

# PARAMETROS RESISTENTES DE UN SUELO CON RESIDUOS SOLIDOS URBANOS Y ESTABILIDAD DEL TALUD DE LA ZONA DE KANTUTANI, CIUDAD DE LA PAZ

RESISTANT PARAMETERS OF A SOIL WITH URBAN SOLID WASTE AND SLOPE STABILITY IN THE KANTUTANI AREA, CIUDAD DE LA PAZ

\* Waldo A. Aliaga Aranda, \*\*Sergio D. Paco Mamani

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>El trabajo de investigación permitió determinar parámetros resistentes del talud que soporta una edificación post deslizamiento (Kantutani 2019). Destacando que el suelo está compuesto por una mezcla de areniscas, arcillas, limos y Residuos Sólidos Urbanos (RSU), que no corresponde a un material frecuente de ensayo tradicional, sin embargo, se utilizó las normativas ASTM y AASHTO como referencia, además de ensayos de identificación visual, pruebas in situ y condiciones resistentes para poder contrastar los valores obtenidos en laboratorio. El análisis probabilístico de resultados ayudó a reducir la incertidumbre en el comportamiento del suelo con RSU. La evaluación del talud considerando la carga externa (edificación) que soporta éste, ha establecido en función a los análisis de estabilidad ASD y LRFD, que los parámetros resistentes son específicos de las condiciones actuales del lugar, manteniéndose en el límite del equilibrio. Recomendando efectuar estudios de suelos periódicos, debido a que la dinámica de estos suelos mezclados con RSU, pueden cambiar los parámetros resistentes del talud.</p> <p><b>PALABRAS CLAVE:</b> Kantutani Deslizamiento 2019, Caracterización visual y normas ASTM y AASHTO para estudio de suelos, análisis de sensibilidad ASD y LRFD para taludes, método Fellenius, Bishop y Jambu.</p>	<p>The research work made it possible to determine resistant parameters of the slope that supports a post-slide building (Kantutani 2019). Emphasizing that the soil is composed of a mixture of sandstone, clay, silt and Urban Solid Waste (MSW), which does not correspond to a frequent material for traditional testing, however, ASTM and AASHTO standards were used as a reference, in addition to tests visual identification, in situ tests and resistant conditions to be able to compare the values obtained in the laboratory. The probabilistic analysis of results helped to reduce the uncertainty in the behavior of the soil with MSW. The evaluation of the slope considering the external load (building) that it supports, has established based on the ASD and LRFD stability analysis that the resistant parameters are specific to the current conditions of the place, remaining in the equilibrium limit. Recommending carrying out periodic soil studies because the dynamics of these soils mixed with RSU can change the resistant parameters of the slope.</p> <p><b>KEYWORDS:</b> Kantutani Landslide 2019, visual characterization and ASTM and AASHTO standards for soil study, ASD and LRFD sensitivity analysis for slopes, Fellenius, Bishop and Jambu method.</p>	<p>O trabalho de investigação permitiu determinar os parâmetros de resistência da encosta que suporta um edifício pós-deslizamento (Kantutani 2019). Ressaltando que o solo é composto por uma mistura de arenito, argila, silte e Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que não corresponde a um material frequente para testes tradicionais, porém, foram utilizadas como referência as normas ASTM e AASHTO, além de teste identificação visual, testes in situ e condições de resistência para poder comparar os valores obtidos em laboratório. A análise probabilística dos resultados ajudou a reduzir a incerteza no comportamento do solo com os RSU. A avaliação do talude considerando a carga externa (edifício) que suporta, estabeleceu com base na análise de estabilidade ASD e LRFD, que os parâmetros resistentes são específicos das condições atuais do local, permanecendo no limite de equilíbrio. Recomendando a realização de estudos periódicos de solos, pois a dinâmica destes solos misturados com RSU, pode alterar os parâmetros de resistência do talude.</p> <p><b>PALAVRAS-CHAVE:</b> Kantutani Landslide 2019, Caracterização visual e normas ASTM e AASHTO para estudo de solos, análise de sensibilidade ASD e LRFD para encostas, método Fellenius, Bishop e Jambu.</p>
<p><b>History of the article:</b> Received 29/06/2023. Style review 10/07/2023. Accepted 11/07/2023.</p>		

## INTRODUCCION

El 30 de abril de 2019, en la ciudad de La Paz se produjo un significativo deslizamiento de tierra<sup>1</sup> que afectó a los sectores de Inmaculada Concepción, Avenida Libertad sector Puente Libertad, y San Jorge Kantutani de la zona de Bajo Llojeta. Que desplazó una gran masa de suelo conformado por desechos urbanos, desechos de viviendas derrumbadas y suelo existente en la zona. La fotografía 1 muestra el área y el material deslizado.



Fotografía 1: Parte de la zona y material deslizado [1]

<sup>1</sup> Las quebradas de la zona pertenecieron al ex botadero de Sopocachi y fueron rellenas desde 1960 a 1990 con toneladas de basura. Debido a esta situación en el área, las construcciones no estaban autorizadas. Sin embargo, en la zona se han construido muchas viviendas de las cuales el deslizamiento afectó a 68 en tres zonas, adicionalmente la alcaldía identificó otros 22 inmuebles, 20 de los cuales empezaron a ser demolidos para estabilizar el área; 26 viviendas continúan siendo monitoreadas y 53 fueron evacuadas preventivamente. El área total afectada por el deslizamiento fue de 80 hectáreas y el volumen de escombros y residuos sólidos ocasionados está alrededor de 800000 m<sup>3</sup>. [1]

Actualmente el sector se encuentra en proceso de estabilización con la implementación de un sistema de pantallas con pilotes de fundación y un posterior relleno de tierra y la pavimentación para vincular el puente.

En el área del deslizamiento se observa una edificación (corona de talud) que tiene algunos daños, pero no se derrumbó, y está apoyado sobre un suelo con residuos sólidos urbanos RUS del ex botadero de Sopocachi. Ver fotografía 2.



