

## Estudo do Comportamento Geomecânico de um Rejeito de Mineração de Ouro a Luz do Estado Crítico

Davidson Miguel Avelar de Oliveira

Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, eng.davidson@hotmail.com

Mariana Tonini de Araújo

Pós-doutoranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, marianatonini93@gmail.com

Nilo Cesar Consoli

Professor Titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

**RESUMO:** Devido aos grandes acidentes com barragens de rejeito a disposição de rejeitos filtrados em pilhas tem se apresentado como uma alternativa de disposição altamente difundida. Tendo em vista que para essa técnica de disposição a pilha é construída com o próprio rejeito, as características estruturais e o comportamento geomecânico são essenciais para garantir a segurança estrutural. Assim, este trabalho tem como principal objetivo a caracterização e avaliação do comportamento geomecânico de um rejeito de mineração de ouro. Foram realizados ensaios de compressão triaxial não drenado e saturado (CIUsat) em amostras reconstituídas em laboratório com grau de compactação de 90% e submetidas às tensões confinantes de 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Ensaios de adensamento unidimensional foram realizados em amostras reconstituídas com grau de compactação de 86%, 88%, 102% e 103%. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralogia (MLA e DRX) para identificar as principais características do geomaterial. Os resultados foram analisados a luz da mecânica do estado crítico, com avaliação de comportamento geomecânico quanto a geração de poropressões, definição de parâmetro de estado, delimitação da região de comportamento contrátil e dilatante e características da linha de estado crítico (LEC) e linhas de consolidação isotrópica (LIC). Os resultados indicam diversas LIC associadas aos diferentes estados de consolidação inicial e não paralelismo entre LEC e LIC. As amostras obtiveram parâmetro de estado positivo ( $\psi+$ ) associado a geração de poropressões positivas e ao comportamento contrátil do material, características vinculadas ao grau de compactação estudado (90%) nos ensaios triaxiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rejeito de Ouro, Estado crítico, Comportamento Geomecânico, Pilhas de Rejeito.

**ABSTRACT:** Due to major accidents with tailings dams, filtered tailings stacking has emerged as a highly widespread disposal alternative. Considering for this disposal technique that the stacking is built with the tailing itself, the structural characteristics and geomechanical behavior are essential to ensure structural safety. Therefore, the main objective of this work is to characterize and assess the geomechanical behavior of a gold mining tailing. Undrained isotropic consolidation (CIUsat) triaxial shear tests, in saturated condition, were carried out on samples reconstituted in the laboratory with a compaction degree of 90% and subjected to confining stresses of 100, 200, 400, 800 and 1,600 kPa. One-dimensional consolidation tests were carried out on reconstituted samples with compaction degree of 86%, 88%, 102% and 103%. Geotechnical, chemical and mineralogy characterization tests (MLA and XRD) were carried out to identify the main characteristics of the geomaterial. The results were analyzed considering the critical state, and the geomechanical behavior was assessed regarding pore pressures generation, state parameter, contractive and dilatant behavior region delimitation and critical state line (LEC) and isotropic consolidation lines (LIC) characteristics. The results indicate several LICs associated with different initial consolidation states of the material and non-parallelism between LEC and LIC. Samples presented a positive state parameter ( $\psi+$ ), direct associated with positive pore pressures generation and contractive behavior, characteristics associated with the compaction degree studied (90%) in the triaxial tests.

**KEYWORDS:** Gold tailings, Critical state, Geomechanical behavior, Tailings stacking.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma alternativa amplamente difundida em detrimento da disposição do rejeito em polpa em barragens é o método de desaguamento do rejeito, que tem como finalidade a redução da quantidade de água e incremento do teor de sólidos, seguido de disposição mecanizada em pilhas. Segundo Portes (2013) o uso da técnica de disposição em pilha de rejeitos filtrados em comparação com o uso do sistema convencional de disposição dos rejeitos em forma de polpa apresenta grandes benefícios, como menor impacto ambiental, menores riscos associados e menores consequências relacionadas aos modos de falha. Vale destacar que não necessariamente as estruturas do tipo pilhas de rejeitos filtrado terão em todas eventuais condições comparativas às barragens, menores riscos (susceptibilidade x consequência), porém, o fato de dispor materiais com menor saturação pode propiciar menor potencial de abrangência/extensão do material quando numa eventual ruptura, devido a viscosidade e concentração de sólidos. Segundo Ulrich e Kerr (2011) os rejeitos filtrados são caracterizados por apresentarem teor de sólidos acima de 85%, o que, conforme Melo (2013), estaria associado a propensões ao escoamento muito baixas.

