

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE CONTENÇÕES EM SOLO ARMADO OU SOLO GRAMPEADO: ÁREAS COM OCUPAÇÃO DESORDENADA

Felipe Boucas (IC) e Henrique Dinis (orientador)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

Contenções são obras visando estabilizar ou conter o solo, diante de fenômenos que causam sua instabilidade, em especial, tratando-se de encostas, em que massas de solo, diante da perda do equilíbrio natural ou devido a intervenções humanas, rompem em forma de deslizamento, escorregamento, tombamento, queda e desprendimento. Em encostas, especialmente, os taludes naturais estão sempre sujeitos a apresentar problemas de instabilidade, devido aos processos físico-químicos contínuos de alteração das rochas. A solução mais geral é a reconstituição de patamares que sofreram escorregamento, ou obras preventivas, detectando-se sua instabilidade. Devido às dificuldades de mobilização de equipamentos, para estas obras, adotam-se muitas vezes, soluções pontuais que requerem equipamentos leves. Duas soluções vêm sendo utilizadas, as contenções de solo armado, para reconstituição de patamares que sofreram escorregamento, e as de cortina grampeada (solo grampeado), para assegurar a estabilidade de patamares em risco de escorregamento ou erosão, desde que o talude não se encontre frontalmente obstruído, e são essas contenções que delineiam este trabalho. Desenvolve-se um estudo sobre os critérios de verificação da estabilidade para cada uma destas contenções e busca-se o alinhamento entre cada um. Conclui-se pela validade das formulações para o cálculo dos tirantes a serem aplicadas indistintamente para cada uma das contenções e propõe-se uma solução híbrida, em composição aos métodos.

Palavras chave: Solo Armado. Solo Reforçado. Contenções.

ABSTRACT

Containments are works to stabilize or contain the soil, in the face of phenomena that cause its instability, especially when it comes to slopes, where soil masses, due to the loss of natural balance or due to human interventions, break in the form of sliding, skidding, fall, fall and detachment. On slopes, especially, natural slopes are always subject to instability problems, due to the continuous physical-chemical processes of rock alteration. The most general solution is the reconstitution of slippery reliefs, or preventive works, detecting their instability. Due to the difficulties in mobilizing equipment for these works, one-off solutions that require light equipment are often adopted., as long as the slope is not obstructed frontally. Two solutions have been used, the containing reinforced soil, for reconstitution of levels that have suffered slipping, and those of stapled curtain (stapled soil), to ensure the stability of landings at risk of slipping or erosion. It was studied the criteria for verifying stability for each of these

restraints and seeks alignment between each one. The conclusion is that the draw calculation formulations are valid and can be applied indistinctly to each of the contentions, and a hybrid solution is proposed.

Keywords : Stapled Soil. Reinforced Soil. Retaining Walls

1. INTRODUÇÃO

Contenções são obras visando estabilizar ou conter o solo, diante de fenômenos que causam sua instabilidade, como em áreas com ocupação antrópica, em especial, tratando-se de encostas, em que massas de solo, diante da perda do equilíbrio natural ou devido a intervenções humanas, rompem em forma de deslizamento, escorregamento, deslocamento, tombamento, queda e desprendimento (DAS, 2011). Em encostas, especialmente, como cita Gerscovich (2012) os taludes naturais estão sempre sujeitos a apresentar problemas de instabilidade, tendo em vista tratar-se da própria dinâmica de evolução das encostas, devido aos processos físico-químicos contínuos de alteração das rochas, que após fenômenos como o intemperismo, formam solos residuais, que apresentam características inferiores para resistir aos efeitos do deslizamento, gerando condições para deflagrar a ruptura, ver Figura 1.

Normalmente, as obras de estradas, quando em meio às encostas, são realizadas segundo um rígido acompanhamento geotécnico, elaborando-se projetos pontuais de contenção, sempre que se detecta possível instabilidade. No entanto, em encostas ocupadas de forma desordenada, a exemplo as favelas, estes cuidados são mínimos, ou mesmo inexistem, fazendo com que os acidentes com a ruptura de taludes sejam constantes. Segundo BANDEIRA (2010), Os efeitos da expansão urbana sem infraestrutura adequada levam a processos erosivos com consequências para a estabilidade local, que após a remoção da vegetação, ocupação e ampliação das áreas construídas, estes solos são rapidamente desestabilizados e transportados, daí a necessidade de medidas preventivas ao se evidenciar tal processo.



Figura 1 – Erosão na Rua Camanducaia, Ibura, Recife
Bandeira (2010)

Segundo JORGE (2013), a ocupação desordenada das encostas, devido ao desmatamento para a construção de casas e ruas, tem sido a principal responsável pela ocorrência dos processos de movimentos de massas. O processo se inicia com a remoção da cobertura vegetal e da alteração da superfície natural da encosta, e sua progressão vai depender do tipo de solo, declividade e forma da encosta, e como o ser humano intervém,

muitas vezes, alterando o percurso natural das águas pluviais, lançando esgoto a céu aberto, deposição inadequada de lixo, agravando a situação de potencial erosão dos solos, problema bem característico dos solos tropicais, ver Figura 2. Nestes casos, as obras de contenção ocorrem em três situações distintas, de reconstituição dos taludes rompidos, para correção de em taludes que sofreram intervenções inadequadas, visando um aumento da segurança e para proteção contra a instabilidade natural das encostas. São as duas primeiras situações as que mais demandam intervenções com contenções.



Figura 2 – Erosão em Camaragibe – área urbana de Recife
BANDEIRA (2010)

Em se tratando de encostas com ocupação antrópica, de forma irregular, como as favelas, ocorrem em grande parte delas, problemas geotécnicos, em decorrência da construção de patamares para assentamento de edificações, sem a devida proteção, submetendo tais edificações, aos chamados riscos geológicos. Ver Figura 3. Em análise de riscos, muitas destas habitações são avaliadas como risco na escala máxima, recomendando-se sua remoção. Obras de contenção são complexas, muitas vezes descartadas pelo custo de execução, no entanto não inviáveis. Ocorre que nas grandes cidades o custo social tem se tornado cada vez maior, uma vez que mesmo os espaços para se construir conjuntos habitacionais estão se esgotando. Recorre-se então a investigações quanto às possibilidades de se executar contenções. Duas soluções vêm sendo utilizadas, as contenções de solo armado, para reconstituição de patamares que sofreram escorregamento, e as de solo grampeado, para assegurar a estabilidade de patamares em risco de escorregamento ou erosão, desde que o talude não se encontra frontalmente obstruído.