Fotografía 2: Talud con materiales RUS y la vivienda al borde del coronamiento. Crédito: W. Aliaga - S. Paco (2023)

En consecuencia, talud, suelo de apoyo y edificación han motivado efectuar el presente trabajo de investigación. Dirigido a evaluar las propiedades índices resistentes del talud en relación con las características geotécnicas del lugar.

Haciendo notar que este suelo al estar compuesto por residuos sólidos urbanos no corresponde a un material común de ensayo según normas ASTM y AASHTO, resaltando así, las particularidades de este suelo respecto a los ensayos para establecer su comportamiento.

## DESARROLLO

### a) Estudio geológico e hidrogeológico

En el estudio geológico del área (Zonas Sopocachi, Llojeta, San Pedro), se encontró:

- Limos, arcillas y arenas bien estratificadas, con niveles lenticulares y delgadas capas de cinerita volcánica, procedentes de la **Formación La Paz**,
- Mezclas heterogéneas de materiales gravosos con niveles limosos irregulares compactos y una matriz limo arcilloso, **flujo de barro jukumarine**,
- En la parte superior, sobre la corona de deslizamiento se tienen la **formación Miraflores, flujo de barro**, unidades que sobre yacen a la **formación La Paz**,
- En los farallones del sector Valle Concepción y sus colindancias, aparece la **formación Miraflores**,
- **Residuos sólidos y de relleno**, la presencia de estos materiales en el área es de distribución puntual, su extensión y espesor identificado en el área se reflejan en el talud ubicado al Nor-Oeste, ver fotografía 2.

La presencia de agua subterránea se pudo advertir por los afloramientos de los niveles arenosos de la formación La Paz, donde las arcillas intercaladas con lentes de arenas muchas veces son portadoras de agua subterránea.

La zona en conjunto presenta una permeabilidad baja a media, y un nivel freático superficial. En el talud se manifiesta la salida de agua que fue encauzada.

### b) Área de estudio y recolección de muestras

El deslizamiento de 2019 dejó una estratigrafía del terreno conformado por suelo clasificado en el acápite (a) y residuos sólidos urbanos. Por lo tanto, se excavaron cinco pozos alrededor de la vivienda en pie (área crítica del talud) con profundidades de 0,5m a 1,10 m para eliminar el material superficial alterado; ver fotografía 3. K1 corresponde a la corona superior del talud, K2 y K4 al coronamiento de la banquina intermedia formada, K3 y K5 al pie del talud antes de la obra de estabilización, K5 es material compactado para habilitar una vía de acceso provisional.

La extracción y ensayo de muestras se realizó usando como referencia las normativas para estudios Geológicos – Geotécnicos de La Paz y el Manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC<sup>2</sup>, ambas normas homologadas según normas internacionales ASTM y AASHTO.



**Fotografía 3:** Ubicación pozos excavados para la toma de muestras.  
Crédito: W. Aliaga - S. Paco (2023)

En cada punto de excavación se recolectaron<sup>3</sup> 40 kg de muestra alterada por pozo, además de muestras inalteradas, plastificadas herméticamente para determinar el contenido de humedad, densidad, remoldeado de probetas de compresión no confinada y corte directo. Ver tabla 1.

**Tabla 1**  
**Ubicación pozos excavados**

Pozo	Prof. Min. (m)	Prof. Máx. (m)	Este (m)	Norte (m)	Cota superior msnm
K1	1,1	1,1	593508,40	8173525,17	3515,00
K2	0,5	0,6	593513,73	8173514,67	3495,00
K3	0,5	0,8	593535,38	8173511,69	3485,00
K4	0,5	1,6	593534,58	8173534,86	3495,00
K5	0,5	0,6	593542,19	8173527,55	3485,00

Fuente: Elaboración propia

### c) Caracterización visual del material<sup>4</sup>

Se estimó una clasificación de características del terreno adaptando algunos ensayos orientados a suelos para caracterizar los suelos con RSU. Los ensayos realizados son de apreciación del tamaño de granos y estimación de porcentajes de cada fracción, apreciación de la resistencia a la rotura, apreciación de la plasticidad, apreciación de la dilatancia, comportamiento al corte con navaja, olor, fractura de rocas y apreciación de la alterabilidad de rocas por inmersión con agua oxigenada.

**Tabla 2**  
**Clasificación del suelo a partir de caracterización visual**

Pozo	Clasificación		
K1	GM	SM	ML
K2	SM	GM	MI
K3	SM	GM	ML
K4	GC	SC	CL
K5	GM	ML	

Fuente: Elaboración propia

Para conocer las cantidades de material suelo y residuos urbanos sólidos, se determinó el porcentaje en peso de residuos presentes en cada muestra, a partir de los

<sup>3</sup> Material recolectado con mucha precaución.

<sup>4</sup> Siguiendo el manual de reconocimiento visual y ensayos de inspección en campo del Dr. Morilla Abad.

<sup>2</sup> Administradora de Carreteras de Bolivia.

ensayos de reconocimiento visual y granulometría hasta tamiz Número 4. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3**  
Porcentaje de residuos sólidos urbanos a partir de ensayo granulométrico y de caracterización visual

Porcentaje RUS	Granulometría	Muestra natural
K1	31,57	20,09
K2	9,53	2,49
K3	12,25	8,23
K4	20,01	11,50
K5	6,15	1,68

Fuente: Elaboración propia

Entre los residuos se encontraron restos de vidrios, ventanas, espejos, botellas; materiales cocidos, ladrillos, estuco, mortero de cemento; plásticos, nylon, utensilios varios; orgánicos, huesos, raíces en descomposición. Ver porcentajes en la tabla 4.

**Tabla 4**  
Porcentaje de composición y materiales observados

Porcentaje RUS	A	B	C	D	E
K1	1,09	11,62	0,91	6,47	79,91
K2	0,00	1,28	0,04	1,18	97,51
K3	0,00	8,09	0,12	0,01	91,77
K4	0,54	9,36	0,25	1,35	88,50
K5	0,00	0,70	0,00	0,97	98,32

**Referencias:**

A (vidrios), B (Material cocido), C (Plásticos), D (Orgánicos), E (Agregados)

Fuente: Elaboración propia

Al sumergir las muestras en agua en agua oxigenada, se observó el comportamiento mineralógico de los suelos y su alterabilidad, (este ensayo ayudo a prever problemas en la realización de otros ensayos). Observándose una reacción elevada en las muestras K1, K3 y K4 durante los primeros instantes, que se reducen a partir del primer día de inmersión.

