

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudos comparativos de ensaios triaxiais executados na FEUP e na UFMG para determinação de linhas de estados críticos em rejeitos de ferro.

Danilo Manata Eloi

Gerente de Geotécnia, Diefra Engenharia e Consultoria, Belo Horizonte, Brasil, manataeloi@gmail.com

António Joaquim Pereira Viana da Fonseca

Professor Doutor, FEUP, Porto, Portugal, viana@fe.up.pt

Diana Cordeiro

Técnica de Laboratório, FEUP, Porto, Portugal, ec12020@fe.up.pt

Antônio Ananias de Mendonça

Professor Mestre, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, aanias@ufmg.br

Fausto Andrés Molina Gómez

Doutorando, FEUP, Porto, Portugal, faustoandres.molina@gmail.com

RESUMO: O processo para determinação da linha de estado crítico (LEC) de um solo, e o seu uso como referência para avaliação da susceptibilidade à liquefação, vem ganhando destaque, em detrimento de abordagens empíricas e menos rigorosas. Sendo este um estudo comparativo entre resultados obtidos nos laboratórios de geotecnia da FEUP e da EE/UFMG, procurou-se, através deste trabalho, fazer uma análise comparativa dos equipamentos, métodos e processos, conduzidos nestes laboratórios, visando assim explicar a obtenção de resultados diferenciados nos ensaios de caracterização e de resistência e, consequentes distintas linhas de estado crítico (LEC) obtidas para um mesmo rejeito de mineração proveniente da região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Este trabalho visa identificar possíveis fatores que explicam tais diferenças, como a utilização de bases lubrificadas e topos guiados no laboratório da FEUP, e suas influências nos resultados finais dos ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: ensaios triaxiais, linha de estados críticos, mineração, rejeitos de mineração

ABSTRACT: The process for determining the critical state line (LEC) of a soil, and its use as a reference for assessing the susceptibility to liquefaction, has gained prominence, in detriment of empirical and less rigorous approaches. As this is a comparative study between results obtained in the geotechnical laboratories of FEUP and EE/UFMG, through in this work, sought to make a comparative analysis of the equipments, methods and processes carried out in these laboratories, in order to explain the differentiated results obtained in the characterization and resistance tests and, consequently, distinct critical state lines obtained for the same mining tailings from the region of the Iron Quadrangle of Minas Gerais. This work objective to identify possible factors that explain such differences, as the use of lubricated bases and guided tops in the FEUP laboratory, and their influence on the final results of the tests.

KEYWORDS: triaxial trials, critical state line, mining, tailings

1 Introdução

Quando um solo está em uma condição aonde o cisalhamento continua ocorrendo mesmo sem variação de volume ou de tensões efetivas, estabelece-se que este solo está em sua condição de estado crítico (Atkinson e Bransby 1978).

Casagrande (1936) foi o primeiro a estudar sobre a resistência ao cisalhamento de solos. Em seus estudos, ao realizar ensaios triaxiais drenados com tensões controladas em diversas amostras de areias



inicialmente soltas e densas, percebeu que aqueles corpos de prova testados com a mesma pressão de confinamento efetiva se aproximaram da mesma densidade quando cisalhados em grandes deformações. Ele também percebeu que esses continuaram a cisalhar com resistência ao cisalhamento constante mesmo sem variações da densidade e que todos os materiais, amostras densas e soltas, tinham o mesmo índice de vazios que foi denominado índice de vazios crítico conforme demonstrado na figura 1 (Kramer, 1996).

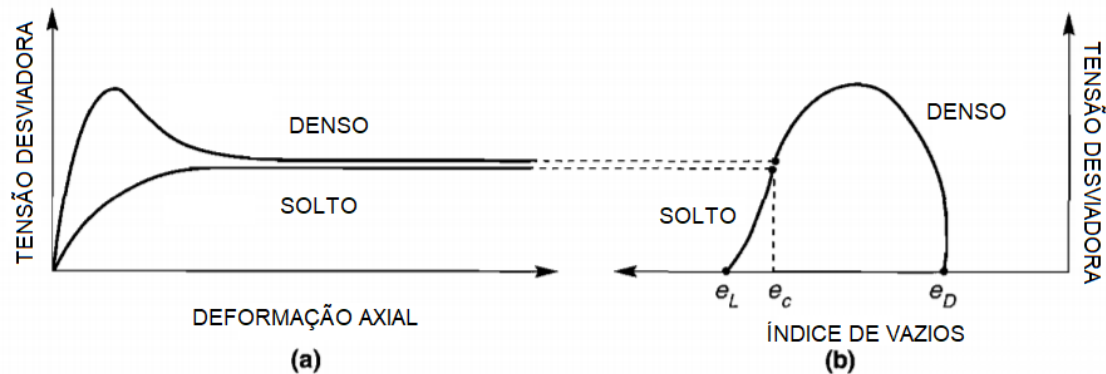


Figura 1 – (a) gráfico Tensão x deformação (b) gráfico Tensão x índice de vazios para amostras soltas e densas de areia (Kramer, 1996).