A solução mais geral é a reconstituição de patamares que sofreram escorregamento, ou obras preventivas, detectando-se sua instabilidade. Devido às dificuldades de mobilização de equipamentos, para estas obras, adotam-se muitas vezes, soluções pontuais que requerem equipamentos leves.

Existem muitos registros de situações de risco geológico em áreas com ocupação desordenada, com divulgações em eventos técnicos e trabalhos acadêmicos, mas há poucas informações sobre as soluções técnicas encontradas para as várias situações. Assim, estudar e analisar as aplicações destes dois métodos em situações de reconstituição ou segurança de taludes de patamares de ocupações desordenadas irá trazer contribuições para este conhecimento, àqueles que militam nesta temática, profissionalmente ou na área acadêmica.



Figura 3 – Taludes Verticalizados e sem proteção superficial – Encostas da RM-Recife
BANDEIRA (2010)

Cada uma destas duas obras de contenção, objeto deste trabalho, de solo reforçado e solo grampeado, têm, na prática, aplicações distintas, quando utilizadas em encostas ocupadas de forma desordenada: as cortinas de solo grampeado são utilizadas para a proteção de taludes, em risco de ruptura, e as de solo reforçado, para a reconstituição, após ruptura do talude, quando se deseja restituir o espaço de ocupação. Ambas as soluções, no entanto, podem ser estudadas quando aplicadas para restituir ou dotar de segurança, espaços ocupados. A cortina de contenção de solo reforçado, reconstitui um patamar de ocupação sobre seu terrapleno e a de solo grampeado, da mesma forma, um patamar existente no terrapleno, que se deseja assegurar a estabilidade à ruptura de talude. Geometricamente, as duas soluções são semelhantes, no entanto, construtivamente, bem distintas uma da outra.

As contenções em solo reforçado são resultado da execução de aterros, em camadas de solo que se intercalam com reforços de fios ou malhas de aço ou de outro material resistente à tração, que sustentam um paramento frontal ao aterro, resistindo aos empuxos de terra. Já as contenções em solo grampeado são resultado da execução de cortes, ou de acertos em corte de taludes irregulares, que são executados em patamares sucessivos, de cima para baixo, formando um paramento próximo ao vertical, sobreposto ao qual, é executada uma cortina de concreto, ou outro material resistente, que venha conter os empuxos de terra a cada nível da escavação, por tirantes executados por furos no solo, onde são inseridas barras de aço (SOLOTRATE, 2009).

Ocorrem similaridades de comportamento estrutural e formulações de verificação de sua estabilidade, destes dois métodos, como também na aplicabilidade de cada um deles, a despeito de suas diferenças construtivas. No entanto, há uma lacuna na literatura com relação ao projeto propriamente, na aplicação destas técnicas, a despeito do pleno conhecimento de seus processos construtivos. As aplicações numéricas de verificação estão pouco referenciadas quanto ao seu desenvolvimento, gerando inseguranças em suas aplicações, quando se deseja aplicá-las a situações excepcionais, por exemplo, o caso da existência de edificações no terrapleno, seja em qual dos dois métodos. Verifica-se, assim, a necessidade de se ter, a disposição, contribuições técnicas e acadêmicas melhor desenvolvidas e referenciadas para melhor capacidade interpretativa de suas aplicações e maior facilidade ao desenvolvimento dos projetos.

Estudar e referenciar as aplicações dos métodos de contenção de reforço do solo com armações, o solo armado e o solo grampeado, em encostas com ocupação antrópica desordenada é o objetivo deste trabalho, mas, principalmente, deseja-se efetuar uma revisão bibliográfica das teorias para análise da verificação da estabilidade e dos métodos de dimensionamento, para os dois sistemas de contenção, avaliando suas validades de aplicação e disposições construtivas que asseguram o comportamento estrutural assumido nas formulações, selecionando as formulações com melhor aplicabilidade aos casos de contenção em estudo, efetuando os recorte e simplificações cabíveis.

Neste contexto, busca-se verificar as possibilidades de se aplicar um tratamento analítico semelhante de verificação da estabilidade e dimensionamento, para os dois sistemas de contenção, considerando a situação de formação de patamares superiores carregados por sobrecargas, em análise da estabilidade local. Propõe-se, como decorrência do melhor entendimento, outras aplicações para os referidos métodos de contenção.

2. DESENVOLVIMENTO DO ARGUMENTO

Como regra para se efetuar obras de contenções em encostas, deve-se primeiramente ser verificada a estabilidade global dos taludes naturais. A questão é bem ampla, envolvendo as causas que levam aos escorregamentos naturais, tendo em vista fenômenos temporais que alteram as características dos solos ou como estão arrançados na natureza, podendo como consequência do próprio processo, ocorrer fenômenos de movimento de massas, como deslizamentos de tálus, escorregamentos, deslocamentos, deslocamentos de blocos de rochas e mesmo, avalanches, no caso de períodos prolongados de chuvas fortes (MASSAD, 2010). A análise da estabilidade natural das encostas normalmente demanda estudos mais complexos, envolvendo um número maior de variáveis, muitas só reconhecidas no campo. Assim, não faz parte deste trabalho, em que desejamos tirar conclusões sobre condicionantes

de sistemas construtivos de contenção de taludes secundários, o que leva a estudos de estabilidade local de taludes. Segundo Gerscovich (2012), para avaliar a estabilidade de taludes, deve-se verificar, inicialmente, a possível forma da ruptura, que considera a geometria do maciço de terra, as sobrecargas, o solo que constitui as camadas de ruptura, se residual, coluvionares, ou mesmo rocha, eventuais heterogeneidades ao longo do perfil do talude, como também, a existência de infiltrações que acarretam poropressões.

