UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO VICTOR MENDES DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE ROTINA EM AUTOLISP PARA O CÁLCULO DE EMPUXO PASSIVO EM SOLOS ARENOSOS PELA METODOLOGIA DA ESPIRAL LOGARÍTMICA

Caruaru
2023

JOÃO VICTOR MENDES DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE ROTINA EM AUTOLISP PARA O CÁLCULO DE EMPUXO PASSIVO EM SOLOS ARENOSOS PELA METODOLOGIA DA ESPIRAL LOGARÍTMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador(a): Prof. Dr. José Moura Soares

Caruaru
2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Marilene Mendes e José Joseildo, que sempre me apoiaram e me deram condições para estudar em uma universidade federal.

À minha tia Joselia Maria, meu irmão José Augusto e minha cunhada Elaine Saborido, por sempre serem me apoiarem e estarem presentes nos momentos difíceis.

À minha namorada, Isabelle Sales, por ser minha confidente e minha parceira de vida. Por sempre estar presente e por me dar apoio nas decisões que tomo.

Aos amigos que formei durante a graduação que me ajudaram a passar pelos momentos difíceis e a seguir em frente, e que hoje são colegas de profissão.

À Pórtis, empresa júnior de engenharia, em que pude vivenciar diversas áreas da graduação e experiências complementares ao curso.

À Bezerra Engenharia, Fernando e Victor, por me darem a oportunidade de trabalhar com o que gosto e me passarem ensinamentos essenciais para um engenheiro.

Ao Professor José Moura Soares pela oportunidade e confiança depositada nesse estudo, e por ajudar nos momentos necessários. Pela paciência tida durante as longas reuniões e por me ajudar a realizar um bom trabalho.

Sou grato à UFPE por ter tido a oportunidade de realizar e finalizar a graduação em Engenharia Civil, aumentando meus conhecimentos e me tornando apto a trabalhar nesse ramo.

Ao Professor Johannes Cornelis Johanna Maria Derks por ter ajudado e contribuído com a implementação do algoritmo deste trabalho.

Desenvolvimento de rotina em AutoLISP para o cálculo de empuxo passivo em solos arenosos pela metodologia da espiral logarítmica.

Development of a routine in AutoLISP for the calculation of passive thrust in sandy soils using the logarithmic spiral methodology.

João Victor Mendes da Silva [1]

RESUMO

Para elaboração de um projeto de muro de arrimo, torna-se necessário dimensionar a sua geometria, calcular os empuxos de terra atuantes e fazer o cálculo de estabilidade do mesmo, verificando a fator de segurança quanto ao deslizamento e ao tombamento, e analisando a capacidade de carga do solo de fundação e sua estabilidade global. Na realização do estudo de muros de arrimo, normalmente encontra-se dos dois tipos de empuxo: ativo e passivo. Se tratando especificamente do empuxo passivo, verifica-se que existem diversas metodologias de cálculo, dentre elas, destaca-se uma que é utilizada para solos arenosos, que é a metodologia da espiral logarítmica. O princípio dessa metodologia parte da análise de várias superfícies de ruptura, portanto, gasta-se um tempo razoável para descobrir onde ocorre a ruptura, chamada de superfície crítica. Atualmente com o desenvolvimento da computação gráfica, é possível trabalhar através algoritmos, metodologias para acelerar o processo de cálculo de empuxo passivo. Um instrumento bastante utilizado em projetos de engenharia e arquitetura, o AutoCAD, uma ferramenta CAD (*Computer-Aided Design*), que de maneira general serve para realização de desenhos e representações gráficas, mas que também pode ser utilizado para cálculos mediante linguagem de programação própria chamada AutoLISP. A partir dela é possível implantar funcionalidades adicionais através de arquivos textos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Esses arquivos são criados em AutoLISP, que é uma variação da LISP (*List Processing*). Através do seu uso é possível fazer praticamente qualquer tipo de comando ou rotina para fins de cálculo ou desenhos de engenharia. Assim sendo, esta pesquisa visa o desenvolvimento de uma rotina para acelerar o processo de investigação de superfície crítica em caso de empuxo passivo em solos arenosos. Os resultados obtidos com a rotina desenvolvida determinam o empuxo passivo e a posição da superfície de ruptura crítica com precisão e velocidade.

Palavras-chave: AutoLISP; superfície ruptura crítica, empuxo passivo.

ABSTRACT

For the execution of a retaining wall project, it is necessary to dimension its geometry, calculate the active earth thrusts and calculate its stability, verifying the safety factor regarding sliding and overturning, and analyzing the capacity foundation soil load and its overall stability. When carrying out the study of retaining walls, two types of thrust are usually found: active and passive. If dealing specifically with passive thrust, it appears that there are several calculation methodologies, among them, one that is used for sandy soils stands out, which is the methodology of the logarithmic spiral. The principle of this methodology starts from the analysis of several rupture surfaces, therefore, a reasonable time is spent to discover where the rupture occurs, called the critical surface. Currently with the development of computer graphics, it is possible to work through algorithms, methodologies to accelerate the passive thrust calculation process. An instrument widely used in engineering and architecture projects, AutoCAD, a CAD (Computer-Aided Design) tool, which in general serves to carry out drawings and graphic representations, but which can also be used for calculations through its own programming language. called AutoLISP. From there, it is possible to implement additional functionalities through ASCII (American Standard Code for Information Interchange) text files. These files are created in AutoLISP, which is a variation of LISP (List Processing). Through its use it is possible to make practically any type of command or routine for calculation purposes or engineering drawings. Therefore, this research aims to develop a routine to accelerate the critical surface investigation process in case of passive thrust in sandy soils. The results obtained with the developed routine determine the passive thrust and the position of the critical failure surface with precision and speed.

Keywords: AutoLISP; Critical Surface, Passive Thrust.

DATA DE APROVAÇÃO: 09 de maio de 2023.

[1]Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: joao.victormendes@ufpe.br

1 INTRODUÇÃO

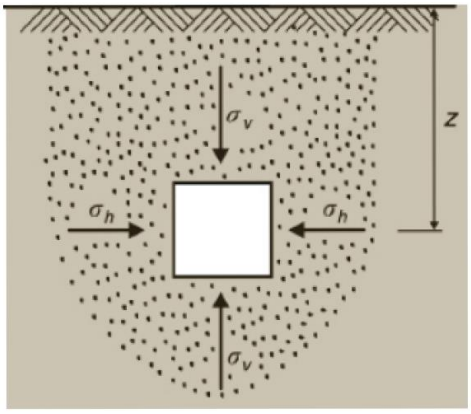
1.1 Muros de arrimo

Estruturas de contenção como muros de arrimo, são utilizadas normalmente quando se tem diferença de nível de um mesmo terreno, o que faz com que seja necessária a criação de uma estrutura que conectará os dois níveis. Para que se construa um muro de arrimo é obrigatório conhecimento das forças que atuam na parte posterior/anterior do muro, assim, ajustando o correto planejamento e execução do projeto, e posteriormente, sua construção. As forças que atuam a montante do muro são causadas pela distribuição de tensão horizontal no solo ao longo de sua altura, que através do cálculo de sua área (de seu diagrama), possibilita a determinação dessas forças. Entende-se por empuxo de terra, a ação produzida pelo maciço terroso sobre as obras em que estão em contato com essas estruturas (CAPUTO, 2015). Alguns fatores que são importantes para o cálculo do empuxo atuante no muro são: o seu tipo (gravidade, de flexão, com contraforte, etc), empuxo ativo ou passivo, inclinação do muro de arrimo na interface, resistência ao cisalhamento do solo retido, ângulo de atrito na interface parede-aterro (adesão) e inclinação da superfície do aterro.

1.2 Cálculo de Empuxo

DAS (2007) mostra que existem três tipos de empuxo: empuxo no repouso, empuxo ativo e empuxo passivo. Na situação em que o solo está em seu estado natural, ele se encontra no estado de tensão que é considerada em repouso, ou seja, as tensões presentes são aquelas oriundas da sua formação geológica (Figura 1). Para o repouso, a pressão vertical (σ_v) é o produto entre a profundidade (z) e o peso específico do solo (γ), $\sigma_v = \gamma z$.

Figura 1 - Representação empuxo no repouso



Fonte: Caputo (2015)

No caso de uma situação de repouso, caso uma parte de solo semi-infinito seja retirado, e substituído por um plano imóvel (simulando a construção de um muro), indeformável e sem atrito, o estado de tensões no solo contido, é mantido igual a situação original. Para este caso, as pressões horizontais sobre o referido plano vertical, crescerá linearmente com a profundidade, ou seja, o carregamento é hidrostático (Figura 2), sendo:

$\sigma_h = K_0 \sigma_v = K_0 \gamma z$.

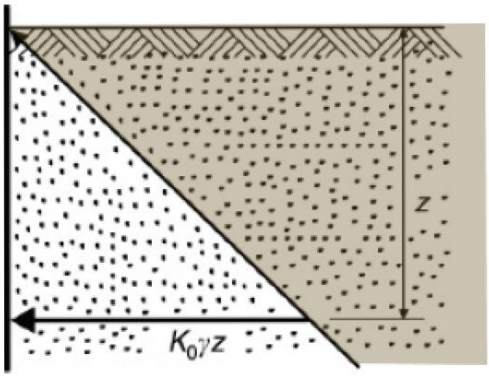
Sendo:

K_0 = Coeficiente de empuxo no repouso.

σ_h = Pressão horizontal (kN/m²).

Os empuxos sobre estruturas, que essencialmente não possam ou não devam sofrer deslocamentos apreciáveis, serão calculados utilizando-se o coeficiente K_0.

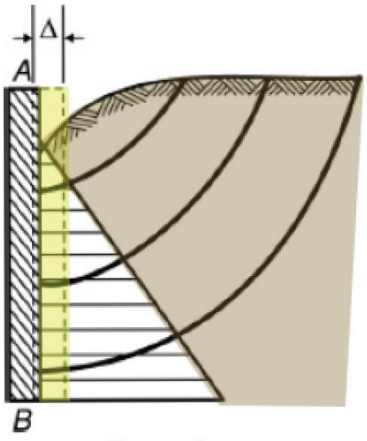
Figura 2 – Variação das pressões no repouso



Fonte: Caputo (2015)

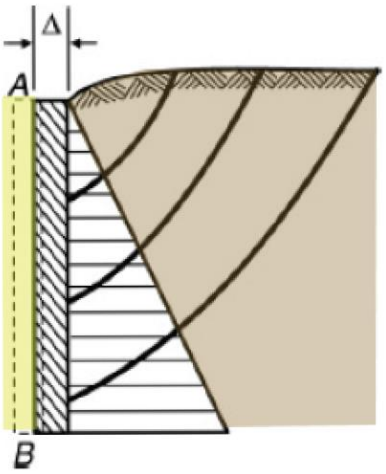
No que se refere a situação ativa, a estrutura se move para fora do terreno, ocorrendo diminuição das tensões horizontais e o aumento dos deslocamentos Δ (Figura 3). Na situação contrária (passivo), a estrutura empurra o aterro, com isso ocorre menores deslocamentos Δ e maiores tensões horizontais (Figura 4). Em ambas as situações, devido a resistência ao cisalhamento, o solo apresenta um plano de deslizamento.

