

“Avaliação da Variabilidade da Linha de Estados Críticos de Rejeitos de Minério de Ouro em Distintas Fases de Deposição e Preparação em Laboratório”

António Viana da Fonseca

CONSTRUCT-GEO, Fac. Eng^a (FEUP), Univ. Porto, Portugal, viana@fe.up.pt

Marisa Soares

CONSTRUCT-GEO, Fac. Eng^a (FEUP), Univ. Porto, Portugal, smarisaesoares@gmail.com

Catarina Ramos

CONSTRUCT-GEO, Fac. Eng^a (FEUP), Univ. Porto, Portugal, catarinacorreiamos@gmail.com

Daniela Coelho

CONSTRUCT-GEO, Fac. Eng^a (FEUP), Univ. Porto, Portugal, danielac@fe.up.pt

Janine Rodrigues Figueiredo

CONSTRUCT-GEO, Fac. Eng^a (FEUP), Univ. Porto, Portugal, janinefigueiredo_minas@yahoo.com.br

Li Wei

City University of Hong Kong, Hong Kong, China, liwei890508@126.com

RESUMO: O acréscimo significativo da quantidade de minério explorado e o volume de resíduos produzidos no seu beneficiamento levam a um aumento da área requerida para a disposição desses rejeitos. Os rejeitos são geralmente armazenados em barragens através de métodos construtivos em que é exigida uma constante verificação de sua estabilidade, sendo os materiais depositados por flutuação particularmente sensíveis à perda total de resistência por liquefação. A falta ou a incorreta definição da condição de estados limites que rege a interpretação à luz da Teoria do Estado Crítico (TEC), resulta frequentemente em acidentes catastróficos. A variabilidade dos materiais rejeitados em fases distintas da vida útil da exploração têm como consequência comportamentos mecânicos singulares e distintivos. Por isso, os estados limites de referência (como a Linha dos Estados Críticos, LEC) têm que ser avaliados ao longo da vida do empreendimento e os ensaios que os determinam devem ser conduzidos em condições controladas de laboratório com métodos adequados de preparação das amostras que representem melhor as condições de deposição in situ. Neste trabalho são apresentados ensaios realizados com o objetivo de verificar como os métodos de preparação e a essa variabilidade dos rejeitos depositados em barragens ao longo de sua operação influem na forma e posição da LEC. O material utilizado é um rejeito de ouro de uma mineração brasileira, associando uma proveniência de material tipologicamente distinta e formas de preparação diversas. Os ensaios incluem identificação física e ensaios de compressibilidade em condições confinadas, bem como de compressão em células triaxiais. Com os resultados obtidos verificam-se variabilidades significativas da LEC nos materiais estudados decorrentes de distintos tempos de deposição na barragem. É também analisada a influência do tipo de preparação das amostras no comportamento geomecânico acima referido.

PALAVRAS-CHAVE: barragem de rejeito, instabilidade por liquefação, parâmetro de estado, linha de estados críticos.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade essencial à economia e desenvolvimento de um país com recursos minerais. Associada a esta atividade está uma produção de grandes quantidades de rejeitos que exigem tratamento e são geralmente depositados e armazenados em barragens, em que o próprio rejeito funciona como elemento construtivo.

A rota de beneficiamento de uma indústria de mineração é determinada pelas características do minério explorado do maciço rochoso e por exigências de projeto. O rejeito, produto do beneficiamento, resulta de uma sucessão de processos físicos e químicos que decorrem da exploração mineira e que envolvem peneiração, britagem, moagem, deslamagem, flotação em colunas e, mais recentemente, espessamento. Ao longo do tempo, as características do rejeito variam conforme a mineralogia, granulometria ou composição química do minério a ser tratado. No decorrer das diversas fases de operação, o material disposto em barragens apresenta uma variabilidade em relação aos seus parâmetros geotécnicos, o que influencia diretamente o seu comportamento geomecânico e a própria estabilidade dos depósitos. A quantidade de sólidos contida nos resíduos, a forma de deposição e as condições de drenagem local são fatores condicionantes no comportamento do material depositado (Valenzuela, 2015).

