 desse material ou de qualquer escavação. No DSM, a mistura entre o solo e o agente
144 cimentante é realizada através de brocas especiais equipadas com pás misturadoras, essas
145 brocas rotacionam, revolvendo o solo, ao mesmo tempo em que injetam o agente cimentante.
146 De maneira geral, os efeitos mais comumente observados pela aplicação da técnica de DSM
147 são: o aumento da capacidade resistente, a redução da permeabilidade e redução da
148 deformabilidade (LARSSON, 2005; MASSARSCH, 2005; BRUCE, 2000).

149 O procedimento executivo corriqueiramente empregado é composto por duas principais
150 etapas, a primeira etapa o equipamento é introduzido no solo com o auxílio da broca, a qual
151 desintegra o material. A segunda etapa é composta pela extração do conjunto, nessa etapa, o
152 agente cimentante é injetado no solo e as pás são rotacionadas em altas velocidades,
153 homogeneizando o solo e o agente cimentante. Os procedimentos são ilustrados de forma
154 simplificada na Figura 4.



155

156 Figura 4: Procedimentos de execução de colunas de *Deep Soil Mixing* (KELLER, 2016).

157 Existem dois principais métodos de injeção do agente cimentante no solo desagregado:
158 método úmido (*wet method*) e o método seco (*dry method*). O método seco é caracterizado
159 pela utilização de ar comprimido para realizar a injeção do agente cimentante (em forma de
160 pó) no solo. Já para o método úmido, o agente cimentante é previamente misturado com água,
161 formando uma nata a qual é injetada no solo a ser melhorado.

162 É de fundamental importância à realização de ensaios laboratoriais e *in situ* para aferir quanto
163 às dosagens a serem utilizadas, bem como, as propriedades do material melhorado.

164 Entretanto, não existe nenhuma metodologia estabelecida como padrão internacional, que
165 determine as condições de mistura e técnica de preparação das amostras.

166 O ensaio *simple shear* é conhecido e utilizado para a medição da resistência e rigidez do solo,
167 ele é o único ensaio laboratorial que submete uma amostra a condições planas de deformação
168 enquanto o volume da amostra é mantido constante e, além disso, permite a rotação das
169 tensões principais. Tais condições, muitas vezes, são representativas de estados de tensão em
170 situações típicas de campo (CORTE, 2016).

171 Além dos carregamentos monotônicos usualmente empregados o ensaio *simple shear* também
172 permite o carregamento cíclico nas amostras de solo. Ainda como exemplo, tem-se as
173 ferrovias de alta velocidade, rodovias e aerovias, onde os carregamentos provocados pelos
174 seus modais são cíclicos. As solicitações provocadas pela detonação de explosivos e pela ação
175 do tráfego pesado em aterros de resíduos de mineração são também cíclicas (Festugato, 2011).
176 Os ensaios em solos sob carregamentos cíclicos tiveram seu interesse renovado nos últimos
177 anos em virtude da presença mais frequente de solicitações cíclicas nas estruturas de
178 engenharia e do aprimoramento da análise de seus projetos.

179 A interpretação dos resultados no *simple shear* fornece diretamente os valores de σ'_v , σ'_h , τ e
180 γ . Como são medidas as poro-pressões, todas as tensões podem ser representadas em termos
181 efetivos.

182 No ensaio, a amostra cilíndrica é colocada em uma membrana de látex não reforçada, aplica-
183 se tensão confinante e uma tensão de cisalhamento é aplicada aos planos superior e inferior da
184 amostra. Não há tensões cisalhantes complementares nos planos verticais da amostra.

185 Internamente à câmara de pressão, são medidos os deslocamentos horizontais e verticais
186 junto à amostra e os carregamentos aos quais o corpo de prova é submetido.

187 Para traçar os resultados no plano $p' \times q$, a partir de resultados de ensaios *simple shear*,
188 determina-se primeiramente as tensões principais do ensaio, que são dependentes das tensões
189 efetivas verticais e horizontais.

$$\sigma'_v = PC + Q - PP, \quad \sigma'_h = PC - PP$$

190 Sendo PC a pressão confinante, PP a poro-pressão e q a tensão desviatória.

191 As tensões principais efetivas (σ_1 , σ_2 e σ_3) podem ser obtidas da seguinte forma:

$$\sigma'_{1,3} = \left(\frac{\sigma'v + \sigma'h}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma'v - \sigma'h}{2} \right)^2 + \tau^2}, \quad \sigma'2 = \sigma'h$$

192 Onde σ'_v e σ'_h são as tensões efetivas vertical e horizontal e τ é o cisalhamento no plano
193 horizontal.

194 **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

195 Os materiais e os métodos usados na presente pesquisa serão discutidos abaixo.

196 **MATERIAIS**

197 O resíduo de mineração de ouro utilizado nessa pesquisa é proveniente do Complexo
198 Industrial Mina-Usina Fazenda Brasileiro, localizada no município de Teofilândia, estado da
199 Bahia. O método de disposição empregado na Mina Fazenda Brasileiro compreende o
200 processo de ciclonagem dos rejeitos. A ciclonagem produz a separação dos rejeitos quanto ao
201 tamanho dos grãos, cada uma dessas diferentes frações é dispostas em diferentes locais. De
202 forma geral, existem três frações: Material *Overflow*, não ciclonado e *underflow* – Parcela de
203 granulometria mais granular em relação às outras.

204 O rejeito é oriundo de rochas pertencentes à formação *Greenstone Belt*. A formação
205 *Greenstone Belt* é constituída de uma sequência de rochas vulcânicas e sedimentares, as quais
206 foram afetadas por metamorfismo de baixo grau.

207 Empregou-se cimento Portland de alta resistência inicial CPV–ARI (de acordo com a
208 ABNT:NBR 16697, 2018) e *Type III* (de acordo com a ASTM C 150, 2012) nas misturas
209 utilizadas para o melhoramento do rejeito supracitado, motivado pela capacidade de atingir
210 elevadas resistências com reduzido tempo de cura. O referido aglomerante é capaz de
211 alcançar, aos sete dias de idade, cerca de 80% da resistência obtida aos 28 dias. Essa
212 característica permitiu que o tempo de cura adotado para a execução dos ensaios
213 compressivos fosse de sete dias. O peso específico real dos grãos do cimento corresponde a
214 3,15 g/cm³.

215 Foi utilizada água destilada para os procedimentos de moldagem das amostras, durante o
216 período de percolação, também foi utilizada água destilada com o objetivo de não influenciar
217 na composição da mistura final.

218 **MÉTODOS**

219 *Ensaio de caracterização*

220 A caracterização geotécnica do rejeito de mineração estudado consistiu na determinação da
221 massa específica real dos grãos, granulometria e dos limites de Atterberg.

222 *Massa Específica Real dos Grãos*

223 A massa específica real dos grãos foi determinada segundo os procedimentos definidos na
224 ABNT:NBR 6508:2016

225 *Granulometria*

226 O ensaio de granulometria foi realizado segundo as diretrizes da norma ABNT NBR 7181:
227 2018.

228 *Limites de Atterberg*

229 A determinação dos limites de liquidez e de plasticidade do rejeito de mineração seguiu os
230 métodos descritos nas normas ABNT NBR 6459:2017 e ABNT NBR 7180:2016,
231 respectivamente.

232 *Moldagem e cura das amostras*

233 Toda a preparação das amostras para a moldagem dos corpos-de-prova, etapa que envolve os
234 procedimentos de secagem ao ar, destorroamento do material, peneiramento e a determinação
235 da umidade higroscópica seguiu os procedimentos descritos na norma NBR 6457/2016.

236 O processo de moldagem dos corpos-de-prova foi realizado através de procedimentos de
237 pesagem, mistura, moldagem, acondicionamento, armazenagem, cura e desmoldagem. Após a
238 pesagem da quantidade para cada material, realizou-se a mistura destes. A quantidade total de

239 material permitia além da moldagem da amostra, também a retirada de material referente à
240 determinação dos teores de umidade.

241 O processo de moldagem é iniciado a partir da mistura do rejeito de mineração com a
242 quantidade de água destilada necessária para atingir a umidade representativa do campo de
243 38% (umidade referente à profundidade de 1,5 metros tendo em vista que a condição do
244 rejeito é saturada), selecionada a partir de estudos prévios de Tomasi (2018), Bedin (2010),
245 Nierwinski (2013). Esse processo é realizado manualmente até a constatação visual da
246 homogeneização da amostra, após isso, se determinava a umidade da mistura de modo a
247 conferir se as condições iniciais estipuladas foram atendidas.

248 Após a realização da mistura inicial, ocorre a adição do agente cimentante (Cimento Portland-
249 ARI), a adição do cimento foi realizada após a adição da água destilada, para simular as
250 condições de campo e reproduzir a técnica seca (*dry method*) do DSM. O processo
251 supracitado também é realizado manualmente até que haja a constatação visual da
252 homogeneidade da mistura. Outra vez, a umidade da mistura é determinada.

253 Concluída a etapa de mistura, inicia-se a etapa de moldagem no menor intervalo de tempo
254 possível. A etapa de moldagem compreende os procedimentos descritos a seguir, embasados
255 nas diretrizes da EN 14679 (2005) e da JGS 0821 (2000).

256 O material resultante não é passível de ser compactada estaticamente devido à sua
257 consistência de lama, então, essa lama é vertida dentro de um molde bipartido com dimensões
258 de 100mm de diâmetro e 50mm de altura. O preenchimento do molde é realizado em três
259 camadas, em cada camada é efetuado um processo para retirada das bolhas de ar. Esta técnica
260 consiste em aplicar 30 golpes com a haste metálica, observando a expulsão das bolhas de ar.
261 Posteriormente, a base do molde é golpeada contra uma superfície rígida 30 vezes. Ao final
262 do processo, são verificados o peso e a altura da mistura, permitindo assim, calcular os índices
263 físicos da amostra a ser ensaiada.

264 Terminada a etapa da moldagem, o corpo-de-prova é envolto por duas sacolas plásticas a fim
265 de manter a umidade dos mesmos. Após dois dias de cura, as amostras são retiradas do molde
266 e curadas a temperatura ambiente até o sexto dia após a moldagem, quando é realizada a
267 montagem do ensaio.

268 Neste sentido, foram selecionadas as dosagens de 75, 100 e 150 kg/m³ de cimento
269 (aproximadamente 5, 7 e 11% de teor de cimento em relação ao peso de material seco).

270 *Ensaio Simple Shear*

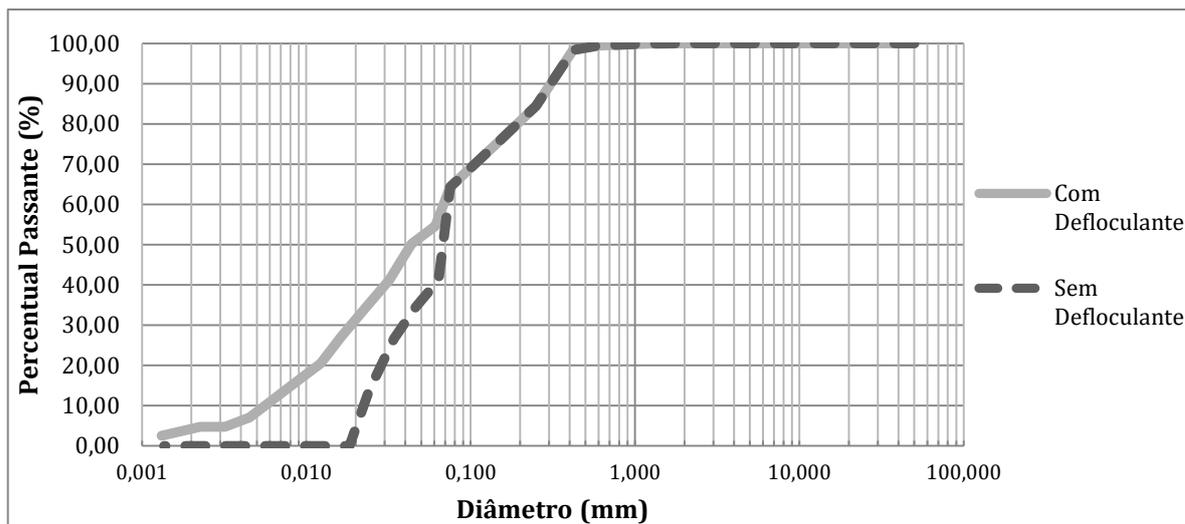
271 Os procedimentos do ensaio envolve, primeiramente, o posicionamento da amostra cilíndrica
272 entre dois cabeçotes rígidos de topo e base com saliências nas bordas com o objetivo de
273 garantir uma adequada acomodação da amostra, é colocada também uma membrada de látex
274 com espessura de 0,4mm com o objetivo de isolar a amostra, existindo assim uma tensão
275 confinante e uma contrapressão, procedimentos seguidos tendo como referência CORTE
276 (2017).

