

Determinação da Linha de Estado Crítico e Curvas Típicas de Adensamento de Areias por Ensaios Triaxiais CIU_{SAT} e Suas Aplicações

Guilherme de Mattos Galhardo

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte, Brasil,
guilherme.galhardo@pimentadeavila.com.br

Guilherme Henrique da Silva Pinto

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte, Brasil,
guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br

João Lira da Matta Machado

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte, Brasil,
joao.machado@pimentadeavila.com.br

RESUMO: O entendimento do comportamento de areias quando submetidas a diferentes níveis de tensões é de suma importância para antever a resposta do material para diferentes condições de carregamento, bem como a avaliação da sua resposta durante o adensamento e seu potencial de liquefação. Dessa forma, este artigo descreve uma metodologia utilizada para a determinação da linha de estado crítico (*Critical State Line* - CSL) e curvas de adensamento de areias (*Normal Compression Line* - NCL e *Limiting Compression Curve* - LCC) em gráficos de compacidade relativa por tensão confinante, a partir dos resultados de ensaios triaxiais CIU_{SAT} , realizados para amostras moldadas a diferentes condições de compacidade relativa (diferentes índices de vazios). Diante da elaboração do gráfico proposto, foi possível estimar o comportamento do material em análise a partir do acréscimo de tensões devido a modificações na geometria do maciço (alteamentos), sendo possível observar a mudança de comportamento ao cisalhamento de dilatante para contrátil. Apesar de tal mudança no comportamento, constatou-se que devido ao nível de tensões a perda de resistência do material não seria do tipo abrupta (apresentando baixa fragilidade), sendo descartada a possibilidade de ocorrência de liquefação estática.

PALAVRAS-CHAVE: Compacidade Relativa, Linha do Estado Crítico, Liquefação, Fragilidade.

ABSTRACT: Understanding the behavior of sands under different stress levels is of utmost importance to anticipate the material's response to various loading conditions, as well as assessing its response during consolidation and its liquefaction potential. Thus, this paper describes a methodology used to determine the Critical State Line (CSL), the Normal Compression Line (NCL) and the Limiting Compression Curve (LCC) for sands in relative density versus confining stress plots, based on the results of CIU_{SAT} triaxial tests conducted on samples prepared under different relative density conditions (different void ratios). By constructing the proposed chart, it was possible to estimate the behavior of the material under analysis as stress increased due to changes in the dam's geometry (embankments) and observe the transition in behavior from dilative to contractive shear response. Despite this change in behavior, it was found that due to the stress levels, the material's strength loss would not be abrupt (indicating low brittleness), thus ruling out the possibility of static liquefaction occurrence.

KEYWORDS: Relative Density, Critical State Line, Liquefaction, Brittleness.

1 INTRODUÇÃO

De um modo geral, pode-se afirmar que as areias ou materiais arenosos se encontram presentes em praticamente todas as barragens de terra existentes, seja como material drenante aplicado em seu sistema de drenagem interna ou como parte de sua fundação em terreno natural. Tais materiais podem ocorrer tanto em condição natural (solos transportados ou residuais com fração predominante arenosa) quanto como material antropizado (como os sistemas de drenagem), como ocorre em diversas barragens independentemente do método construtivo. Para ambos os casos citados, faz-se necessário estudar as condições em que se encontram tais materiais, para que seja possível avaliar questões relacionadas ao seu comportamento frente a novos carregamentos, ou avaliar o seu potencial de liquefação.

Segundo Dos Santos Junior (2021), a liquefação estática ocorre em solos saturados ou com alto grau de saturação que apresentam perda abrupta de resistência durante o cisalhamento devido à sua tendência à geração de excesso de poropressão positiva em carregamentos não drenados (redução do índice de vazios, caracterizando um comportamento contrátil). Tal fenômeno ocorre com areias e siltes de baixa plasticidade em compacidade fofa (elevado índice de vazios).

Casagrande (1936) define a existência de um índice de vazios crítico ($e_{crit.}$), como estado no qual os solos tendem a atingir ao final de um ensaio de cisalhamento, independentemente de sua condição inicial de compacidade. Ele observou que amostras de uma areia inicialmente fofas tendiam a se contrair ao longo do cisalhamento (redução do índice de vazios), enquanto amostras desta mesma areia, moldadas densas ao início do ensaio, tendiam a se dilatar (aumento do índice de vazios), com ambas atingindo o mesmo índice de vazios ao final do ensaio.