Os rejeitados, quando depositados em superfície em barragens ou diques, podem ficar sujeitos a um risco de rotura por liquefação. Essa rotura pode ser provocada por eventos cíclicos/dinâmicos ou por aumento rápido da sobrecarga do depósito (Viana da Fonseca, 2012, Bedin, et al., 2012, Schnaid et al., 2015). A liquefação ocorre quando um solo saturado, ou quasi-saturado, sofre uma perda de resistência por incrementos de poro-pressões, gerados por cargas transientes ou rápida mudança de estado de tensão, comportando-se como um líquido.

No caso das barragens de rejeito, estas podem estar sujeitas ao fenómeno de liquefação por sobrecarga do depósito. O controlo da sua estabilidade pode ser feito com o conhecimento

da posição relativa da compacidade (índice de vazios) e do estado de tensão dos materiais depositados *in situ* em relação aos estados últimos, que são materializados pela linha de estados críticos cuja determinação é crucial.

A avaliação do potencial de liquefação do solo, através de ensaios em laboratório que representam as condições *in situ*, foi iniciada por Casagrande (1936). Segundo o autor, os estados últimos ou críticos podem ser identificados por uma linha que tem expressão no espaço de tensões de desvio (q) versus tensão média efetiva (p') e no espaço de índice de vazios (e) versus este último estado de tensão. Materiais que se posicionam próximo desta linha (ou superfície, se a representação for feita em três eixos – ver Jefferies and Been, 2016) têm comportamento de resistência exclusivamente atrítica e rompem a volume constante. Solos com estados acima da LEC no espaço e - p' (soltos) são compressíveis e abaixo dilatantes (compactos ou densos). Em condições não drenadas alguns materiais liquidificáveis, poderão comprimir de forma agravada, instabilizando-se de forma abrupta.

O limite entre os solos suscetíveis ou não à liquefação, que não é exclusivo de condições de estado acima da LEC é então crucial e incide particularmente em estados de tensão efetiva moderados. Na Figura 1 (Carrera et al., 2011) e na Figura 2 (Bedin et al. 2012).

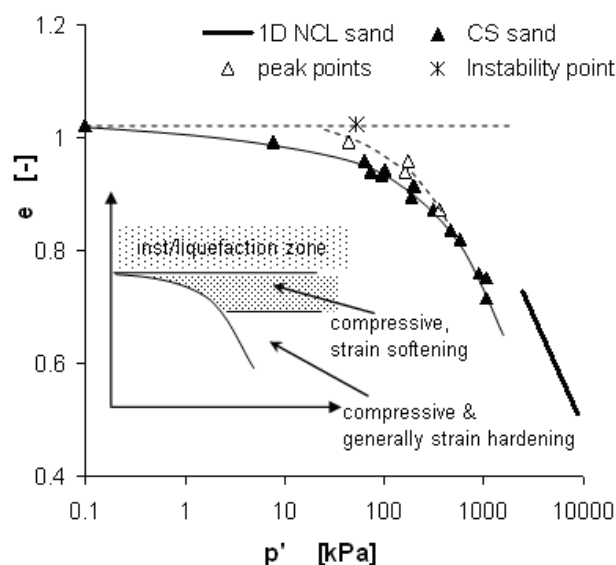


Figura 1. Variação do comportamento em liquefação como estado inicial de uma areia limpa da barragem de Stava (Carrera et al. 2011).

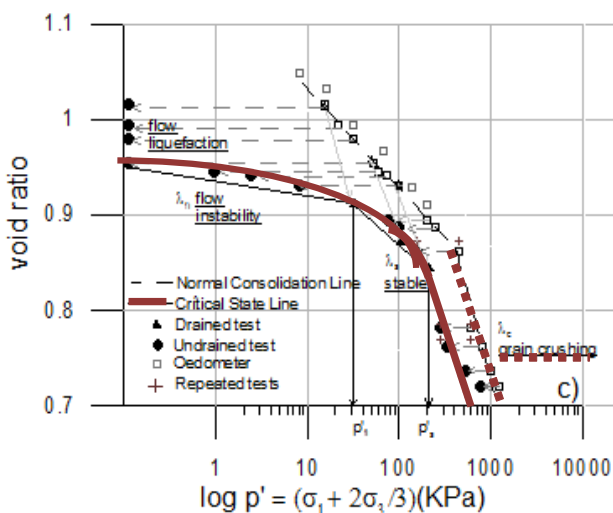


Figura 2. Aplicação dos mecanismos da Mecânica dos Solo de Estados Críticos para avaliação de liquefação por fluxo, em condições de LEC curvas (Bedin et al. 2012).

