

Análise da Estabilidade de Taludes do Aterro Sanitário de Rosário do Sul/RS

Analysis of Stability of Slopes in the Landfill of Rosário Do Sul/RS

Análisis de estabilidad de taludes del Vertedero Rosário do Sul/RS

Angélica Cirolini

Professora Doutora, UFPel, Brasil.

acirolini@gmail.com

Alexandre Felipe Bruch

Professor Doutor, UFPel, Brasil.

afbruch@gmail.com

Ricardo Giumelli Marquezan

Professor Doutor, UFPel, Brasil.

rgmarquezan@gmail.com

Felipe Martins Marques da Silva

Professor Doutor, UFPel, Brasil.

engfelipemarques21@gmail.com

Marciano Carneiro

Professor Mestre, UFRGS, Brasil.

marciano.carneiro@hotmail.com

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

RESUMO

Esse estudo tem como finalidade analisar a estabilidade de taludes do aterro sanitário do município de Rosário do Sul, localizado na porção sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. Seu desenvolvimento ocorreu a partir de levantamentos de campo e laboratório, seguindo as etapas metodológicas, ou seja, Levantamento de Pontos de Controle e Níveis Piezométricos, Aerolevantamento Fotogramétrico com veículo aéreo não tripulado (VANT), Processamento Fotogramétrico e a Simulação Geotécnica de Ruptura de Taludes. Os aerolevantamentos com VANT e pontos de controle determinados com receptores de Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) garantem um levantamento topográfico detalhado e acurado, o qual serve de base para a geração do modelo digital de superfície (MDS). Os resultados das simulações de ruptura de taludes realizadas no aterro sanitário revelaram que pequenas diferenças na geometria dos perfis topográficos, impactam diretamente no Fator de Segurança (FS) do aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (RSU), em especial quando se referem às encostas com maior comprimento de vertentes e ausentes de patamares intermediários e/ou canais de escoamento. As análises em campo e laboratório comprovaram que a simulação de ruptura de taludes pelos parâmetros geotécnicos de peso específico, coesão e ângulo de atrito dos materiais se mostraram extremamente eficientes e com resultados compatíveis com as observações de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de talude. Aterro sanitário. Aerolevantamento fotogramétrico.

ABSTRACT

This study aims to analyze the slope stability of the landfill in the municipality of Rosário do Sul, located in the southwestern portion of the state of Rio Grande do Sul. Its development occurred from field and laboratory surveys, following the methodological steps, or that is, Survey of Control Points and Piezometric Levels, Photogrammetric Aerolift with unmanned aerial vehicle (UAV), Photogrammetric Processing and the Geotechnical Simulation of Slope Rupture. The aerial surveys with UAVs and control points determined with receivers of the Global Navigation Satellite System (GNSS) guarantee a detailed and accurate topographic survey, which serves as the basis for the generation of the digital surface model (MDS). The results of the slope rupture simulations carried out at the landfill revealed that small differences in the geography of the topographic profiles directly impact the Safety Factor (FS) of the urban solid waste landfill (MSW), especially when referring to slopes with greater length of slopes and absent intermediate levels and / or flow channels. The field and laboratory analyzes showed that the simulation of slope rupture by geotechnical parameters of specific weight, cohesion and friction angle of the materials proved to be extremely efficient and with results compatible with field observations.

Keywords: Slope stability. Landfill. Photogrammetric aerial survey.

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar la estabilidad de taludes del relleno sanitario en el municipio de Rosário do Sul, ubicado en la porción suroeste del estado de Rio Grande do Sul. Su desarrollo se dio a partir de estudios de campo y laboratorio, siguiendo los pasos metodológicos, o es decir, Levantamiento de Puntos de Control y Niveles Piezométricos, Aerolift fotogramétrico con vehículo aéreo no tripulado (UAV), Procesamiento Fotogramétrico y Simulación Geotécnica de Ruptura de Taludes. Los levantamientos aéreos con UAV y puntos de control determinados con receptores del Global Navigation Satellite System (GNSS) garantizan un levantamiento topográfico detallado y preciso, que sirve de base para la generación del modelo digital de superficie (MDS). Los resultados de las simulaciones de rotura de taludes realizadas en el vertedero revelaron que pequeñas diferencias en la geografía de los perfiles topográficos impactan directamente en el Factor de Seguridad (FS) del vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU), especialmente cuando se refieren a taludes con mayor longitud de taludes y ausencia de niveles intermedios y / o canales de flujo. Los análisis de campo y de laboratorio demostraron que la simulación de rotura de taludes por parámetros geotécnicos de peso específico, cohesión y ángulo de fricción de los materiales resultó ser extremadamente eficiente y con resultados compatibles con las observaciones de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidad de taludes. Vertedero. Encuesta aérea fotogramétrica.

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento dos centros urbanos, um dos fatores que traz maior preocupação é o destino dos resíduos sólidos urbanos (RSU), uma vez que deve haver estudo e planejamento para seu correto descarte e não ocasionar danos ao ambiente, fazendo com que as administradoras dos aterros invistam no aumento da capacidade de carga dos aterros sanitários. Este fato resulta na construção de aterros cada vez mais altos, o que soluciona a questão da necessidade de destinação dos resíduos, mas gera um agravante quanto à estabilidade destes aterros sanitários.

Os resíduos tem origem de toda e qualquer atividade da sociedade contemporânea, sejam elas atividades domésticas até grandes processos produtivos e industriais. Segundo Marques (2001), todo processo tecnológico destinado à recuperação da matéria, como os sistemas de triagem, reciclagem e compostagem, ou mesmo os que visam à eliminação da mesma utilizando processos térmicos (incineração), geram certa quantidade de resíduo, sendo assim os aterros sanitários tornam-se sempre necessários e se apresentam como a forma mais usual e econômica para a disposição final dos resíduos.

O planejamento da vida útil de um aterro e o comportamento destes maciços está diretamente relacionado com as formas construtivas e operacionais, porém torna-se importante o estudo das condições e estabilidade dos taludes, com possibilidades de simulações para prever seu comportamento futuro e suas condições geomecânicas.

Este planejamento pode ser realizado com o auxílio dos sistemas de informações geográficas (SIG) que atual no seu mapeamento e monitoramento, a partir de um sistema gerenciamento de banco de dados. Todavia, com o uso das geotecnologias torna-se possível realizar levantamentos em campo, processamento, geração de banco de dados geográficos e simulações que possibilitam diferentes tipos de análise referentes à estabilidade de taludes, a partir do cruzamento de distintos parâmetros que compõem os aterros sanitários e o ambiente. Sendo assim, este estudo tem por objetivo realizar algumas análises referentes à estabilidade de taludes a partir de seções e/ou perfis topográficos e simulações de ruptura de taludes implementadas no software *SLOPE/W* da *Geo-Slope International*, com base na comparação com os cálculos dos fatores de segurança.

