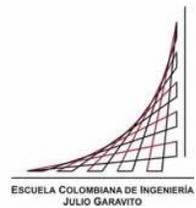


“Análisis de la Influencia de Factores Geotécnicos de Suelos en la Susceptibilidad a Deslizamientos”

Anexo A

“Casos de Deslizamientos Analizados”



Casos de Deslizamiento Analizados

1	Estudio de un caso sobre la causa del deslizamiento en Santa Clara, California, EE. UU.	1
2	Deslizamiento en Zhenxiong, Yunnan, suroeste de China.....	6
4.	Los deslizamientos de la cuenca baja del río Darro	18
5.	Métodos de monitoreo en los deslizamientos Montes Cárpatos, Polonia.	24
6.	Modelación numérica del efecto de la lluvia en el deslizamiento de Azazga, Argelia.	33
7.	Comportamiento de una pendiente coluvial ubicada en el sureste de Brasil.....	38
8.	Investigación del deslizamiento Fu Yung Shan Tsuen, Hong Kong.....	44
9.	Caracterización geotécnica y análisis numérico del deslizamiento de Sarak en India.	50
10.	Análisis de estabilidad del deslizamiento Portalet en los Pirineos.....	55
11.	Deslizamientos en las cuencas del noreste margen de la meseta tibetana.	60
12.	Evaluación de la estabilidad de un talud de alta pendiente en un deslizamiento en Turquía. 65	
13.	Estabilización del deslizamiento de Cortiana en el noreste de Italia.....	71
14.	Estudio del caso en un deslizamiento en el sur de Italia.	76
15.	Estudio de deslizamientos en temporada de lluvias con análisis numérico.	82
16.	Estudio de análisis de estabilidad en una zona de alta complejidad en los Alpes Italianos. 87	
17.	Modelación con elementos finitos para la evaluación de la estabilidad de taludes de roca y detritos. 92	
18.	Análisis de un deslizamiento de suelo residual en Rio de Janeiro, Brasil.....	98

Índice de Figuras Anexo “A”

Figura 1. Planta general del deslizamiento, caso 1.....	3
Figura 2. Corte principal, caso 1.	3
Figura 3. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 1.	4
Figura 4. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 1.	4
Figura 5. Análisis de elementos finitos, desplazamiento total (Phase 2) Caso 1.	5
Figura 6. Planta general del deslizamiento, caso 2. ().....	9
Figura 7. Corte principal, caso 2.	9
Figura 8. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 2.	10
Figura 9. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 2.	10

Figura 10. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento (Phase 2) Caso 2.	11
Figura 11. Planta general del deslizamiento, caso 3.....	14
Figura 12. Corte principal, caso 3.	15
Figura 13. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 3.	15
Figura 14. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 3.....	16
Figura 15. Análisis de elementos finitos, desplazamientos totales (Phase 2) Caso 3.....	16
Figura 16. Planta general del deslizamiento, caso 4.....	21
Figura 17. Corte principal, caso 4.	21
Figura 18. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE), Caso 4.	22
Figura 19. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2), Caso 4.....	22
Figura 20. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2), Caso 4.	22
Figura 21. Planta general del deslizamiento, caso 5.)	27
Figura 22. Corte “A”.....	27
Figura 23. Corte “D”.....	28
Figura 24. Corte “E”.....	28
Figura 25. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 5, corte “A”.....	28
Figura 26. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 5, corte “D”.....	29
Figura 27. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 5, corte “E”.....	29
Figura 28. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 5, corte “A”...	30
Figura 29. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 5, corte “D”...	30
Figura 30. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 5, corte “E”...	30
Figura 31. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 5, corte “A”.	31
Figura 32. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 5, corte “D”.	31
Figura 33. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 5, corte “E”.	31
Figura 34. Planta general del deslizamiento, caso 6.....	35
Figura 35. Cortes principales, caso 6.	36
Figura 36. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 6.	36
Figura 37. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 6.....	37
Figura 38. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 6.	37
Figura 39. Planta general del deslizamiento, caso 7.....	41
Figura 40. Cortes principales, caso 7.	41

Figura 41. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 7.	42
Figura 42. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 7.	42
Figura 43. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 7.	43
PLANTA DEL DESLIZAMIENTO	
Figura 44. Planta general del deslizamiento, caso 8.	47
Figura 45. Cortes principales, caso 8.	47
Figura 46. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 8.	48
Figura 47. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 8.	48
Figura 48. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 8.	49
Figura 49. Planta general del deslizamiento, caso 9.	52
Figura 50. Cortes principales, caso 9.	53
Figura 51. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 9.	53
Figura 52. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 9.	53
Figura 53. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento (Phase 2) Caso 9.	54
Figura 54. Planta general del deslizamiento,	57
Figura 55. Cortes principales, caso 10. La sección transversal P2 equivale al corte A-A' en la planta general (Ver Figura 61).	58
Figura 56. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 10. Corte A-A' en Figura 54 y sección P2 en la Figura 55.	58
Figura 57. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 10.	59
Figura 58. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 10.	59
Figura 59. Cortes principales, caso 11.	62
Figura 60. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 11.	63
Figura 61. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 11.	63
Figura 62. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 11.	64
Figura 63. Planta general del deslizamiento, caso 12.	68
Figura 64. Cortes principales, caso 12.	68
Figura 65. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 12.	69
Figura 66. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 12.	69
Figura 67. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento (Phase 2) Caso 12.	70
Figura 68. Planta general del deslizamiento, caso 13.	73
Figura 69. Cortes principales, caso 13.	74
Figura 70. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 13.	74
Figura 71. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 13.	75
Figura 72. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 13.	75

Figura 73. Planta general del deslizamiento, caso 14.....	79
Figura 74. Cortes principales, caso 14.	79
Figura 75. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 14. Fuente Propia	80
Figura 76. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 14.	80
Figura 77. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 14.	81
Figura 78. Planta general del deslizamiento, caso 15.....	84
Figura 79. Fotografía del deslizamiento (a) y corte principal (b), caso 15.	84
Figura 80. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 15.	85
Figura 81. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 15.	85
Figura 82. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 15.	86
Figura 83. Planta general del deslizamiento, caso 16.....	89
Figura 84. Cortes principales, caso 16.	90
Figura 85. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 16.	90
Figura 86. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 16.	91
Figura 87. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 16.	91
Figura 88. Planta general del deslizamiento, caso 17.....	95
Figura 89. Corte principal Caso 17.	95
Figura 90. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 17.	96
Figura 91. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 17.	96
Figura 92. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 17.	97
Figura 93. Planta general del deslizamiento, caso 18.....	100
Figura 94. Cortes principales, caso 18.	101
Figura 95. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 18.	101
Figura 96. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 18.	102
Figura 97: Análisis de elementos finitos, desplazamiento total (Phase 2) Caso 18..	102

Índice de Tablas Anexo “A”

Tabla 1. Parámetros geotécnicos caso 1.....	2
Tabla 2. Resultados caso 1	6
Tabla 3. Distribución granulométrica y humedad para el coluvión.	8
Tabla 4. Parámetros geotécnicos caso 2.....	8
Tabla 5. Resultados caso 2.....	12

Tabla 6. Granulometría, límites de Atterberg y humedad para el suelo residual de Pune	14
Tabla 7. Parámetros geotécnicos caso 3.....	14
Tabla 33. Resultados caso 3	18
Tabla 9. Clasificación, límites de Atterberg y humedad de la arcilla.....	20
Tabla 10. Parámetros geotécnicos caso 4.....	20
Tabla 11. Resultados caso 4.	23
Tabla 12. Granulometría, límites de Atterberg y humedad natural del coluvión.	26
Tabla 13. Parámetros geotécnicos caso 5.....	26
Tabla 14. Resultados caso 5.	33
Tabla 15. Parámetros geotécnicos caso 6.....	35
Tabla 16. Resultados caso 6.....	38
Tabla 17. Distribución granulométrica y humedad natural	40
Tabla 18. Parámetros geotécnicos caso 7.....	40
Tabla 44. Resultados caso 7.	44
Tabla 20. Granulometría y límites de Atterberg del coluvión.....	46
Tabla 21. Parámetros geotécnicos caso 8.....	46
Tabla 22. Resultados caso 8.	50
Tabla 23. Distribución granulométrica, límites de Atterberg y humedad natural, para la arena.....	52
Tabla 24. Parámetros geotécnicos caso 9.....	52
Tabla 50. Resultados caso 9.	55
Tabla 26. Parámetros geotécnicos caso 10.....	57
Tabla 52. Resultados caso 10.....	60
Tabla 28. Parámetros geotécnicos caso 11.....	62
Tabla 29. Resultados caso 11.	65
Tabla 30. Resultados de los ensayos de clasificación de la capa de Arena arcillosa a grava arcillosa	67
Tabla 31. Parámetros geotécnicos caso 12.....	67
Tabla 32. Resultados caso 12.....	71
Tabla 33. Parámetros geotécnicos caso 13.....	73
Tabla 34. Resultados caso 13.	76
Tabla 35. Parámetros geotécnicos caso 14.....	78
Tabla 36. Resultados caso 14.	82
Tabla 37. Parámetros geotécnicos caso 15.....	83
Tabla 38. Resultados caso 15.....	87

Tabla 39. Parámetros geotécnicos caso 16. (Barla et al., 2013).....	89
Tabla 40. Resultados caso 16. (Barla et al., 2013)	92
Tabla 41. Distribución granulométrica y humedad natural suelo residual (Dolomita altamente meteorizada).....	94
Tabla 42. Parámetros geotécnicos caso 17.....	94
Tabla 43. Resultados caso 17.	98
Tabla 44. Distribución granulométrica y humedad natural suelo residual arenoso	100
Tabla 45. Parámetros geotécnicos caso 18.....	100
Tabla 46. Resultados caso 18.	103

1 Estudio de un caso sobre la causa del deslizamiento en Santa Clara, California, EE. UU.

Caso No. 1	
TÍTULO ORIGINAL:	A CASE HISTORY STUDY ON CAUSATION OF THE LANDSLIDE IN SANTA CLARA, CALIFORNIA, USA.
UBICACIÓN / AÑO:	Santa Clara, California, Estados Unidos / 2011.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	<p>En un estudio realizado por Yun Liao (2015), se evalúa un deslizamiento de tierra sobre un talud de aproximadamente 18.3 m de altura, 33.5 m de ancho y aproximadamente 51.8 m de largo. El movimiento de tierra se produjo al sur de una edificación y se trasladó afectando la carretera más cercana localizada en la cresta del talud (Road A) y la vía de acceso al predio (Pavement Driveway), como se muestra en la Figura 1. Para la construcción de la edificación y las demás estructuras asociadas, ubicadas en la pata del talud, las excavaciones requeridas incluyeron cortes al terreno natural con una altura de hasta 3.7 m y pendiente de 45°. El autor de la investigación hizo uso de los resultados de una exploración geotecnia realizada por un consultor externo después del evento. Se realizaron dos perforaciones, arriba y abajo del deslizamiento, en las cuales se encontró arenisca y material térreo altamente fracturado. El nivel freático fue identificado entre 3.7 m y 4 m. En ambas zonas se identificó una capa de 15 cm de material arcilloso de alta plasticidad.</p>
GEOLOGÍA	<p>Geológicamente, el área de estudio pertenece a la unidad Mélange del complejo Franciscano. La unidad está compuesta por una matriz de lutita arenosa a arcillosa altamente cizallada con diferentes tipos y tamaños de fragmentos de roca. Se incluyen metasedimentos (areniscas y lutitas), metavolcánicos, chert y calizas. Los tamaños varían desde varios pies hasta grandes bloques.</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento compuesto rotacional y traslacional.
POSIBLES CAUSAS	Diferentes cortes y rellenos hechos para construir un tanque de agua y otras estructuras en la pata del talud, con pendientes pronunciadas, que disminuyeron las fuerzas de resistencia.

Caso No. 1	
	Infiltración de agua desde las grietas de la vía. Existencia de una capa delgada intermedia de arcilla de alta plasticidad.
TIPO DE MATERIAL:	Coluvial de comportamiento cohesivo.

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

Los parámetros de resistencia y el peso unitario del complejo Franciscano, fueron asignados por Yun Liao (2015) de acuerdo con lo presentado en el Reporte de Amenaza Sísmica para la zona de estudio del Servicio Geológico de California, los cuales se resumen en la Tabla 1.

En cuanto a los parámetros de la capa delgada de arcilla, que Yun Liao (2015) y los consultores externos consideran es uno de los factores condicionantes, sus parámetros de resistencia se definieron según los valores asignados a arcillas de alta plasticidad en diferentes investigaciones de la misma zona; BAGG Engineers (2010) y BAGG Engineers (2016) entre otros, definen un ángulo de fricción de 11°, cohesión de 18 kPa y peso unitario de 15 kN/m³, por su parte, Nelson (1992) en su análisis de resistencia al corte para las formaciones de Santa Clara, obtuvo un ángulo de fricción residual medio de 12°. De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros de resistencia asignados, en cuanto a las constantes elásticas, éstas fueron definidas teniendo en cuenta lo estipulado en el 1.1.1.3, para suelo arcilloso y para el coluvión (considerando la matriz arenosa).

Tabla 1. Parámetros geotécnicos caso 1.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
KJfm	Granular	35	23,9	20,4	40	0.25
Capa de arcilla	Cohesivo	11	18	15	10	0.4

Fuente: (Yun Liao, 2015)

Caso No. 1

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

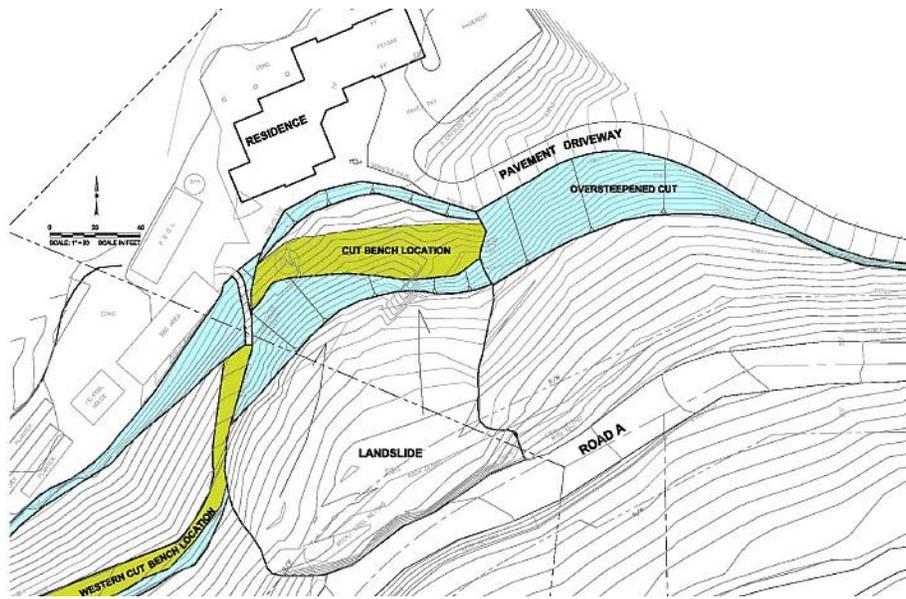


Figura 2. Planta general del deslizamiento, caso 1.

(Yun Liao, 2015)

PERFIL

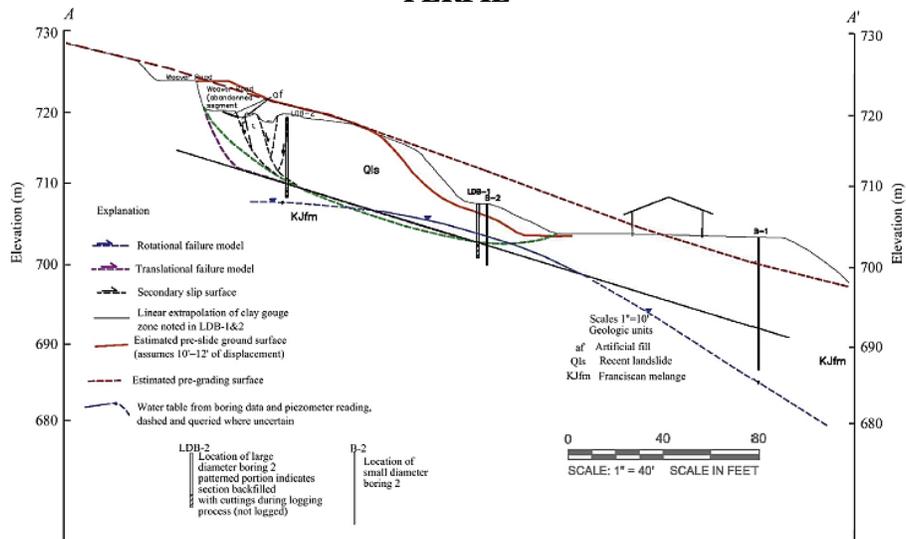


Figura 3. Corte principal, caso 1. (Yun Liao, 2015)

Caso No. 1

MODELADO

De la Figura 4 a la Figura 6 se presentan los análisis estáticos realizados, en los cuales se indican los parámetros de resistencia utilizados.

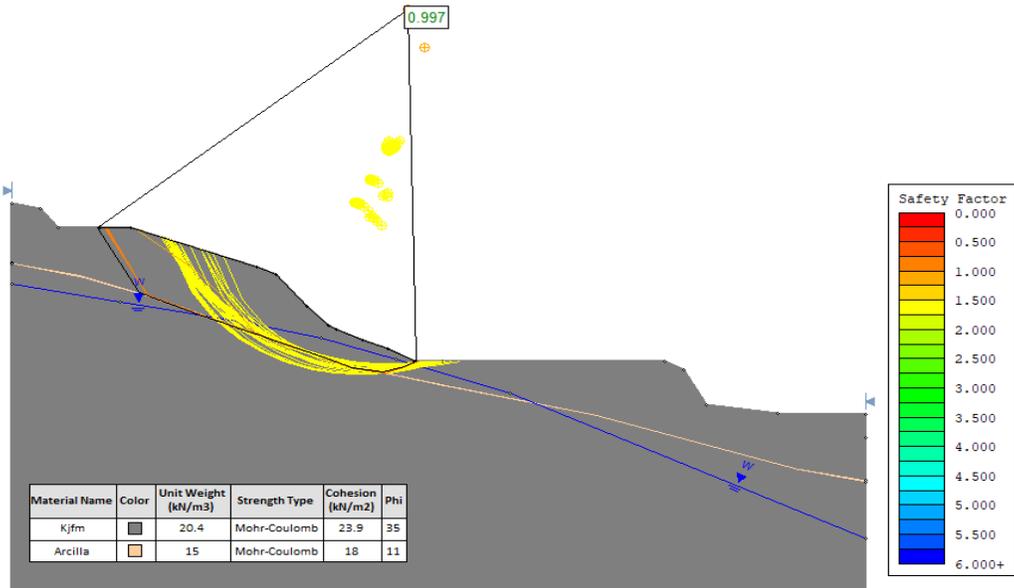


Figura 4. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 1.

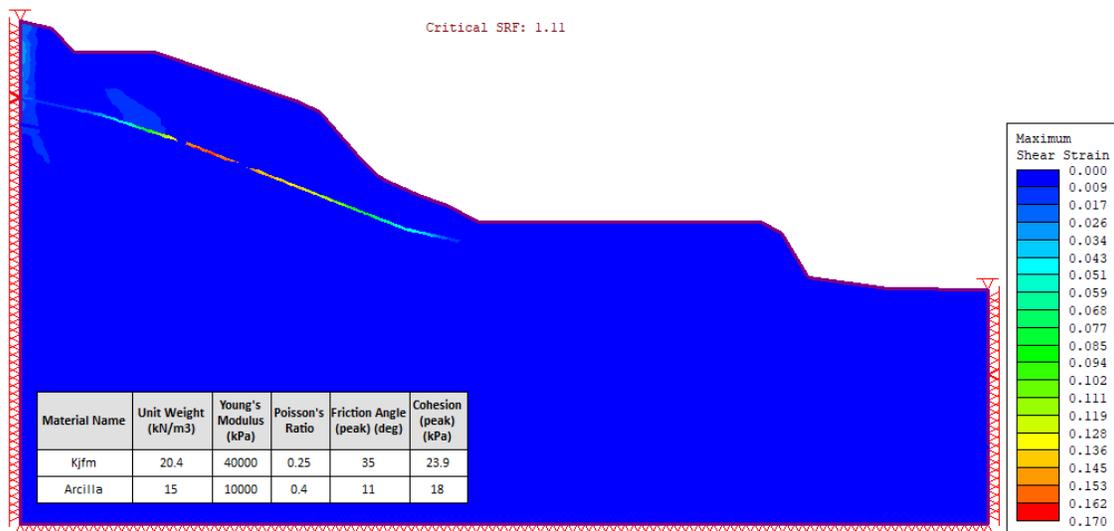


Figura 5. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 1.

Caso No. 1

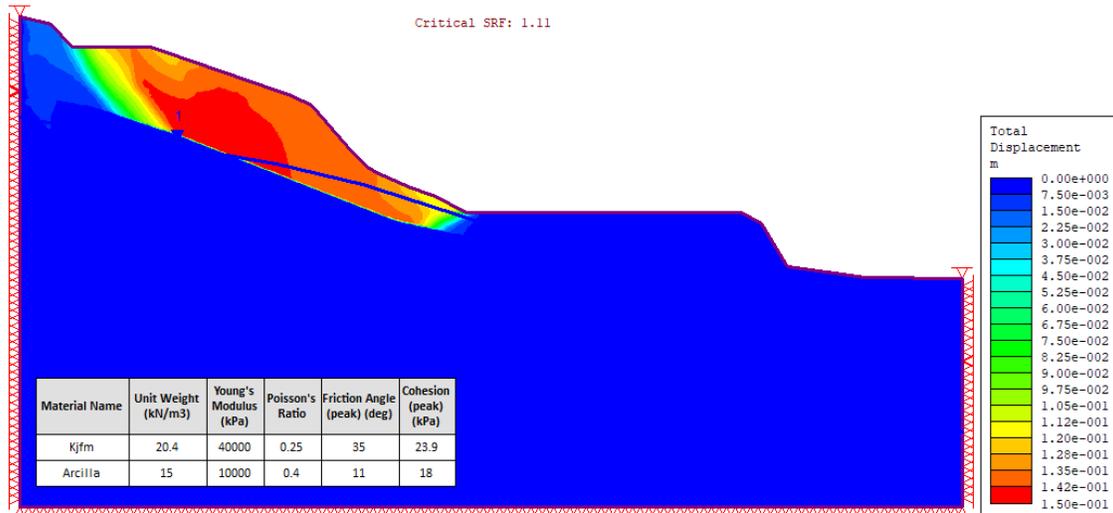


Figura 6. Análisis de elementos finitos, desplazamiento total (Phase 2) Caso 1.