Tendo em vista que o e_{crit} não é único para um determinado material (Taylor, 1948), mas sim varia em função da tensão confinante a qual este se encontra submetido, a linha de estado crítico (*Critical State Line* - CSL) pode ser definida como a envoltória que relaciona os índices de vazios dos estados críticos com a sua respectiva tensão confinante efetiva. Para avaliar a posição relativa do estado de um material em relação ao seu estado crítico, pode ser utilizado o parâmetro de estado (ψ) que consiste na diferença entre o índice de vazios atual e o índice de vazios no estado crítico para uma mesma tensão efetiva ($\psi = e_0 - e_{crit}$).

O comportamento típico das areias (*sand-like soils*) quando submetidas a adensamento também pode ser observado no espaço gráfico de índice de vazios por tensão média (p' ou \log de p'), conforme mostrado na Figura 1. Diferentemente das argilas (*clay-like soils*), que apresentam uma única linha de compressão normal (*Normal Compression Line* - NCL), também denominada reta virgem, paralela a CSL, as areias apresentam uma infinidade de linhas de compressão normais, a depender de seu estado inicial. Para materiais *sand-like*, observa-se também a existência de uma curva de compressão limite (*Limiting Compression Curve* - LCC), para a qual todas as NCL's tendem a convergir, a altas tensões. Nesta região, a CSL se torna retilínea e paralela a LCC, sendo que a razão entre as tensões confinantes efetivas destas, para uma mesma compacidade relativa, apresenta valores entre 2 e 4 (Pestana e Whittle, 1995).

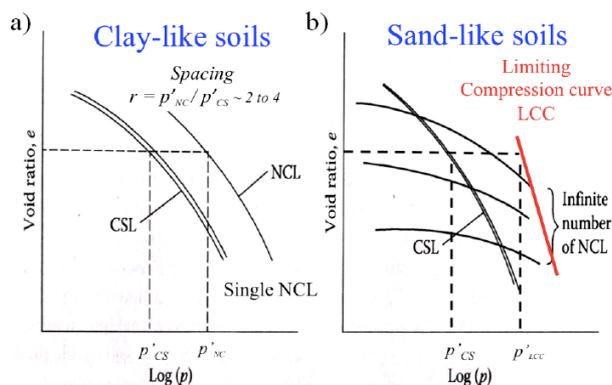


Figura 1 - Esquema típico do comportamento das areias, com a CSL, NCL, e LCC sendo plotadas em gráfico de e vs $\log(p')$ para: a) argilas; e b) areias (Adaptado de Robertson, 2017).

Observa-se na Figura 2 os resultados de ensaios triaxiais CIU_{SAT} apresentados por Jefferies e Been (2016), realizados para três amostras de uma mesma areia, com diferentes compacidades iniciais, em um gráfico de compacidade relativa (CR) por tensão confinante efetiva octaédrica (p') normalizada pela pressão

atmosférica ($p_a = 100$ kPa). Conforme observado pelos autores, a razão entre a tensão confinante efetiva atuante (p'_o) e a tensão confinante efetiva do estado crítico (p'_{cs}), para uma mesma compactidade relativa, apresenta grande influência em sua fragilidade (I_B – *Brittleness Index*), a qual pode ser definida como o percentual de perda de resistência após o pico (Robertson, 2017). A amostra C apresenta um parâmetro de estado (ψ) superior ao da amostra A, porém, como este apresenta uma relação muito inferior de p'_o/p'_{cs} , a perda de resistência observada foi menor, como indicado pelo índice de fragilidade I_B . Este fato se justifica pela proximidade entre o estado do material e a CSL nesta região a altas tensões, resultando em uma perda de resistência menor para atingir o estado crítico, ou seja, menor fragilidade em relação às outras amostras (menor I_B).