Para a realização das análises e simulações fez-se um estudo de caso no aterro sanitário do município de Rosário do Sul, estado do Rio Grande do Sul, no qual foram verificadas in loco algumas feições de instabilidade como cicatrizes de escorregamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da pesquisa foram realizadas 5 etapas de campo e laboratório: Levantamento de Pontos de Controle e Níveis Piezométricos, Aerolevantamento Fotogramétrico com VANT, Processamento Fotogramétrico e a Simulação Geotécnica de Ruptura de Taludes.

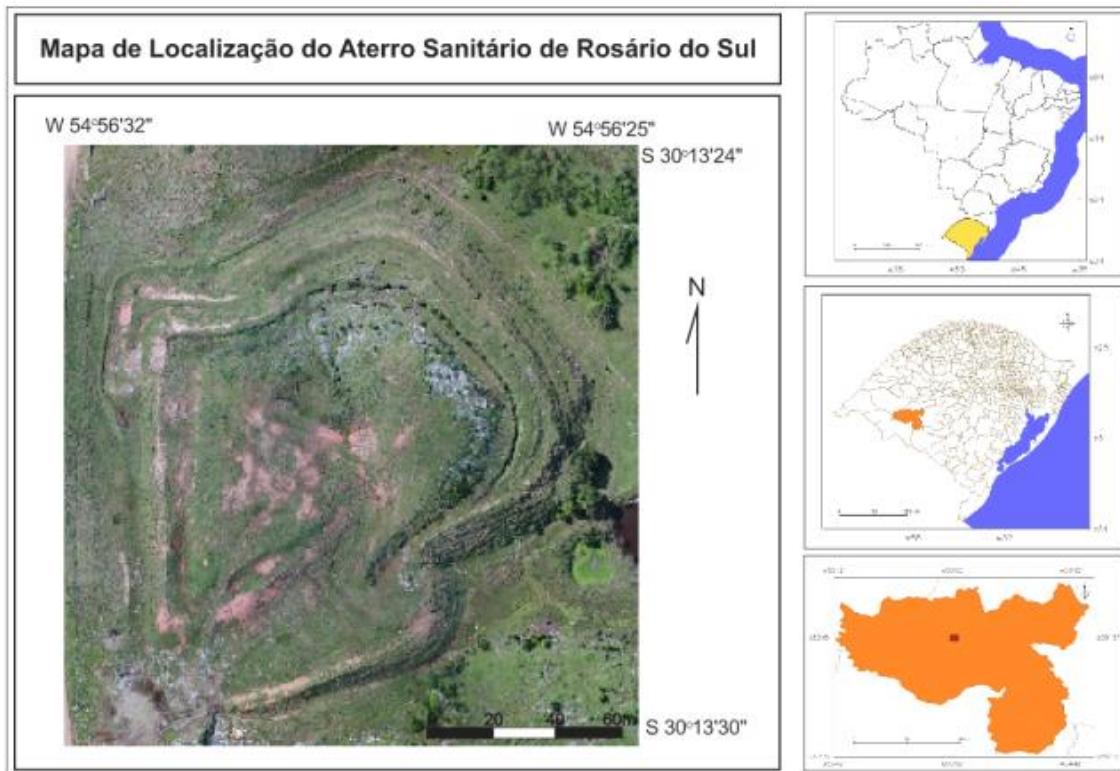
Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

2.1. Área de Estudo

O aterro sanitário em estudo está localizado em Rosário do Sul/RS, sendo operado exclusivamente por este município. Está delimitado pelas coordenadas geográficas de 30°13'24"S à 30°13'30"S e 54°56'25"W à 54°56'32"W (Figura 1). O acesso é realizado a partir da BR290, sentido Rosário do Sul – Uruguaiana, entrando a direita na estrada da divisa.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo



A área apresenta terrenos de baixa altitude, suavemente ondulados, com o substrato compreendido por rochas sedimentares características da Província Geológica/Geomorfológica da Depressão Central (SPGG, 2018). Pedologicamente predominam argissolos e neossolos, com profundidades de até 2m. Conforme o IBGE (2010), a população do município é de 39.707 habitantes, sendo que 67% possuem esgotamento sanitário e mais de 90% recolhimento de lixo domiciliar.

2.2. Levantamento de Pontos de Controle e Níveis Piezométricos

Primeiramente, foram rastreados em campo 10 pontos de controle e, para tanto utilizou-se dois receptores Geodésicos ProMark 500 GNSS L1/L2 (Figura 2). O rastreamento foi realizado no modo estático em período superior à uma hora, com intervalo de registro de 2 segundos. O pós-processamento para a correção dos erros foi realizado através do sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O sistema de

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

referência geodésico utilizado foi o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

Figura 2: Rastreamento de ponto de controle com receptor GNSS



Fonte: Levantamento de Campo dos autores, 2018.

No PPP foram utilizadas as órbitas finais, com o emprego das constelações GPS e Glonass. O rastreio com receptores de dupla frequência L1/L2 com as referidas órbitas gera precisões planialtimétricas superiores a 4 cm (IBGE, 2017). Na tabela 1 constam os pontos de controle rastreados em campo e na tabela 2 constam os pontos dos piezômetros e os níveis d'água medidos a partir da altitude elipsoidal (Figura 3).

Tabela 1: Pontos de Controle rastreados em campo

Ponto	Latitude (S)	Longitude (W)	Z (m)
1	30° 13' 38.208"	54° 56' 27.770"	141,98
2	30° 13' 27.232"	54° 56' 24.834"	122,87
3	30° 13' 28.118"	54° 56' 24.426"	123,06
4	30° 13' 32.669"	54° 56' 32.229"	136,48
5	30° 13' 33.270"	54° 56' 25.508"	129,60
6	30° 13' 37.030"	54° 56' 34.844"	134,01
7	30° 13' 24.899"	54° 56' 30.959"	130,63
8	30° 13' 24.902"	54° 56' 30.976"	130,72
9	30° 13' 24.500"	54° 56' 37.735"	125,28
10	30° 13' 26.159"	54° 56' 28.850"	141,19

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

Tabela 2: Altitudes Piezométricas medidas em campo

Piezômetro	Latitude (S)	Longitude (W)	Z (m)	Nível d'água(m)	Alt. Piezométrica(m)
P1	30° 13' 33.270"	54° 56' 25.507"	129,60	0,00	129,60
P2	30° 13' 28.118"	54° 56' 24.426"	123,06	-0,13	122,93
P3	30° 13' 24.502"	54° 56' 24.135"	121,97	-1,06	120,91
P4	30° 13' 27.231"	54° 56' 24.833"	122,87	-0,36	122,51
P5	30° 13' 37.030"	54° 56' 34.844"	134,01	-0,50	133,51
P6	30° 13' 24.500"	54° 56' 37.734"	125,28	0,00	125,28
P7	30° 13' 35.931"	54° 56' 33.201"	126,00	-0,50	125,50
P8	30° 13' 24.899"	54° 56' 30.959"	130,63	-0,55	130,08
P9	30° 13' 20.668"	54° 56' 30.579"	120,53	-1,01	119,52