**d) Caracterización de material bajo normativa**

Efectuados los ensayos de granulometría ASTM D422-63 AASHTO T27-93 vía seca y húmeda. Hidrometría ASTM D421 AASHTO T87- 88. Debido a la alta cantidad de partículas cohesivas en las muestras K2 y K4 se procedió a repetir los ensayos por vía seca en las muestras ya seleccionadas K1, K2, K3 y K4 por vía húmeda (lavado). El bajo porcentaje de terrones y partículas de RSU en la muestra K5 evitó repetir el ensayo por vía húmeda. Las muestras conteniendo residuos sólidos dificultaron el cumplir la normativa rigurosamente. Ver fotografía 4.



**Fotografía 4:** Tamizado de muestra K1, presencia de cerámicas, ladrillos, material orgánico, entre otros. Crédito: W. Aliaga - S. Paco (2023).

El análisis granulométrico (método del hidrómetro) evidenció la presencia de partículas flotantes en la muestra K1 que sedimentan en la etapa de floculación con hexa meta fosfato de sodio, al agitar la muestra.

Para efectuar el análisis del contenido de Agua ASTM D2216 (w%)<sup>5</sup>, Las muestras fueron sometidas al menos dos días a temperatura de 100 °C, evitando problemas de infección o contaminación higiénica, más aún con los problemas sanitarios del año de realización de este estudio. En la tabla 5 se tienen los resultados alcanzados de humedad natural a partir de muestras inalteradas y conservadas herméticamente.

**Tabla 5**  
Porcentaje de Humedad Natural

Muestra	K1	K2	K3	K4	K5
Porcentaje de humedad	12,62	4,94	6,68	6,44	12,87

Fuente: Elaboración propia

Respecto al ensayo Límites de Atterberg ASTM D4318 AASTHO T89-90, el material de los pozos K1 y K3 presenta índices muy bajos de plasticidad, en comparación el material de los pozos K2, K4 y K5. Ver tabla 6.

**Tabla 6**  
Índices de líquidos de los materiales

Pozo	LL	LP	IP
K1	37,50	36,78	0,72
K2	22,25	19,13	3,12
K3	17,60	17,52	0,08
K4	26,50	21,15	5,35
K5	25,70	19,36	6,34

**Referencias:**

LL límite líquido, LP límite plástico, IP índice de plasticidad

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7, se muestra la clasificación del material de los pozos excavados normas ASTM, y AASHTO.

**Tabla 7**  
Clasificación del Suelo según ASTM y AASHTO

Pozo	ASTM	AASHTO
K1	SM-ML-O	A-2-4
K2	SM-ML	A-2-4
K3	SM	A-6
K4	SM-SC	A-4
K5	ML	A-2-4

**Referencias:**

SM arena limosa, ML limos inorgánicos, O arcillas orgánicas, SC arena arcillosa  
A-2-4 material granular pasa tamiz 200 menos del 35%  
A-4 material limo arcilloso pasa tamiz 200 más del 35%  
A-6 material limo arcilloso pasa tamiz 200 más del 36%

Fuente: Elaboración propia

<sup>5</sup> Según recomendaciones el material se debe tratar a 60 °C hasta lograr peso constante. Thome Juca en el simposio brasilero de ingeniería sanitaria y ambiental indica que la variabilidad de temperatura 60 a 110 °C incide muy poco en la determinación del contenido de humedad cuanto mayor sea el tiempo de secado.

La tabla 8 muestra los resultados de los siguientes ensayos efectuados con el material de los pozos excavados: peso específico de partículas sólidas **Gs** ASTM D854 – E127 AASHTO T85 – T91 – T100<sup>6</sup>, Densidad trozos inalterados ASTM D854 AASHTO T233, Contenido Orgánico AASTHTO T267 por ignición,

**Tabla 8**  
Peso específico, densidad natural, contenido orgánico y densidad de trozos inalterados recubrimiento con parafina

Material Pozo	Peso específico (Gs)	Densidad natural* $\rho_{nat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	Contenido orgánico** (%)
K1	2,24	1,275	3,25
K2	2,56	1,753	0,50
K3	2,71	1,944	0,35
K4	2,61	1,955	0,86
K5	2,72	2,105	1,78

\* La muestra K1, tiene una densidad relativamente baja por los residuos, en las otras muestras hay más presencia de suelo.

\*\* Las muestras K1 y K5 tienen alto contenido de partículas orgánicas.

**Densidad de trozos inalterados**

Las muestras K1 y K5 presentan mayor porcentaje de arenas y gravillas, por lo tanto se dificulta la obtención de geometrías regulares, K1 incluye alto porcentaje de residuos sólidos.



Fuente: Elaboración propia

**d) Caracterización por condiciones resistentes**

En la evaluación de la resistencia de estos suelos con RSU, un primer ensayo in situ fue el ensayo de penetración dinámica ligero DPL - ASTM 3441 y también DIN 4094, fundamentalmente por la dificultad y condición del material, además la accesibilidad para realizar el ensayo SPT (Standard Penetration Test = Prueba de Penetración Estándar). A partir de este ensayo es posible correlacionar los resultados STP, y a través de fórmulas determinar parámetros resistentes.