Figura 3 - Empuxo ativo



Fonte: Caputo (2015)

Figura 4 - Empuxo passivo



Fonte: Caputo (2015)

Nos estudos clássicos, foram utilizadas superfícies planares para simplificação dos cálculos, pois o que ocorre normalmente na realidade é uma superfície curva. Caputo (2015) descreve que na situação de empuxo ativo (E_a), a angulação α formada entre o plano de deslizamento, considerando a superfície planar de ruptura, e a superfície horizontal, é de (45º + ϕ/2) (Figura 5). Diferentemente para o empuxo passivo (E_p), cujo ângulo formado com a horizontal é de (45º - ϕ/2) (Figura 6). As pressões correspondentes chamam-se ativa e passiva, e os coeficientes, ativo (K_a) e passivo (K_p). O material que existe acima da superfície de deslizamento é chamado de cunha instável, e com a movimentação dessa região, ocorre o que é denominado de equilíbrio plástico. Neste caso, o solo é acionada em sua resistência interna, conhecida como Estado Ativo de Equilíbrio. Para solos não coesivos, o valor de K_a é calculado pela Equação 1:

$K_a = \tan^2 (45^o - \phi/2)$ (1)

Sendo:

ϕ = ângulo de atrito

O cálculo do empuxo ativo total, ou seja, ao longo da altura do muro será calculado pela Equação 2:

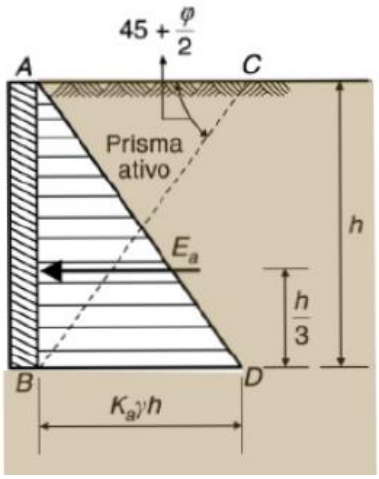
$E_a = (1/2)\gamma\, h^2\, Ka$ (2)

Sendo :

$\gamma =$ Peso específico (kN/m³).

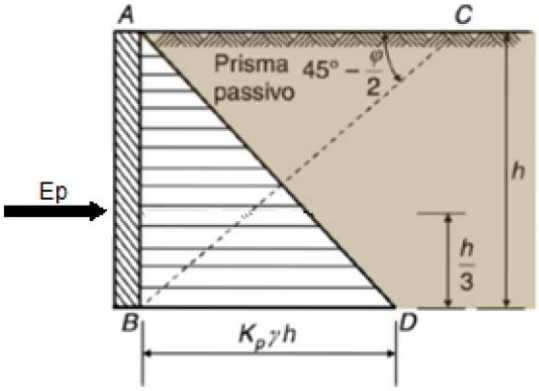
$h =$ Profundidade (m).

Figura 5 - Angulação empuxo ativo



Fonte: Caputo (2015)

Figura 6 - Angulação empuxo passivo



Fonte: Caputo (2015)

No empuxo passivo, a estrutura se move em direção ao aterro. O solo é comprimido pela estrutura, ocorrendo a formação da cunha instável, criando resistência no solo ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura. Uma vez formada a cunha gerada por causa do seu

movimento, ocorre na situação ativa que a massa de solo, tende a descer segundo ao plano de deslizamento (Figura 7), já na situação passiva ela tende a subir (Figura 8) (CAPUTO, 2015). Para solos não coesivos, o valor de K_p é calculado pela Equação 3:

$$K_p = \tan^2 (45^o + \phi/2) \quad (3)$$

Sendo:

ϕ = ângulo de atrito

A expressão do empuxo passivo total, ou seja, ao longo da altura do muro será calculado pela Equação 4:

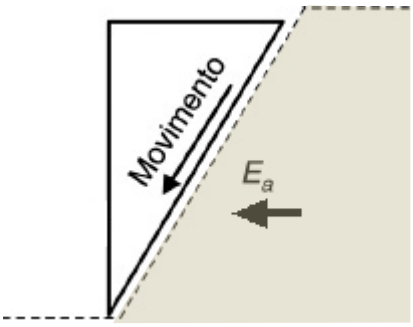
$$E_p = (1/2)\gamma\, h^2\, Kp \quad (4)$$

Sendo:

$\gamma =$ Peso específico (kN/m³)

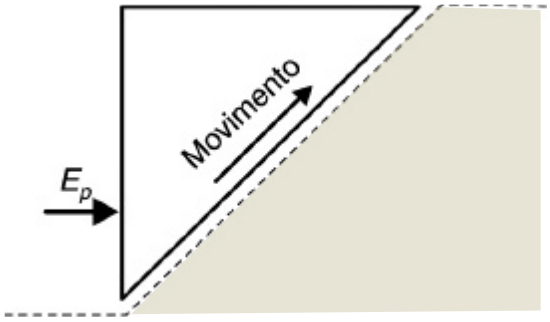
$h =$ Profundidade (m)

Figura 7 - Movimento no empuxo ativo



Fonte: Caputo (2015)

Figura 8 - Movimento no empuxo passivo



Fonte: Caputo (2015)

Na Tabela 1, indicam-se os valores de K_a e K_p para os diferentes valores de ϕ, como uma que evidenciam que os coeficientes de empuxo passivo e ativo são inversamente proporcionais, sendo o valor do empuxo passivo, normalmente, maior que o do empuxo ativo.

Tabela 1 - Valores de K_a e K_p para os diferentes valores de ϕ

ϕ	K_a	K_p
0º	1,00	1,00
10º	0,70	1,42
20º	0,49	2,04
25º	0,41	2,47
30º	0,33	3,00
35º	0,27	3,69
40º	0,22	4,40
45º	0,17	5,83
50º	0,13	7,55
60º	0,07	13,90

Fonte: Caputo (2015)

Como se observa, entre os três valores do coeficiente de empuxo K_i, pode-se escrever:

$K_a < K_0 < K_p$

Sendo:

$K_p = 1/K_a$

1.3 Análise de Limite e superfícies de deslizamento

O equilíbrio de limite é um conceito utilizado na mecânica dos solos para avaliar a estabilidade de maciços de terra ou fundações. Como descrito por Terzaghi e Peck (1996), a maioria dos métodos envolve a comparação entre as forças ou momentos resistentes e os atuantes em uma determinada superfície de deslizamento. Utilizando informações sobre as propriedades de resistência ao cisalhamento do solo/rocha, descontinuidades, poropressões e outras características do maciço, o método permite calcular o fator de segurança do talude. O objetivo dessas análises é determinar se há resistência suficiente no talude para suportar as tensões de cisalhamento que podem causar falha ou deslizamento. Os principais métodos clássicos são baseados na metodologia do equilíbrio de limite e são aqui discutidos.

A Teoria de Coulomb (1776) do empuxo de terra é baseada na existência de uma superfície de ruptura, e originalmente considera a presença de atrito entre o solo e a parede. Nessa teoria,

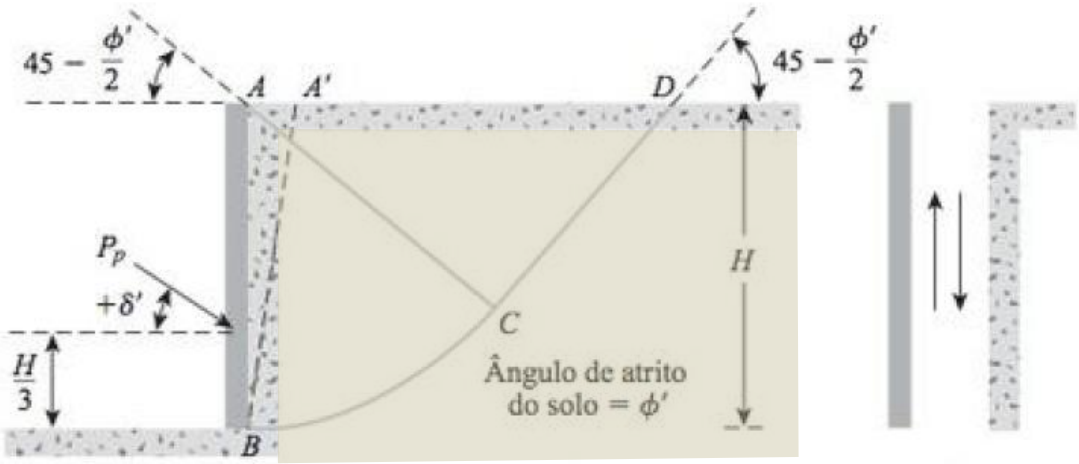
o maciço de terra é tratado como um corpo rígido que se rompe ao longo de superfícies curvas, que por conveniência são assumidas como planas.

A Teoria de Rankine (1857) surgiu a partir do estudo do empuxo do solo. Nesta teoria, presume-se que a massa de solo em contato com a estrutura de suporte esteja em um estado plastificado, seja ativo ou passivo, assumindo que todo o solo esteja em equilíbrio plástico. A análise de Rankine se baseia nas equações de equilíbrio interno do maciço, que são definidas para um elemento infinitesimal do meio e são estendidas a toda a massa plastificada através de integração ao longo da sua altura. De acordo com Rankine, a superfície de contato entre a estrutura e o solo é lisa, pois não há atrito entre os dois, diferentemente do que é definido na teoria de Coulomb.

Superfície de deslizamento é uma superfície imaginária dentro de um maciço de solo ou rocha onde ocorre a ruptura ou deslocamento (COULOMB, 1776). É uma zona de cisalhamento onde há perda de coesão e aderência entre as partículas do solo ou entre os blocos de rocha. Em situações práticas, as superfícies são curvas, já na teoria é estudado tanto as superfícies curvas como também superfícies planas, mas o foco maior se dá nas planas por facilitar as metodologias e os cálculos aplicados. A Teoria de Rankine, para solos argilosos e arenosos, foi realizada para superfícies planares, já em Coulomb, foi realizado para areias como planar, e para solos argilosos os resultados gerados, em muitos casos, são desfavoráveis a segurança, e neste caso deve-se considerar que a superfície de ruptura será curva.

Na prática, a parede de contenção é áspera e a força de cisalhamento é gerada entre a superfície da parede e o aterro. Nos casos mais comuns encontrados em projetos de engenharia, a representação de uma curva de ruptura geralmente é pensada como um arco de circunferência (CAPUTO, 2015). Para o cálculo de empuxo passivo E_p com o +δ (ângulo de rotação de E_p em relação a normal da face do muro), que é a situação mais comum encontrada em obras, a superfície de ruptura do solo pode ser considerada um arco de uma espiral logarítmica (Figura 9) (DAS 2007). Para considerações práticas, no caso de um aterro granular fofo, o ângulo de atrito do muro (δ) é considerado igual ao ângulo do atrito do solo (ϕ). Para aterros granulares densos, δ é menor que ϕ e está na faixa de $\phi'/2 \leq \delta' \leq (2/3)\,\phi$. Para Murthy (2002), é comumente usado em superfícies de ruptura para determinar o valor de empuxo passivo para um muro de arrimo com aterro, se δ for maior igual que ϕ/3.

