

Implicações da Técnica de Aspersão de ar na Estabilidade de Taludes

Fernando A. M. Marinho

Professor Livre Docente, Universidade de São Paulo. USP/SP, SP, Brasil, fmarinho@usp.br

Geraldo Vanzolini Moretti

Engenheiro civil. Moretti Engenharia Consultiva Ltda., SP. Brasil, geraldo@morettiengenharia.com.br

RESUMO. A aspersão de ar (“air sparging”) é uma técnica de remediação de solo realizada no campo com o objetivo de reduzir as concentrações de constituintes voláteis de produtos derivados de petróleo, que estão adsorvidos no solo e dissolvidos na água. A técnica induz uma volatilização, por meio da injeção de ar “puro” diretamente na zona saturada do solo (abaixo do lençol freático). A técnica de aspersão de ar pode induzir uma elevação temporária da pressão da água. Quando a técnica é aplicada nas proximidades do taludes, a elevação da poro-pressão da água poderá comprometer a estabilidade do talude. O artigo discute os aspectos teóricos relacionados com a geração de excesso de poro pressão quando da utilização da técnica de aspersão de ar e apresenta análises numéricas e por equilíbrio limite das conseqüências da aplicação de pressão próximo a um talude. O trabalho conclui sobre a importância da investigação geotécnica e determinação de parâmetros adequados.

PALAVRAS-CHAVE: aspersão de ar, descontaminação de solos, estabilidade de taludes.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de aspersão de ar foi desenvolvida no final da década de 80 com o objetivo de tratar regiões onde existem compostos orgânicos dissolvidos na água do solo, em particular a água abaixo do lençol freático. A técnica envolve a injeção de ar sob pressão na zona abaixo do lençol freático. Esta injeção cria uma pluma de ar no interior da água que leva os compostos volatilizados pelo ar para a zona não saturada.

Diversos pesquisadores observaram que a eficiência do sistema é tanto maior quanto maior for a pluma de ar, sua densidade e uniformidade, além da vazão. (e.g. Baker e Benson, 2007). A pluma depende do tipo de solo que por sua vez também define a vazão possível, pois a vazão possui limitações associadas à pressão de entrada de ar do solo. Quando o solo possui estratificações o ar irá buscar os caminhos de menor resistência (menor pressão de entrada de ar e/ou menor pressão hidrostática), impedindo assim a criação de uma pluma de ar homogênea. O conhecimento das características do maciço é fundamental tanto para a eficiência do processo como para a eventual estabilidade do talude onde o procedimento é aplicado. O presente trabalho apresenta os aspectos necessários para a compreensão dos fenômenos envolvidos com a técnica de aspersão de ar e seus eventuais efeitos na estabilidade de taludes.

2 Considerações teóricas sobre a técnica de aspersão de ar

2.1 Conceito básico

A aspersão de ar (“air sparging”) é uma técnica de remediação de solo realizada no campo com o objetivo de reduzir as concentrações de constituintes voláteis de produtos derivados de petróleo, que estão adsorvidos no solo e dissolvidos na água. A técnica induz uma volatilização, por meio da injeção de ar “puro” diretamente na zona saturada do solo (abaixo do lençol freático). Com a passagem do ar os hidrocarbonetos dissolvidos na água mudam de fase transformando-se em vapor. Este ar é levado para a zona não saturada do solo onde é captado por um sistema de vácuo (pode-se utilizar outro sistema em alguns casos). A Figura 1 ilustra o processo de aspersão de ar.

O processo de aplicação de ar induz a saída da água dos poros do solo em função da pressão que é aplicada. A saída de água depende da capacidade do solo de reter água nos seus poros e da posição do ponto de injeção em relação ao nível d’água.

A técnica de aspersão de ar pode induzir uma elevação temporária da pressão da água, que poderá comprometer a estabilidade do talude. Além disto, os procedimentos de aplicação de pressão de ar podem induzir uma ruptura pneumática do solo.