277 As etapas do ensaio *simple shear* são semelhantes às de um ensaio de compressão triaxial.
278 Inicialmente, um fluxo ascendente de água é estabelecido através da amostra para expulsão de
279 possíveis bolhas de ar. Em seguida, incrementos de pressão confinante e de contrapressão são
280 aplicados para que ocorra a dissolução do ar na água, ocasionando a saturação da amostra. A
281 próxima etapa é a consolidação, em que ocorre um aumento da tensão de confinamento e
282 mantida a contrapressão constante, após isso, o cisalhamento é iniciado. Para o cisalhamento a
283 partir de carregamentos monotônicos, realizou-se ensaios em três diferentes tensões efetivas
284 (25, 50 e 75 kPa), já para os cíclicos, optou-se pela utilização da tensão efetiva média (50
285 kPa), assim como, a dosagem intermediária de agente cimentante (100 kg/m³). Os parâmetros
286 tanto de deformação controlada como frequência para o carregamento cíclico foram
287 referenciados a partir de estudos de Festugato et al. (2013, 2015), sendo utilizada a frequência
288 de 0,1 Hz e deformação controlada de 2 e 4%.

289 **RESULTADOS**

290 *Ensaio de Caracterização*

291 O resultado do ensaio de análise granulométrica do rejeito de mineração de ouro estudado
292 nesta pesquisa é apresentado na Figura 5 e o mesmo é discutido a seguir.



293

294

Figura 5: Granulometria dos rejeito de mineração de ouro.

295

296

Na figura, são apresentados os resultados da sedimentação e peneiramento para a mistura com defloculante e sem defloculante. A partir da análise da curva granulométrica, é possível depreender que o rejeito de mineração utilizado no trabalho é um material que pode ser classificado como um silte arenoso (de composição: 50% silte, 45% areia fina e 3% argila, aproximadamente). Também é possível evidenciar que o material é não plástico, o que pode ser explicado pelo processo de beneficiamento do próprio rejeito, onde é feita uma moagem o que induz a não-plasticidade do material.

297

298

299

300

301

302

303

Os resultados de massa específica, limites de Atterberg e índices físicos estão sintetizados na Tabela 1, apresentada a seguir.

304

305

ÍNDICE FÍSICO	RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE OURO
Massa específica real dos grãos (γ_s)	28,0 kN/m ³
Coefficiente de uniformidade (C_u)	12,0
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,08
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,006 mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,04 mm
Limite de Liquidez – LL (%)	Não Plástico
Limite de Plasticidade – LP (%)	Não Plástico
Índice de Plasticidade – IP (%)	Não Plástico
Areia Fina (%)	45,34
Silte (%)	49,9
Argila (%)	2,52
Classificação SUCS (D 2487 – ASTM, 2011)	ML (Silte de baixa compressibilidade)

306

Tabela 2: Principais características do rejeito de mineração de ouro.

307 Ainda, segundo o sistema de classificação dos solos SUCS, o material foco do estudo é um
308 silte de baixa compressibilidade – ML.

309 *RESULTADOS PARA CISALHAMENTO MONOTÔNICO*

310 Os ensaios monotônicos no equipamento *Simple Shear* foram realizados em condição não-
311 drenada com uma taxa de deslocamento de 0,1mm/min, a qual equivale a uma taxa de
312 deformação cisalhante constante de, aproximadamente, 0,2%/min.

313 *RESULTADOS PARA CISALHAMENTO MONOTÔNICO PARA REJEITO DE MINERAÇÃO* 314 *MELHORADO COM 5% DE CIMENTO*

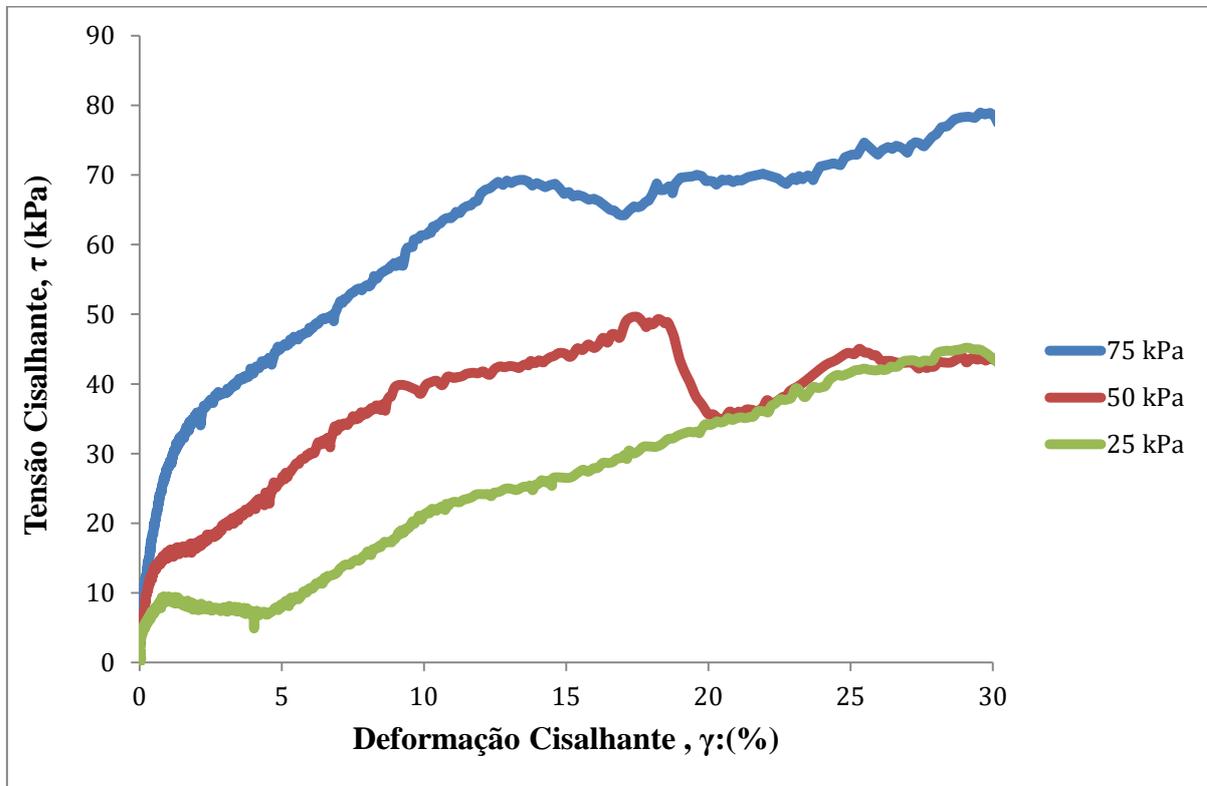
315 Para a análise do comportamento do rejeito de mineração melhorado com cimento, foram
316 analisados juntamente os ensaios realizados a diferentes tensões verticais efetivas iniciais. Os
317 resultados são apresentados a seguir.

318 A Figura 6 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento versus a deformação cisalhante,
319 onde se pode observar que ocorre um aumento de resistência com o aumento da tensão
320 vertical efetiva. No ensaio cuja tensão efetiva vertical é 25 kPa, é possível evidenciar que
321 houve um escorregamento da base da amostra, o que ocasionou uma redução da resistência
322 durante o início do carregamento. Na Figura 7, são apresentados através dos invariantes de
323 tensões, p' e q , as trajetórias de tensões para cada um dos ensaios realizados.

324 Na Figura 8 são apresentadas as curvas de tensão cisalhante pela tensão vertical efetiva, para a
325 análise dos parâmetros de resistência, foi traçada uma reta de ajuste nos pontos de máxima
326 tensão de cisalhamento para cada uma das tensões verticais efetivas iniciais. O ângulo de
327 atrito é obtido através do Arco tangente do coeficiente angular (0,6782) da equação e o
328 intercepto coesivo é o valor apresentado pelo coeficiente linear (27,5). Logo, o ângulo de
329 atrito encontrado foi 34° e o intercepto coesivo foi encontrado o valor de 27,5 kPa.

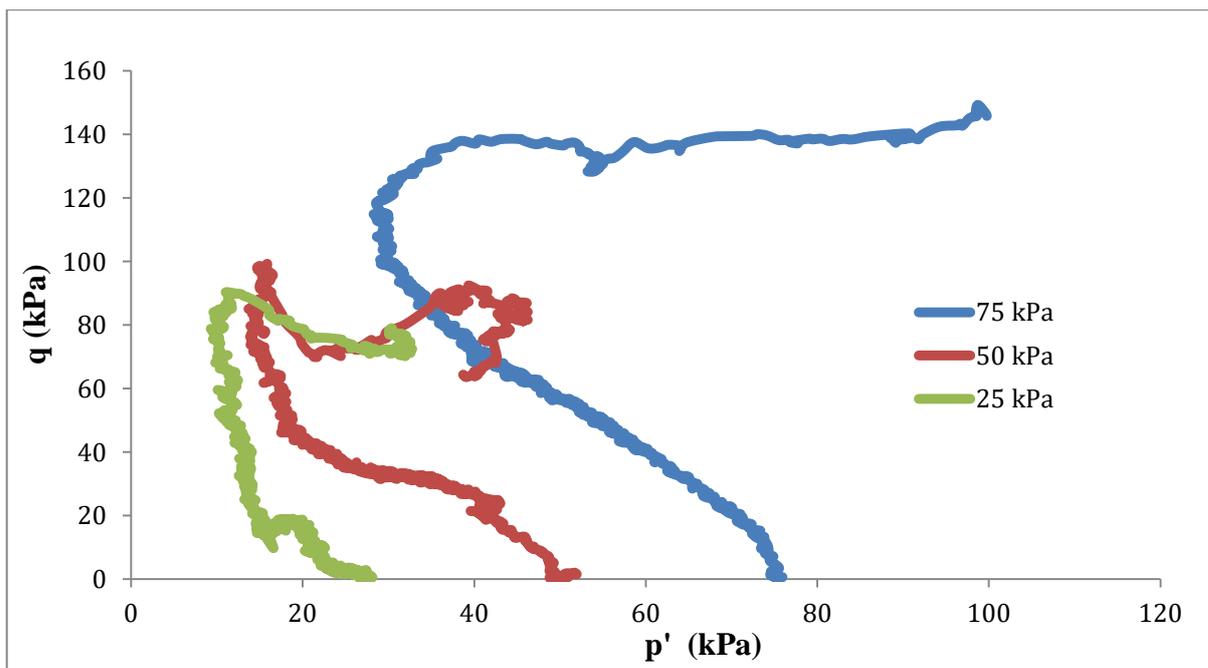
330 A Figura 9 apresenta os módulos de cisalhamento secante das três amostras em relação a
331 deformação cisalhante, podendo ser evidenciado uma degradação no módulo cisalhante com o

332 aumento da deformação cisalhante. Também podemos evidenciar que existe um aumento do
333 módulo cisalhante com o aumento da tensão vertical efetiva inicial.



334

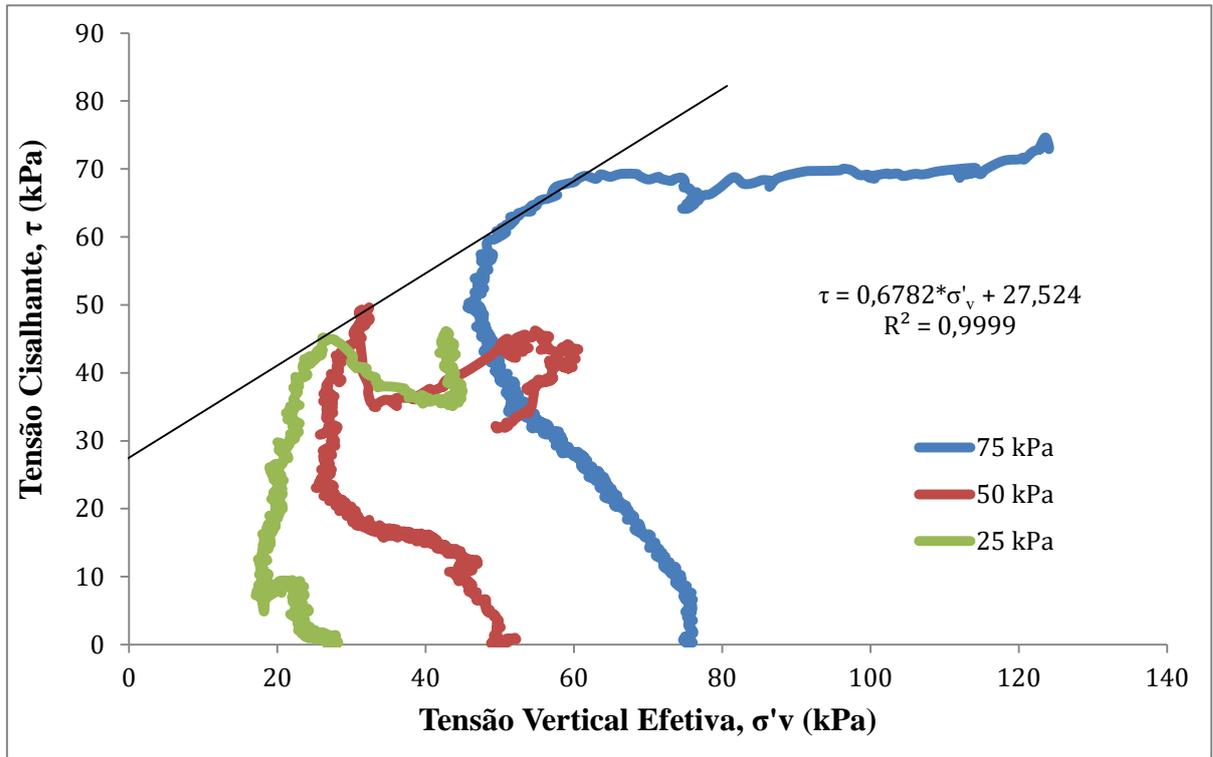
335 Figura 6: Curva da Tensão Cisalhante, τ , em relação à Deformação Cisalhante, γ .



