

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
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise de Suscetibilidade à Liquefação em um Rejeito de Mineração

Wemerson da Silva Dias¹

Especialista em Geotecnia, Patrol Investigações Geotécnicas Ltda, Belo Horizonte, Brasil,
wemersonsdias@yahoo.com.br

Josias Eduardo Rossi Ladeira²

Professor, PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil, proqual@uol.com.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é demonstrar que mesmo estando um rejeito de mineração a 100% do seu grau de compactação, o mesmo tende a ter elevada capacidade de deformação, pois ao estar este rejeito em teores de umidade elevado se comporta de maneira contrátil, onde as partículas mais finas que apresentam com um certo percentual de água, passa a atuar como um líquido viscoso, dispersando as partículas granulares, impedindo o contato grão a grão, ocasionando deformações no maciço do rejeito tornando-se necessário que na disposição desse rejeito em barragem ou em pilhas, a realização de ensaios de resistência em busca da melhor densidade próxima à linha de estado de tensão e volume permanente, podendo esta densidade estar numa compactidade relativa maior que 1.0.

PALAVRAS-CHAVE: Disposição de Rejeito, Métodos de Análises, Compactidade Relativa, Liquefação.

ABSTRACT: The objective of this work is to demonstrate that even offering a mining tailings at 100% of their degree of compaction, it tends to have a high deformation capacity, as this tailings in high humidity content behaves in a contractile manner, where as the finer particles are presented with a certain percentage of water, it starts to act as a viscous liquid, dispersing as granular particles, preventing the grain to grain contact, causing deformations in the tailings mass making it necessary that in the disposal of this waste in the dam or in stacks, the performance of resistance tests in search of the best density close to the state line of tension and permanent volume, this density being able to be in a relative compactness greater than 1.0.

KEYWORDS: Tailings Disposal, Analysis Methods, Relative Compactness, Liquefaction.

1 Introdução

As barragens normalmente têm o maciço construídos de solos ou o próprio rejeito para conter a polpa e lama de rejeitos, resultado do processo de mineração. O lançamento da polpa no reservatório pode ser por meio de bombeamento, espigotamento, ou ciclonagem. Esse último processo de disposição promove a separação das partículas finas das grossas, cujo controle é de extrema importância, pois implicará na vida útil e na segurança da barragem.

A disposição de rejeito sem uma técnica adequada e sem um controle rígido neste processo tem levado muitas barragens ao colapso. O elevado nível de saturação do rejeito disposto em camadas heterogêneas (mistura de lama e rejeito) de baixa densidade, altos índices de vazios e colmatação nos drenos são elementos que por ação de um evento deflagrador, tal como um sismo ou qualquer tipo de abalo, e mesmo elevação da poropressão na massa, promova o colapso e rompimento do maciço da barragem.

As barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil, a maioria alteada a montante, tornam-se mais vulneráveis quando o rejeito é disposto sem controle, ou mantido no reservatório em condições saturadas, o que pode deixar esse rejeito suscetível à liquefação. Quando neste cenário há solicitações na massa não drenada originária devido ao aumento das pressões internas (u), os grãos desse material dispersam-se, o que reduz as tensões efetivas e diminui sua resistência ao cisalhamento.

O processo de liquefação se dá quando um solo ou rejeito de característica arenosa, saturado e em condição não drenada, com compactidade relativa baixa, tende à contração. Nesta situação há perda da resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo das pressões internas (u), quando recebem algum tipo de

solicitação, seja em um carregamento estático ou cíclico, em volume constante ou mobilidade cíclica, oriundo das deformações contínuas. Este fenômeno leva a estrutura do barramento à ruptura, gerando um deslocamento rápido da massa de rejeito que sai destruindo tudo o que está à frente, causando danos ambientais, econômicos e sociais, perda de vidas humanas, animais e vegetais.

Os últimos eventos de ruptura de barragem de rejeito por liquefação, em 2015 e 2019, reforçaram a necessidade de realização de ensaios em laboratório, além de observação de certos comportamentos do rejeito quanto ao seu estado de tensões, não somente a identificação de parâmetros de coesão (C') e ângulo de atrito (ϕ'), outras técnicas que não eram tão usuais passaram a ser usadas para melhor interpretação quanto ao comportamento e tomada da melhor decisão de como dispo-lo.

