

ROTINA DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE ATERROS ULTRALEVES SOBRE SOLOS MOLES UTILIZANDO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NA SUPERESTRUTURA

Victor Nahum ¹; Fernando Luiz Lavoie ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Solos moles são uma constante preocupação na Construção Civil. A execução sobre este necessita de cuidados especiais, visto que pode acarretar em recalques diferenciais elevados e até ruptura de um plano, fatores que prejudicam a estabilidade da estrutura. Uma solução já bastante utilizada no exterior, mas que vem ganhando seu espaço no cenário nacional é a utilização de EPS (poliestireno expandido ou “ISOPOR®”). Devido ao seu baixo peso específico, a construção de aterros com este tipo de blocos reduz drasticamente os recalques diferenciais, além de garantir leveza e segurança à estrutura. Concomitantemente, o poliestireno expandido necessita de algumas atenções especiais quando tratamos de sua durabilidade e qualidade. Estudos recentes realizados com este método construtivo concluiu que, apesar das preocupações extras por conta dos blocos, o método foi capaz de reduzir em aproximadamente 50% do tempo. Através de uma nova rotina de cálculo foi possível verificar a estabilidade do aterro e garantir com certa precisão o recalque sofrido por este. O método desenvolvido retrata bem a realidade e pode ser usado como forma de dimensionar este novo método construtivo que está em seus primeiros passos no Brasil.*

Introdução

Nas últimas décadas as tecnologias têm avançado de forma única. A velocidade da informação, e a possibilidade de reproduzi-la em qualquer lugar do planeta, tem acelerado os processos de conhecimento e uso de novas tecnologias. A alguns anos, países europeus desenvolvidos têm usado blocos de poliestireno expandido para reduzir o peso geral da estrutura. Além de inédito, o método também reduz cerca de 50% do tempo de obra. Essa nova tecnologia chamou a atenção de algumas construtoras ao realizarem aterros com EPS. A construtora Norberto Odebrecht, por exemplo, realizou sua primeira obra com a tecnologia após minuciosa avaliação. A Rota das Bandeiras se tornou uma das primeiras obras de infraestrutura rodoviária a utilizar o método.

Apesar das vantagens do uso do EPS como aterro ultraleve sobre solos moles, a tecnologia ainda é pouco difundida no país. A falta de métodos construtivos, métodos de cálculo e experiência em campo fazem com que este método construtivo seja, todavia, pouco utilizado na construção civil brasileira. Este ponto foi um dos balizadores para explicar o motivo deste estudo, buscar desenvolver um roteiro de cálculo que se torne viável e útil ao usuário projetista.

A construção sobre solos moles sempre foi uma realidade preocupante para os projetistas e investidores, visto que a necessidade de tratamentos ao solo, devido à sua baixa capacidade de carga e sua elevada compressibilidade, atrasaria demais a obra, encareceria os preços orçamentários e dependeria de boas condições climáticas. Porém, as substituições destes métodos, assim como aterros convencionais, podem reduzir tempos e custos da obra em geral.

O EPS é uma esfera de plástico polimerizado com etileno em água. Com a injeção de pentano, a esfera reage com o agente, expandindo seu volume incrivelmente, chegando a cerca de 50 vezes seu tamanho original. Constituído de 98% de ar, o EPS é um material de peso específico muito reduzido. As obras, então, tornam-se bem mais leves, e recebem um avanço na praticidade. Este trabalho visa elaborar um roteiro de cálculo para o dimensionamento de aterros ultraleves, buscando expandir e multiplicar o conhecimento sobre este tema.

Material e Métodos

O roteiro de cálculo estudado neste artigo não requer conhecimentos prévios em programação ou cálculo avançado. Isso ocorre, pois, todo o método está por desenvolver-se em Excel Microsoft. Esta ferramenta mundialmente famosa, possibilita a qualquer usuário fazer uso, abrangendo instruções e comandos simples para seu manuseio.

