

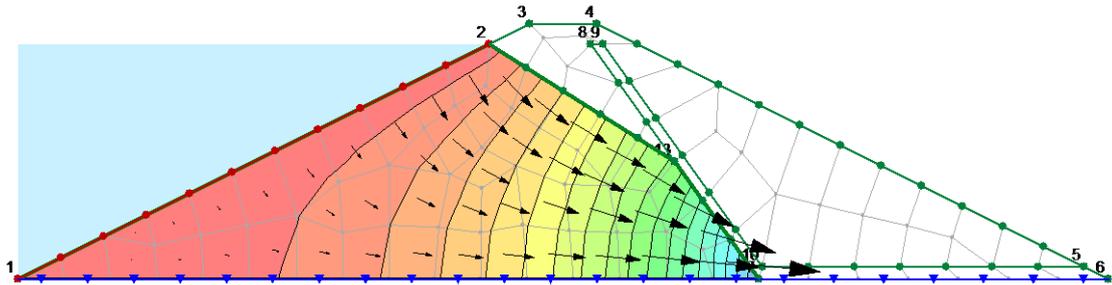
A Figura 1 apresenta um exemplo de desenho de projeto de uma barragem real: Água Vermelha, no Rio Grande, em São Paulo, na divisa com Minas Gerais.

As decisões tomadas nos exercícios aplicam-se tanto àquela barragem quanto à barragem da Figura 2, uma seção transversal muito simplificada para efeito das análises numéricas.

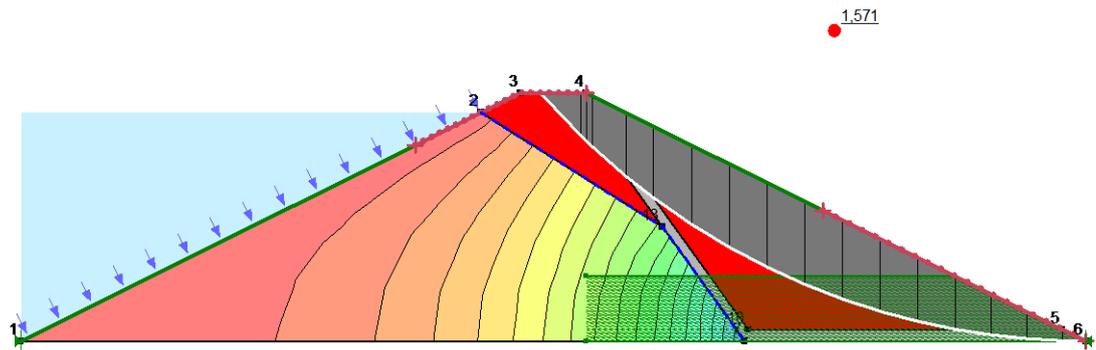
- 1) Determinação do fator de segurança para a seção de barragem apresentada na Figura 1, na etapa **final de construção**?
 - a. Qual dos taludes?
Jusante.
 - b. Por que escolheu esse talude?
Mais íngreme do que o de montante.
 - c. No final de construção, o solo compactado do corpo da barragem encontra-se saturado ou não saturado? Por que?
De maneira geral, não saturado, pois para a grande maioria dos solos as condições ótimas de compactação são atingidas para grau de saturação entre 85% e 95% aproximadamente. Devido ao peso próprio das camadas superiores, é provável que o grau de saturação cresça um pouco com a profundidade.
 - d. Quais as pressões neutras de **regime permanente** e como levá-las em conta na análise de estabilidade?
Final de construção: não houve enchimento do reservatório, portanto não se estabeleceu um fluxo de regime permanente.
 - e. Há sobrepressões neutras, poropressões de regime transiente? Por que?
Sim, porque a **compactação** e o peso próprio das **camadas** subjacentes geram sobrepressões neutras, negativas (sucção) ou positivas, que se dissipam com o tempo. O processo de **ruptura** também pode gerar sobrepressões neutras; estas serão melhor discutidas nas questões seguintes.
 - f. Qual o efeito das sobrepressões neutras na estabilidade?
As positivas reduzem as tensões efetivas. Nas regiões a elas sujeitas o momento mais crítico (menor F) ocorre antes da dissipação das sobrepressões neutras. Quando negativas, ocorre o contrário.
 - g. Como levar em conta as sobrepressões neutras no cálculo do fator de segurança?
Em se tratando de sobrepressões neutras, há sempre duas opções:
 - i. estimá-las e subtraí-las das tensões totais, para chegar às efetivas a serem utilizadas com uma envoltória de resistência de tensões efetivas;
 - ii. reconhecer que às vezes essa estimativa é complicada e utilizar resistências não drenadas, obtidas em ensaios de laboratório conduzidos de forma a gerar sobrepressões neutras similares às de campo.
 - h. Como analisar, afinal, a segurança de final de construção?
De maneira geral, uma distribuição de $r_u = u_T / (\gamma z)$ no corpo da barragem é obtida combinando ensaios de laboratório (ensaios PN) com medidas de campo de u_T em barragens anteriormente construídas (u_T = poropressão transiente ou sobrepressão neutra). Esses valores de r_u são introduzidos no *software* de análise de estabilidade, com resistências expressas em tensões efetivas.