Portanto, a proposta deste artigo é discutir resultados de ensaios que indicam potencial de liquefação de rejeitos de mineração.

2 Contextualização do cenário de disposição de rejeitos de mineração

Para controle qualitativo e quantitativo são usados métodos de verificação quanto ao estado de compactidade, grau de compactação desse rejeito na barragem; além de realização de ensaios de caracterização para obtenção de índices físicos, índice de consistência e resistência ao cisalhamento, além de ensaio de densidade in situ.

O adensamento do rejeito na praia do reservatório é realizado por espalhamento, pelo uso de trator de esteiras. Nesta situação obtém-se o grau de compactação pelo número de passadas desse trator sobre o rejeito. O controle de adensamento do material é realizado pela comparação entre o grau de compactação em campo comparado com a densidade máxima obtida em laboratório. Tal controle pode ser realizado pelos métodos da Membrana, Frasco de Areia, Densímetro Nuclear ou Light Weight Deflectometer (LWD). Estando de posse dos resultados de densidades em acordo às especificações de projeto, libera-se a camada para a continuidade do processo. Os valores do grau de compactação devem estar entre 95% a 100% do Proctor Normal (PN), de acordo com as especificações de projeto.

Frequentemente o rejeito mais grosso é depositado próximo à crista do barramento, cenário que auxilia no processo de drenagem interna da água presente na polpa de rejeitos. Na área intermediária do armazenamento, o material em transição, entre grão grosseiros e finos. Em local distante do barramento de contenção de rejeitos se deposita a lama, ou seja, o material mais fino.

A Figura 1 apresenta a segregação hidráulica na disposição de rejeito em uma barragem.

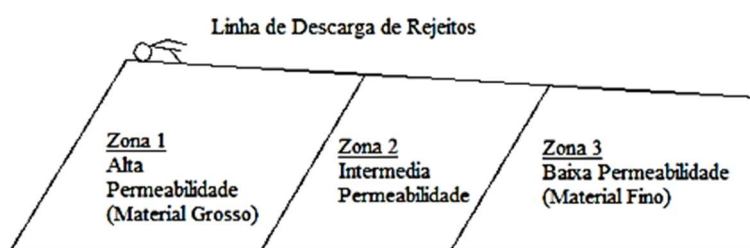


Figura 1. Segregação hidráulica num depósito de rejeito de minério de ferro (Santos, 2004).

Assim, esta pesquisa apresenta o comportamento geotécnico de certos tipos de rejeitos de mineração, que ao serem submetidos a um estado de tensões cisalhantes (τ), com densidade máxima obtida por ensaio de compactação. Esse material em estado considerado como compacto, mas que para determinados rejeitos ainda encontram-se em seu estado fofo ou medianamente compacto, ao estar em estado de tensões e resistência ao corte tem comportamento contrátil.

A análise das condições de estabilidade do maciço e do estado de tensões do rejeito levou a necessidade de realizar vários ensaios in situ, tais como ensaio de SPT, CPTU e correlações empíricas, além de ensaios em laboratório para caracterização do material e determinação de sua resistência ao cisalhamento.



3 Aspectos Técnicos do Rejeito de Mineração

Thevanaygam et al (2002) citado por Telles (2017) exemplifica o comportamento microestrutural no solo granular misto (mistura das partículas granulares e fina), onde o primeiro contato dos grãos pode ser entre grãos granulares ou finos, sendo estes apresentados com o mesmo índice de vazios, mas com teores de finos diferentes. Neste cenário havendo mesmo índice de vazios, quanto maior a quantidade de finos da mistura, menor é o contato entre os grãos granulares, resultando numa deformação maior e ao alcançar uma determinada porcentagem de finos, o contato primário entre grãos passa a ser entre grãos finos. Caso o teor de grãos finos seja menor, os grãos granulares são os primeiros a terem contato entre grãos, passando a ter função primária na resistência ao cisalhamento dos solos, e os grãos finos têm uma função secundária. Thevanaygam et. al. (2002) citado por Telles (2017), atenta que o índice de vazios não é um índice representativo para caracterizar a resposta mecânica de misturas granulares. Ou seja, o mesmo índice de vazios pode ser obtido com maior ou menor quantidade de material granular.