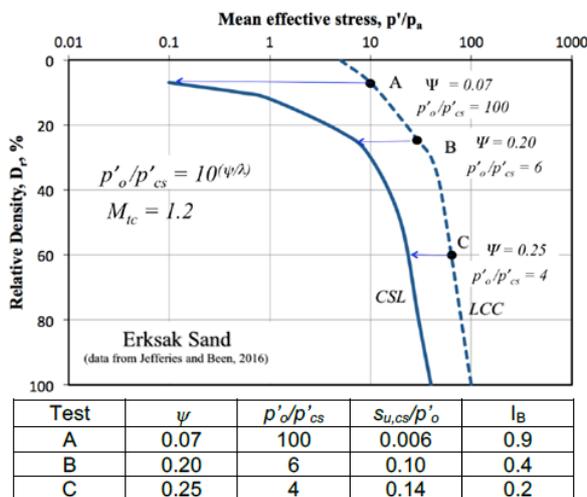


Figura 2 – Posição da CSL e LCC e avaliação de sua influência no comportamento de areias a altas tensões (Adaptado de Jefferies e Been, 2016).

Robertson (2017) avaliou casos históricos de ocorrência de liquefação de rejeitos em barragens, e constatou que o fenômeno não é observado para materiais que apresentem fragilidade menor que 40% ($I_B \leq 0,40$). Em complemento, Sadrekarimi e Olson (2011) observaram que, quando a razão entre as tensões confinantes apresenta valores menores do que 4 ($p'_o/p'_{cs} < 4$), o material apresenta baixa fragilidade, com $I_B < 0,20$. Portanto, os materiais que se encontram nesta faixa entre a CSL e a LCC a altas tensões, mesmo sendo contráteis, apresentam uma perda de resistência reduzida, não sendo suscetíveis a liquefação. Tal conclusão também foi observada por Robertson (2017), conforme apresentado na Figura 3 em que a razão das tensões confinantes é inversamente proporcional a fragilidade.

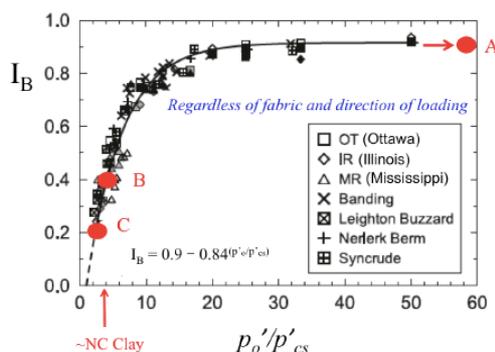


Figura 3 – Relação entre as razões de tensões e a fragilidade (Adaptado de Robertson, 2017).

Dessa forma, o presente artigo tem por objetivo apresentar a metodologia adotada para a determinação da linha de estado crítico (CSL) e curvas típicas de adensamento de areias (NCL e LCC) a partir de ensaios triaxiais CIU_{SAT}. Os ensaios foram realizados para amostras moldadas a diferentes condições de compactidade inicial considerando uma areia pura a ser utilizada como sistema de drenagem de uma barragem. A partir da definição destas curvas em um gráfico de CR por Log (p'/p_a), buscou-se avaliar o comportamento do material frente a novos carregamentos (alçamento) bem como avaliar o seu potencial de liquefação para cada etapa.

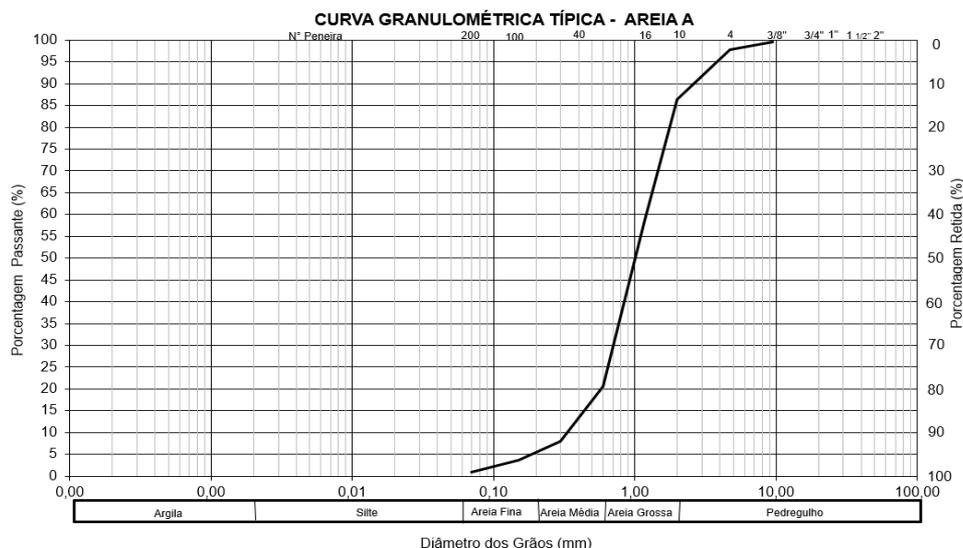
2 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A metodologia desenvolvida neste estudo consiste nas seguintes etapas:

1. Determinação da linha de estado crítico da areia estudada (CSL) a partir dos resultados dos ensaios triaxiais CIU_{SAT} executados que tenham atingido o estado crítico;
2. Avaliação do comportamento das areias frente a etapa de adensamento dos ensaios triaxiais, para as diferentes condições iniciais de compactidade, traçando-se assim, as linhas de compressão normais (NCLs) associadas;
3. A partir das NCLs definidas na etapa anterior, definição da posição aproximada da curva de compressão limite (LCC);
4. Seleção dos casos mais críticos observados em campo em relação a possibilidade de ocorrência de comportamento contrátil (ou seja, pontos onde a areia se encontre com menor compactidade e onde será submetida as maiores tensões confinantes);
5. Tendo como referência as NCLs traçadas a partir das fases de adensamento dos ensaios triaxiais, estimar a NCL representativa da areia do ponto crítico observado em campo, a partir do conhecimento de sua compactidade inicial e da tensão de confinamento atuante sobre esta;
6. Avaliação do comportamento esperado do material, comparando o ponto representativo do caso mais crítico esperado para a condição de campo, em relação a CSL (indicando assim se há tendência a comportamento contrátil ou dilatante), sendo que:
 - Caso seja observada tendência ao comportamento dilatante, a ocorrência de liquefação pode ser descartada para o material;
 - Caso seja observada o comportamento contrátil, avaliar se há possibilidade de ocorrência de perda de resistência significativa. Para tal, foi adotado como referência o índice de fragilidade I_B , seguindo a referência apresentada por Robertson (2017), sendo que:
 - Para $I_B > 0,40$ o material apresenta potencial de liquefação (alta fragilidade); e
 - Para $I_B < 0,40$, a ocorrência de liquefação pode ser descartada para o material (baixa fragilidade).

3 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA CONSIDERADA NO ESTUDO

A Figura 4 apresenta curva granulométrica típica da areia utilizada no presente estudo, denominada como “Areia A”, sendo composta praticamente pela fração areia conforme a classificação proposta pela NBR 7181 (ABNT, 2016). A massa específica dos grãos apresentou valor médio de $2,665 \text{ g/cm}^3$ obtida conforme a NBR 6458 (ABNT, 2016). Foram realizados também ensaios de índices de vazios máximos e mínimos, conforme normas NBR 16840 e 16843 (ABNT, 2020a e 2020b). A média dos índices de vazios máximos obtidos foi igual a 0,819 e mínimos igual a 0,479.



4 DEFINIÇÃO DA CSL, NCL E LCC A PARTIR DOS ENSAIOS TRIAXIAIS CIU_{SAT}

Os ensaios triaxiais foram realizados para três grupos de amostras, moldadas a condições de compactação relativa (CR) distintas. A moldagem foi realizada pelo processo de compactação a úmido (*Moist Tamping*) conforme descrito por Vianna da Fonseca (2021) e os procedimentos de saturação, adensamento e cisalhamento realizados conforme a norma americana D4767-11 (ASTM, 2020). O CR inicial foi determinado a partir dos índices de vazios calculados para cada corpo de prova, comparados aos índices de vazios máximo e mínimo obtidos. Para cada grupo de amostras, foram realizados ensaios para quatro níveis de tensões confinantes (100, 200, 400 e 800 kPa), totalizando 12 corpos de prova. Obteve-se CRs. de 29,1%, 43,8% e 85,0% (mensurados para a etapa de moldagem, anterior a percolação, saturação e adensamento).