O roteiro de cálculo desenvolvido pelo autor conta com sete abas diferentes, cada uma abordando um tema diferente na análise de estabilidade de aterros sobre solos moles. A primeira aba, “Introdução”, expõe algumas dicas de utilização do método, explica como funciona e quais cuidados devem ser tomados. A segunda aba, “Sondagem”, faz uso de uma Macro para caracterizar uma sondagem feita em campo. Os valores a serem fornecidos serão futuramente utilizados nos métodos. A terceira aba conta com o auxílio do usuário para caracterizar o formato do aterro, suas dimensões, etc. A quarta aba conta com a caracterização da estrutura do pavimento, assim como uma simplificação para o dimensionamento da sobrecarga cíclica (veículos). Em seguida, apresentam-se as análises de estabilidade e de recalque. Os métodos utilizados foram a Estabilidade por Fellenius, Sousa Pinto e uma breve análise de subpressão. Dentre os métodos de recalque foram analisados os recalques devido ao adensamento Primário e Secundário, além do Instantâneo e o Não Instantâneo.

Método de estabilidade por Fellenius

As análises de estabilidade de aterros são feitas a partir do método de equilíbrio limite, também conhecido como método de Fellenius. Em sua análise, Fellenius admitiu uma superfície circular de ruptura e igualou os momentos atuantes e resistentes. A equação que obteve era simples, pois a resistência era puramente coesiva, o que facilitou a pesquisa do círculo crítico. (MASSAD, 2003).

O método de Fellenius considera, também, que a resistência ao cisalhamento iguala-se à coesão não drenada, $\tau_{\max} = Su$, e que a tensão que leva esse terreno a ruptura é:

$$qr = 5,5 \cdot c \quad (1.1)$$

Onde c tem o mesmo valor da coesão Su . A figura 1, a seguir, apresenta a solução de Fellenius para um carregamento uniforme Q , e o terreno circular de ruptura sob o carregamento. Unindo as duas equações temos:

$$q_{adm} = \frac{5,5 \cdot Su}{FS} \quad (1.2)$$

Onde: FS é o fator de segurança da obra, usualmente estabelecidos como 1,5.

Toda a teoria criada por ele, determina que existe uma altura crítica, H_c , que leva a ruptura do terreno de fundação. Este valor pode ser obtido a partir da equação a seguir, onde o peso específico do aterro é chamado de γ_{at} .

$$H_c = 5,5 \cdot \frac{Su}{\gamma_{at}} \quad (1.3)$$

Porém, este valor só é válido se as espessuras (D) da camada de solo mole são elevadas. Tendo a equação abaixo, o círculo crítico não pode se desenvolver, ou seja, é possível aumentar a altura do aterro, atingindo valores maiores que o próprio H_c .