Figura 9 - Superfície de ruptura com +δ



Fonte: DAS (2007)

1.4 Equação da Espiral Logarítmica

A espiral logarítmica, segundo Murthy (2002), é uma função que é dada por um raio vetor arbitrário da curva (r_0), pelo ângulo de atrito (ϕ) e pela variação angular (θ) do raio (r) ao longo da região estudada, dada pela Equação (5) que tem como finalidade o cálculo de empuxo passivo para solos arenosos não coesivos:

$$r = r_0 e^{\theta tan\phi} \tag{5}$$

Sendo:

$r_0 =$ Raio vetor selecionado arbitrariamente para referência. (m)

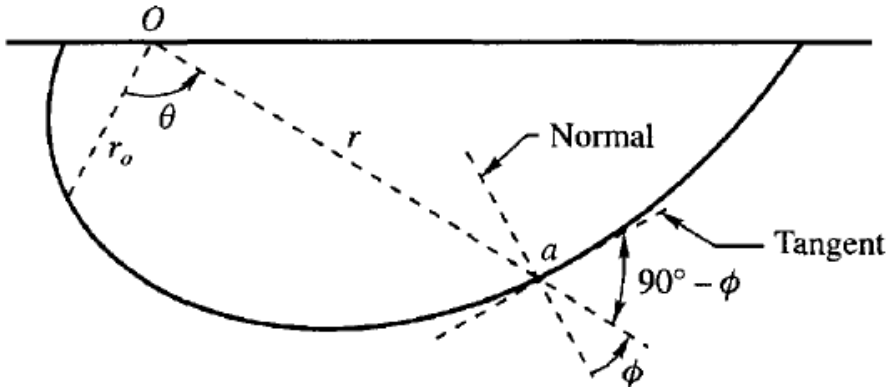
$r =$ Raio vetor de qualquer ponto escolhido na espiral fazendo um ângulo θ com r_0. (m)

$\phi =$ Ângulo de atrito interno do material. (graus)

$\theta =$ Ângulo entre r e r_0. (grau)

Para entendimento das variáveis da equação, é mostrado na Figura 10 a sua aplicação, onde O é a origem (centro) da espiral logarítmica. A propriedade da espiral logarítmica mostra que cada raio vetor r, como a reta Oa , por exemplo, faz um ângulo de (90°- ϕ) com a tangente a espiral no ponto a, e também, o vetor Oa faz um ângulo ϕ com a reta normal tangente da espiral em a.

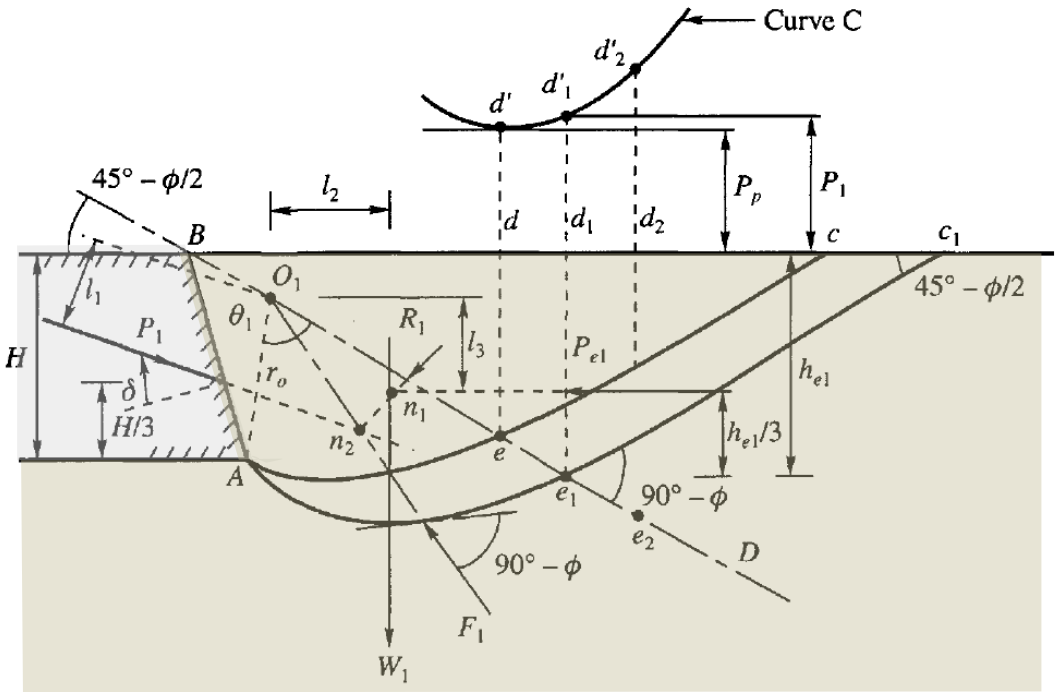
Figura 10 - Propriedades da Espiral Logarítmica



Fonte: Murthy (2002)

De acordo com Murthy (2002), pode-se ver na Figura 11, que mostra uma seção através da face plana de contato AB de um muro de arrimo rígido que gira em torno do ponto A no aterro de solo sem coesão com uma superfície horizontal. A linha BD é desenhada em um ângulo (45°- ϕ/2) com a superfície. Tendo O_1 como um ponto arbitrário selecionado na linha BD como o centro de uma espiral logarítmica, e seja O_1A o vetor de referência r_0. Supondo uma superfície deslizante de teste Ae_1c_1 que consiste em duas partes. A primeira parte é a curva Ae_1 que se refere a espiral logarítmica com centro em O_1 e sendo a segunda uma reta e_1c_1 que é tangente à espiral no ponto e_1 da linha BD.

Figura 11 - Método da Espiral Logarítmica para obtenção do empuxo passivo de areia



Fonte: Murthy (2002)

O encontro de e_1 com a superfície horizontal em c_1 forma um ângulo de (45°- ϕ/2). O encontro de O_1 com e_1 é o vetor final r_1 da espiral que faz um ângulo θ_1 com o vetor de referência r_0. A linha BD faz um ângulo de (90°- ϕ) com a linha e_1c_1, satisfazendo a propriedade da espiral. Com a geometria formada, torna-se necessário analisar as forças que atuam sobre a massa de solo situada acima da superfície de deslizamento Ae_1c_1.

Dentro da massa de solo representada pelo triângulo Be_1c_1, o estado de tensão é o mesmo que na massa semi-infinita no estado passivo de Rankine. As tensões de cisalhamento ao longo das seções verticais são zero nesta zona triangular. Portanto, podemos substituir a massa de solo situada na zona $e_1d_1c_1$ por uma pressão passiva de terra P_{e1} atuando na seção vertical e_1d_1 a uma altura $h_{e1}/3$ onde h_{e1} é a altura de a seção vertical e_1d_1. O valor dessa pressão é dado pela Equação (6), sendo complementada pela Equação (7).

$$P_{e1} = (1/2)\gamma\, h_{e1}^2\, N_\phi \quad (6)$$

$$N_\phi = tan^2(45° + \phi/2) \quad (7)$$

Sendo:

γ = Peso específico (kN/m³).

H_{e1} = Profundidade (m).

ϕ = Ângulo de atrito do solo.

O corpo de massa de solo BAe_1d_1 atuam as seguintes forças:

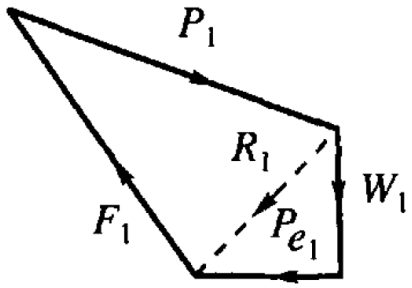
1. O peso W_1 da massa de solo agindo no centro de gravidade formando um braço de alavanca l_2 em relação a O_1, que é o centro da espiral logarítmica.
2. A pressão passiva de solo P_{e1} que atua na seção vertical e_1d_1 com um braço de alavanca l_3.
3. A pressão passiva de solo P_1 atuando na superfície AB em um ângulo δ com a normal com uma altura de h/3 acima de A, com um braço de alavanca l_1.
4. A reação da força resultante F_1 na superfície curva Ae_1 e passando pelo centro O_1

1.4.1 Determinação da Força P1 via Polígono de Forças

As direções de todas as forças mencionadas anteriormente, são conhecidas, exceto a direção de F_1. Para determinação da direção de F_1, é combinado o peso W_1 com a força P_{e1} que gera a resultante R_1 (Figura 12). Esta resultante passa pelo ponto de interseção n_1 de W_1 e P_{e1} na Figura 10 e intercepta a força P_1 no ponto n_2. Por equilíbrio, é requerido que a força F_1 passe pelo mesmo ponto. De acordo com a propriedade da espiral, ela deve passar pelo mesmo ponto

e também deve passar pelo centro O_1 da espiral. Assim, a direção de F_1 passa a ser conhecida e o polígono de forças mostrado na Figura 12 pode ser completado. Assim obtém-se a intensidade da força P_1 necessária para produzir o deslizamento ao longo da superfície Ae_1c_1.

Figura 12 – Polígono das forças



Fonte: Murthy (2002)

1.4.2 Determinação de P1 graficamente por momentos

A força P_1 pode ser obtida, também, pelo cálculo dos momentos de todas as forças em torno do centro O_1 da espiral. O equilíbrio do sistema requer que a soma dos momentos de todas as forças seja igual a zero. Já que a direção de F_1 agora é conhecida, e como ela passa por O_1, ela não gera momento. A soma dos momentos de todas as outras forças podem ser escritas como mostrado na Equação 8 complementada pela Equação 9. A equação foi adaptada para gerar o somatório nulo, pois segundo Murthy (2002), as três forças geram momentos de mesmo módulo.

$$P_1 l_1 - W_1 l_2 - P_{e1} l_3 = 0 \quad (8)$$

$$P_1 = (W_1 l_2 - P_{e1} l_3)/l_1 \quad (5)$$

Sendo:

W_1 = Peso (kN).

P_1 = Empuxo do solo passivo atuando na superfície AB com um ângulo δ com a normal numa altura H/3 tendo um braço de alavanca l_1 (kN).

P_{e1} = Empuxo do solo passivo atuando na seção vertical e_1d_1 tendo um braço de alavanca l_3 (kN).

$l_1 =$ Braço de alavanca de P_1 (m).

$l_2 =$ Braço de alavanca de W_1 (m).

$l_3 =$ Braço de alavanca de P_{e1} (m).

Portanto, P_1 é obtido para uma suposta superfície de ruptura Ae_1c_1.

A metodologia da espiral logarítmica consiste em repetir a investigação de mais superfícies de teste passando por A que interceptam a linha BD nos pontos e_2, e_3, etc. Os valores de P_1, P_2, P_3, etc, assim obtidos podem ser plotados como ordenadas $d_1d'_1$, $d_2d'_2$, etc., como mostrado na Figura 11 e uma curva suave C é obtida juntando os pontos d'_1, d'_2, etc. O deslizamento ocorre ao longo da superfície correspondente ao valor mínimo P_p que é representado pela ordenada d'_d. No exemplo da bibliografia, a superfície de falha correspondente é mostrada como Aec na Figura 11.

Para aplicação dessa metodologia, faz-se necessário uma adaptação que se refere as diversas curvas espirais logarítmicas que se busca gerar, pois segundo Murthy (2002), estas são obtidas através da variação do ângulo θ como ângulo central que inicia a partir de um vetor r_0 (módulo constante) até o valor do módulo do vetor final r. Verifica-se pela equação da espiral logarítmica, que isto é impossível, já que os parâmetros (r_0 e ϕ) não foram alterados. Logo, na aplicação da espiral logarítmica deste estudo, além da variação do ângulo θ, haverá também a mudança dos valores de r_0, o que será representado por figuras geométricas com várias retas AB. Por esse motivo, as curvas que serão geradas pelo algoritmo deste trabalho diferem do proposto na Figura 11.

Um ponto importante a se analisar seria o da variação do ângulo de atrito ϕ. Para a aplicação da espiral logarítmica, caso o valor de ϕ fosse alterado juntamente com θ e mantendo r_0 fixo, seria possível gerar todas as superficies partindo de um único ponto. Porém, a execução dessa teoria é inviável, já que se deve considerar um solo homogêneo e sem a presença de água.

1.5 AutoCAD e AutoLISP

Para aplicação da metodologia da espiral logarítmica, foi necessário utilizar conceitos de computação gráfica, como o AutoCAD, e, para cálculo da função do empuxo passivo, será utilizado o AutoLISP. Essa é uma linguagem de programação interna processada em lista que faz parte do AutoCAD. Trata-se de uma variação da programação em LISP que é de fácil aprendizado e boa eficiência, no que diz respeito a sintaxe da programação, porém, seu uso para desenvolvimento de rotinas, é que traz um grau maior de dificuldade.