Como critério para a determinação do ponto onde o ensaio tenha atingido o estado crítico, foi avaliado o comportamento dos gráficos de tensão desviadora e poropressão vs deformação axial. Foram considerados como representativos do estado crítico os pontos que não apresentaram variações significativas de tensão desviadora e poropressão enquanto se deformavam até o ponto limite do ensaio (deformação axial de 20%). Dos 12 ensaios triaxiais realizados, 8 atingiram o estado crítico ao final do ensaio.

Os pontos representativos do estado crítico de cada ensaio triaxial foram plotados em um gráfico de CR por $\text{Log}(p'/p_a)$, normalizando a tensão efetiva média pela pressão atmosférica. O resultado obtido é apresentado na Figura 5a. Para a definição da CSL nesse espaço gráfico, foi utilizada a equação linear proposta por Bolton (1986) apresentada na Figura 5b. Foi adotado um valor de 8,0 para o parâmetro “Q”, para o ajuste dessa equação aos resultados dos ensaios e k_0 estimado igual a 0,70.

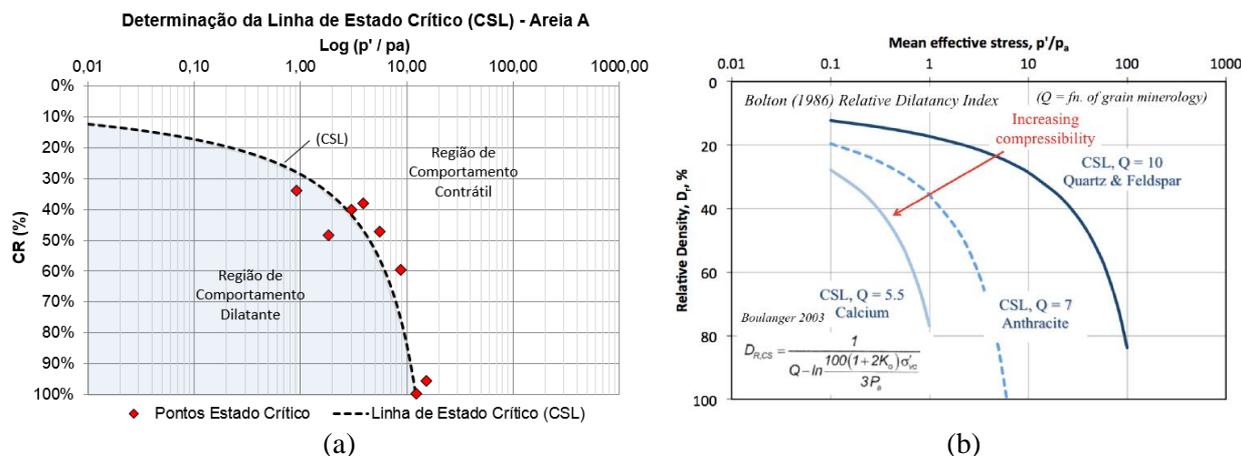


Figura 5 – Determinação da Linha de Estado Crítico (CSL): a) Areia A (foco deste estudo); e b) Equação linear proposta por Bolton (1986) apresentada por Robertson (2017) para a determinação da CSL.

Para a determinação das NCLs e da LCC a partir das informações da fase de adensamento do ensaio triaxial foram plotados neste mesmo espaço gráfico (CR vs $\text{Log}(p'/p_a)$), diferentes momentos dos corpos de prova, sendo:

- (i) Ponto representativo da preparação dos corpos de prova, no momento anterior ao início do ensaio, onde uma compactação inicial é aplicada, apresentando CR conforme executado e tensão confinante nula; e
- (ii) Pontos representativos do final da fase de adensamento de cada um dos corpos de prova, submetidos as diferentes tensões confinantes de ensaio (100, 200, 400 e 800 kPa);

Como a fase de adensamento de todos os quatro corpos de prova tem seu ponto de início em comum, pode-se admitir que todos os corpos de prova são submetidos ao mesmo esforço até que se atinjam 100 kPa de tensão confinante aplicada. Neste ponto, um dos corpos de prova tem sua fase de adensamento concluída, enquanto os demais seguem sendo adensados até a tensão de 200 kPa, onde o ensaio de mais um corpo de prova é concluído, e assim sucessivamente até 800 kPa. O estado final de cada um dos corpos de prova submetidos a fase de adensamento representa diferentes pontos de uma mesma trajetória de adensamento (NCL). Na Figura 6a são apresentados os estados dos corpos de prova descritos acima.