336

337

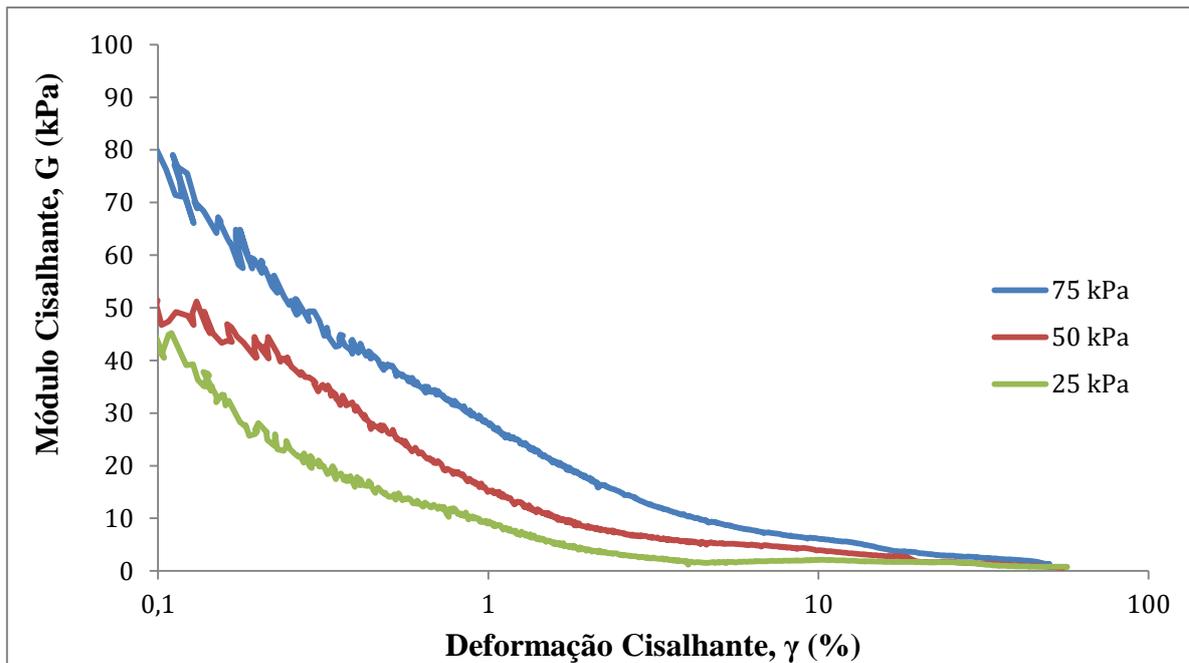
Figura 7: Trajetória de tensão, p' e q .



339

Figura 8: Tensão Cisalhante, τ , em relação à tensão vertical efetiva, σ'_v e envoltória de resistência.

340



341

342

Figura 9: Módulo Cisalhante, G, em relação a Deformação Cisalhante, γ .

343

RESULTADOS PARA CISALHAMENTO MONOTÔNICO PARA REJEITO DE MINERAÇÃO

344

MELHORADO COM 7% DE CIMENTO

345

Para a análise do comportamento do rejeito de mineração melhorado com cimento, foram

346

analisados juntamente os ensaios realizados a diferentes tensões verticais efetivas iniciais. Os

347

resultados são apresentados a seguir.

348

A Figura 10 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento versus a deformação cisalhante,

349

onde pode-se observar que ocorre um aumento de resistência com o aumento da tensão

350

vertical efetiva, ocorreu um fenômeno onde as amostras ensaiadas com uma maior tensão

351

vertical efetiva apresentaram tensão de pico, diferente da amostra ensaiada com menor tensão

352

confinante (25kPa), isso pode ser explicado pelo fato de que durante a consolidação, ocorre

353

uma redução do índice de vazios e , como consequência, a amostra fica mais compacta

354

resultando nesse comportamento, também ocorreu um deslizamento na base da amostra no

355

ensaio de 50 kPa de tensão vertical efetiva. Na Figura 11, são apresentados através dos

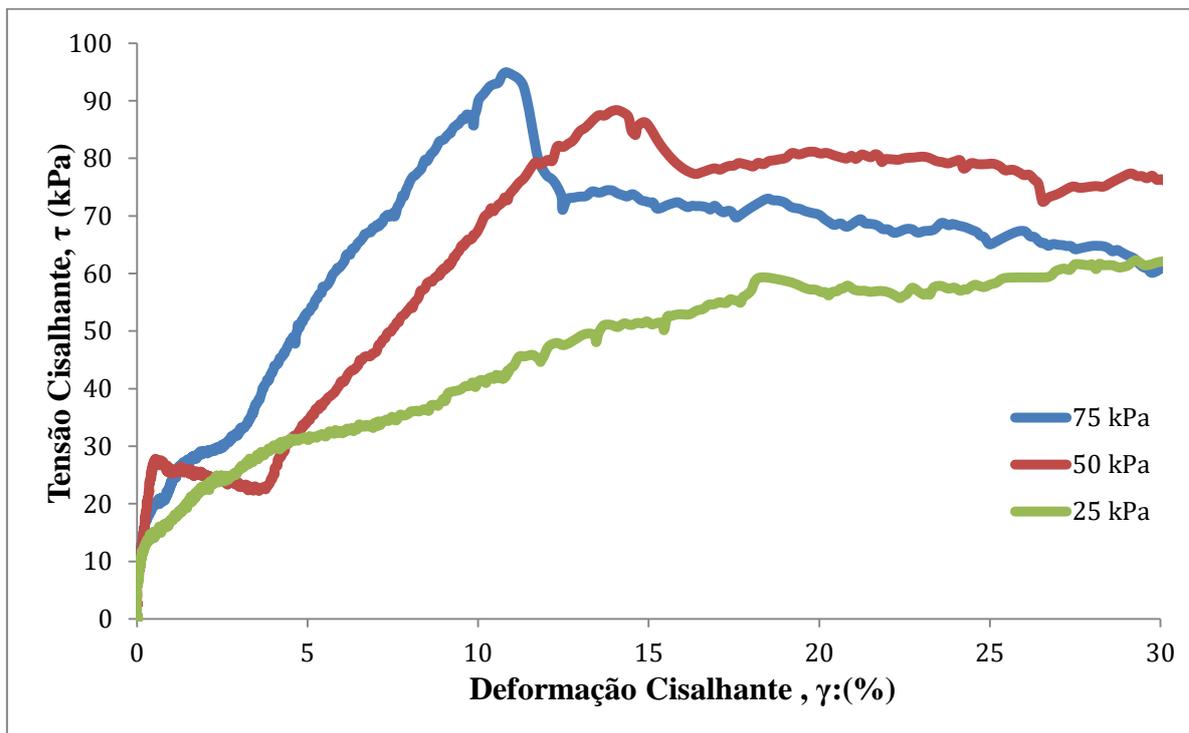
356

invariantes de tensões, p' e q , as trajetórias de tensões para cada um dos ensaios realizados.

357 Na Figura 12 são apresentadas as curvas de tensão cisalhante pela tensão vertical efetiva, para
358 a análise dos parâmetros de resistência, foi traçada uma reta de ajuste nos pontos de máxima
359 tensão de cisalhamento para cada uma das tensões verticais efetivas iniciais. O ângulo de
360 atrito é obtido através do Arco tangente do coeficiente angular (0,6854) da equação e o
361 intercepto coesivo é o valor apresentado pelo coeficiente linear (52,7). Logo, o ângulo de
362 atrito encontrado foi 34° e o intercepto coesivo foi encontrado o valor de 52,7 kPa.

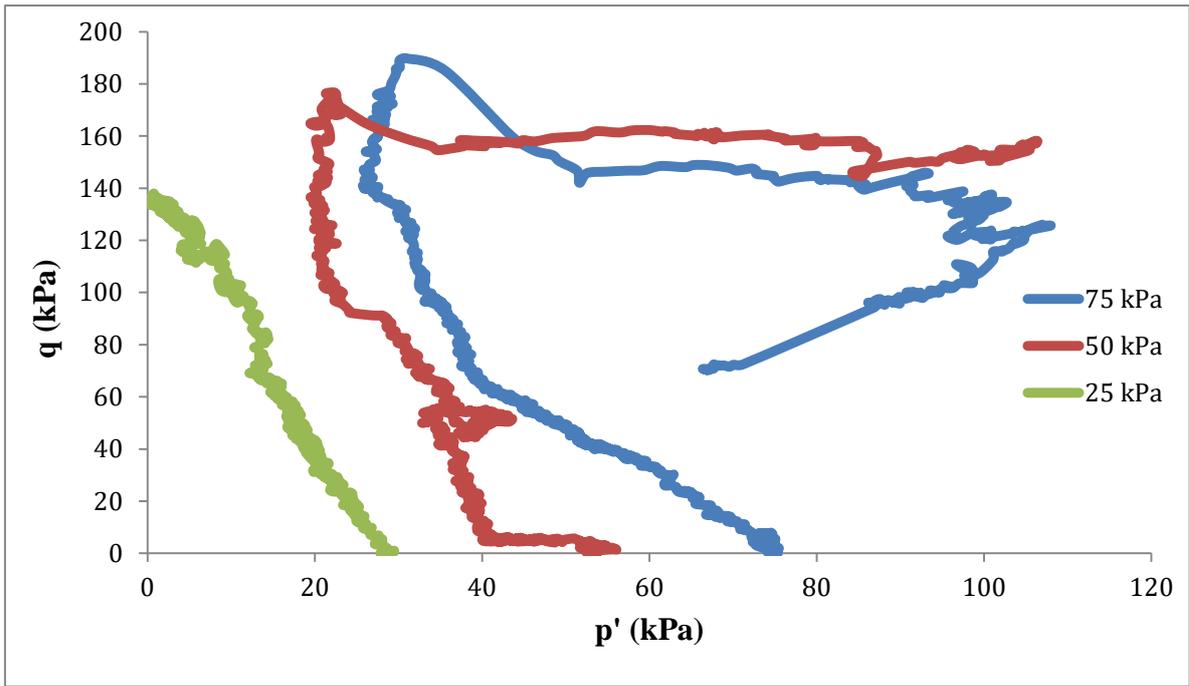
363 O valor do ângulo de atrito é o mesmo para a dosagem utilizando 5% de agente cimentante,
364 tendo uma variação no intercepto coesivo que aumentou de 27,5 kPa para 52,7 kPa, um
365 aumento de aproximadamente 91%.

366 A Figura 13 apresenta os módulos de cisalhamento secante das três amostras em relação à
367 deformação cisalhante, podendo ser evidenciado uma degradação no módulo cisalhante com o
368 aumento da deformação cisalhante.