**Tabla 9**  
Datos DPL y profundidades de ensayo

Pozo	Profundidad (m)	N5DPL	N30	N60
K1	1,15 – 1,45	5-6-5-4-5-6	13	12
K2	0,50 – 0,80	2-3-4-4-6-5	10	8
K3	0,50 – 0,80	3-5-7-14-10-11	21	15
K4	0,50 – 0,80	2-2-2-2-12-9	12	9
K5	0,60 – 0,90	5-2-1-1-2-3	6	4

Fuente: Elaboración propia

<sup>6</sup> Se realizó con dos picnómetros diferentes de 100 mL cada uno sobre el material que pasa tamiz N°10. La muestra K1 contiene alta cantidad de partículas suspendidas, impidiendo una lectura correcta del nivel calibrado, por disponibilidades de equipo no se repite este ensayo con un picnómetro de 500mL.

Con la información determinada in situ, se determinó la correlación al ensayo SPT, los resultados se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10**  
Ensayo de penetración dinámica ligera DPL  
Correlaciones DPL – SPT – Parámetros resistentes

P		K1	K2	K3	K4	K5	
I	N30	13	10	21	12	6	
II	N60	12	8	15	9	4	
III	$\Phi$	31°	30°	33°	30°	28°	
IV	C	0,88	0,63	1,32	0,86	0,34	kg·cm <sup>-2</sup>
V	$q_u$	1,76	1,27	2,64	1,72	0,68	kg·cm <sup>-2</sup>
VI	E	120,76	96,61	125,00	102,53	72,96	kg·cm <sup>-2</sup>
VII	$\mu$	0,24	0,25	0,23	0,25	0,27	
VIII	Dr%	44,72	36,51	50,00	37,73	25,82	

**Referencia de parámetros resistentes (P):**

(I) SPT a partir del DPL, (II) N30 a N60 (PECK ARENA),

(III) Ángulo de fricción, (IV) Cohesión, (V) Tensión admisible,

(VI) Módulo de elasticidad, (VII) Módulo de Poisson, (VIII) Densidad relativa.

Fuente: Elaboración propia

Otro ensayo ejecutado fue el de corte directo consolidado drenado ASTM D3080 M-11 AASTHO T236, en muestras cilíndricas remoldeadas a partir de muestras inalteradas, (rem) evitando pérdidas de humedad natural. Ver tabla 11.

**Tabla 11**  
Resultados corte directo consolidado drenado

Muestras	Ángulo de fricción ( $\Phi$ ) Grados	Cohesión (C) kg·cm <sup>-2</sup>	Observación
K1	23	0,01	Remoldeado y tamizado N10
K1 (NT)	16	0,00	Remoldeado sin tamizar
K2	21	0,07	Remoldeado y tamizado N10
K2 (NT)	14	0,09	Remoldeado sin tamizar
K3	19	0,00	Remoldeado y tamizado N10
K3(NT)	32	0,00	Remoldeado sin tamizar
K4	9	0,13	Remoldeado y tamizado N10
K4(NT)	22	0,07	Remoldeado sin tamizar
K5	14	0,18	Remoldeado y tamizado N10
K5 (NT)	29	0,04	Remoldeado sin tamizar

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12, se reportan resultados de los ensayo de compresión simple ASTM D2126 AASTHO T208, correspondientes a las muestras inalteradas que contienen gran cantidad de partículas de residuos sólidos urbanos, (tallado probetas muestras K2 y K4 con restos de mayor porcentaje de finos). Más el remoldeado de las muestras inalteradas de cada pozo, seleccionando material que pasa tamiz N°10, (conservando humedad y la densidad natural obtenida por el método de trozos inalterados).

Las determinaciones de carga uniaxial<sup>7</sup> de los ensayos, indican que la cohesión medida presenta valores altos en comparación con los valores teóricos calculados a partir de las correlaciones del SPT.

<sup>7</sup> Esfuerzo de tracción sobre una probeta de material hasta su rotura.

**Tabla 12**  
Resultados del ensayo a compresión no confinada

Ensayo	q <sub>u</sub> kg·cm <sup>-2</sup>	C kg·cm <sup>-2</sup>	E kg·cm <sup>-2</sup>	Observaciones
K1 rem	2,67	1,34	55,01	Remoldeado y tamizado TN10
K1 (NT)	0,00	0,00	0,00	Se deshace al transportar
K2 inalt	12,64	6,32	259,93	Tallado
K2 rem	2,27	1,13	77,69	Remoldeado y tamizado TN10
K2 rem (NT)	1,39	0,69	35,24	Remoldeado sin tamizar
K3 rem	2,51	1,26	84,99	Remoldeado y tamizado TN10
K3 rem (NT)	2,12	1,06	42,69	Remoldeado sin tamizar
K4 inalt	9,96	4,98	165,26	Tallado
K4 rem	8,27	4,14	164,96	Remoldeado y tamizado TN10
K4 rem (NT)	8,97	4,48	180,68	Remoldeado sin tamizar
K5 rem	5,96	2,98	99,31	Remoldeado y tamizado TN 10
K5 rem (NT)	1,11	0,55	11,24	Remoldeado sin tamizar

Fuente: Elaboración propia

**e) Litoestratigrafía con sectorización del área**

El material del lugar de estudio está compuesto por suelos arenos limosos mezclados en distintas proporciones con residuos sólidos urbanos (basura), que al momento de determinar sus parámetros resistentes, tiene limitaciones debido a su comportamiento atípico.

En consecuencia, para poder determinar parámetros resistentes y evaluar la estabilidad global del talud, se procedió a obtener valores de cohesión realizando un análisis de sensibilidad con los perfiles obtenidos de la topografía del talud.

Análisis de sensibilidad que permite determinar rangos de cohesión a partir de la topografía deslizada y menores ángulos de fricción establecidos en gabinete. Asumiendo un factor de seguridad igual a la unidad asistencia del software Slide y el uso de los métodos de cálculo de Fellenius, Bishop y Jambu.

Se determinaron siete perfiles en los cuales se introdujo materiales tipo K1 en la cota 3495 m.s.n.m<sup>8</sup>. superior, tipo K2 entre 3495 y 3482 m.s.n.m y tipo K5 de 3482 m.s.n.m. en la parte baja. Considerando además ángulos menores de fricción y la carga uniformemente distribuida de la edificación.

