

Avaliação da necessidade do estudo de liquefação em elaboração de cartas de risco geotécnico para barragens alteadas a montante

Gladys Celia Hurtado Aquino

Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, gladys.aquino@fonntesgeotecnica.com

Michel Moreira Morandini Fontes

Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, michel@fonntesgeotecnica.com

Michelle Rose Petronilho

Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, michelle.petronilho@fonntesgeotecnica.com

Ingrid Belcavello Rigatto

Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, ingrid.rigatto@fonntesgeotecnica.com

RESUMO: Os estudos de liquefação atualmente realizados avaliam o potencial de liquefação para a condição de nível d'água atual e subida rápida do nível freático. Entretanto, esses estudos são poucas vezes realizados para elaboração das cartas de risco geotécnico. Para melhor entendimento dessa situação e desenvolvimento de uma abordagem mais segura para a elaboração de cartas de risco, este estudo comparou algumas cartas de risco e estudos de liquefação realizados para diversas barragens alteadas a montante existentes no Brasil, com uma abordagem crítica sobre o assunto. Foi verificado, após as simulações das análises realizadas, que os níveis do reservatório podem atingir primeiramente os níveis de ativação da liquefação, e depois os níveis de sinalização de carta de risco de análises estáticas. Desta forma, considera-se importante a realização desta verificação da ativação da liquefação frente a várias barragens existentes com alteamento a montante que não são avaliadas como se espera.

PALAVRAS-CHAVE: Liquefação, Carta de Risco, Segurança de Barragens, Barragem com alteamento a montante.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais métodos de construção de barragens, aquelas alteadas para montante, além dos riscos à ruptura associados a causas comuns, tais como galgamento, piping, entre outras, existe um potencial elevado para ocorrência de liquefação concernentes as características dos materiais que constituem o maciço e principalmente àqueles que servem de fundação, uma vez que estas, são formadas por materiais fofos e saturados, como grande parte dos rejeitos de mineração atualmente dispostos nessas estruturas. Os estudos de liquefação atualmente realizados avaliam o potencial de liquefação (potencial de ativação do gatilho de

liquefação) para a condição de nível d'água atual (estudos realizados durante as auditorias de barragens alteadas a montante) e para condição de subida rápida do nível freático (em projetos de barragens). Entretanto, esses estudos são poucas vezes realizados para elaboração das cartas de risco geotécnico, utilizadas para indicar a necessidade de ações de controle e mitigação de problemas onde a estabilidade da estrutura pode estar sendo comprometida tendo como razão o processo de liquefação desencadeado.

Apesar de não existir uma norma regulamentadora específica, é convencional entre as empresas que elaboram as cartas de risco geotécnico estudar a estabilidade estática,

tendo por base a elevação do nível d'água dentro do maciço para obter fatores de segurança da estabilidade correspondente a quatro níveis (normal, atenção, alerta e emergência). A inexistência de um estudo de liquefação em conjunto com as análises estáticas é preocupante. Mesmo que a barragem esteja em condições aceitáveis nas análises estáticas, é possível que ocorra ruptura por liquefação devido as possíveis condições de níveis d'água que não foram estudadas e sua correlação aos níveis de poropressões atuantes não assumidas nas condições estáticas.

Para melhor entendimento dessa situação e desenvolvimento de uma abordagem mais segura para a elaboração de cartas de risco, este estudo realizou análises em barragens tipo com sugestões de elaboração de carta de risco para ativação da liquefação, seguindo algumas diretrizes de Silva (2010). Ressalta-se que este artigo não discute a idoneidade das metodologias de estudo de liquefação existentes. O principal objetivo é verificar a influência da liquefação nas análises de carta de risco, em função da experiência dos estudos de liquefação já realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A elaboração de carta de risco é um processo comum de gestão de barragens, não normatizado, que auxilia no acompanhamento da variação dos fatores de segurança da estrutura baseado na elevação da linha freática no interior da mesma e sua influência direta no estado de tensões reinantes, conseqüentemente nas condições de estabilidade da estrutura. Tal procedimento deve estar consorciado à realização de inspeções periódicas, leituras de marcos superficiais e medidores de vazão, visando avaliação de outros modos de falha, como recalques, piping, galgamento e liquefação.