Estabelecidas essas condições na massa depositada no reservatório da barragem, o processo de liquefação pode se dar por fluxo ou deformação cíclica.

O fluxo por liquefação, é fenômeno que ocorre quando o solo saturado em condição não drenada, no estado fofo possui comportamento contrátil ao ser submetido a determinado estado de tensão (carregamento monotônicos ou cíclicos). Nessa situação o material perde sua resistência, além de haver deformação. Tal fluxo se dá quando *in situ* a tensão cisalhante (τ_d) é maior que a resistência do estado permanente ou resistência liquefeita. Essa deformação é denominada *strain softening* (suavização de tensão). Em solos com comportamento de deformação denominado de *strain hardening* (endurecimento de tensão) impossibilita a mobilização do fenômeno de liquefação. Neste cenário, a ativação do fenômeno de liquefação pode se dar por carregamento estático, dinâmico ou por deformação não drenada sob carga constante (Pirete, 2010).

A deformação cíclica se dá quando ocorre excesso de poropressões interna num carregamento da massa depositada, em um processo de dilatação durante carregamentos monotônicos. O aumento da poropressão ocorre antes do solo atingir o limite de sua deformação; onde esse limite depende da magnitude da tensão cisalhante inicial e tensão cisalhante aplicada

Segundo Aubertin et al. (2003) citado por Pirete (2010), a liquefação pode ocorrer também em solos não saturados, que tenham grau de saturação suficiente para se contrair, resultando na expulsão de água ao invés de ar. Por meio de ensaios realizados em laboratório é possível confirmar que em materiais com o grau de saturação em torno de 80% há possibilidade da ocorrência de processo de liquefação (Martin, 1999 citado por Pirete, 2010).

O fluxo por liquefação, fenômeno originário do resultado da ruptura não drenada, a Superfície Susceptível a Liquefação (SSL - *Steady State Line*) é obtida sob solicitação não drenada para areias fofas, comportamento contrátil em ensaios triaxiais de tensão controlada (Poulos, S.J., 1981 citado por Maxuel, 2016). A Linha de Estado Crítico (CSL) é obtido para ensaios com solos densos (comportamento dilatante) em ensaios de deformação controlada em condição drenada (Schofield, A.N.; Wroth C.P., 1968 citado por Maxuel, 2016).

A granulometria também tem influência no processo de liquefação, onde solos de granulometria variável, decrescente ou bem graduado são considerados menos suscetíveis à liquefação, por abrigar nos interstícios dos grãos granulares partículas menores, o que possibilita menor deformação volumétrica (ϵ_v) em condições drenadas. Nesta situação a água em estado de drenagem gera pouco ou nenhuma poropressão, o que permite melhor acomodação entre os grãos, tornando-os menos suscetíveis à liquefação, quando se apresentam em distribuição granulométrica uniforme são mais suscetíveis ao fenômeno de liquefação.

Citado por Pirete (2010), Terzaghi apresenta estudo de solos e rejeitos suscetíveis ou não ao fenômeno de liquefação. Os ensaios de granulometria podem identificar o perfil dos solos e rejeitos que mediante ao tamanho das partículas, determina faixa granulométrica de solos suscetíveis à liquefação.

4 Metodologia

O rejeito de mineração, foco desta pesquisa, originário da região do quadrilátero ferrífero próximo à Cordilheira do Espinhaço, em Itatiaiuçu – MG, é oriundo do processo de beneficiamento de minério de ferro, local apresentado na Figura 2.