Na Figura 6b são definidas as NCLs representativas para cada um dos grupos de ensaio, que representam corpos de prova moldados a diferentes compactações iniciais. As NCLs foram definidas por equações lineares

a partir dos resultados dos ensaios. Ainda na Figura 6b, a partir das NCLs, pode-se estimar a posição de um trecho da LCC. A partir de comparações entre a posição da CSL e da LCC, no trecho em que estas se desenvolvem aproximadamente paralelas, pode-se inclusive delimitar uma região de comportamento contrátil, porém com perda de resistência reduzida ($I_B < 0,20$) e, portanto, não susceptível a liquefação, conforme discutido anteriormente.

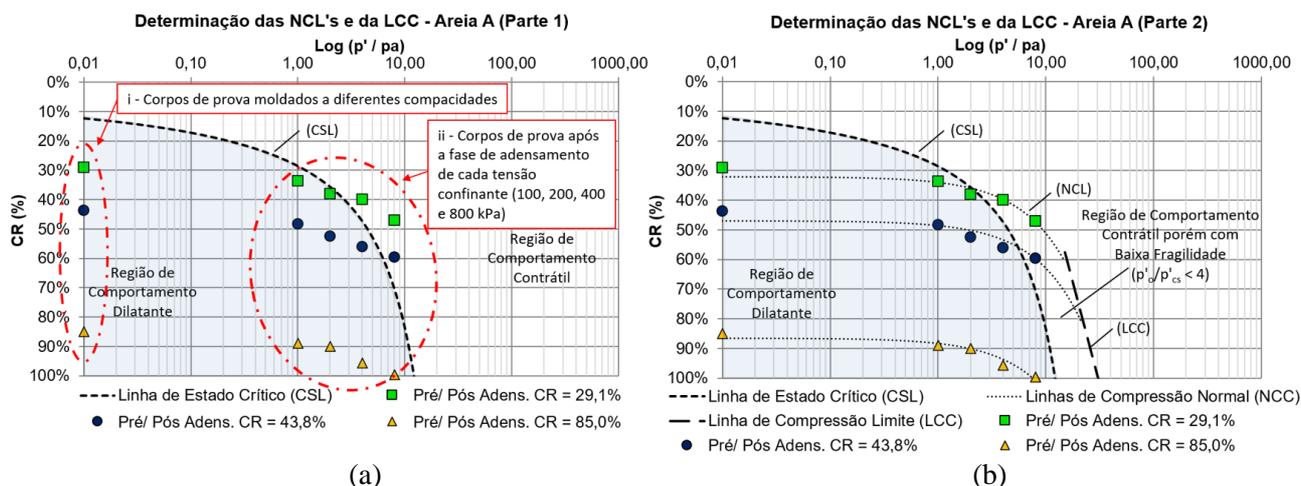


Figura 6 - Determinação das NCLs e da LCC da Areia A: a) Parte 1; b) Parte 2.

O gráfico apresentado na Figura 6b descreve o comportamento esperado para a Areia A em relação a sua dilatância, que varia em função do seu estado de compactação e tensão confinante atuante, comparado a posição da CSL. Da mesma forma, permite avaliar a tendência a perda de resistência do material, quando submetido a um esforço cisalhante. O gráfico permite ainda o conhecimento do comportamento esperado dessa areia, quando submetida a condições de adensamento.