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El análisis de estabilidad se realizó con el método de equilibrio límite de Bishop y Janbu. La superficie de falla asociada al menor FS (0.99) se ubica en la parte media alta del talud, y compromete en gran parte la capa cohesiva, evidenciando además afectación a la carretera.

Del mismo modo en que el análisis de estabilidad refleja que las superficies de falla potenciales involucran a la capa de material cohesivo, el análisis de elementos finitos evidencia un máximo esfuerzo cortante a lo largo de este estrato arcilloso, el cual ha sido identificado y localizado de acuerdo con los resultados de las perforaciones. El factor de reducción de resistencia tiene un valor de 1.11, superior al establecido en el análisis de estabilidad, pero que implica un estado cercano al límite en la resistencia del material, lo que muestra la congruencia de los métodos de análisis. Adicionalmente, la Figura 6 muestra los desplazamientos de mayor magnitud en la parte superior del talud, tal como se observó in situ. Por lo tanto, se concluye que la modelación del talud por ambos métodos de análisis, describe la situación real.

Considerando lo anterior, la resistencia de los materiales, el efecto de una capa delgada débil y la infiltración de agua desde la parte alta del talud, constituyen los principales factores condicionantes y detonantes que producen el deslizamiento.

Es importante resaltar que factores como estratos delgados de resistencia baja, no pueden ser identificados durante el análisis de susceptibilidad y amenaza a escala regional, pese a su importancia en el condicionamiento del deslizamiento.

Caso No. 1

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 2. Resultados caso 1

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength Reduction Factor (SRF)
Coluvial	Cohesivo	11	18	15	30%	0.99	1.11

Fuente: Yun Liao (2015) y propia.

2 Deslizamiento en Zhenxiong, Yunnan, suroeste de China

Caso No. 2

TÍTULO ORIGINAL:	A LARGE-SCALE COLLUVIAL LANDSLIDE CAUSED BY MULTIPLE FACTORS: MECHANISM ANALYSIS AND PHASED STABILIZATION
UBICACIÓN / AÑO:	Zhenxiong, Yunnan, suroeste de China./2013-2015.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	<p>El sitio del deslizamiento se ubica aguas abajo de la presa Xiaowan en las inmediaciones del Río Lantsang, es un sector bastante empinado, con una pendiente que va desde los 32° hasta los 35°, razón por la cual se presentó un movimiento de tierras en sentido Este – Oeste.</p> <p>La diferencia de nivel entre la parte más alta y la pata del talud es de aproximadamente 500 m, tiene dimensiones de 750 m de largo, un ancho que varía entre 80 m y 200 m y un espesor entre 45 m y 70 m. El movimiento ocurrió en un coluvión, generando el deslizamiento de más de 5.000.000 m³. Es común la presencia de depósitos coluviales en el</p>

Caso No. 2	
	<p>área, estos alcanzan profundidades de hasta 100 m. El nivel freático identificado es muy variable, entre 8 cm y 5,28 m. (Song & Cui, 2015)</p>
GEOLOGÍA	<p>En el caso de estudio se encuentran principalmente unidades de rocas sedimentarias y metamórficas. El deslizamiento se presenta en la que se conoce localmente como la formación de Lantsang, la cual consiste en una roca metamórfica, compuesta por gneis granítico y rico en plagioclasa, que contiene un esquisto con un grosor pequeño. El Gneis subyace al coluvión, este tipo de lecho de roca parece ser duro, pero superficialmente tiende a ser débil debido al contacto con el coluvión. La zona de contacto con el lecho rocoso está compuesta por grava limosa, arcilla gravosa y limo gravoso, de espesores entre 0.15 m y 4.5 m. (Song, 2015, pp 321;Mao YP, 2004).</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	<p>Deslizamiento complejo</p>
POSIBLES CAUSAS	<p>Cortes inapropiados, precipitaciones prolongadas y procesos de voladura.</p>
TIPO DE SUELO:	<p>Coluvión de comportamiento cohesivo.</p>
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Como parte de la investigación se realizaron perforaciones, galerías, túneles de drenaje y se instalaron inclinómetros. De la galería y el túnel de drenaje fueron extraídas cuatro muestras inalteradas en las que se hicieron ensayos de peso unitario, humedad natural, granulometría y compresión triaxial.</p> <p>El material coluvial está compuesto por un 5% de cantos (diámetro de 2m a 4m), del 10% al 20% de guijarros (diámetro de 0.2 m a 1 m) y del 30% al 70% de gravas (diámetro entre 5cm y 15cm) en matriz limo arenosa, luego el comportamiento del depósito está fuertemente influenciado por la matriz limosa. En la Tabla 3 se presentan los valores medios calculados a partir de los</p>	

Caso No. 2

resultados reportados por Song & Cui (2016) para la grava en matriz limo arenosa que conforma el coluvión y su humedad natural.

El perfil de la zona de análisis se puede dividir en tres estratos: coluvial, coluvial profundo y roca. Los parámetros geotécnicos definidos para cada uno de estos estratos fueron adoptados por el autor en función de los resultados de ensayos de laboratorio y referencias literarias, así como la experiencia y el juicio en sitio de los investigadores. En la Tabla 4 se condensan los valores definidos por Song & Cui (2016) y las constantes de deformación definidas de acuerdo con el numeral 1.1.1.3. Se consideró el peso saturado de los materiales de acuerdo con la posición del nivel freático.

Tabla 3. Distribución granulométrica y humedad para el coluvión.

Granulometría			Humedad natural (%)
20-60 (mm)	5-20 (mm)	<5 (mm)	
34 % Grava gruesa	23% Grava fina	43 % Arena a arcilla	20.3

Fuente: (Huifang Song, 2015)

Tabla 4. Parámetros geotécnicos caso 2.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Coluvión	Granular	30	40	20.6 23.5*	150	0.35
Coluvión profundo (Roca-coluvión)	Cohesivo	22	30	18.5 20.6*	150	0.35
Roca sedimentaria y metamórfica	Roca	35	200	26.0 26.7*	60000	0.22

*Peso unitario saturado

Fuente: (Huifang Song, 2015)

Caso No. 2

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

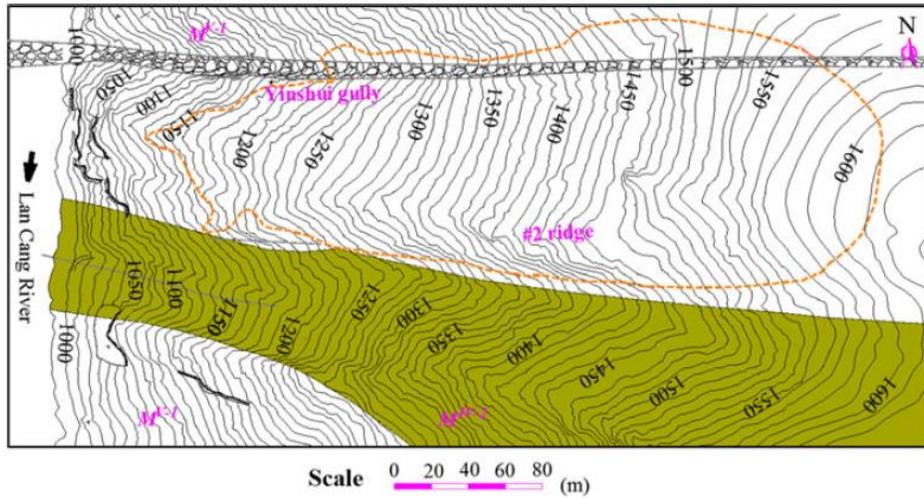


Figura 7. Planta general del deslizamiento, caso 2. (Song & Cui, 2015)

PERFIL

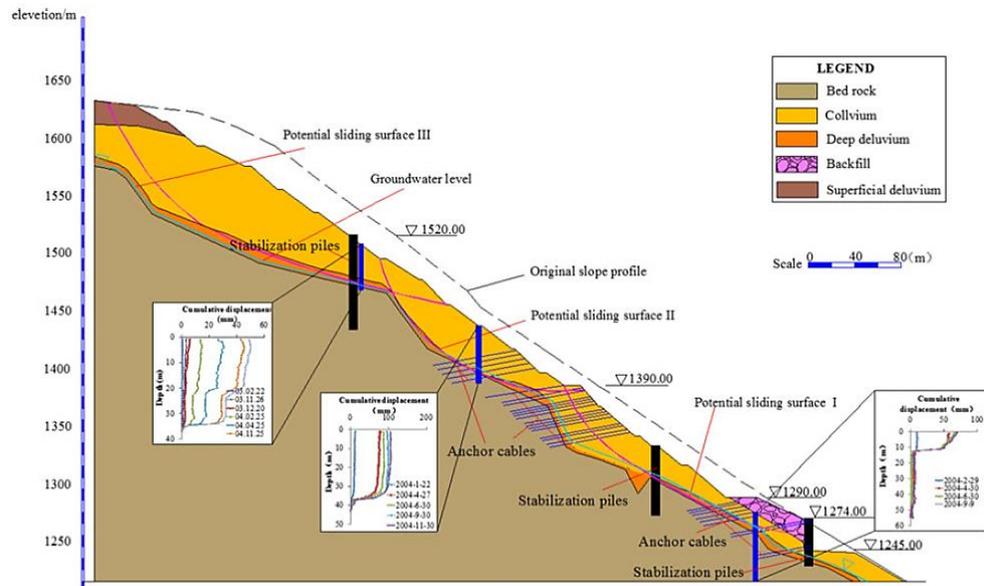


Figura 8. Corte principal, caso 2. (Song & Cui, 2015)

Caso No. 2

MODELADO

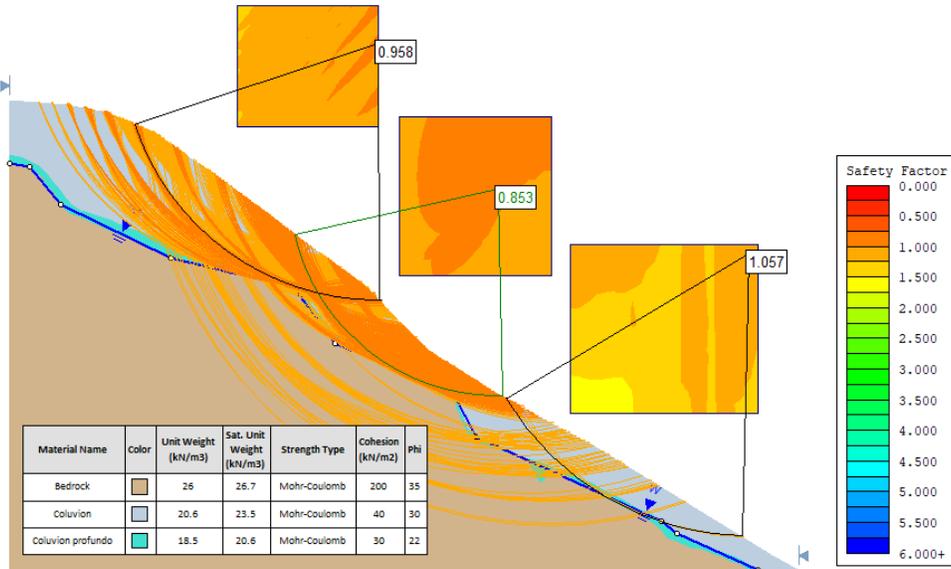


Figura 9. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 2.

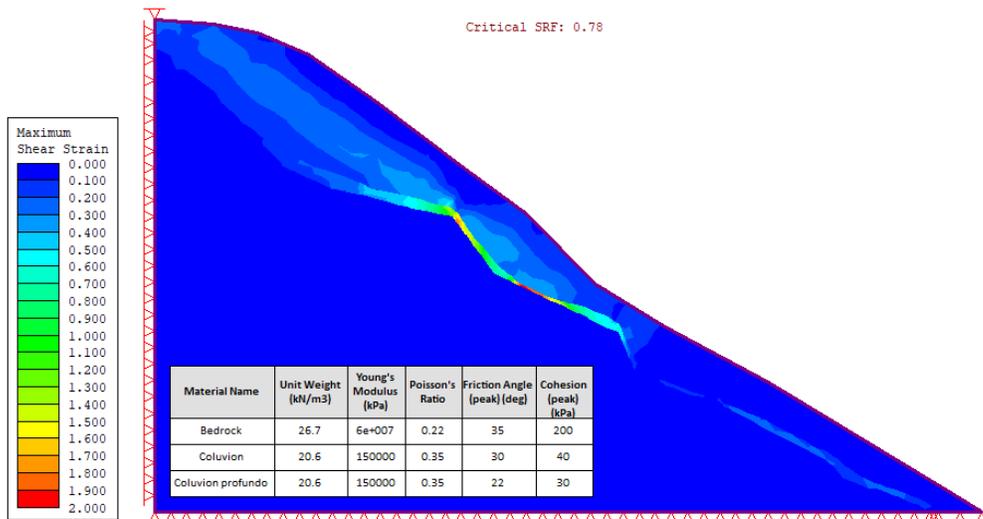


Figura 10. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 2.

Caso No. 2

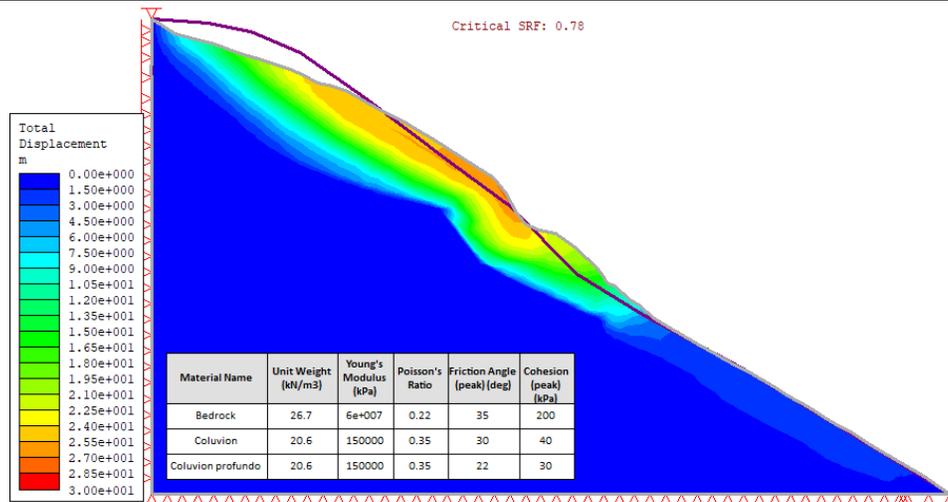


Figura 11. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento (Phase 2) Caso 2.

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El análisis de estabilidad ejecutado se realizó con el método de equilibrio límite de Bishop, así como con el método de estabilidad de Janbu.

En este caso se presenta una inestabilidad en el estrato superior, conformado por el coluvión y el coluvión profundo, la superficie de falla más probable se genera en la zona media del talud, cerca al contacto con la roca madre. Por esta razón se establecen diferentes centros de falla que analizan deslizamientos en el contacto entre el coluvión profundo y la roca madre.

El análisis indicó un factor de seguridad mínimo de 0.85 encontrado por el método de Janbu, mostrando la evidente inestabilidad y falla del talud. Teniendo en cuenta los análisis de estabilidad y resistencia realizados, junto con los estudios ejecutados por Song & Cui (2015); es posible decir que el deslizamiento completo incluía tres masas de deslizamiento potenciales, y el movimiento de la sección superior se desencadenó por la inestabilidad de la sección media, generando un efecto que progresivamente creó más deslizamientos, donde la falla se presenta en el horizonte de la roca, la cual se encuentra saturada.

El factor de reducción encontrado con el método de los elementos finitos tiene un valor de 0.78, comparable con el factor de seguridad obtenido en SLIDE, lo que indica la congruencia de los resultados, y ratifica numéricamente que el sistema se encuentra en falla. Los mayores esfuerzos se presentan en el contacto de la roca con el coluvión profundo, adicionalmente, se presentan

Caso No. 2							
desplazamientos de hasta 3.0 m, lo que describe la situación real del evento.							
Por otro lado, se hace notar que el corte inadecuado y movimiento de tierras realizados en la zona, contribuyen con la ocurrencia del deslizamiento.							
TABLA DE RESULTADOS							
Tabla 5. Resultados caso 2							
Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Coluvial profundo	Cohesivo	22	30	18.5	32%	0.85	0.78
Fuente: Song & Cui (2015) y propia.							

3. Análisis de estabilidad para el deslizamiento en el distrito de Pune, India.

Caso No. 3	
TÍTULO ORIGINAL:	INVESTIGATIONS AND STABILITY ANALYSES OF MALIN VILLAGE LANDSLIDE OF PUNE DISTRICT, MAHARASHTRA, INDIA
UBICACIÓN / AÑO:	Malingaon, distrito de Pune, Maharashtra, India/2014
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El evento se presentó en una zona de producción agrícola, ocasionando la muerte de 153 personas y la afectación de 55 viviendas. La altura del deslizamiento es de 180 m y el ancho varía entre 40 m y 132 m. La saturación del suelo en la cresta del talud debido a procesos de drenaje incorrectos detonó el movimiento en la parte superior y media del talud, mediante una falla planar, acumulando el material en la parte baja de la ladera.

Caso No. 3	
GEOLOGÍA	<p>El perfil estratigráfico de la zona incluye una capa superficial de materiales de origen aluvial de aproximadamente 5 m de espesor, la cual se ubica sobre un depósito laterítico del cuaternario de más de 20 m de espesor, las formaciones más profundas están compuestas por rocas basálticas. (GSI, 1993)</p> <p>El área afectada contiene suelos residuales producto de la meteorización de basalto, el cual se presenta con textura masiva y vesicular (principalmente en la corona), con alto contenido de sílice, calcita y zeolita.</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento traslacional.
POSIBLES CAUSAS	Fuertes lluvias durante 3 días. Drenaje inadecuado en la ladera. Deforestación y cambio de uso del suelo.
TIPO DE SUELO	Suelo residual.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Una investigación de campo fue llevada a cabo para la caracterización del terreno en la zona del movimiento. Según Singh et al. (2016) se obtuvieron muestras inalteradas en tres secciones del talud (zona superior, media e inferior), para el suelo y la roca, en las cuales se ejecutaron ensayos de laboratorio para la clasificación de los materiales y la definición de parámetros de resistencia y deformación. Del análisis de resultados de laboratorio se asignaron las propiedades geotécnicas para cada material del perfil, como se muestra en la Tabla 7.</p> <p>De acuerdo con Singh et al. (2016), el suelo residual se clasifica como grava, sin embargo su comportamiento en la falla es cohesivo, por lo que se seleccionan los límites de consistencia definidos por Shah, Sathe, Bhagawati, & Mohite (2019) para el mismo material para la capa de suelo residual clasificada como arcilla arenosa a arcilla limosa (del mismo deslizamiento), en la Tabla 6 se resumen los resultados.</p>	

Caso No. 3

Tabla 6. Granulometría, límites de Atterberg y humedad para el suelo residual de Pune

Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Humedad natural (%)
50	30	20	23.12

Fuente: (Shah et al., 2019; Singh et al., 2016)

Tabla 7. Parámetros geotécnicos caso 3

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Suelo residual	Cohesivo	19	51	18.5	1.25	0.35
Basalto masivo	Roca	39.4	910.5	28.4	9.22	0.24
Basalto vesicular	Roca	38	810.1	25.5	9.22	0.24

Fuente: (Shah et al., 2019; Singh et al., 2016)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO



Figura 12. Planta general del deslizamiento, caso 3. (Singh et al., 2016)

Caso No. 3

PERFIL

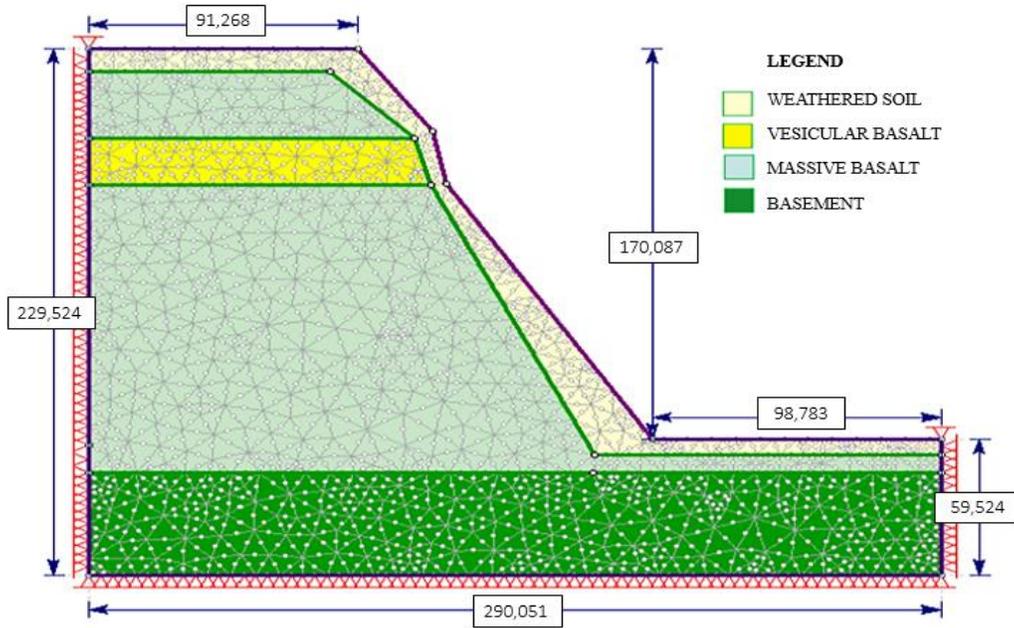


Figura 13. Corte principal, caso 3. (Singh et al., 2016)

MODELADO

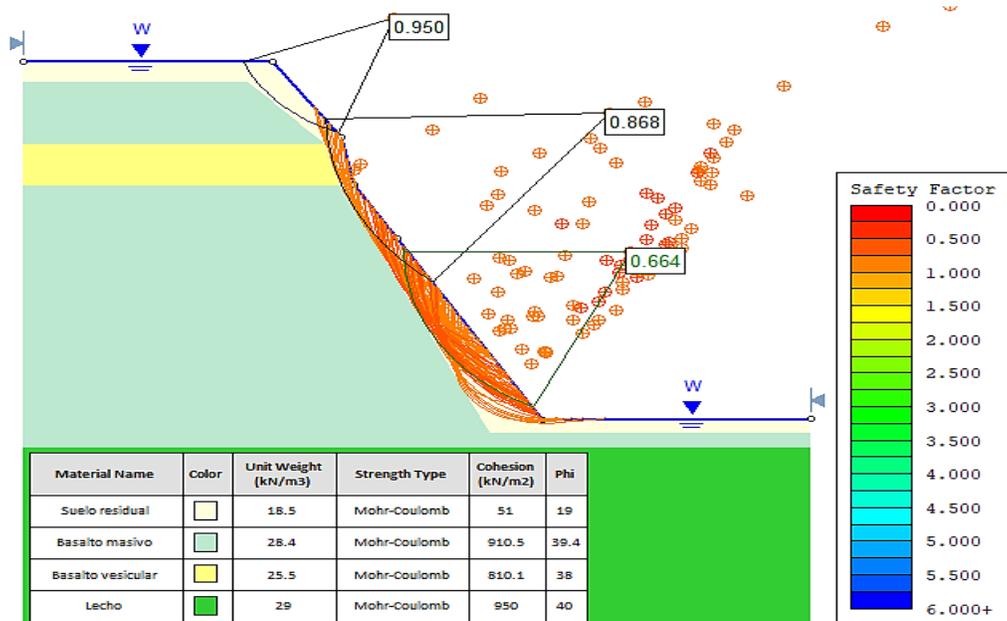


Figura 14. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 3.