Executando ensaios em diferentes pressões efetivas de confinamento, Casagrande (1936) determinou que o índice de vazios crítico relacionava exclusivamente com a pressão efetiva de confinamento, determinando assim a linha de estado crítico (Figura 2) onde essa delimita a fronteira entre os estados solto, que contrai, e denso, que dilata (Kramer, 1996).

Num gráfico, o espaço geométrico que congrega os pontos em que se correlacionam as tensões e o índice de vazios crítico é chamado de linha de estados críticos (Junior et al., 2019).



Figura 2 – Linha de vazios crítica delimitando o estado denso e o solto (Kramer, 1996).

Segundo Viana da Fonseca (2013) a abordagem com base no parâmetro de estado (Ψ) para problemas geotécnicos vem sendo aplicada com sucesso no estudo dos carregamentos cíclicos e monotônicos.

A relação desses dois fenômenos é pouco compreendida, entretanto percebe-se que ambos se baseiam na compressibilidade dos materiais geotécnicos, sendo que este fator relaciona-se com a posição do índice de vazios de repouso e a correspondente da linha de estados críticos para o mesmo estado de tensão efetiva. (Viana da Fonseca, 2013).



2 Metodologias e resultados

O rejeito utilizado nesse estudo provém de uma barragem que se situa na região do quadrilátero ferrífero no estado de Minas Gerais, Brasil. Os minérios de ferro dessa região são em grande maioria os itabiritos (Rocha, 2008).

Por ser um trabalho envolvendo dois laboratórios, o laboratório de geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LabGeo/ FEUP) e o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais (LabGeo-DETG/EEUFMG), executou-se os mesmos ensaios em ambos, ressaltando as diferenças entre as normas aplicadas em cada laboratório e os equipamentos utilizados.

2.1 Ensaios de caracterização granulométrica

A análise granulométrica executada na FEUP, seguiu a especificação E 196 – 1966 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Por sua vez, a análise granulométrica executada na EE/UFMG, seguiu as especificações das Normas Brasileira Regulamentadoras (NBRs) 7181 e 6457 da Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Comparando os resultados obtidos da FEUP e da EE/UFMG, percebe-se que a curva granulométrica da EE/UFMG obteve um maior percentual de partículas muito finas (argilas) e um percentual menor de material arenoso, considerando assim que houve nesse caso uma maior dispersão das partículas do solo devido a uma maior atuação do defloculante quando comparado ao ensaio da FEUP. A Figura 3 mostra as duas curvas granulométricas no mesmo gráfico.