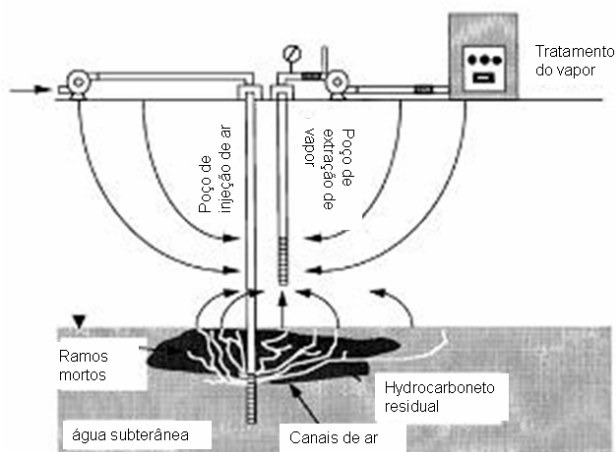


Figura 1 – Representação esquemática do sistema de aplicação da técnica de “air sparging” in situ (modificado de Johnson, 1998).

2.2 Pressão de entrada de ar em solos

Ao aplicar uma pressão de ar a um solo saturado a água irá se deslocar apenas quando a pressão de ar vencer as forças que seguram a água dentro do sistema poroso do solo. Estas forças são predominantemente capilares. Desta forma, define-se a pressão de entrada de ar como sendo a diferença entre a pressão de ar (u_a) e a pressão da água (u_w) que induz a saída de água do solo dessaturando o mesmo. No caso da aplicação da técnica de aspersão de ar esta dessaturação faz com que o ar passe continuamente para a zona não saturada.

2.3 Influência das características do maciço na pressão de injeção

O ar injetado abaixo do nível d’água irá sair para a zona não saturada em função das características do solo acima do ponto de injeção. Mesmo que o solo mais impermeável esteja acima do nível de água o mesmo pode se encontrar saturado por capilaridade. Nos dois casos haverá uma dificuldade para a saída do ar, caso este solo possua uma pressão de entrada de ar superior a do solo abaixo do nível d’água. Esta dificuldade pode induzir uma elevação da pressão de água. Isto pode causar uma redução na eficiência do método.

Deve-se verificar a existência de estratificação do solo na região da implementação da descontaminação. O ar irá buscar os caminhos de menor resistência (menor pressão de entrada de ar e/ou menor pressão hidrostática).

Caso o solo tenha uma micro-estrutura predominante (solos mais finos) o ar pode se

espalhar lateralmente. Este espalhamento pode causar problemas tanto relativos à liberação de vapor em locais não previstos, como elevar pressões em estruturas ou regiões onde o talude possui um estado de tensão menor. Salienta-se que a aplicação da técnica de aspersão de ar não é recomendada em locais próximos a regiões com subsolos, tubulações de esgoto ou outras estruturas enterradas, a menos que um sistema de extração de vapor esteja associado (USEPA, 1994).

2.4 Desenvolvimento de pressão de água durante a injeção de ar

A injeção de ar e seu efeito na elevação da pressão de água dependem das características do maciço conforme mencionado anteriormente. No caso de um maciço homogêneo a elevação da pressão da água se dá conforme ilustrado na Figura 2.

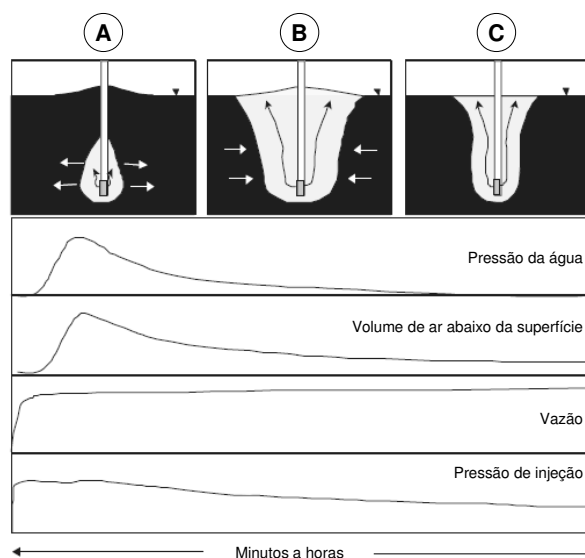


Figura 2 – Modelo conceitual durante o início da aplicação de ar em meio homogêneo (modificado de Johnson et al., 2001).