$$D < \frac{b}{0,785} \quad (1.4)$$

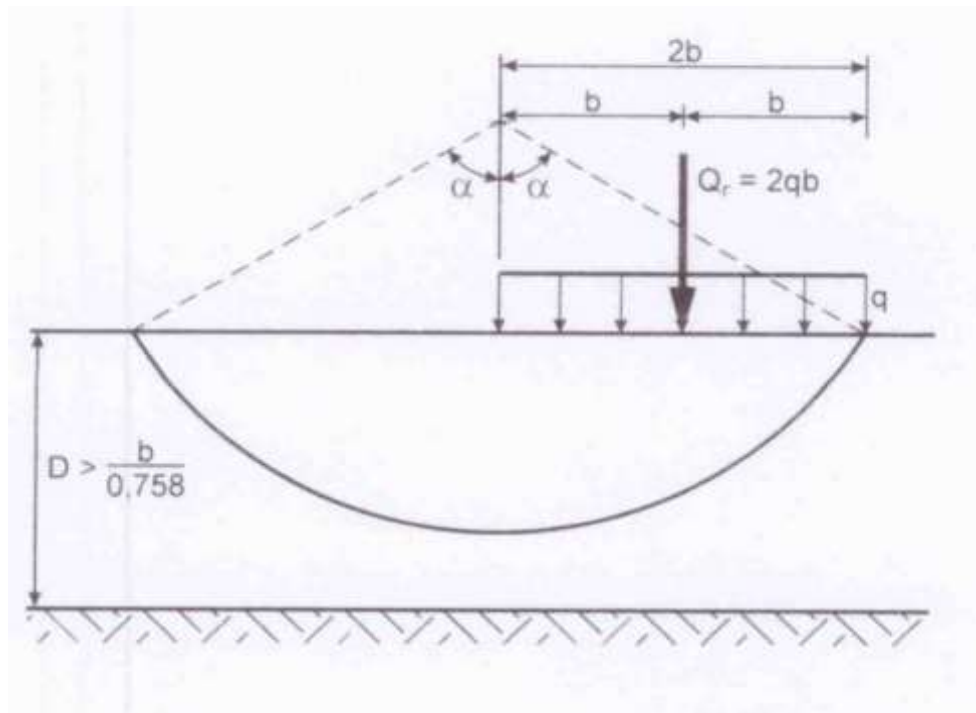


FIGURA 1 – Carga distribuída (q) sobre a superfície de uma camada de solo mole, com coesão constante e de espessura (D). É apresentado o plano de ruptura deste exemplo.

Método de estabilidade por Sousa Pinto

O método de estabilidade por Sousa Pinto foi desenvolvido em 1966 levando em consideração a coesão linearmente crescente com a profundidade. Assim:

$$Su_{proj.} = c_0 + c_1 \cdot z \quad (2.1)$$

Onde c_0 é a coesão na superfície do terreno e c_1 é a taxa de crescimento da coesão que cresce no decorrer da profundidade, z . Neste tipo de análise, os círculos críticos tendem a ser mais superficiais. Sousa Pinto definiu que a carga que leva à ruptura do aterro, deve ser igual ao fator de carga (N_{co}) multiplicado pela coesão da superfície (c_0). Portanto, tem-se:

$$q_r = c_0 \cdot N_{co} \quad (2.2)$$

Tendo-se a carga que leva à ruptura e a carga admissível do aterro, podemos resolver a razão matemática resultando-nos o Fator de Segurança da estrutura. O autor também definiu que quanto maior a espessura da camada de solo argiloso, menor o valor de N_{co} . E portanto, menor a altura de aterro que se pode lançar sobre este. Para tanto definiu dois cenários distintos:

Para $D = \infty$:

$$N_{co} = 6,1 + 2,1 \frac{c_1 d}{c_0} \quad \text{para} \quad \frac{c_1 d}{c_0} \leq 2 \quad (2.3)$$

$$N_{co} = 7,0 + 1,4 \frac{c_1 d}{c_0} \quad \text{para} \quad 2 \leq \frac{c_1 d}{c_0} \leq 20 \quad (2.4)$$

Para D finito:

$$N_{co} = \max \left[\left(1,0 + \frac{c_1 d}{c_0} + 1,5 \frac{d}{D} \right); N_{co} (D = \infty) \right] \quad (2.5)$$

A partir destes cenários define-se o valor do fator de carga N_{co} e por conseguinte, a carga máxima admissível na estrutura antes de sua ruptura. Nos casos em que o fator de segurança é baixo, ou seja, inferior a 1,5, deve-se reduzir a altura do aterro, carregando menos o subsolo argiloso o qual se apoia.

Método de Subpressão

O método da subpressão busca encontrar o máximo valor de tensão vertical da água, em kPa, em decorrência dos carregamentos sobre o solo estudado. Basicamente, é uma equação simples de relação entre o peso e a resultante do solo, em busca de um fator de segurança. Assim:

$$FS = \frac{\sigma_v}{\sigma_a} \quad (3.1)$$

Onde a tensão vertical é dividida pela tensão da água. Essa razão retorna o valor do Fator de Segurança, FS. Neste estudo, como buscamos a tensão máxima exercida pela água, opera-se com a seguinte:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_v}{FS} \quad (3.2)$$

A partir da tensão vertical causada pela água é possível encontrar outra relação em busca da máxima cota de elevação das águas. Este valor deve ser procurado dado que alturas elevadas de água subterrânea podem levar a um arrancamento de todo o aterro por parte da água. Como estudado em diversas outras disciplinas, o empuxo venceria o peso próprio do aterro, arrastando-o e colocando em risco a vida de milhares de pessoas.

Recalque imediato

Recalque são deslocamentos verticais da superfície do terreno resultante de uma variação nas tensões a que o solo está submetido. Os recalques classificados como recalques imediatos são aqueles que ocorrem concomitantemente com o carregamento. Nas argilas saturadas, estes recalques não drenados ocorrem sem a variação de volume do solo mole. Quando comparado aos recalques por adensamento, são até considerados de pequena magnitude.