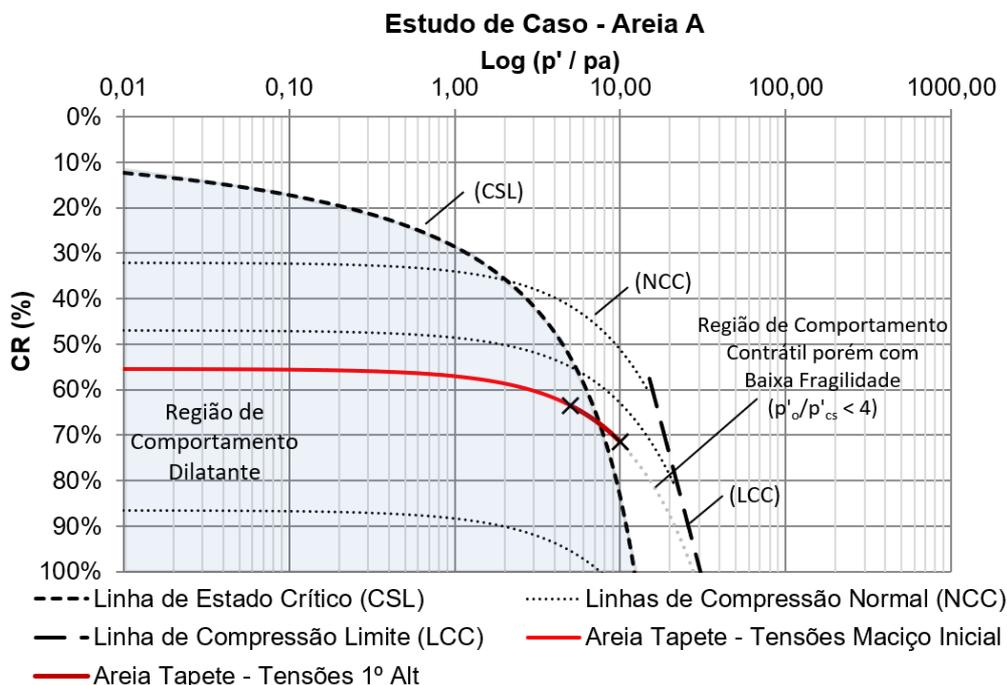
Desta forma, o gráfico apresentado na Figura 6b se torna uma ferramenta útil para o estudo do comportamento do material para diferentes propósitos, como a avaliação de recalques esperados frente a novos carregamentos e avaliação do seu potencial de liquefação, para condições atuais e futuras.

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação, o método desenvolvido será utilizado para validar o CR mínimo definido em especificação técnica para a camada de areia de um tapete drenante a ser executado no contato com a fundação de uma barragem de terra hipotética. O objetivo é avaliar se o CR especificado permitirá que a areia trabalhe de maneira adequada quando submetida às tensões confinantes futuras esperadas. A metodologia permitirá avaliar se o seu adensamento resultará, por exemplo, numa redução da espessura do tapete drenante que comprometerá a seção hidráulica considerada no dimensionamento do sistema de drenagem interno da barragem, ou ainda se esta areia apresentará comportamento susceptível a liquefação, para as tensões confinantes esperadas pós carregamento.

Como dados de entrada da avaliação, foram considerados CR especificado de projeto de 55,0% e tensões confinantes máximas esperadas de 500 e 1.000 kPa, referentes a construção do maciço inicial e do primeiro alteamento da barragem por jusante, respectivamente. O estado da Areia A foi estimado para estas tensões confinantes esperadas a partir da compactação relativa inicial supracitada e da trajetória de adensamento NCL estimada a partir de uma equação linear, tendo como referência as demais NCLs definidas para o material a partir dos ensaios triaxiais CIU_{SAT} (ver item 4).

A Figura 7 apresenta o resultado obtido, no qual pode-se observar a linha de compressão normal (NCL) estimada a partir do CR inicial de 55,0%, com marcações destacando os pontos de interesse das tensões confinantes esperadas de 500 e 1.000 kPa. Neste exemplo, o material do tapete inicia-se abaixo da CSL configurando-se um estado dilatante ao cisalhamento. Após o alteamento, o material cruza a CSL e passa a ter um comportamento contrátil ao cisalhamento, porém plotando dentro da região onde espera-se uma baixa fragilidade como a observada por Jefferies e Been (2015) na Figura 2.