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

Figura 3: Medição dos níveis d'água dos poços piezométricos



2.3. Aerolevantamento Fotogramétrico com VANT

No aerolevantamento fotogramétrico foi utilizado um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de asa rotativa, modelo *Phantom 4 Advanced*, com câmera fotográfica digital de pequeno formato, fabricado pela empresa chinesa DJI. As características do VANT são as seguintes:

Peso em ordem de voo: 1368 gramas

- Autonomia de voo: 28 minutos
- Distância máxima de alcance de rádio transmissor: 5 km

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

- Bateria: LiPo4s de 5870 mAH
- Câmera: Sensor CMOS de 20 Mega pixels
- Dimensão máxima de cada foto: 5472 x 3648 pixels
- Posicionamento Espacial: GPS+GLONASS

Para aumentar a precisão do levantamento, principalmente manter a taxa de sobreposição das imagens, altura e velocidade de voo, foi criado um plano de voo (Figura 4) através do programa gratuito *DroneDeploy*, com as seguintes características:

- Altitude de voo: 100 metros
- Sobreposição lateral das faixas: 60%
- Sobreposição frontal das fotos: 70%
- Azimute de voo: 85°
- Velocidade máxima: 15 m/s
- Visada da câmera: Nadir
- Resolução espacial: 2,5 cm/pixel
- Tempo de voo: 9 minutos e 24 segundos

Figura 4: Plano de voo criado no programa *DroneDeploy*



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

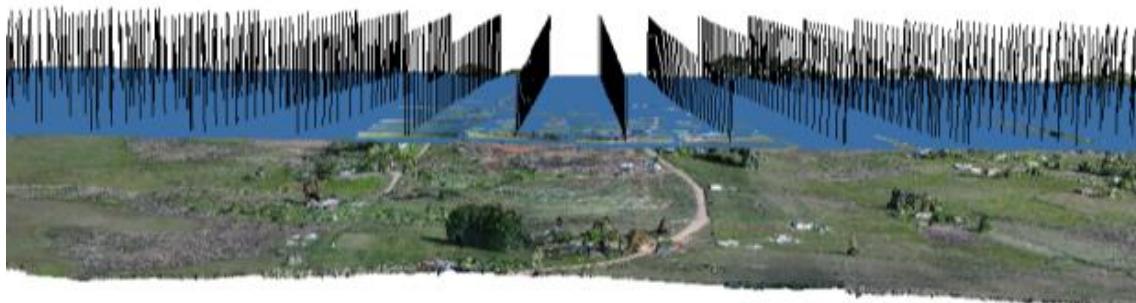
2.4. Processamento Fotogramétrico

Para o processamento das imagens aéreas foi utilizado o programa *MetaShape* Profissional desenvolvido pela empresa *Agisoft*, conforme a proposta de Jaud *et al.* (2016) e Bruch *et al.* (2019). O *MetaShape* permite a criação de ortomosaicos com alta resolução espacial através da técnica de mosaicagem com base nas semelhanças radiométricas ou geoespaciais entre as imagens (BRUCH *et al.*, 2019).

O processo começa com uma avaliação visual da qualidade das imagens e dos registros do intervalômetro. A próxima etapa foi à importação das imagens e o alinhamento das mesmas (Figura 5), onde o programa define os parâmetros da câmera utilizada, o Ponto Principal (pp) e a rotação das fotos. Também foi verificado se toda área havia sido imageada durante o levantamento. Apesar das imagens já possuírem um registro com as coordenadas geodésicas de localização, estas foram corrigidas através de georreferenciamento com os 10 pontos materializados em campo. Este processo foi realizado para aumentar a precisão do ortomosaico.

Por conseguinte, é gerada a nuvem de pontos homólogos e construído o Modelo Digital de Superfície (MDS). Também foi gerado um ortomosaico para o conhecimento da área. Para a geração destes produtos, o *MetaShape* utiliza a tecnologia *multiview*, a qual permite processar imagens arbitrárias, com variação de sobreposição, desde que existam pontos homólogos em imagens distintas (BRUCH *et al.*, 2019). Por fim, o ortomosaico e o MDS foram exportados no formato *Tagged Image File Format* (TIFF), com resolução espacial de 2,5 cm.

Figura 5: Processamento das imagens no *MetaShape* com alinhamento de faixas



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

2.5. Simulação de Estabilidade de Taludes

Para a simulação da estabilidade e instabilidade dos taludes do aterro sanitário de Rosário do Sul/RS, utilizou-se o Programa *Slope W* da *Geo-Slope International*. O *Slope/W* é um programa que modela materiais heterogêneos em geometrias topográficas complexas, tendo opções pré-configuráveis para taludes genéricos, encostas naturais de terra e rocha, escavações inclinadas, aterros sanitários, aterros de contenção, estruturas de retenção, entre outras (ANDRADES, 2018).

Na geração das simulações de ruptura de taludes utiliza-se uma série de informações em um

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

modelo determinístico, ou seja, modelo complexo com variáveis conhecidas, visando encontrar um coeficiente de segurança (CS) ao longo de uma superfície com potencial ruptura. O resultado deste modelo é a geração do coeficiente de segurança e das linhas potenciais expressas em círculos críticos (ANDRADES, 2018).

Os dados utilizados no modelo *Slope W* são:

- Seções dos taludes (perfis topográficos) obtidos em cortes no MDS do aerolevantamento;
- Parâmetros geotécnicos dos materiais que compõem o aterro sanitário, sendo extraídos do memorial descritivo da Prefeitura Municipal de Rosário do Sul/RS e da bibliografia especializada;
- Linha piezométrica, definida a partir probabilidade de saturação no interior do maciço de resíduos, obtidos em medições dos piezômetros por Gazola (2018).

A partir dos dados supracitados e modelados no *Slope W*, foram selecionados 5 perfis com possíveis rupturas de talude, conforme geometria pentagonal do aterro sanitário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A rotina de processamento do programa *Geoslope/W* utiliza na modelagem de parâmetros de dinâmica interna de um maciço a equação de *Mohr-Coulomb*, sendo que para tanto é necessário alimentar o modelo com os dados geotécnicos dos materiais constituintes através da bibliografia específica, de pesquisadores e institutos de pesquisas renomados na área de geotecnia de aterros sanitários e do projeto geotécnico do aterro. Sendo assim, a tabela 3 apresenta os dados geotécnicos quantitativos utilizados na modelagem.