Para o cálculo do deslocamento vertical devido à variação da tensão, calcula-se:

$$\rho = \sigma_o \cdot B \cdot \left(\frac{1-v^2}{E} \right) \cdot I \quad (4.1)$$

Onde ρ é o recalque, ou deslocamento vertical. B é a largura da berm do aterro, σ é a tensão adicional, v é o coeficiente de Poisson, E é o módulo de elasticidade do solo.

Na formula acima, I é um fator de forma que depende diretamente das dimensões do aterro a ser estudado. Calcula-se as relações: i) a/z ; e ii) b/z . Em seguida procura-se no ábaco da figura a seguir o valor do fator de forma I .

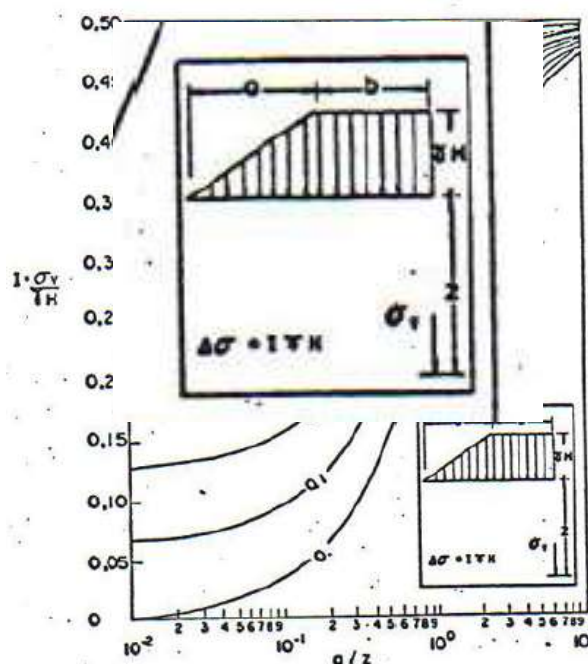


FIGURA 2 – ábaco usado para determinar fator de forma em relação às características do aterro.

FIGURA 3 – Definição dos termos “a” e “b” usados para determinar o valor do fator de forma.

Recalques por adensamento primário

Os recalques por adensamento dependem da condição a qual a argila se encontra: sobreadensada e normalmente adensada. Os cálculos se desenvolvem como a seguir:

ASA – Argila sobreadensada

$$\Delta H = \frac{C_r \cdot H_i}{(1+e_i)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_i + \Delta\sigma}{\sigma'_i}\right) \quad \text{se } \sigma'_i + \Delta\sigma < \sigma_a, \quad \text{então} \quad (4.2)$$

$$\Delta H = \frac{C_r \cdot H_i}{(1+e_i)} \cdot \log\left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_i}\right) + \frac{C_c \cdot H_i}{(1+e_i)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma_a}\right) \quad \text{porém, se } \sigma'_i + \Delta\sigma > \sigma_a, \quad \text{então} \quad (4.3)$$

ANA – Argila normalmente adensada

$$\Delta H = \frac{C_c \cdot H_i}{(1+e_i)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_i + \Delta\sigma}{\sigma'_i}\right) \quad (4.4)$$

Onde os fatores de compressibilidade (C_r e C_c) dependem de análise do solo, H_i é a espessura da camada de argila, σ'_i é a tensão inicial efetiva e σ_a é a tensão de pré-adensamento, informação esta que deve ser fornecida pelo usuário.

Recalques não instantâneos

São os recalques que evoluem com o passar do tempo. Segundo uma analogia de Terzaghi, ao aplicarmos uma carga sobre um solo saturado, com o passar do tempo, a água presente nos vazios do solo começa a ser expulsa, aumentando o recalque no solo mole. Para tanto usa-se a seguinte rotina de cálculo:

- 1- $T = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$
- 2- O valor de T encontrado deve auxiliar a encontrar o valor de U em “3” ou “4”
- 3- $T = -0,933 \cdot \log(1 - U) - 0,085$ para $U > 0,6$
- 4- $T = \frac{\pi}{4} \cdot U^2$ para $U \leq 0,6$
- 5- $\Delta H = \frac{C_r \cdot H_i}{(1+e_i)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_i + \Delta\sigma}{\sigma'_i}\right)$
- 6- Cálculo do recalque parcial: $\rho = U \cdot \Delta H$

Com o valor de U respeitando as condições e calculado o recalque, podemos concluir que este valor é válido para o tempo (t), em dias, passado o fim da obra.