Segundo Galvão-Sobrinho (2014) a produção mineral tem elevado a magnitudes cada vez maiores o volume de rejeitos gerados, resultando, conseqüentemente, no aumento do porte de estruturas de disposição, como pilhas de rejeitos. Crystal et al. (2018) menciona o uso da mecânica dos solos no estado crítico para entender as limitações de altura de pilhas de rejeitos filtrados e mudança de comportamento do material, principalmente em elevadas tensões. Segundo Jefferies e Been (2016) a condição do material no estado crítico é caracterizada por um estado estável em que a tensão média efetiva ( $p'$ ), tensão desvio ( $q$ ) e o índice de vazios ( $e$ ) não variam. A avaliação de comportamento do material a luz do estado crítico é comumente realizada através do diagrama de volume específico ( $v$ ) ou índice de vazios ( $e$ ) em função da tensão efetiva média ( $p'$ ).

A teoria idealizada, conforme Jefferies e Been (2016), propõe uma única linha de compressão isotrópica (LIC) paralela a uma linha de estado crítico (LEC), compensadas por uma razão de espaçamento. Em contradição às definições clássicas, Robertson (2017) definiu que há comportamentos distintos para solos argilosos e arenosos. Para este autor, solos argilosos possuem uma única LEC paralela a uma única LIC e solos arenosos possuem diversas LIC não paralelas a LEC. Porém, a maior parte dos trabalhos relatados na literatura são baseados em testes em areias limpas e uniformes ou materiais puramente argilosos, em contrapartida, muitos geomateriais, como os rejeitos de mineração de ouro, possuem granulometria predominante siltosa.

Assim, é essencial o estudo gemecânico de rejeitos de mineração, tendo em vista as limitações de entendimento do comportamento geotécnico de rejeitos de mineração de ouro no estado crítico, geomateriais predominantemente siltosos. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento geomecânico de um rejeito de ouro a luz do estado crítico.

## 2 MATERIAIS E METODOLOGIA

O material utilizado para desenvolvimento deste estudo corresponde a um rejeito de mineração de ouro. Este rejeito é proveniente do beneficiamento do minério de ouro após o processo de flotação e filtragem do material. Foram coletadas amostras deformadas de rejeito provenientes do reservatório de uma barragem de contenção de rejeitos. A coleta aleatória distribuída em 5 (cinco) locais diferentes do reservatório teve como objetivo garantir maior representatividade do material.

Para a caracterização química e mineralógica, foram coletadas 12 (doze) amostras do rejeito de ouro. Os ensaios foram realizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Centro de Microscopia da UFMG (Belo Horizonte – MG, Brasil). As análises mineralógicas e associações minerais realizadas consideraram tanto o contraste do número atômico quanto a composição química de cada fase (imagens eletrônicas retroespalhadas e espectros de raios X característicos por EDS, modo XBSE para análise modal e SPL\_DZ para mineralogia Au-Ag).