369

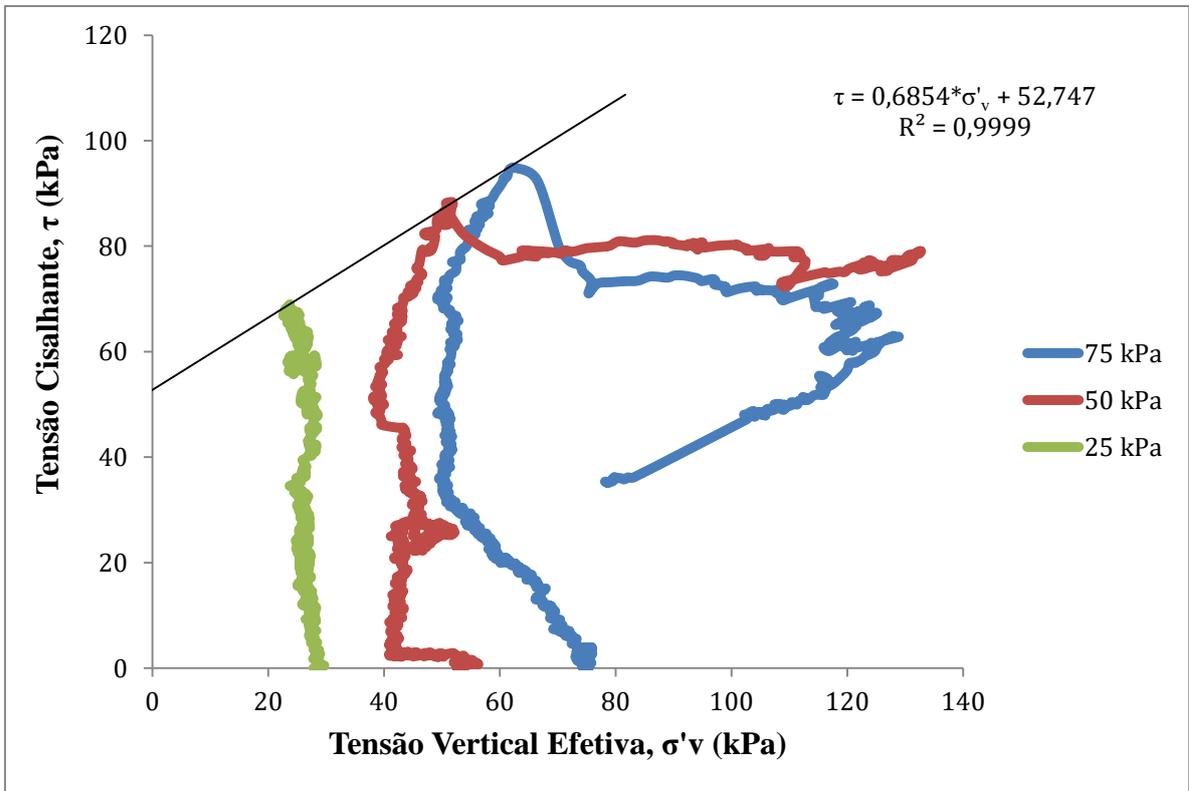
370 Figura 10: Curva da Tensão Cisalhante, τ , em relação à Deformação Cisalhante, γ .



371

372

Figura 11: Trajetória de tensão, p' e q.

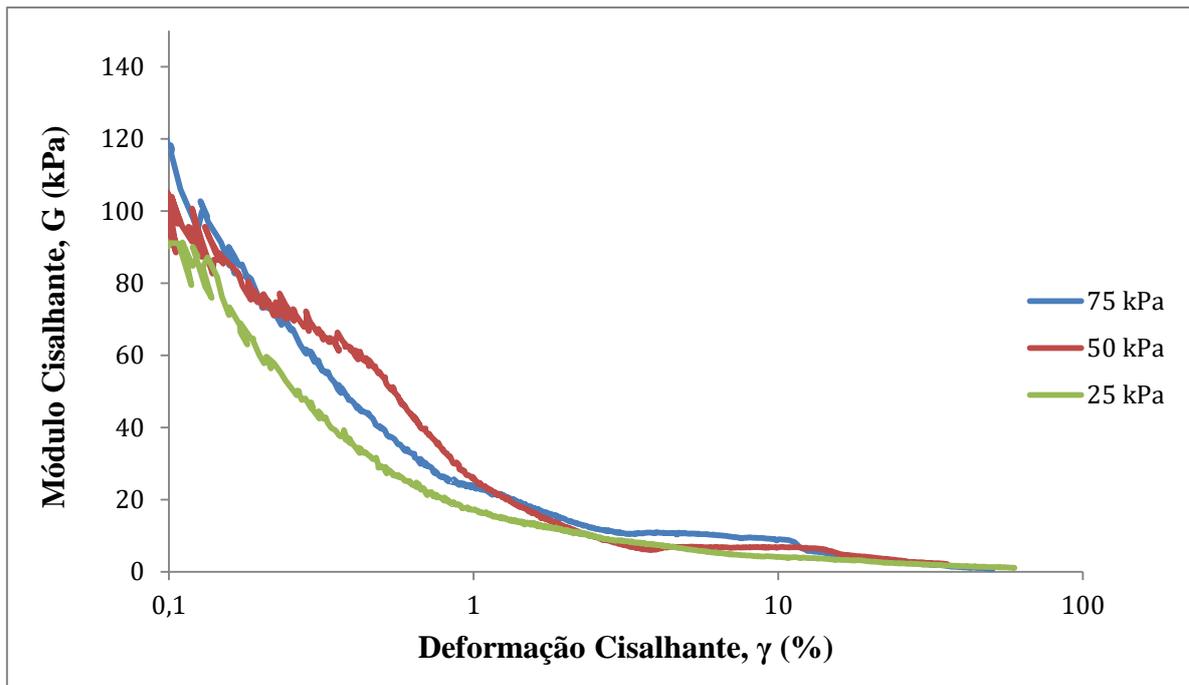


373

374

375

Figura 12: Tensão Cisalhante, τ , em relação à tensão vertical efetiva, σ'_v e envoltória de resistência.



376

377

Figura 13: Módulo Cisalhante, G, em relação a Deformação Cisalhante, γ .

378

RESULTADOS PARA CISALHAMENTO MONOTÔNICO PARA REJEITO DE MINERAÇÃO

379

MELHORADO COM 11% DE CIMENTO

380

Para a análise do comportamento do rejeito de mineração melhorado com cimento, foram analisados juntamente os ensaios realizados a diferentes tensões verticais efetivas iniciais. Os resultados são apresentados a seguir.

382

383

A Figura 14 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento versus a deformação cisalhante, onde pode-se observar que ocorre um aumento de resistência com o aumento da tensão vertical efetiva, também ocorreu o fenômeno de para as maiores tensões verticais efetivas as amostras apresentaram tensão de pico, isso pode ser explicado por ocorrer uma consolidação em maiores tensões ocasionar uma redução no índice de vazios e por conseguinte, apresentar tensão de pico. Na Figura 15, são apresentados através dos invariantes de tensões, p' e q , as trajetórias de tensões para cada um dos ensaios realizados.

389

390

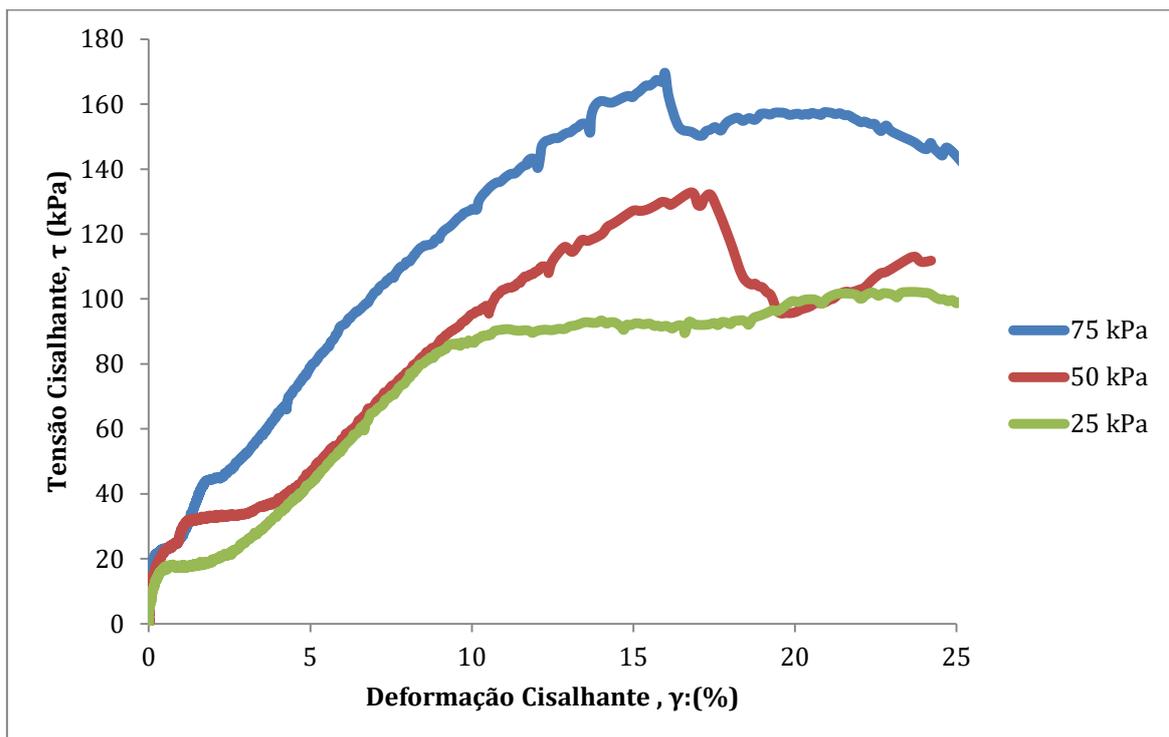
Na Figura 16 são apresentadas as curvas de tensão cisalhante pela tensão vertical efetiva, para a análise dos parâmetros de resistência, foi traçada uma reta de ajuste nos pontos de máxima

391

392 tensão de cisalhamento para cada uma das tensões verticais efetivas iniciais. O ângulo de
393 atrito é obtido através do Arco tangente do coeficiente angular (0,6718) da equação e o
394 intercepto coesivo é o valor apresentado pelo coeficiente linear (91,95). Logo, o ângulo de
395 atrito encontrado foi 34° e o intercepto coesivo foi encontrado o valor de 92 kPa.

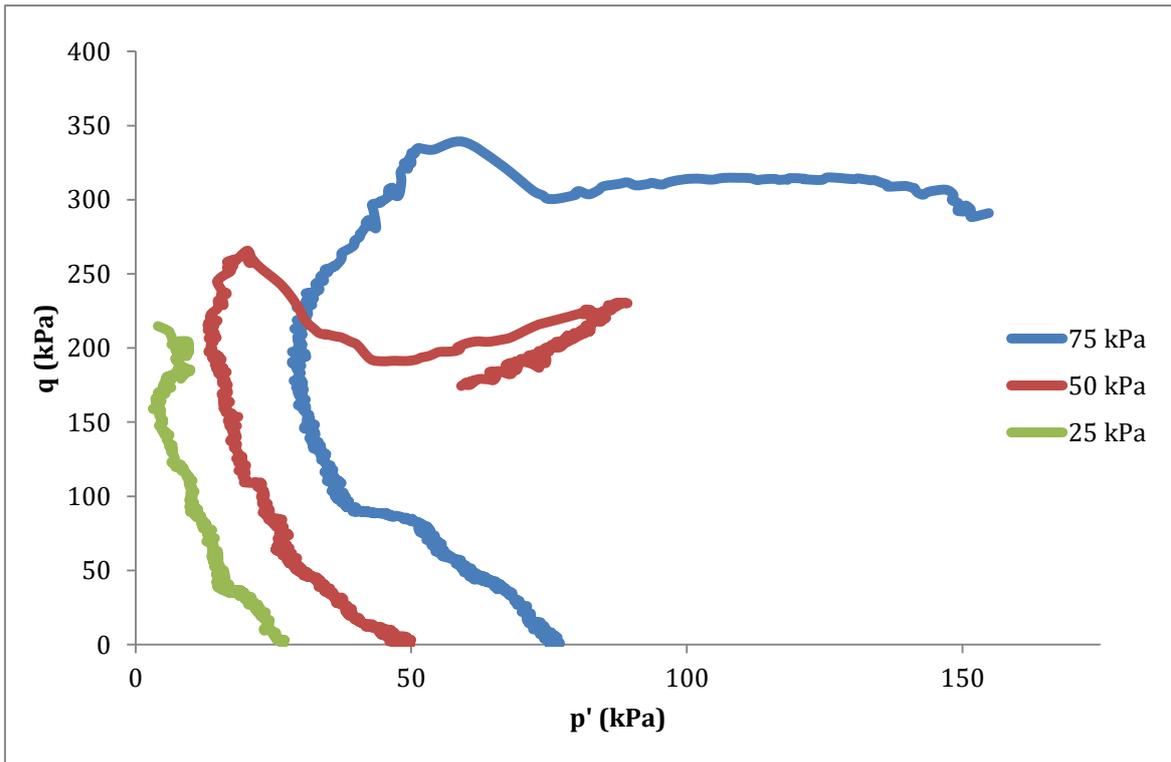
396 O valor do ângulo de atrito é o mesmo para a dosagem utilizando 5% e 7% de agente
397 cimentante, tendo uma variação no intercepto coesivo que aumentou de 52,7 kPa para 92 kPa,
398 um aumento de aproximadamente 74% em relação a dosagem de 7%.

399 A Figura 17 apresenta os módulos de cisalhamento secante das três amostras em relação à
400 deformação cisalhante, podendo ser evidenciado uma degradação no módulo cisalhante com o
401 aumento da deformação cisalhante. Podemos evidenciar também, um aumento do módulo
402 cisalhante em relação as amostras com menores teores de agente cimentante.