Relativamente à verificação da estabilidade local, que requer estudos de dimensionamento das partes de armação, pode-se chegar às larguras de influência de cada contenção. Neste sentido, cabe verificar exatamente as técnicas de execução e disposições construtiva de cada um dos métodos em questão.

Contenção em Solo Reforçado

As contenções de solo reforçado são formadas por maciços de terra a que se atribui o comportamento de muros do tipo gravidade, com comportamento de corpo rígido, ao menos suficiente para distribuir ao solo tensões verticais de reação aos carregamentos verticais e momentos causados pelos empuxos de terra, semelhantes ao caso de um muro de gabião, ou de flexão em concreto com sapata rasa, aplicada sobre uma camada de solo superficial, que é definida como sendo uma base com capacidade de desenvolver reação no solo onde se apoia, como pode-se observar na Figura 4 (Das, 2011). Na verdade, estas contenções são estruturas de contenção flexíveis, tendo em vista as movimentações do maciço terroso, mas que, ao receberem armações distribuídas, concedem ao maciço, estabilidade aos efeitos de deslizamento e tombamento (FELIX, 1991).



Figura 4: Muro verde na Lagoa da Conceição em solo reforçado - CASAN

Fonte: <https://www.casan.com.br/noticia/index/url/muro-verde-na-lagoa-da-conceicao-esta-em-fase-de-conclusao#0>. Publicado em 28/02/2022

Construtivamente, são caracterizadas pela junção de paramentos verticais, que podem ser elementos modulares pré-fabricados de concreto ou qualquer outro sistema de vedação resistente, na função contenção, ancoradas no solo por armações horizontais, intercaladas

por camadas de terra compactada. Estas armações, além de conceder ao solo o comportamento de um maciço rígido, sustentam o paramento aos efeitos dos empuxos horizontais. Podem ser barras ou fitas de aço; mantas tecidas, os geotêxteis; ou as telas, as geogrelhas, ambas geralmente feitas com derivados do petróleo, como poliéster, polietileno, ou o polipropileno, como mostra a Figura 5 (DAS, 2011). A elevada resistência resultante, propicia uma contenção com resistência a compressão, cisalhamento e tração, contando com grande flexibilidade e tolerância a recalques diferenciais (FELIX, 1991).

Segundo Gerscovich (2019) "Diversas são as características vantajosas da técnica de solo reforçado, porém uma salta aos olhos: a possibilidade de utilização do próprio solo disponível no local como um dos principais materiais para a construção da estrutura de contenção". Ainda, refere-se a outras qualidades, como a utilização de equipamentos simples, velocidade de execução e tolerância a recalques de fundação, entre outras. Cabe salientar, que para pequenas obras pode-se utilizar compactadores e escavadeiras do solo compactos para preparar a base da obra. Porém, como ponto negativo, a base para executar a obra requer maiores dimensões que outras soluções. Mas de forma geral, em encostas com ocupações desordenadas, é boa solução para recomposição de taludes rompidos, restituindo-se um patamar superior para nova ocupação.

Solo Grampeado

O Solo grampeado, por sua vez, trata-se de uma estabilização de maciços terrosos, em situação de corte ou escavação, quando se aplica na superfície do solo escavado, um paramento, vertical ou em talude. A estabilidade do solo é garantida aos efeitos de deslizamento ou deslocamento, por meio da introdução de reforço no maciço do solo através da inserção de barras sub-horizontais de aço, por cravação, no caso de grampos ou pregos, ou em pré-furos preenchidos com nata de cimentos, no caso chumbadores, ou em barras de aço, com preenchimento posterior de argamassa, que ancoram o paramento frontal, ver Figura 5 (MASSAD, 2009).



Figura 5: Detalhes construtivos das contenções em cortina grampeada
Fonte: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-solo-grampeado.html>

Se diferenciam dos tirantes ativos, por não serem protendidos. O paramento, aplicado imediatamente após ter sido efetuado o corte do maciço, pode ser constituído de concreto armado projetado, ou unicamente, receber sobre a superfície, uma tela, com resistência para conter as pressões do solo entre grampos, com posterior plantio de grama ou vegetação arbustiva sobre a mesma. A armação, como na alternativa anterior, ancora e sustenta o paramento aos efeitos dos empuxos horizontais, mas ainda, pode trabalhar para garantir a estabilidade global do maciço assim formado.

O solo grampeado se mostra um método eficaz e econômico frente a outras soluções, pois apresenta a possibilidade de execução em locais de difícil acesso, com rapidez no trabalho, que faz do método uma das melhores maneiras de conter maciços (SOLOTRAT, 2009).

Verifica-se que ambos os métodos, mesmo que construtivamente diferentes, apresentam similaridades na composição estrutural, qual seja, paramentos verticais ou inclinados, amparando maciços de solo, ancorados por armação horizontal, aplicada em planos horizontais intercalados por espessuras de terra. Mas, mesmo tendo composição estrutural similar, recebem tratamento analíticos distintos na verificação de sua estabilidade, como também no dimensionamento de suas armações. No entanto, para um ou outro, existem referências de se utilizarem considerações semelhantes no dimensionamento das armações, como cita Budhu, 2015. Formulações são fornecidas distintamente, para cada um dos métodos, por vários autores, com muitas semelhanças, por exemplo, em que a resistência ao arrancamento das barras de armação que constituem os grampos, para os dois casos, é determinada em função da tensão vertical devido do peso de solo e sobrecargas que se encontram acima dos grampos.

Vários estudos foram efetuados sobre o comportamento do solo reforçado voltados ao dimensionamento. Felix (1991), por exemplo desenvolve estudos de análise do comportamento do solo reforçado por meio simulações utilizando soft de dimensionamento com base em modelo numérico bidimensional não linear, por programa de elementos finitos, trazendo conclusões sobre as curvas de ruptura do solo e zonas de tração da armadura, comparando com resultados experimentais. Cita que o dimensionamento corrente de solo reforçado se faz por métodos de equilíbrio limite, apresentando exemplos para aplicação numérica. EHRLICK (2009) comenta que um aspecto particular no dimensionamento é a estabilidade interna, devendo-se garantir que não ocorram rupturas no reforço por tração ou arrancamento, e a instabilidade localizada na face. Apresenta vários métodos, com base em métodos pelo equilíbrio limite, com considerações para a determinação das solicitações de tração no reforço e reação ao arrancamento com base no atrito desenvolvido em função das tensões verticais.