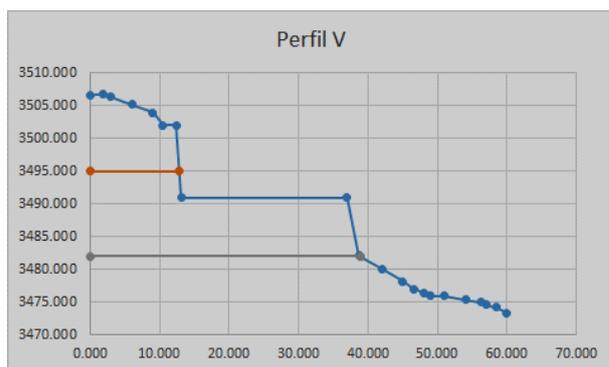
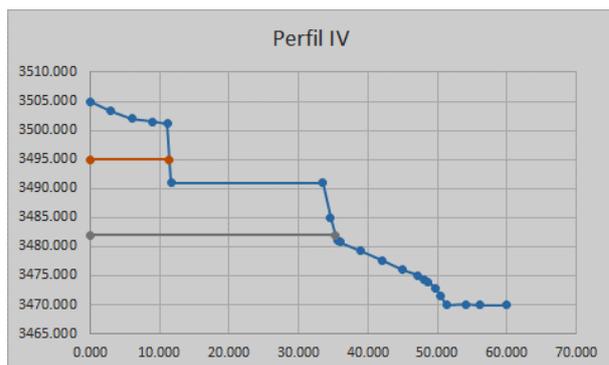
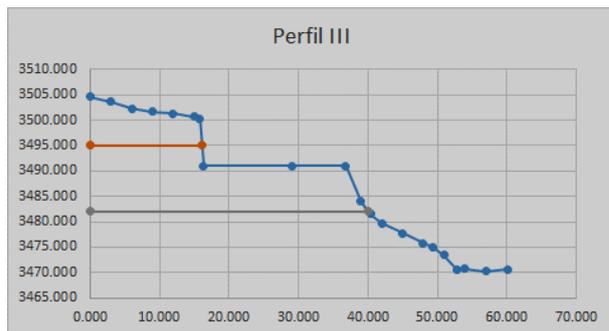
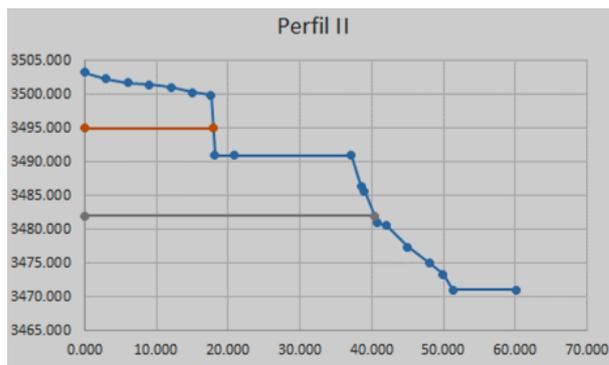
En el cuadro 1, se muestran cuatro secciones (perfiles) importantes del talud.

**f) Análisis de sensibilidad y probabilístico**

Las secciones transversales son analizadas considerando los valores de la tabla 13.

<sup>8</sup> Metros sobre el nivel del mar.

**Cuadro 1**  
Cuatro perfiles del talud considerando la banquina donde está edificación



Fuente: Elaboración propia

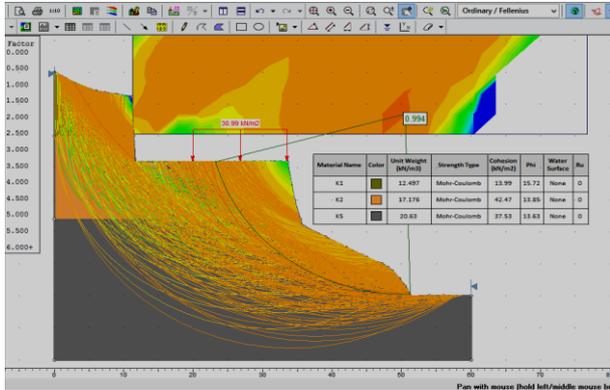
**Tabla 13**  
Parámetros de Partida de Retro análisis

	Y nat. kN·m <sup>-3</sup>	Tipo de esfuerzo	Cohesión kg·m <sup>-2</sup>	Ángulo (°)
K1	12,5	Mohr -Coulomb	1	16
K2	17,18	Mohr -Coulomb	68,14	14
K5	20,63	Mohr -Coulomb	54,33	14

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 2 se muestra el análisis del perfil IV, considerando los parámetros determinados en el análisis de sensibilidad, donde el factor de seguridad encontrado indica el valor de FS = 0,99, estando en el límite del equilibrio.

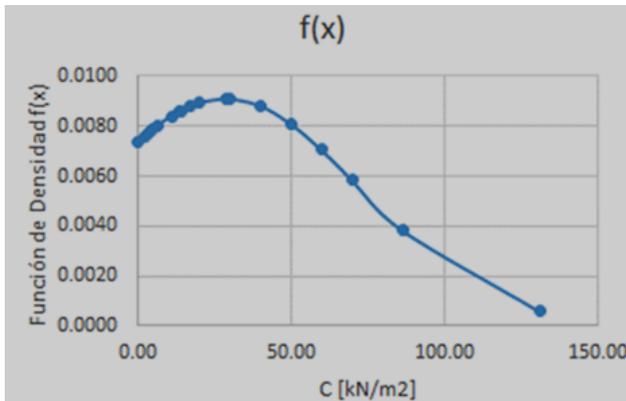
**Cuadro 2**  
**Perfil IV. análisis método Fellenius FS = 0,99 con cohesiones determinadas por el análisis de sensibilidad**



Fuente: Elaboración propia

A partir de todos los datos de cohesión obtenidos de DPL – SPT, compresión simple y retro análisis, se estableció una curva de probabilidades, resaltando la media, ver cuadro 3.