À medida que a pressão de ar é aumentada para vencer a pressão hidrostática, a água é deslocada para a zona não saturada. Como a água está fluindo do ponto de injeção de ar, afastando-se dele, existe um gradiente hidráulico a partir do ponto de injeção. Observa-se então um aumento da pressão de água, que se reduz com a distância em relação ao ponto de injeção. O valor da pressão e a velocidade de elevação dependem da permeabilidade do solo, da pressão de injeção e da vazão de ar. Um pouco antes de o ar encontrar a zona não saturada a pressão de água passa por um valor máximo (Figura 2A). Após este ponto o ar é “dissipado” para a zona não saturada. A partir daí a pressão da água começa

a se reduzir (Figura 2B). No caso de um maciço homogêneo e de alta permeabilidade ($K > 10^{-3}$ cm/s) em questão de minutos ou horas o regime de fluxo pelos canais maiores fica em regime permanente (Figura 2c).

No caso de um maciço heterogêneo as pressões desenvolvidas podem ser bem maiores e de maior duração. O desenvolvimento da pressão e sua dissipação podem ser observados na Figura 3. Este processo segue o mesmo padrão do caso do maciço homogêneo. No entanto, os níveis de pressão de água desenvolvidos podem ser significativamente diferentes.

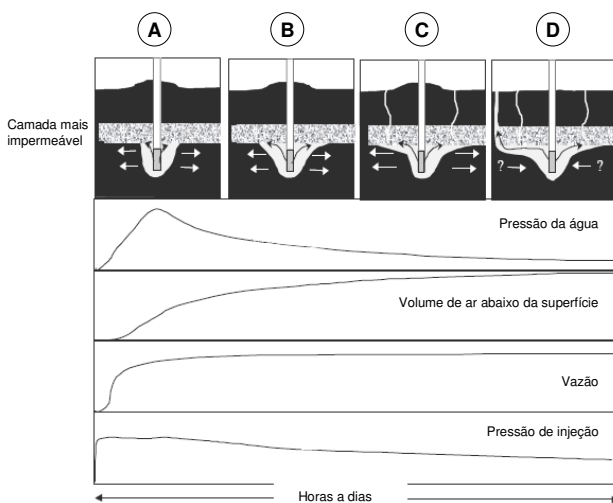


Figura 3 - Modelo conceitual durante o início da aplicação de ar em meio heterogêneo (modificado de Johnson et al., 2001).

A presença de uma camada mais impermeável pode causar uma elevação significativa da pressão da água (1 a 3mca) (e.g. Johnson et al., 2001). Nestes casos a pressão pode levar alguns dias para se dissipar, ou só se dissipar quando o sistema for completamente desligado.

2.5 Níveis de pressão de ar

2.5.1 Fratura pneumática

A fratura pneumática ocorre quando a injeção de ar no solo for superior às tensões *in situ*. Este fenômeno está associado a vazões induzido superiores à permeabilidade do material. A fratura pneumática além de reduzir a eficiência da técnica de aspersão de ar pode induzir a criação de zonas de baixa resistência.

A pressão (em kPa) que pode causar fratura pneumática vale aproximadamente:

$P_{frat.} = 16H$, onde H é a profundidade da injeção de ar em metros.

Este valor pode ser menor caso a injeção esteja em uma zona onde não haja confinamento lateral suficiente.

2.5.2 Pressão de injeção

A pressão mínima de injeção (P_{min}) deve ser a soma da pressão de entrada de ar ($P_{ea} = u_a - u_w$) do solo com a pressão hidrostática (P_h) no ponto de injeção, ou seja:

$$P_{min} = P_{ea} + P_h$$

A relação entre a pressão de entrada de ar e a pressão hidrostática deve ser considerada na análise para evitar a ruptura pneumática do solo.