Para a caracterização geotécnica foram realizados ensaios de granulometria e sedimentação (NBR 7181, 2016), massa específica dos grãos (NBR 6508, 1984), índice de vazios máximo (NBR 12004, 2015), limite de liquidez (NBR 6459, 2016), limite de plasticidade (NBR 7180, 2016), compactação proctor normal (NBR

7182, 2020) e ensaios de permeabilidade a carga variável (NBR 14545, 2021). O índice de vazios mínimo foi definido por correlação com o máximo peso específico seco através da equação a seguir.

$$\gamma_d = (Gs \cdot \gamma_w) / (1 + e) \quad (1)$$

Os ensaios de adensamento unidimensional foram realizados para obtenção das curvas de adensamento e definição das linhas de consolidação isotrópica, através de correlação matemática. Os ensaios foram realizados conforme orientações da norma NBR 16853 (ABNT, 2020). As amostras foram moldadas em diferentes estados de consolidação inicial, correspondentes a um grau de compactação de 86%, 88%, 102% e 103%, identificadas neste trabalho, respectivamente, como S2-86N, S4-88N, S1-102N e S3-103N. Foram executadas aplicações de cargas de carregamento de 2, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 e 3200 kPa e em seguida de descarregamento de 3200, 1600, 800, 400, 200, 50 e 12,5 kPa. Os parâmetros de inclinação  $\lambda$  e  $\kappa$  referente ao descarregamento e recarregamento da Linha Isotrópica de Consolidação (LIC) foram definidos por correlação com os parâmetros  $C_c$  e  $C_s$  do ensaio de Adensamento Unidimensional, já que  $\lambda = C_c/2,3$  e  $\kappa = C_s/2,3$ .

Os ensaios triaxiais de consolidação isotrópica não drenada (CIU), em condição saturada (B de Skempton igual a 0,98), foram realizados em amostras reconstituídas em laboratório conforme ASTM D4767 (ASTM, 2020). Foram moldadas amostras reconstituídas com grau de compactação de 90%, identificadas neste trabalho como S5-90N. As amostras foram moldadas com altura de 110 mm e diâmetro de 50 mm e submetidas a tensões confinantes ( $p_0'$ ) de 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa.

Para avaliação do comportamento geomecânico do material utilizou-se como metodologia a análise dos resultados em termos de tensão de desvio ( $q$ ) e geração de poropressões ( $u$ ) em função da deformação axial ( $\epsilon_a$ ), trajetória de tensões efetivas (TTE), e, para a condição no estado crítico, variação volumétrica ( $v$ ) em função da tensão efetiva média ( $p'$ ).

A avaliação no estado crítico foi realizada através da determinação da Linha de Estado Crítica (LEC) pela função curvilínea (Equação 2) e função linear (Equação 3), equações propostas por diversos autores (JEFFERIES E BEEN, 2016; LI E COOP, 2018; SCHNAID ET AL., 2013; VERDUGO, 1992; VERDUGO E ISHIHARA, 1996; SCHOFIELD E WROTH, 1968). Foi considerada como metodologia para definição da condição no estado crítico os resultados no estágio final de cisalhamento. Neste trabalho os parâmetros “a”, “b” e “c” foram ajustados até obtenção de uma linha curva de maior convergência com os dados na condição última de cisalhamento. O parâmetro  $\Gamma$  corresponde ao valor de  $v$  equivalente a  $p' = 1$  kPa e  $\lambda$  é a inclinação da LEC.

$$v = a - b(p'/p_{ref})^c \quad (2)$$

$$v = \Gamma - \lambda \cdot \ln p' \quad (3)$$

A equação da Linha Isotrópica de Consolidação (LIC) no plano  $v$ - $\ln p'$  é definida pela função linear apresentada a seguir, semelhante a equação linear da LEC. O parâmetro  $N$  correspondente ao valor de  $v$  equivalente a  $p' = 1$  kPa e  $\lambda$  é a inclinação da LIC.

$$v = N - \lambda \cdot \ln p' \quad (4)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Mineralogia

Os resultados dos ensaios de caracterização química permitiram determinar os principais elementos químicos presente no rejeito de mineração de ouro, sendo eles, em ordem de concentração, Si (22,1%), Fe (12,3%), Ca (5,21%), Al (3,49%), C (3,43%), S (2,49%), Mg (2,02%), K (0,75%), Mn (0,57%), Na (0,46%), Ti (0,32%) e As (0,15%).