**Cuadro 3**  
**Curva de frecuencias normales K1**  
**C = 3,26 – 54,04 KN·m<sup>-2</sup>**



Fuente: Elaboración propia

Realizadas las valoraciones para cada material con los perfiles y análisis realizados, se ve que hay dispersión en los datos por el comportamiento del material con basura, sin embargo, se llegó a considerar los siguientes parámetros resistentes y propiedades mecánicas, tabla 14.

**g) Evaluación estabilidad del talud**

Para el análisis de estabilidad del talud, se aplicó criterios ASD y LRFD. La evaluación divide en tres estratos al talud:

1. Parte superior compuesto por materiales **K1**,
2. Base de la edificación (cuatro plantas) **K2**,
3. Pie del talud, **K5**.

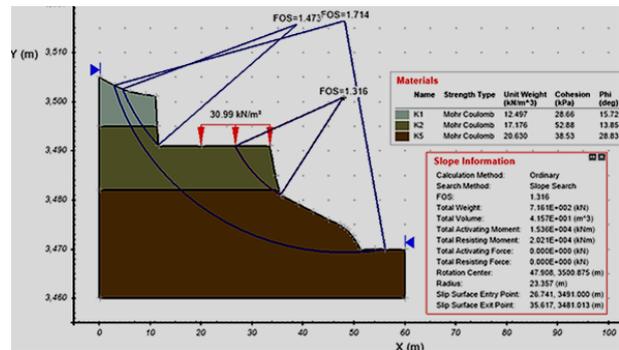
La evaluación es para cada estrato y luego en forma global. Ejemplo: perfil IV, cuadro 4.

**Tabla 14**  
**Parámetros resistentes y propiedades mecánicas, muestras extraídas deslizamiento Kantutani**  
 (K4 No se considera para el análisis de estabilidad)

Clasificación ASTM/AASHTO	K1	K2	K3	K5
	SM-ML A-2-4	SM-ML A-2-4	SC-SM A-6	SC-SM A-2-6
ρ nat. (g·cm <sup>-3</sup> )	1,275	1,753	1,944	2,105
Angulo (°)	16	14	32	29
C (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,29 ± 0,26	0,54 ± 0,16	0,86 ± 0,33	0,39 ± 0,08
qu (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,58 ± 0,52	1,08 ± 0,32	1,72 ± 0,66	0,78 ± 0,16
μ	0,36	0,38	0,24	0,26
E (kg·cm <sup>-2</sup> )	120,26	96,61	125,00	72,96
G (kg·cm <sup>-2</sup> )	44,07	35,00	50,60	28,98
RSU (%)	20,09	2,49	8,23	1,68

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4**  
**Análisis de estabilidad del talud. Perfil IV. Método Fellenius: FS<sub>sup</sub> = 1,473 FS<sub>inf</sub> = 1,315 FS<sub>global</sub> = 1,714**



Fuente: Elaboración propia

La tabla 15, registra factores de seguridad promedio del talud superior, inferior y la falla global. La evaluación estadística de resultados, estableció que la sección con el menor factor de seguridad es el talud de la parte superior, debido a su composición (mezcla de residuos sólidos, areniscas y limos) presentes en ese lugar.

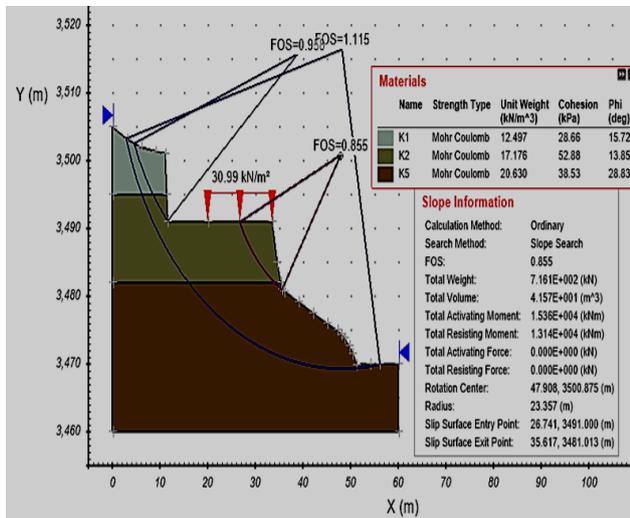
**Tabla 15**  
**Determinación estabilidad del talud superior, inferior y general, Criterio ASD (Allowable Stress Design) Diseño por esfuerzo admisible**

Falla Global FS 1,62 ± 0,12 rango FS 1,50 – 1,74				
Método	Fellenius	Bishop	Jambu	Promedio
P1	1,42	1,43	1,39	1,41
P2	1,55	1,58	1,49	1,54
P3	1,57	1,60	1,52	1,56
P4	1,71	1,78	1,66	1,72
P5	1,93	2,04	1,80	1,92
P6	1,57	1,61	1,51	1,56
P7	1,59	1,64	1,53	1,59
Falla talud superior FS 1,42 ± 0,14 rango FS 1,28 – 1,56				
Método	Fellenius	Bishop	Jambu	Promedio
P1				
P2	1,60	1,55	1,49	1,54
P3	1,47	1,43	1,50	1,47
P4	1,47	1,41	1,04	1,31
P5	1,23	1,18	1,26	1,23
P6	1,57	1,61	1,51	1,56
P7				
Falla talud inferior FS 1,45 ± 0,09 rango FS 1,36 – 1,54				
Método	Fellenius	Bishop	Jambu	Promedio
P1				
P2	1,49	1,52	1,49	1,50
P3	1,48	1,52	1,46	1,49
P4	1,32	1,29	1,34	1,32
P5	1,40	1,39	1,43	1,40
P6	1,57	1,61	1,51	1,56
P7				

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte el análisis de estabilidad aplicando el método de factores de diseño de carga y resistencia LRFD (Load and Resistance Desing Factors), para el perfil IV se puede ver en el cuadro 5.

**Cuadro 5**  
**Análisis de Estabilidad Estabilidad de Talud - Metodo Fellenius:  $FS_{sup} = 0,950$ ,  $FS_{inf} = 0,856$ ,  $FS_{global} = 1,115$**



En forma similar al anterior análisis, en la tabla 16 se indican los factores de seguridad promedio del talud superior, inferior y la falla global.