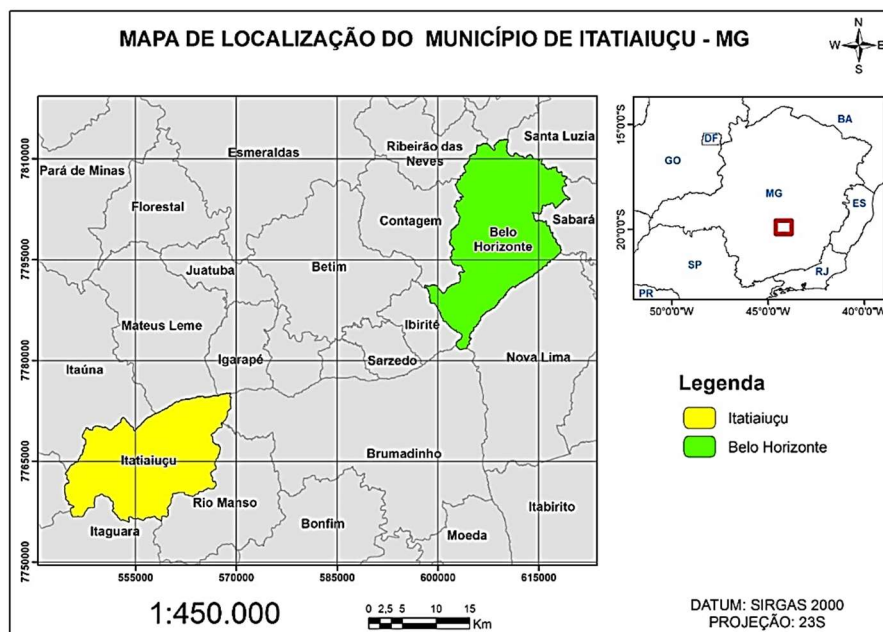


Figura 2 – Mapa de localização regional da coleta da amostra

Para análise do comportamento do rejeito constituído de lama e partículas mais grossas foram realizados ensaios de caracterização e resistência no laboratório da empresa Patrol Investigações Geotécnicas Ltda.

Para a obtenção da densidade relativa foram realizados ensaios de índice de vazios máximo, conforme norma ASTM D4254/16 para $e_{\min}$, norma ASTM D4253/16 ($e_{\max}$ e $e_{\min}$), ensaio de compactação conforme Proctor Normal, método de HILF em conformidade a norma NBR 7182/2016 e aplicação do método MCV¹ (Mini-MCV - Moisture Condition Value) Parson (1976), modificado por Nogami e Villibor (2003), para comparação dos resultados das densidades, além da realização de ensaios de caracterização, como Massa Específica Real dos Grãos (GS). Utilizaram-se as normas NBR 6458/16 para ensaio de granulometria com sedimentação, NBR 7181/16 para identificação das dimensões dos grãos. A seguir são apresentados os dados de resultados obtidos, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Resultado dos Ensaios de Índices Físicos do Rejeito

Ensaios	$e_{\max}$	$e_{\min}$	γ (g/cm ³)	w ótima' (%)
GS	-	-	3,380	-
Hilf		0,79	1,884	18,2
Mini-MCV		0,64	2,055	18,0
Índice de Vazios	1,38	0,8	1,882	-

Ao realizar campanha de ensaios geotécnicos em laboratório, ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento (triaxiais CIU, CID²), no rejeito heterogêneo, foram realizadas mistura do rejeito grosso com

¹ Mini-MCV - Moisture Condition Value

² CIU – Consolidado Isotropicamente Não drenado

CID – Consolidado Isotropicamente Drenado

rejeito fino (lama). Nesta condição percebeu-se que este rejeito ou até mesmo outros rejeitos com tais características tendem a deformar além do seu índice de vazios mínimo, que ao estarem em contato com água em um grau de saturação elevado, com 95% a 98% do parâmetro B de Skempton tendem ao comportamento contrátil, que independente de suas condições de cisalhamento, drenado ou não drenado. Tal comportamento pode ser observado nas misturas de partículas grossas e finas na região intermediária do depósito de rejeitos, situada na zona 2 como mostra a Figura 1, onde ocorre a transição dos grãos grossos e de tamanho intermediário, em que os grãos finos não possuem segregação hidráulica nessa área do depósito.