Tabela 3: Parâmetros dos materiais constituintes do aterro utilizados na modelagem

Fonte	Parâmetro Geotécnicos			Observações
	Peso Específico (KN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo Atrito (º)	
IPT (1991) e Benvenutto e Cunha (1991)		13,5	22	RSU - Retroanálise
Andrades (2018), PM de Rosário do Sul	25			Argila
Andrades (2018), PM de Rosário do Sul	17			Solo

Obs: A escolha dos valores foi baseada na similaridade dos materiais constituintes do aterro com a bibliografia específica e dados do projeto de implementação do aterro sanitário de Rosário do Sul

Para a determinação das altitudes piezométricas da área de estudo, os dados foram interpolados no programa SPRING 5.5.6, através do interpolador determinístico *Mitasova*, gerando uma grade regular. Foi escolhido o interpolador *Mitasova* porque este segue uma superfície de tendência, plenamente aplicável a condições de superfícies piezométricas, pois suaviza discrepâncias.

O resultado da interpolação das cotas piezométricas demonstra que, nos limites das células do aterro sanitário, a cota mínima simulada na base dos taludes foi de 125,74 m, praticamente aflorante na caixa do dreno. Já a cota simulada mais elevada encontra-se da direção dos piezômetros 5 e 8 (aproximadamente quadrante SW), com 130,11 m (Figura 6). Deve-se

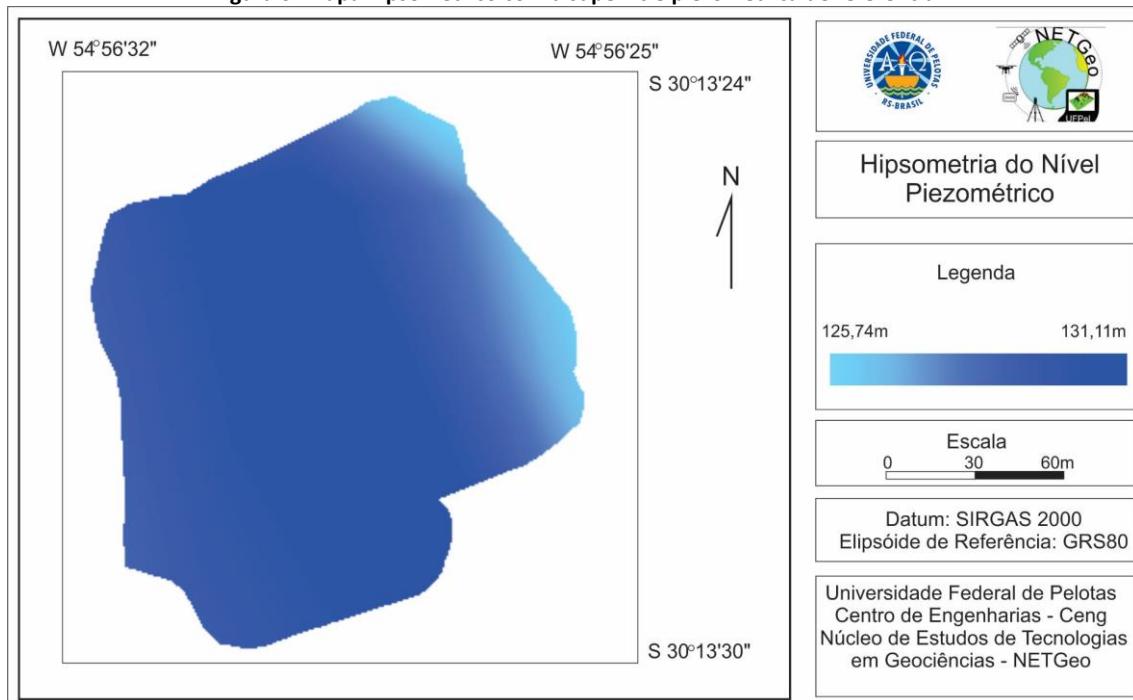
Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

destacar que a discrepância entre as medições dos piezômetros está dentro do esperado, com níveis de profundidade variando de 0 m (aflorante) à -1,06 m a partir da superfície topográfica, ou seja, quanto maior a cota piezométrica, mais distante os líquidos percolados estão da superfície topográfica.

Realizando simulações de superfícies piezométricas, Gazola (2018), encontrou resultados semelhantes, com discrepâncias próximas a 5 cm. A superfície piezométrica interpolada foi seccionada em perfis, conforme blocos a serem modelados no *GeoSlope/W*. Os perfis foram seccionados em pontos amostrais com equidistância de 1m.

Figura 6: Mapa hipsométrico com a superfície piezométrica de referência



As superfícies topográficas de referência para a modelagem do *GeoSlope/W*, foram definidas a partir dos perfis, partindo com referência altimétrica a base dos taludes até a crista do aterro, formando uma seção em perfil com cota mínima e máxima. Os dados dos perfis foram exportados do MDS gerado no *MetaShape* e simplificados em alinhamentos com verticais equidistantes de 1m, buscando assim, reduzir o tempo computacional para a geração do modelo no *GeoSlope/W* (Figura 7).

Fórum Ambiental da Alta Paulista

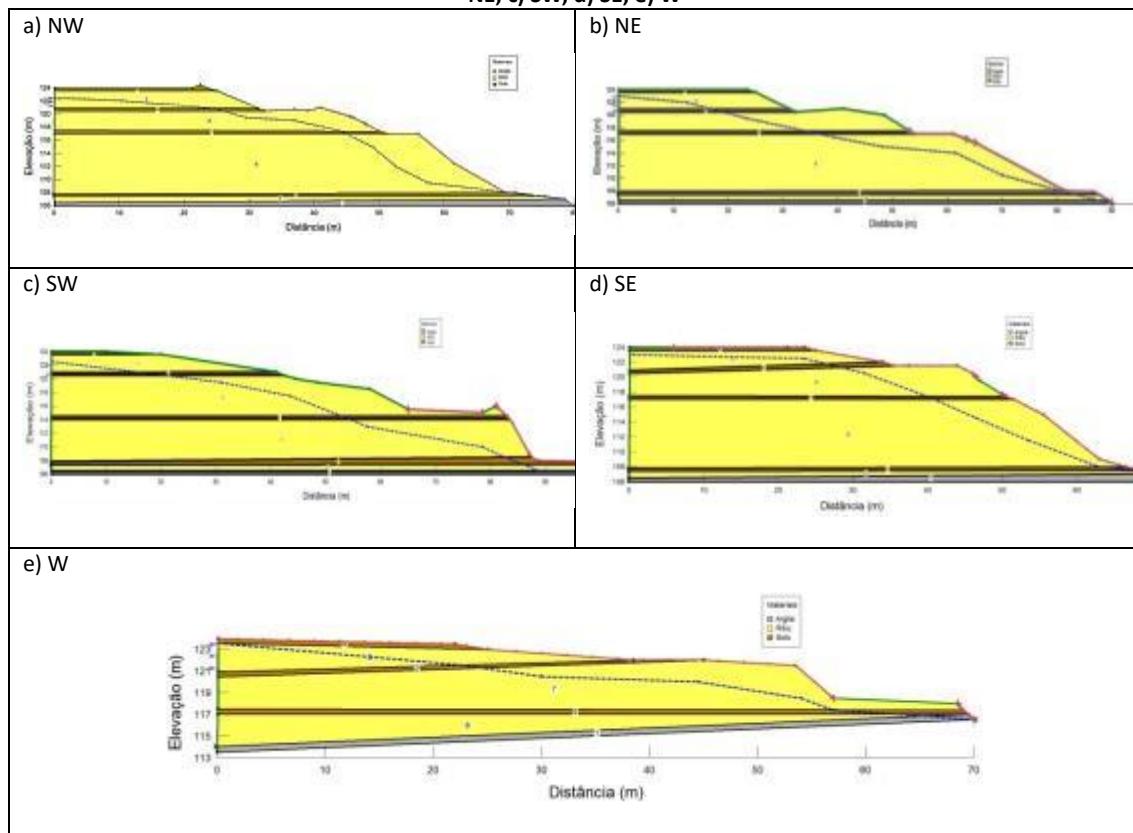
ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