**Tabla 16**  
**Determinación estabilidad, factor del talud superior, inferior y general. Criterio LRFD**

Falla global $FS 1,05 \pm 0,08$ rango $FS 0,97 - 1,13$				
Método	Fellenius	Bishop	Jambu	Promedio
P1	0,92	0,93	0,91	0,92
P2	1,01	1,03	0,97	1,00
P3	1,02	1,04	0,99	1,02
P4	1,12	1,16	1,08	1,12
P5	1,25	1,33	1,17	1,25
P6	1,02	1,05	0,98	1,02
P7	1,03	1,07	1,00	1,03
Falla talud superior $FS 0,92 \pm 0,09$ rango $FS 0,83 - 1,01$				
Método	Fellenius	Bishop	Jambu	Promedio
P1				
P2	1,01	1,01	0,97	1,00
P3	0,96	0,93	0,98	0,95
P4	0,96	0,92	0,68	0,85
P5	0,80	0,77	0,82	0,80
P6	1,02	1,05	0,98	1,02
P7				
Falla talud inferior $FS 0,95 \pm 0,06$ rango $FS 0,89 - 1,01$				
Método	Fellenius	Bishop	Jambu	Promedio
P1				
P2	0,97	0,99	0,97	0,97
P3	0,96	0,99	0,95	0,97
P4	0,86	0,84	0,87	0,86
P5	0,91	0,90	0,93	0,91
P6	1,02	1,05	0,98	1,02
P7				

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que el parámetro estimado **FS global** está en el límite de resistencia. Mientras que los parámetros **FS<sub>sup</sub>** y **FS<sub>inf</sub>** guardan relación con los cálculos efectuados y establecen que ambos se encuentran en condición de falla, Sin embargo en la realidad los sectores del talud, aún después del deslizamiento, continúan estables. Consiguientemente los parámetros estimados del terreno, son bastante realista.

**h) Caracterización suelo de pozos excavados**

K1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO			
SUCS	SM-ML	H nat (%)	12,62
AASHTO	A-2-4	e	0,98
SUCS visual	GM-SM-ML	S	28,90
RSU Tamiz. (%)	31,57	LL	37,50
RSU visual (%)	20,09	LP	36,78
$\rho_{nat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,28	IP	0,72
$\rho_{seco}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,13	Ic	34,39
$\rho_{sat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,63	Actividad	0,13
Gs	2,24	Orgánico (%)	3,25

ENSAYOS IN SITU	
Prof. penetración	1,15 – 1,45
N <sub>5</sub> golpes DPL	5-6-5-4-5-6
N <sub>golpes</sub> SPT	13

PARÁMETROS RESISTENTES			
Áng. fricción (°)	15,72	$\mu$	0,36
C (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,29 ± 0,26	E (kg·cm <sup>-2</sup> )	120,26
qu (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,58 ± 0,52	G (kg·cm <sup>-2</sup> )	44,07

K2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO			
SUCS	SM-ML	H nat (%)	4,94
AASHTO	A-2-4	e	0,54
SUCS visual	SM-SM-ML	S	23,60
RSU Tamiz. (%)	31,57	LL	22,25
RSU visual (%)	20,09	LP	19,13
$\rho_{nat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,75	IP	3,12
$\rho_{seco}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,67	Ic	5,54
$\rho_{sat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	2,02	Actividad	0,36
Gs	2,56	Orgánico (%)	0,50

ENSAYOS IN SITU	
Prof. penetración	0,5 – 0,8
N <sub>5</sub> golpes DPL	2-3-4-4-6-5
N <sub>golpes</sub> SPT	10

PARÁMETROS RESISTENTES			
Áng. fricción (°)	13,85	$\mu$	0,38
C (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,54 ± 0,16	E (kg·cm <sup>-2</sup> )	96,61
qu (kg·cm <sup>-2</sup> )	1,08 ± 0,32	G (kg·cm <sup>-2</sup> )	35,00

K3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO			
SUCS	SC-SM	H nat (%)	6,68
AASHTO	A-6	e	0,49
SUCS visual	SM-GM-ML	S	37,51
RSU Tamizado	12,25	LL	17,60
RSU visual	8,23	LP	17,52
$\rho_{nat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,94	IP	0,08
$\rho_{seco}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,82	Ic	132,92
$\rho_{sat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	2,15	Actividad	0,02
Gs	2,71	Orgánico (%)	0,35

ENSAYOS IN SITU	
Prof. penetración	0,5 – 0,8
N <sub>5</sub> golpes DPL	3-5-7-14-10-11
N <sub>golpes</sub> SPT	21

PARÁMETROS RESISTENTES			
Áng. fricción (°)	31,98	$\mu$	0,24
C (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,86 ± 0,33	E (kg·cm <sup>-2</sup> )	125,00
qu (kg·cm <sup>-2</sup> )	1,72 ± 0,66	G (kg·cm <sup>-2</sup> )	50,60

K4 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO			
SUCS	SC-SM	H nat (%)	6,44
AASHTO	A-4	e	0,42
SUCS visual	GC-SC-CL	S	40,04
RSU Tamiz. (%)	20,01	LL	26,50
RSU visual (%)	11,50	LP	21,15
$\rho_{nat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,95	IP	5,35
$\rho_{seco}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1,84	Ic	3,75
$\rho_{sat}$ (g·cm <sup>-3</sup> )	2,13	Actividad	0,47
Gs	2,61	Orgánico (%)	0,86

Es parte de la  
tabla K4

K4 ENSAYOS IN SITU	
Prof. penetración	0,5 – 0,8
N <sub>5golpes</sub> DPL	2–2–2–3–12–9
N <sub>5golpes</sub> SPT	12

K4 PARÁMETROS RESISTENTES			
Áng. fricción (°)	22,23	$\mu$	0,31
C (kg·cm <sup>-2</sup> )	4,53 ± 0,71	E (kg·cm <sup>-2</sup> )	102,53
qu (kg·cm <sup>-2</sup> )	9,06 ± 1,42	G (kg·cm <sup>-2</sup> )	39,11