O material estudado no presente trabalho é proveniente de uma hidrometalúrgica do Complexo industrial Mineração Usina Fazenda Brasileiro, na cidade de Teofilândia (Bahia). A mina de ouro está sobre um “greenstone belt” constituído por rochas vulcano-sedimentares com baixo grau de metamorfismo. O resíduo produzido no processo de beneficiamento do minério de ouro tem como constituintes principais os minerais de quartzo, albita, clorita e sulfetados (Bedin, 2010).

O rejeito underflow do ouro (o material que contém uma proporção significativamente maior de partículas grossas) depositado na barragem foi objeto de estudos anteriores (Bedin, 2010; Bedin et al., 2012; Soares, 2014), que procuraram definir a linha de estados críticos clássica a partir de ensaios triaxiais em condições drenadas e não drenadas, de modo a estudar metodologias reacionais de avaliação de liquificabilidade e propor novas abordagens de avaliação dos riscos de rotura em barragens de rejeito. O presente trabalho complementa esses estudos e compara as linhas de estado crítico obtidas para diferentes tempos de deposição na barragem.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para estudar o comportamento destes materiais foram realizados ensaios de identificação física, ensaios de compressibilidade sob condições

confinadas (ensaios edométricos) e ensaios de compressão triaxial. As amostras foram moldadas em laboratório, tentando representar da melhor maneira as condições in situ, e seguindo o procedimento descrito em Soares e Viana da Fonseca (2016). O material utilizado foi o mesmo resíduo do ouro que Soares (2014) estudou, recolhido numa fase mais avançada de operação da barragem, distinto do primeiro resíduo do ouro estudado por Bedin (2010).

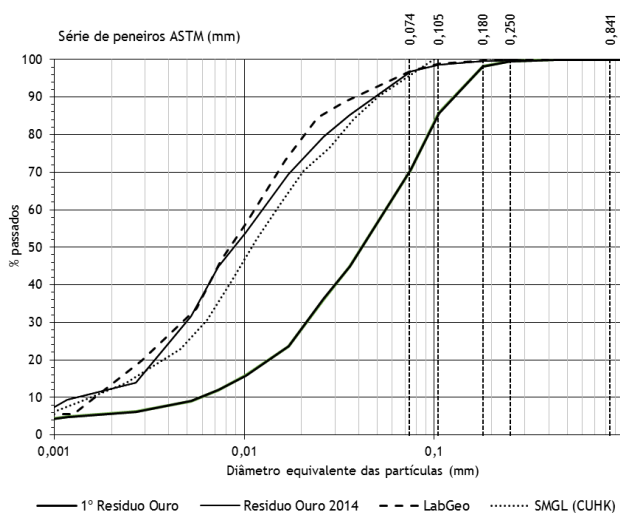
3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os parâmetros físicos que caracterizam o material do resíduo do ouro encontram-se na Tabela 1. Trata-se de um solo fino, siltoso e bem graduado.

Assim como, a curva granulométrica obtida que se apresenta na Figura 3, em conjunto com as curvas granulométricas obtidas estudos anteriores (Bedin, 2010 e Soares, 2014).

Tabela 1. Caracterização física do solo.

Solo		Rejeito do Ouro
γ_s (kN/m ³)		28.6
Distribuição granulométrica	Nº 20 (0.841mm)	100
	Nº 60 (0.250mm)	99.8
	Nº 200 (0.075mm)	97.0
C_c		7.06
C_u		1.23
$e_{\min}$		n.v.
$e_{\max}$		n.v.