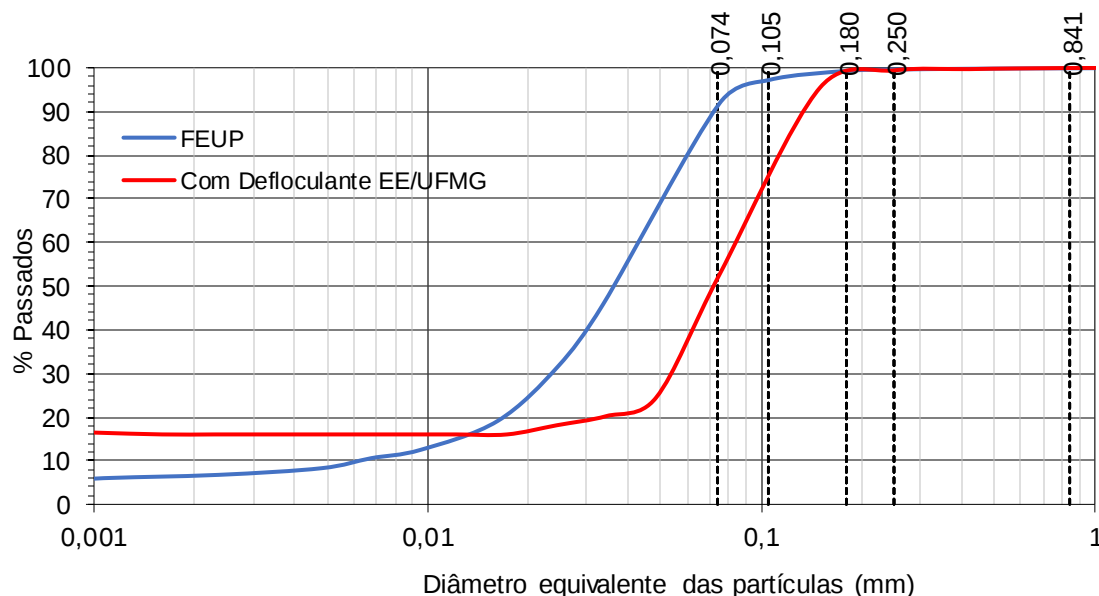


Figura 3 – Curvas granulométricas obtidas na FEUP e na EE/UFMG em ensaios com defloculante

2.2 Ensaios de massa específica

A determinação da massa específica relativa (densidade) do solo executada na FEUP, seguiu as especificações da Norma Portuguesa (NP – 83), e a determinação da massa específica relativa (densidade) do solo executada na EE/UFMG, seguiu as especificações da NBR - 6508 da ABNT.

O ensaio de massa específica feito na FEUP encontrou um valor de 4,548 e o ensaio executado na EE/UFMG encontrou um valor de 4,55; percebendo assim a convergência nos resultados deste ensaio.

2.3 Ensaios de limites de liquidez e plasticidade



Na execução dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foi verificado que os rejeitos são materiais não plásticos, corroborando assim com os estudos conduzidos por Vick (1983).

2.4 Ensaios de resistência

Executaram-se ensaios triaxiais em condições controladas para a determinação dos parâmetros de resistência desse material. Foram executados ensaios drenados aonde determinaram-se as variações dos índices de vazio ao longo do cisalhamento, visando a determinação da linha de estados críticos do rejeito.

Tanto na FEUP, como na EE/UFGM, os ensaios foram executados isotropicamente com as tensões de consolidação de 100, 200 e 400 kPa.

Em ambos os laboratórios foram executadas as moldagens dos corpos de prova com as técnicas de moist tamping, ou compactação ligeira em condições pouco úmidas, e under compaction, aonde aumenta-se progressivamente o peso de cada camada durante a moldagem.

Nos ensaios executados na FEUP as dimensões dos moldes foram de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura. A utilização de bases e topos lubrificadas, conforme a figura 4, objetivaram a redução dos efeitos do atrito nas extremidades. A base lubrificada consiste em dois discos de membrana látex, com uma fina camada de graxa de silicone prensada entre eles. As lâminas lubrificadas evitam o pressionar das partículas do solo nas extremidades e assim reduzem os atritos. Tal implemento permite que os corpos de prova deformem uniformemente durante o cisalhamento, pois o diâmetro dessas bases são ligeiramente maiores que o diâmetro da amostra, podendo assim acompanhar a sua deformação radial (Eloi, 2021).

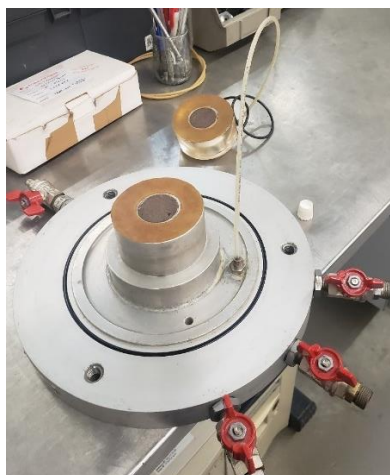


Figura 4 – Base lubrificada da FEUP (Eloi, 2021).

Outro diferencial dos ensaios na FEUP é a utilização de blocos de topo do tipo guiados. Esses blocos reduzem as diferenças de inclinações durante o cisalhamento da amostra, permitindo deformações maiores e uniformes, reduzindo a possibilidade da ocorrência de superfícies de rotura direcionadas. Os topos guiados permitem também que ocorram variações volumétricas mais homogêneas, sendo essa importante na melhora das aferições das LEC (Eloi, 2021).

Nos ensaios da EE/UFGM os corpos de prova tinham 50 mm de diâmetro e 110 mm de altura. Neste laboratório não se utilizaram bases lubrificadas e topos guiados.