Também, vários estudos foram efetuados sobre o comportamento de contenções em solo grampeado. Por exemplo. Costa Neto (2015) apresenta um estudo da variação dos Fatores de Segurança, considerando o dimensionamento do solo grampeado baseado em Métodos de Equilíbrio Limite, em função da variação de diversos parâmetros, tais como geometria, resistência dos solos do maciço, tipo de grampo, quantidade, comprimento, inclinação, espaçamento e posição relativa no talude, além da capacidade nominal e resistência ao arrancamento. Também Santos (2019) efetuou análises paramétricas conduzidas considerando diferentes inclinações da face, considerando o procedimento de execução da escavação, a variação da rigidez do grampo, dos parâmetros de resistência e rigidez do solo e traz resultados no deslocamento na face do paramento e solicitações dos grampos.

Considerando a aplicação destas duas soluções de contenção em encostas com ocupação antrópica irregular, com ambas, formando, em seu terrapleno, patamares ocupados por edificações, que representam sobrecargas aplicadas, verifica-se que geometricamente são soluções semelhantes. No entanto, na concepção geral de projetos, o solo grampeado é tratado como uma cortina atirantada (SOLOTRAT, 2009) e o solo reforçado, como um muro de gravidade (FELIX, 1991). Este fato induz a buscar uma similaridade de comportamento estrutural entre os dois sistemas, seja no dimensionamento das armações, como na verificação da estabilidade.

Mesmo que a compreensão do conhecimento teórico relativo ao objeto de pesquisa tenha se dado com base em referências bibliográficas, livros técnicos, artigos científicos, teses, estudos práticos de obras realizadas, para se concluir sobre a similaridade entre os dois métodos estudados de contenção, o solo grampeado e o solo reforçado, além dos

condicionantes e disposições construtivas e requisitos para aplicação e construção de contenções em solo armado e solo grampeado, faz-se também, por meio de referencial bibliográfico, uma análise das formulações aplicáveis e propostas por vários autores, para a verificação da estabilidade e dimensionamento dos elementos construtivos, para ambos os tipos de contenção. A partir da compreensão das formulações, sua aplicabilidade, parâmetros, validade e dos condicionantes que norteiam os processos construtivos para ambos os sistemas, torna-se possível a partir do agrupamento de conceitos semelhantes, estabelecer aplicações similares em que ocorra validade nas formulações para os dois métodos.

Escolheu-se, para os estudos de protótipo, uma configuração de ocupação de encostas bem característica das áreas de ocupação irregular, o corte vertical de taludes naturais das encostas, para a formação de patamares de ocupação. A altura destes taludes verticais estão em torno de 3,0m a 4,0m, muitas vezes muito próximos às edificações que ocupam estes patamares, referenciando-se aqui, em especial, os casos documentados em (BANDEIRA, 2010), como pode-se observar na Figura 3.

Segue-se com um estudo de simulação de modelos para aplicação dos referidos sistema de contenções, a partir da imagem da Figura 3, identificado como caso real na pesquisa bibliográfica feita por Bandeira (2010), voltada à análise de risco geológico em encostas com ocupação antrópica, adequando-se soluções específicas aos casos reais. Ver Figura 6.

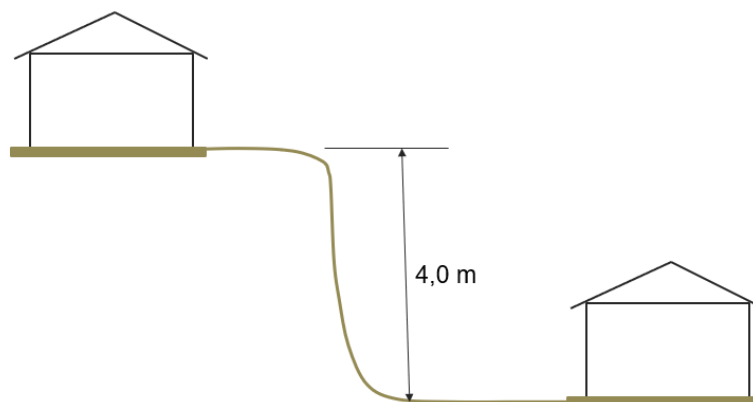


Figura 6: Modelo figurativo de situação real a ser estudado
Fonte: Autor

Após estudos de vários protótipos de modelos de concepção e de cálculo, para verificar se a capacidade de estruturas assim concebidas, à carregamentos horizontais, fosse condizente com os empuxos de terra que podem atuar nestas estruturas e sua validade de aplicação, escolheu-se dois modelos de contenção estrutural, em dimensões e detalhes construtivos, que são mostrados a seguir.

O primeiro, uma cortina grampeada, executada contra um talude vertical de corte, aplicada ao modelo da Figura 4, executada em quatro níveis de tirantes (grampos) espaçados

na altura e na horizontal de 1,0m. Esta solução privilegia a manutenção das dimensões do patamar inferior, como mostra a figura 7. O segundo, uma cortina em solo reforçado, também executada em quatro níveis de tirantes (fitas de aço) espaçados na altura e na horizontal de 1,0m. Esta segunda solução privilegia o patamar superior, ampliando sua dimensão. Ver Figura 8.