As diferentes análises granulométricas permitem concluir que o material estudado neste trabalho possui uma granulometria mais fina que o primeiro resíduo do ouro retirado da barragem, o que confirma a diferença no tamanho das partículas dos materiais depositados ao longo de distintas fases de operação da mina e consequentemente do seu comportamento. As curvas obtidas no LabGeo da FEUP e no Soil Mechanics and Geology Laboratory, Department of Architecture and Civil Engineering da City University of Hong Kong (SMGL, CUHK) são bastante semelhantes, uma vez que foram realizadas em condições semelhantes. A pequena diferença observada pode ser explicada por terem sido realizadas por diferentes operadores, mesmo ambos tomando os devidos cuidados na preparação do material.

4 ENSAIOS DE COMPRESSIBILIDADE

Os ensaios de compressibilidade e consolidação tem o objetivo de estudar o comportamento do rejeito carregado em condições confinadas e impedido de experimentar deformações horizontais. A partir da deformação volumétrica experimentada pelo material para diferentes escalões de carga, obteve-se a curva de compressibilidade.

A preparação das amostras foi feita através da técnica de moist-tamping, com um teor em água de 11.5%, semelhante ao utilizado na moldagem das amostras para os ensaios triaxiais. Foram moldadas duas amostras com índice de vazios de 1.30 e 1.10.

Como se observa na Figura 4, as curvas de compressibilidade convergem para o mesmo ponto com o aumento das tensões aplicadas, não havendo evidência de que sejam materiais transicionais, ou seja, cujas LEC não convergem. Denotando sensibilidade à fábrica induzida na preparação/moldagem das amostras (corpos de prova).

Na Figura 5 encontram-se os resultados obtidos neste trabalho comparados com curvas de compressibilidade de ensaios realizados no mesmo material, mas em diferentes condições

de preparação da amostra. Os ensaios foram realizados no laboratório da City University of Hong Kong. Mais uma vez se comprova como os resultados convergem todos para altas tensões.

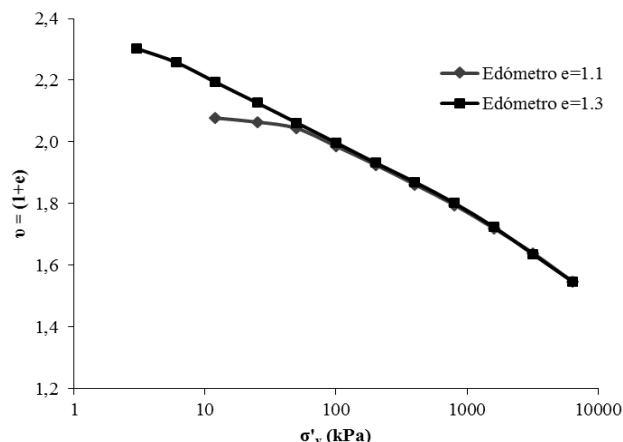


Figura 4. Ensaios Edométricos realizados (moist-tamping).

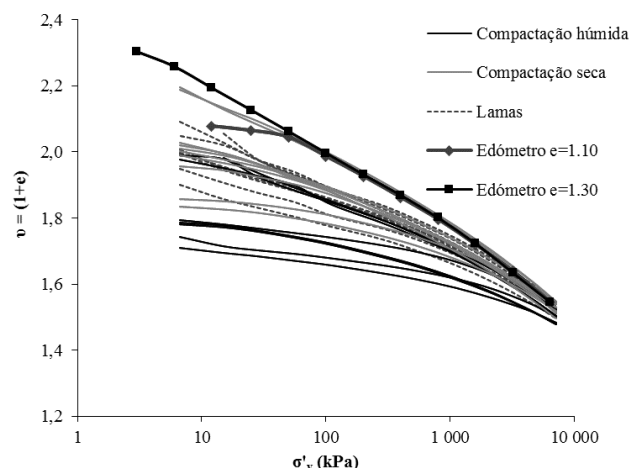


Figura 5. Comparação dos ensaios realizados no LabGeo e no SMGL (CUHK).

5 ENSAIOS TRIAXIAIS

Os ensaios de compressão triaxial estáticos com consolidação isotrópica ($K_0=1.0$) sob condições drenadas e não drenadas tiveram como objetivo o estudo do comportamento mecânico do resíduo do ouro. Os provetes foram moldados com a técnica de *moist-tamping* (Ishihara, 1996) com teor em água de 11.5% e dimensões aproximadas de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura. Realizaram-se três ensaios de

compressão triaxial, com diferentes tensões de confinamento.