Resultados e Discussão

Os métodos de estabilidade aproveitam-se das informações entradas pelo usuário para realizar seus cálculos. O método de Sousa Pinto leva em consideração a crescente coesão do solo em decorrência do crescimento da profundidade. Isso é observado no fator de carga que leva em consideração os valores de coesão e da taxa de crescimento da mesma. Já pelo método de Fellenius, a coesão é considerada constante, e é observada sua aplicação no valor da tensão de ruptura do solo mole.

Estabilidade por Sousa Pinto			
Coesão na superfície do co = 5	Espessura da camada de solo: D = 20	Carga que leva à ruptura: qr = 34.7	Carga do aterro: q = 20.87
Taxa de crescimento da c1 = 1	Fator de carga: Nco = 6.94	Peso específico do Aterro compactado: γ = 0.23	Fator de Segurança: FS = 1.66
Profundidade: z = 20	se D = 00 Nco = 6.94	$c1 \cdot D/co =$	aprovado
Su de projeto: Su proj = 25	se D = finito Nco = 6.94	$c1 \cdot d/co =$	
		$c1 \cdot d/co = 0.4$	

FIGURA 4 – Método de estabilidade por Sousa Pinto. Fonte: Autor.

Estabilidade por Fellenius			
Peso específico do Aterro compactado: γ = 1	Su de projeto: Su proj = 10.8	Profundidade até solo consistente: z = 20	Altura Crítica: Hc = 59.40
Fator de Segurança: FS = 1.5	Largura da Base: b = 12	Carga do aterro: q = 18.09	Altura Admissível: Hadm = 39.60
Su vane test: Su = 12	$D > b/0.758$ D > 15.83	Carga admissível: qadm = 39.60	Conclusão: D = Ok Hadm = ok

FIGURA 5 – Método de estabilidade por Fellenius. Fonte: Autor.

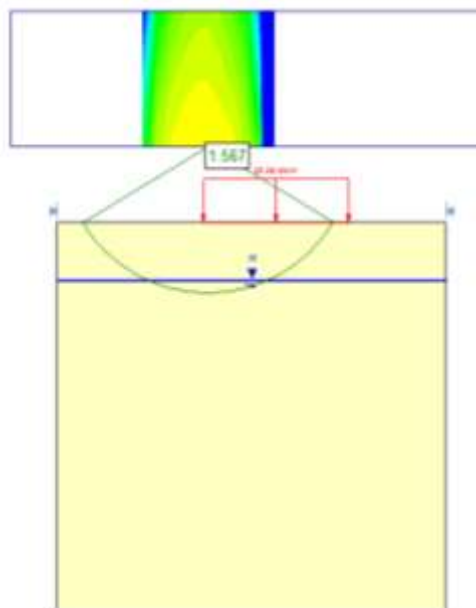


FIGURA 6 – Estabilidade de aterro no programa Slide da Rocscience Inc para Sousa Pinto. Fonte: Slide, Rocscience Inc.

Como pode-se observar acima, o método de Sousa Pinto, que considera a coesão pela profundidade obteve um valor bastante similar ao encontrado em modelos computacionais. Na figura 6 da mesma situação em modelagem computacional. Sousa Pinto, ligeiramente mais conservador, chegou a um fator de segurança de 1,66, enquanto o modelo computacional reduziu para 1,57 o FS. Já o método de Fellenius, observado na figura 7 abaixo, pode ser comparado ao modelo computacional, visto que o fator de segurança de ambos os casos foi bastante similar. O modelo computacional resultou em 1.584, enquanto o modelo foi calculado para fator de segurança de 1,5.