Os resultados de mineralogia indicam que o rejeito é rico principalmente em quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), 37,98%. Óxidos e outros silicatos são raros e representam menos de 0,1%. Os sulfetos representam uma pequena parcela

dos minerais correspondendo a 0,71% para as amostras de rejeito. Em maiores proporções estão presentes cerca de 4,43% de Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), 8,92% de Moscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_{1.9}\text{F}_{0.1}$ ), 15,8% de Clorita ( $(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$ ) e 6,92% de carbonatos ( $\text{Ca}(\text{Fe,Mg,Mn})(\text{CO}_3)_2$ ,  $\text{FeCO}_3$ , e  $\text{CaCO}_3$ ).

A predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) em rejeitos de mineração de ouro também foi relatada por Hoch (2022) com cerca de 93,89%, Lebron (2023) com cerca de 59,3%, Festugato (2011) na proporção de 29% e Bedin (2010) com cerca de 32,5% presente na rocha de origem e no rejeito cerca de 33,47%.

### 3.2 Caracterização Geotécnica

Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 1. Conforme ASTM D2487 (ASTM, 2017) o rejeito é classificado como silto arenoso (ML) sendo constituído de 78,4% de silte, 16,5% de areia e 5,1% de argila. Foi definido índice de vazios máximo de 1,44 e mínimo de 0,56, sendo o valor mínimo definido por correlação com o máximo peso específico. Através dos gráficos de compactação normal é possível aferir que o material apresenta teor de umidade ótimo de 17,83% e peso específico seco máximo de 1,72  $\text{kN/m}^3$ .

Tabela 1. Caracterização geotécnica do rejeito.

Caracterização	Resultados	Norma
Pedregulho (%)	0,00	
Areia grossa (%)	0,00	
Areia média (%)	0,73	NBR 7181 (ABNT, 2016)
Areia fina (%)	22,87	
Silte (%)	75,30	
Argila (%)	1,10	
Massa específica (Gs)	2,81	NBR 6508 (ABNT, 1984)
e máx	1,44	NBR 12004 (ABNT, 2015)
e min	0,56	Correlação com o máximo peso específico
Teor de umidade ótimo (%)	17,83	NBR 7182 (ABNT, 2020)
Peso específico seco máximo: $\text{kN/m}^3$	1,72	NBR 7182 (ABNT, 2020)
LL: (%)	Não-líquido	NBR 6459 (ABNT, 2016)
LP: (%)	Não-plástico	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Classificação	ML	ASTM D2487 (ASTM, 2017)
Coefficiente de Permeabilidade (cm/s)	$1,7 \times 10^{-7}$	NBR 14545 (ABNT, 2021)

### 3.3 Comportamento Geomecânico

Os resultados de tensão desvio (q) e geração de poropressões (u) em função da deformação axial ( $\epsilon_a$ ) são apresentados na Figura 1. Verifica-se a estabilização da tensão de desvio (q) e da geração de poropressões (u) para deformações axiais da ordem de 18% e 8%, respectivamente. As amostras obtiveram geração de poropressão positiva para todos os estados de tensão confinante. No comportamento tensão de desvio por deformação axial as amostras alcançaram a tensão máxima desviadora seguido por pequena redução de resistência e estabilização. Os principais resultados dos ensaios triaxiais são apresentados na Tabela 2.

A avaliação de comportamento no cisalhamento e definição dos parâmetros de resistência e no estado crítico do material foram avaliados em termos de trajetórias de tensões efetivas, assim como definição da envoltória de resistência de pico e no estado crítico (Figura 2a). Observa-se que a envoltória de resistência de pico é superior a envoltório no estado crítico. Os parâmetros de resistência para a máxima tensão desviadora foram intercepto coesivo de 17 kPa e ângulo de atrito de 31°.

Tabela 2. Resultados dos ensaios triaxiais.