As amostras foram saturadas até valores do parâmetro B de 0.99. O corte foi realizado com uma velocidade de deformação de 0.02mm/min, considerada adequada uma vez que a esta velocidade não havia geração de excessos de pressão neutra no extremo oposto ao da injeção da contra-pressão, pelo que a drenagem se mantinha (no caso dos ensaios drenados).

As características dos ensaios realizados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos ensaios triaxiais realizados.

Teste	v_i	p_i (kPa)	Tipo de Teste	
Tx1_CIU_700	1.78	700	Não drenado	Triaxial convencional com congelamento
Tx2_CID_400	1.81	400	Drenado	Triaxial convencional com congelamento
Tx6_CID_20	2.04	20	Drenado	Triaxial convencional com congelamento

Os primeiros estudos em material de resíduo do ouro foram realizados por Bedin (2010), que obteve resultados para diversas trajetórias de tensão.

Esses resultados foram reavaliados por Soares (2014), que repetiu os ensaios e utilizou a técnica de congelamento para corrigir o posicionamento da linha dos estados críticos.

O material utilizado nesses ensaios é diferente do utilizado no presente trabalho, uma vez que contém um menor teor de finos (partículas com diâmetro menor que 0.074mm) e densidade das partículas sólidas de 2.972. Na Figura 6 encontra-se a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com as curvas obtidas por Bedin (2010), Soares (2014) e Soares e Viana da Fonseca (2016). Na Figura 6, também se encontram as curvas de consolidação edométricas, obtidas nos ensaios apresentados anteriormente. Ambas se localizam acima das LEC e servem para ajudar a traçar a linha para mais altas tensões.

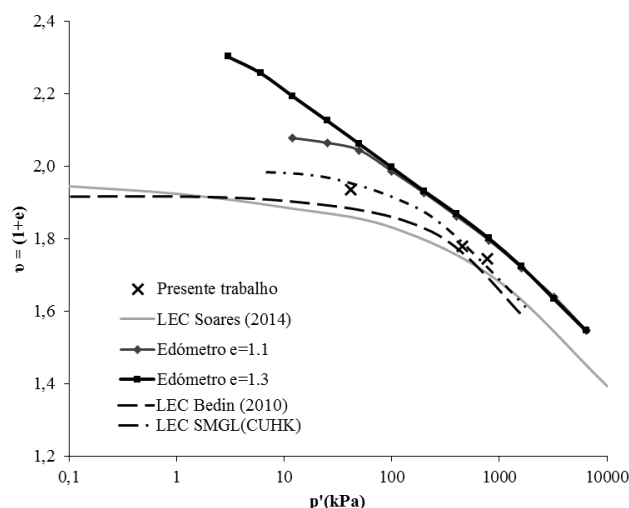


Figura 6. Representação das diferentes LEC.

Na Figura 7 encontra-se resultados de ensaios triaxiais de compressão convencional realizados por Soares (2014), em que as amostras tinham diferentes graus de saturação antes da consolidação (parâmetro B de Skempton inferior que 0.95 ou superior a 0.97). É possível fazer a distinção de duas Linhas de estados estáveis para baixas tensões de confinamento, sendo a LEE para as amostras garantidamente saturadas posicionadas mais abaixo no gráfico, implicando que os parâmetros de estado do material depositado para baixas tensões (condições mais críticas) referenciados a esta curva mais realista são mais elevados, logo com maior risco de instabilidade (liquidificabilidade). Percebe-se a importância de garantir a saturação das amostras ensaiadas em laboratório, pois as análises de risco decorrentes são fortemente condicionadas por esta correta determinação da LEC.

