

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O fenômeno de liquefação em solos, geralmente arenosos ou areno siltosa com pouca ou nula plasticidade, continua sendo um tema de grande importância na engenharia geotécnica sísmica, devido a suas conseqüências muitas vezes catastróficas.

A determinação de parâmetros de resistência e a avaliação do comportamento de um solo carregado sismicamente devido à propagação das ondas cisalhantes, para propósitos de engenharia, resultam um pouco deficientes com ensaios de laboratório comumente realizados. Um ensaio de cisalhamento direto simples cíclico DSS (aparelho de Cambridge) seria o mais recomendável para estes fins já que eles conseguem investigar a rotação das tensões principais durante todo o carregamento e propiciam uma melhor distribuição das tensões no interior da amostra.

A determinação da resistência residual S_r de solos liquefeitos continua sendo um tema continuamente revisado por muitos pesquisadores. Ensaios de laboratório em amostras indeformadas são complicados e caros, e as vezes as amostras não são representativas devido à redistribuição dos vazios que poderiam ocorrer em campo em um solo liquefeito e que não seria observado nas amostras com razão de vazios antes de um sismo. A estimação do S_r também pode ser feito através da retro-análise de casos históricos de deslizamentos por liquefação de fluxo.

Correlações para a estimativa do S_r baseados no ensaio do SPT parecem ser bastante aproximados e práticos. Idriss e Boulanger em 2007 apresentaram uma reavaliação das correlações antes apresentadas por Stark e Mesri em 1992, e Olson e Stark em 2002, entre outros, baseados em casos históricos. A correlação apresentada por Idriss e Boulanger de S_r/σ'_{vo} em função do N_{SPT} , resultou menos conservadora que as correlações anteriormente apresentadas.

As análises para avaliar o potencial de liquefação por meio do método semi-empírico de Seed-Idriss, como verificado neste trabalho, continuam sendo uma

ferramenta útil e prática para a determinação de camadas com alto potencial a liquefazer. Os dados necessários para este tipo de análises são obtidos de ensaios de campo comumente realizados durante as investigações geotécnicas, como: o ensaio de penetração normal (SPT), ensaio de penetração do cone (CPT), medição das ondas de cisalhamento in-situ ou o ensaio de penetração de Becker (BPT).

Neste trabalho usaram-se os dados do ensaio SPT disponíveis do projeto para a avaliação do potencial de liquefação, incorporando-se as últimas revisões dos parâmetros feitas por Idriss e Boulanger em 2004.

O valor de N do SPT, medido em campo, é corrigido por vários fatores que estão em função das características em que foi realizado o ensaio e o teor de finos. É recomendável que as características do ensaio sejam medidas ou fornecidas pela responsável pelas sondagens para a correta avaliação do valor de N . Se esses dados não são disponíveis, é melhor deixar os fatores de correção como 1 (um).

A magnitude de sismo M expressa em momento (M_w) parece ser a mais confiável para ser usado nos cálculos de potencial de liquefação. As outras magnitudes: local ou de Richter (M_L), de corpo (m_b ou m_B) e de superfície (M_s) tem limitações para ser usados dependendo se trata-se de sismos pequenos ou grandes e com a sua distância à superfície e o tempo a serem medidos. O cálculo da magnitude de momento M_w pode ser complicado devido às formulações matemáticas, mas a NCEER em 1998 apresentou uma gráfica onde relaciona as outras magnitudes com M_w .

Realizou-se uma comparação de análises de estabilidade usando um programa de equilíbrio limite, o Slide, e um programa de diferenças finitas, o FLAC. A seção usada nas duas análises foi a seção B. Na análise estática, o Slide deu valores de FS de 1,90 e 1,64 (falha circular e por bloco, respectivamente) e no FLAC o FS encontrado foi de 1,93, indicando as duas análises uma ruptura próxima da linha de interface. As análises pós-sismo, também indicaram ruptura próxima ou sobre a linha de interface, no Slide o FS foi de 0,80 e 0,85 (falha circular e por bloco, respectivamente) e no FLAC o FS foi de 0,63. Como conclusão destes resultados, os dois programas computacionais são bastante aproximados no cálculo de fatores de segurança nas análises de estabilidade de taludes.