Outras diferenças entre os ensaios nestes laboratórios foram a utilização de dióxido de carbono (CO_2) nos ensaios da FEUP para acelerar e aumentar a saturação; as velocidades de corte, sendo de 0,025 mm/min na FEUP e de 0,050 mm/min na EE/UFGM; e a utilização do congelamento final da amostra na FEUP, para determinação do índice de vazios

As tabelas 1 e 2 demonstram as condições dos corpos de prova após a moldagem (A), após a consolidação (B) e após a conclusão dos cisalhamentos (C) nos dois laboratórios e para as diferentes tensões.



Tabela 1 – Resumo das condições iniciais dos corpos de prova para cada fase dos ensaios triaxiais na FEUP.

Tensão Efectiva	Fase	Diâmetro	Altura	Peso Húmido do Provete	Peso Seco do Provete	Teor de Água	Peso Volumico seco	Índice de Vazios
σ'_c (kPa)		D (mm)	H (mm)	W (g)	W_d (g)	w (%)	γ_d (kg/m ³)	e
100	A	71,22	143,68	1227,21	1146,28	7,1	19,6	1,27
	B	67,56	136,83	1384,48	1145,88	20,8	22,9	0,95
	C	77,65	97,83	1357,20	1145,88	18,4	24,3	0,84
200	A	71,55	143,55	1227,21	1139,99	7,7	19,4	1,30
	B	67,44	135,96	1373,15	1137,57	20,7	23,0	0,94
	C	76,40	99,40	1343,12	1137,57	18,1	24,5	0,82
400	A	70,87	144,09	1148,73	1095,83	4,8	18,9	1,36
	B	65,78	134,76	1312,97	1095,94	19,8	23,5	0,90
	C	74,69	98,24	1285,44	1095,94	17,3	25,0	0,79

Tabela 2 – Resumo das condições iniciais dos corpos de prova para cada fase dos ensaios triaxiais na EE/UFG.

Tensão Efectiva	Fase	Diâmetro	Altura	Peso Húmido do Provete	Peso Seco do Provete	Teor de Água	Peso Volumico seco	Índice de Vazios
σ'_c (kPa)		D (mm)	H (mm)	W (g)	W_d (g)	w (%)	γ_d (kg/m ³)	e
100	A	53,00	110,00	562,91	532,05	5,8	21,5	1,20
	B	50,36	105,06	606,42	501,36	21,0	23,5	0,95
	C	55,64	83,06	599,12	501,36	19,5	24,4	0,88
200	A	53,00	110,00	561,31	532,05	5,5	21,5	1,20
	B	49,20	104,20	603,36	502,25	20,1	24,9	0,92
	C	54,16	82,20	594,66	502,25	18,5	26,0	0,84
400	A	53,00	110,00	562,38	532,05	5,7	21,5	1,20
	B	48,60	103,50	601,78	505,35	19,1	25,8	0,87
	C	53,54	81,50	593,28	505,35	17,4	27,0	0,79

Com os resultados, foram determinadas as linhas de estados críticos de cada laboratório e plotadas no gráfico $p' \times e$ da figura 5.

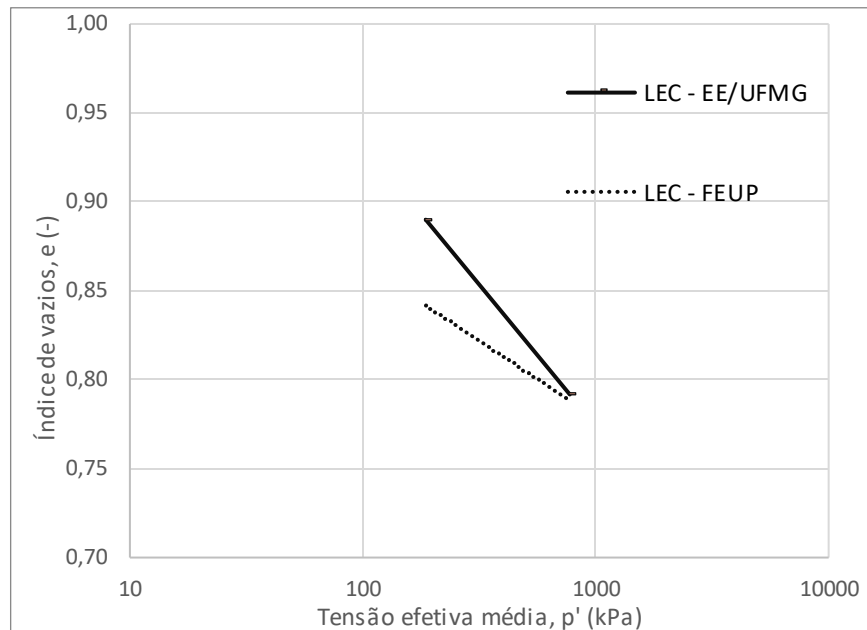


Figura 5 – LEC no plano p' x e, FEUP e EE/UFMG.