O AutoCAD funciona como uma ferramenta de entrada e saída de dados (pré-processamento e pós-processamento) que interagem com o AutoLISP, pois através da interface gráfica (interpretador de comandos) é possível visualizar os resultados dos algoritmos programados, as rotinas podem ser escritas num processador ASCII, porém existe o Visual LISP, que é um ambiente próprio, que facilita a escrita e organização das rotinas. Essas rotinas geradas podem

solicitar que o usuário forneça informações de entrada, permita que acesse comandos internos do AutoCAD, modifique ou crie objetos no banco de dados dos desenhos. As rotinas criadas no AutoLISP podem adicionar comandos personalizados no AutoCAD.

Para a escrita da rotina em desenvolvimento, utilizou-se a sintaxe da linguagem segundo GUIMARÃES (2003) e LEITÃO (2007), onde é possível aprender os pontos principais dessa linguagem no que diz respeito às estruturas de repetição, estruturas condições e funções, além da visualização de diversos exemplos.

Dentro do AutoCAD, além do AutoLISP, também é possível implementar rotinas através de ActiveX. O ActiveX é uma maneira de trabalhar via programação com o conteúdo de um desenho do AutoCAD. Em muitos casos, o ActiveX funciona mais rápido do que as funções tradicionais do AutoLISP na manipulação de objetos de desenho do AutoCAD. Ao trabalhar com objetos ActiveX no AutoLISP, trabalha-se com o mesmo modelo de objeto, propriedades e métodos que podem ser manipulados em outros ambientes de programação. Algumas funções do ActiveX facilitarão na obtenção de dados necessários para implementação da espiral logarítmica, que será discutido posteriormente.

O presente trabalho visa auxiliar e servir de apoio aos técnicos e profissionais da geotecnia na análise de estabilidades de taludes que são afetadas por empuxo passivo e empuxo ativo, através de rotinas criadas em AutoLISP, aplicadas em softwares AutoCAD utilizando a metodologia da espiral logarítmica. O objetivo é produzir diversas superfícies de tentativa baseadas no cálculo do empuxo passivo, e com as amostras necessárias, detectar o empuxo passivo mínimo que denotará a superfície crítica dentre as diversas superfícies de ruptura. Através do presente estudo, foi possível aplicar, testar e verificar a metodologia da espiral logarítmica, o que possibilitou encontrar a superfície de ruptura crítica e determinar o empuxo passivo para o caso de estudo.

2 METODOLOGIA

Com relação a metodologia, pode-se verificar no fluxograma na Figura 13, a sequência do que foi realizado para se conseguir atingir os resultados a que se propôs o trabalho.

2.1 Revisão bibliográfica

Através de livros, cursos online, artigos e entre outras bibliografias, foi elaborado um estudo com o objetivo de detalhar e refinar os conhecimentos sobre comportamentos dos solos aplicados em muros de arrimo e sobre a linguagem LISP.

2.2 Análise de interação com usuário

Dentre as possíveis formas de interação entre o programa e o usuário, foi escolhido o método via *prompt* de comando, pois a maioria das rotinas LISP desenvolvidas dentro do AutoCAD são executadas diretamente da linha de comando, sendo este o método mais comum. Para a execução da rotina desenvolvida neste programa para análise de empuxo passivo do solo, este foi o procedimento utilizado. Cabe ressaltar que o usuário necessita ter o conhecimento mínimo dos comandos principais de desenho do AutoCAD. Para facilitar a função do usuário, as rotinas de programação foram analisadas e estabelecidas para cada comando de forma distinta.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia de estudo

Fonte: Autor (2023)

2.3 Desenvolvimento de rotinas

As rotinas foram criadas utilizando a ferramenta de programação AutoLISP. Para modelagem gráfica da espiral logarítmica, foram utilizadas funções próprias da linguagem AutoLISP para cálculo do empuxo passivo no solo. Para definição de sua geometria são definidas variáveis que, entre outras funções, representam informações a serem utilizadas em textos e operações matemáticas. A entrada de dados é feita solicitando ao usuário que insira informações relevantes (raio inicial, ângulos, quantidade de iterações, etc), o que também é objeto de discussão no desenvolvimento da rotina.

2.4 Testes e adequações

Durante o desenvolvimento da rotina, houve a realização de testes para obtenção de resultados parciais. GUIMARÃES (2003) e LEITÃO (2007), mostram este procedimento como corriqueiro para análise instantânea das rotinas criadas em AutoLISP, ou seja, quando elaboram programas, sempre realizam testes para verificar o andamento da rotina. Os ajustes da rotina são feitos de forma incremental, sempre analisando o melhor método didático disponível para o usuário. Com base em testes do funcionamento do código, foram identificados pontos de correção e melhoria, isto tudo no que se diz respeito a linguagem de programação (*debug*).

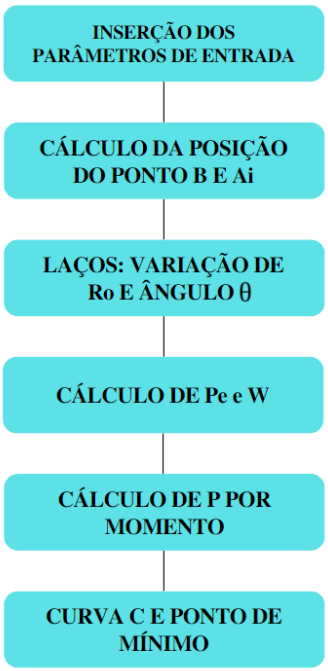
2.5 Finalização do programa

Para finalização do programa foram realizadas diversas execuções para testar a funcionalidade do programa de modo que quando houver a disponibilização para os usuários, se tenha o mínimo de erro possível, de acordo com valores obtidos em testes realizados analiticamente via planilha, e que seja clara a forma de entrada de dados e saídas de resultados.

2.6 Fluxograma do programa

A fim de facilitar o entendimento do funcionamento do código para o leitor, foi realizado um fluxograma com as etapas executadas pelo algoritmo disposto na Figura 14, que resume as etapas de cálculo da espiral logarítmica descritas na introdução.

Figura 14 - Fluxograma do programa



Fonte: Autor (2023)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o estudo da linguagem AutoLISP, e com a ajuda de algumas funções auxiliares do ActiveX para o cálculo do centróide e área de um polígono (*vla-get-centroid, vla-get-area,* etc), foi possível finalizar o programa para ser executado no AutoCAD, que serviu para se obter dados importantes no cálculo e plotagem da metodologia da espiral logarítmica. O código em AutoLISP e ActiveX vai ser disponibilizado para que outros alunos posteriormente possam desenvolver implementações desse trabalho, que se encontra para consulta no APÊNDICE A.

Uma vez feita a escrita do código, faz-se necessário escolher valores de entrada para que possa analisar os resultados gerados pelo algoritmo, e assim encontrar o valor mínimo da função, gerada pelos pontos das diversas superfícies de ruptura para cálculo do empuxo passivo.

Para aplicar a metodologia, realizou-se diversos testes para valores de entradas diferentes. O solo aplicado tem características descritas por Joppert (2007), sendo um solo arenoso com poucos finos, homogêneo e não saturado. Os cinco testes levaram em consideração somente a mudança do vetor inicial r_0 dentro do laço, e entre os testes feitos, a principal diferença foi a simulação da variação do ângulo de atrito ϕ, mantendo os parâmetros (θ, δ e γ) fixos. Os resultados obtidos nas simulações serão discutidos mais à frente.

Para aplicação dos cinco testes, os valores de entrada definidos foram:

$r_0 = 1{,}0$ m

$\theta = 60^o$

$\delta = 45^o$

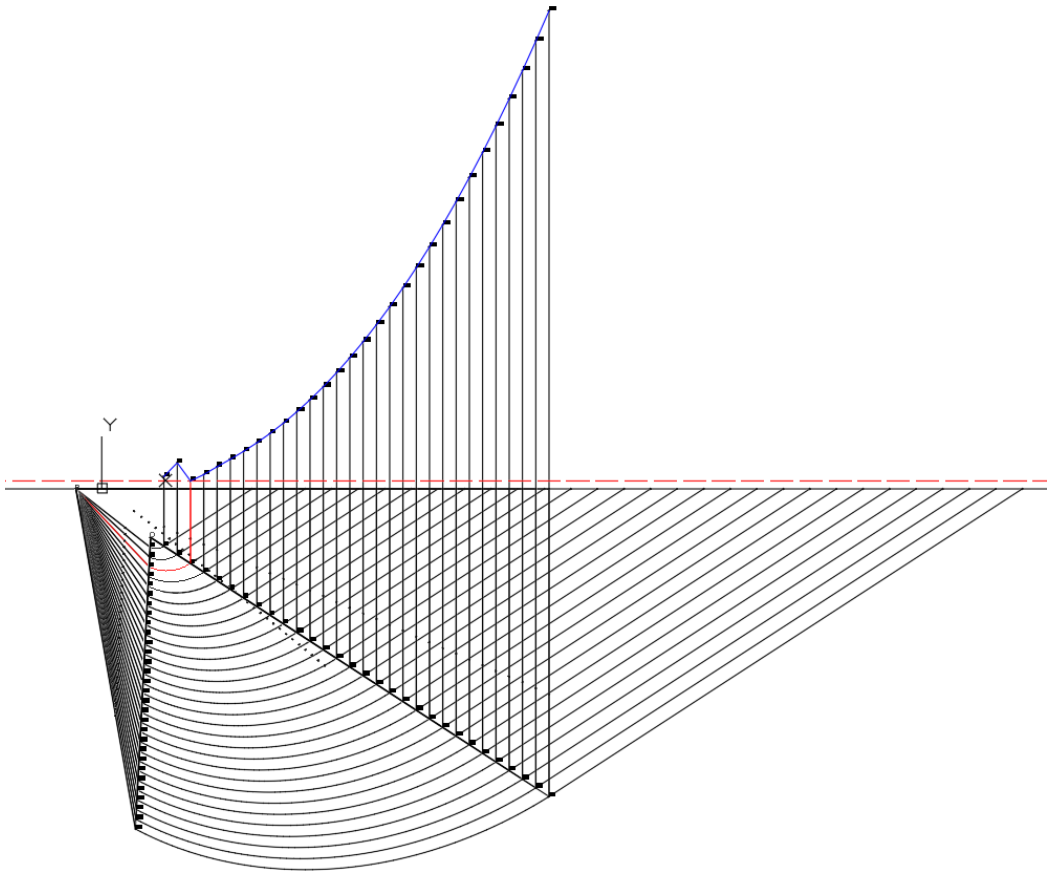
$\gamma = 17{,}0$ kN/m³ (Areia fina homogênea)

Com a variação do r_0 de 1m para cada laço do algoritmo de acordo com a equação da espiral logarítmica.

3.1 Teste 1

Através da execução do programa, foi escolhido especificamente para esse teste, a quantidade de 30 iterações para tentar entender como funciona o comportamento das superfícies de ruptura. O valor utilizado do ângulo de atrito ϕ foi de 25º. O resultado obtido é mostrado na Figura 15 e os resultados analíticos de cada iteração podem ser vistos na Tabela 2.