4.1 Granulometria e sedimentação do rejeito de mineração

Ensaios de granulometria e sedimentação foram realizados de acordo com a norma NBR 7181/2016. A amostra seca em estufa, material passante na peneira 2,0 mm (Nº 10) foi disperso em água, e para melhor dispersão dos elementos utilizou-se defloculante (hexametáfosfato de sódio), em que a amostra foi embebida por 18 horas. A seguir a amostra foi levada a um dispersor elétrico (alguns segundos), logo após colocou-se a mistura (amostra e solução) em uma proveta e completou-se com água destilada. Agitou-se a mistura dentro da proveta (cerca 1 minuto) e introduziu-se um densímetro na suspensão, onde foram realizadas leituras densimétricas das partículas suspensas e temperaturas. As leituras foram realizadas nos intervalos de 30 seg, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1h, 2 h, 4 h, 8 h e 25 h. Após passar as 25 horas foi realizada a última leitura de densidade e temperatura; a seguir a amostra foi lavada na peneira 0,075 mm (Nº 200). O material retido foi transferido a uma bacia e levado para a estufa de temperatura a 105°C. Após 18 horas a amostra seca foi peneirada para determinação do diâmetro das partículas. A pesagem foi lançada em uma planilha excel, em que se observou o diâmetro efetivo D_{10} , diâmetro médio D_{50} , o coeficiente de curvatura (C_c), e o coeficiente de uniformidade (C_u), além do coeficiente de segregação (S_0). Este último apresenta resultado em linha de cor preta no gráfico da FIGURA 3. Pode-se observar que a curva granulométrica enquadra-se dentro da faixa (linhas de vermelho no gráfico) proposta por Terzaghi para rejeitos finos suscetíveis à liquefação. O gráfico da Figura 3 representa os diâmetros dos grãos da amostra em análise.

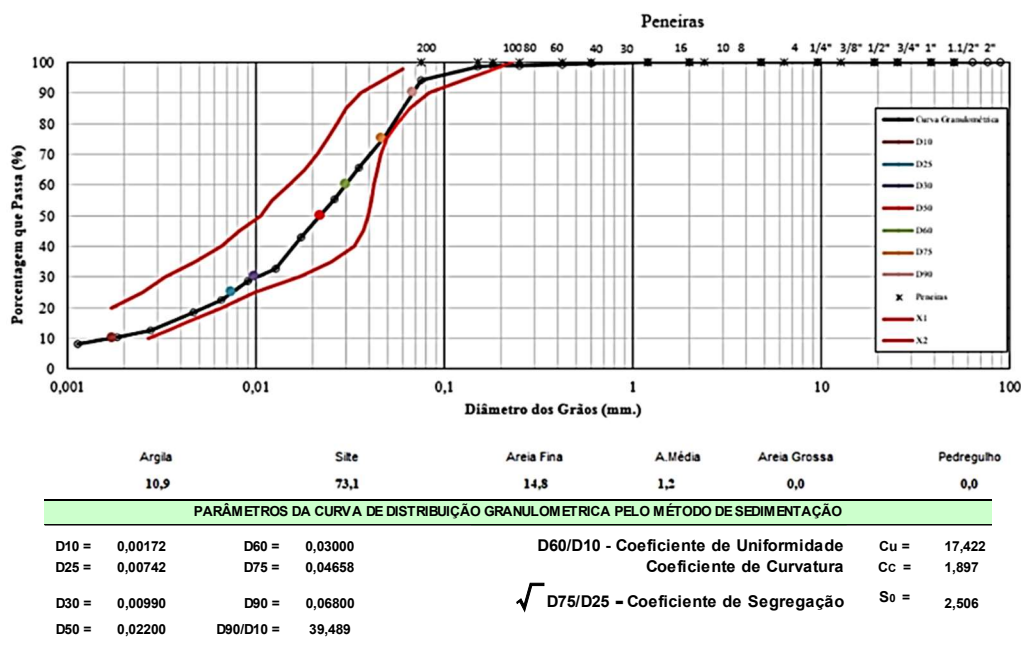


Figura 3 - Curva granulométrica do rejeito com a faixa de rejeitos finos suscetíveis a liquefação proposta por Terzaghi (Pirete, 2010), com cálculo do diâmetro D, Braja (2007).

4.2 Ensaios de Resistência

Na análise de resistência ao cisalhamento utilizou-se uma Prensa Servo Controlada para os ensaios

triaxiais nas condições Consolidado Isotropicamente Drenado (TCID), conforme norma ASTM D4767/11. Para a condição de Consolidado Isotropicamente Não Drenado (TCIU) seguiu-se a norma ASTM D4767/11, para medidas dos parâmetros e análise quanto ao seu comportamento e estado de tensões.