- 2) Quais as outras situações para as quais deve ser verificada a segurança contra a instabilidade dos taludes de barragens?
Operação e rebaixamento rápido.
- 3) Considere a condição de **operação** da barragem da Figura 1, com nível d'água máximo no reservatório.
- Qual o talude mais crítico nessa situação?
Jusante.
 - Por que esse talude?
Porque durante a operação age sobre o talude de montante um empuxo de água estabilizante.
 - Quais as pressões neutras de regime permanente e como levá-las em conta na análise de estabilidade?
Pressões neutras decorrentes do fluxo de água, através da barragem e das suas fundações, do reservatório para os filtros-drenos. Para levá-las em conta na análise de estabilidade:
 - resolver o problema de fluxo no domínio de interesse (vide aulas sobre fluxo em RP)
 - escolher superfície de escorregamento a ser analisada
 - aplicar a essa superfície as pressões neutras de regime permanente já calculadas
 - subtrair as pressões neutras das tensões totais na superfície analisada, para obter as tensões efetivas (de regime permanente)
 - Há sobrepressões neutras, poropressões de regime transiente? Por que?
As sobrepressões neutras geradas pela compactação devem ter-se dissipado durante o enchimento do reservatório. Cabe discutir, no entanto, se outras sobrepressões neutras podem ser geradas.
No processo de ruptura os solos podem sofrer tendências de **expansão** ou **compressão**. Se o solo em questão for **pouco permeável**, a água dos vazios pode não conseguir movimentar-se na velocidade que seria necessária para atender plenamente às tendências de variação volumétrica, gerando sobrepressões neutras e um processo transiente de variação volumétrica. Solos argilosos são pouco permeáveis e suscetíveis a grandes variações volumétricas, portanto... Só não surgirão sobrepressões neutras se o próprio processo de ruptura for de **longo prazo, lento**.
 - Qual o efeito das sobrepressões neutras na estabilidade?
O de sempre: se positivas, reduzem as tensões efetivas, reduzindo F; claro que se houver tendência de expansão na ruptura as sobrepressões neutras serão negativas, e seu efeito favorável.
 - Como levar em conta as sobrepressões neutras no cálculo do fator de segurança?
Em se tratando de sobrepressões neutras, há sempre duas opções:
 - estimá-las e subtraí-las das tensões totais, para chegar às efetivas a serem utilizadas com uma envoltória de resistência de tensões efetivas;
 - reconhecer que às vezes essa estimativa é complicada e utilizar resistências não drenadas, obtidas em ensaios de laboratório conduzidos de forma a gerar sobrepressões neutras similares às de campo.