Figura 15 - Curvas geradas pelo algoritmo no teste 1



Fonte: Autor (2023)

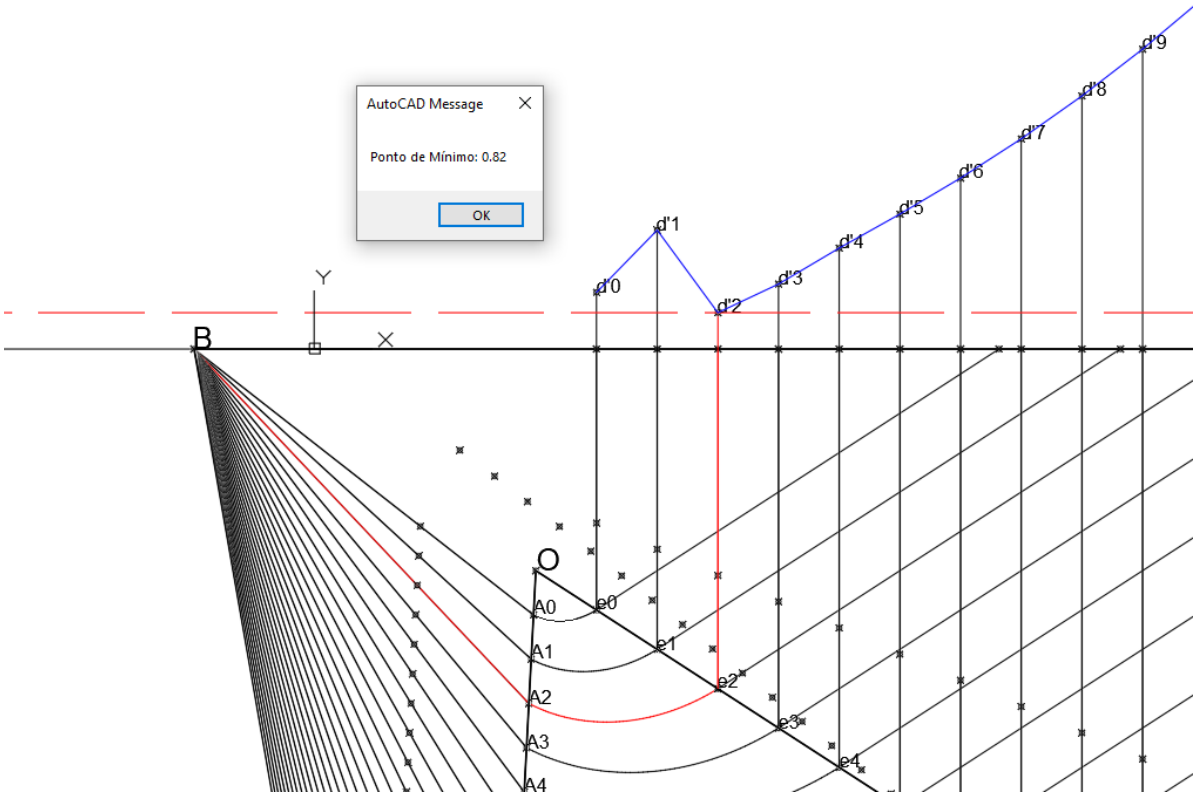
Tabela 2 - Valores de P_1 para variação do R_0, com φ=25º (Teste 1)

R_0 (m)	P_1 (kN/m)	L_1 (m)	W (kN/m)	L_2 (m)	P_e (kN/m)	L_3 (m)	Área (m²)
1,00	1278,58	1,31	536,37	1,71	698,64	1,07	31,55
2,00	2682,75	0,44	796,30	0,93	925,15	0,48	46,84
3,00	819,65	0,41	1107,04	0,19	1183,41	0,11	65,12
4,00	1466,21	1,24	1468,57	0,53	1473,42	0,70	86,39
5,00	2276,82	2,04	1880,89	1,24	1795,19	1,29	110,64
6,00	3043,95	2,82	2344,01	1,93	2148,71	1,88	137,88
7,00	3856,80	3,57	2857,93	2,62	2533,98	2,48	168,11
8,00	4741,29	4,29	3422,64	3,30	2951,01	3,07	201,33
9,00	5708,60	5,00	4038,15	3,98	3399,79	3,66	237,54
10,00	6764,84	5,68	4704,45	4,66	3880,32	4,25	276,73

Fonte: Autor (2023)

Nota-se que os valores vistos na Tabela 2 estão com valores diferentes da Figura 16, pois caso fosse gerado uma curva C utilizando tais valores, gerariam uma curva C difícil de ser visualizada, por haver variações de grande escala para o P_1, por esse motivo o resultado mostrado pela Figura 16 está com um fator de redução 1/1000. Tal mudança será aplicada para todos os outros testes.

Figura 16 – Ponto de mínimo teste 1



Fonte: Autor (2023)

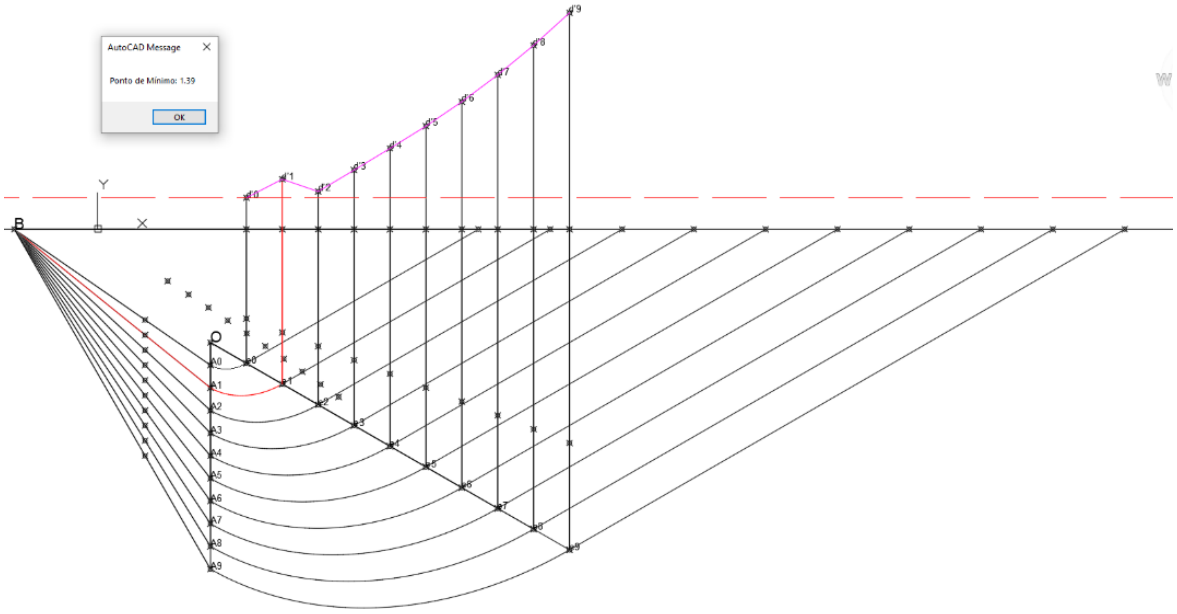
Pelo o que foi estabelecido pela metodologia da espiral logarítmica, o ponto de mínimo da curva C será referente a superfície crítica, em que ocorre a ruptura do solo, que para esse caso foi encontrado o valor de 819,65 kN/m.

Observa-se para esse primeiro teste que o comportamento das superfícies convergiu após 10 iterações, não mudando a concavidade. Por esse motivo, a partir do teste 2, será implementado somente 10 iterações para melhor visualização das superfícies de ruptura.

3.2 Teste 2

Para o teste 2, o novo valor do ângulo de atrito adotado foi de 30º. O comportamento das superfícies de ruptura para esse caso é bem semelhante ao teste anterior. Pode-se visualizar as curvas geradas na Figura 17, bem como os valores de cada variável calculada na Tabela 3. Pelo o que foi estabelecido pela metodologia da espiral logarítmica, o ponto de mínimo da curva C será referente a superfície crítica, em que ocorre a ruptura do solo, que para esse caso foi encontrado o valor de 1342,42 kN/m.

Figura 17 - Superfícies geradas no teste 2



Fonte: Autor (2023)

Tabela 3 - Valores de P_1 para variação do R_0, com φ=30º (Teste 2)

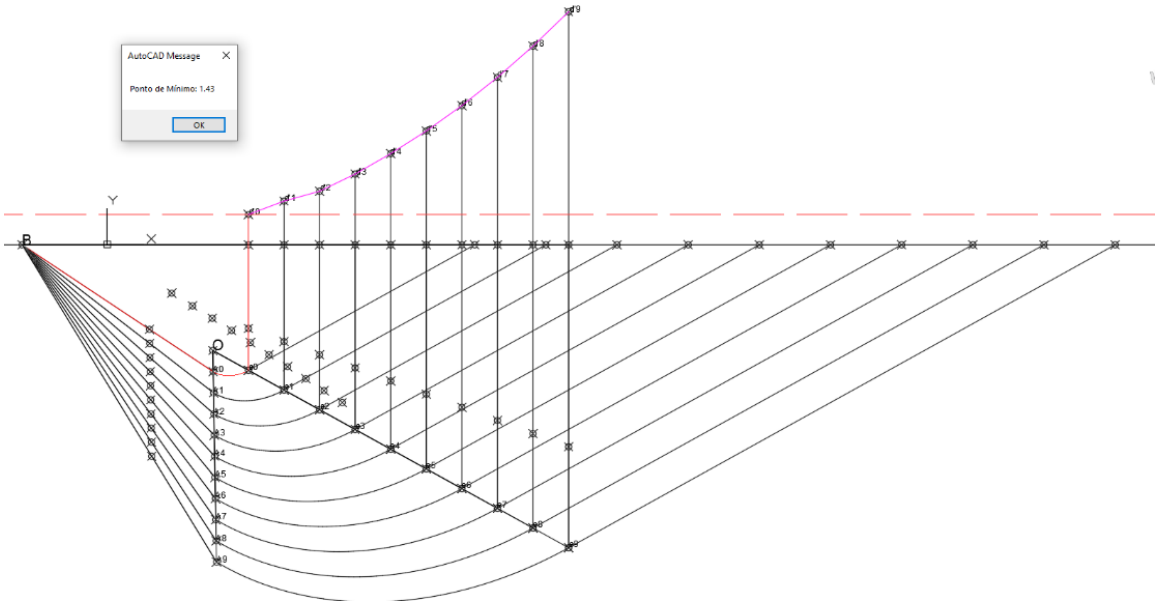
R_0 (m)	P_1 (kN/m)	L_1 (m)	W (kN/m)	L_2 (m)	P_e (kN/m)	L_3 (m)	Área (m²)
1,00	1392,42	1,50	606,06	1,89	892,25	1,06	35,65
2,00	2211,59	0,64	903,33	0,97	1189,73	0,45	53,14
3,00	1666,97	0,22	1259,87	0,09	1529,93	0,16	74,11
4,00	2613,29	1,06	1675,69	0,76	1912,85	0,77	98,57
5,00	3570,94	1,87	2150,78	1,60	2338,49	1,38	126,52
6,00	4553,41	2,66	2685,14	2,42	2806,86	1,99	157,95
7,00	5628,51	3,42	3278,78	3,24	3317,95	2,60	192,87
8,00	6815,19	4,16	3931,69	4,05	3871,76	3,21	231,28
9,00	8122,17	4,88	4643,87	4,85	4468,29	3,82	273,17
10,00	9554,75	5,58	5415,32	5,66	5107,55	4,44	318,55

Fonte: Autor (2023)

3.3 Teste 3

No teste 3, o novo valor de ϕ foi de 32º. As superfícies geradas apresentaram espaçamentos semelhantes e não houve variação no sentido de crescimento da curva C. É possível verificar o resultado na Figura 18, assim como os valores calculados para cara parâmetro na Tabela 4. O valor de mínimo encontrado foi de 1430,69 kN/m.