ID	Condição	GC (%)	$p'$ inicial (kPa)	$p'$ final (kPa)	$q$ máximo (kPa)	$q$ final (kPa)	$v$ final	$e$ final	$v$ inicial	$e$ inicial	$\psi_0$
S5-90N	CIU	90	100	94,11	157,97	108,34	1,74	0,74	1,79	0,79	0,01
S5-90N	CIU	90	200	127,21	222,22	162,63	1,72	0,72	1,79	0,79	0,01
S5-90N	CIU	90	400	250,17	444,86	297,52	1,69	0,69	1,79	0,79	0,01
S5-90N	CIU	90	800	549,70	967,69	653,09	1,66	0,66	1,79	0,79	0,02
S5-90N	CIU	90	1600	860,85	1359,72	944,54	1,62	0,62	1,79	0,79	0,04

Onde: GC – grau de compactação;  $p'$  – tensão efetiva média;  $q$  – tensão desviadora;  $v$  – volume específico;  $e$  – índice de vazios;  $\psi_0$  – parâmetro de estado.

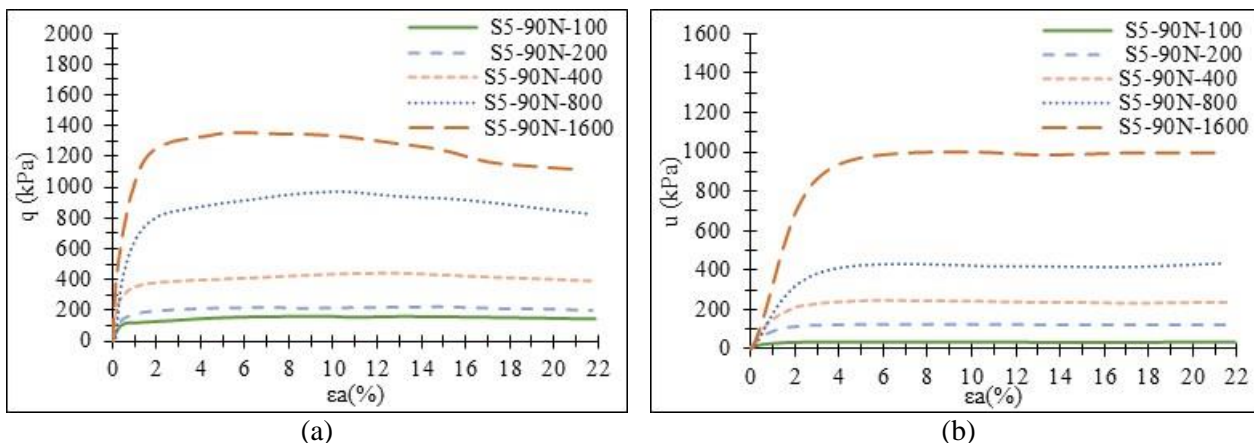


Figura 1. a) Gráfico tensão em função da deformação axial; e b) gráfico de variação de poropressões em função da deformação axial.

Os resultados indicam que a maioria das amostras atingiram ou estavam se movendo em direção ao estado crítico no estágio de cisalhamento final. Este fato é constatado pela tendência de estabilização da tensão de desvio ( $q$ ) e variação de poropressões ( $u$ ) a partir de certo estágio de deformação axial. O ângulo de atrito no estado crítico no plano  $p'$ - $q$  resultou em valor de  $28^\circ$  e razão de atrito no estado crítico ( $M$ ) de 1,13. Estes valores estão dentro da ordem de grandeza apresentada na literatura para rejeitos de ouro, conforme Bedin (2010), Lebron (2023) e Hoch (2022).

Os resultados de Adensamento Unidimensional são apresentados na Figura 2b. Constata-se que existem diversas linhas de adensamento unidimensional (LAU) que são diretamente correlacionadas com a consolidação inicial ou grau de compactação de cada amostra. As amostras foram preparadas com grau de compactação de 86% (S2-86N), 88% (S4-88N), 102% (S1-102N) e 103% (S3-103N). Os parâmetros de inclinação  $\lambda$  e  $\kappa$  referente ao descarregamento e recarregamento da Linha Isotrópica de Consolidação (LIC) foram definidos por correlação com os parâmetros  $C_c$  e  $C_s$  do ensaio de Adensamento Unidimensional (Tabela 3).