Caso No. 3

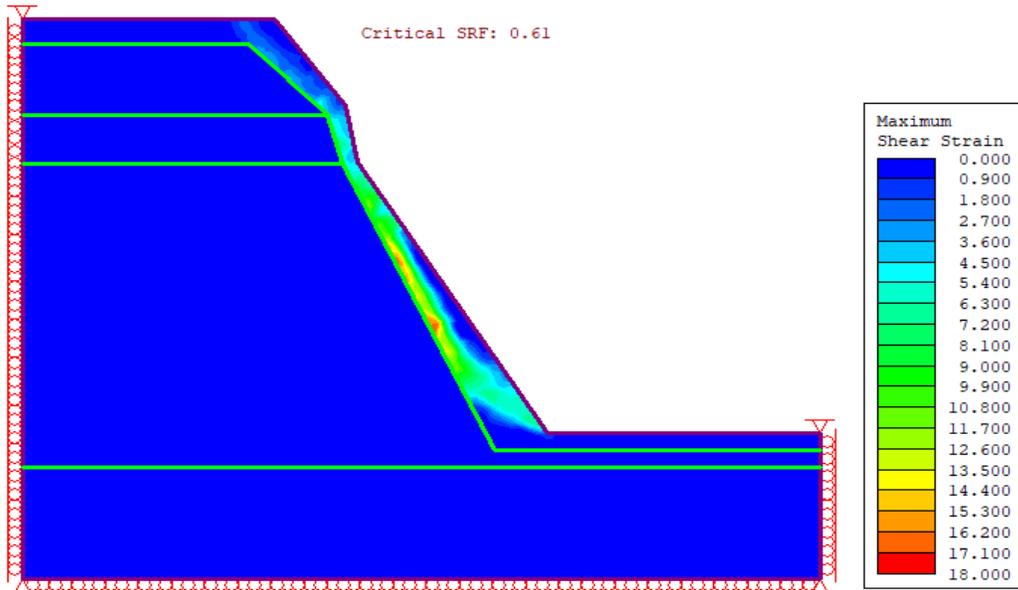


Figura 15. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 3.

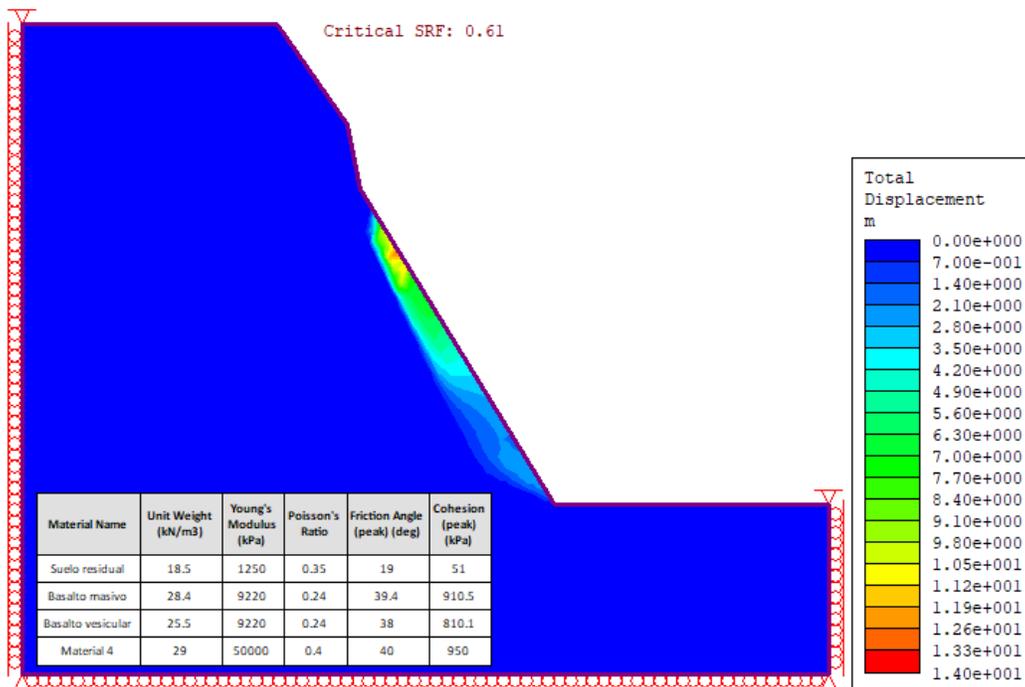


Figura 16. Análisis de elementos finitos, desplazamientos totales (Phase 2) Caso 3.

Caso No. 3

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El Factor de seguridad mínimo se encontró con el método de Bishop para una superficie ubicada en el sector central de la ladera y un valor de 0.66. Pese a la localización de la superficie de falla más probable, se evidencia la inestabilidad a lo largo del estrato de suelo, siendo la zona de contacto con la roca un factor altamente influyente.

Es importante notar que el nivel freático se encuentra a nivel de terreno, debido a la lluvia prolongada y la estructura en la zona superior de la ladera que permitió la fácil infiltración del agua y la saturación del estrato residual, sin embargo, al considerar el talud en condición seca, el FS incrementa a 0.7, lo que indica que la falla no depende significativamente de la posición del nivel freático.

De los análisis de elementos finitos se puede inferir que la distribución de esfuerzos cortantes máximos se presenta en el estrato de suelo, esencialmente en el contacto con la roca. El factor de reducción calculado, tiene un valor de 0.61, muy similar al factor de seguridad encontrado por el método de equilibrio límite, la similitud en los factores indica el mismo comportamiento frente a los dos diferentes análisis, los resultados dejan ver que justo en donde se encontraron las superficies de falla asociadas a los menores factores de seguridad, la resistencia alcanza su estado crítico, ambos resultados reflejan la naturaleza del evento, de acuerdo con lo observado en campo.

Se considera que la pendiente pronunciada y el espesor de la capa de suelo residual son los principales detonantes del evento; este segundo factor de alta influencia, solo es reconocible mediante la exploración geotécnica realizada en los estudios detallados, en los análisis a escala regional el espesor de suelo residual es determinado indirectamente o supuesto, por lo que existe una alta probabilidad de pasar por alto factores detonantes que determinan el grado de susceptibilidad u obtener resultados equívocos.

Caso No. 3

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 8. Resultados caso 3

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	19	51	18.5	45°	0.66	0.61

Fuente: Singh et al. (2016) y propia.

4. Los deslizamientos de la cuenca baja del río Darro

CASO 4	
TÍTULO ORIGINAL:	LOS DESLIZAMIENTOS DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO DARRO (GRANADA, ESPAÑA)
UBICACIÓN / AÑO:	Rio Darro, Granada, España. 2010 - 2015
DESCRIPCIÓN DEL CASO	Se describe un movimiento complejo, compuesto por deslizamiento traslacional, rotacional y flujo de tierra, que afecta a una superficie de 50.000 m ² . Este deslizamiento se originó en el año 2010 durante una temporada de lluvias en la zona, las cuales generaron un flujo de tierra en la parte baja del talud que cerró parcialmente el curso del Rio Darro. Como consecuencia, se presentaron fallas regresivas que afectaron la parte media-alta del talud y generaron un deslizamiento de gran magnitud. Se evidenció rotación en ambos flancos con respecto a la superficie del terreno y grietas de diferentes magnitudes a lo largo del deslizamiento, el movimiento de grandes bloques

CASO 4	
	<p>describió una superficie de falla curva cerca de la superficie y plana en profundidad (Garrido, 2012).</p> <p>Hasta la fecha de elaboración de la investigación el deslizamiento se encontraba activo, ejecutándose obras de estabilización que redujeran el riesgo de afectación sobre el Canal de los Franceses. (Borda, 2015)</p>
GEOLOGÍA	<p>La zona presenta Formaciones de rocas metamórficas y sedimentarias carbonatadas del Neogeno y Cuaternario, correspondientes a la Cuenca de Granada. En su parte inferior presenta rocas metamórficas e intercalaciones de rocas sedimentarias carbonatadas.</p> <p>El deslizamiento se ubica en la formación limosa Cenes-Jun que contiene además conglomerados grises y areniscas muy poco a nada cementadas. Estos materiales fueron depositados de forma aluvial sobre una base erosionada de gravas, arena y arcilla (García, López, Rivas, Galdeano, & Vera, 1980). En general los materiales de la zona se consideran de baja permeabilidad, que en un periodo prolongado de lluvias pueden llegar a saturarse. (Roldán, 2012)</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento complejo, con zonas de rotación, translación y flujo, con mecanismo progresivo.
POSIBLES CAUSAS	Precipitaciones prolongadas.
TIPO DE SUELO:	Suelo residual cohesivo.

CASO 4

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

Debido a que el deslizamiento es un movimiento activo desde el 2010, diferentes investigaciones han medido las propiedades geotécnicas requeridas para el análisis de estabilidad y sus acciones de mitigación, entre los que se encuentran Ingenieros Betancourt (2009) y Garrido (2012).

Borda (2015) analizó y compiló los resultados que se muestran en la Tabla 9 y la Tabla 10, referentes a las propiedades índice y geomecánicas. Las propiedades elásticas de los tres materiales se definieron de acuerdo con el numeral 1.1.1.3.

Tabla 9. Clasificación, límites de Atterberg y humedad de la arcilla

Clasificación USCS	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Humedad natural (%)
CL	32	19	13	12.9

Fuente: (Garrido & Delgado, 2013)

Tabla 10. Parámetros geotécnicos caso 4.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Formación Cenes- Jun Limos	Cohesivo	22	14,5	18,9	11	0.35
Formación Cenes- Jun Arcillas	Cohesivo	22	15,1	19	9	0.4
Conglomerado	Roca	31	9,5	20	45	0.2

Fuente: (Ferreira et al., 2015)

CASO 4

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

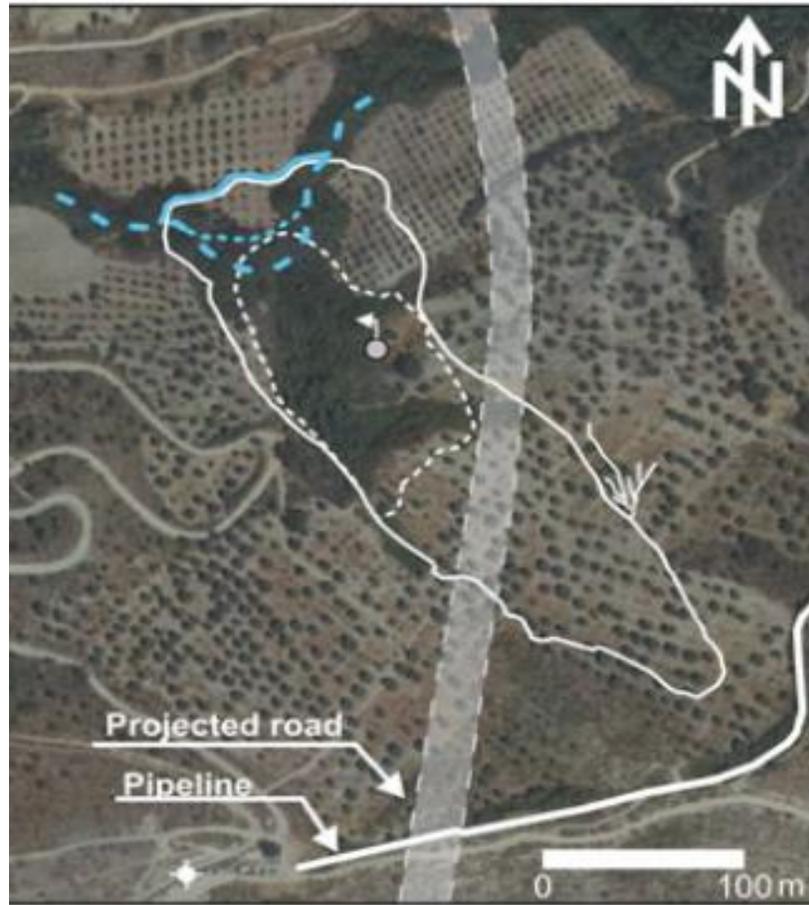


Figura 17. Planta general del deslizamiento, caso 4 (Garrido, 2012).

PERFIL

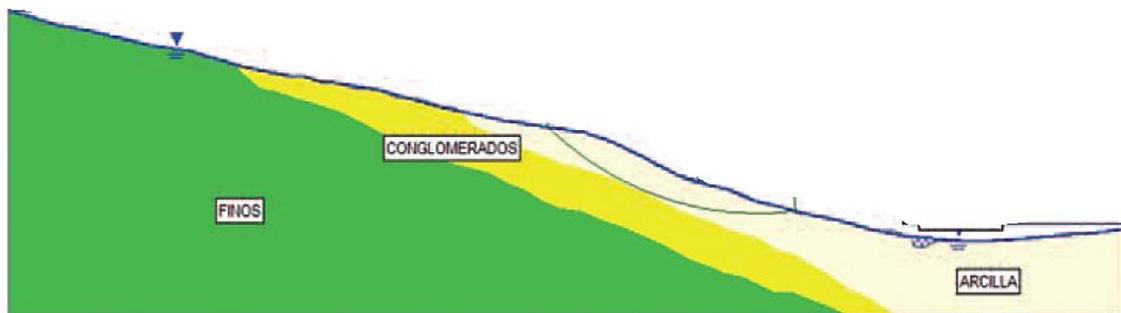


Figura 18. Corte principal, caso 4. (Borda, 2015)

CASO 4

MODELADO

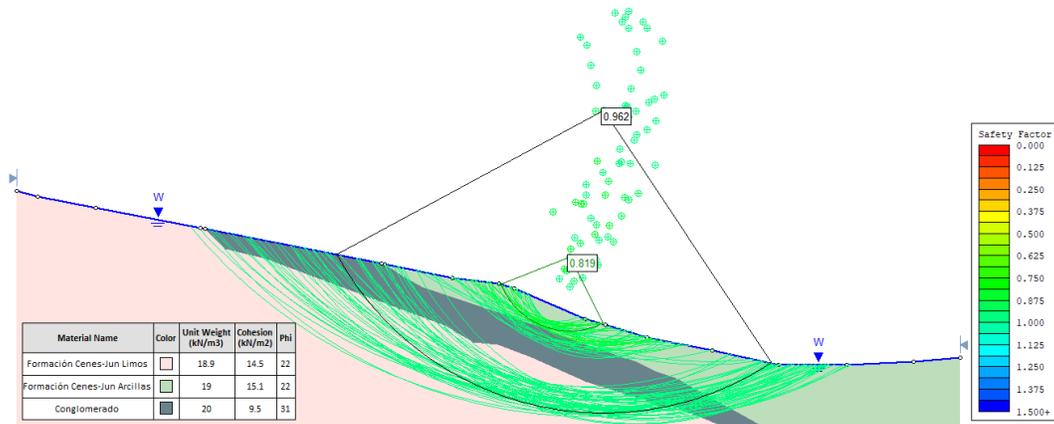


Figura 19. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE), Caso 4.

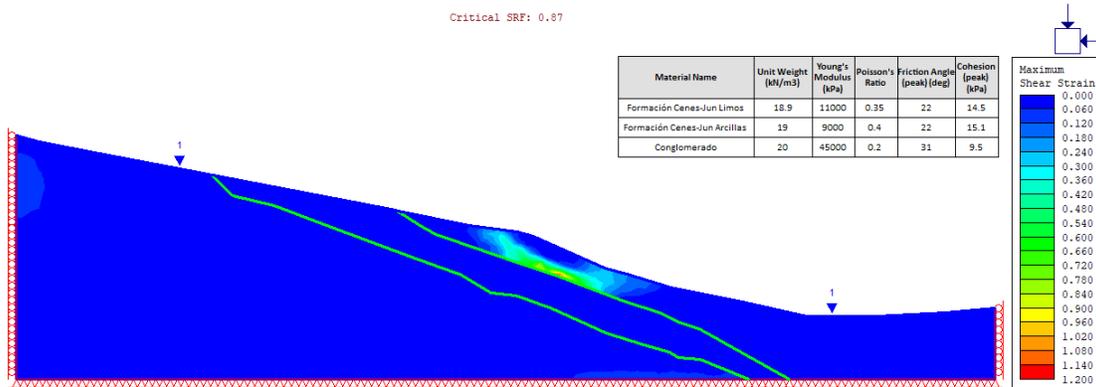


Figura 20. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2), Caso 4.

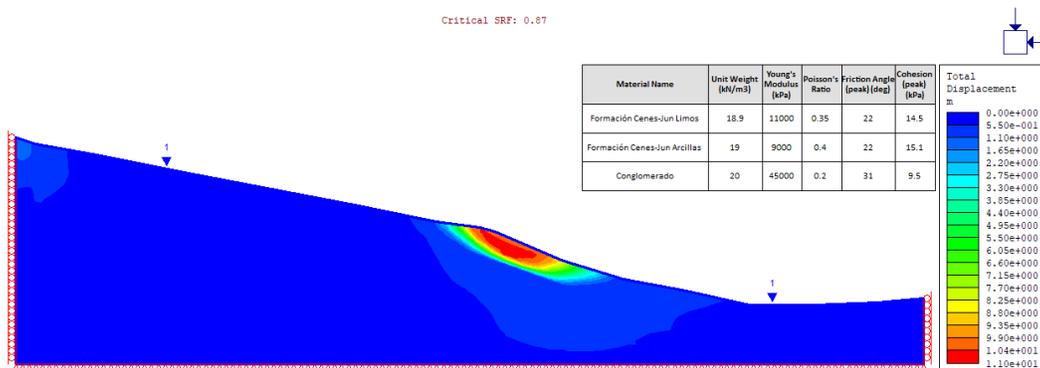


Figura 21. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2), Caso 4.

CASO 4

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El análisis de estabilidad fue ejecutado por los métodos de equilibrio límite de Bishop y Janbu. El menor factor de seguridad fue calculado con el método de Janbu y tiene un valor equivalente a 0.82, como se muestra en la Figura 19, cabe resaltar que el resultado obtenido con Bishop es igualmente menor que 1.0. La superficie de falla asociada al menor factor de seguridad se presenta en la zona media de la ladera e involucra únicamente el material arcilloso, sin embargo, se presentan potenciales fallas de mayor dimensión que afectan el perfil en su totalidad, lo cual evidencia la inestabilidad de la ladera en concordancia con el proceso generado en el área. Es importante notar que el nivel freático se encuentra a nivel de terreno, lo cual favorece significativamente la inestabilidad, ya que en condición seca la falla no se presentaría.

Los análisis de elementos finitos presentan una máxima deformación cortante en la parte media del talud concentrando la mayor magnitud en el contacto entre las formaciones limosas y arcillosas, lo que indica que la zona de contacto entre materiales muy diferentes condiciona el deslizamiento. El factor de reducción de resistencia encontrado mediante el uso de Phase 2 tiene un valor de 0.87, similar al mínimo factor de seguridad encontrado con SLIDE, lo que sugiere la consistencia de los análisis y la inminente falla de la ladera. Estos resultados, que se alinean con la naturaleza del deslizamiento (según las observaciones in situ), representan la inestabilidad de la zona media y la movilización de la resistencia al corte en la zona baja del talud que provoco la obstrucción del río.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 11. Resultados caso 4.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	22	14,5	18,9	20%	0,82	0,87

Fuente: Borda (2015) y propia.