Se $\frac{P_{ea}}{P_h} \gg 1$ existe risco de ruptura pneumática do solo

Se $\frac{P_{ea}}{P_h} \cong 1$ A pressão de entrada de ar possui uma influência no movimento do ar.

Se $\frac{P_{ea}}{P_h} \ll 1$ A pressão de entrada de ar não possui uma influência significativa no movimento do ar. Em geral esta é a condição para o adequado funcionamento da técnica, independentemente da questão de estabilidade de taludes.

A pressão de injeção deve vencer a pressão hidrostática da água (P_h) acima do ponto de injeção (0.1atm para cada metro de coluna de água) mais a pressão de entrada de ar do solo (P_{ea}). O valor informado de pressão a ser aplicada (8 atm) é significativamente maior que a pressão hidrostática em muitos pontos do talude. Salienta-se que uma pressão significativamente maior que P_h pode levar a ruptura pneumática, além de gerar elevada pressão de água. Na Figura 4 são apresentadas as pressões atuantes no processo de expulsão de água do solo pela aplicação de pressão de ar.

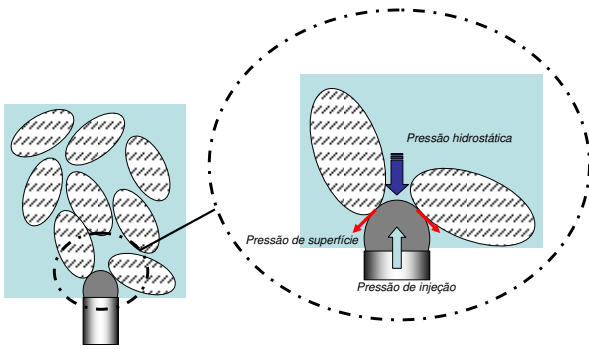


Figura 4 – Ilustração das pressões atuantes do processo.

3 Recomendações relativas à estabilidade de taludes

3.1 Acompanhamento do processo

Dependendo do perfil geotécnico duas possibilidades podem existir:

- A água a ser deslocada pela aplicação de pressão de ar não encontra solo com condutividade hidráulica menor acima do nível d'água. Desta forma o aumento da pressão da água seria muito localizado, pequeno e por um período muito curto de tempo.
- A água a ser deslocada encontra uma camada mais impermeável acima do ponto de injeção, baixo no nível de água ou imediatamente acima deste. Isto causaria um efeito tampão que geraria pressões positivas na água. Estas pressões podem se estender por vários metros em relação ao ponto de aplicação, e podem ser elevadas, podendo se manter por vários dias.

Para a maior segurança do talude e ainda para o controle da efetiva eficiência do processo é necessário um monitoramento. Este monitoramento deve ser feito por meio de piezômetros elétricos. A Figura 5 ilustra o sistema de monitoramento com piezômetros.

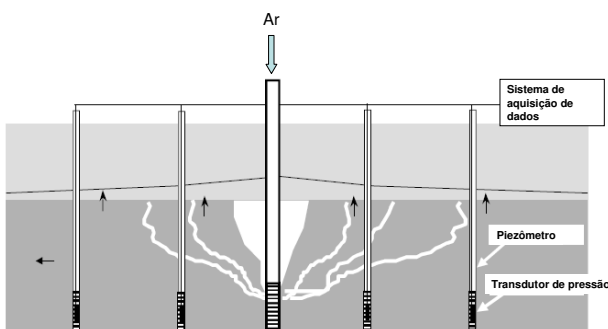


Figura 5 – Uso de transdutores de pressão para o monitoramento da pressão de água (modificado de Johnson et al., 2001).

O próprio controle do processo de tratamento pode servir de indicativo para problemas de elevadas pressões de água. A necessidade de aumento excessivo da pressão de injeção pode sugerir a presença de camadas com pressão de entrada de ar muito elevada. A tentativa de ultrapassar o valor de entrada de ar pode levar a um aumento indesejado da pressão da água. O controle da pressão aplicada deve ser feito com rigor, de modo a não ultrapassar um valor que deve ser pouco maior que a pressão hidrostática ($P_{inj} = P_h$), tendo em vista que o método só é eficiente se a pressão de entrada de ar do solo for baixa.