Para este último, podemos citar dois tipos: liquefação estática e dinâmica, dependendo da natureza do agente responsável do processo de liquefação.

Os terremotos são fenômenos que podem ser causados por falhas geológicas, vulcanismos e, principalmente, pelo encontro de diferentes placas tectônicas. A maioria dos abalos sísmicos é provocada pela pressão aplicada em duas placas contrárias. Portanto, as regiões mais vulneráveis à ocorrência dos terremotos são aquelas próximas às bordas das placas tectônicas. Na América do Sul, os países mais atingidos por terremotos são o Chile, Peru e Equador, pois essas nações estão localizadas em uma zona de convergência entre as placas tectônicas de Nazca e a Sul-Americana. O Brasil está situado no centro da placa Sul-Americana, que atinge até 200 quilômetros de espessura. Os sismos nessa localidade raramente possuem magnitude e intensidade elevadas. No entanto, existe a ocorrência de terremotos no território brasileiro, causados por desgastes na placa tectônica, promovendo possíveis falhas geológicas. Essas falhas, causadoras de abalos sísmicos, estão presentes em todo o território nacional, proporcionando terremotos de pequena magnitude; alguns deles são considerados imperceptíveis na superfície terrestre, portanto, a avaliação do potencial de liquefação estática é mais relevante, sendo este o foco do estudo.

Davies et al. (2002) citam os seguintes gatilhos potenciais para a liquefação estática em barragens de rejeitos: aumento das poropressões induzido por uma subida da superfície freática; aumento das poropressões induzido por uma taxa de carregamento excessiva, como por exemplo devido a um rápido alteamento da barragem; tensões cisalhantes estáticas atuantes ultrapassando a superfície de colapso, levando a uma liquefação espontânea; remoção da camada de suporte posicionada no pé da estrutura, promovida por galgamento da barragem ou por qualquer outra situação, aumentando as tensões cisalhantes atuantes; movimento da fundação rápido o suficiente para criar um carregamento não drenado em rejeitos suscetíveis ao colapso espontâneo.

Martin & McRoberts (1999) esclarecem que durante a subida da superfície freática no interior de uma barragem de rejeitos, a tensão

efetiva média (p') é reduzida enquanto a tensão cisalhante (q) é mantida constante. Esta situação pode ativar a liquefação caso o novo estado de tensões, após a subida da linha freática, esteja posicionado acima da superfície de colapso. Este exemplo ilustra uma condição de carregamento drenado causando a ativação da liquefação.

Um método muito empregado para avaliação do potencial de liquefação estática é o método empírico de Olson (2001), baseado em correlações com dados de ensaios de campo SPT e CPT. Poulos et al. (1985) propôs um procedimento para avaliação do potencial de liquefação e obtenção da resistência ao cisalhamento de solos liquefeitos por meio de ensaios de laboratório. Contudo, os efeitos de amostragem, transporte, manuseio e consolidação nas amostras coletadas causam variações na densidade da amostra e, conseqüentemente, no valor da resistência não drenada medida no ensaio.