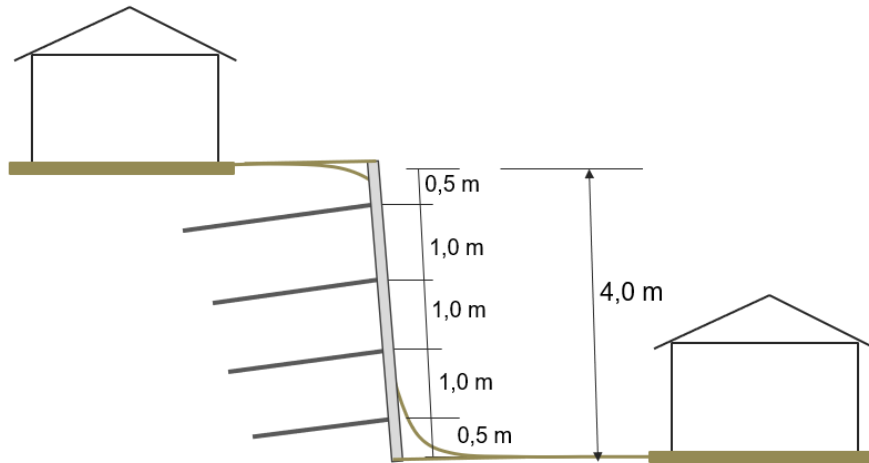


Figura 7: Modelo de contenção estrutural em cortina grampeada
Fonte: Autor

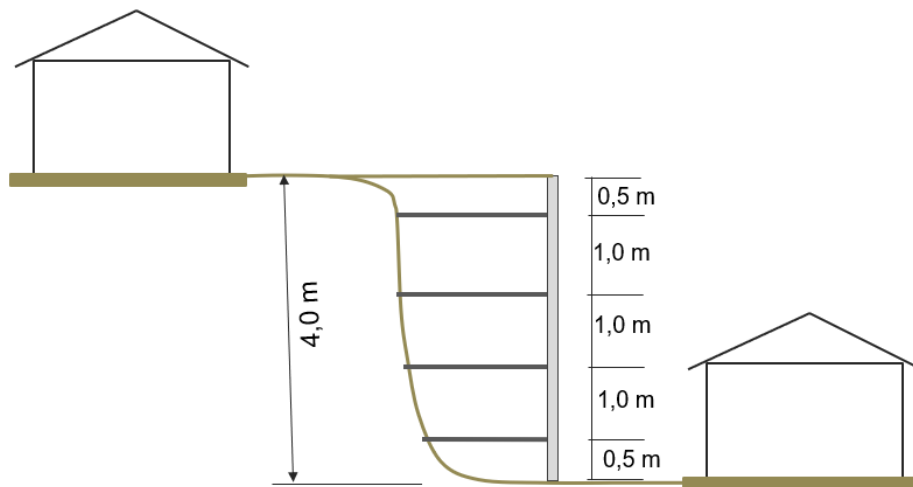


Figura 8: Modelo de contenção estrutural em solo reforçado
Fonte: Autor

Deseja-se conhecer, mais precisamente, a possibilidade de se criar uma contenção híbrida, contendo os dois modelos acoplados e com técnicas que permitam executar e considerar, nestas condições, uma contenção de comportamento único, como mostra a Figura 9.

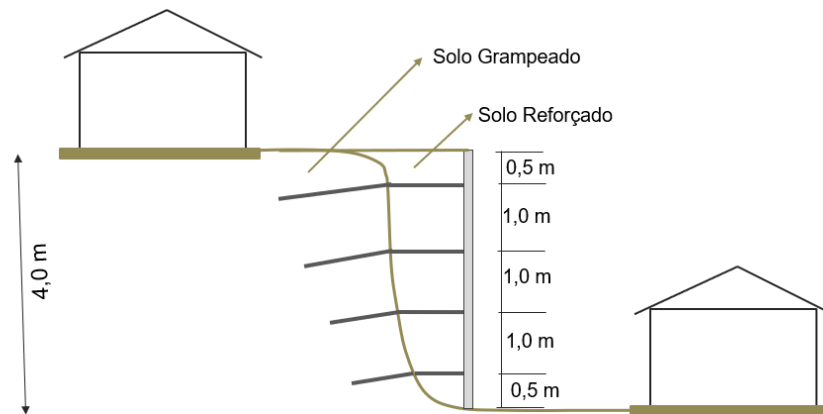


Figura 9: Modelo de contenção estrutural em solo reforçado e cortina grampeada
Fonte: Autor

Esta situação traria como contribuição a adequação da contenção em situações de executar-se a cortina em solo grampeado em larguras mais estreitas, em casos de espaço restrito, possibilitando, ao mesmo tempo, a ampliação do patamar superior, para uso.

Para o projeto da contenção híbrida, torna-se necessário um metodologia de cálculo e dimensionamento, já que, envolveria conceitos distintos. Deseja-se avaliar um método que concilie os métodos utilizados, que são distintos. Escolheu-se (BUDHU, 2015), para o estudo, pelo fato de abordar os métodos utilizados para os dois tipos de contenção.

Para as contenções em solo-reforçado, BUDHU (2015) indica o método dos empuxos ativos, ao longo da altura, avaliadas pela teoria de Rankine, que determina as pressões através por meio do círculo de Mohor, onde a pressão vertical é a vertical, peso próprio do solo e sobrecargas e a horizontal, os empuxos ativos. As equações dos empuxos ativos encontram solução, ao evoluir suas pressões até que o círculo tangencie a reta envoltória de ruptura do solo obtida pelo ensaio de cisalhamento direto (DINIS, 2022), obtendo-se assim as equações resultantes para determinação dos empuxos ativos. Interpreta-se o Empuxo Ativo, como sendo a pressão horizontal mobilizada pelo solo contra um paramento, pelo efeito de descompressão, após atingir o limite de resistência do solo ao cisalhamento. Ver figura 10.

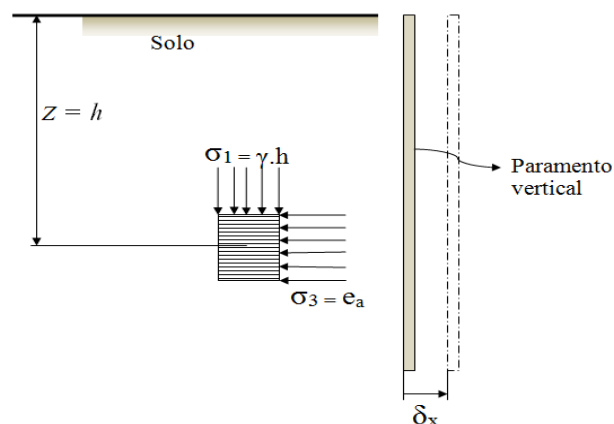


Figura 10: Esquema de desconfinamento que gera os empuxos ativos
Fonte: (DINIS, 2022)

Denominado de σ_1 a maior das tensões atuantes (cargas verticais) e σ_3 , a menor (empuxo), pode-se representar como abaixo, o elemento solo através do conceito de superfícies de ruptura.