3.2 Análise da estabilidade de taludes

Com o objetivo de avaliar o efeito de um sistema de injeção de ar instalado e operado próximo a um talude, foram feitas análises numéricas e de equilíbrio limite (Bishop simplificado) em um talude hipotético.

Os estudos de estabilidade de Taludes foram efetuados com o auxílio de um software que considera os resultados das análises de percolação em função do emprego do procedimento denominado 'air sparging'. Utilizou-se o programa computacional denominado Slide[®], que satisfaz a condição anterior.

O Software permite realizar análises de fluxo utilizando o método dos elementos finitos, para solos saturados e não-saturados, tanto para regime permanente como transiente. Os resultados das análises de fluxo são exportados e utilizados nas análises de estabilidade de taludes.

A Figura 6 apresenta as características do talude estudado. O perfil simula um corte, onde na parte superior tem-se um material siltoso (material 1), sobrejacente a uma camada de material argiloso (material 2) e abaixo dela outra camada siltosa (material 3). Os parâmetros utilizados nas análises de estabilidade estão apresentados na Tabela 1.

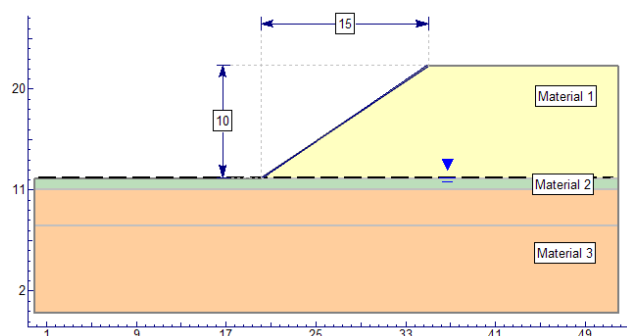


Figura 6 – Geometria do talude analisado e superfície crítica sem a aplicação de ar.

Tabela 1 - Parâmetros Geotécnicos do Solo

Solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Mat 1	19,0	8,0	25
Mat 2	16,0	15,0	15
Mat 3	19,0	8,0	25

Para avaliar o efeito da aplicação de ar simulou-se a operação de um sistema de três poços instalados e operados conforme ilustra a Figura 7.

Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros adotados para a análise de fluxo. Para os solos acima do nível de água adotou-se uma função de permeabilidade com base do modelo de van Genuchten (1980).

3.2.1 Resultados das análises

A partir da geometria do talude e dos parâmetros adotados, realizaram-se análises de fluxo e estabilidade global do talude, para avaliar a variação do fator de segurança (FS) em função da diferença entre a pressão de injeção e a pressão hidrostática. Esta diferença simula diferentes valores de entrada de ar do solo. Foram utilizadas as seguintes pressões: 30 kPa, 50 kPa, 80 kPa e 100 kPa.

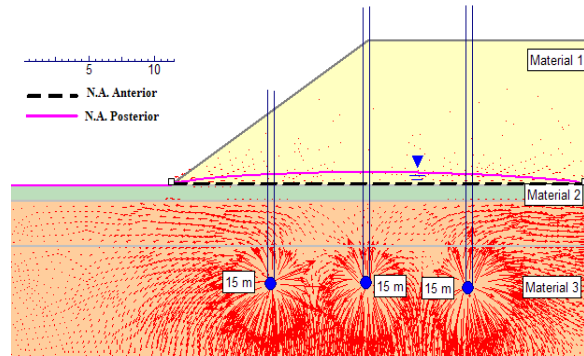


Figura 7 – Sistema de pressão em operação

A pressão em um ponto específico induz o fluxo de água gerando um aumento do nível de água. Para ilustrar o comportamento obtido nas análises são apresentados os casos para as pressões de 50 kPa (Figura 8) e 100 kPa (Figura 9). Observa-se nas duas situações um aumento do nível de água que reduz o FS de 1,28 para 1,16 no caso da pressão de entrada de ar de 50 kPa e para 1 no caso da pressão de ar ser 100 kPa.