Percebe-se que as linhas apresentaram uma tendência de proximidade nos ensaios sob maiores tensões (400 kPa), devido aos valores dos índices de vazios ao final dos ensaios estarem mais próximos. Nos ensaios sob as tensões de 100 kPa e 200 kPa, verifica-se um afastamento entre as LEC, sendo essa diferença explicada, em parte, pelos diferentes índices de vazios finais dos ensaios. Esse afastamento das linhas pode ser explicado pelo fato de que sob as menores tensões os provetes da EE/UFMG, por não possuírem bases lubrificadas e topos guiados, geraram planos de fratura mais notórios. As dimensões reduzidas dos provete nesse laboratório também acentuam os erros no ensaio. Por fim, outro fator influenciador pode ser a maior espessura das membranas utilizadas no laboratório da EE/UFMG que acabam por restringirem mais os provetes e assim alteram as tensões nos mesmos.

Nos gráficos p' x q verifica-se o valor do rácio de tensões no estado crítico (M) para as LEC de cada laboratório. O valor da FEUP é de aproximadamente 1,40 e da EE/UFMG cerca de 1,45 conforme pode-se verificar nas figuras 6 e 7. Com esses valores, definiu-se os ângulos de atrito críticos (ϕ_c) para os ensaios da FEUP de 34,58° e para os da EE/UFMG de 35,72°, valores obtidos com recurso a equação [1], estando estes associados aos planos de corte nos ensaios.

$$M = \frac{6 \times \sin \phi_c}{3 - \sin \phi_c} \quad [1]$$

Analisando as linhas de estados críticos obtidas nos gráficos p' x q da FEUP e da EE/UFMG nas figuras 6 e 7, percebe-se uma diferença entre elas, conforme as equações das retas, corroborando a diferença entre as LEC de cada laboratório obtidas no plano p' x e demonstrado na figura 5

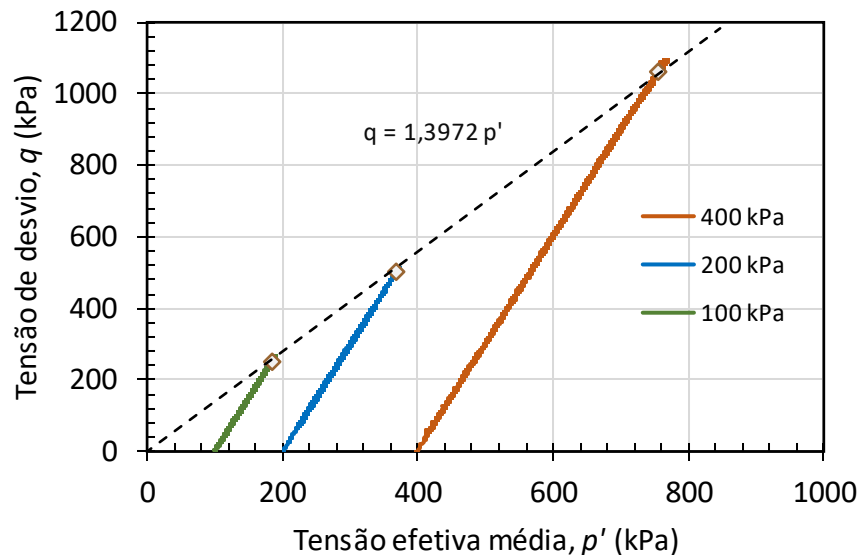


Figura 6 – Gráfico $p' \times q$ da FEUP.