Em relação a deformabilidade, observa-se uma variação do CR ao longo da trajetória, atingindo valores de 64,0% e 72,0%, para as tensões confinantes esperadas de 500 e 1.000 kPa, respectivamente. A partir desses valores de CR, é possível determinar o índice de vazios e calcular a redução de espessura do tapete de areia para cada etapa. O resultado obtido é indicado na Tabela 1, sendo possível observar uma variação reduzida de 0,04 m, a partir da qual não se espera comprometimento do funcionamento no sistema de drenagem, visto os fatores de segurança elevados usualmente considerados para este tipo de dimensionamento.

Tabela 1 – Avaliação da Redução do CR, do Índice de Vazios

Etapa	Tensão Confinante Esperada (kPa)	Compacidade Relativa (CR)	Índice de Vazios (e)	Espessura do Tapete de Areia (m)
Execução Tapete de Areia	0	55%	0,632	1,00
Maciço Inicial	500	64%	0,601	0,98
1º Alteamento	1000	72%	0,574	0,96

Mediante a avaliação apresentada, conclui-se que o material não se enquadra como suscetível a liquefação em ambas as situações (pré e pós alteamento) apesar da sua mudança de comportamento de dilatante para contrátil, bem como apresenta uma redução desprezível na sua espessura que não levaria riscos ao sistema de drenagem interna. Portanto, o CR especificado está adequado frente aos critérios adotados neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma sugestão de metodologia a ser seguida para a determinação da linha de estado crítico (CSL) e curvas típicas de adensamento de areias (NCL e LCC) a partir de ensaios triaxiais CIU_{SAT}, realizados para amostras preparadas a diferentes condições de compacidade inicial. A definição destas curvas típicas se mostra de grande utilidade para o conhecimento do material e avaliação do seu comportamento esperado, para diferentes condições de compacidade e tensão confinante.

Como exemplo, foram avaliadas as condições e comportamentos esperados de uma areia componente de um tapete drenante de uma barragem de terra hipotética, frente a diferentes condições de tensões confinantes impostas ao longo de sua vida útil, em um primeiro momento devido a construção do maciço principal e em um segundo momento devido ao alteamento da estrutura. Foi possível estimar a variação do CR da camada

para cada etapa e, conseqüentemente, a variação do seu índice de vazios e recalque esperado. Foi possível também avaliar a mudança de comportamento do material e sua susceptibilidade a liquefação, para cada etapa.

Cabe destacar que a metodologia aqui desenvolvida pode sofrer modificações para outros casos, que apresentem condições de contorno diferentes, devendo ser avaliada para o caso específico em estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio e o incentivo da Pimenta de Ávila na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2020). D4767-11: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2020a). NBR 16840: *Solo - Determinação Do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2020b). NBR 16843: *Solo - Determinação Do Índice de Vazios Mínimo de Solos Não Coesivos*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2016). NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1995). NBR 7181: *Solo Análise Granulométrica*
- Bolton, M.D. (1986). *The strength and dilatancy of sands*. Geotechnique, 36(1): 65–78
- Casagrande, A. (1936) “*Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills*”. Journal of Boston Society of Civil Engineers.
- Dos Santos Junior, M. (2021) *Avaliação da Susceptibilidade à Liquefação Estática de um Rejeito Silto-Arenoso com Base em Ensaio CPTu*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).
- Jefferies, M.G. and Been, K. (2016). *Soil Liquefaction – A critical state approach*. Taylor & Francis, London, ISBN 0-419-16170-8 478 pages.
- Pestana, J.M. & Whittle, A.J. (1995) *Compression model for cohesionless soils*, Géotechnique, 45(4), 611-633.
- Robertson, P. K. (2017) “*Evaluation of Flow Liquefaction: influence of high stresses*”. Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Based Design (PBD-III), Vancouver, BC, Canada
- Sadrekarami, A., and Olson, S.M. (2011) *Yield strength ratios, critical strength ratios, and brittleness of sandy soils from laboratory tests*. Canadian Geotechnical Journal, 48(3): 493–510.
- Taylor, D.W. (1948) “*Fundamentals of Soil Mechanics*”. New York: John Wiley.
- Viana da Fonseca, A., Cordeiro, D., & Molina, F. (2021). *Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples*. Geotechnics, 1, 1–34.