Para análise do potencial de liquefação, a metodologia de Olson (2001) indica a realização de uma análise de estabilidade, a partir da geometria do problema na condição de pré-ruptura. Nessa análise, estima-se a tensão cisalhante estática atuante (τ_d) nos solos suscetíveis à liquefação, com um único valor de resistência ao cisalhamento, quando se obtiver um fator de segurança estático $FS_{est}=1,0$ na estabilidade global. Ou seja, busca-se os parâmetros de resistência que geram um fator de segurança unitário para a estabilidade estática. Depois, seguindo com a mesma metodologia, verifica-se se há a ativação da liquefação. Nessa verificação, compara-se a tensão cisalhante estática atuante (τ_d) (para $FS_{est}=1$) com a resistência não drenada de pico (Su_{pico}), encontrando o FS_{liq} (fator de segurança do potencial de liquefação). Se nessa relação o FS_{liq} for maior ou igual que 1,0, o potencial para desenvolver a liquefação estática é pouco provável, e na análise pós liquefação (pós gatilho) deve-se utilizar a resistência não drenada de pico. Por outro lado, se o FS_{liq} for menor que 1,0, a liquefação é provável e, portanto, deve-se utilizar a resistência não

drenada liquefeita (Su_{liq}) para a análise de pós liquefação. Para as análises pós liquefação, se o $FS_{est}<1,0$, o processo de ruptura de fluxo é mais provável, e se $1,0<FS_{est}<1,1$ o processo de ruptura é menos provável, segundo Olson (2001).

Ressalta-se que o principal objetivo deste artigo é a realização da carta de risco com foco no distanciamento do nível de água do talude de montante e, conseqüentemente, uma menor possibilidade de ativação da liquefação na estrutura. Assim, para este estudo, será avaliado um cenário após liquefação considerando a resistência de pico, visto que buscamos a não ativação da liquefação e o FS_{liq} procurado deve ser maior que 1. Silva (2010) propõe limites de coeficiente de segurança para liquefação (Tabela 1), assim como nas análises de carta de risco para cenário estático.

Tabela 1. Níveis de sinalização de segurança para liquefação.

LIMITE FS_{liq}	CONDIÇÃO DE SEGURANÇA
$FS_{liq} \geq 1,5$	potencial de liquefação muito baixo
$1,3 \leq FS_{liq} < 1,5$	potencial de liquefação baixo
$1,1 \leq FS_{liq} < 1,3$	potencial de liquefação moderado
$FS_{liq} < 1,1$	potencial de liquefação elevado

A partir dos limites estipulados na tabela acima, baseou-se o estudo para elaboração de carta de risco considerando análises de liquefação para posterior comparação a carta de risco para análises estáticas.

3 METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Nas últimas duas décadas, a liquefação tem sido uma das subdisciplinas da mecânica dos solos mais pesquisadas e publicadas. Rupturas em barragens de rejeitos de mineração representam algumas das mais dramáticas contribuições de casos históricos para o banco de dados de eventos de liquefação que ocorrem em escala real (Davies et al., 2002).

Dentre os diversos modelos avaliados,

apresenta-se o estudo de um modelo de barragem alteada a montante no estado de Minas Gerais, considerando todos os seus dados atuais (parâmetros de resistência, níveis de água do reservatório e instrumentação de controle existente, valores de investigação – SPT e CPTU). Assim, foram realizadas três etapas para o estudo de liquefação baseado a metodologia de Olson (2001) para a seção de maior altura desta barragem. São elas:

1º etapa – Primeiramente, foi realizada a análise estática da estrutura atual (Figura 1) bem como seus níveis de segurança frente à prática de carta de risco comumente utilizada (a Figura 2 mostra um exemplo e a Tabela 2 indica todos os níveis a serem avaliados). Considerou-se o nível d'água sendo medido a partir de dois indicadores de nível d'água (INA), instalados na barragem como instrumentação de controle. Utilizou-se como parâmetros de resistência do rejeito uma coesão de 0kN/m², um ângulo de atrito de 27 graus e um peso específico de 20,5kN/m³.