Para a moldagem dos corpos de prova utilizou a umidade ótima (w_{ot}), obtida por meio do ensaio de compactação Proctor Normal, pelo método Hilf e a compactidade relativa (CR) de 100%, 112% e 118% como mecanismo de análise de grau de compactação. Neste ensaio através do volume de um molde cilíndrico bipartido de 35,66 mm de diâmetro (ϕ) e altura (h) 72,04 mm, foi determinada a massa para moldagem dos corpos de prova. A massa de rejeito dividida em 6 porções, compactada com o auxílio de um soquete e 6 cabeças de bater, em níveis de altura uniforme, teve como diferença a massa aplicada em cada camada. Nas primeiras camadas utilizou-se menos massa a fim de evitar que essas camadas sofressem uma compactação maior que as demais, deixando o corpo de prova estruturalmente heterogêneo, o que afetaria diretamente no resultado do ensaio.

Após a moldagem os corpos de prova foram montados em células juntamente com papéis filtro nas laterais, sob e sobre os corpos de prova colocando pedras porosas no base *cap* e no top *cap*, ambos envolvidos por uma membrana e anéis para vedação. As células fenchidas com água deaerada e colocadas nas prensas triaxiais, foram submetidas a quatro processos: percolação, saturação, adensamento e cisalhamento. Ao fim do ensaio o corpo de prova foi retirado da célula, pesado e levado à estufa para determinação do teor de umidade final.

Para o ensaio drenado (TCID), a fase cisalhante se deu de forma lenta para evitar elevação da poropressão, nesta situação o corpo de prova continuou a passar por deformação volumétrica.

Para o ensaio não drenado (TCIU), a fase cisalhante se deu de forma rápida, ocorrendo elevação da poropressão, pelo fato de não haver drenagem, e nesta situação não ocorreu variação volumétrica. Os resultados de resistências poropressões e deformações são apresentados na Figura 4 abaixo.

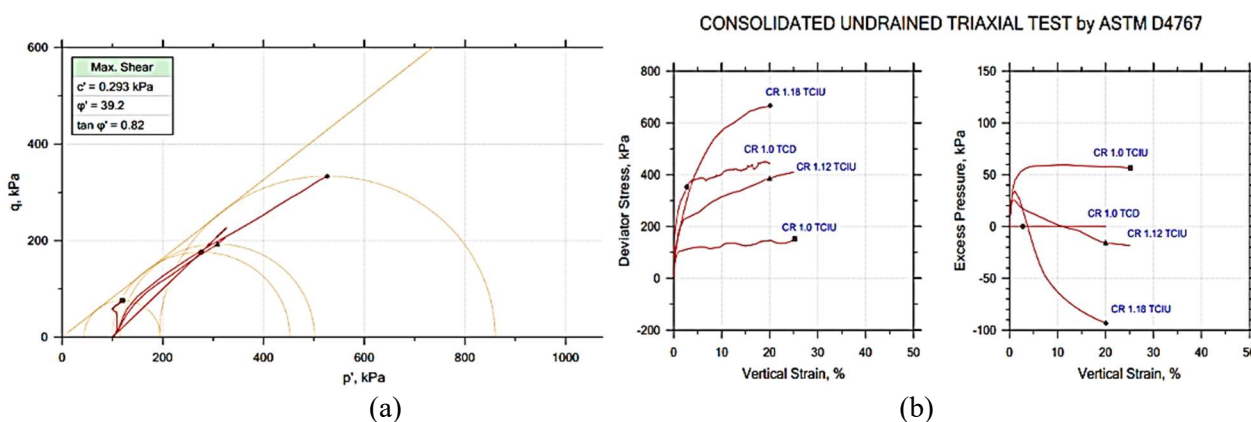


Figura 4 - Círculo de Mohr correspondente aos ensaios da tensão efetiva confinante de 100 kPa . Tensão Desvio *versus* Deformação Vertical (a), Excesso de Pressão *versus* Deformação Vertical (b).

5 Resultados e Discussões

Como pode ser observado, as densidades nos ensaios de Hilf e MCV³ apresentam diferenças devido ao fato da compactação Moisture Condition Value (MCV), permitir a distribuição plena de energia em toda a seção da área do cilindro, o que possibilita a distribuição uniforme de energia durante a compactação. Já no método de Hilf, a distribuição de impactos da compactação é feita de forma aleatória, podendo o rejeito receber mais ou menos energia em alguns locais do que em outros. O que fica claro que os oito golpes aplicados pelo método MCV⁴ correspondem à energia do proctor normal pelo método Hilf.