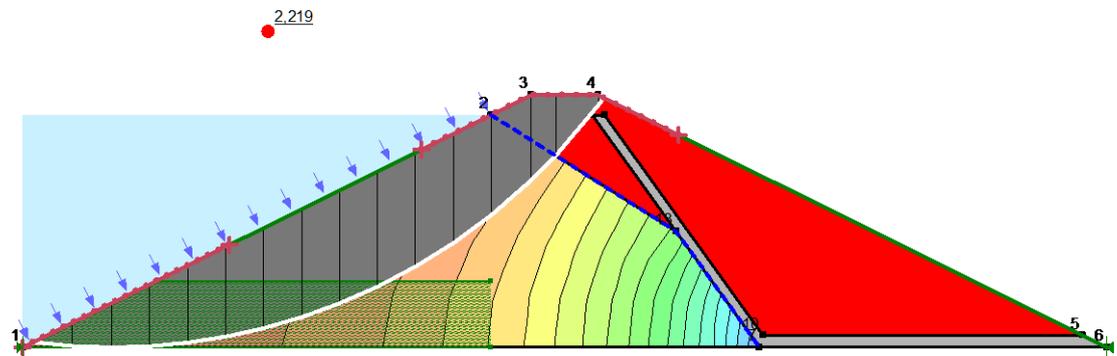
- 4) Considere agora a condição de operação da barragem da Figura 2.
- Resolva numericamente o problema de fluxo em condição de operação.



- Considerando um processo de ruptura lento, de longo prazo, determine numericamente o valor do fator de segurança do talude mais crítico.



- Determine numericamente o valor do fator de segurança do outro talude.

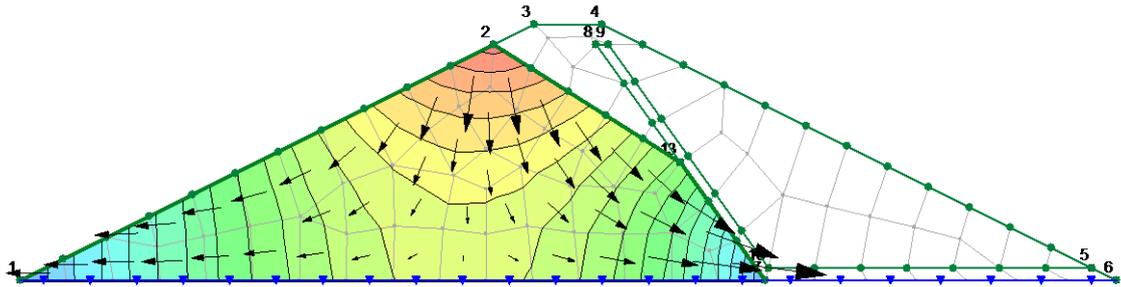


- 5) Considere a condição de **rebaixamento rápido** do nível d'água do reservatório da Figura 1.