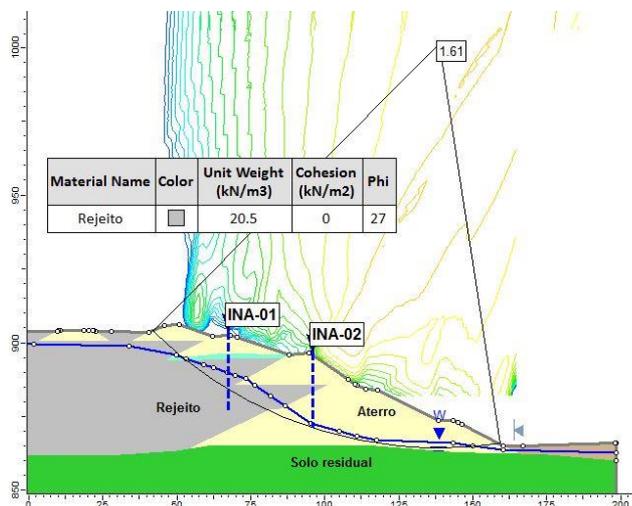


Figura 1. Análise estática considerando nível de água normal.

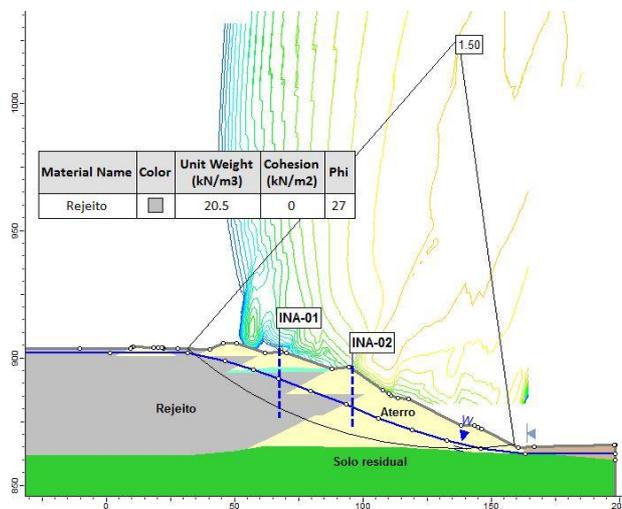


Figura 2. Análise estática considerando nível de água para fator de segurança 1.5 (exemplo).

Tabela 2. Níveis de sinalização de segurança análises estáticas.

LIMITE FS_{est}	CONDIÇÃO DE SEGURANÇA
$FS_{est} \geq 1,5$	Normal
$1,3 \leq FS_{est} < 1,5$	Atenção
$1,1 \leq FS_{est} < 1,3$	Alerta
$FS_{est} < 1,1$	Emergência

Cabe ressaltar que a elaboração da carta de risco foi realizada conforme prática, utilizando tensões efetivas e rede de fluxo. Não é foco deste estudo a discussão de tal metodologia.

2º etapa – Realizou-se a identificação da tendência do solo ser contrátil, através da envoltória de Fear e Robertson (1995), que utiliza dos valores de sondagem a percussão e tensões geostáticas para fazer tal separação. A partir dessa condição, seguiu-se com a metodologia proposta por Olson (2001), onde foi verificada a ativação da liquefação devido a solicitações estáticas. Nessa verificação, avalia-se basicamente a possibilidade das tensões cisalhantes estáticas atuantes excederem ou não a resistência ao cisalhamento de pico dos solos suscetíveis à liquefação. Para isto, deve-se obter um fator de segurança (FS_{est}) igual a 1,0 (Figura 3 e Tabela 3) na análise estática, através da diminuição dos parâmetros de resistência originais. Utilizou-se como parâmetros reduzidos de resistência do rejeito para

obtenção da ativação da liquefação uma coesão de 0kN/m², um ângulo de atrito de 9,6 graus e um peso específico de 20,5kN/m³. Destaca-se que esses parâmetros foram testados até que se encontre o fator de segurança estática igual a 1 para o nível d'água estabelecido como atual na condição do maciço, conforme a metodologia citada.