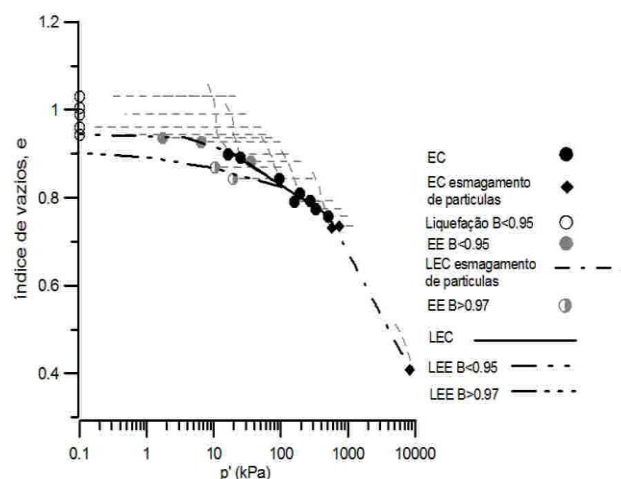


Figura 7. Comparação de LEC em ensaios com diferentes graus de saturação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do trabalho foi verificar que a heterogeneidade dos rejeitos de mineração dispostos em barragens influencia o seu comportamento geomecânico. A partir de uma série de ensaios em laboratório avaliou-se se o material estudado era ou não suscetível à liquefação nas condições *in situ*. Obteve-se uma nova Linha de estados críticos, para um material mais fino proveniente de uma fase mais avançada da operação e confirmou-se que, ao longo da operação, a LEC evolui. Não se verificou liquefação no solo estudado.

De notar a importância da curva de compressibilidade na determinação do parâmetro de estado (inicial) que é fundamental na avaliação do comportamento do solo durante o corte e na avaliação da suscetibilidade à liquefação.

É assim necessário um controlo de qualidade rigoroso de resíduos da mineração e da evolução da LEC. Uma boa monitorização *in situ* é essencial para a manutenção da estabilidade das barragens e para se evitar acidentes catastróficos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Professores Fernando Schnaid (UFRGS) e Mathew Coop (CUHK) pelas trocas de experiência em trabalhos de investigação conjuntos muito frutuosos. À Dr^a Jucélia Bedin o nosso apreço pelo grande trabalho inicial que levaria a um glinha de investigação muito consistente. A 5^a autora agradece ao CNPq, Brasil, pelo suporte financeiro (bolsa nº 201144/2015-8).

REFERÊNCIAS

- Bedin, J. (2010). *Estudo do Comportamento Geomecânico de Resíduos de Mineração*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Bedin, J.; Schnaid, F.; Costa Filho, L.M. (2010). Estudo das Propriedades Geotécnicas de Resíduos de Mineração através de ensaios de laboratório. Em: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG.
- Bedin, J., Schnaid, F. e Viana da Fonseca, A. (2012). Gold tailings liquefaction using critical state soil mechanics concepts. *Géotechnique*, 62(3), pp. 263-267.
- Carrera, A., Coop, M.R. e Lancellotta, R. (2011). The Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings, *Géotechnique*, 62(3), pp. 263-267.
- Casagrande, A. (1936). Characteristic of cohesionless soils affecting the stability of slope and earth fill. *Journal of the Boston society of Civil. Eng.*, pp. 13-32.
- Ishihara, K. (1996) Soil behavior in earthquake geotechnics. Oxford University. Press, New York.
- Jefferies, M. e Been, K. (2016) Soil Liquefaction: A Critical State Approach. 2nd Edition, CRC Press
- Schnaid, F., Bedin, J., Viana da Fonseca, A. & Costa-Fillho, L. de M. (2013). Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings, *J. Geotech and Geoenvironmental Eng.*, 139(12), 2136–2144
- Sladen, J. A. e Handford, G. (1987). A potential systematic error in laboratory testing of very loose sands. *Can. Geotech. J.*, 24(3):462–466.
- Soares, M. (2014). Evaluation of soil liquefaction potential based on laboratory data. Major factors and limit boundaries. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Soares, M., Viana da Fonseca, A. (2016). Factors affecting steady state line positioning in triaxial tests. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, in print (Ag. 2016)
- Valenzuela, L. (2015). Tailings Dams and Hydraulic Fills. The 2015 Casagrande Lecture. Arcadis Chile. Em: 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina.
- Viana da Fonseca, A. (2012). Application of in situ testing in tailing dams, emphasis on liquefaction: case-history. Workshop on Practical Applications in ISC'4. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 1 (181-203), CRC, Taylor & Francis, London, UK.