Nos ensaios de índice de vazios máximo e mínimo, os resultados obtidos de densidade e índice de vazios correspondente, foram próximos ao resultado obtido no ensaio de compactação pelo método Hilf.

³ Mini-MCV - Moisture Condition Value

⁴ Mini-MCV - Moisture Condition Value

No ensaio de granulometria com sedimentação, com base nos resultados obtidos, foi possível traçar uma faixa proposta por Terzaghi e citada por Pirete (2010), onde o rejeito analisado se enquadra dentro da faixa de solos suscetíveis à liquefação, de acordo com o diâmetro nominal das partículas.

Para a análise de resistência, comportamento e estado do rejeito (fofo ou compacto) foram realizados ensaios triaxiais do tipo Consolidado Isotropicamente Não Drenado (CIU) e Consolidado Isotropicamente Drenado CID⁵. Os corpos de prova ensaiados foram compactados com compacidades relativas (CR) diferentes, no intuito de obter comportamento dilatante do rejeito. Tais compacidades relativas CR foram 100%, 112% e 118%; ambos foram moldados no teor de umidade ótima, obtida no ensaio de compactação pelo método Hilf. Neste método, aplicou-se tensões confinantes σ_3 de 100 kPa em todos os corpos de prova e em ambos obtiveram parâmetro B de Skempton de 0.98.

Para obter-se um comportamento dilatante foi necessário aplicar uma densidade de compactação relativa correspondente a 1.12 (CR), chegando assim a um grau de compactação maior que 100%, considerado em relação às densidades obtida no ensaio de compactação Hilf e ensaio de índices de vazios mínimo, e a curva de cedência não se apresentou tão significativa, rija o suficiente a ponto de obter uma ruptura uniforme do corpo de prova.

6 Considerações finais

A análise do rejeito de mineração composto por lama e partículas granulares foram realizado vários ensaios de análise e caracterização geotécnica, por se tratar de material suscetível à liquefação.

O método de compactação Moisture Condition Value (MCV), além de aplicar golpes numa mesma área, possibilita a observação de curvas de energia, tais como energia intermediária e modificada num mesmo ensaio, aplicado em campo e também em laboratório. Assim foi possível identificar a densidade próxima da realidade, o que permite que este índice de vazios esteja próximo à linha de estado de tensões permanente, o que caracteriza estado dilatante. Atenção nesta situação deve ser dada a quebra ou não de grãos da massa de rejeitos. Ao analisar a granulometria notou-se que a distribuição granulométrica se enquadra na faixa de Terzaghi citado por Pirete (2010) sujeita ao fenômeno de liquefação. Após os ensaios o rejeito de mineração apresentou enquadrado na faixa de solos finos suscetíveis à liquefação, embora considerado como mistura de partículas finas e grossas, o rejeito apresenta grãos de diâmetros inferior a 0,075 mm. Portanto um material muito fino, podendo talvez estas partículas não serem caracterizadas corretamente num ensaio de sedimentação.

Os resultados dos ensaios de índice de vazios e densidade apresentaram-se próximos aos resultados da energia aplicada ao método Proctor Normal, método Hilf, ou seja, 100% grau de compactação (GC), ao realizar ensaio de resistência. Esse tipo de rejeito se comportou como fofo, estado contrátil. Estando o rejeito seco os grãos sólidos do solo (rejeito) ocuparam seu espaço num determinado volume e ao adicionar água em certa quantidade, a parcela de sólido do solo de partículas mais finas começaram a trabalhar como líquido viscoso (lama), que dispersa os grãos de dimensões maiores (grosso), não permitindo o contato grão a grão. Nesta situação houve deformação por contração, tal comportamento é citado por Thevanaygam et. al. (2002) em Telles (2017), quando um solo com estas características, estando saturado é submetido a uma tensão cisalhante (τ).

Um dos métodos usados para controle de qualidade quanto à disposição de rejeitos de mineração, em relação ao seu estado no corpo da barragem é a utilização da densidade obtida nos ensaios de índice de vazios máximo e mínimo ou Proctor, para análise do grau de compactação do rejeito por meio de ensaios *in situ* pelos métodos Frasco de Areia, Membrana, Densímetro Nuclear ou Light Wheight Deflectometer (LWD).