5. Métodos de monitoreo en los deslizamientos Montes Cárpatos, Polonia.

Caso No. 5	
TÍTULO ORIGINAL:	IDENTIFICATION OF FLYSCH LANDSLIDE TRIGGERS USING CONVENTIONAL AND ‘NEARLY REALTIME’ MONITORING METHODS – AN EXAMPLE FROM THE CARPATHIAN MOUNTAINS, POLAND
UBICACIÓN / AÑO:	Valle del río Bystrzanka, Montañas Cárpatos, Polonia. 2010 – 2015.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	<p>La zona de las montañas Cárpatos concentra un 90 % de todos los movimientos de remoción en masa en Polonia, con inclinaciones de los taludes naturales de entre 9° y 18°. Dichos taludes en el valle del río evolucionaron como resultado de procesos naturales, que incluyen la erosión y los deslizamientos en periodos largos de tiempo, por lo cual, durante los periodos húmedos y lluviosos, se reactivan y causan nuevos movimientos, que pueden llegar a tener de entre 100 m y 500 m de longitud y profundidades de hasta 20 m. (Bednarczyk, 2018). De acuerdo con Gil & Dlugosz (2006), el primer deslizamiento en la zona se generó en 1974, la ladera se conformaba por lutitas e intercalaciones de areniscas. Desde su reactivación en 2010 el material se ha considerado un coluvial. El nivel freático se encontró entre 0.5 m y 2 m. (Bednarczyk, 2018)</p> <p>La zona de estudio cuenta con 15 deslizamientos distribuidos en 10 km, la investigación hecha por Bednarczyk (2018) se enfoca en seis deslizamientos, de los cuales tres se consideran deslizamientos activos de gran tamaño. Para estos movimientos se intensifico la exploración geotécnica y se generaron secciones geológicas; en la Figura 22 se presentan los deslizamientos en planta, los cuales están considerablemente distanciados y tienen estratigrafías y condiciones topográficas diferentes.</p>

Caso No. 5	
GEOLOGÍA	Gran parte del valle del río Bystrzankaesta se ubica en la unidad geológica conocida como Magura Nappe, la cual corresponde a rocas formadas durante el Eoceno. El lecho rocoso está compuesto por arcillolitas de baja resistencia y areniscas resistentes a procesos de meteorización e intemperismo. (Kijowska-Strugala, 2015)
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento complejo, movimiento rotacional en la parte alta que se transforma en traslacional e incluye flujo hacia la zona inferior. (Gil & Dlugosz, 2006)
POSIBLES CAUSAS	Precipitaciones prolongadas, saturación del medio y variaciones de hasta el 100% en la presión de poros.
TIPO DE SUELO:	Depósitos coluviales de comportamiento arcilloso.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Como parte de la investigación, fueron ejecutados 25 ensayos de laboratorio, entre los que se encuentran ensayos de clasificación y pruebas de corte directo para la determinación de los parámetros de resistencia residual. Se encontró una cohesión variable entre 6.5 kPa y 12 kPa y un ángulo de fricción entre 9° y 11°. Además, se obtuvieron contenidos de agua entre 20% y 36% y un índice de liquidez superior a 0.6 (Bednarczyk, 2018).</p> <p>Zydrón & Prawica (2014), para la misma zona de ocurrencia del evento definen, mediante la ejecución de ensayos de corte, valores de cohesión y fricción residual de 5 kPa y 11.5°, asociados a los valores de resistencia al corte pico de 26 kPa y 25.9°, respectivamente. Según los autores, después de la falla la resistencia puede disminuir hasta 5 veces en este tipo de rocas.</p> <p>Del mismo modo, Zydrón, Gryboś, Kubiś, Hobot, & Janus (2015), evaluaron las condiciones de resistencia del material localizado sobre la roca en la banca del río Bystrzanka (en la zona donde se localiza el deslizamiento), encontrando una cohesión entre 24 kPa y 56 kPa y un ángulo de fricción entre 16° y 24°; los autores explican la importante incidencia de la cantidad de agua en el material, y discriminan resultados con respecto a la humedad de las muestras.</p> <p>Considerando las tres investigaciones, se definen los parámetros de resistencia que se muestran</p>	

Caso No. 5

en la Tabla 13, junto con las constantes de elasticidad definidas según el numeral 1.1.1.3. Las propiedades índices obtenidas en la investigación se presentan en la Tabla 12.

Considerando que la zona de estudio cuenta con tres deslizamientos de condiciones estratigráficas y de topografía disímiles, se efectuaron tres análisis diferentes asociados a cada una de las secciones transversales elaboradas por Bednarczyk (2018), las cuales se muestran de la Figura 23 a la Figura 25. Cada una de estas secciones fue tomada como un caso independiente dentro del total de casos analizados. Los parámetros geotécnicos que se presentan a continuación aplican para los tres deslizamientos. *

Tabla 12. Granulometría, límites de Atterberg y humedad natural del coluvión.

Granulometría				Clasificación USCS	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Humedad natural (%)
Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)					
0	9.3	67	23.7	Limo	49.7	23.2	26.5	25.3

Fuente: (Bednarczyk, 2018; Zydrón et al., 2015; Zydrón & Prawica, 2015)

Tabla 13. Parámetros geotécnicos caso 5.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Coluvial	Cohesivo	23	31	14 16*	33	0.4
Lutita	Cohesivo	40	29	16 20*	20250	0.33

*Peso unitario saturado

Fuente: (Bednarczyk, 2018; Zydrón et al., 2015; Zydrón & Prawica, 2015)

Caso No. 5

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

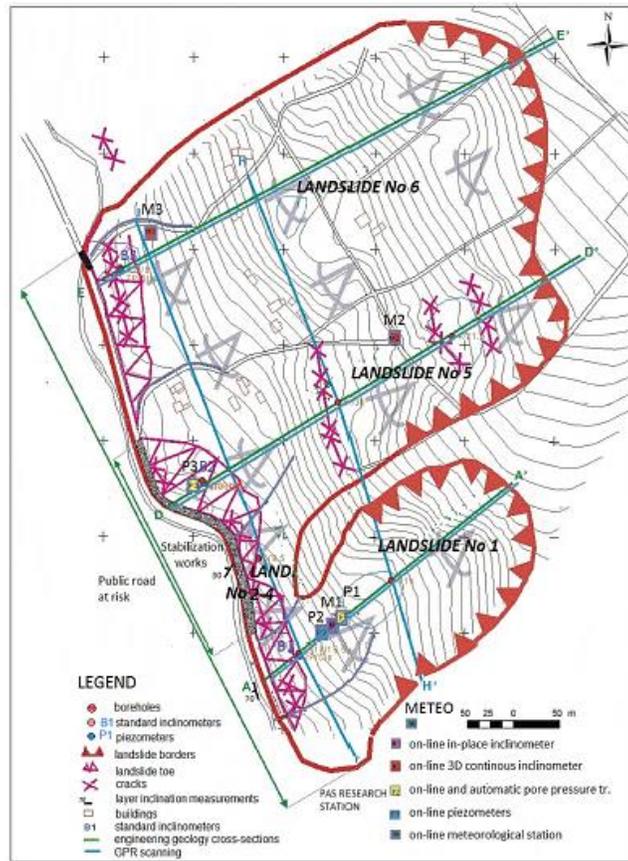


Figura 22. Planta general del deslizamiento, caso 5. (Bednarczyk, 2018)

PERFIL

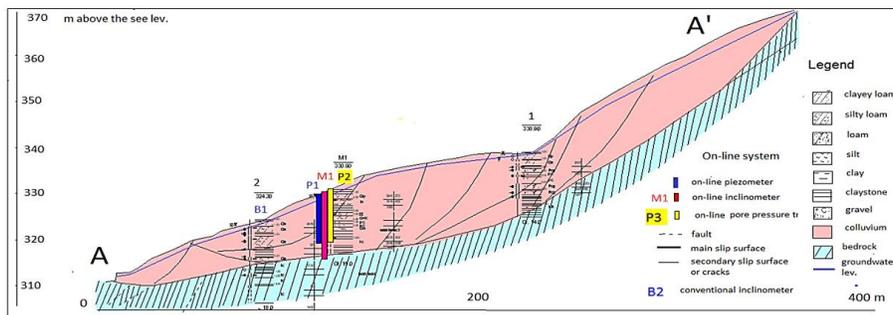


Figura 23. Corte "A". (Bednarczyk, 2018)

Caso No. 5

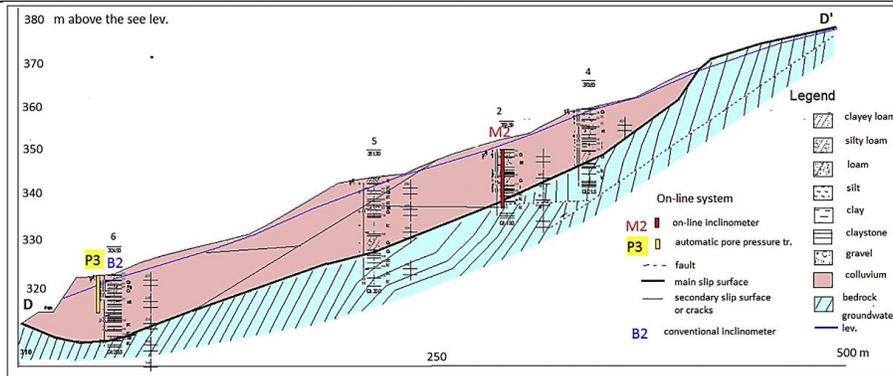


Figura 24. Corte "D". (Bednarczyk, 2018)

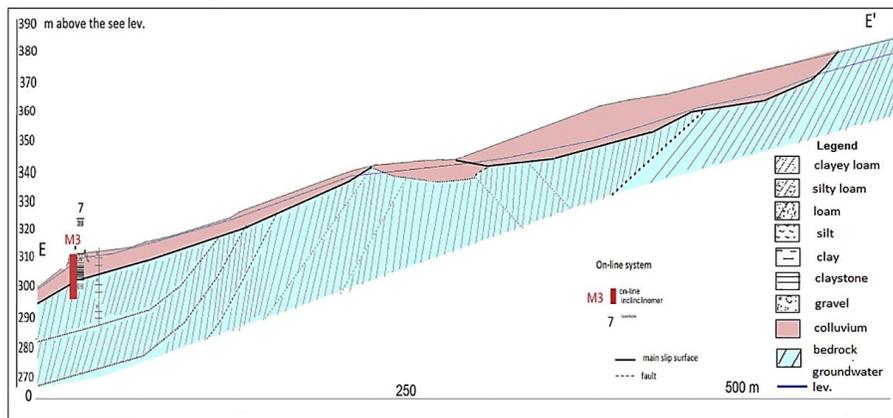


Figura 25. Corte "E". (Bednarczyk, 2018)

MODELADO

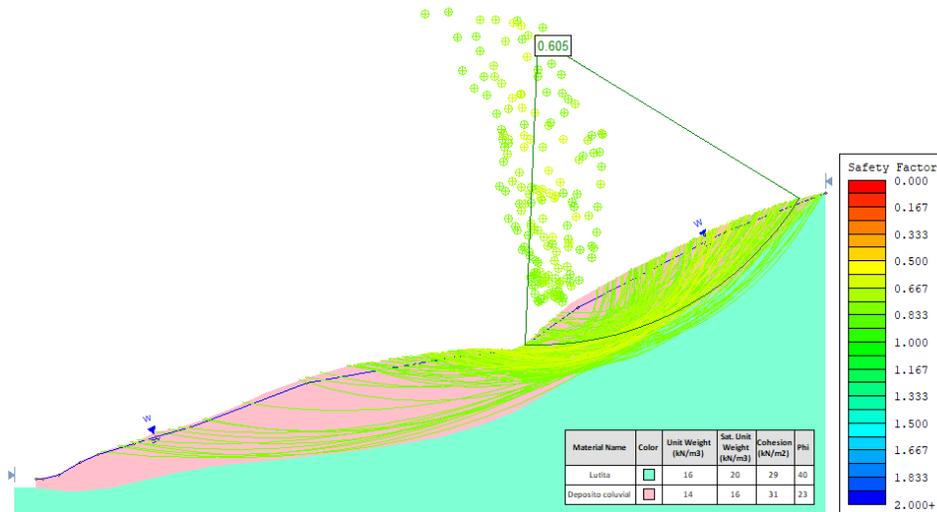


Figura 26. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 5, corte "A".

Caso No. 5

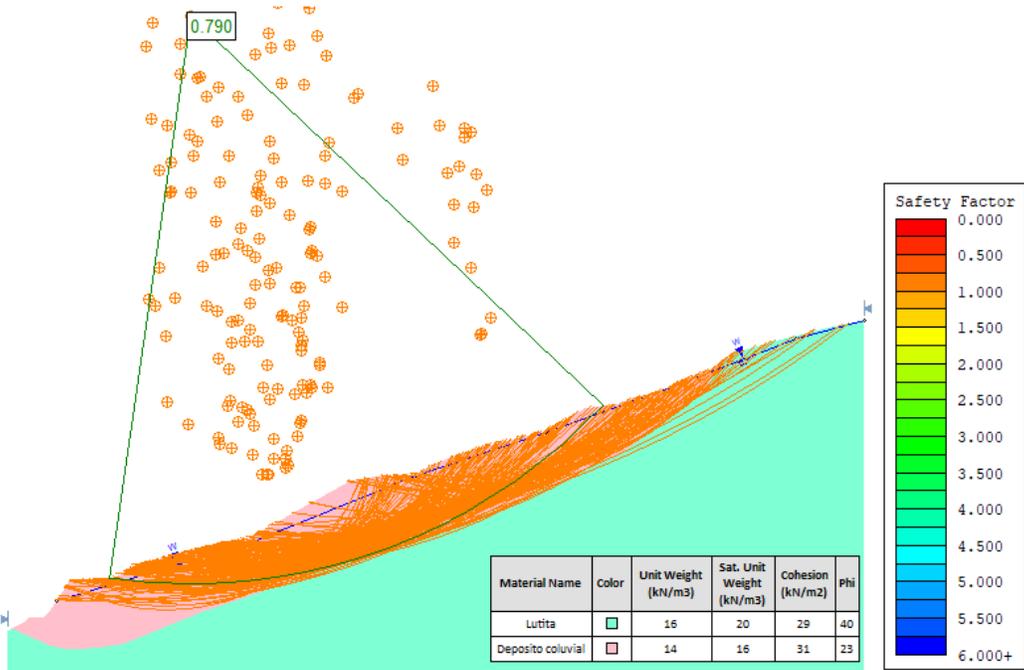


Figura 27. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 5, corte “D”

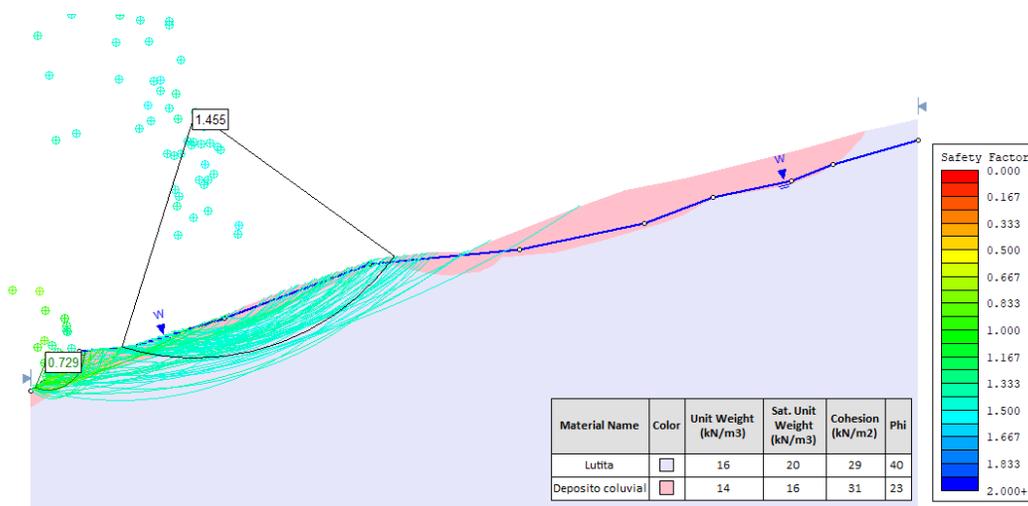


Figura 28. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 5, corte “E”.

Caso No. 5

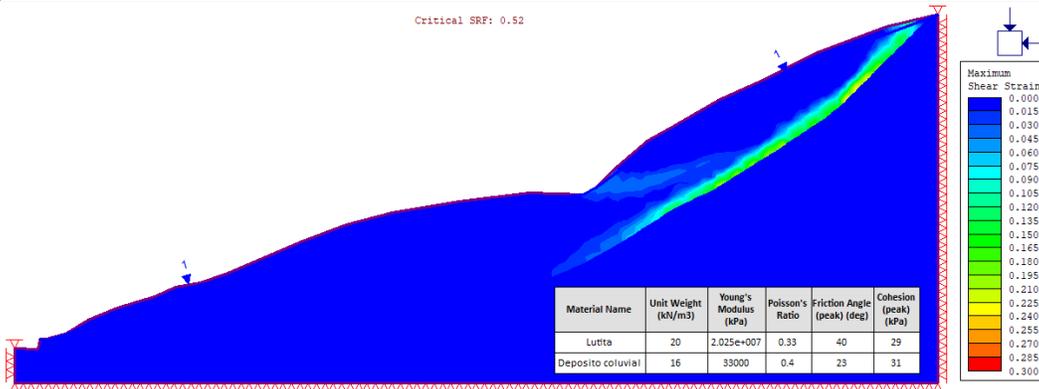


Figura 29. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 5, corte "A".

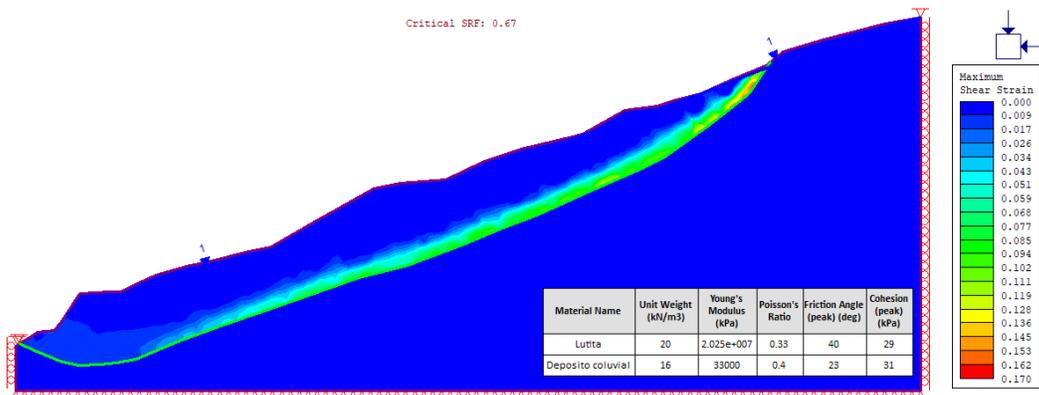


Figura 30. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 5, corte "D"

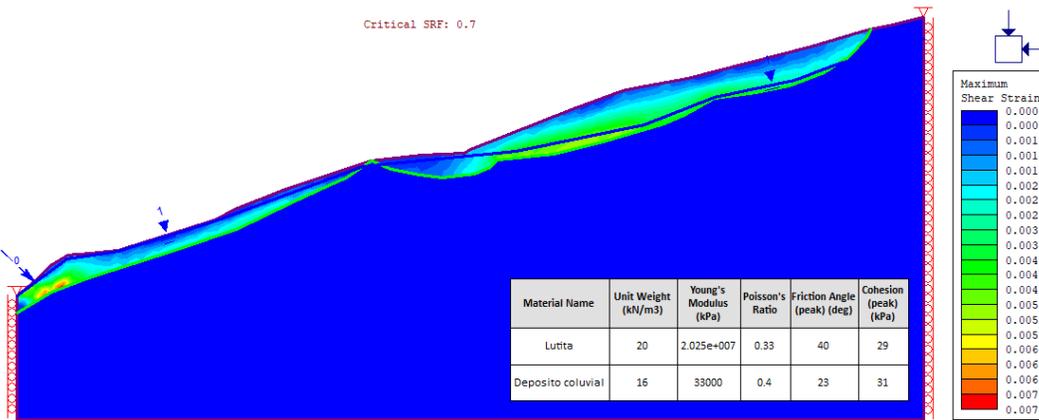


Figura 31. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 5, corte "E".

Caso No. 5

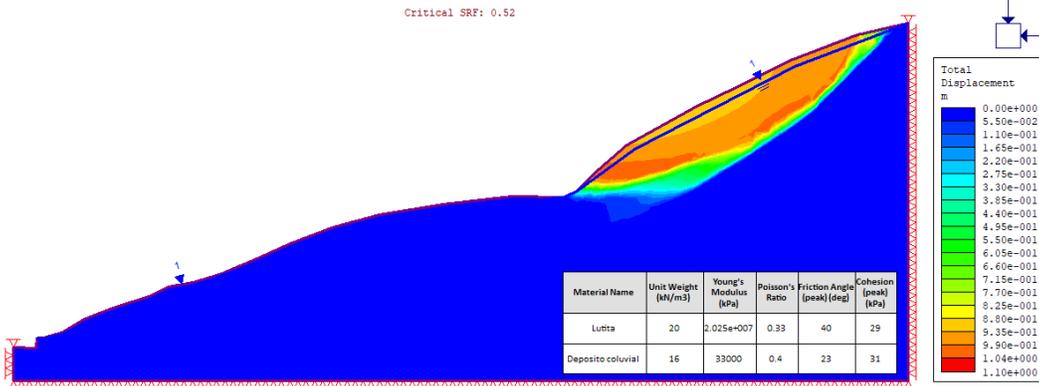


Figura 32. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 5, corte "A".