Tabela 2 - Parâmetros Hidráulicos do Solo

Solo	K_s (m/s)	Alpha (1/m)	n
Mat 1	10^{-3}	0,33	1,37
Mat 2	10^{-5}	0,10	1,10
Mat 3	10^{-3}	0,33	1,37

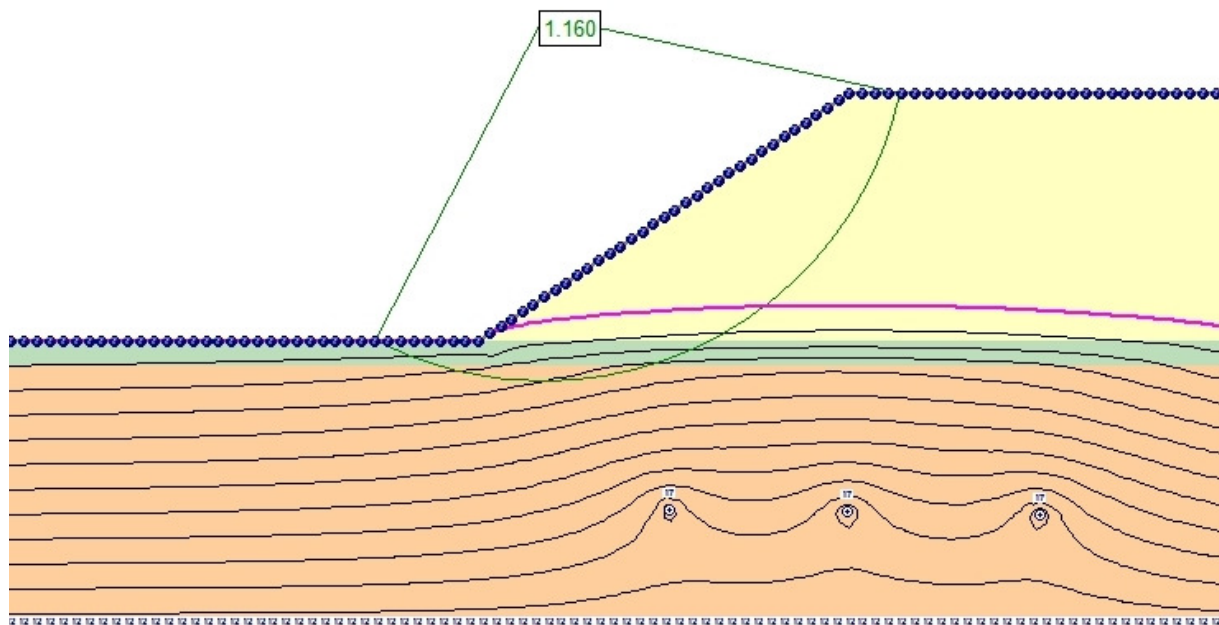


Figura 8. Comportamento da carga hidráulica durante a aplicação de $P_{ea} = 50\text{kPa}$ (FS=1.16).