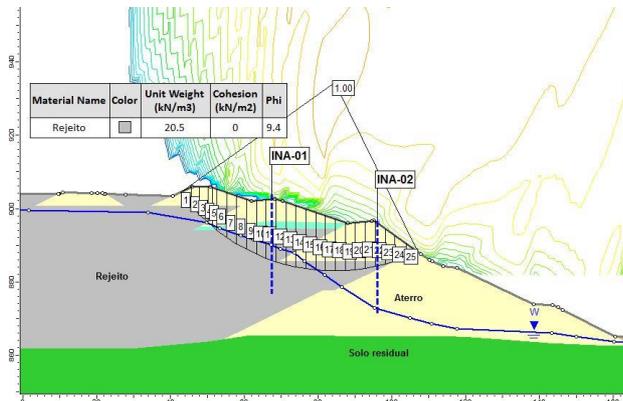


Figura 3. Avaliação da Liquefação Estática - (Olson, 2001).

Tabela 3. Determinação do τ_d e FS_{liq} para condição atual

Fatia	τ	σ'_v	τ/σ'_v	$Su_{(pico)}/\sigma'_v$	Su_{pico}	$FS=[Su_{pico}/\tau]$
1	Aterro					
2	18,88	114,05	0,17	0,22	25,09	1,33
3	25,85	156,15	0,17	0,22	34,35	1,33
4	Aterro					
5	Lastro					
6	34,33	207,40	0,17	0,22	45,63	1,33
7	36,44	220,13	0,17	0,22	48,43	1,33
8	38,10	230,12	0,17	0,22	50,63	1,33
9	39,72	239,93	0,17	0,22	52,78	1,33
10	43,63	263,54	0,17	0,22	57,98	1,33
11	48,12	290,67	0,17	0,22	63,95	1,33
12	49,97	301,82	0,17	0,22	66,40	1,33
13	50,03	302,20	0,17	0,22	66,48	1,33
14	52,19	315,26	0,17	0,22	69,36	1,33
15	52,38	316,41	0,17	0,22	69,61	1,33
16	51,83	313,06	0,17	0,22	68,87	1,33
17	49,61	299,66	0,17	0,22	65,92	1,33
18	46,75	282,41	0,17	0,22	62,13	1,33
19	44,45	268,50	0,17	0,22	59,07	1,33
20	44,62	269,55	0,17	0,22	59,30	1,33
21	44,32	267,73	0,17	0,22	58,90	1,33
22	38,67	233,57	0,17	0,22	51,39	1,33
23	29,65	179,09	0,17	0,22	39,40	1,33
24	Aterro					
25	Aterro					
FS Médio						1,33

Conforme resultados apresentados na Tabela 3, o potencial para desenvolver a liquefação estática é pouco provável, já que o FS_{liq} (Su_{pico}/τ_d), foi maior que 1 em todas as fatias, neste caso. Ressalta-se que esse fator foi igual

em todas as fatias por uma condição específica avaliada, pois a coesão estava zerada e houve apenas a variação do ângulo de atrito nesta etapa. Para parâmetros diferentes, é comum que os valores de FS_{liq} sejam diferentes em cada fatia.

3ª etapa – Na sequência foi realizada a análise pós-liquefação (pós-gatilho), considerando que não houve a ativação da liquefação. Utilizou-se a resistência não drenada de pico (pois não houve a ativação) igual 0,22 (resistência de pico não drenada normalizada por correlações com os valores de SPT e CPT) para os rejeitos, utilizando a metodologia de Idriss e Boulanger (2007). Utilizou-se essa resistência em função de que o FS_{liq} foi maior ou igual a 1,0 (Figura 4). Caso fosse menor, seria necessário utilizar a resistência após liquefação (resistência liquefeita).