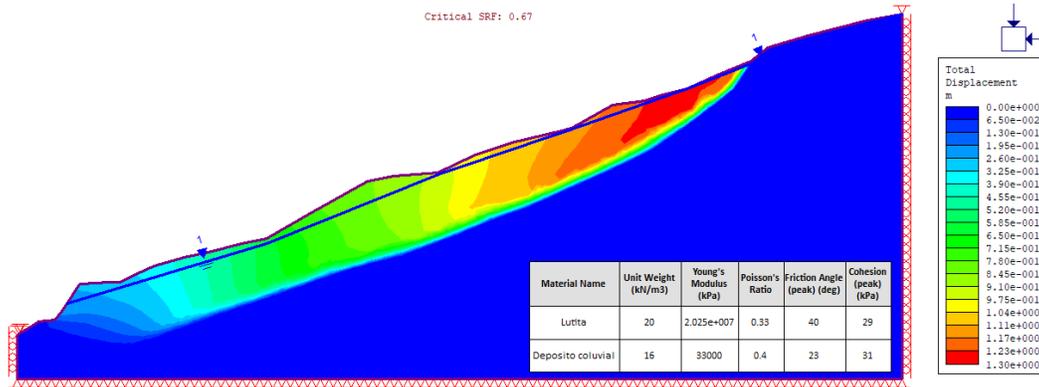


Figura 33. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 5, corte "D".

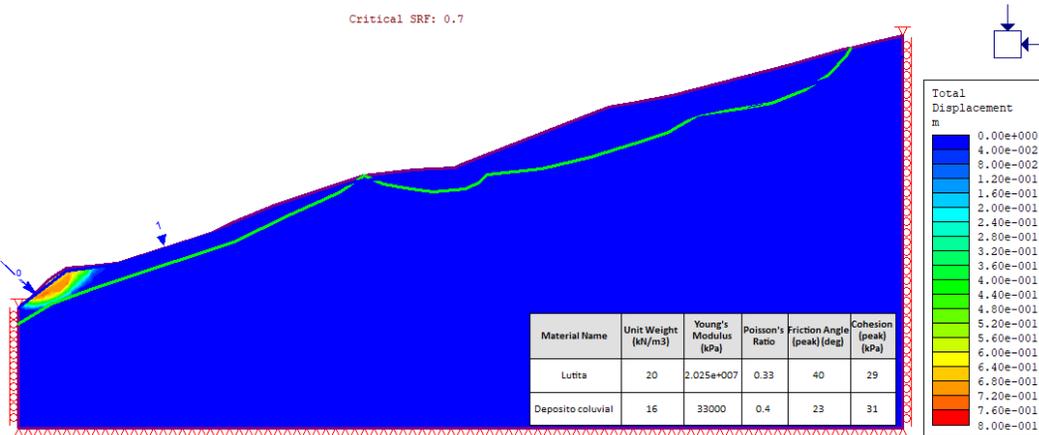


Figura 34. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 5, corte "E".

Caso No. 5

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Este caso cuenta con tres cortes importantes de diferente longitud, los cuales pertenecen a la misma zona y tienen pendiente y contacto roca – suelo distinto. Para el corte A, teniendo en cuenta los resultados de análisis de estabilidad de taludes y elementos finitos, la inestabilidad se presenta principalmente en la parte alta del talud, esto pudiéndose explicar que es el tramo que presenta más pendiente, el factor de seguridad mínimo del talud obtenido por el método de Janbu es de 0.605. Adicionalmente, del análisis de elementos finitos, se observan los mayores esfuerzos justo en la zona que se genera la superficie de falla del movimiento más probable, con los mayores valores en el contacto entre los materiales, con un factor de reducción de resistencia de 0.52, de magnitud similar al factor de seguridad.

El corte D, debido a su composición y forma de la ladera, cuenta con una superficie general de falla a lo largo de todo el talud, con un factor de seguridad mínimo de 0.79 encontrado por el método de Janbu, lo que indica una falla inminente del talud, esto fue corroborado mediante el análisis de elementos finitos realizado, el cual presenta una falla general prácticamente a lo largo de todo el contacto suelo – roca, con un factor de reducción de 0.67.

En cuanto al corte E, el análisis por equilibrio límite indica una inestabilidad en la pata de la ladera. La superficie de falla asociada al menor factor de seguridad se encontró mediante el método de Janbú, con un valor equivalente a 0.73, lo que en cualquier caso indica una inestabilidad de terreno. Adicionalmente, del análisis de elementos finitos se pueden observar los esfuerzos de mayor magnitud en dos secciones del corte sobre el contacto entre la roca y suelo, en la zona inferior y media, el análisis produce un factor de reducción de resistencia de 0.7. Se considera además, que la inestabilidad local identificada en la pata del talud puede incidir en forma general a largo plazo.

Los factores encontrados reflejan la falla de talud y la fuerte inestabilidad producida por el coluvión en contacto con la roca. Las superficies de falla y el resultado del análisis numérico, obtenidos en todas las modelaciones, coinciden con los movimientos típicos de la zona de estudio, evidenciado el contacto entre los materiales como principal factor condicionante y la influencia directa del nivel freático ubicado cerca de la superficie, tal como lo describe el autor.

Caso No. 5

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 14. Resultados caso 5.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Coluvial	Cohesivo	23	31	14	24%	0,61	0,52
Coluvial	Cohesivo	23	31	14	35%	0,79	0,67
Coluvial	Cohesivo	23	31	14	28%	0,73	0,7

Fuente: Bednarczyk (2018) y propia.

6. Modelación numérica del efecto de la lluvia en el deslizamiento de Azazga, Argelia.

CASO 6	
TÍTULO ORIGINAL:	NUMERICAL MODELING OF THE EFFECT OF RAINFALL ON AZAZGA LANDSLIDE, ALGERIA
UBICACIÓN / AÑO:	Municipio de Azazga, Región Tizi-Ouzou, Argelia / 2014
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El deslizamiento hace parte de una zona de alta inestabilidad de 260 ha. La altura media del talud es de 195 m y su inclinación es de 15°. El sitio ha experimentado diferentes fases como consecuencia de efectos climáticos, por lo que es de común interés el estudio de la reactivación del deslizamiento de Azazga; los primeros eventos desarrollados en el área datan de 1952, recientemente, en marzo de 2012 se presentaron movimientos por una gran capa de nieve que cubría el depósito y en 2014 una fuerte lluvia causo el último movimiento.

CASO 6	
	<p>En concordancia con la actividad del deslizamiento, los parámetros de resistencia al corte medidos en las capas limo arcillosas en donde se genera la falla son muy bajos. (Djerbal & Bahar, 2016)</p> <p>El nivel freático se identifica a 21 m bajo la superficie del terreno en época de verano mientras que en invierno se encuentra cerca de la superficie del terreno natural. (Djerbal & Bahar, 2016)</p>
GEOLOGÍA	<p>El municipio de Azazga se localiza, según el mapa geológico publicado por la Oficina Nacional de Investigación Geológica y Minera de Argelia, en un área arcillosa y margosa. La unidad geológica se conoce como flysch de Kabylia, la cual se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios compuestos por limos y arcillas o limos arenosos, que se consideran sensibles al agua y fueron constituidos de forma multicapa.</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	<p>Deslizamiento traslacional.</p>
POSIBLES CAUSAS	<p>Saturación del suelo debido a las temporadas invernales. Fuertes lluvias.</p>
TIPO DE SUELO:	<p>Suelo residual arcilloso</p>
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Los parámetros de resistencia utilizados para la modelación de la investigación fueron obtenidos de la recopilación bibliográfica de numerosos ensayos de laboratorio ejecutados para la caracterización del deslizamiento, en conjunto con el conocimiento de varias décadas de los autores y otros expertos. En la Tabla 15 los parámetros de resistencia y deformación para cada estrato definidas por Djerbal & Bahar (2016).</p> <p>Teniendo en cuenta las condiciones ambientales en el momento del evento, al igual que en las modelaciones realizadas por los autores, se establece el nivel freático en la superficie del terreno</p>	

CASO 6

natural y se usan los pesos unitarios saturados de cada material.

Tabla 15. Parámetros geotécnicos caso 6.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Arena limosa	Granular	7	50	16.0 18.8*	203.8	0.33
Arcilla alterada	Cohesivo	3	28	15.3 18.0*	93.52	0.33
Marga	Roca	14	155	18.0 18.4*	4000	0.33
Lecho rocoso	Roca	30	300	23.0 23.16*	40520	0.3

*Peso unitario saturado

Fuente: (Djrbal & Bahar, 2016)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

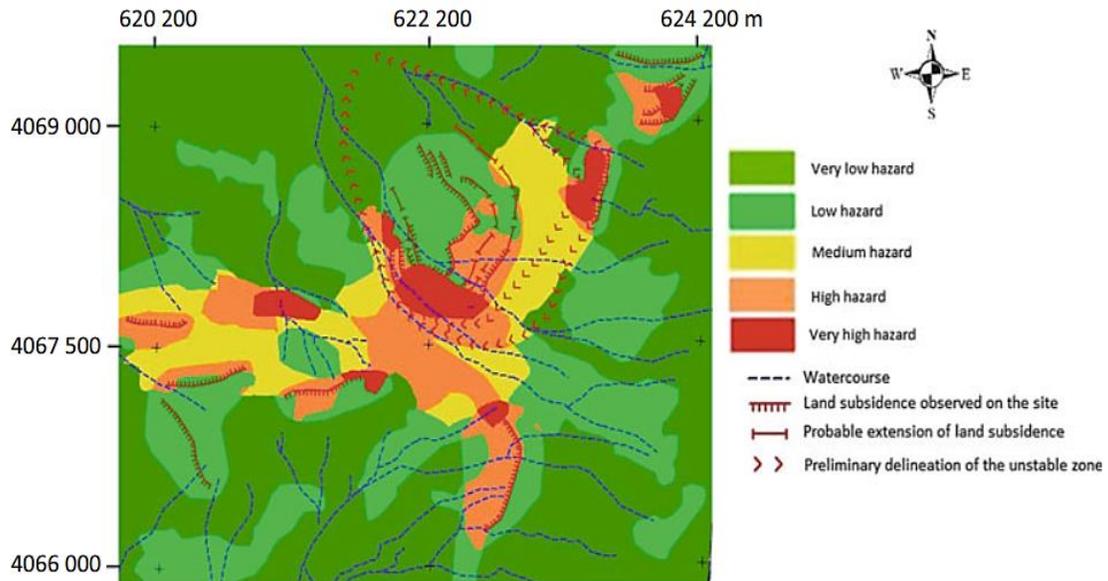


Figura 35. Planta general del deslizamiento, caso 6. (Djrbal & Bahar, 2016)

CASO 6

PERFIL

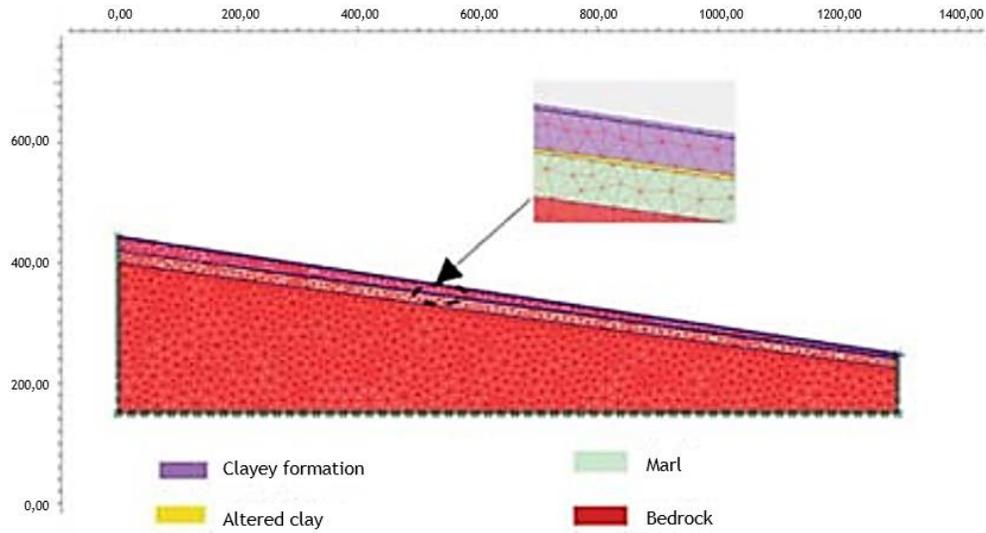


Figura 36. Cortes principales, caso 6. (Djeral & Bahar, 2016)

MODELADO

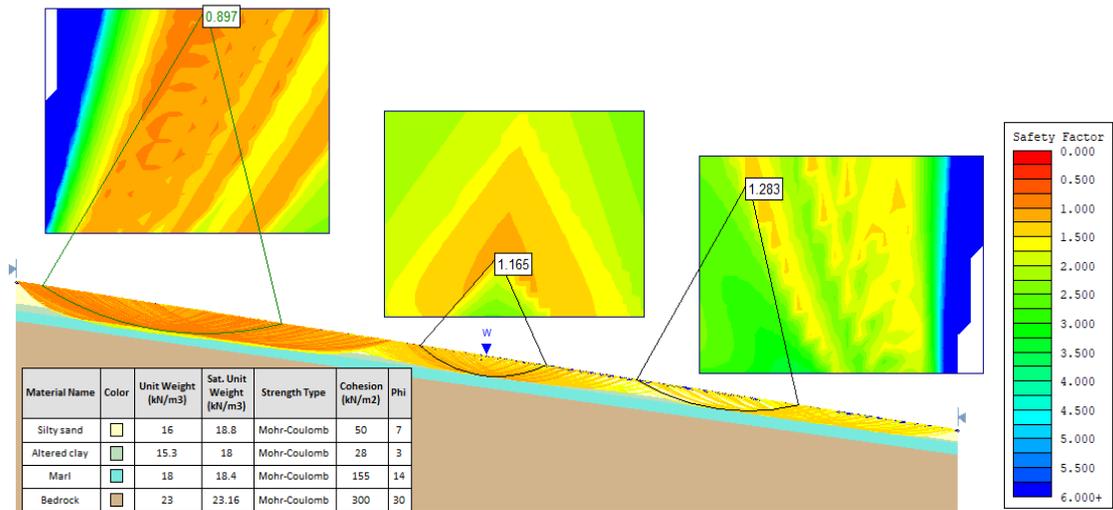


Figura 37. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 6. Fuente Propia

CASO 6

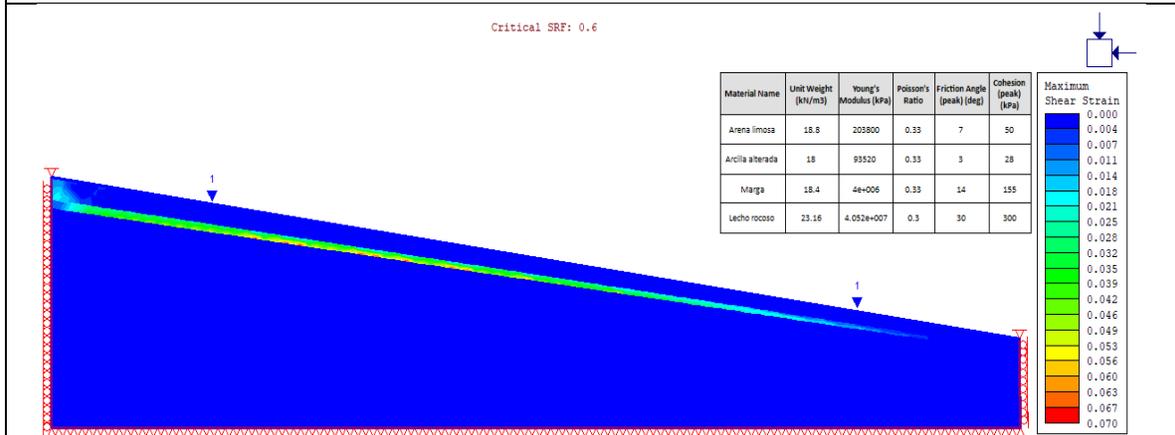


Figura 38. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 6. Fuente Propia

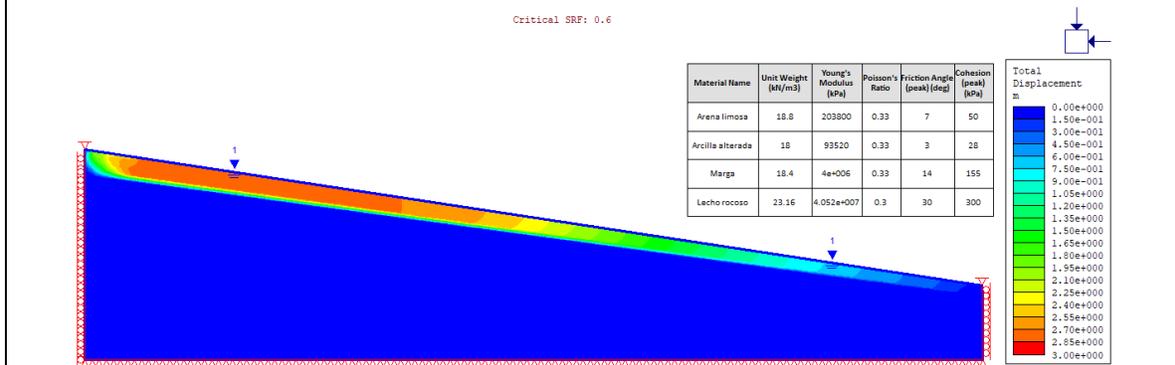


Figura 39. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 6. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

De la aplicación del método de equilibrio límite, se obtuvieron factores de seguridad por los métodos de Bishop y Janbu, los cuales evidencian la falla del talud, con una superficie de falla asociada al menor factor de seguridad que se localiza en la parte alta de la ladera, este factor de seguridad encontrado por el método de Janbu corresponde a 0.897.

La zona de falla corresponde a las capas superficiales constituidas por una importante fracción cohesiva y arena, tal como se puede observar en el resultado de la modelación con elementos finitos, en donde los máximos esfuerzos cortantes se distribuyen en el talud sugiriendo una falla planar a lo largo de la capa de arcilla alterada. En la zona alta de la ladera, en donde se encontró

CASO 6

el menor factor de seguridad, se localizan los esfuerzos cortantes de mayor magnitud, al igual que los desplazamientos, lo cual es consistente con lo obtenido en el análisis de estabilidad. El factor de reducción de resistencia encontrado con el programa de elementos finitos corresponde a 0.6, que en consistencia con el análisis de estabilidad describe la inminente falla.

Los resultados obedecen a los valores de los ángulos de fricción reconocidos para los materiales superficiales, al igual que la baja cohesión principalmente en la capa de arcilla. La saturación del subsuelo posterior a la fuerte lluvia sucedida en 2014, además de las propiedades intrínsecas que condicionan la resistencia disponible del material cohesivo, constituyen una inminente inestabilidad, generando los daños evidenciados en las estructuras adyacentes al deslizamiento y los desplazamientos del terreno observados en campo por los autores. Se resalta que la significativa incidencia del nivel freático en la falla del talud, ya que sin tener en cuenta la saturación de los materiales que conforman el perfil, el talud presentaría un factor de seguridad superior que 1.2.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 16. Resultados caso 6

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	3	28	18	10	0.897	0.6

Fuente: Djerbal & Bahar (2016) y propia.

7. Comportamiento de una pendiente coluvial ubicada en el sureste de Brasil.

CASO 7

TÍTULO ORIGINAL:	BEHAVIOR OF A COLLUVIAL SLOPE LOCATED IN
-------------------------	--

CASO 7	
	SOUTHEASTERN BRAZIL.
UBICACIÓN / AÑO:	Sur de Brasil, vía federal BR116 a 29 km de Rio de Janeiro / 1976.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	La vía BR116 es una vía nacional que atraviesa el país de norte a sur; a lo largo de su trazado presenta un tramo cercano a Rio de Janeiro llamado “Serra do Mar”, el cual se caracteriza por tener zonas de baja estabilidad. En esta zona se realizó una excavación para la construcción de la vía, generando una activación de un movimiento lento del depósito coluvial, el cual en las temporadas de lluvias es más crítico. La zona de estudio presenta colinas cóncavas y convexas de entre los 200 msnm y 400 msnm, con pendientes levemente inclinadas. (Ehrlich, Costa, & Cerqueira, 2018)
GEOLOGÍA	Superficialmente se encuentran depósitos coluviales que se depositan en las zonas bajas, pero el origen de este material corresponde a una zona de rocas graníticas, con un fracturamiento considerable, lo cual permite el flujo del agua. Los depósitos generados contienen un pequeño porcentaje de material fino, y más del 88% de material granular, (Lacerda, 2004)
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento traslacional muy lento.
POSIBLES CAUSAS	Excavaciones para construcción de la vía y alta pluviosidad.
TIPO DE SUELO:	Depósitos coluviales de comportamiento Granular.

CASO 7

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

En 2012 se realizó una campaña exploratoria que incluyó la ejecución de 12 perforaciones de rotación y en 2016 se detalló la litología mediante ensayos geofísicos. De las perforaciones fueron obtenidas muestras para la realización de ensayos de laboratorio, además, se extrajeron bloques para obtener parámetros de resistencia en el coluvión.

En la Tabla 17 se presentan los resultados promedio obtenidos de los ensayos de distribución granulométrica y humedad natural y en la Tabla 18 se presentan los parámetros geotécnicos encontrados por Ehrlich, Pereira, & Cerqueira (2018). El módulo de elasticidad y relación de Poisson para la roca, se definieron de 60000 MPa y 0.22 de acuerdo con el numeral 1.1.1.3.

Tabla 17. Distribución granulométrica y humedad natural

Granulometría			Humedad natural (%)
Bloques (%)	Arena (%)	Finos (%)	
6	Arena de grano fino: 31 Arena de grano medio: 38 Arena de grano grueso: 12	Arcilla: 2 Limo: 11	11

Fuente: (Ehrlich et al., 2018)

Tabla 18. Parámetros geotécnicos caso 7.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Coluvión granular	Granular	35	0	17	40	0.25
Coluvión granular sumergido	Granular	29	0	20	40	0.25

Fuente: (Ehrlich, Costa, & Cerqueira, 2018).