403

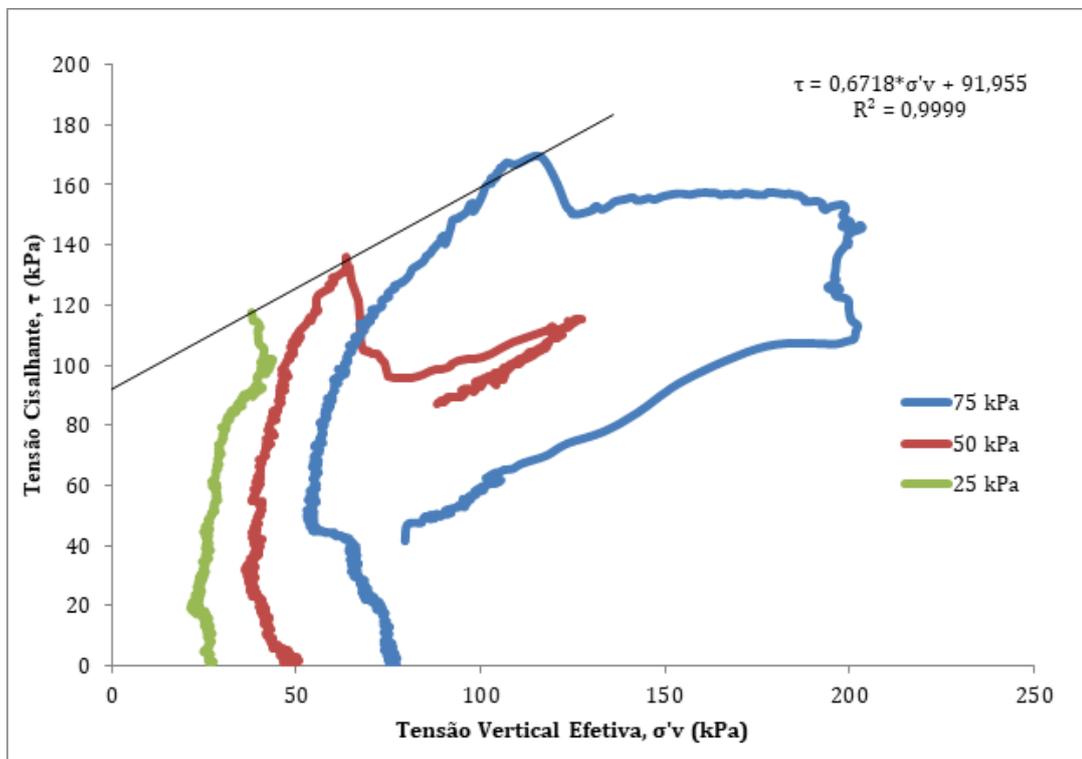
404 Figura 14: Curva da Tensão Cisalhante, τ , em relação à Deformação Cisalhante, γ .



405

406

Figura 15: Trajetória de tensão, p' e q .

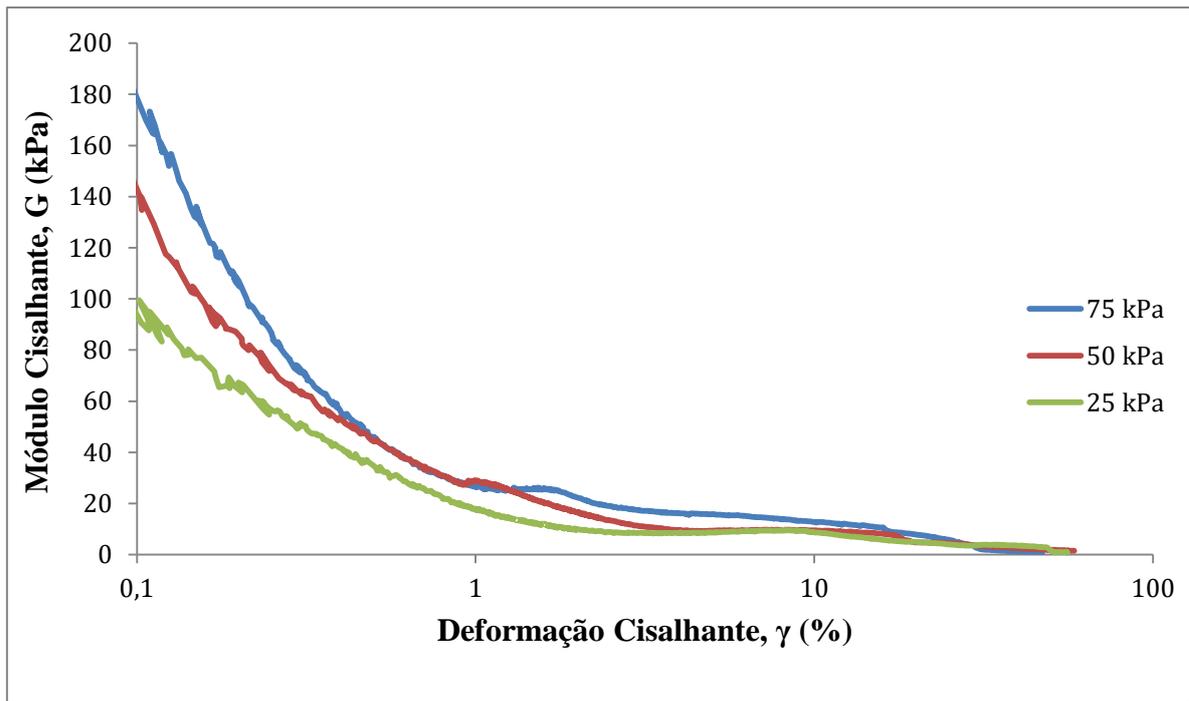


407

408

409

Figura 16: Tensão Cisalhante, τ , em relação à tensão vertical efetiva, σ'_v e envoltória de resistência.



410

411

Figura 17: Módulo Cisalhante, G, em relação à Deformação Cisalhante, γ .

412

UTILIZAÇÃO DO PARÂMETRO η/c_{iv} PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE

413

RESISTÊNCIA

414

A relação porosidade/Teor volumétrico de agente cimentante (η/c_{iv}) tem sido empregada em diversos trabalhos como parâmetro capaz de prever o comportamento mecânico dos mais diversos materiais artificialmente cimentados. Dentre os trabalhos é possível destacar os estudos de Foppa (2005). Tendo isso como referência, nesta pesquisa foi investigada a adequabilidade do parâmetro η/c_{iv} na previsão do comportamento mecânico das misturas de rejeito de mineração de ouro melhorado com cimento Portland, nos procedimentos baseados na técnica de DSM.

420

421

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de resistência do rejeito de mineração de ouro melhorado com cimento e o seu η/c_{iv} pós-moldagem.

422

423

Tendo em vista que o ângulo de atrito (ϕ') do material não se altera com os diferentes η/c_{iv} , basta saber a relação entre o intercepto coesivo (c') e o η/c_{iv} para a determinação da envoltória de resistência do material.

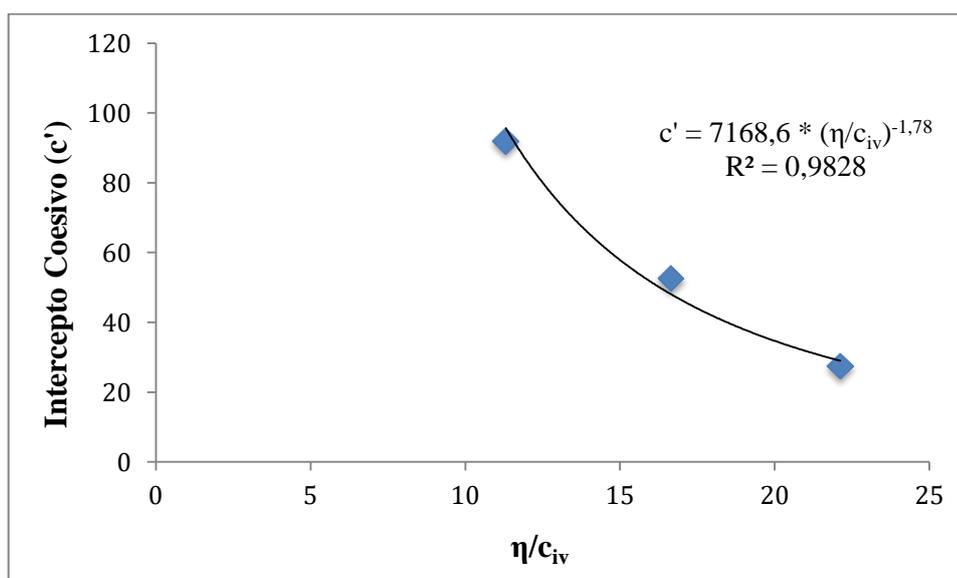
425

Parâmetro	Quantidade de agente cimentante (%)		
	5%	7%	11%
ϕ' (°)	34	34	34
c' (kPa)	27,5	52,7	92,0
η/c_{iv}	22,1	16,6	11,3

426 Tabela 3: parâmetros ϕ' e c' para distintas dosagens de cimento.

427 A Figura 18 apresenta a relação entre o parâmetro de resistência intercepto coesivo (c') do
428 rejeito de mineração melhorado com cimento em relação ao parâmetro η/c_{iv} .

429 Com isso, é possível estimar qual será a dosagem necessária para que seja alcançada o
430 intercepto coesivo de interesse, cabe salientar que os valores devem ser estimados dentro do
431 intervalo estudado (η/c_{iv} entre 22,1 e 11,3).



432

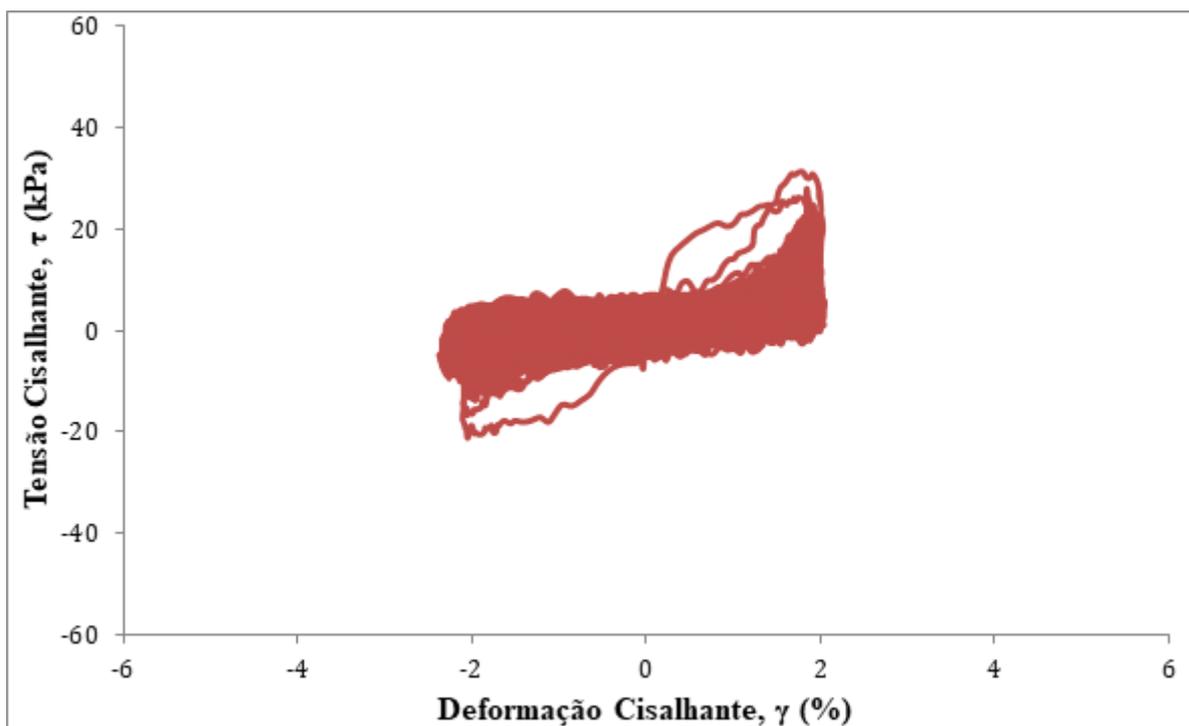
433 Figura 18: Intercepto Coesivo, c' , em relação ao η/c_{iv} .