Figura 7: Exemplo de perfil topográfico gerado a partir do MDS (direção SE)



De posse dos dados dos níveis piezométricos, superfície topográfica e dados geotécnicos dos materiais do aterro, foram confeccionados os cinco perfis de modelagem no *Slope/W* (Figura 8). Nos perfis foram inseridas as camadas com os RSU, de material inerte e de consolidação, com argila na base e solo entre as células de RSU e também no tamponamento de encerramento da deposição.

Figura 8: Perfis topográficos com as camadas das células do aterro e nível piezométrico, nas direções: a) NW; b) NE; c) SW; d) SE; e) W



Os resultados das simulações de ruptura de taludes demonstram que pequenas diferenças na geometria dos perfis, principalmente encostas com maior comprimento de vertente e ausentes de patamares intermediários/canais de escoamento, impactam diretamente no Fator de Segurança (FS) do aterro sanitário de RSU. Essa afirmação fica evidente no resultado dos perfis, principalmente no NW e SE (Tabela 4).

Fórum Ambiental da Alta Paulista

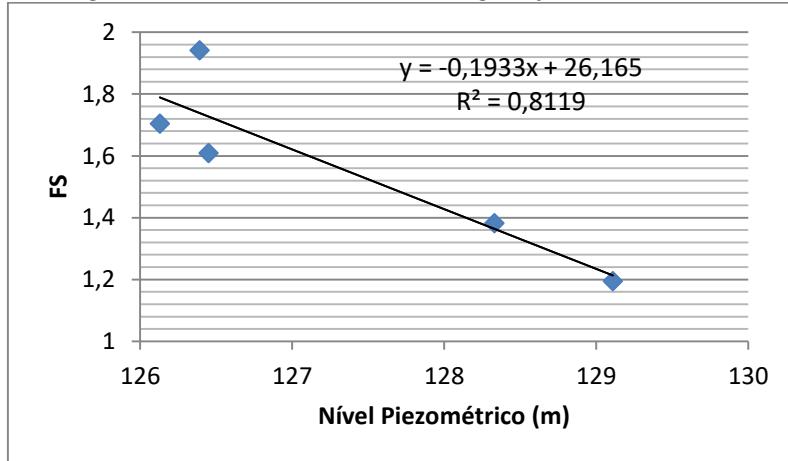
ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

Tabela 4: Fator de segurança dos perfis e níveis piezométrico médio

Perfil	Nível Piezométrico Médio (m)	Fator de Segurança (FS)
NW	128,33	1,382
NE	126,45	1,609
SW	126,13	1,704
SE	129,11	1,194
W	126,39	1,941
Correlação R		-0,9010
Correlação R²		0,8119

Fundamenta essa afirmação, os valores constantes de Coesão, Ângulo de Atrito e Peso Específico dos materiais e as diminutas variações entre as dimensões das células nos perfis analisados, recaindo assim as diferenças de resultado sobre a geometria dos taludes e níveis piezométricos. A tabela 4 apresenta a correlação de Pearson através de regressão linear simples (R) entre altos valores piezométricos e a redução do Fator de Segurança, onde temos correlação negativa forte (DEVORE, 2006). Aplicando os Mínimos Quadrados temos R², também observamos alta correlação inversa, ou seja, altos níveis piezométricos refletem baixos valores de FS (Figura 9).

Figura 9: Regressão linear inversa entre Fator de Segurança e Nível Piezométrico Médio



Com relação aos perfis gerados no *GeoSlope/W*, as cores atribuídas às secções geométricas de ruptura representam o seu FS, sendo em análise geral, taludes mais inclinados apresentam maior superfície longitudinal de ruptura e menor FS (perfis NW e SE). Inversamente, taludes com geometrias de rompimento com menor comprimento longitudinal são os que apresentam maior FS (perfis W, NE e SW) (Figura 10).

Comparando os perfis SE (FS 1,194) e NW (FS 1,382), gerados no *GeoSlope/W* com observações de campo, pode-se afirmar que resultados da simulação geotécnica está correta, pois as cicatrizes identificadas no levantamento estão posicionadas em sua maioria nestes quadrantes, principalmente em SE. Cabe também destacar o perfil NE (FS 1,609), a qual deveria apresentar resultados próximos ao perfil SE, teve a geometria do seu talude alterada, sendo inseridos