Figura 18 - Curvas geradas pelo algoritmo no teste 3



Fonte: Autor (2023)

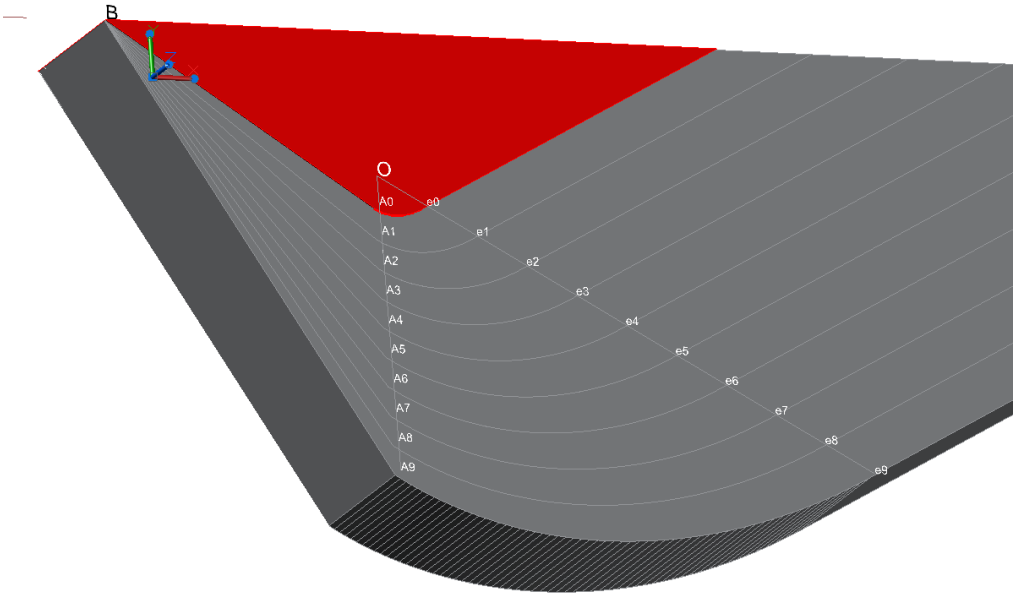
Tabela 4 - Valores de P1 para variação do R0, com φ=32º (Teste 3)

R_0 (m)	P_1 (kN/m)	L_1 (m)	W (kN/m)	L_2 (m)	P_e (kN/m)	L_3 (m)	Área (m²)
1,00	1430,69	1,57	634,02	1,95	973,70	1,04	37,30
2,00	2065,18	0,71	948,11	0,96	1303,93	0,42	55,77
3,00	2530,80	0,15	1325,62	0,03	1682,30	0,20	77,98
4,00	3344,34	0,98	1766,56	0,88	2108,80	0,82	103,92
5,00	4309,32	1,80	2270,93	1,78	2583,44	1,44	133,58
6,00	5380,35	2,60	2838,72	2,66	3106,21	2,06	166,98
7,00	6579,89	3,36	3469,94	3,53	3677,12	2,69	204,11
8,00	7916,19	4,11	4164,58	4,40	4296,16	3,31	244,98
9,00	9394,39	4,83	4922,65	5,26	4963,34	3,93	289,57
10,00	11018,40	5,54	5744,15	6,12	5678,65	4,55	337,89

Fonte: Autor (2023)

Para o teste 3, por gerar uma curva C suave, optou-se por gerar imagens 3D das superfícies de ruptura. Para a criação desses objetos, utilizou-se de funções próprias do AutoCAD de modelagem tridimensional que estão disponíveis na versão base do *software*, que não estão implementadas na rotina, e que o usuário pode utilizar das funções Extrusão e Revolução para obter tais resultados. Para gerar a Figura 19, foi realizado a extrusão das superfícies de ruptura. A imagem 3D é útil pois permite que o usuário tenha um melhor entendimento de como é a geometria da cunha considerando a espiral logarítmica. A parte em vermelho representa a superfície de ruptura crítica.

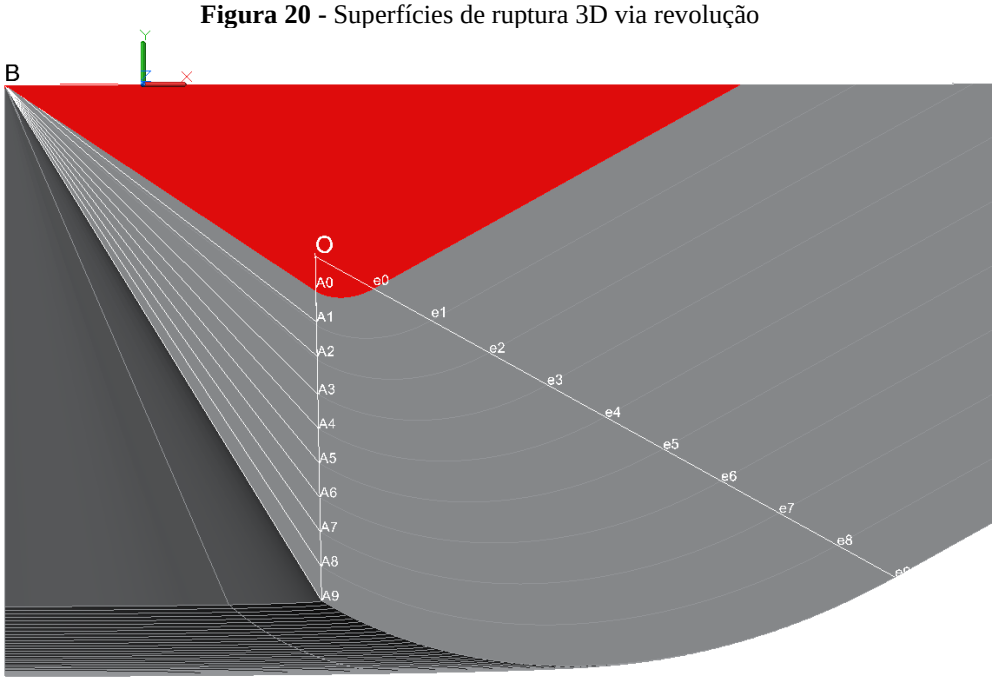
Figura 19 - Superfícies de ruptura 3D via extrusão



Fonte: Autor (2023)

Utilizando a função revolução, foi possível gerar outra imagem 3D das superfícies de ruptura do teste 3, mostrando de uma outra maneira o comportamento da superfície crítica (Figura 20).

Figura 20 - Superfícies de ruptura 3D via revolução

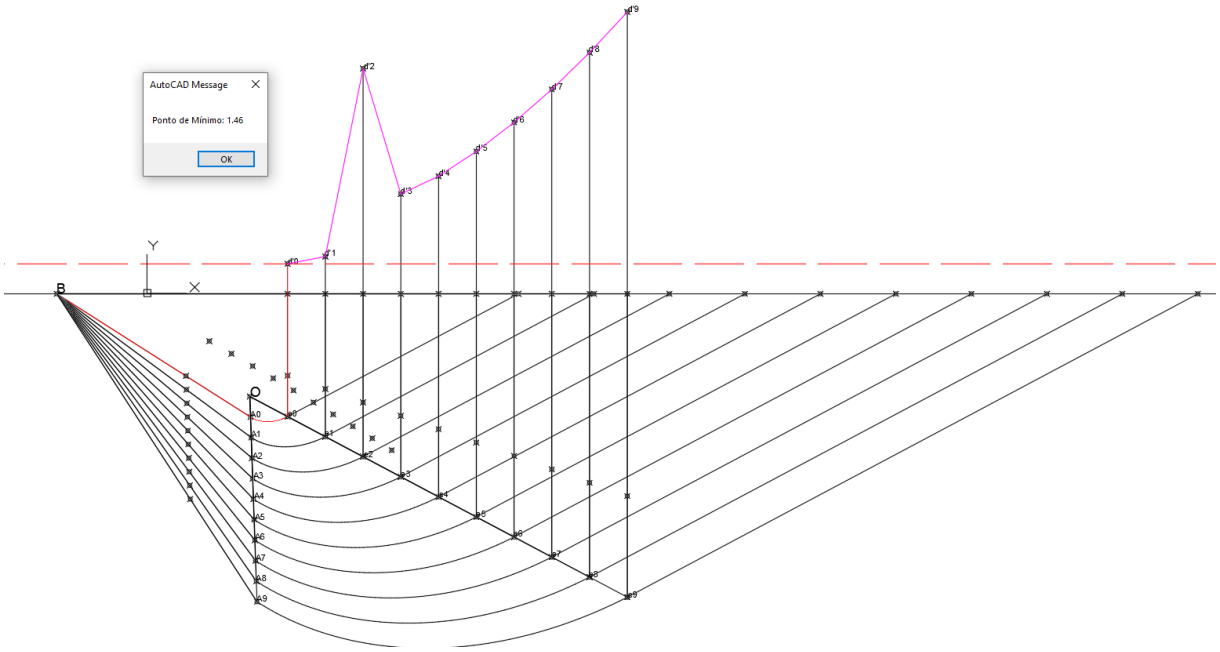


Fonte: Autor (2023)

3.4 Teste 4

Para o teste 4, o novo valor do ângulo de atrito adotado foi de 35º. Como se pode observar na Figura 21, a curva C gerada pelas superfícies possui uma alteração brusca na iteração com valor de r_0= 3m. Isso ocorre devido o braço de alavanca l_1 ser muito pequeno (0,07m), logo, o cálculo de P_1 através dos momentos será muito elevado. Os valores para cada iteração podem ser vistos na Tabela 5. O valor de mínimo encontrado foi de 1458,94 kN/m.

Figura 21 – Superfícies de ruptura teste 4



Fonte: Autor (2023)

Tabela 5 - Valores de P_1 para variação do R0, com φ=35º (Teste 4)