As análises de estabilidade pós-sismo, realizadas considerando que todo o solo saturado encontra-se com resistência residual devido a que liquefaz, segundo

os resultados das análises de potencial de liquefação, chegaram à conclusão que o talude é instável com fatores de segurança inferiores a 1,1 usado como critério de segurança.

Das análises dinâmicas pode ser concluir o seguinte:

O programa computacional FLAC-2D requer certa habilidade do engenheiro geotécnico como programador e conhecimento médio dos modelos numéricos a empregar nas suas análises. Devido a isto, o FLAC se torna em uma ferramenta não generalizada, contudo resulta muito útil na hora de modelar condições particulares de um projeto, sobretudo em análises acopladas (ex. fluxo - dinâmica) que outros programas não conseguem representar apropriadamente ou são mais complicados.

O FLAC tem incluído nas bibliotecas um modelo hysterético, modelo que deveria representar melhor o comportamento de amortecimento dos modos naturais de oscilação de um sistema e a razão de cisalhamento do solo a diferentes graus de deformação cisalhante, como descrito por muitos autores. Este modelo hysterético do FLAC, segundo os resultados obtidos, não consegue amortecer o sistema quando o sismo é grande, isto é, quando o registro tempo-aceleração dos dados de entrada tem valores muito altos como no caso estudado $a_{pico}=0,35g$, e é aplicada uma condição de grandes deformações, recomendado para análises de liquefação. Como resultado deste pouco amortecimento, a malha deforma bastante com poucos segundos de sismo aplicado, gerando um problema matemático nos cálculos, sendo impossível continuar.

Uma combinação de amortecimento Rayleigh (2% da frequência dominante) e Local (recomendado por outros usuários do FLAC neste tipo de análises) foi usado para amortecimento do sistema de análise, nos dois modelos Finn e UBCSAND, dando aparentemente um comportamento adequado.

O problema de usar o modelo de Rayleigh para amortecer o sistema é o tempo extenso de análise.

Os modelos usados para avaliação da liquefação, modelo de Finn (incluído no FLAC) e o modelo de UBCSAND do prof. Byrne usaram a mesma malha e condições iniciais para propósitos de comparação.

Os dois modelos para esta aplicação em particular, utilizam um tempo de execução considerável. Demora, nas análises realizadas, para um sismo de 53s,

entre 4 ou 5 dias com o modelo de UBCSAND. O modelo de Finn utiliza um tempo 50% a mais do que o UBCSAND.

Das análises realizadas, observou-se que uma constante importante que afeta muito o tempo de execução é o módulo de deformação volumétrica da água. Comprovou-se que para o módulo real da deformação volumétrica da água, $K_w=1E6KPa$, o tempo de execução resultava exageradamente extensa. Com outros valores menores, $K_w=1E5KPa$ e $K_w=1E3KPa$, observou-se que o tempo melhorou substancialmente, mas para $K_w=1E3KPa$, verificou-se que os incrementos das poropressões geradas foram muito baixas ao término da carga sísmica, tanto que não geraram zonas liquefeitas. Em conclusão, as análises foram avaliadas com o $K_w=1E5KPa$, otimizando-se o tempo de execução do programa e deixando certa rigidez contra a deformação volumétrica da água

O modelo de Finn e o modelo de UBCSAND chegaram à mesma conclusão, grande parte da área saturada da pilha falha por fluxo de liquefação.

Os dois modelos apresentam um incremento súbito das poropressões depois de ter finalizado a aplicação do sismo, na análise pós-sismo, condição estática, mas ainda em condição não drenada.

A zona apresentada como liquefeita pelo modelo de Finn resulta um pouco maior que a do UBCSAND. Esta diferença localiza-se principalmente na zona do pé da pilha.

Como foi comentado, o modelo UBCSAND não considera o efeito da rotação das tensões principais nem as deformações plásticas que ocorrem durante o carregamento reverso de um movimento cíclico. Em consequência, o modelo poderia estar sob-avaliando a liquefação e calculando uma deformação menor do que realmente poderia acontecer. Isto pode responder um pouco a diferença nos resultados com o modelo de Finn.

O modelo UBCSAND2, apresenta uma modificação no primeiro modelo para incluir os dois efeitos: a rotação de tensões principais e as deformações plásticas durante o carregamento reverso. Sugere-se uma comparação do modelo UBCSAND e UBCSAND2.

Sugere-se o desenvolvimento de uma função no FLAC, para o modelo histerético que seja compatível com sismos de grandes acelerações.