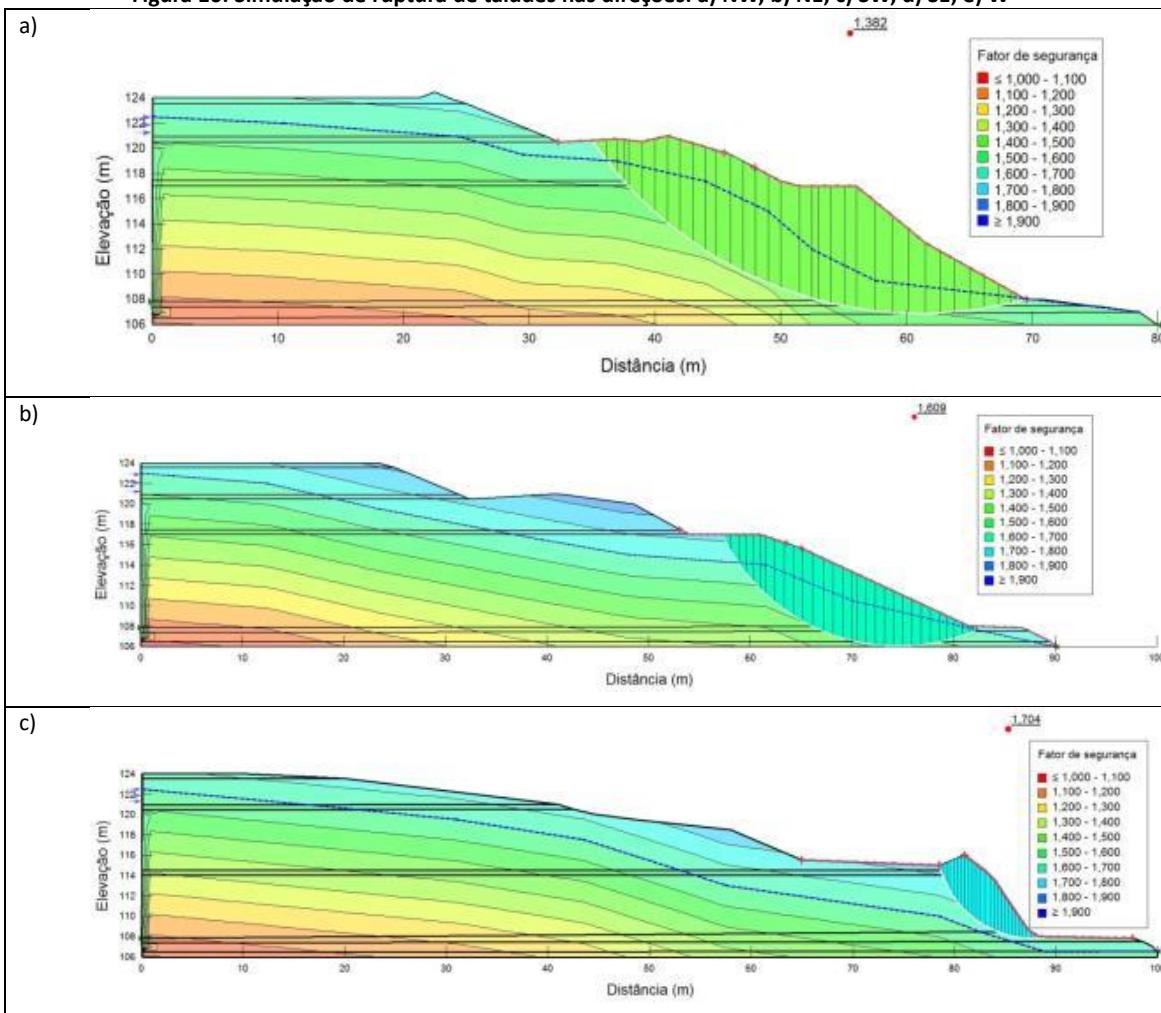
Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

patamares e drenos para o controle de microfissuras pretéritas, resultando em um quadrante com bom FS (BENVENUTTO, 2012).

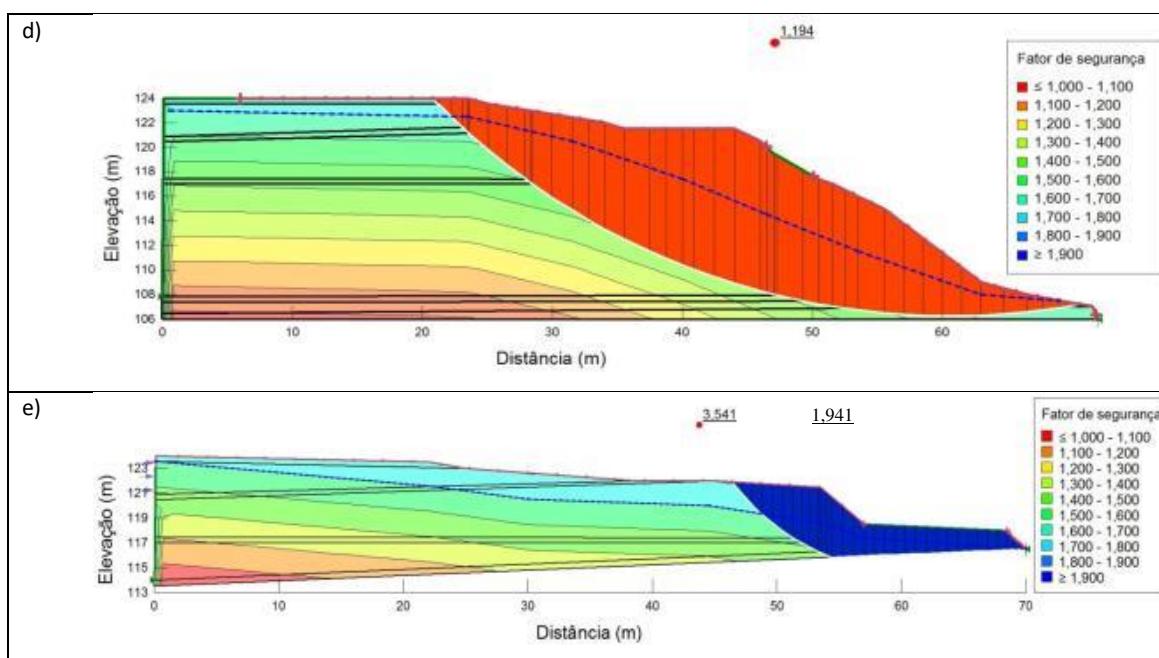
Os perfis W (FS 1,941) e SW (FS 1,704) e SW (FS 1,541) tiveram fatores de segurança considerados como bons, pois possuem níveis de cotas piezométricas altas, mas estáveis, dispersando a poropressão de maneira uniforme no modelo e também com taludes com inclinação mais suaves. O talude do perfil W, apesar de mais íngreme, é compartimentado em dois patamares, o que reduz às cargas verticais e dispersa as poropressões (BORGATTO, 2010).

Figura 10: Simulação de ruptura de taludes nas direções: a) NW; b) NE; c) SW; d) SE; e) W



Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020



Buscando demonstrar graficamente os níveis de segurança dos aterros sanitários de RSU, a norma técnica NBR 11682 – Estabilidade de Taludes (ABNT, 2009), estabelece limites mínimos e máximos de FS e as recomendações de ações segundo o enquadramento proposto (Tabela 5).

Tabela 5: Classificação dos taludes a partir do FS

Alerta 1 Bom	Alerta 2 Atenção	Alerta 3 Alerta	Alerta 4 Intervenção
FS > 1,5	1,3 < FS > 1,5	1,2 < FS > 1,3	1,0 < FS > 1,2

Fonte: Adaptado de ABNT (2009) e Andrade (2018).

Na avaliação dos resultados da modelagem de ruptura de taludes, levando em consideração a classificação da NBR 11682, observa-se que o talude NW (Figura 11a), apresenta um enquadramento de segurança na classe Atenção, onde deve ocorrer o monitoramento dos taludes para identificação de possíveis movimentações no aterro. Nota-se que apesar da superfície de possível ruptura se estender pelas camadas 2 e 3, são geometrias com FS estável na maior parte do perfil, com leve acentuação de fragilidade no contato entre as camadas 3 e 4.