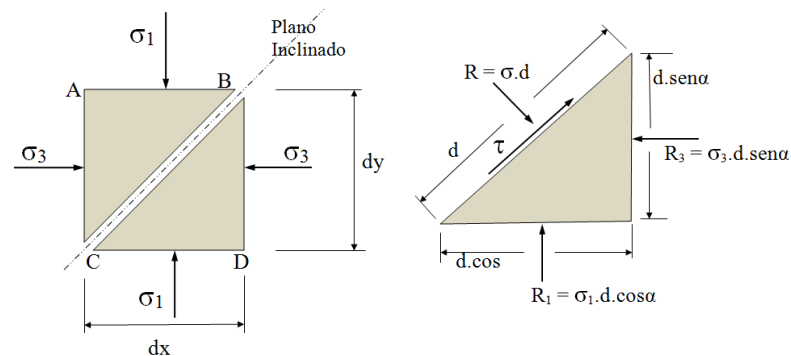


Figura 11: Equacionamento das tensões que atuam na superfície de ruptura
Fonte: (DINIS, 2022)

Quando algum ponto do círculo de Mohr tangencia a reta envoltória de ruptura, ocorre a ruptura do solo no plano α , resultando a tensão limite de cisalhamento τ , para o caso determinado de carregamento. Neste caso, o ângulo de ruptura α , que é a inclinação da superfície de ruptura, será determinado, como na Figura 12.

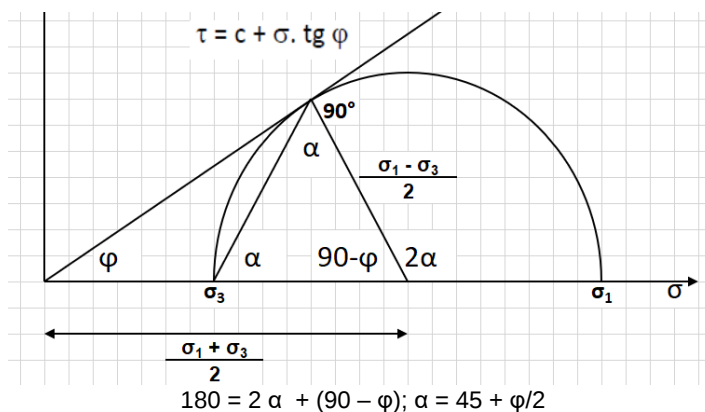


Figura 12: Determinação da superfície de ruptura pelo círculo de Mohr
Fonte: (DINIS, 2022)

As expressões do valor do empuxo ativo, a uma determinada profundidade, pode ser obtido a partir da própria representação do círculo de Mohr (DINIS, 2022), e chega-se à expressão a seguir, em que σ_3 será a tensão exercida a uma determinada profundidade. Fazendo variar a profundidade, chega-se ao diagrama das tensões de empuxo, cuja resultante E, empuxo total, representa o valor da força total do empuxo mobilizado, ver Figura 13.

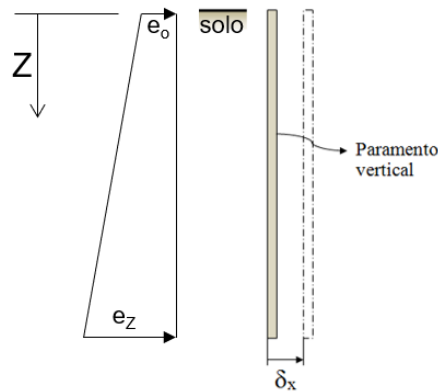


Figura 13: Detalhes construtivos das contenções em solo reforçado
Fonte: Autor

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)} = \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot K_a = e_a$$

$$e_a (\text{tensão do empuxo}) = (\gamma_s \cdot Z + SC) \cdot K_a$$

Segundo indica Budhu (2015), estabelece-se os níveis de tirantes (fitas de aço) e a cada nível, pela influência dos empuxos ativos naquela profundidade, chega-se a força de tração que estaria atuando no tirante. Se comprimento seria a soma de um trecho inativo, L_R , dentro da zona de ruptura pelo desconfinamento, determinada pela superfície de ruptura obtida pelo círculo de Mohr e o trecho de ancoragem da força de tração no tirante, ancorada por atrito do solo, L_e . Ver Figura 14.

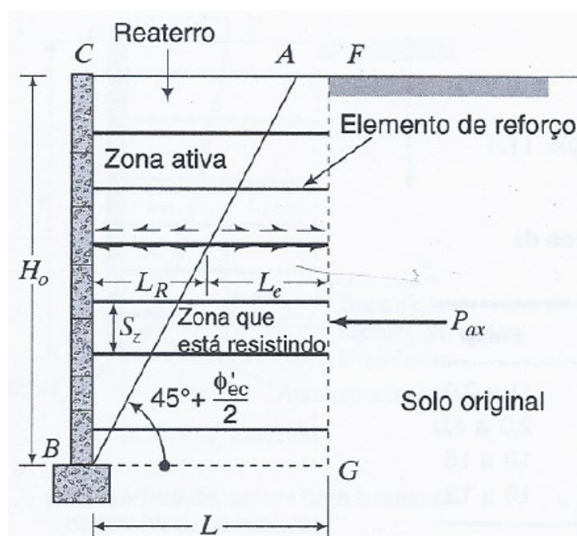


Figura 14: Detalhes construtivos das contenções em solo reforçado
Fonte: (BUDHU, 2015)

A seguir, efetua-se a determinação da distribuição dos empuxos por Rankine, ao longo da profundidade, obtendo-se as resultantes E1 e E2, ver Figura 15.