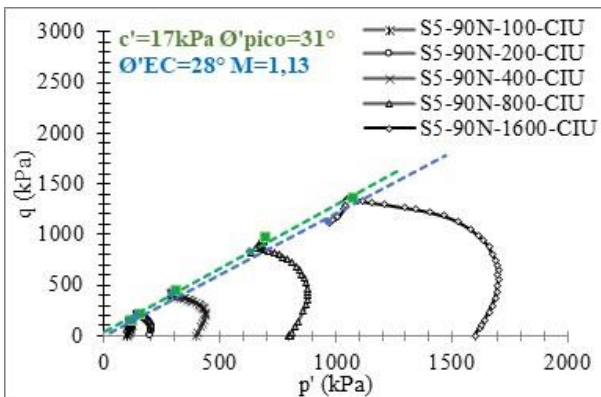
A Linha de Estado Crítica (LEC) foi inferida pela interpolação dos valores de volume específico ( $v$ ) e tensão média efetiva ( $p'$ ) ao final do ensaio triaxial. A Figura 2c apresenta a determinação da LEC através da função curvilínea (Equação 2). Neste gráfico a LEC foi traçada em conjunto com a linha de adensamento unidimensional (LAU) da amostra S4-88N (GC=88%), para efeitos comparativos. Contata-se que todas as amostras, independente da tensão confinante submetida, obtiveram parâmetro de estado positivo ( $\psi^+$ ), o que indica comportamento contrátil no cisalhamento associado a geração de poropressões positivas.

A LEC determinada pela função linear (Equação 3) foi traçada em conjunto com os resultados de LIC para diferentes estados de consolidação inicial das amostras (Figura 2d). As LICs foram determinadas por correlação matemática através da manipulação dos resultados das LAUs. Os parâmetros das funções lineares da LEC foram  $\Gamma=1,97$  e  $\lambda=-0,05$ . Os resultados de  $N$ ,  $\lambda$  e  $\kappa$  das LICs são apresentados na Tabela 3. Constata-se que existem diversas linhas de consolidação isotrópica (LIC) para a correspondente linha de estado crítico (LEC) e que elas não são paralelas entre si, apresentando diferentes valores de  $\lambda$ . Foi determinado parâmetro

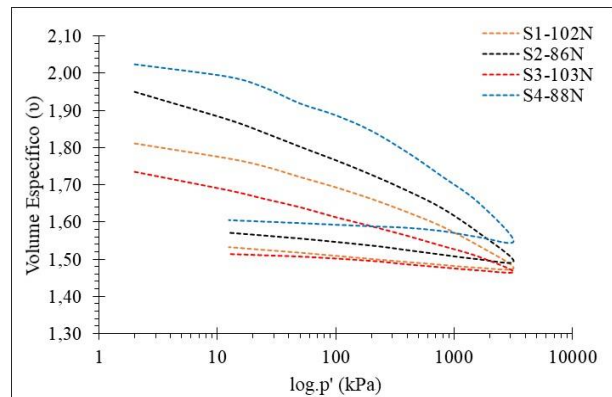
de inclinação ( $\lambda$ ) da LEC de -0,05 enquanto os parâmetros de inclinação ( $\lambda$ ) das LICs variam entre -0,016 e -0,033.

Tabela 3. Parâmetros do ensaio de Adensamento Unidimensional e correlação com os parâmetros de Compressão Isotrópica.