CASO 7

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

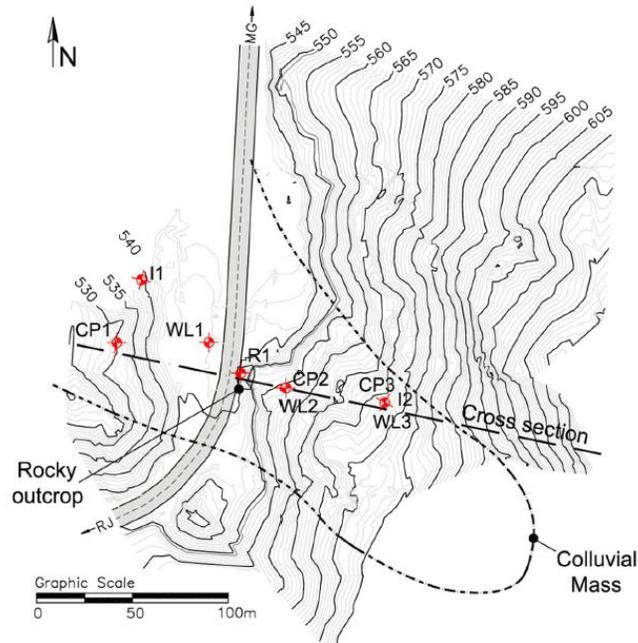


Figura 40. Planta general del deslizamiento, caso 7. (Ehrlich, Costa, & Cerqueira, 2018)

PERFIL

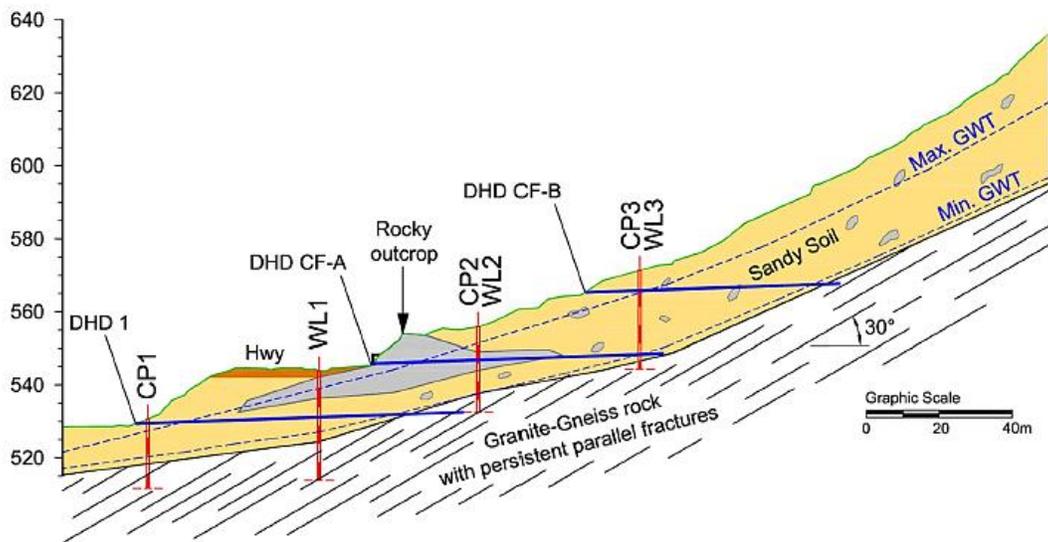


Figura 41. Cortes principales, caso 7. (Ehrlich, Costa, & Cerqueira, 2018)

CASO 7

MODELADO

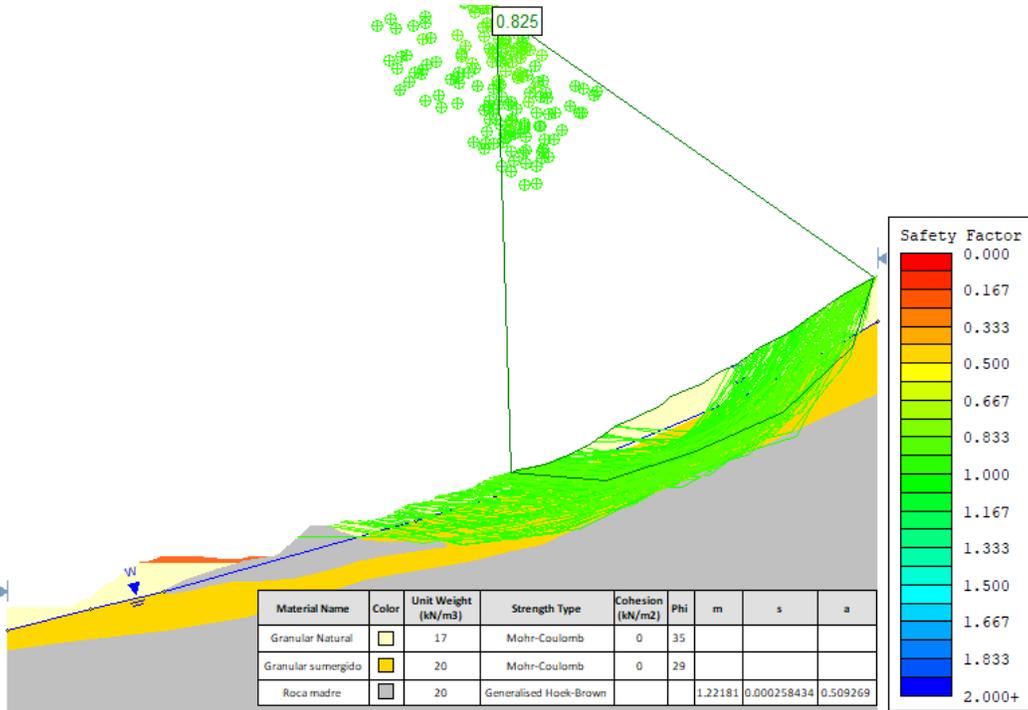


Figura 42. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 7. Fuente Propia

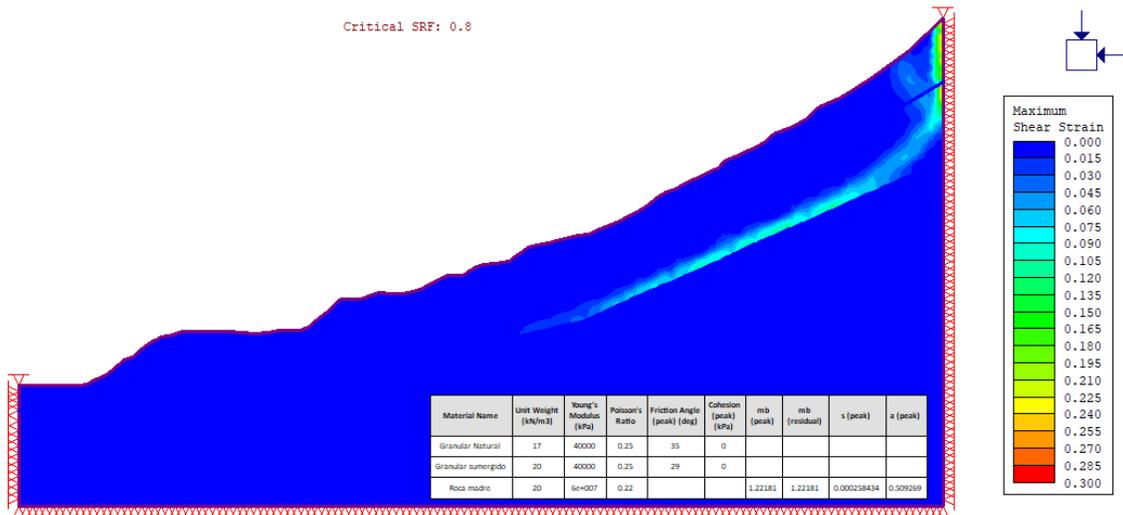


Figura 43. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 7. Fuente Propia

CASO 7

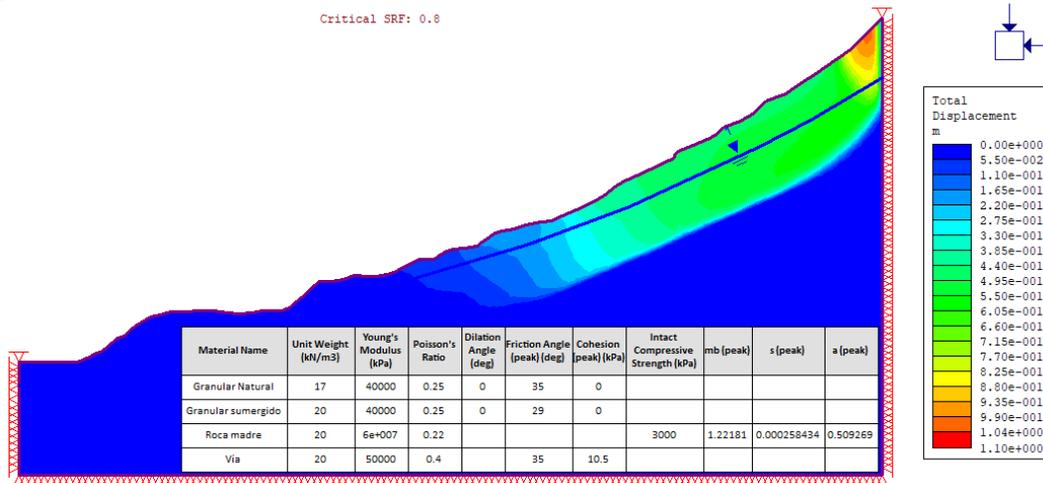


Figura 44. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 7. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Para el análisis de estabilidad se presentan tres materiales, cuyos valores de resistencia son asignados de acuerdo con las descripciones e imágenes presentadas en la fuente, para la roca madre se usa el modelo generalizado de Hoek y Brown. Como resultado se obtiene que la falla es inminente en el material arenoso, principalmente donde se encuentra la arena saturada debido a la disminución del esfuerzo cortante resistente.

En las dos modelaciones se evidencia la falla en la parte alta, bajo el nivel freático y cerca al contacto con la roca, con una superficie de falla asociada al menor factor de seguridad (0.83) en el coluvión saturado, justo en donde se presentan los esfuerzos máximos según el análisis por elementos finitos, del cual se obtuvo una reducción del esfuerzo cortante crítico de 0.8. Los resultados de los dos análisis son consistentes y sugieren la inestabilidad del talud con una magnitud comparable. El nivel freático establece una condición determinante en la estabilidad del terreno, ya que si este nivel se ubica a una mayor profundidad, cerca al contacto con la roca, la estabilidad del talud tiende a aumentar.

De acuerdo con los autores, el perfil contaba con un afloramiento de roca y debido a la meteorización diferencial en el macizo y el flujo de agua a través de las juntas, se generó una capa intermedia de suelo. Pese a la presencia de dicha masa rocosa, el deslizamiento afecta la vía en la zona en donde se realizaron excavaciones y movimientos de tierra. En cuanto a los desplazamientos que indican las modelaciones, estos coinciden con lo identificado en el

CASO 7							
monitoreo llevado a cabo en el sitio.							
TABLA DE RESULTADOS							
Tabla 19. Resultados caso 7.							
Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Coluvial	Granular	29	0	20	36%	0.83	0.8
Fuente: (Ehrlich, Costa, & Cerqueira, 2018)							

8. Investigación del deslizamiento Fu Yung Shan Tsuen, Hong Kong

CASO 8	
TÍTULO ORIGINAL:	INVESTIGATION OF THE 20 AUGUST 2005 FATAL LANDSLIDE AT FU YUNG SHAN TSUEN, HONG KONG
UBICACIÓN / AÑO:	Fu Yung Shan Tsuen, Hong Kong. 2005.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	<p>En el año 2005 ocurrió un deslizamiento con consecuencias fatales, este movimiento de tierra de aproximadamente 400 m³, cuenta con unos 45 m de longitud, 18 m de ancho y unos 4 m de profundidad, con un ángulo de inclinación entre 50° y 65°.</p> <p>Una lluvia intensa y prolongada que precedió el movimiento se considera el principal detonante, la acción humana incrementó la susceptibilidad del deslizamiento, debido a la</p>

CASO 8	
	disposición inadecuada de desechos, instalación o construcción incorrecta de sistemas de abastecimiento de agua, infraestructura urbana y senderos. (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012)
GEOLOGÍA	La formación geológica más antigua corresponde a roca granodiorita de origen ígneo, sobre la cual se han depositado y cementado suelos residuales producto de la meteorización de la roca, generando un perfil de meteorización de roca sana en profundidad a granodiorita completamente descompuesta y meteorizada hasta aproximadamente 3 m bajo la superficie del terreno. Superficialmente se encuentra un coluvión con una matriz arcillo - limosa y algunos cantos de roca. (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012)
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento rotacional.
POSIBLES CAUSAS	Lluvias intensas y prolongadas, intervención antrópica.
TIPO DE SUELO:	Depósitos coluviales de comportamiento granular.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Para la caracterización del terreno de estudio y de acuerdo con Ho, Chao, Lau, & Silva (2012), el programa de investigación geotécnica se dividió en dos fases, la primera en la cual se caracterizaron los materiales después del deslizamiento, mediante perforaciones, piezómetros y trincheras entre otros; la segunda fase consistió en la ejecución de un programa similar en las inmediaciones del movimiento, en donde no se presentaron desplazamientos.</p> <p>De las muestras inalteradas obtenidas en campo se realizaron ensayos de clasificación y resistencia. Los valores medios asociados a los ensayos de clasificación se presentan en la Tabla 20 y en cuanto a las pruebas para la definición de la resistencia al corte, se realizaron triaxiales y cortes directos en el coluvión y en la granodiorita descompuesta y meteorizada, para los cuales se obtuvo el promedio que se presentan en la Tabla 21, así como las constantes de deformación</p>	

CASO 8

definidas de acuerdo con el numeral 1.1.1.3. Es importante mencionar que los autores indican que el material coluvial es principalmente granular (arena limosa), lo que se evidencia en su comportamiento de falla (con cohesión prácticamente nula y alto ángulo de fricción), sin embargo, presentan parámetros de la fracción fina, correspondiente al material limoso de alta plasticidad.

De acuerdo con el perfil precisado por los autores de la investigación, la capa de granodiorita medianamente a no descompuesta y meteorizada no se logró definir claramente durante las exploraciones, por lo que se consideran los mismos parámetros de la capa superior, la cual se encuentra completamente meteorizada. Según el análisis de Ho, Chao, Lau, & Silva (2012), el nivel freático se encuentra a 1.9 m por debajo del terreno natural, para los sectores no saturados se consideró el peso unitario seco. Los rellenos levantados en la zona fueron considerados en el modelo, con pesos unitarios de 20 kN/m³ y 12 kN/m³, para el relleno artificial y el relleno de residuos sólidos urbanos respectivamente. (Stark et al., 2008).

Tabla 20. Granulometría y límites de Atterberg del coluvión.

Geología	Granulometría	Clasificación	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
	Finos (%)				
Coluvión	50	Limo	54	28	26

Fuente: (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012)

Tabla 21. Parámetros geotécnicos caso 8.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Coluvión	Granular	39	1	12.1 15.6*	11	0.35
Granodiorita descompuesta	Granular	34	2	14.9 17.6*	10	0.38

Fuente: (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012).

CASO 8

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

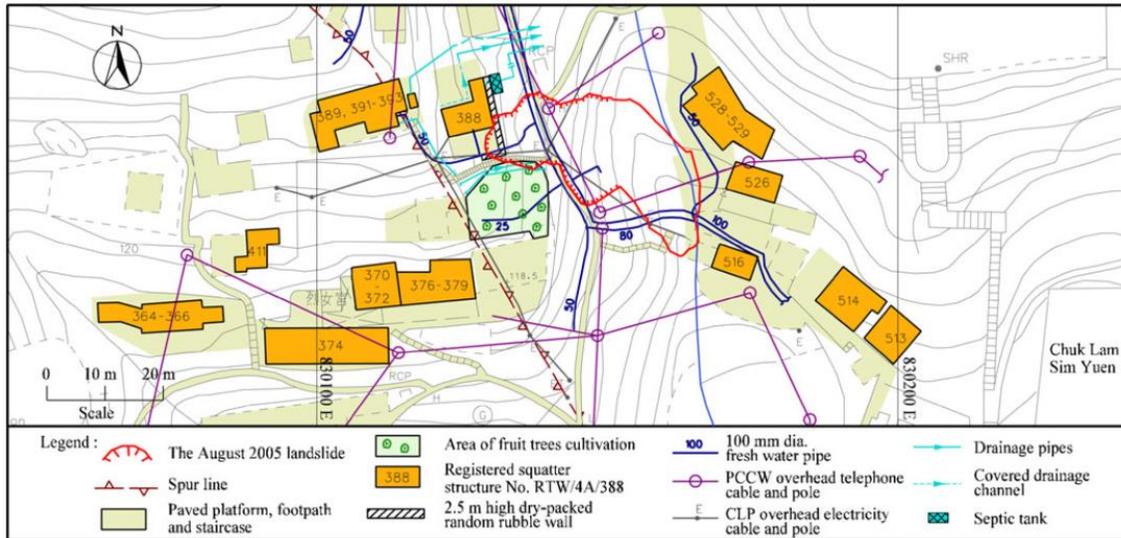


Figura 45. Planta general del deslizamiento, caso 8. (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012)

PERFIL

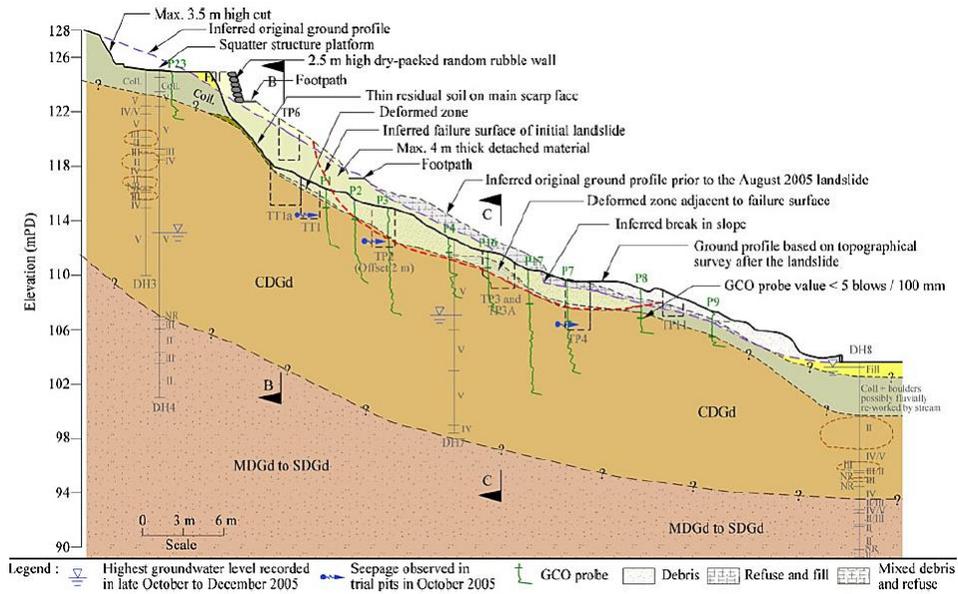


Figura 46. Cortes principales, caso 8. (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012)