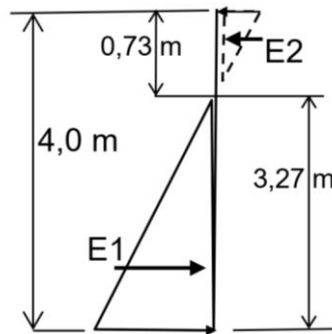


Figura 15: Cálculo dos Empuxos pela teoria de Rankine
Fonte: Autor

As tensões máximas e mínimas dos empuxos ativos são determinadas a seguir:

$$e(0,0m) = \gamma h + SC * Ka - 2c\sqrt{Ka} = (20 * 0,0 + 20,0) * 0,333 - 2 * 10\sqrt{0,333} = -4,88kN/m^2$$

$$e(4,0m) = \gamma h + SC * Ka - 2c\sqrt{Ka} = (20 * 4,0 + 20,0) * 0,333 - 2 * 10\sqrt{0,333} = 21,76kN/m^2$$

$$E1 = \frac{21,76 * 3,27}{2} = 35,58 \frac{Kn}{m}; E2 = \frac{-4,88 * 0,73}{2} = -1,78 \frac{Kn}{m}$$

Empuxo total que atua no paramento: $E = 35,58 - 1,78 = 34,10 \text{ kN/m}$

Para as contenções em cortina grampeada, BUDHU (2015) indica o método das superfícies de ruptura, em que determina-se o valor da força do empuxo a partir do equilíbrio de forças que atuam em uma ruptura em cunha, atuando: as cargas verticais agindo sobre a cunha a ser deslocada, a força ortogonal à superfície de ruptura da cunha, constituída da componente força vertical e o empuxo que se quer determinar e por fim, as componentes tangenciais à superfície de ruptura, a solicitante, como resultado da força vertical e empuxo E_a resistente, obtida pelo atrito e ação da coesão. Do equilíbrio deste conjunto de forças, determina-se o valor da incógnita, que é o empuxo, Ver Figura 15. Este modelo deve ser reproduzido, para cada aumento de profundidade. Como no solo reforçado, o tirante tem uma parcela de comprimento não ativa, relativa à zona de ruptura L_R , e outra reativa L_e , ancorada pelo atrito do solo, como no caso do solo reforçado.

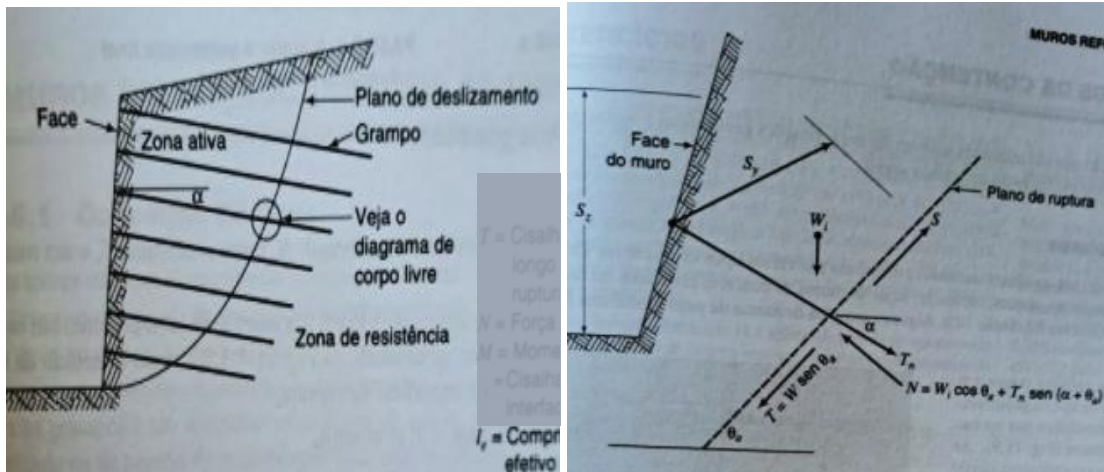


Figura 15: Detalhes construtivos das contenções em cortina grampeada
Fonte: (BUDHU, 2015)

Os cálculos são efetuados para cada tirante em sua profundidade desde a superfície, deduzindo-se o valor correspondente inferior.

A título de estudo e maior compreensão, se irá determinar o empuxo total do paramento vertical do presente estudo de caso, com altura de 4,0 m, por Rankine e pelo método das superfície de ruptura e comparar os resultados, efetuando-se um reflexão sobre todo o processo de cálculo.

Determina-se inicialmente o empuxo total que atua no paramento vertical pelo método da superfície de ruptura, adotando-se a inclinação de 30° descendente para a direção dos grampos. Ver Figura 16.

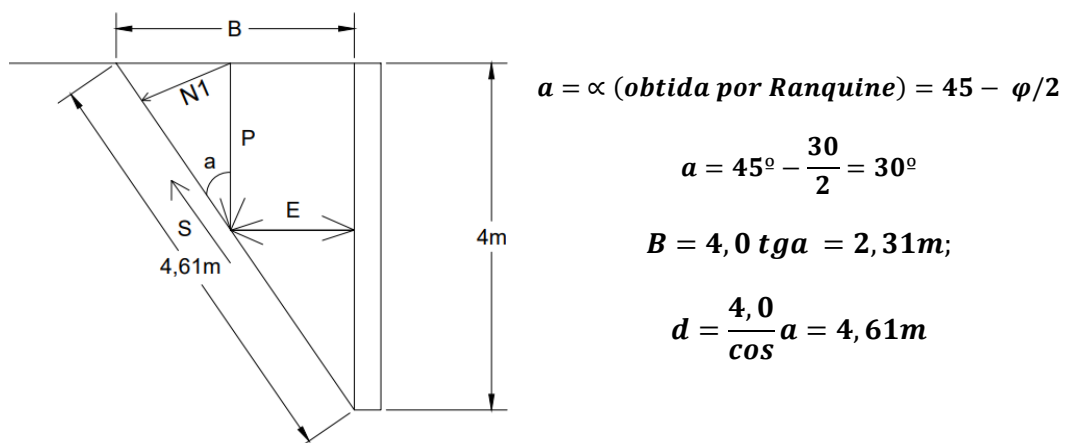


Figura 16: Detalhes construtivos das contenções em cortina grampeada
Fonte: Autor