K5 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO			
SUCS	SC– SM	H nat (%)	12,87
AASHTO	A–2–4	e	0,47
SUCS visual	GM–ML	S	78,14
RSU Tamiz. (%)	6,15	LL	25,70
RSU visual (%)	1,68	LP	19,36
$\rho$ nat (g·cm <sup>-3</sup> )	2,11	IP	6,34
$\rho$ seco (g·cm <sup>-3</sup> )	1,87	Ic	2,02
$\rho$ sat (g·cm <sup>-3</sup> )	2,18	Actividad	0,29
Gs	2,72	Orgánico (%)	0,78

ENSAYOS IN SITU	
Prof. penetración	0,6 – 0,9
N <sub>5golpes</sub> DPL	5–2–1–1–2–3
N <sub>5golpes</sub> SPT	6

PARÁMETROS RESISTENTES			
Áng. fricción (°)	28,83	$\mu$	0,26
C (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,39 ± 0,08	E (kg·cm <sup>-2</sup> )	72,96
qu (kg·cm <sup>-2</sup> )	0,78 ± 0,16	G (kg·cm <sup>-2</sup> )	28,98

## CONCLUSIONES

Efectuados los trabajos de campo, laboratorio y gabinete, a partir de muestras de suelo extraídas de cinco pozos. Se logró obtener datos del terreno próximo a la edificación que está al borde del talud producto del deslizamiento de Kantutani del 2019. Demostrando que el suelo de fundación está constituido por residuos sólidos urbanos RSU o desechos de basura, escombros de edificios y suelo natural. Frente a la inexistencia de normativas específicas para estudios de suelos con RSU, se utilizó las normativas ASTM y AASHTO como referencia, así como ensayos de caracterización visual de Morilla Abad y adaptaciones de ensayos de Krishna R. Reddy y Shi Jin Feng,

Debido al comportamiento atípico del suelo con RSU. Previamente se realizaron ensayos de caracterización visual para identificar particularidades de estos suelos, además se efectuaron ensayos bajo normativa que no señalan un comportamiento real del suelo del talud (mezcla de residuos sólidos urbanos), caracterizando lo siguiente:

- Pozo K1: presencia de desechos y materia orgánica, baja densidad.
- Pozo K2: conformado en mayor proporción por suelo limoso de cohesión elevada (sin remoldeo), y baja cohesión (remoldeado).
- Pozo K3: no presenta índice de plasticidad, igualando sus características con el material consolidado de pozo K2.
- Pozo K4: conformado por materiales cocidos (yeso, ladrillo y mortero, adicionalmente bolsas plásticas), el suelo cuenta con tixotropía, un ángulo de fricción de 22° y cohesión de 4,14 kg·cm<sup>-2</sup>, valores muy diferentes a los otros resultados.
- Pozo K5: corresponde a un suelo compactado, sin embargo deberá ser mejorado para habilitar como vía de acceso provisional.

Complementariamente se efectuaron ensayo in situ (STP) y en laboratorio para valorar las propiedades y parámetros resistentes.

La evaluación del talud considerando la carga externa correspondiente a la edificación, ha establecido según análisis de estabilidad ASD y LRFD, que los parámetros resistentes corresponden a las condiciones actuales del lugar, manteniéndose en el **límite del equilibrio**.

Finalmente se recomienda efectuar estudios periódicos de parámetros resistentes y propiedades mecánicas del suelo sobre el cual está levantada la edificación. Considerando que la estabilidad futura del lugar, puede variar principalmente por la descomposición química de los residuos sólidos urbanos que se mezclan con el suelo del lugar.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ref. <https://www.lostiempos.com/actualidad/pais/20190502/deslizamiento-kantutani-es-tercero-mas-grave-declaran-desastre>,

ABC, A. B., 2008, Manuales Técnicos Volumen 4: Ensayos de Suelos y Material. (pág. S0103). APIA XXI Ingenieros y Arquitectos Consultores,

Vijayan, D. P., 2020, Effect of Solid waste based stabilizing material for strengtheing of Expansive Soil–A review. Environmental Technology & Innovation 20 (2020) 101108,

Dobrovolny, E., 1962, Geología del Valle de La Paz.: Departamento Nacional de Geología La Paz–Bolivia,

GAMLP., sin fecha, Normativa para estudios Geológicos–Geotécnicos de La Paz,

GAMLP – DEGIR Dirección Especial de Gestión Integral de Riesgos., 2011, Mapa de Riesgos de los Distritos Urbanos del Municipio de La Paz Memoria Explicativa, La Paz–Bolivia,

Krishna, R., Reddy, H. H., 2008, Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, Waste Management 29 (2009) 952–959, USA,

Krishna, R. Reddy, H. H., 2011, Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. Waste Management 31 (2011) 2272–2286, USA,

Leao de Lima, A., Thome Juca, J., Rodrigues de Brito, A., & Camargo de Melo, M. (2002). Estudios Comparativos de Diferentes Metodologías para Determinación de Humedades y Sólidos Volátiles Aplicados en Residuos Sólidos Urbanos. VI Simposio Italo Brasileiro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 11., Sao Pablo–Brasil,

Morilla Abad, I., sin fecha, Reconocimiento Visual de Suelos y Rocas. Cartillas Técnicas de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 13, España,

Muni Budhu., 2011, Soil Mechanics and Foundation. John Wiley & Sons, Inc. USA,

Shi–In Feng, K.–W. G.–X, 2016, Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, Waste Management, China,

Thomé Jucá, J., 2020, Investigación, Diseño y Control de Rellenos Sanitarios. Ciclo Geotecnia Brasil #3. Obtenido de: Investigación, Diseño y Control de Rellenos Sanitarios. <https://www.youtube.com/watch?v>

### Fe de autores:

(\*) Magíster – Ingeniero Civil,  
Docente Construcciones Civiles,  
Facultad de Tecnología – UMSA.

(\*\*) Ingeniero Civil.