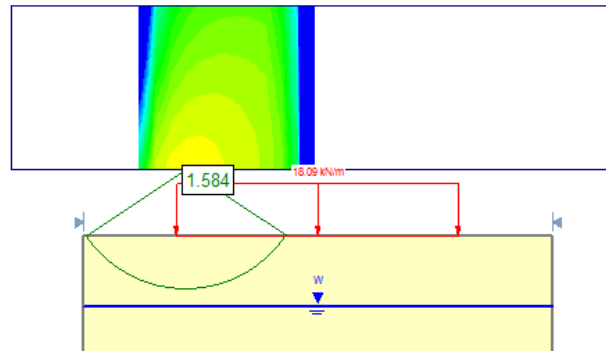


FIGURA 7 – Estabilidade de aterro no programa Slide da Rocscience Inc para Fellenius. Fonte: Slide Rocscience Inc.

A análise de elevação do nível de água proporcionou o cálculo da elevação máxima de 2,51m, para o exemplo mostrado, conforme pode ser visto na figura 8.

Subpressão							
Tensão Vertical do Aterro (kPa) :		Fator de Segurança:		Tensão Vertical da Água (kPa) :		Elevação Máxima (m):	
Tv1 =	26.18	FS =	1.065	Tv2 =	24.58216	Cmáx =	2.51

FIGURA 8 – Subpressão por tensão vertical. Fonte: Autor.

As análises de recalque foram feitas como descrito em Materiais e Métodos. Foi definida uma tensão de pré adensamento de 120 kPa Os parâmetros para cálculo de compressibilidade e demais informações sobre o solo, devem ser entradas pelo usuário na seção “Sondagem”. Os cálculos variam segundo o tipo de adensamento da argila, sendo ela sobre adensada ou normalmente adensada. As informações sobre o Aterro foram alteradas de forma a igualar os cenários, buscando encontrar apenas a diferença de recalques dos dois métodos. A largura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, entre outros parâmetros foram alterados para igualarem a situação real de obra. Assim chegamos aos resultados a seguir:

Recalque Não Instantâneo			
Coefficiente de Adensamento	Espessura da camada	Tensão da Estrutura	$T = C_v \cdot t / H_d^2$
Cv = 0.0004	Hd = 20	$\sigma_o = 8$	T = 0.003154
Tempo passado do fim da obra (dias):	Nível de água (N.A.)	Tensão do Pavimento	U ≤ 60% de recalque:
t = 365	N.A. = 5	$\sigma_1 = 2$	U = 0.035751
Índice de compressibilidade	Tensão efetiva inicial:	Argila Sobreadensada	U > 60% de recalque:
Cc/(1+e) = 0.378	$\sigma'_i = 320$	$\Delta H = 0.013818$	U = 0.172529
Índice de recompressão	Tensão de pré adensamento:	Argila Sobreadensada	Recalque:
Cr/(1+e) = 0.0517	$\sigma_a = 120$	$\Delta H = 2.880903$	$\rho = 0.102994$
Recalque Imediato			
Peso específico do aterro	Largura do topo do aterro	Profundidade até rocha impermeável	A partir das informações fornecidas ao lado, buscar no ábaco o valor de forma (i)
$\gamma = 1$	B = 4	z = 20	i = 0.45
Tensão da estrutura	Módulo de Elasticidade do solo	Relação a/z	Recalque Imediato (cm)
$\sigma_o = 8$	E = 2000	a/z = 0.2	$\rho = 0.171$
Tensão do Pavimento	Coefficiente de Poisson	Relação b/z	
$\sigma_1 = 2$	$\nu = 0.9$	b/z = 0.1	
Recalque Primário			
Índice de compressibilidade	Nível de água (N.A.)	Tensão da Estrutura	Argila Normalmente
Cc/(1+e) = 0.378	N.A. = 5	$\sigma_o = 8$	$\Delta H = 0.101032$
Índice de recompressão	Tensão efetiva inicial:	Tensão do Pavimento	Argila Sobreadensada
Cr/(1+e) = 0.0517	$\sigma'_i = 320$	$\sigma_1 = 2$	$\Delta H = \downarrow$
Espessura da camada	Tensão de pré adensamento:		Argila Sobreadensada
Hi = 20	$\sigma_a = 120$		$\Delta H = 2.880903$

FIGURA 9 – Recalques analisados na planilha. Fonte: Autor.

Verifica-se na figura 9 que os valores de recalques são bastante distintos. Isso ocorre pois são tipos diferentes de recalques, cada qual com seu método e intuito. A soma dos recalques resultaria em 3.15 cm. Enquanto, por exemplo, a Rota das Bandeiras, apresentou recalque de 2,8 cm.