A realização desta pesquisa mostrou que tais informações não são suficientes para obtenção do melhor resultado de estado do material depositado, tornando-se necessário ensaios de resistência para certificação quanto ao estado real do rejeito antes do processo de alteamento. Nesta situação o objetivo é uma densidade que determine um comportamento bem próximo à linha de estados permanentes, se possível numa deformação dilatante, dependendo do tipo e comportamento do material, de um percentual de deformação cisalhante maior

⁵ CIU – Consolidado Isotropicamente Não drenado

CID – Consolidado Isotropicamente Drenado



que 20%. Sendo assim, buscou-se alcançar uma constância da deformação residual e tensão efetiva σ' (Maranha, 2016), onde na análise deste rejeito precisou de uma compacidade relativa maior que 112% para tais características descritas acima, para iniciar o estado dilatante.

Durante o alteamento não era praxe de proceder-se o acompanhamento com ensaios de resistência ao cisalhamento, e nem se analisava a camada de material logo após o lançamento, mas sim depois de uma sequência de alteamentos. Nesta situação a camada mais abaixo poderia ficar comprometida a metros de profundidade abaixo da cota original. Portanto é preciso mudar a concepção de alteamentos de barramentos e estudar melhor o comportamento dos rejeitos de mineração, seja em barragens ou até mesmo em pilhas.

O fato de estar ou não saturado, não significa que uma estruturas não possam sofrer um colapso. A água no interior do maciço pode estar em pequena ou grande quantidade, seja devido a chuva, do processo de beneficiamento, no interior dos grãos ou na elevação do lençol freático sob a massa do rejeito depositado. Portanto é preciso estar atento todas às situações condicionantes, pois nenhuma estrutura está totalmente estável, se existir possibilidade por menor que seja de algum evento de ruptura, essa deve ser levada em consideração na análise de estabilidade e segurança das estruturas de depósitos de rejeitos de mineração.

Por fim encerra-se esse artigo, esperando que possa ser útil para os profissionais da área de geotecnia que atuam na elaboração de projetos de obras de disposição de rejeitos de mineração.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus primeiramente pela vida, saúde, dons, oportunidades, tudo que temos e somos.

À nossas esposas, filhos, familiares por fazerem parte de nossa vida e nos permitir fazer parte da vida deles, pelo apoio companheirismo, paciência, incentivo e renúncias para que pudessem estarmos dedicando aos estudos.

A todos da empresa Patrol Investigação Geotécnica Ltda por toda ajuda na realização deste trabalho, por permitir o aprendizado e a realização dos ensaios, por ser o local da prática e do aprendizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Braja, M. Das (2007) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, Thomson, Learning, 2007, Tradução da 6.ed. Norte Americana, São Paulo, Brasil, p. 26-35.
- Maranha, E. das Neves. (2016) *Mecânica dos Solos Estados Críticos Solos Saturados e não Saturados*. 2ed IST Press Ensino da Ciência e da Tecnologia, Lisboa, Portugal, p 270-276.
- Pirete, W. da Silva (2010) *Estudo do Potencial de Liquefação Estática de uma Barragem de Rejeito Alteada para Montante Aplicando a Metodologia de Olson (2001)*, Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, NUGEO, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p 11-23.
- Maxuel. (2016) *Fundamentos Teóricos da Liquefação*, Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/25812/25812_3.PDF>. Acesso em: 09 ago. 2019.
- Nogami, J. S e Villibor, D. F (2003) *34ª Reunião Anual de Pavimentação, Modificação Recentes na Classificação Geotécnica MCT*, Campinas, São Paulo.
- Telles, ACM (2017) *Análise do Comportamento de um Rejeito de Minério de Ferro no Estado de Regime Permanente*, Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COOPE, da, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p 11-23.
- Robertson, P.K and Wride (FEAR), C.E. (1998) – *Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetrometer Test*. Canadian Geotechnical Journal.
- Telles, ACM (2017) *Análise do Comportamento de um Rejeito de Minério de Ferro no Estado de Regime Permanente*, Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COOPE, da, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p 11-23.
- Robertson, P.K and Wride (FEAR), C.E. (1998) – *Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetrometer Test*. Canadian Geotechnical Journal.