434 RESULTADOS PARA CISALHAMENTO CÍCLICO SOB DEFORMAÇÃO CONTROLADA

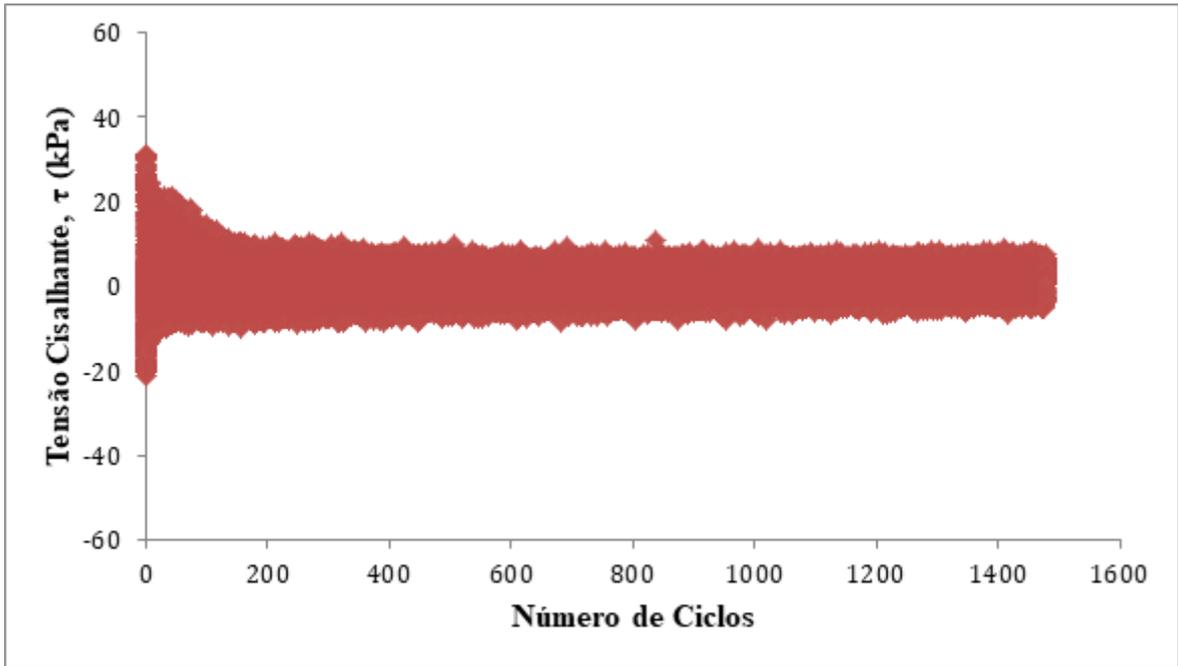
435 Os ensaios *simple shear* cíclicos com deformação cisalhante controlada foram realizados na
436 condição não drenada. A frequência de 0,1 Hz foi empregada para todos os ensaios cíclicos.
437 Sob tais condições, o equipamento impõe à amostra, em cada ciclo de carga, as deformações

438 definidas previamente e, como principal resposta, mede os valores de tensão cisalhantes. Os
439 ensaios foram terminados somente quando o número de ciclos atingia 1500.

440 As figuras abaixo apresentam a resposta cisalhante cíclica do rejeito de mineração de ouro
441 melhorado com cimento utilizando a dosagem intermediária (7%), ensaiado sob 50 kPa de
442 tensão vertical efetiva inicial e $\pm 2,0\%$ de deformação cisalhante controlada. Na Figura 19 é
443 apresentada a curva da tensão cisalhante, τ , em relação à deformação cisalhante. Já na Figura
444 20 é apresentada a evolução da tensão cisalhante, τ , em função dos ciclos. A Figura 21
445 apresenta o incremento de poropressão, Δu , e a tensão vertical efetiva, $\sigma'v$, em função do
446 número de ciclos. Na Figura 22 a tensão cisalhante, τ , é traçada em relação à tensão vertical
447 efetiva, $\sigma'v$. Finalmente, na Figura 23, através dos invariantes de tensão, p' e q , a trajetória de
448 tensões é apresentada.



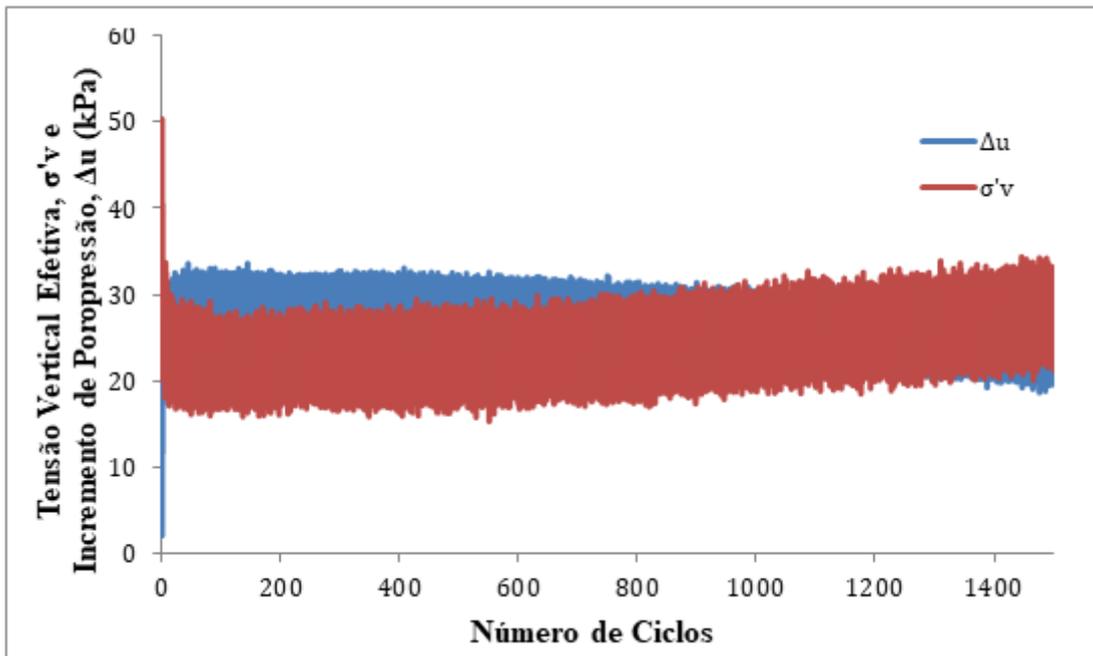
450 Figura 19: Tensão Cisalhante, τ , em relação à deformação cisalhante, γ , controlada de $\pm 2,0\%$.



451

Figura 20: Tensão Cisalhante, τ , em relação ao número de ciclos.

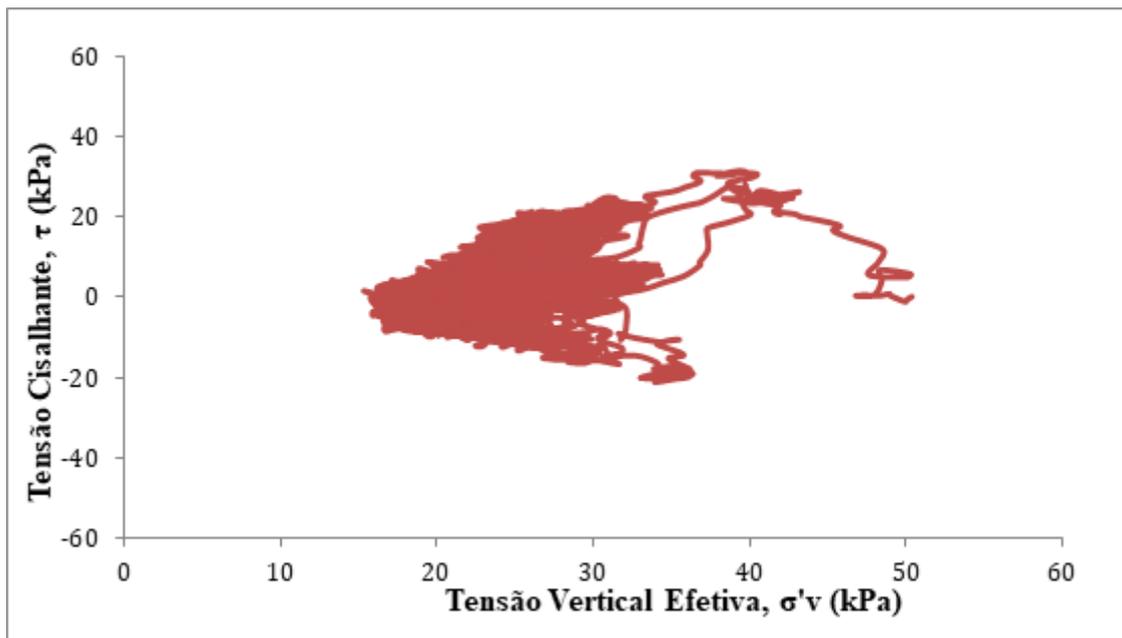
452



453

Figura 21: Incremento Tensão Vertical Efetiva, σ'_v , e da variação de poropressão, Δu , em relação ao número de ciclos.

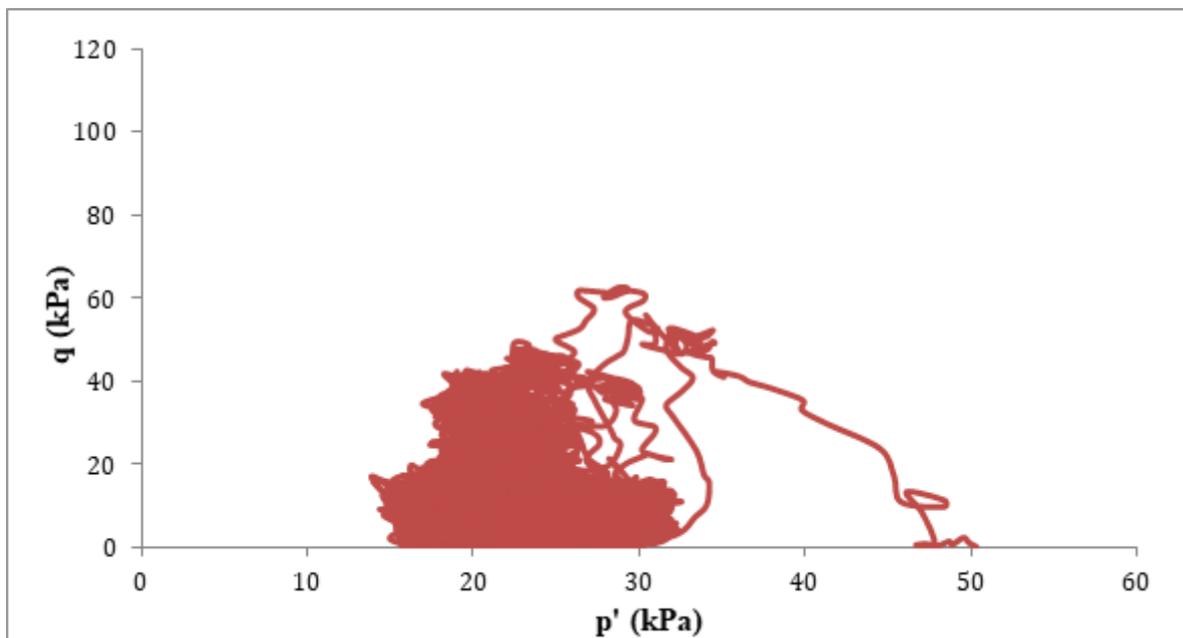
454



456

457

Figura 22: Tensão Cisalhante, τ , em relação à tensão vertical efetiva, σ'_v .



458

459

Figura 23: Trajetória de tensão, p' e q .

460

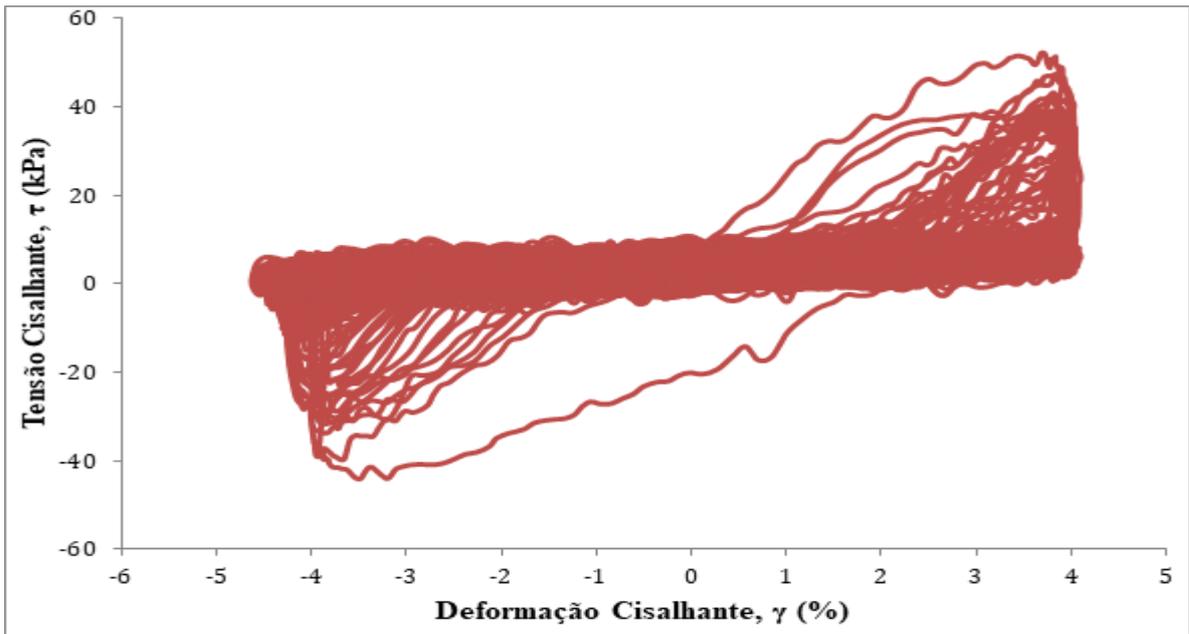
Da mesma forma, as figuras abaixo apresentam os resultados para o ensaio cíclico realizado