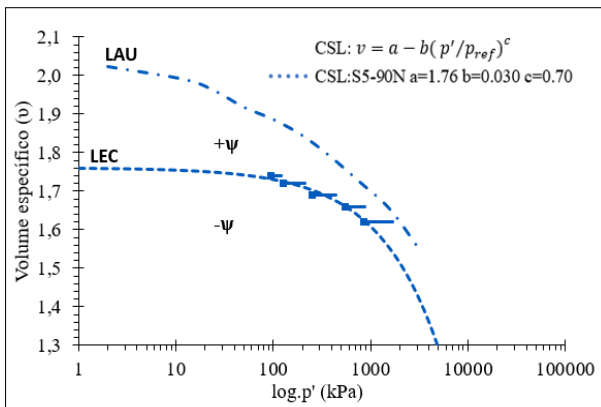
ID	Compressão Oedométrica		Compressão Isotrópica		
	Cc	Cs	N	$\lambda$	$\kappa$
S1-102N	-0,045	-0,011	1,88	-0,020	-0,005
S2-86N	-0,060	-0,015	2,06	-0,026	-0,007
S3-103N	-0,036	-0,009	1,78	-0,016	-0,004
S4-88N	-0,077	-0,010	2,22	-0,033	-0,004



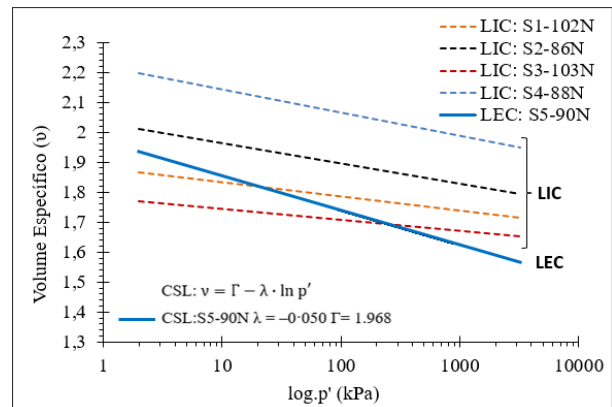
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. a) trajetória de tensões efetivas das amostras S5-90N; b) curvas de adensamento unidimensional; c) linha de estado crítico (LEC) e linha de adensamento unidimensional (LAU); e d) linha de estado crítico (LEC) e linhas de consolidação isotrópica (LIC).

#### 4 CONSIDERAÇÕES

Foi analisado neste estudo o comportamento geomecânico de um rejeito de mineração de ouro quando submetido a um cisalhamento por compressão triaxial não drenado saturado (CIUsat) e adensamento unidimensional. Para tanto, foram avaliadas no cisalhamento a geração de poropressões, resistência e comportamento no estado crítico. Ensaio de caracterização geotécnica e mineralogia foram realizados para indicar as principais características do rejeito de mineração de ouro.

Os resultados de caracterização geotécnica evidenciam que o rejeito de mineração de ouro estudado possui características compatíveis a outros rejeitos de ouro apresentados na literatura. O material é classificado como silto arenoso com pouca parcela de argila e não-plástico. A condutividade hidráulica foi determinada

como  $1,7 \times 10^{-9}$  m/s, valor típico de rejeitos de mineração com granulometria fina e não plásticos. Para a compactação normal foi definido peso específico seco máximo de  $1,74 \text{ kN/m}^3$  e teor de umidade ótimo de 17,8%. Com relação a mineralogia o rejeito apresentou predominância de Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), 37,98%, em conformidade com a caracterização de rejeitos de ouro por outros autores.

A avaliação mecânica quanto a esforços de compressão triaxial e consequente geração de poropressões ( $\Delta u$ ) e tensão desvio ( $q$ ) em função da deformação axial ( $\epsilon_a$ ) indicaram comportamento similar a geomateriais e solos com granulometria semelhante. A resistência ao cisalhamento do material é maior quanto maior a tensão confinante aplicada. Em geral, as amostras apresentaram pequena redução de resistência após a falha (máxima tensão desviadora). Para todos os níveis de tensão confinante, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, as amostras apresentaram geração de poropressão positiva, i.e., comportamento contrátil.