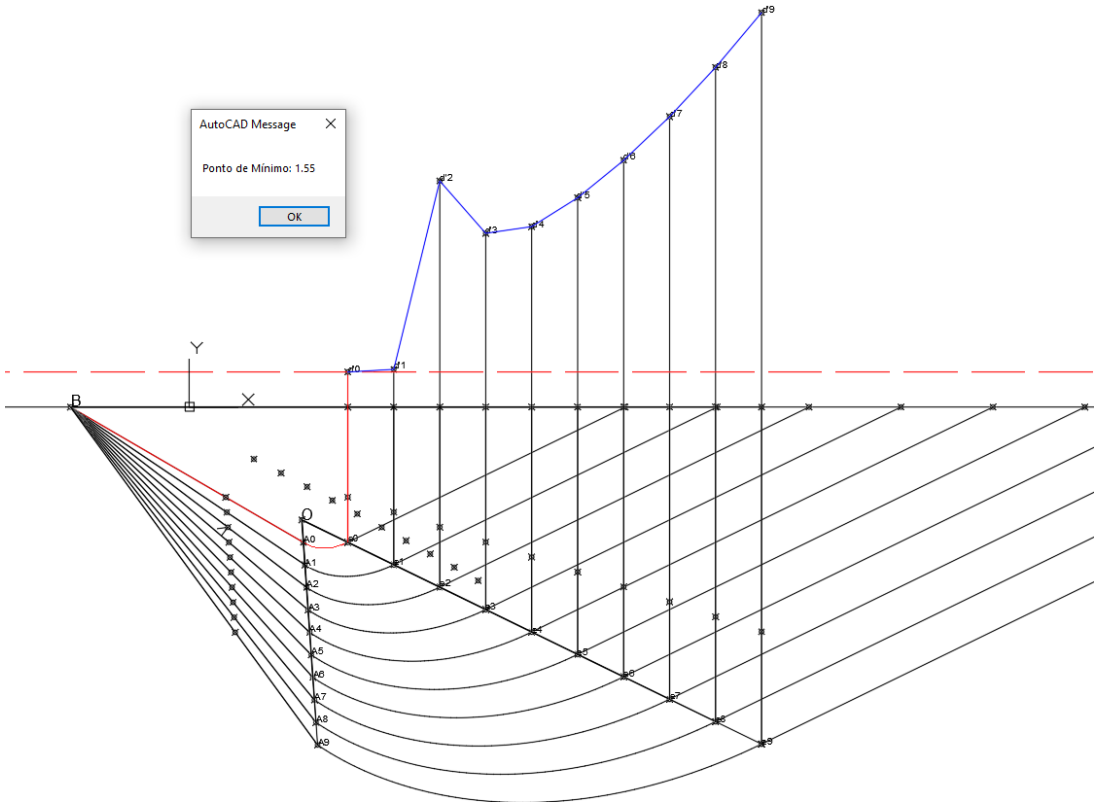
R_0 (m)	P_1 (kN/m)	L_1 (m)	W (kN/m)	L_2 (m)	P_e (kN/m)	L_3 (m)	Área (m²)
1,00	1458,94	1,65	669,80	1,97	1074,21	1,02	39,40
2,00	1815,32	0,79	1010,96	0,89	1454,22	0,36	59,47
3,00	10968,80	0,07	1423,14	0,14	1891,68	0,29	83,71
4,00	4861,06	0,91	1906,32	1,14	2386,57	0,94	112,14
5,00	5728,61	1,73	2460,52	2,12	2938,90	1,59	144,74
6,00	6932,04	2,53	3085,72	3,10	3548,68	2,24	181,51
7,00	8348,02	3,30	3781,94	4,06	4215,89	2,89	222,47
8,00	9954,37	4,05	4549,17	5,01	4940,54	3,55	267,60
9,00	11746,40	4,78	5387,42	5,96	5722,64	4,20	316,91
10,00	13724,20	5,49	6296,67	6,91	6562,17	4,85	370,39

Fonte: Autor (2023)

3.5 Teste 5

Para o teste 5, o valor utilizado para o ângulo de atrito foi de 38º. De maneira semelhante ao teste 4, a curva C apresentou um ponto deslocado do crescimento suave da curva, pois da mesma maneira, o valor do braço de alavanca l_1 foi de uma grandeza menor que os outros (l_2 e l_3). O valor de mínimo encontrado foi de 1553,67 kN/m.

Figura 22 - Curvas geradas pelo algoritmo no teste 5



Fonte: Autor (2023)

Tabela 6 - Valores de P1 para variação do R0, com φ=38º (Teste 5)

R_0 (m)	P_1 (kN/m)	L_1 (m)	W (kN/m)	L_2 (m)	P_e (kN/m)	L_3 (m)	Área (m²)
1,00	1553,67	1,83	732,49	2,12	1283,56	1,00	43,09
2,00	1672,02	0,97	1108,69	0,92	1744,36	0,34	65,22
3,00	10022,20	0,11	1564,30	0,23	2275,69	0,32	92,02
4,00	7700,86	0,74	2099,30	1,35	2877,56	0,98	123,49
5,00	7998,43	1,56	2713,70	2,46	3549,97	1,64	159,63
6,00	9276,38	2,37	3407,50	3,54	4292,91	2,31	200,44
7,00	10934,50	3,15	4180,70	4,62	5106,39	2,97	245,92
8,00	12870,50	3,92	5033,30	5,69	5990,41	3,63	296,08
9,00	15055,60	4,66	5965,29	6,75	6944,97	4,29	350,90
10,00	17480,60	5,38	6976,69	7,81	7970,06	4,96	410,39

Fonte: Autor (2023)

4 CONCLUSÕES

O programa desenvolvido se mostrou uma boa ferramenta para calcular o empuxo passivo, que são as forças que os solos exercem nas estruturas de contenção de aterro, apresentando resultados satisfatórios e eficientes para busca da superfície crítica proposta pela metodologia da espiral logarítmica, pois os dados apresentados por cálculos analíticos via planilha coincidem com os apresentados pelo algoritmo.

Os estudos mais aprofundados sobre a espiral só puderam ser encontrados na bibliografia de Murthy (2002), sendo as apresentadas pelos outros autores com informações insuficientes para sua modelagem, ou seja, são apresentadas figuras onde se percebe a importância do estudo das curvas espiral logarítmica em estudo de estabilidade de taludes, e determinação dos fatores de capacidade de carga de fundações.

Vale salientar que este se trata do primeiro trabalho realizado no Campus Acadêmico do Agreste onde se utilizou a linguagem de programação AutoLISP, e que pode ser implementada por outros alunos que tenham interesse de fazer estudos na área de computação gráfica, linguagem computacional, tornando-os capazes de melhorar essa primeira versão, baseando-se na hipótese simplificada desse estudo, ou seja, o solo estudado foi uma areia, sendo considerado homogêneo, e com resistência ao Cisalhamento predominantemente devido ao atrito.

Através da manipulação das curvas geradas pelo usuário para gerar imagens em 3D, utilizando funções próprias do AutoCAD, é possível utilizar as figuras para uma melhor didática através da aplicação da metodologia da espiral logarítmica em sala de aula, que ajudam na compreensão do comportamento de muros de arrimo e também na visualização da sua superfície de ruptura.

Por ser de fácil execução, o programa permite ao usuário realizar a quantidade necessária de testes para as mais variadas escolhas dos parâmetros de entrada, se tornando um auxílio para profissionais da área que utilizam AutoCAD. A ferramenta tem seu lado positivo por ser de uso gratuito e atua como uma extensão do AutoCAD.

É sugerido para futuros trabalhos da área que utilizarem dessa metodologia, que façam a implementação de outras variáveis como coesão, solos heterogêneos, para fins de estudo de capacidade de carga, que promovam a análise e aplicação em fundações, visto que este estudo se firmou em estudo de estabilidade de taludes.

REFERÊNCIAS

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos, v. 1.** Rio de Janeiro/RJ**, 2015.**

COULOMB, C.A. **Essai Sur Une Application des regies des Maximis et Minimum a Queiques Problemes de Statique Relatifs a L'Architecture'**, Mem. Acad. Roy Pres. Divers Savants, Paris, Vol. 3, Paris, 1776.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

GUIMARÃES, Dênio. **Curso Gratuito de AutoLISP**. CadNorma. Niterói, 2003. Disponível em: <https://www.cadnorma.com.br>. Acesso em: 17 de jul. de 2022.

JOPPERT JR, Ivan. **Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução.** Pini, 2007.

LEITÃO, Antônio Menezes. **Introdução à Programação com AutoLISP**. 2007.

MURTHY, V. N. S. **Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering**. CRC press, 2002.

RANKINE, William John Macquorn. II. **On the stability of loose earth**. Philosophical transactions of the Royal Society of London, n. 147, p. 9-27, 1857.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil mechanics in engineering practice**. John wiley & sons, 1996.