461

com a amostra de rejeito de mineração de ouro melhorado com cimento (7%), sob uma tensão

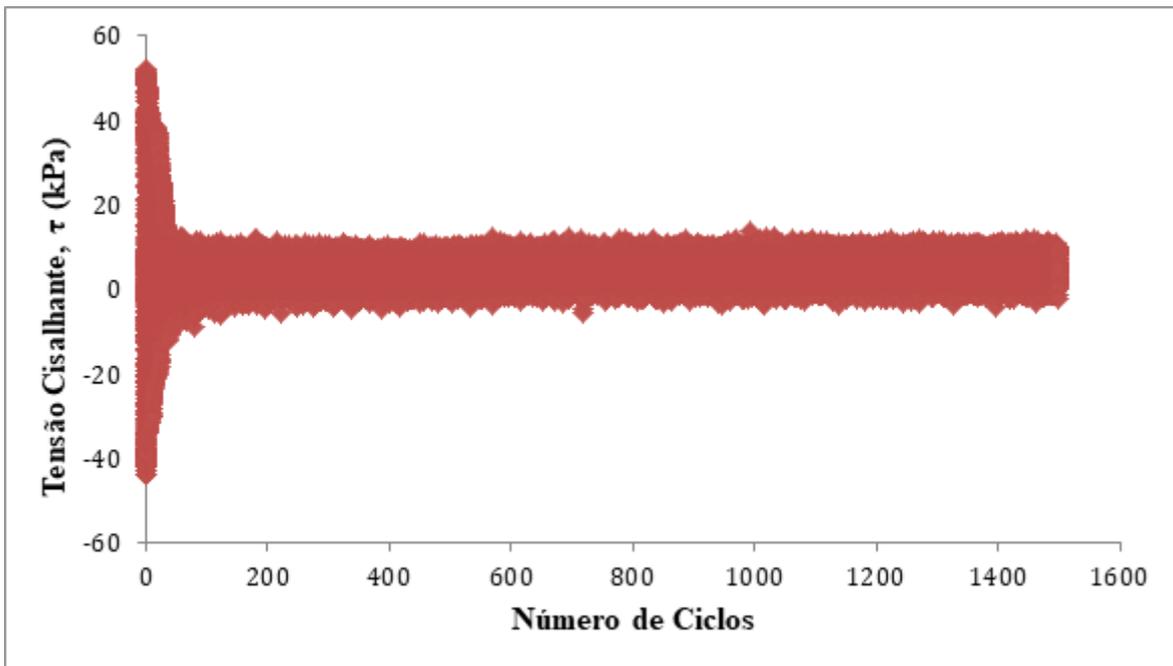
462

vertical efetiva inicial de 50 kPa e a deformação cisalhante controlada, γ , de $\pm 4,0\%$



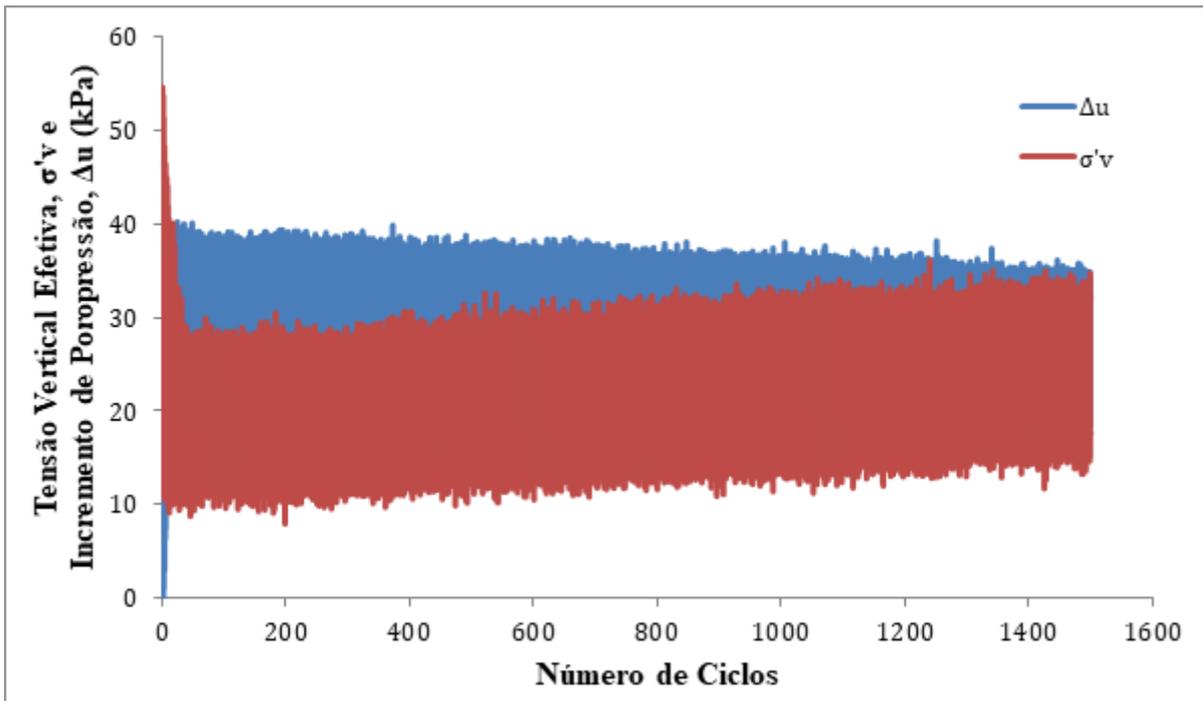
463

464 Figura 24: Tensão Cisalhante, τ , em relação à deformação cisalhante, γ , controlada de $\pm 4,0\%$.



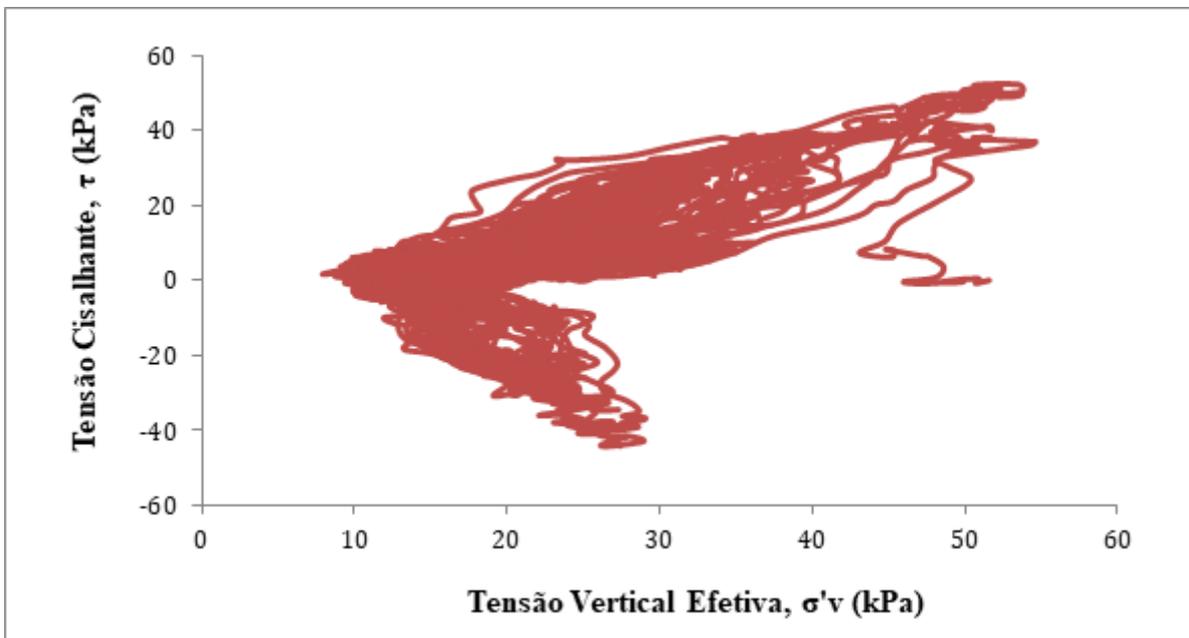
465

466 Figura 25: Tensão Cisalhante, τ , em relação ao número de ciclos.



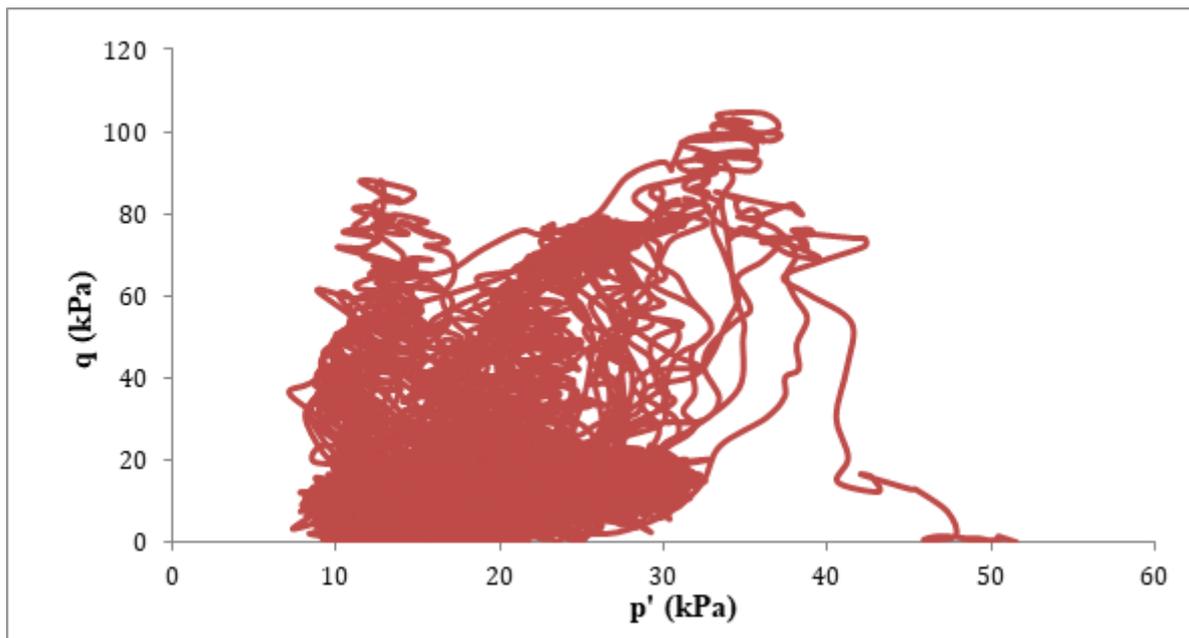
467

468 Figura 26: Incremento Tensão Vertical Efetiva, σ'_v , e da variação de poropressão, Δu , em
 469 relação ao número de ciclos.



470

471 Figura 27: Tensão Cisalhante, τ , em relação à tensão vertical efetiva, σ'_v .



472

473

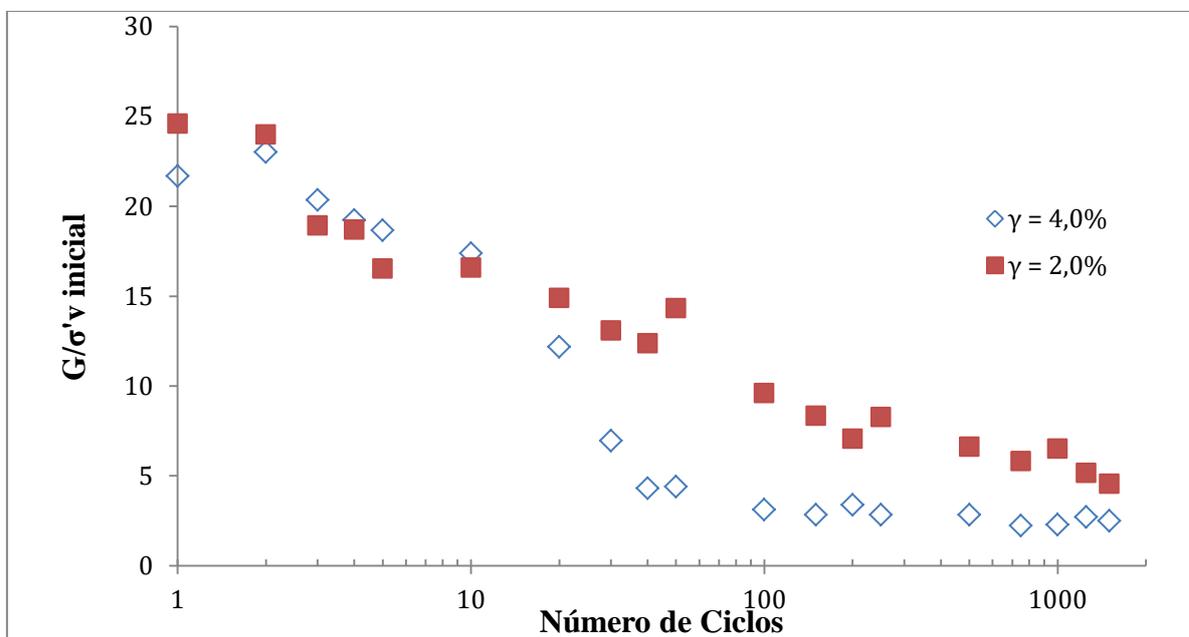
Figura 28: Trajetória de tensão, p' e q .