Em relação ao comportamento no estado crítico percebe-se que os resultados no diagrama volume específico ( $v$ ) em função do logarítmico da tensão efetiva média ( $\log.p'$ ) ajustaram-se bem a equação exponencial curvilínea e linear, para os níveis de tensão confinante estudados. Quanto a avaliação conjunta da Linha no Estado Crítico (LEC) e das Linhas de Consolidação Isotrópica (LIC), definidas para diferentes estados de consolidação inicial (86%, 88%, 102% e 103%), conclui-se que existem diversas LICs não paralelas entre si e entre a LEC. A variabilidade das LICs é diretamente relacionada com a consolidação inicial das amostras. Além disso, verifica-se que a inclinação da LEC é superior a inclinação das LICs. Este comportamento assemelha-se a definição proposta por Robertson (2017) para materiais arenosos. Neste sentido, conclui-se que, embora o rejeito de ouro de estudo tenha predominância de partículas siltosas a parcela arenosa pode estar condicionando o comportamento do material no cisalhamento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC-UFRGS), ao laboratório da Diefra e ao Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials (2017). ASTM. D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes* (Unified Soil Classification System). ASTM. [S.l.].
- American Society for Testing and Materials (2020). ASTM. D4767: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. ASTM. [S.l.].
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). NBR 12.004. *Solo-Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. ABNT. Rio de Janeiro, p. 6.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 14.545. *Solo-Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável*. ABNT. Rio de Janeiro - RJ, p. 16.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16.853. *Solo-Ensaio de adensamento unidimensional*. ABNT. Rio de Janeiro, p. 16.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo-Determinação do limite de liquidez*. ABNT. Rio de Janeiro - RJ, p. 5.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6508. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. ABNT. Rio de Janeiro - RJ, p. 8.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo-Determinação do limite de plasticidade*. ABNT. Rio de Janeiro - RJ, p. 3.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo-Análise Granulométrica*. ABNT. Rio de Janeiro - RJ, p. 12.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 7182. *Solo-Ensaio de compactação*. ABNT. Rio de Janeiro - RJ, p. 9.

- Bedin, J. (2010) *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 205.
- Crystal, C., Hore, C., Ezama, i. (2018) Filter-Pressed Dry Stacking: Design Considerations Based on Practical Experience. Tailings and Mine Waste. *Geotechnical Engineering*. Keystone, Colorado, USA, p. 209-219.
- Festugato, L. (2011) *Comportamento de Hidratação e Resposta Cisalhante Cíclica de Resíduo de Mineração Cimentado Reforçado com Fibras*. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Galvão-Sobrinho, A. R. V. (2014) *Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: estudo de caso*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, Rio Grande do Norte, p. 134.
- Hoch, B.Z. (2022) *Comportamento Geomecânico de Rejeito de Mineração de Ouro Submetido a uma Ampla Faixa de Tensões de Confinamento sob Carregamento Monotônico e Cíclico*. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 220.
- Jefferies, M., Been, K. (2016) *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*. Second Edition. Taylor & Francis Group, LLC. [S.l.].
- Lebron, C.A.X.S. (2023) *Propriedades Físicas e Geomecânicas à Luz do Estado Crítico de um Rejeito de Ouro*. Dissertação de Mestrado - Universidade de Coimbra. Coimbra, p. 128.
- Li, W., Coop, M. R. (2018) Mechanical Behaviour of Panzhihua Iron Tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 56, n. 3, p. 420-435.
- Melo, L.R. (2013) *Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da Barragem Tico-Tico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG.
- Portes, A. M. C. (2013) *Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, p. 154.
- Robertson P. K. (2017) *Evaluation of Flow Liquefaction: influence of high stresses*. Conference: PBDIII, Vancouver, BC, Canada. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/318682041>>.
- Schnaid, F.; Bedin, J.; Viana da Fonseca, A.J.P., Costa Filho, L.M. (2013) Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 139, n. 12, p. 2136-2144.
- Schofield, A.; Wroth, P. (1986) *Critical State Soil Mechanics*. Cambridge: McGRAW-HILL Book Company. Cambridge.
- Ulrich, B., Kerr, T. (2011) High-density tailings, paste and filtered tailings. *Mining Engineering*, v. 63, n. 11, p. 66-70.
- Verdugo, R. (1992) *Characterization of sandy soil behavior under large deformation*. Ph.D. thesis, University of Tokyo. [S.l.].
- Verdugo R.; Ishihara K. (1996) The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations*, v. 36, n.2, p. 81-91.