APÊNDICE A – PROGRAMA PARA EXECUÇÃO DA ESPIRAL LOGARÍTMICA

```
; Autolisp de João Victor Mendes para o TCC no curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste – 28/04/2023

; TCC:
; Desenvolvimento de aplicativo em AutoLISP para o cálculo de empuxo passivo em solos
; arenosos pela metodologia da espiral logarítmica.

; Algoritmo para a geração das espirais logarítmicas para cálculo de empuxo passivo

; Para compreensão dos valores de entrada do algoritmo, é necessário visualizar a figura 11.23.b, pág 463
; do livro MURTHY, V. N. S. Geotechnical engineering:
;principles and practices of soil mechanics and foundation engineering. CRC press, 2002

; Cálculo da tangente - Função a ser utilizada para cálculo da tangente
(defun tang(x)
  (/ (sin x) (cos x))
  )
; Cálculo do arco seno
(defun asin (x)
  (atan x (sqrt (- 1 (* x x))))
  )

; Cálculo do centróide e área - Função a ser utilizada para cálculo do centroide e área de uma polilinha fechada
; Para esse cálculo faz-se necessário o uso de funções ActiveX para obtenção de informações que podem ser obtidas mais facilmente, agilizando a execução da subrotina.
(defun c:get_centroid ()
  (vl-load-com)
  (setq ename (entlast))
  (command "region" ename "")
  (setq ename (entlast))
```

```
  (setq obj (vlax-ename->vla-object ename))
  (setq centroid (vlax-safearray->list (vlax-variant-value (vla-get-centroid obj))))
  (setq pl_area (vla-get-area obj))
  (setq cgi centroid)
  (command "undo" "")
  (command "_point" cgi)
  (princ)
)

; Início do algoritmo da espiral
(defun c:EspiralLog ()
  (command "_pdmode" 35) ; Comando para alterar o estilo de ponto padrão para melhor visualização dos resultados
  (setvar "osmode" 0) ; Desligamento do Object snap do autocad
  (setvar "orthomode" 0) ; Desligamento do orthome do autocad
  (command "_gridmode" 0) ; Desligamento do grid do autocad
  (setq teta_grau (getreal "\nInsira o valor de Teta (em graus): ")) ; Define valor de Teta pelo usuário
  (setq teta (/ (* pi teta_grau) 180)) ; Transforma grau em radiano
  (setq fi_grau (getreal "\nInsira o valor de Fi (em graus): ")) ; Define valor de fi pelo usuário
  (setq fi (/ (* pi fi_grau) 180)) ; Transforma grau em radiano
  (setq ro (getreal "\nInsira o valor inicial do raio (em metros): ")) ; Valor de R0 definido pelo usuário
  (setq delta (getreal "\nInsira o valor do delta (em graus): ")) ; Angulação de P1n com a normal - (valor dado pelo usuário)
  (setq gama (getreal "\nInsira o valor do gama do solo: ")) ; Valor de gama do solo arenoso

  ; Definição dos parâmetros que serão utilizadas dentro do loop para cálculo da espiral

  (setq rn (getreal "\nInsira o a quantidade de superfícies geradas: ")) ; Valor definido pelo usuário para a quantidade total de raios (rn) (quantas vezes vai ser executado o loop+1)
  (setq ir (getreal "\nInsira o valor do incremento do raio: ")) ; Valor definido pelo usuário para incrimento do raio (delta r) (variaçao do r dentro do loop se começar em ro, o prox é 1+vrn)
```

```
(setq ri (list ro)) ; Definição da lista ri iniciando com r0

(setq S (list 0 0)) ; Definição das coordenadas da linha do solo
(command “_xline” S "@1<0" "" "") ; Criação da linha do solo na horizontal com altura de 0m
(setq o (getpoint "\nEscolha onde vai ser inserido o ponto O do gráfico (abaixo da linha do solo).")); Pedir ao usuário a localização do Ponto O clicando na tela -
 ; É recomendado que a distância vertical do O para linha do solo não seja maior que 20m para não gerar erros, pois para valores maiores os resultados não são consistentes.
(setq ox (car o) ; Acessa o X de O
   oy (cadr o)) ; Acessa o Y de O
(command “_point” o)
(command “_text” o "0.5" "" "O" "" "") ; Nomeia o ponto O
(setq bdgrau (* -1 (- 45 (/ fi_grau 2)))) ; Angulação da reta BD
(setq bd (/ (* pi bdgrau) 180)) ; Transformação do angulo em rad

 ; Cálculo da posição do Ponto B
(setq dos (abs (- oy (cadr S)))) ; Distância de Oy para Sy
(setq hip (abs(/ dos (sin bd))))
(setq by (+ dos oy))
(setq bx (- ox (* hip (cos bd))))
(command “_point” (list bx by))
(command “_text” (list bx by) "0.5" "" "B" "" "") ;Nomeia o ponto B

;Ponto A (base do talude)
(setq agrau (+ 180 (- 180 (- teta_grau bdgrau)))) ;Calcula a angulação de O até A
(setq arad (/ (* pi agrau) 180))
(setq ax (+ ox (* ro (cos arad)))) ;Definindo ponto A através da posição e angulação de O
(setq ay (+ oy (* ro (sin arad))))


(setq j 0) ;Zeramento do contador
;Definição dos raios que serão utilizadas dentro do loop para cálculo da espiral
(setq aux ro) ;Auxliar para armazenar r0
```

```
(while (< j rn) ;Loop de criação da lista de todos os raios a serem calculados
  (setq aux (+ aux ir))
  (setq listtempo (list aux))
  (setq ri (append ri listtempo))
  (setq j (+ j 1)))


(setq i 0)  ;Zeramento do contador
;Parte 1 -  Loop para calcular todas as superfícies
(while (< i rn)
     (setq axn (append axn (list (+ ox (* (nth i ri) (cos arad)))))) ;Definindo ponto A através
da posição e angulação de O
   (setq ayn (append ayn (list (+ oy (* (nth i ri) (sin arad))))))
     (command "_point" (list (nth i axn) (nth i ayn)))
      (setq textoa (strcat "A" (rtos i 2 2)))
     (command "_text" "j" "l" (list (nth i axn) (nth i ayn)) 0.3 0.0 textoa) ;Nomeia o ponto A
   (command "_line" (list bx by) (list (nth i axn) (nth i ayn)) "") ;Linha de B para (axn,ayn)

   (setq loopgrau agrau) ;Definição do angulo inicial do loop
   (setq loopx+1 (nth i axn)) ;Salvar variáveis de partida do (x0,y0)
   (setq loopy+1 (nth i ayn))
   (setq tetaloopgrau 0) ;Definição da variação do angulo do loop
   (setq rloop (nth i ri))

   (setq j 0)
      (command "_.pline" (list (nth i axn) (nth i ayn))) ;Criação das polilinhas de superfície
     (while (< j teta_grau)
      (setq loopgrau (+ 1 loopgrau))  ;incrimento do angulo do loop
      (setq looprad (/ (* pi loopgrau) 180)) ;angulo para radiano
      (setq loopx loopx+1) ;salve das posições de Xn,Yn
      (setq loopy loopy+1)
      (setq tetaloopgrau (+ tetaloopgrau 1)) ;incremento da variação do teta dentro do loop
      (setq tetalooprad (/ (* pi tetaloopgrau) 180)) ;angulo para radiano
```

```
        (setq r1 (* rloop (exp (* tetalooprad (tang fi))))) ;Calculo do r1 de acordo com a variação do teta
        (setq loopx+1 (+ ox (* r1 (cos looprad)))) ;Definindo ponto Xn do loop através da posição e angulação de Xn-1
        (setq loopy+1 (+ oy (* r1 (sin looprad))))
        (command (list loopx+1 loopy+1))
           (setq j (+ j 1))
        )     ;fim do loop do teta_grau
    (setq ex (append ex (list loopx+1))) ;Salvamento da posição de ex ey lista
    (setq ey (append ey (list loopy+1)))
    (setq exi (nth i ex) eyi (nth i ey)) ; Alteração do (exi,eyi)
      (setq cx (+ exi (abs (- exi bx)))
        cy (+ eyi (abs (- eyi by))))
    (setq dxpol exi dypol (cadr S)) ;Criação da viarável para salvar a posição d do polígono BAed
    (command (list dxpol dypol) (list bx by) (list (nth i axn) (nth i ayn)) "") ;fechamento da polilinha de rn
    (c:get_centroid)   ;Chama função para salvar o centroide e área
      (command "_point" (list cx cy))
    (command "_point" (list dxpol dypol))
    (command "_point" (list exi eyi))
      (command "_point" (list exi eyi))
       (setq textoe (strcat "e" (rtos i 2 2)))
      (command "_text" "j" "l" (list exi eyi) 0.3 0.0 textoe) ;Nomeia o ponto e na curva
    (command "_line" (list ox oy) (list exi eyi) "")  ;Linha de O até ei
    (command "_line" (list ox oy) (list (nth i axn) (nth i ayn)) "")
    (command "_line" (list exi eyi) (list cx cy) "")
    (setq cgx (append cgx (list (car cgi)))) ;Salvamento de todos os centroides dos polígonos
    (setq cgy (append cgy (list (cadr cgi))))
    (setq areas (append areas (list pl_area))) ;Salvamento de todas as áreas dos polígonos
    (setq i (+ i 1))
  )
 ;Fim do loop dos raios e do cálculo da espiral
```

```
 ;Parte 2 - Polígono das forças

 (setq Nfi (tang (/ (* pi (+ (/ fi_grau 2) 45)) 180))) ;calculo da tangente de 45+fi/2
 (setq Nfi (* Nfi Nfi)) ;tangente ao quadrado

 (setq i 0)

 (while (< i rn) ;Loop para cálculo do Pe e W
   (setq he (append he (list (abs (- (nth i ey) (cadr S)))))) ;Distancia de e para altura da
superfície S
   (setq he_3 (append he_3 (list (* 2 (/ (nth i he) 3))))) ;Valor de he/3
   (setq Pe (append Pe (list (/ (* gama (* (nth i he) (* (nth i he) Nfi))) 2)))) ; Cálculo do Pe
   (command "_point" (list (nth i ex) (+ (nth i ey) (/ (nth i he) 3))))
   (setq W (append W (list (* (nth i areas) gama)))) ;W = Area * gama
   (setq R (append R (list (+ (nth i Pe) (nth i W))))); Calculo de R1
   (setq i (+ i 1))
  )


;Cálculo da posição de Pn na reta BAn
 (setq i 0)
 (while (< i rn) ;Loop para cálculo  da posição da reta Pni no talude BA
   (setq Hi (abs (nth i ayn))) ;Definição de H
   (setq distBAx (abs (- (nth i axn) bx)) distBAy (abs (- (nth i ayn) by))) ;Distancia de B até A
   (setq Pxdelta (/ (* distBAx (/ Hi 3)) distBAy)) ; Semelhança de triangulo para achar
deslocamento de P (ABy/Abx = Apy/Apx)
   (if (< (nth i axn) bx)
     (setq Px (+ (nth i axn) pxdelta) Py (+ (/ hi 3) (nth i ayn)))) ;Força P1 passando na reta BA
   (if (> (nth i axn) bx)
     (setq Px (- (nth i axn) pxdelta) Py (+ (/ hi 3) (nth i ayn)))) ;Força P1 passando na reta BA
   (command "_point" (list px py))
   (setq pnix (append pnix (list px)) pniy (append pniy (list py)))
   (setq i (+ i 1))
 )
```

```
;Parte 3 - Cálculo do P1 por momento
 (setq i 0)
 (while (< i rn) ;Loop para o cálculo dos valores de Pforça por momento
    (setq POx (append POx (list (abs (- ox (nth i pnix)))))
      POy (append POy (list  (- oy (nth i pniy))))
      POreta (append POreta (list (sqrt (+ (* (nth i POx) (nth i POx)) (* (nth i POy) (nth i
POy))))));Distancia de P para O
      SenPO (append SenPO (list (/ (abs (nth i POy)) (nth i POreta))))
      ArcPO (append ArcPO (list (asin (nth i SenPO))))
      GrauArcPO (append GrauArcPO (list (/ (* (nth i ArcPO) 180) pi)))
      PAx (append PAx (list (abs (- (nth i axn) (nth i pnix)))))
      PAy (append PAy (list (abs (- (nth i ayn) (nth i pniy)))))
      PAreta (append PAreta (list (sqrt (+ (* (nth i PAx) (nth i PAx)) (* (nth i PAy) (nth i
PAy))))))
      SenPA (append SenPA (list (/ (nth i PAy) (nth i PAreta))))
      ArcPA (append ArcPA (list (asin (nth i SenPA))))
      GrauArcPA (/ (* (nth i ArcPA) 180) pi)
      GrauArcPACor (append GrauArcPACor (list (- 90 GrauArcPA))))
      (if (> (nth i POy) 0)
       (setq AngL1Grau (append AngL1Grau (list (abs (- (nth i GrauArcPO) (- (nth i
GrauArcPACor) Delta)))))
       ))
      (if (< (nth i POy) 0)
       (setq AngL1Grau (append AngL1Grau (list (+ (nth i GrauArcPO) (- (nth i
GrauArcPACor) Delta))))
       ))
      (setq AngL1Rad (append AngL1Rad (list (/ (* pi (nth i AngL1Grau)) 180))))
      (setq L1 (append L1 (list (* (nth i POreta) (sin (nth i angL1rad))))))
    (setq L2 (append L2 (list (abs (- ox (nth i cgx)))))) ;Distância de W para O - parcela L2 do
momento
    (setq L3 (append L3 (list (abs (+ oy (nth i he_3)))))) ;Distancia de e para O - Parcela L3
do momento
```

```
    (setq pforcai (/ (+ (* (nth i W) (nth i L2)) (* (nth i Pe) (nth i L3))) (nth i L1))) ;Calculo de Pforça usando momento ; as parcelas do momento foram corrigidas para ficar positivas
    (setq pforca (append pforca (list pforcai))) ;Salvamento da variável P1
    (setq i (+ i 1))
  )

;Parte 4 - Curva C

 (setq i 0)
 (setq dyminimo 10000)
 (while (< i rn)
    (setq dxi (nth i ex) dyi (+ (cadr S) (nth i pforca))) ;Posição de D1
    (setq dyi (/ dyi 1000)) ;Fator de escala 1/1000
    (if (< dyi dyminimo)
      (setq dyminimo dyi dxminimo dxi))
    (command "_line" (list (nth i ex) (nth i ey)) (list dxi dyi) "");Linha de e1 para d'1
    (command "_point" (list dxi dyi))            ;Ponto na coordenada d'1
      (setq textod (strcat "d'" (rtos i 2 2)))
      (command "_text" "j" "l" (list dxi dyi) 0.3 0.0 textod) ;Nomeia o ponto D' no gráfico
    (setq dx (append dx (list dxi)) dy (append dy (list dyi )))
    (setq i (+ i 1))
  )
 (command "_xline" (list dxminimo dyminimo) "@1<0" "" "") ;Linha da menor curva
 (setq dtext (rtos dyminimo 2 2))
 (alert (strcat "Ponto de Mínimo: "  dtext )) ;Mensagem ao usuário do ponto de mínimo

 (setq i 1) ; Loop para criação da Polilinha da curva C
 (command "_.pline" (list (nth 0 dx) (nth 0 dy)))
 (while (< i rn)
   (command (list (nth i dx) (nth i dy)))
   (setq i (+ i 1))
 )
 (command (list (nth i dx) (nth i dy)) "")
```

```
(setvar “osmode” 16383) ;Reativa todos os osnap
  (command "_zoom" “e”) ;Leva o zoom até os desenhos realizados
  (command "_regen") ; Atualiza o desenho

  princ) ;Fecha o algoritmo da espiral


;Mensagem de aviso ao carregar o LISP
(prompt "\nComandos Carregados com Sucesso!")
(princ)
```

JOÃO VICTOR MENDES DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE ROTINA EM AUTOLISP PARA O CÁLCULO DE EMPUXO PASSIVO EM SOLOS ARENOSOS PELA METODOLOGIA DA ESPIRAL LOGARÍTMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

Área de concentração: Geotecnia

Aprovado em 09 de maio de 2023.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. DSc. José Moura Soares (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. DSc. Saul Barbosa Guedes (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. DSc. Débora Cristina Almeida de Assis (Avaliadora)
Universidade Federal de Campina Grande