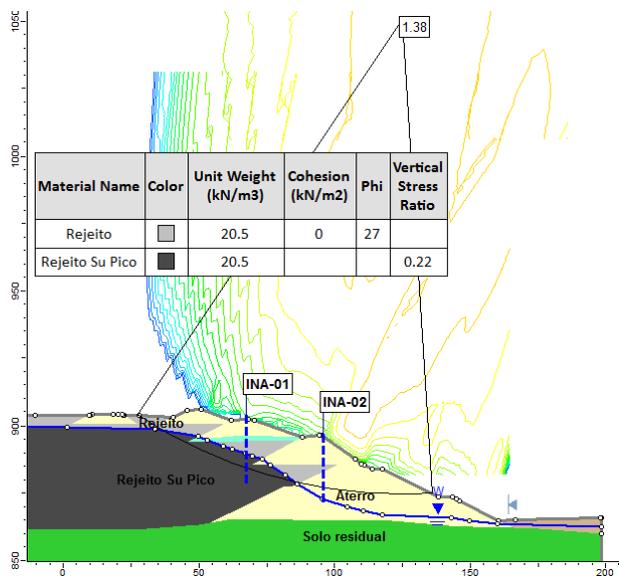


Figura 4. Análise após liquefação dos rejeitos (Olson, 2001).

Segundo os resultados obtidos nas análises após liquefação, o fator de segurança da ruptura após liquefação ($FS_{após-liq}$) foi maior que 1,3, podendo ser classificado como muito pouco provável.

Após a realização da metodologia de Olson (2001) para definição do potencial de liquefação, aplicou-se a proposta da elaboração da carta de risco para o cenário de liquefação

visando à comparação das elevações da freática no reservatório. Para esta metodologia, foram consideradas quatro etapas, sendo elas:

1º etapa – Primeiramente, foi considerado para o rejeito do reservatório valor de coesão igual a 0kPa e variação dos ângulos de atrito para os fatores de segurança do potencial de liquefação (FS_{liq}) de 1,0, 1,1, 1,3 e 1,5. Desta forma, foi encontrado um valor teórico de ângulo de atrito para cada nível da carta de risco.

2º etapa – Considerando os parâmetros encontrados na etapa 1, foi realizada a variação do nível freático para o encontro do $FS_{est}=1$ (ruptura) bem como dos fatores de 1,0, 1,1, 1,3 (Figura 5) e 1,5 na análise da liquefação (FS_{liq}) (Tabela 4).

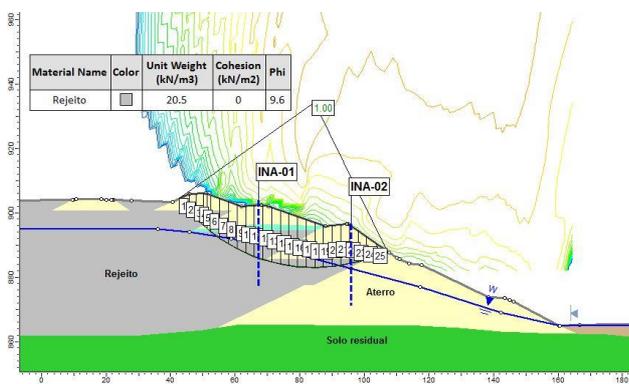


Figura 5. Avaliação da Liquefação Estática - fator de segurança 1.3 (exemplo).