Observando os perfis NE e SW (Figura 11 b e c), estes apresentam um enquadramento classificado como Bom, inclusive em todas as camadas até o limite superior analisado. Deve-se salientar que estes perfis apresentaram um bom resultado visto à existência de um escalonamento entre as bancadas das células de deposição, com geometria do talude bem definida, assim como os drenos em boas condições, melhorando assim o rebaixamento dos níveis piezométricos.

Já o talude SE (Figura 11d) apresentou o pior resultado, sendo enquadrado na classe Intervenção, ou seja, devem ser realizadas ações de controle de processos internos, como o

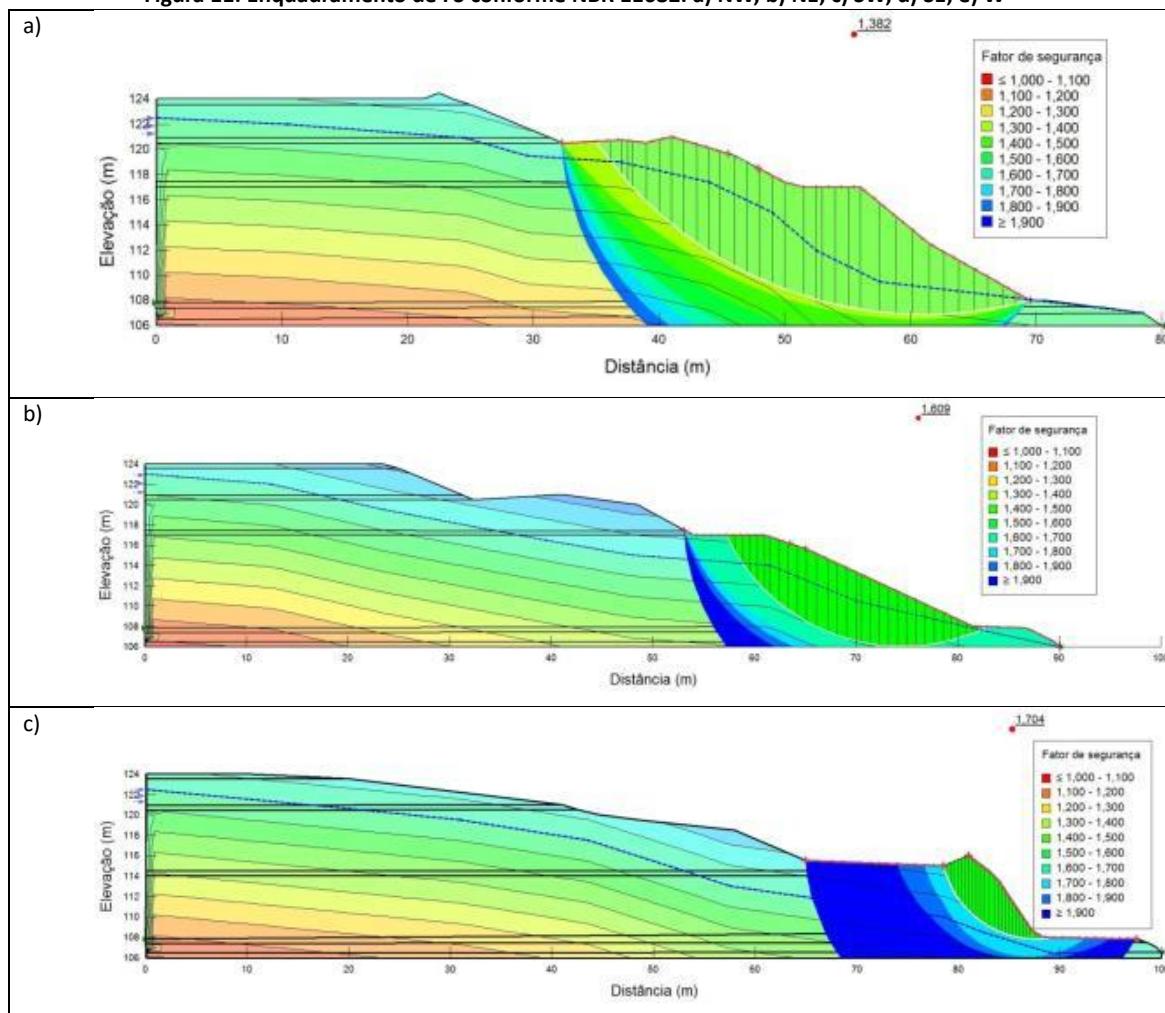
Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

rebaixamento do nível piezométrico. Nota-se também neste perfil que praticamente até a metade do comprimento da bancada 4, os níveis do FS ainda são preocupantes, demonstrando assim a necessidade de cuidados com a impermeabilização, cobertura vegetal e instalação de processos erosivos (Figura 12).

Por fim, o perfil W (Figura 11e) apresenta um enquadramento na classe Bom, pois possui uma rampa alongada com baixa inclinação e baixo nível piezométrico. Este enquadramento se mantém até quase o limite definido no perfil, sendo necessário apenas o monitoramento superficial de acompanhamento. Cabe destacar que a base oeste do aterro foi ancorada em alicive da topografia primitiva, agindo como contra-força e contribuindo para a resistência a cisalhamento na camada base (BENVENUTTO e CUNHA, 1991).

Figura 11: Enquadramento de FS conforme NBR 11682: a) NW; b) NE; c) SW; d) SE; e) W



Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

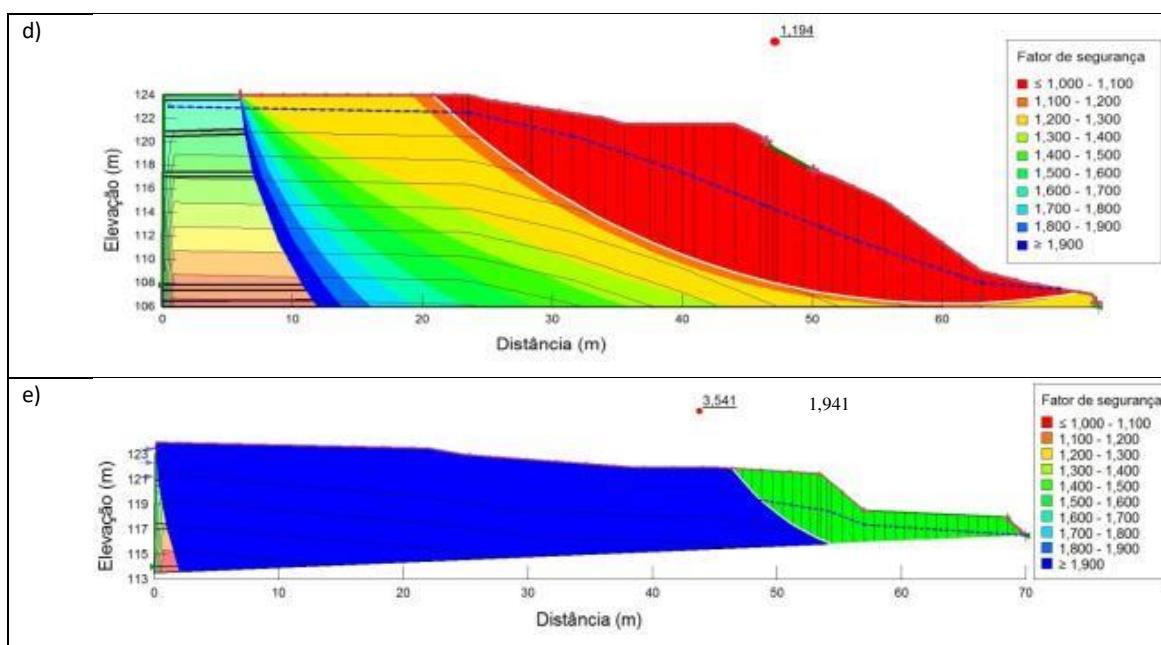


Figura 12: Início dos processos erosivos instalados na face Se do Aterro Sanitário de RSU

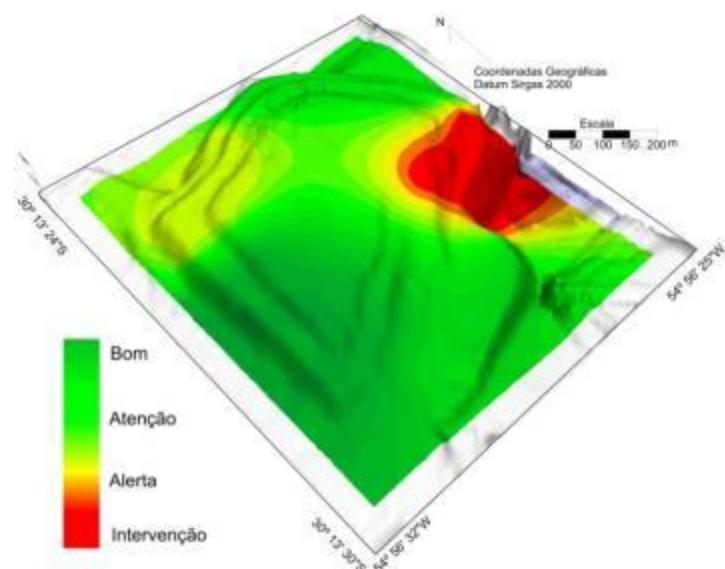


Buscando espacializar os resultados dos Fatores de Segurança, os dados dos perfis foram interpolados e apresentados no modelo numérico da figura 13. A representação hipsométrica dos FS segue a proposta adaptada de Andrade (2018).

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

Figura 13: Modelo numérico com a representação espacial do FS



3. CONCLUSÕES

São recorrentes os problemas relacionados à instabilidade de taludes de aterros sanitários de RSU, sendo inúmeras as referências que registram estes processos, principalmente pós o encerramento das atividades de deposição de materiais e inconstante manutenção e monitoramento. Nesta pesquisa, no trabalho de campo ficou evidente a falta de manutenção e monitoramento do aterro sanitário de Rosário do Sul e este cenário se confirma nos níveis piezométricos encontrados.

As leituras dos piezômetros demonstraram que existe uma alta percolação da pluviosidade para o interior das células e em algumas faces do aterro as canaletas de drenagem não efetuam sua função de maneira correta, visto a falta de manutenção. Essas afirmações são respaldadas pelas altas cotas piezométricas encontradas, variando de 126,13 à 129,11 m em valores medidos e 125,74 à 130,11m simulados.

Já a retroanálise e a simulação de ruptura de taludes pelos parâmetros geotécnicos de peso específico, coesão e ângulo de atrito dos materiais se mostraram extremamente eficientes e com resultados compatíveis com as observações de campo. Isso porque as faces NE (FS 1,609), SW (FS 1,704) e W (FS 1,941), foram diagnosticadas como muito estáveis, não sendo encontradas cicatrizes ou movimentações aparentes dos taludes. Já nas faces NW (1,382) e principalmente na SE (FS 1,194), foram encontradas várias cicatrizes e até processos de rastejo de taludes, comprovando o baixo valor de FS simulado.

Por fim, o aerolevantamento com VANT, apoiado com pontos de controle determinados com receptores GNSS se mostraram ferramentas eficazes para o levantamento topográfico

Fórum Ambiental da Alta Paulista

ISSN 1980-0827 – Volume 16, número 5, 2020

detalhado e acurado, gerando de maneira rápida, dados para a geração do MDS. Além disso, gerou-se um ortomosaico com alta resolução que apoio a interpretação da superfície do aterro.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2009. NBR 11682 – Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro: ABNT 12p.
- ANDRADES, S. A. **Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta.** Dissertação de Mestrado. PPG em Engenharia Civil. UFPR, Curitiba. PR, 2018 144p.
- BENVENUTO, C.; CUNHA, M.A. Escorregamento em Massa de Lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo. **II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos - REGEO'91 - v.2**, Rio de Janeiro / RJ, novembro, p. 55-66. 1991.
- BENVENUTO, C. **Estabilidade geotécnica de aterros sanitários.** I Seminário sobre Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos, 2012.
- BORGATTO, A. V. A. **Estudo das Propriedades Geomecânicas de Resíduos Sólidos Urbanos Pré-Tratados.** Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. 2010.
- BRUCH, A. F.; CIROLINI, A. ; THUM, A. B. ; CARNEIRO, M. Avaliação da Acurácia das Cubagens de Volumes de Mineração através de Levantamentos Convencionais e Fotogramétricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 1. p. 283-298, 2019.
- DEVORE, J.L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências.** São Paulo: Thomson Pioneira, 2006. 706 p.
- GAZOLA, V. **Modelagem do Fluxo Subterrâneo na Região do Aterro Sanitário do Município de Rosário do Sul, RS.** Trabalho de Conclusão Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Geológica. UFPel, Pelotas, 2018. 47p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Dados estatísticos do Censo Demográfico 2010.** Governo Federal. 2010. Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>
- _____. **Manual do Usuário:** Aplicativo Online IBGE-PPP. Brasília. 2017.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.-. **Ocupação de Encostas.** IPT. São Paulo. 1991.
- JAUD, M., PASSOT, S., LE BIVIC, R., DELACOURT, C., GRANDJEAN, P., LE DANTEC, N. Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan and MicMac in Sub-Optimal Survey Conditions. **Remote Sensing** [online] 8/6. 2016.
- MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.** 2001. 350 p. + anexos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SPGG - Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. **Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul.** Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>. Acesso em 20/12/2019.