CASO 8

MODELADO

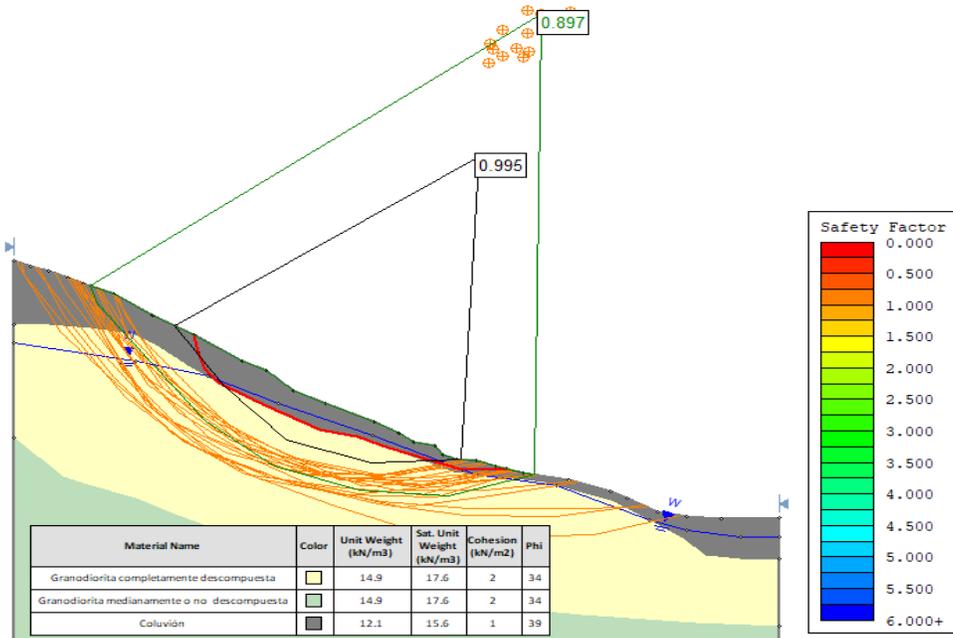


Figura 47. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 8. Fuente Propia

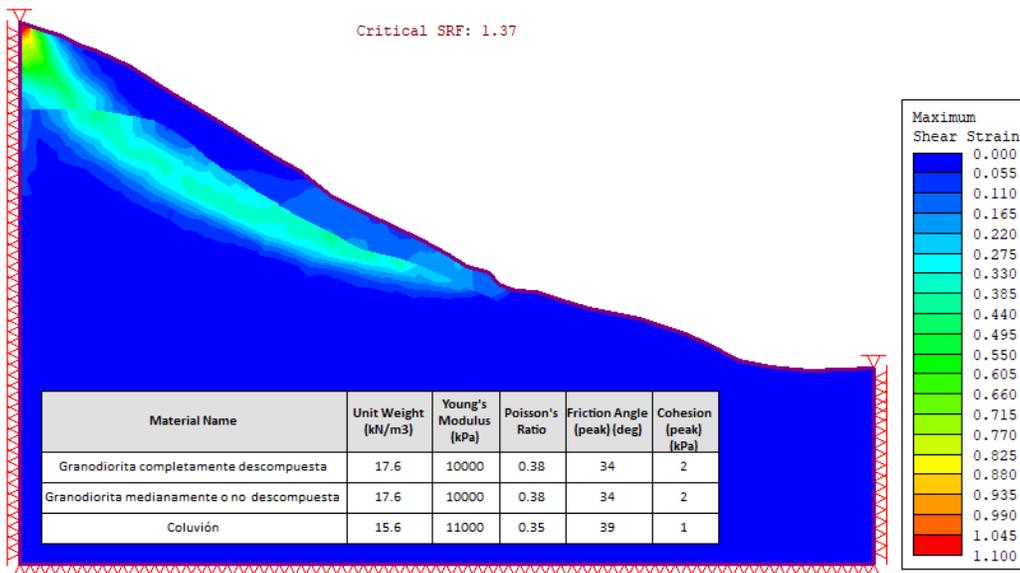


Figura 48. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 8. Fuente Propia

CASO 8

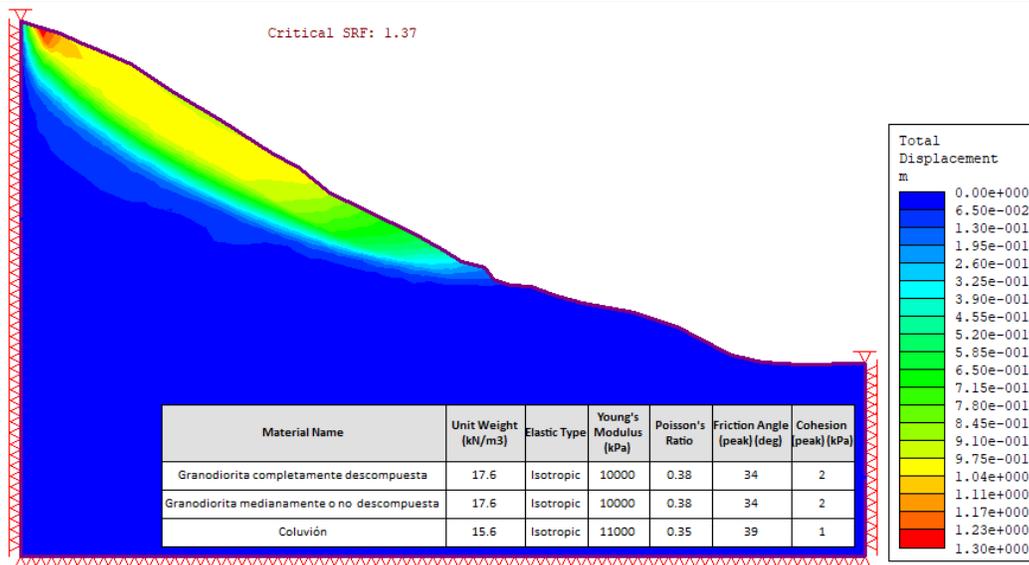


Figura 49. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 8. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Del análisis de estabilidad realizado en este talud, se identifica una potencial zona de falla en la zona media alta del talud, como se muestra en la Figura 47, con un factor de seguridad mínimo de 0.89 encontrado mediante el método de Janbu con superficie no circular, considerando la falla sugerida de la investigación geotécnica. Del mismo modo, el resultado del análisis por elementos finitos, evidencia la presencia de los mayores esfuerzos de corte en la zona media alta del talud, sin embargo, el factor de reducción de resistencia es de 1.37, que a diferencia del factor de seguridad, no describe la inestabilidad presentada en el talud, pero tampoco se considera un factor suficientemente alto. Ligeras variaciones en la posición del nivel pueden inducir fácilmente una disminución por debajo de la unidad del factor de reducción de resistencia, o reflejar estabilidad en el análisis de equilibrio límite, por lo que se considera que el sistema es altamente sensible a la saturación del coluvial y se hace notar la importancia de la correcta definición del nivel freático.

La modelación refleja el comportamiento del terreno descrito por los habitantes de la zona, y como se observó en la exploración, la falla se ubica en el estrato coluvial, cerca al contacto con la granodiorita completamente meteorizada e influenciado por el incremento en la presión de poros,

CASO 8

dada la infiltración de agua lluvia y la elevación del nivel freático que usualmente se encuentra por debajo de los 4 m.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 22. Resultados caso 8.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Coluvial	Granular	39	1	15.6	34%	0.89	1,37

Fuente: (Ho, Chao, Lau, & Silva, 2012)

9. Caracterización geotécnica y análisis numérico del deslizamiento de Sarak en India.

CASO 9

TÍTULO ORIGINAL:	GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TWO LANDSLIDES ALONG THE NATIONAL HIGHWAY 1-A (LADAKH REGION, JAMMU AND KASHMIR)
UBICACIÓN / AÑO:	Region Ladakh, Jammu y Kashmir, India / 2013
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El movimiento se presentó en el talud de la vía Nacional 1-A, que conecta la región de Ladakh con Jammu y Kashmir, ubicado al norte de India. Cuenta con un área de 28.000 m ² . De acuerdo con las investigaciones, el deslizamiento se generó en temporada de verano, durante la cual la nieve depositada durante 4 meses se derritió e infiltró en el suelo, adicionalmente se realizaron ampliaciones a la vía que disminuyeron la resistencia del terreno y alteraron el equilibrio natural

CASO 9	
	de la ladera, provocando una falla. Como consecuencia se evidenciaron daños en la carretera, canales y cultivos.
GEOLOGÍA	<p>Las unidades geológicas de la zona están compuestas por rocas como granito, arenisca, lutitas y conglomerados. Las formaciones más antiguas corresponden a Cuarzitas, Gneis y Limolitas.</p> <p>Estratigráficamente, en la parte superior, el área de estudio cuenta con una gran cantidad de material detrítico y mantos de roca meteorizada, en valles y en zonas altas secas.</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento superficial traslacional
POSIBLES CAUSAS	Saturación del talud por infiltración de agua.
TIPO DE SUELO:	Suelo residual, meteorizado de granito.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Los parámetros de resistencia, así como las propiedades índice fueron determinadas mediante trabajo de laboratorio en muestras obtenidas del área, mientras que el módulo de la elasticidad, la relación de Poisson y el peso unitario se asignaron de acuerdo con los valores típicos para el material identificado en la zona (Hussain et al., 2019).</p> <p>La campaña exploratoria incluye la extracción de muestras en la parte alta, media y baja del talud, los resultados de los laboratorios exhiben un comportamiento homogéneo, por lo que los valores medios son seleccionados para la clasificación del material de la zona inestable. En la Tabla 23 se presentan los resultados de los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y humedad natural, y en la Tabla 24 se presentan los parámetros de resistencia, el peso unitario y constantes de deformación.</p>	

CASO 9

Tabla 23. Distribución granulométrica, límites de Atterberg y humedad natural, para la arena

Granulometría			Clasificación USCS	Humedad natural (%)	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)					
32.2	66.6	1.2	SP	6.44	60	21	30

Fuente: Modificado de Hussain et al. (2019)

Tabla 24. Parámetros geotécnicos caso 9.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Arena	Granular	31	20	20.5	20	0.28

Fuente: (Hussain et al., 2019)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

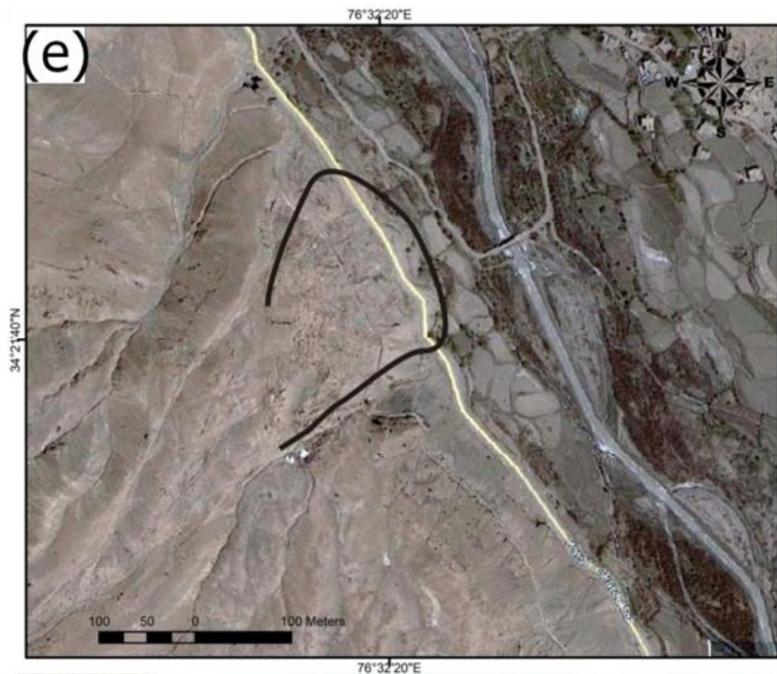


Figura 50. Planta general del deslizamiento, caso 9. (Hussain et al., 2019)

CASO 9

PERFIL

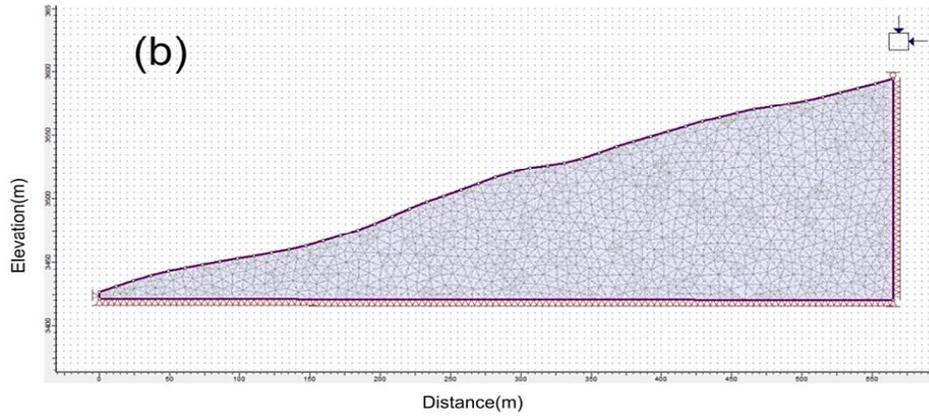


Figura 51. Cortes principales, caso 9. (Hussain et al., 2019)

MODELADO

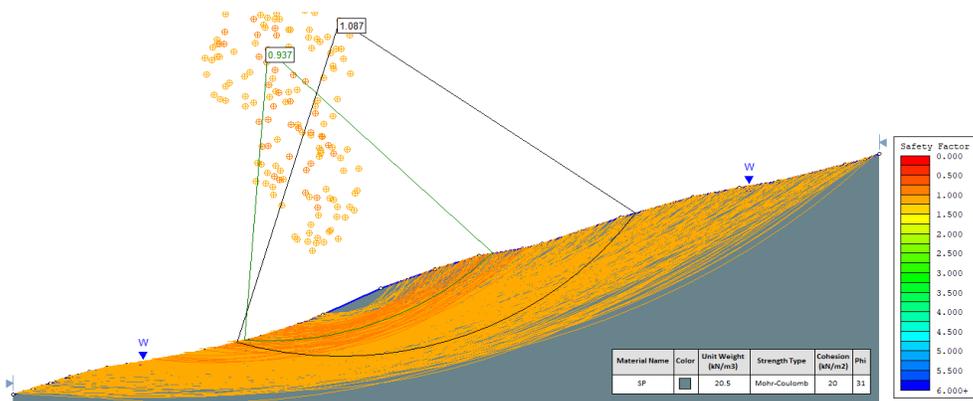


Figura 52. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 9. Fuente Propia

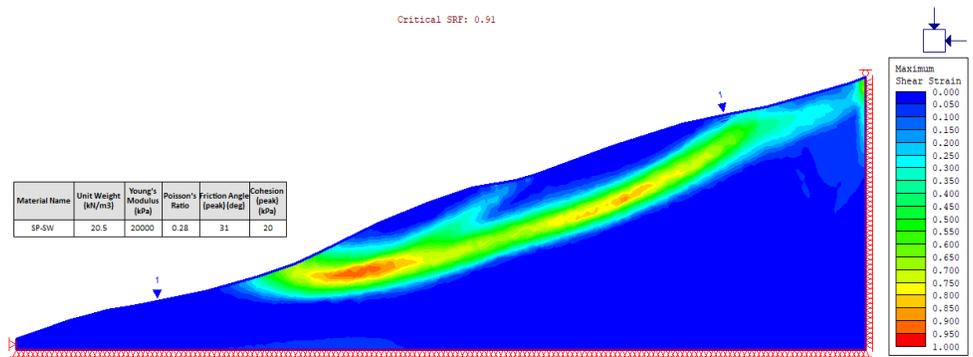


Figura 53. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 9. Fuente Propia

CASO 9

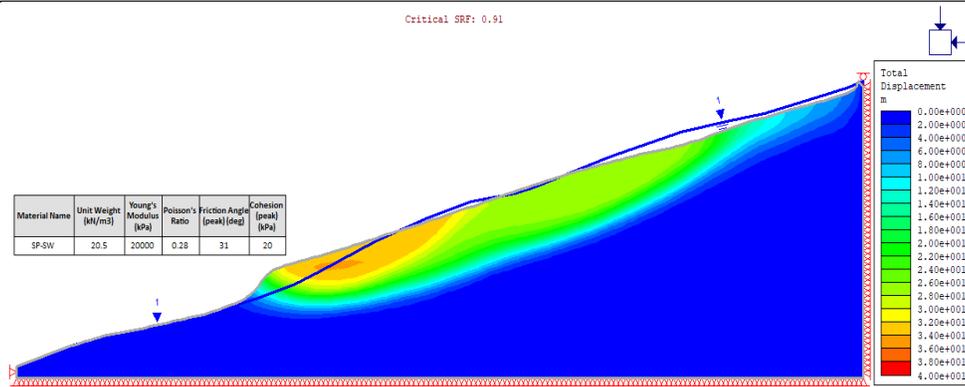


Figura 54. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento (Phase 2) Caso 9. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Se aplicó el método de equilibrio límite de Bishop y Janbu, de este análisis de estabilidad realizado en SLIDE se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 0.94 por método de Bishop, el cual se asocia a una superficie de falla que se desarrolla en la parte media-baja del talud, sin embargo, se observan potenciales movimientos en la longitud total del perfil con factores de seguridad ligeramente superiores a 1.0, esto permite considerar que el terreno en general se encuentra un estado de equilibrio límite.

Del mismo modo, el resultado del análisis numérico deja ver que los esfuerzos cortantes máximos se ubican desde la parte media de la ladera hasta la cresta, de forma paralela a la superficie, por lo que es posible describir el tipo de movimiento planar observado en campo, con desplazamientos de hasta 4.5 m, como se muestra en la Figura 54. El factor de reducción encontrado en Phase 2 es de 0.91, muy similar al factor de seguridad, lo que describe la misma respuesta del modelo frente a los dos tipos de análisis exhibiendo la falla del mismo.

La saturación del medio y los procesos de excavación realizados en la zona, disminuyen la resistencia al corte del material, que incluso en estado natural se considera suelto y frágil, generando el desplazamiento obtenido de los análisis estáticos. El nivel freático considerado en superficie afecta significativamente el resultado del evento, en condición seca la falla no se hubiera presentado.

Adicionalmente, Hussain et al. (2019) enfatizan en la influencia de los parámetros geotécnicos en la inestabilidad, resaltan que el suelo arenoso pobremente gradado, debido a la cantidad de vacíos

CASO 9

y la cantidad de contactos entre partículas granulares, que además facilitan la movilización de agua, disminuyen la resistencia y son más susceptibles a deslizarse. En cuanto al límite líquido calculado en la fracción fina, así como el límite de plasticidad, precisan que son mayores que los de otros materiales encontrados en laderas más estables.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 25. Resultados caso 9.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Granular	31	20	20.5	18°	0.94	0.91

Fuente: Hussain et al. (2019) y propia.

10. Análisis de estabilidad del deslizamiento Portalet en los Pirineos.

CASO 10	
TÍTULO ORIGINAL:	3D STABILITY ANALYSIS OF THE PORTALET LANDSLIDE USING FINITE ELEMENT METHOD
UBICACIÓN / AÑO:	Pirineos central, España /2004
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El deslizamiento Portalet, es un deslizamiento activo muy lento, ubicado en la zona central española de los pirineos, evidenciado en el 2004 después de la construcción de un parqueadero en la pata de la ladera, el cual tiene 380 m de largo y 290 m de ancho.

CASO 10	
	En general, el perfil de la zona cuenta con un depósito coluvial ubicado sobre un perfil de meteorización de esquisto. El nivel freático se encontró entre el coluvión y el esquisto meteorizado.
GEOLOGÍA	<p>La zona de estudio cuenta con formaciones de la edad paleozoica compuestas por esquistos, esquistos con niveles de arena y caliza y depósitos cuaternarios coluviales, residuales y transportados de origen aluvial.</p> <p>La sección transversal del deslizamiento tiene cuatro niveles, una capa superior correspondiente a un depósito coluvial, seguido por una capa de grava, arcilla arenosa y limo provenientes de esquistos, el tercer nivel es un esquisto fragmentado con un bajo grado de meteorización y el lecho rocoso correspondiente al nivel más profundo está compuesto por esquistos y caliza.</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento rotacional.
POSIBLES CAUSAS	Excavación en la pata del talud.
TIPO DE SUELO:	Suelo residual proveniente de esquisto.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Desde 2004 se ha llevado una campaña geotécnica y geofísica para la caracterización geométrica e hidrogeomecánica del deslizamiento. (Bru et al., 2015). Considerando los resultados de dichas investigaciones fueron definidos los parámetros para cada capa, como se muestra en la Tabla 26.</p> <p>De acuerdo con Bru, Fernández, García, Herrera, & Fernánde (2015) el material en donde se genera</p>	

CASO 10

la falla corresponde a limo y arcilla arenosa con algo de grava.

Tabla 26. Parámetros geotécnicos caso 10.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Depósito coluvial	Cohesivo	30	10	21	19.5	0.3
Esquisto meteorizado	Cohesivo	22	10	21.7	19.5	0.3
Esquisto fragmentado	Roca	23	173	21.7	40	0.28
Esquisto sano	Roca	31	640	27.7	4000	0.2

Fuente: (Bru et al., 2015)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

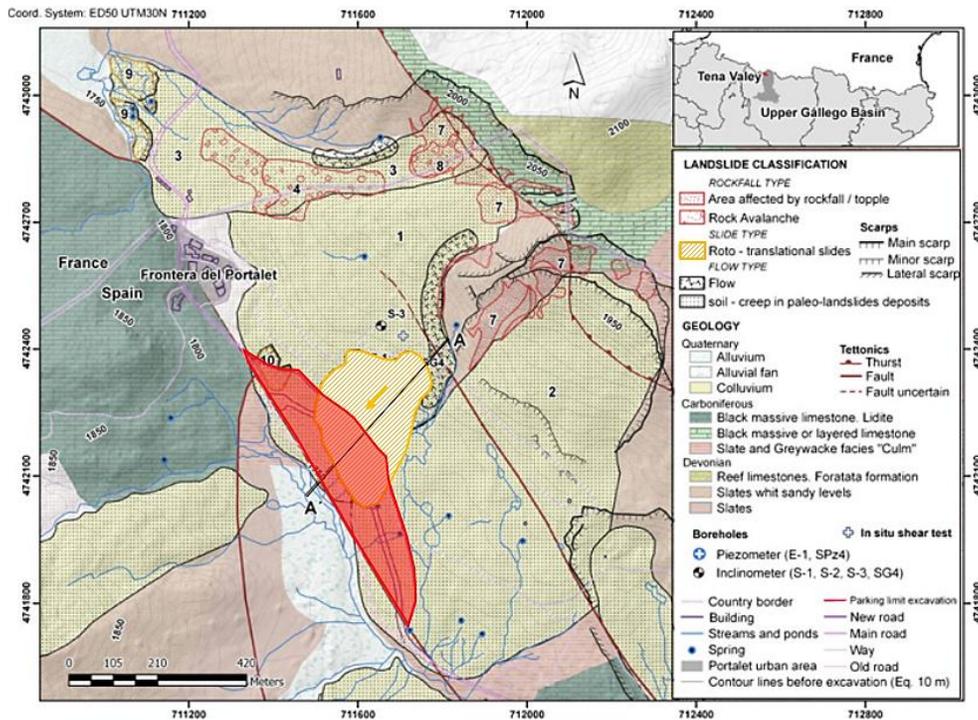


Figura 55. Planta general del deslizamiento, caso 10. El área sombreada amarilla corresponde al deslizamiento y el área sombreada roja equivale al área de excavación del parqueadero. (Bru et al., 2015)

CASO 10

PERFIL

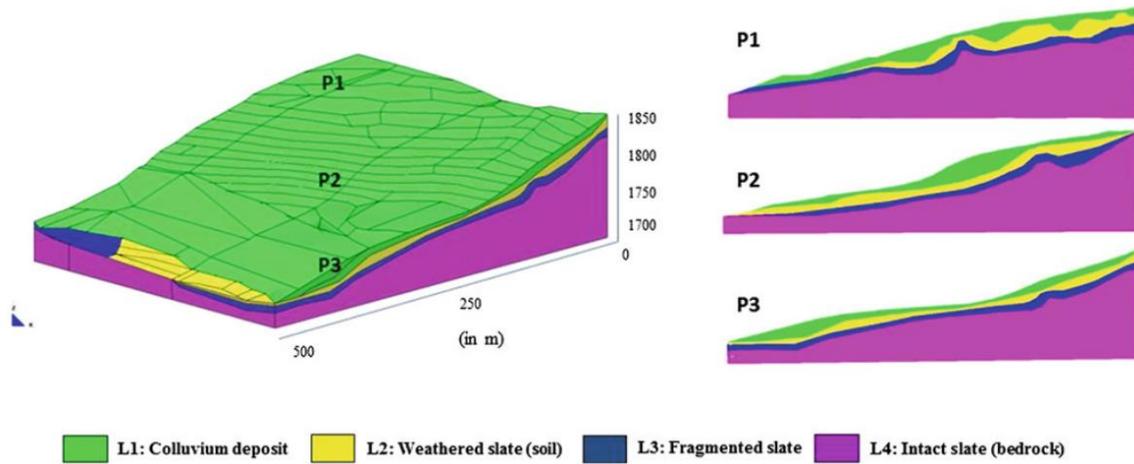


Figura 56. Cortes principales, caso 10. La sección transversal P2 equivale al corte A-A' en la planta general (Ver Figura 55). (Bru et al., 2015)