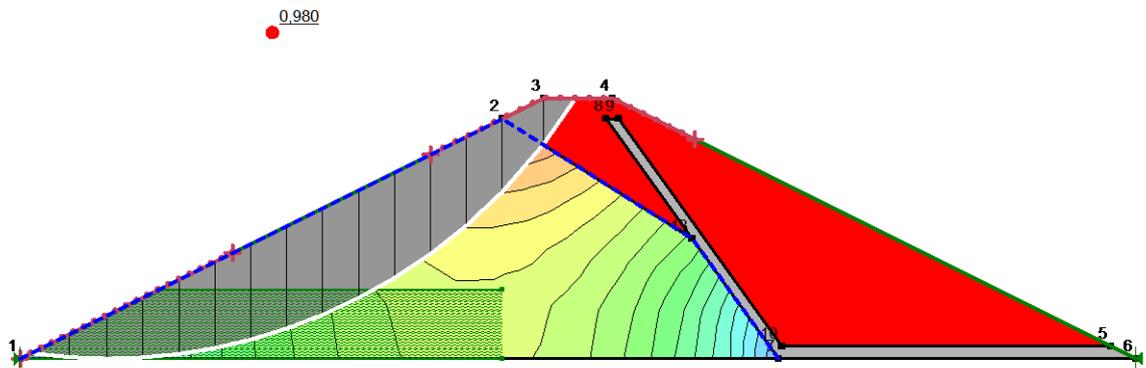
- Qual o talude mais crítico nessa situação?
Montante, ainda que menos íngreme.
- Por que esse talude?
O fluxo tende a refluir para o reservatório, com forças de percolação atuando no sentido da desestabilização do talude de montante. Outra explicação, equivalente à anterior: é reduzida a pressão estabilizadora da água sobre o talude de montante.
- Quais as pressões neutras de regime permanente e como levá-las em conta na análise de estabilidade?
Na verdade estabelece-se um fluxo transiente no corpo da barragem: a água que antes fluía do reservatório para os filtros-drenos, passa a fluir do corpo da barragem de volta para o reservatório e também para os filtros-drenos. Como a situação mais crítica (maiores pressões neutras) corresponde ao instante

- imediatamente posterior ao rebaixamento ($t = 0^+$), podem ser utilizadas as condições de contorno correspondentes a esse instante ($u = 0$ na parte não submersa do talude de montante e, como sempre, na freática e no filtro-dreno), como se fossem permanentes, para calcular as pressões neutras decorrentes do fluxo de água através da barragem (e, eventualmente, das suas fundações). Para levá-las em conta na análise de estabilidade:
- i. resolver o problema de fluxo no domínio de interesse (vide aulas sobre fluxo)
 - ii. escolher superfície de escorregamento a ser analisada
 - iii. aplicar a essa superfície as pressões neutras de regime permanente já calculadas
 - iv. subtrair as pressões neutras das tensões totais na superfície analisada, para obter as tensões efetivas instantâneas (como se fossem de regime permanente)
- d. Há sobrepressões neutras, poropressões de regime transiente? Por que? O próprio rebaixamento rápido configura um fluxo em regime transiente, com alteração da superfície freática e do estado de saturação do material da barragem. Como o instante mais crítico para a estabilidade ocorre imediatamente após o rebaixamento ($t = 0^+$), são consideradas, na análise de estabilidade, as pressões neutras estabelecidas pelas novas condições de contorno nesse instante, como se fossem permanentes. Além disso, porém, no processo de ruptura os solos podem sofrer tendências de **expansão** ou **compressão**. Se o solo em questão for **pouco permeável**, a água dos vazios pode não conseguir movimentar-se na velocidade que seria necessária para atender plenamente às tendências de variação volumétrica, gerando sobrepressões neutras e um processo transiente de variação volumétrica. Solos argilosos são pouco permeáveis e suscetíveis a grandes variações volumétricas, portanto... Só não surgirão sobrepressões neutras se o processo de ruptura for de **longo prazo, lento**.
- e. Qual o efeito das sobrepressões neutras na estabilidade? O de sempre: se positivas, reduzem as tensões efetivas, reduzindo F ; claro que se houver tendência de expansão na ruptura as sobrepressões neutras serão negativas, e seu efeito favorável.
- f. Como levar em conta as sobrepressões neutras no cálculo do fator de segurança? Em se tratando de sobrepressões neutras, há sempre duas opções:
- i. estimá-las e subtraí-las das tensões totais, para chegar às efetivas a serem utilizadas com uma envoltória de resistência de tensões efetivas;
 - ii. reconhecer que às vezes essa estimativa é complicada e utilizar resistências não drenadas, obtidas em ensaios de laboratório conduzidos de forma a gerar sobrepressões neutras similares às de campo.

- 6) Considere agora a condição de rebaixamento rápido da barragem da Figura 2 (que está projetada com 1V:2H em ambos os taludes).
- Resolva numericamente o problema de fluxo em condição de rebaixamento rápido.