474 Sob condições de deformação plana com volume constante, para ambas as deformações
 475 controladas ($\pm 2,0\%$ e $\pm 4,0\%$) a resistência ao cisalhamento do rejeito cimentado reduz
 476 drasticamente já nos primeiros cíclicos. Efeito que pode ser explicado pelo salto dos valores
 477 de incremento de poropressão e, por conseguinte, a redução da tensão vertical efetiva da
 478 amostra. Os valores desse incremento são mais pronunciados no ensaio onde a deformação
 479 controlada é mais elevada ($\pm 4,0\%$), chegando a valores do patamar de 40 kPa, em
 480 comparação com os valores de incremento observados no ensaio o qual foi imposta uma
 481 deformação de $\pm 2,0\%$, na qual os valores atingiram os patamares de aproximadamente 30
 482 kPa. Também podemos observar que em nenhuma das duas amostras ocorreu o fenômeno da
 483 liquefação.

484 Um aumento no nível das deformações dos ensaios resultou em um aumento nos valores das
 485 tensões cisalhantes iniciais, em detrimento à redução dos níveis de tensão de cisalhante para
 486 os últimos ciclos. A amostra demonstra maior resistência ao se deformar mais e, quanto maior
 487 o nível de deformações, maiores são os danos à estrutura cimentada. Podendo concluir que a
 488 resistência ao cisalhamento, para os últimos ciclos, é maior para o menor nível de
 489 deformação.

490 A partir dos resultados dos ensaios *simple shear* cíclicos, a análise da rigidez das amostras em
491 função do número de ciclos pode ser realizada através do módulo cisalhante, G , definido pela
492 razão entre amplitude das tensões cisalhantes, $(\tau_{cíc\ máx} - \tau_{cíc\ mín})$, e a amplitude das
493 deformações cisalhantes, $(\gamma_{máx} - \gamma_{mín})$, em cada ciclo. Para tornar adimensional a análise, os
494 valores obtidos de módulo cisalhante são divididos pelos valores de tensão vertical efetiva
495 inicial, $\sigma'_{v\ inicial}$.

496 A Figura 29 agrupa as curvas das diferentes deformações cisalhantes aplicadas, sob condições
497 de deformação cisalhante controlada, a rigidez das misturas diminui com o aumento do nível
498 de deformação.



499

500 Figura 29: Módulo Cisalhante, G , com o número de ciclos em ensaios de deformação
501 controlada sob 50 kPa de tensão vertical efetiva.

502 CONCLUSÕES

503 A partir dos estudos presentes neste documento podem ser feitas as seguintes conclusões:

- 504 • O rejeito de mineração de ouro estudado nesta pesquisa foi caracterizado com a
505 finalidade de compreender as características físicas do material, foi observado que se

506 trata de um Silte de baixa compressibilidade além de apresentar comportamento não
507 plástico.

- 508 • O aumento do teor de agente cimentante, e por consequência uma redução do
509 parâmetro η/c_{iv} , provoca um aumento no intercepto coesivo. Já o ângulo de atrito do
510 material não é alterado.
- 511 • O ângulo de atrito encontrado nesta pesquisa foi de 34° para as diferentes dosagens,
512 valor próximo ao encontrado por Bedin (2010) e Tomasi (2018) para o rejeito de
513 mineração ao estado natural, que foi 33°, fato que corrobora os resultados encontrados.
- 514 • Em nenhuma dosagem de agente cimentante ocorreu o fenômeno da liquefação para
515 carregamento monotônico.
- 516 • Não ocorreu o fenômeno da liquefação para nenhum dos níveis de deformação
517 controlada no carregamento cíclico, porém, é possível evidenciar que um aumento no
518 nível das deformações proporciona um aumento da poropressão gerada a partir desse
519 carregamento e uma degradação maior do módulo cisalhante com os ciclos.

520 REFERÊNCIAS

- 521 AGURTO-DETZEL, H.; Bianchi, M.; Assumpção, M.; Schimmel, M.; Collaço, B.; Ciardelli,
522 C.; Barbosa, J. R., and Calhau, J. 2016. “The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE
523 Brazil and its preceding seismic sequence.” *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4929-
524 4936.
- 525 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C150: Standard Specification
526 for Portland Cement. Philadelphia, 11 p., 2012.
- 527 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland -
528 Requisitos. Rio de Janeiro, 2018;
- 529 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo -
530 preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 9 p.,
531 2016.

- 532 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação
533 do limite de liquidez, 2017.
- 534 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que
535 passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8p, 2016.
- 536 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação
537 do limite de plasticidade. 2016.
- 538 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise
539 granulométrica. 2018.
- 540 BEDIN, J. Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração. Tese de
541 doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto
542 Alegre, 2010.
- 543 BRUCE, D. An introduction to the Deep Soil Mixing methods as used in geotechnical
544 applications. U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, p. 143,
545 2000
- 546 CASAGRANDE, M, D, T. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a
547 grandes deformações. Dissertação de mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação
548 em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- 549 CDIT. The Deep Mixing Method – Principle, design and construction. A. A. Balkema
550 Publishers, 2002.
- 551 CORTE, M, B. Desenvolvimento de Equipamento para Ensaio *Simple Shear*. Dissertação de
552 mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto
553 Alegre, 2016.

554 CORTE, M.B. L. Festugato, N.C. Consoli. “Development of a Cyclic Simple Shear Apparatus
555 - Soils and Rocks, São Paulo, 2017.

556 DAVIES, M.P.;T.E. MARTIN. Upstream Constructed Tailings Dams - A Review of the
557 Basics. In proceedings of Tailings and Mine Waste '00, Fort Collins, January, Balkema
558 Publishers, pp. 3-15, 2000.

559 EN 14679. Execution of special geotechnical Works – Deep Mixing. CEN, English version, p.
560 52, 2005.

561 ESCOBAR, H. 2015. “Mud tsunami wreaks ecological havoc in Brazil.” Science/AAAS,
562 350(1126), 1138-1139.

563 FESTUGATO, L. Comportamento mecânico de hidratação e resposta cisalhante cíclica de
564 resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras. 2011. 221 f. Tese (Doutorado em
565 Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do
566 Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

567 FESTUGATO, L.; FOURIE, A.; CONSOLI, N. C. (2013). Cyclic shear response of
568 fibrereinforced cemented paste backfill. Géotechnique Letters, v. 3, n. 1, p. 5-12.

569 FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, A. (2015). Cyclic shear behavior of
570 fibrereinforced mine tailings. Geosynthetics International, v. 22, n. 2, p. 196-206.

571 FOPPA, D. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos
572 artificialmente cimentados. Dissertação de mestrado em Engenharia. Programa de Pós-
573 Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

574 JAPANESE GEOTECHNICAL SOCIETY. Practice for Making and Curing Stabilized Soil
575 Specimens without Compaction. JGS 0821-2009. Japanese Geotechnical Society. Vol. 1. pp.
576 426–434, 2000.

577 LARSSON, S. State of practice report - execution, monitoring and quality control.
578 International Conference on Deep Mixing. Best Practice and Recent Advances. Deep Mixing
579 '05, Stockholm, Sweden, 2005.

580 NORMAS REGULADORAS DE MINERAÇÃO (NRM) – BENEFICIAMENTO, disponível
581 em: http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_18.htm, acessado em 03/08/2019 as 20:05

582 NIERWINSKI, H. P. Potencial de liquefação de rejeitos de mineração estimado através de
583 ensaios de campo. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em
584 Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

585 PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F.; TOREM, M. L. Beneficiamento de
586 Minérios de Ouro. In: Cap. 2 de Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente.
587 Eds. TRINDADE, R. B. E. e BARBOSA FILHO, O. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ,
588 322p, 2002.

589 SCHNAID, F.; BEDIN, J.; COSTA FILHO, L. M. Piezocone in silty tailing materials. Studia
590 geotechnical et mechanica, Polonia, Special Issue, No. 1-2, p. 151-162, 2007.

591 SOSNOSKI, J. Interpretação de ensaios de CPTU e DMT em solos com permeabilidade
592 intermediária. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em
593 Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

594 TOMASI, L. F. Comportamento mecânico de resíduo de mineração estabilizado com cimento.
595 Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
596 UFRGS, Porto Alegre, 2018.

597 VICK, S. G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369
598 p, 1983.

599

LISTA DE FIGURAS

600		
601		
602	FIGURA 1: RESULTADOS DA VARREDURA DE EDX DO RESÍDUO UNDERFLOW (BEDIN, 2010). __	4
603	FIGURA 2: ETAPAS CONSTRUTIVAS DOS MÉTODOS DE ALTEAMENTO (ADAPTADO DE VICK,	
604	1983). _____	5
605	FIGURA 3: EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM	
606	CIMENTO (CDIT, 2002). _____	6
607	FIGURA 4: PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DE COLUNAS DE <i>DEEP SOIL MIXING</i> (KELLER,	
608	2016). _____	7
609	FIGURA 5: GRANULOMETRIA DOS REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO. _____	13
610	FIGURA 6: CURVA DA TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO CISALHANTE. __	15
611	FIGURA 7: TRAJETÓRIA DE TENSÃO, P' E Q. _____	16
612	FIGURA 8: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À TENSÃO VERTICAL EFETIVA E ENVOLTÓRIA DE	
613	RESISTÊNCIA. _____	16
614	FIGURA 9: MÓDULO CISALHANTE, EM RELAÇÃO A DEFORMAÇÃO CISALHANTE. _____	17
615	FIGURA 10: CURVA DA TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO CISALHANTE. _	18
616	FIGURA 11: TRAJETÓRIA DE TENSÃO, P' E Q. _____	19
617	FIGURA 12: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À TENSÃO VERTICAL EFETIVA E ENVOLTÓRIA DE	
618	RESISTÊNCIA. _____	19
619	FIGURA 13: MÓDULO CISALHANTE, EM RELAÇÃO A DEFORMAÇÃO CISALHANTE. _____	20
620	FIGURA 14: CURVA DA TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO CISALHANTE. _	21
621	FIGURA 15: TRAJETÓRIA DE TENSÃO, P' E Q. _____	22
622	FIGURA 16: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À TENSÃO VERTICAL EFETIVA, E ENVOLTÓRIA	
623	DE RESISTÊNCIA. _____	22
624	FIGURA 17: MÓDULO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO CISALHANTE. _____	23
625	FIGURA 18: INTERCEPTO COESIVO, EM RELAÇÃO AO N/C_{IV} . _____	24
626	FIGURA 19: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO CISALHANTE, CONTROLADA DE	
627	$\pm 2,0\%$. _____	25
628	FIGURA 20: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CICLOS. _____	26
629	FIGURA 21: INCREMENTO TENSÃO VERTICAL EFETIVA, E DA VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO, EM	
630	RELAÇÃO AO NÚMERO DE CICLOS. _____	26
631	FIGURA 22: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À TENSÃO VERTICAL EFETIVA. _____	27
632	FIGURA 23: TRAJETÓRIA DE TENSÃO, P' E Q. _____	27
633	FIGURA 24: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO CISALHANTE, CONTROLADA DE	
634	$\pm 4,0\%$. _____	28
635	FIGURA 25: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CICLOS. _____	28
636	FIGURA 26: INCREMENTO TENSÃO VERTICAL EFETIVA E DA VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO, EM	
637	RELAÇÃO AO NÚMERO DE CICLOS. _____	29
638	FIGURA 27: TENSÃO CISALHANTE, EM RELAÇÃO À TENSÃO VERTICAL EFETIVA. _____	29
639	FIGURA 28: TRAJETÓRIA DE TENSÃO, P' E Q. _____	30
640	FIGURA 29: MÓDULO CISALHANTE, COM O NÚMERO DE CICLOS EM ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO	
641	CONTROLADA SOB 50 kPa DE TENSÃO VERTICAL EFETIVA. _____	31
642		

643

LISTA DE TABELAS

644	TABELA 1: RESULTADOS DA VARREDURA DE EDX DO RESÍDUO (TOMASI, 2018).....	4
645	TABELA 2: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO.....	13
646	TABELA 3: PARÂMETROS Φ' E C' PARA DISTINTAS DOSAGENS DE CIMENTO.	24

647

648

649

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

650	ABNT	Associação Brasileira
651	ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
652	CIU	Ensaio Consolidado Isotropicamente Não-drenado
653	DSM	<i>Deep soil mixing</i>
654	EDX	<i>Energy Dipersive X-ray</i>
655	η/Civ	Parâmetro Porosidade/Teor volumétrico de cimento
656	NRM	Normas Reguladoras de minério
657	UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
658	γ	Deformação Cisalhante
659	τ	Tensão Cisalhante
660	σ	Tensão Normal
661	G	Módulo Cisalhante
662	φ'	Ângulo de atrito efetivo