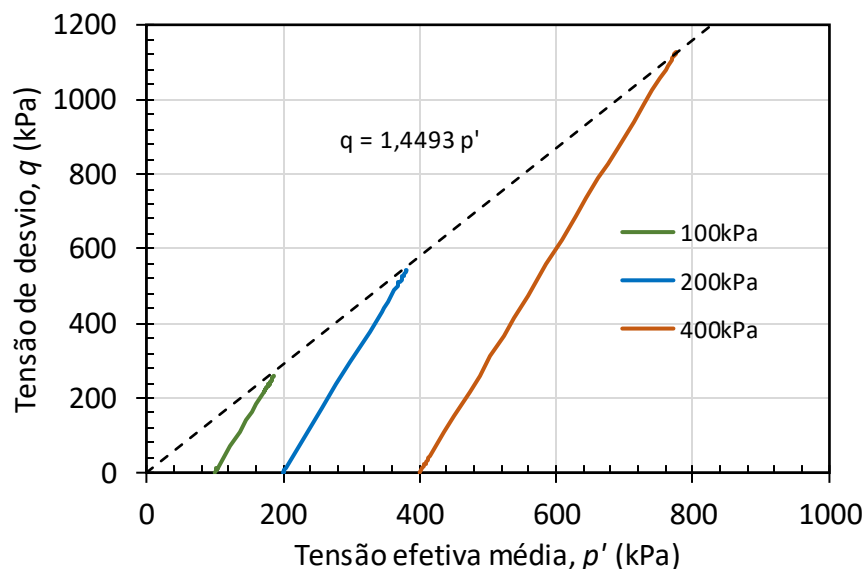


Figura 7 – Gráfico $p' \times q$ da EE/UFGM.

3 Conclusões

Nos dois laboratórios chegou-se a mesma conclusão de que o rejeito estudado é não plástico, mas com curvas granulométricas distintas, diferenciando-se manifestamente na parcela que distingue a parte siltosa da arenosa. Na caracterização granulométrica da FEUP, o material foi classificado como um silte, segundo as normas ASTM, e na curva da EE/UFGM, seguindo as normas ABNT, o mesmo foi classificado como um silte com areia a silte arenoso, estando na interseção das duas classes. A explicação para esta diferença está na forma como as normas direcionam a utilização do defloculante.

Ainda nos ensaios de caracterização, percebe-se que a massa específica das partículas sólidas, determinada em ambos os laboratórios, ficaram próximas, sendo o valor de aproximadamente 4,55.

A resistência última do rejeito foi definida através de ensaios triaxiais executados em cada laboratório, tendo sido estimadas as linhas de estados críticos seguindo procedimentos específicos da FEUP e da EE/UFGM.



A posição mais elevada da LEC obtida na EE/UFGM quando comparada a LEC da FEUP, ou seja, o valor mais elevado do índice de vazios para a tensão efetiva isotrópica padrão, irá gerar resultados de análises de estabilidade de estruturas diferentes se comparados aos resultados obtidos na FEUP.

Determinou-se no gráfico $p' \times q$ o valor correspondente ao ângulo de resistência ao cisalhamento no estado crítico desse rejeito em cada laboratório, sendo obtido um valor de $34,6^\circ$ na FEUP e de $35,7^\circ$ na EE/UFGM. Percebeu-se então um maior diferencial nesse parâmetro de caracterização das linhas de estados críticos, que podem ser marginalmente explicados pelos diferentes índices de vazios da moldagem dos corpos de prova, mas acima de tudo, devido aos procedimentos subsidiários diferenciados, tais como: a ausência de bases lubrificadas, a ausência de topos guiados, as diferenças entre as dimensões dos provetes e a não utilização de congelamento final para determinação do índice de vazios na EE/UFGM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, J. H., Bransby (1978) *An introduction to critical state soil mechanics*. U.K.
- Casagrande, A. (1936). "Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills," *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, reprinted in *Contributions to Soil Mechanics*, Boston Society of Civil Engineers, 1940, pp.257-276.
- Eloi, M. D. (2021). Ensaios triaxiais com procedimentos convencionais e avançados para avaliação de estados crítico em rejeitos de ferro. Tese de mestrado. Universidade do Porto.
- Junior, M. P. S.; Brandão, H. A.; Galhardo, G.M.; Teixeira, G.L.; Análise da susceptibilidade à liquefação estática por meio de ensaios de campo e de laboratório. In: *Acervo do XXXII Seminário Nacional de Grande Barragens*, Salvador-BA, 2019.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Rocha, J. M. Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. - Minas Gerais [tese de doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2008.
- Viana da Fonseca, A (2013) Liquefação de solos à luz da mecânica aplicada. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia* 128, julho de 2013, p. 3-35.
- Vick, S. G. (1983). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Wiley.
- LNEC E 196 1966 - Análise Granulométrica
- NBR – 6457 – Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
- NBR – 6508 – Solo – Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica
- NBR – 7181 – Solo – Análise Granulométrica
- NP – 83 – 65 Solos – Determinação da Densidade das Partículas