- Considerando um processo de ruptura com condições limitadas de drenagem de sobrepressões neutras, determine numericamente o valor do fator de segurança do talude mais crítico.



Observação: este resultado confirma o acerto da prática usual de projetar o talude de montante mais abatido do que o de jusante.

- 7) Você acaba de discutir o efeito das sobrepressões neutras nas análises de estabilidade dos taludes da barragem das Figuras 1 e 2, em três situações críticas para a segurança da barragem.
- Uma alternativa para as análises é fazer uma previsão das sobrepressões neutras e utilizar os parâmetros efetivos (c' e ϕ') de resistência dos materiais envolvidos. Você saberia prever as sobrepressões neutras? Talvez não nos pormenores operacionais, mas o conceito seria:
 - estudar o processo de compactação (final de construção, solo não saturado) e de ruptura, em termos das **variações dos estados de tensão** (falamos bastante em **trajetórias de tensão**; não confundir com envoltórias!);
 - deduzir as **variações de estados de deformação** associadas às variações de estados de tensão;
 - dentre as variações de estados de deformação, destacar as tendências de variações volumétricas;
 - estimar (teoricamente e com validação laboratorial) as sobrepressões neutras decorrentes da impossibilidade de realização imediata das variações volumétricas pretendidas, devido às baixas permeabilidades.

Resumindo: um estudo que guarda semelhanças com o estudo do adensamento, mas que pode ser bem mais complicado devido aos estados de tensão mais complexos e às situações de solo não saturado.

- b. Existe uma outra alternativa? Qual? Quais as suas vantagens e desvantagens?

Sim:

- i. estudar o processo de compactação (final de construção, solo não saturado) e de ruptura, em termos das **variações dos estados de tensão** e das **condições de drenagem**;
- ii. reproduzir em laboratório **trajetórias de tensão e condições de drenagem** similares àquelas do campo (ou mais conservadoras: por exemplo, **sem drenagem**); isso pode, em alguns casos, requerer um ensaio menos simples do que o ensaio triaxial convencional (σ_3 constante, σ_1 crescente) estudado na disciplina;
- iii. admitir que as sobrepressões neutras que, nessas condições, se manifestam no laboratório são idênticas àquelas que se manifestam no campo, produzindo efeitos idênticos sobre a resistência dos solos;
- iv. determinar, a partir dos ensaios de laboratório, a resistência não drenada, resultando em parâmetros de resistência a serem utilizados nas análises de estabilidade em termos de tensões totais.

As incertezas das previsões da alternativa do item a) acima são, em última análise, as mesmas incertezas das hipóteses admitidas na alternativa deste item b). Aqueles que questionam a validade dessas hipóteses e a vantagem conceitual de se trabalhar sempre com uma envoltória de resistência “real”, em termos de tensões efetivas, como na alternativa a), não conseguem refutar o argumento de que as previsões da alternativa a) são bem mais trabalhosas do que a formulação pragmática da alternativa b).

- c. As diferentes alternativas acima implicam diferentes parâmetros de resistência?

Sem sombra de dúvida: ϕ' e, até certo ponto, c' , representam a resistência “real” do solo, em termos de tensões efetivas (observação importante: c' depende da faixa de tensões normais para a qual se fez o ajuste da envoltória retilínea do modelo Mohr-Coulomb); s_u , ou c e ϕ como preferem alguns, definem uma resistência já afetada por sobrepressões neutras geradas por um processo de compactação ou de ruptura.

- d. As diferentes alternativas acima implicam diferentes ensaios de laboratório para determinação dos parâmetros de resistência?

Sem dúvida: no laboratório são realizados ensaios CD, CU, UU, além de PN e outros com trajetórias de tensões similares às de campo em cada situação.

Nas respostas acima alguns trechos foram insistentemente repetidos, e não apenas pela facilidade do “copiar e colar”. A repetição visa a chamar a atenção para a importância dos conceitos discutidos.