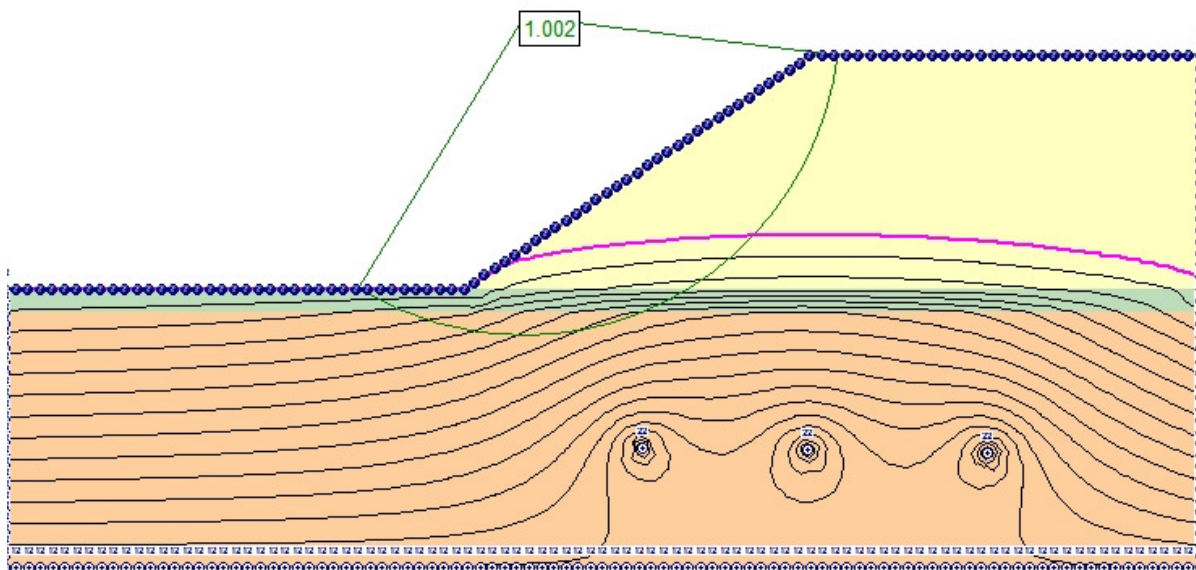


Figura 9. Comportamento da carga hidráulica durante a aplicação de $P_{ea} = 100\text{kPa}$ ($FS=1.00$).

Na Figura 10 é apresentado um resumo das análises em termos de fator de segurança para as diferentes pressões utilizadas. Observa-se a redução do FS com o aumento da pressão. Salienta-se que solos com valores de entrada de ar muito elevado são solos que tendem a ter condutividades hidráulicas baixas e, portanto não seriam adequados para a técnica da aspensão de ar.

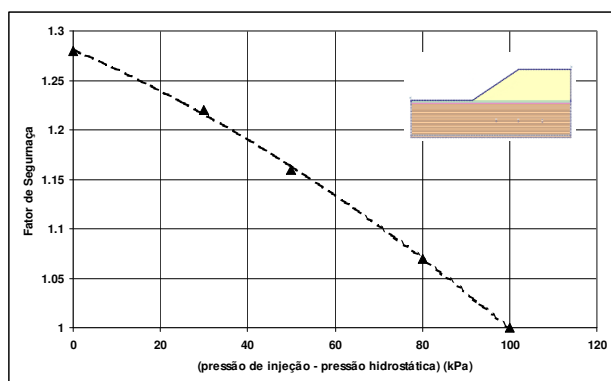


Figura 10. Variação do Fator de Segurança em função da Pressão de entrada de ar (P_{ea})

4 Conclusões

A aplicação da técnica de aspensão de ar não deve ser aplicada sem a realização de uma investigação geotécnica que permita identificar camadas com baixa permeabilidade. Estas camadas podem criar

condições para a elevação do nível de água durante a aplicação de ar, de modo a instabilizar o talude.

É fundamental determinar o valor da pressão de entrada de ar do solo a ser tratado e das camadas acima do mesmo.

5 Referências

- Baker, D. M. e Benson, C.H. (2007). Effect of system variables and particle size on physical characteristics of air sparging plumes. *Geotech Geol Eng* (2007) 25:543–558.
- Johnson, P. C. (1998). Assessment of the Contributions of Volatilization and Biodegradation to in Situ Air Sparging Performance. *Environmental Science & Technology* vol. 32, no. 2
- Johnson, R.L.; Johnson, P.C.; Johnson, T.L.; Thomson, N.R.; Leeson, A. (2001). Diagnosis of In Situ Air Sparging Performance Using Transient Groundwater Pressure Changes during Startup and Shutdown. *Bioremediation Journal*, Volume 5, Issue 4 October, pages 299 – 320.
- USEPA (1994). How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. EPA 510-R-04-002. United States Environmental Protection Agency.
- Van Genuchten (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44. pp.892-898.