E = empuxo total que deve suportar o paramento vertical, para equilibrar as forças tangenciais, solicitantes e resistentes; P = valor das cargas verticais.

$$P = \frac{4,0 * 2,31}{2} * \gamma_s + SC * 2,31 = 139,6 \frac{Kn}{m}$$

$$N1 = P * \operatorname{sen} \alpha = 69,3 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}; T1 = P * \operatorname{cos} \alpha = 120,90 \frac{\text{Kn}}{\text{m}}$$

$$N2 = E * \operatorname{cos} \alpha = 0,87E; T2 = E * \operatorname{sen} \alpha = 0,50E$$

$$S = (N1 + N2) \operatorname{tg} \varphi + c * d; S = (69,3 + 0,87E) \operatorname{tg} 30^\circ + 10 * 4,61$$

$$S = T1 - T2 \quad E = 34,10 \frac{\text{KN}}{\text{M}}$$

“Verifica-se pelos dois métodos uma coincidência de resultados, para a componente Empuxo total E”

Ao se analisar o desenvolvimento analítico, para a dedução das fórmulas do empuxo, no método de Rankine, que o modelo inicial de dedução se baseia exatamente no modelo da superfície de ruptura, evoluindo, a seguir para a composição do círculo de Mohr, a partir do qual, se determina a inclinação crítica de ruptura e a tensão σ_3 (empuxos horizontais) que equilibra o sistema, como pode se verificar nas Figuras 12, 13 e 14, a seguir. A partir desta constatação, se conclui que a força que atua nos tirantes (grampos), pode ser obtida diretamente pela teoria de Rankine. Pode-se concluir que os dois métodos, das superfícies de ruptura, indicado para as cortinas atirantadas e da teoria de Rankine, indicado para o solo grampeado, trata-se da mesma teoria, de escorregamento de cunhas planas, somente que com tratamento analítico diferenciado. Verifica-se pelo desenvolvimento da pesquisa, que os dois métodos podem ser utilizados indistintamente para os dois tipos de contenção, ou para a solução híbrida.

Para a aplicação de soluções híbridas, como proposto, resta ainda solucionar a emenda dos tirantes de um e outro sistema de contenção, o que é um problema comum de engenharia, podendo ser resolvido ,esmo por traspasse das armaduras.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Propor novas disposições construtivas ou uso dos sistemas já existentes, para solucionar problemas de engenharia, faz parte dos processos de projeto. Em encostas, em áreas de encostas com ocupação desordenada, o uso de contenções para formação de patamares com assentamento de edificações, pode significar não remover moradores em áreas de situação de risco.

Buscar, em casos práticos, observados em estudos de áreas de risco geológico, encontrados na literatura, (BANDEIRA, 2010) e (MAXIMO, 2006), ou outros ainda que se apontem na pesquisa bibliográfica, traz uma visão sobre toda a problemática das áreas de risco e das possíveis alternativas de solução. Neste trabalho, analisou-se um pequeno recorte desta problemática. Outrossim, concluir a respeito das vantagens e restrições sobre a escolha de determinado método de análise de contenções de patamares de ocupação de encostas, a

partir dos dados pesquisados, estudados e apresentados, requer uma iniciação e “mergulho” em uma infinidade de conceitos e técnicas, necessárias para o entendimento do problema.

Neste trabalho, foi possível esclarecer os processos de cálculo de cada um dos sistemas de contenção estudados e perceber, que se trata de um único método, com aplicações diferenciadas, unicamente, podendo ser utilizados um ou outro, indistintamente para cada uma dos sistemas de contenção, ou um híbrido.

Fica para novas pesquisas, a sugestão de continuidade, o desenvolvimentos de técnicas e tecnologias próprias para o sistema híbrido identificado na pesquisa.

4. REFERÊNCIAS

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana de Recife**. 340 f. Doutorado em Engenharia Civil: Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

BUDHU, MUNI. **Fundações e estruturas de fundações**. 1 Ed. LTC: Rio de Janeiro, 2013.
COSTA NETO, Alcino de Oliveira. **Análises paramétricas de estabilidade de taludes grampeados**. Mestrado em Engenharia Civil. 235 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2015.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 7. Ed, CENGAGE: São Paulo, 2012.

DINIS, H. **Obras de Terra**. Curso apostilado do curso de graduação em engenharia civil. E.E. Mackenzie, São Paulo, 2022.

EHRICK, M. Becker, L. **Muros e Taludes de Solo Reforçado: projeto e execução**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

FELIX, CARLOS. **Comportamento dos muros de terra armada**, 1991, 151p. Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto, 1991.

GERSCOVICH, DENISE; DONZIGER, BERNADETE; SARAMAGO, ROBSON. **Contenções: Teoria e Aplicações em Obras**. 1. Ed, Oficina de Textos, 2019, 320p.

GERSCOVICH, DENISE. **Estabilidade de taludes**. 1. Ed, Oficina de Textos: São Paulo, 2012, 166p.

JORGE, M. C, O.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. In: JORGE, M. C, O.; GUERRA, A. J. T. **Processos Erosivos e recuperação de áreas degradadas**. Oficina de Textos: São Paulo, 2013.

MASSAD, FAIÇAL. **Obras de terra: curso básico em geotecnia**. 2. Ed. Oficina de Textos: São Paulo, 2010, 216p.

MÁXIMO, A. C. **Uma análise de risco em encostas urbanas**. Mestrado em Arquitetura. 218 f. Universidade Federal de Santa Catarina: Blumenau, 2006.

SANTOS, C. A. B. R. **Análise numérica do comportamento de escavações em solo grampeado: estudo de caso e influência dos condicionantes de projeto e de execução**.

Mestrado em Engenharia Civil. 287 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2019

SOLOTRATE. **Manual de serviços geotécnicos**. 3. Ed. São Paulo, 2009.