Tabela 4. Determinação do τ_d e $FS_{liq}=1,30$

Fatia	τ	$\sigma'v$	$\tau/\sigma'v$	$Su_{(pico)}/\sigma'v$	Su pico	$FS=(Su\ pico/\tau)$
1					Aterro	
2	19,23	113,68	0,17	0,22	25,01	1,30
3	26,33	155,63	0,17	0,22	34,25	1,30
4					Aterro	
5					Lastro	
6	36,77	217,38	0,17	0,22	47,82	1,30
7	38,64	228,44	0,17	0,22	50,26	1,30
8	39,66	234,47	0,17	0,22	51,58	1,30
9	40,77	241,05	0,17	0,22	53,03	1,30
10	44,33	262,11	0,17	0,22	57,66	1,30
11	48,13	284,57	0,17	0,22	62,60	1,30
12	49,95	295,33	0,17	0,22	64,97	1,30
13	49,85	294,71	0,17	0,22	64,84	1,30
14	49,32	291,59	0,17	0,22	64,15	1,30
15	48,49	286,71	0,17	0,22	63,08	1,30
16	47,37	280,08	0,17	0,22	61,62	1,30
17	45,96	271,71	0,17	0,22	59,78	1,30
18	44,12	260,88	0,17	0,22	57,39	1,30
19	43,10	254,79	0,17	0,22	56,05	1,30
20	44,85	265,15	0,17	0,22	58,33	1,30
21	45,32	267,92	0,17	0,22	58,94	1,30
22	39,54	233,79	0,17	0,22	51,43	1,30
23	30,33	179,30	0,17	0,22	39,45	1,30
24					Aterro	
25					Aterro	
FS Médio						1,30

3º etapa: Na sequência, foi realizada a

análise após liquefação, considerando também a resistência não drenada de pico (Su_{pico}) igual 0,22 para os cenários de fatores de segurança. (Figura 6).

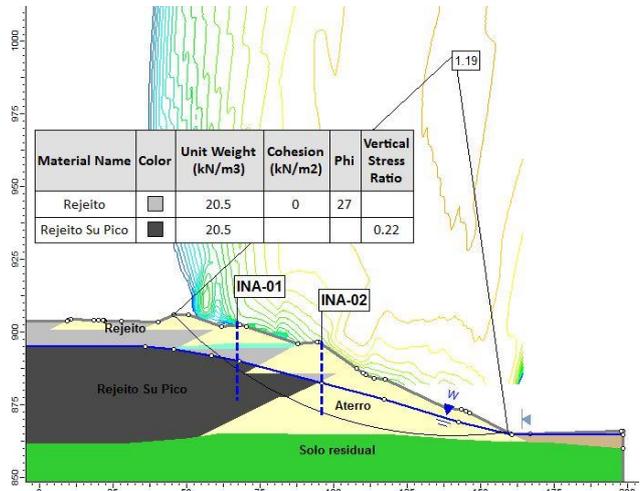


Figura 6. Análise após liquefação dos rejeitos com fator de segurança $FS_{liq}=1.3$ (exemplo).

5 RESULTADOS

Após realização da metodologia de Olson (2001) para realização das análises de liquefação estática e a elaboração da carta de risco para verificação do potencial de liquefação, foi realizada uma comparação dos níveis d'água encontrados. Esses níveis são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6 abaixo, que indicam a cota dos níveis d'água em cada um dos dois indicadores de nível d'água simulados na estrutura.

Tabela 5. Valores encontrados para INA-01

CARTA DE RISCO	FATORES DE SEGURANÇA PARA O INA-01			
	1,5	1,3	1,1	1,0
ANÁLISE ESTÁTICA (m)	891,79	894,61	898,22	-
ANÁLISE DA LIQUEFAÇÃO (m)	-	890,15	895,56	896,30

Tabela 6. Valores encontrados para INA-02

CARTA DE RISCO	FATORES DE SEGURANÇA PARA O INA-02			
	1,5	1,3	1,1	1,0
ANÁLISE ESTÁTICA (m)	880,87	884,13	889,00	-
ANÁLISE DA LIQUEFAÇÃO (m)	-	882,76	884,33	886,40

De acordo com a metodologia comumente utilizada para carta de risco de análises estáticas, o limite mínimo de fator de segurança (FS_{est}) a ser encontrado é de 1,1 (nível de emergência) e, portanto, não foi necessário encontrar valores de nível de água para o fator de 1,0. Já para as análises realizadas para obter os fatores de segurança da ativação da liquefação, não foi encontrado o fator de segurança de 1,5. Contudo, considera-se como os níveis mais importantes os relativos aos valores referentes a 1,3 e 1,1 onde, para carta de risco estática, estes se referem a cenários de atenção e alerta, e para ativação da liquefação refere-se a potencial de liquefação moderado a elevado (segundo Silva, 2010).