Os resultados encontrados em Fellenius, Sousa Pinto e por Subpressão, estimaram valores esperados quando comparados com o método computacional. Os recalques imediato, primário e não imediato também têm suas rotinas de cálculo bastante conhecidas na Geotecnia. Os valores encontrados são aceitáveis, mesmo havendo pequenas discrepâncias por conta de ábacos e aproximações.

O cálculo computacional utilizado na conferência dos projetos foi realizado com o programa Slide, da Rocscience Inc. Bastante difundido no meio universitário e empresarial. O programa conta com diversas ferramentas para ampliar as opções de uso e abranger diversas áreas de Geotecnia. Os valores encontrados em contas manuais ou via Excel foram confirmadas com o uso do aplicativo.

Para complementar os resultados, é importante ressaltar que o uso de EPS reduz significativamente os recalques e aumenta consideravelmente a estabilidade do aterro em si, por se tratar de um aterro cerca de 50 vezes mais leve. A redução do número de funcionários e máquinas

também é um ponto positivo. Alternativamente, cria-se diversos problemas e cuidados para com os blocos, buscando um maior controle de qualidade em obra. As inundações, flutuações, e outros eventos incluindo ações prejudiciais à estrutura com a água, também devem ser levados em conta, visto que são parte crítica e fundamental para a conclusão e constante manutenção.

Conclusões

Tomando como base as informações colhidas com o uso da rotina de cálculo e com o programa computacional Slide, pode-se concluir que os valores encontrados são similares. A rotina de cálculo pode, então, ser tomada como base para cálculos de estabilidade e recalque para Aterros Ultraleves sobre solos moles. Infelizmente, no Brasil, este método ainda é pouco aplicado. No entanto, no futuro, seu uso será mais frequente, devido a tantos benefícios.

Observando-se somente os recalques, a informação definida para ambos projetos foi similar, e da mesma forma seus recalques. A Rota das Bandeiras acumulou 2,8 cm de recalque enquanto essa rotina, com um resultado mais conservador, somou 3,15 cm. Portanto mostra-se bastante válida

Em relação à estabilidade a rotina de cálculo mostrou-se bastante proveitosa para com a análise frente ao método de Sousa Pinto. Os resultados de fator de segurança se aproximaram consideravelmente expedindo completo aval ao seu uso para o método. Neste caso, o fator de segurança da rotina de cálculo resultou em 1,66 enquanto o modelo computacional resultou em 1,57. Já a estabilidade por Fellenius, teve resultados ainda mais parecidos, chegando a igualar a primeira casa decimal com fator de segurança em 1,5.

Apesar dos resultados positivos, vale lembrar que esta rotina de cálculo não substitui nenhum método e esta, todavia, em período de estudo e desenvolvimento. Assim como as modelagens computacionais, erros podem ser feitos na rotina, caso valores irreais sejam usados.

Referências Bibliográficas

- Camargo Barros, J. M.. Curso de Mecânica dos Solos. Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2011.
- Barros, E. F.; Freitas, R. P. de; Capellari, T. A.. Construção de Aterros sobre solos moles utilizando Poliestireno expandido (EPS). 2014, 102, TG. Brasil
- Filho, M. L. C.; Cerejo, B. F.; Gadler, F.; Ferlic, K. M.; Lima, D. S.; Junior, M. P. da C.; Rodrigues, N. A. S.. Aterro ultraleve com EPS: solução alternativa de engenharia para regiões de solos moles. 2013. 30. Consórcio Corredor Dom Pedro I. Brasil
- Miranda, G. B.; Peporini, P. E.; Aterros sobre Solos Moles. 2011. 124. TG. São Caetano do Sul, São Paulo, Brasil.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Norma 381/98 – Projetos de aterros sobre solos moles para obras viárias. Rio de Janeiro, 1998.
- Pinto, C. de S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de texto, 2002.
- Maccarini, M.. Construção de aterro sobre solos moles com utilização de EPS. 2013. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Massad, F. Obras de Terra. São Paulo: Oficina de textos. 2003, 170 p.
- Nacional Cooperative Highway Research Program – NCHRP. Report 529 – Guideline and recommended Standard for Geofoam Applications in Highway Embankments. Washington D.C., 2004.