Desta forma, pode-se perceber que, pelas análises realizadas, os níveis do reservatório referentes a ativação da liquefação são menores do que os encontrados na carta de risco, indicando que, enquanto na análise estática, por exemplo, ainda não chegou no fator de segurança de 1,3, ou seja, está no cenário de atenção, a carta de risco para a liquefação já atingiu o potencial moderado para liquefação, correspondente ao mesmo fator.

Com estes valores, percebe-se o quão seria interessante realizar a carta de risco para a liquefação, já que o maior problema de barragens alteadas a montante é a probabilidade da ocorrência de liquefação, e não somente de estabilidade.

6 CONCLUSÕES

É sabido que para os alteamentos a montante, de forma natural ocorre o afastamento do N.A.

do reservatório em relação ao maciço a partir da formação da praia constituída pelo espigotamento do rejeito à crista do barramento. Contudo, tal procedimento também tem como consequência a formação de porções mais permeáveis junto ao maciço, dada a segregação hidráulica destes materiais quando dispostos desta maneira, e por conseguinte majoração dos riscos uma vez que as perdas de carga são reduzidas e como consequência linha freática mais elevada. Desta forma, torna-se relevante um maior controle do N.A. junto ao maciço, visando a gestão dos riscos associados a probabilidade do potencial de liquefação.

A carta de risco que tem por objeto a análise do potencial por liquefação teve seus níveis d'água a serem monitorados em razão desta apresentaram valores mais conservadores sinalizados por elevações mais baixas do que aquelas que geralmente são adotadas pelas análises estáticas e, portanto, é de suma importância que esta ferramenta seja utilizada no intuito de auxiliar a operação da barragem assegurando sua integridade frente aos riscos impostos.

Por fim, destaca-se, frente aos resultados encontrados nas diversas análises de caso representadas no modelo assumido para fins de apresentação deste artigo, a importância de se considerar quando da definição de parâmetros de monitoramento e por conseguintes condições que resultarão em uma operação segura das barragens alteadas para montante, as análises de liquefação também como premissa de construção da carta de risco para barragens.

Este artigo não entra no mérito das metodologias de análise de liquefação, prevalecendo sobre este, a necessidade de se estabelecer critérios, além dos já considerados a causas comuns, tais como galgamento, piping, entre outras, critérios para manutenção da segurança dos maciços, reduzindo o potencial de ativação do gatilho da liquefação para barragens alteadas a montante.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem a empresa FONNTES GEOTÉCNICA pelo fornecimento de todos os dados necessários para as análises de estabilidade estática e liquefação, bem como seu apoio para a participação em congressos de alta relevância.

REFERÊNCIAS

- Davies, M.P.; Mcroberts, E.C. & T.E. Martin (2002). Static liquefaction of tailings – Fundamentals and case histories. In proceedings Tailings Dams 2002. ASDSO/USCOLD, Las Vegas.
- Fear, C.E. & Robertson, P.K. (1995). Estimating the undrained strength of sand: a theoretical framework. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 859-870.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2007). SPT- and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils. *Earthquake Geotechnical Engineering*, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering – Invited Lectures, K. D. Pitilakis, ed., Springer, The Netherlands, 1-22.
- Martin, T.E. & E.C. McRoberts (1999). Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams, *Proceedings, Tailings & Mine Waste '99*, Fort Collins, Colorado, pp. 287-302.
- Neto, J.P.F. (2009). Estudo de liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UFOP.
- Olson, S.M. (2001). Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana– Champaign, Urbana, Ill.
- Poulos, S.J., Castro, G. & France, J.W. (1985). Liquefaction evaluation procedure. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 111, n. 6, 772-792.
- Silva, W.P., (2010). Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de olson (2001). Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UFOP.