MODELADO

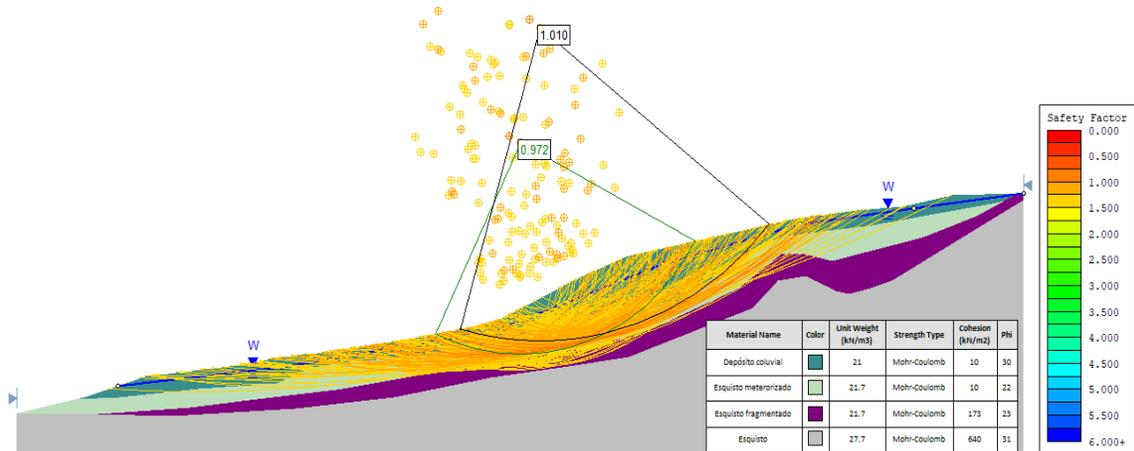


Figura 57. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 10. Corte A-A' en Figura 55 y sección P2 en la Figura 56. Fuente Propia

CASO 10

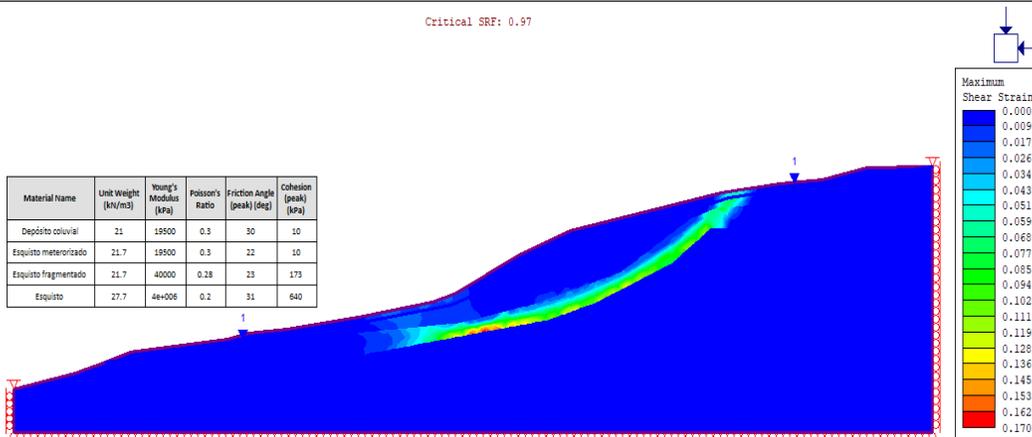


Figura 58. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 10. Fuente Propia

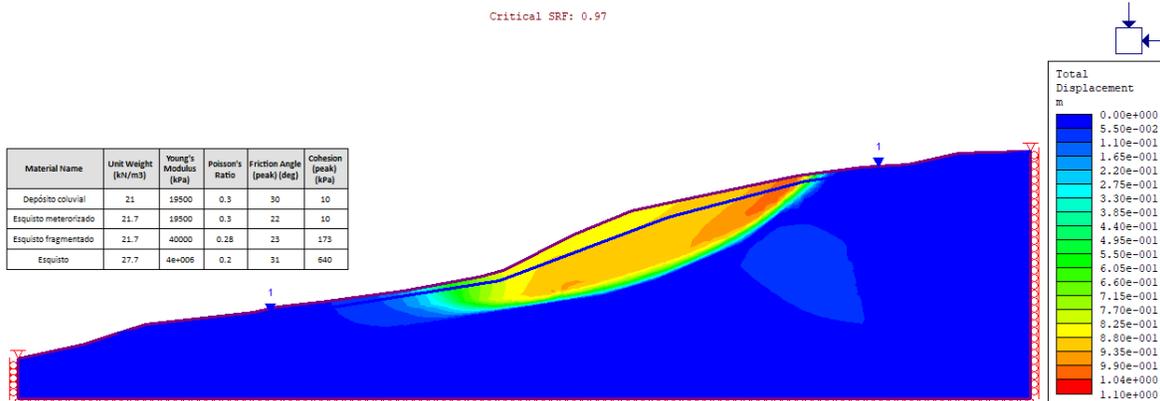


Figura 59. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 10. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Se realizó un análisis de estabilidad mediante los métodos de equilibrio límite de Bishop y Janbu, encontrando que el menor factor de seguridad corresponde a 0.97, usando el método de Janbu, lo que evidencia que antes de la construcción de los parqueaderos, existía en la ladera una condición de inestabilidad, que afectaba especialmente la zona media.

En cuanto al resultado de la modelación numérica del caso de estudio, este permite localizar los esfuerzos cortantes máximos en la capa de suelo residual, justo en el sector donde se desarrolla la superficie de la masa inestable, por lo que se considera que el material compuesto por partículas de grava a arcilla corresponde al medio en el cual se genera la falla, y analógicamente con el movimiento observado en campo, presenta una cinemática rotacional. El factor de reducción

CASO 10

encontrado tiene un valor de 0.97, igual al factor de seguridad, lo que evidencia la consistencia entre los dos diferentes análisis y describe la falla que ocasiono el deslizamiento.

Se considera que los resultados de las modelaciones por ambos métodos tienen una buena correlación con la situación real del deslizamiento y que además de la acción antrópica que juega un papel fundamental en la detonación del movimiento, la posición del nivel freático influye en gran medida en la inestabilidad del talud, ya que en condición seca la falla no se hubiera presentado.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 27. Resultados caso 10.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	22	10	21.7	12°	0.97	0.97

Fuente: Bru et al. (2015) y propia.

11. Deslizamientos en las cuencas del noreste margen de la meseta tibetana.

CASO 11	
TÍTULO ORIGINAL:	ROTATIONAL-TRANSLATIONAL LANDSLIDES IN THE NEOGENE BASINS AT THE NORTHEAST MARGIN OF THE TIBETAN PLATEAU
UBICACIÓN / AÑO:	Meseta Tibetana, Qinghai / 2016
DESCRIPCIÓN DEL CASO	Al noroeste de la meseta tibetana, se realizó un estudio por parte de Xina, Liub, Wua, Lianga, & Linc (2018), en el que se realiza el análisis de diferentes deslizamientos, para

CASO 11	
	comprender el mecanismo de la falla rotacional-traslacional, la distribución espacial del material y la deformación a la que se ve expuesto el suelo durante los eventos que se presentan en la zona. Estos movimientos evidencian la influencia de la erosión del río, actividad tectónica e incremento en la presión de poros. El caso seleccionado se encuentra en el valle del Río Wei.
GEOLOGÍA	La zona en la que se ubican de los deslizamientos de tierra rotacionales-traslacionales predominantemente se compone de lutitas neógenas sobreconsolidadas con alto contenido de arcilla (James, 2001).
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Rotacional – Traslacional.
POSIBLES CAUSAS	Esfuerzos tectónicos y la erosión.
TIPO DE SUELO:	Suelos residuales arcilloso proveniente de Lutitas.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Con base en los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados en las muestras obtenidas de la zona en que se presentó el deslizamiento, Xina, Liub, Wua, Lianga, & Linc (2018) definieron los parámetros de la Tabla 28 con el fin de realizar la modelación numérica de la investigación.</p> <p>Dentro de las propiedades índice, en los deslizamientos que se presentaron en la zona, el límite líquido del material tiene un valor medio de 52 % y el límite plástico de 27 %, y en cuanto a la relación de Poisson a la que no se hace referencia en el documento de Xina, Liub, Wua, Lianga, & Linc (2018), el valor se asignó de acuerdo con lo expuesto en el numeral 1.1.1.3.</p>	

CASO 11

Tabla 29. Parámetros geotécnicos caso 11.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Lutitas con alto contenido de arcilla	Cohesivo	21	102.5	21.3	3*	0.35*

*Se seleccionan los valores mínimos para Lutita (Bowles, 1997)

Fuente: (Xina, Liub, Wua, Lianga, & Linc, 2018)

PERFIL

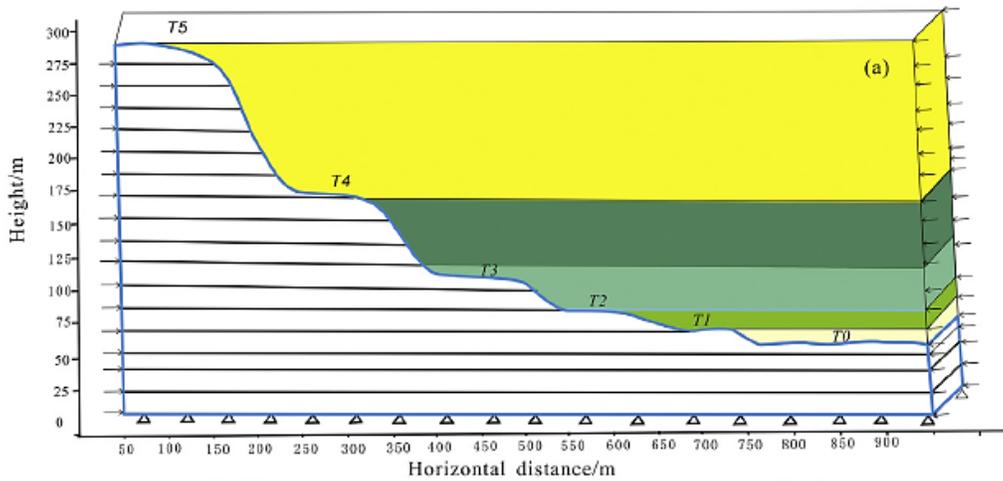


Figura 60. Cortes principales, caso 11. (Xina, Liub, Wua, Lianga, & Linc, 2018)

CASO 11

MODELADO

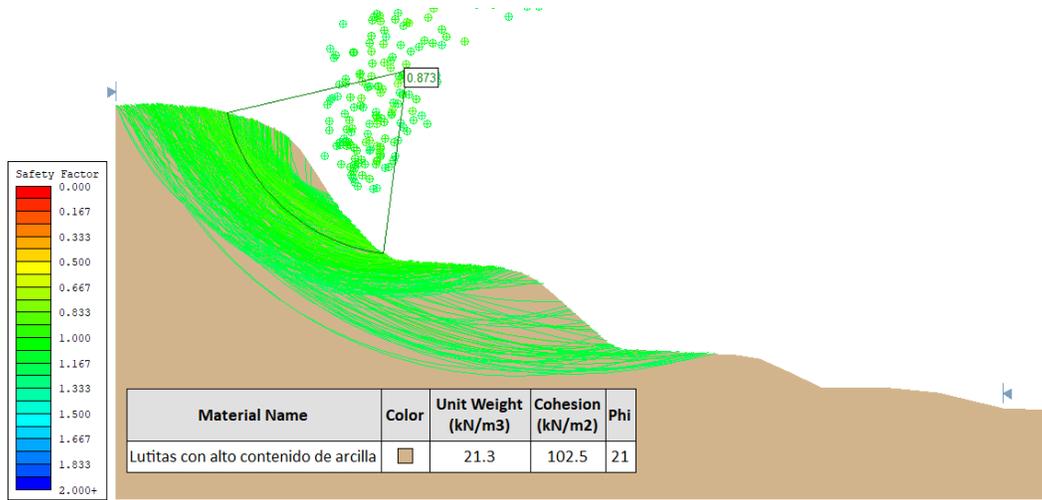


Figura 61. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 11. Fuente Propia

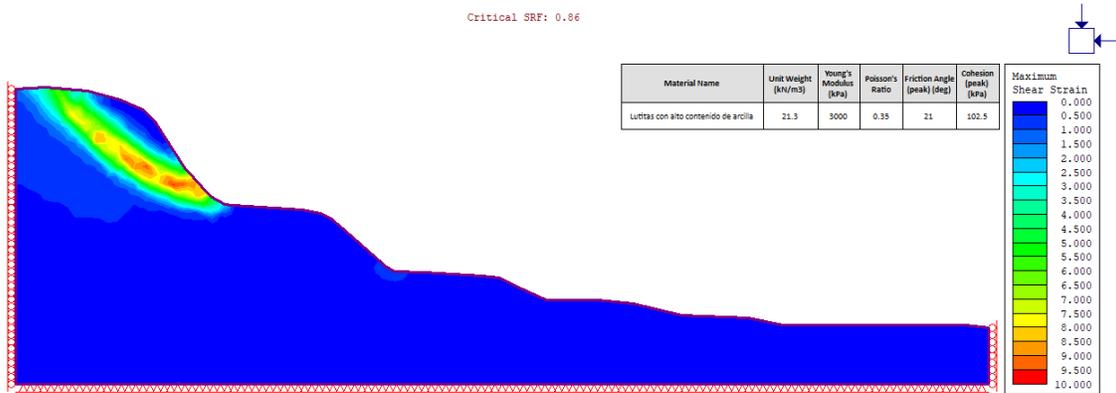


Figura 62. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 11. Fuente Propia

CASO 11

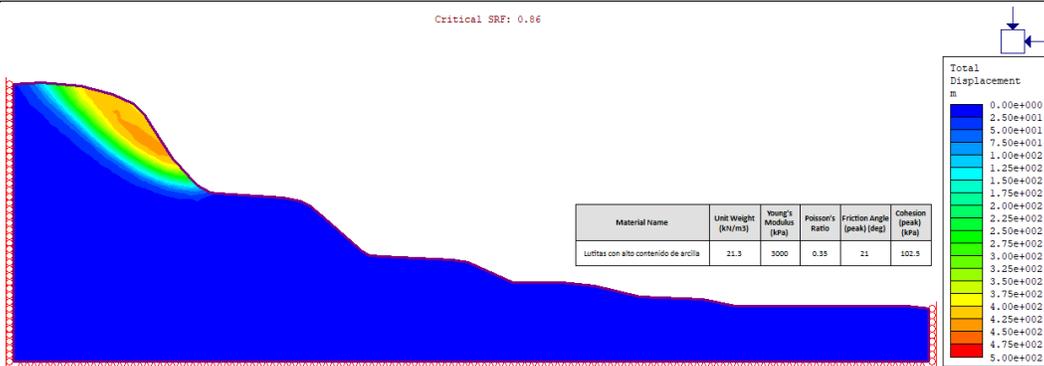


Figura 63. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 11. Fuente Propria

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

De acuerdo con el resultado del análisis de estabilidad, se encontró que la zona alta del talud corresponde al área de mayor inestabilidad mostrando diferentes superficies de falla asociadas a factores de seguridad menores que 1.0, aún sin tener en cuenta el nivel freático, el cual no fue identificado para el momento del deslizamiento. El factor de seguridad mínimo tiene un valor de 0.873, el cual fue encontrado mediante la aplicación del método de Bishop, con una magnitud similar a la encontrada en el método de Janbu.

La condición mencionada es corroborada mediante el análisis de elementos finitos, el cual permite identificar los máximos esfuerzos de corte en la parte alta de la ladera, lo que puede generar una serie de deslizamientos a lo largo de todo el talud. El factor de reducción de resistencia tiene un valor de 0.86 muy similar al factor de seguridad, lo que asemeja la respuesta del modelo frente al análisis numérico y determinístico.

Los resultados se consideran consistentes entre ellos, y además reflejan el comportamiento de la masa terrea observada en campo. Se considera que la topografía del talud es un factor condicionante indispensable en la inestabilidad del mismo.

CASO 11

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 30. Resultados caso 11.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	21	102.5	21.3	34%	0.87	0.86

Fuente: Xina, Liub, Wua, Lianga, & Linc (2018) y propia.

12. Evaluación de la estabilidad de un talud de alta pendiente en un deslizamiento en Turquía.

CASO 12

TÍTULO ORIGINAL:	STABILITY ASSESSMENT OF HIGH-STEEP CUT SLOPE DEBRIS ON A LANDSLIDE (GUMUSHANE, NE TURKEY)
UBICACIÓN / AÑO:	Gumushane, Turquía / 2011
DESCRIPCIÓN DEL CASO	La ciudad de Gumushane está asentada en el valle del río Harsit en el noreste de Turquía, donde uno de los principales problemas ha sido la falta de zonas aptas para el asentamiento, esto ocasiona la modificación del paisaje. En este caso las laderas se ven afectadas, por la necesidad de excavaciones para el establecimiento de nuevas áreas urbanas, lo que a su vez puede desencadenar inestabilidades locales de taludes. (Kaya et al., 2016)

CASO 12	
	El deslizamiento de estudio se desarrolla en la escuela secundaria Gumushane Imam-Hatip, cuyas instalaciones presentan grietas y otros daños estructurales asociados a un movimiento en masa activo, en el cual se planean excavaciones que se prevé pueden intensificar los desplazamientos y sus consecuencias. (Kaya et al., 2016)
GEOLOGÍA	Las unidades litológicas en la zona de estudio están representadas por grupos de rocas graníticas, volcánicas y sedimentarias. La unidad litológica más antigua de la región y sus alrededores es el granitoide de Gumushane formado entre el periodo pérmico y el carbonífero (Topuz, et al., 2010). Esta unidad se superpone por las rocas sedimentarias denominadas Liassic, intercaladas por basalto, andesita y piroclastos, además de caliza. Superficialmente se identifican bloques y gravas principalmente de granito, con una presencia predominante de arcilla, limo y arena. (Kaya et al., 2016)
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento traslacional
POSIBLES CAUSAS	Intervención antrópica por modificación de los taludes y lluvias.
TIPO DE SUELO:	Suelos residuales de comportamiento cohesivo.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
La caracterización de los materiales que conforman el terreno del área en donde se localiza el evento, fue definida por Kaya, Alemdağ, Dağ, & Gürocak (2016), de acuerdo con los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, que fueron ejecutados en muestras inalteradas recuperadas de cuatro perforaciones. En la Tabla 32 se presenta el promedio de los resultados de distribución granulométrica y límites de Atterberg, los cuales fueron realizados en el material de falla. En la Tabla 31 se presentan los parámetros de resistencia, de elasticidad y el peso unitario,	

CASO 12

requeridos para la modelación de los materiales. Los coeficientes elásticos se definieron de acuerdo con la sección 1.1.1.3. Para la roca madre los parámetros de resistencia se tomaron de Castillo & Redolledo (2018).

Tabla 32. Resultados de los ensayos de clasificación de la capa de Arena arcillosa a grava arcillosa

Granulometría		Clasificación USCS	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Retenido tamiz No. 4 (%)	Pasa tamiz No. 200 (%)				
39.7	21.3	SC-GC	47	20	27

Fuente: (Kaya et al., 2016)

Tabla 33. Parámetros geotécnicos caso 12.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Arcilla	Cohesivo	16	26.3	20.3* 19.8	10	0.4
Arena arcillosa a grava arcillosa	Granular	24	10.2	21.8* 20.95	60	0.27
Granodiorita	Roca	45	15000	26	46000	0.23

*Peso unitario saturado

Fuente: (Kaya et al., 2016)

CASO 12

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

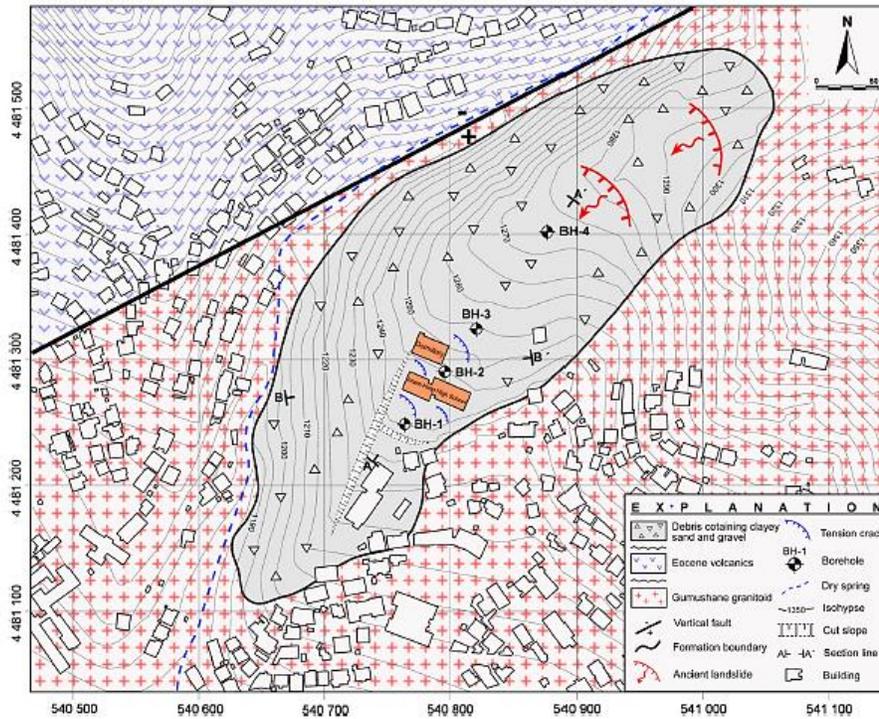


Figura 64. Planta general del deslizamiento, caso 12. (Kaya et al., 2016)

PERFIL

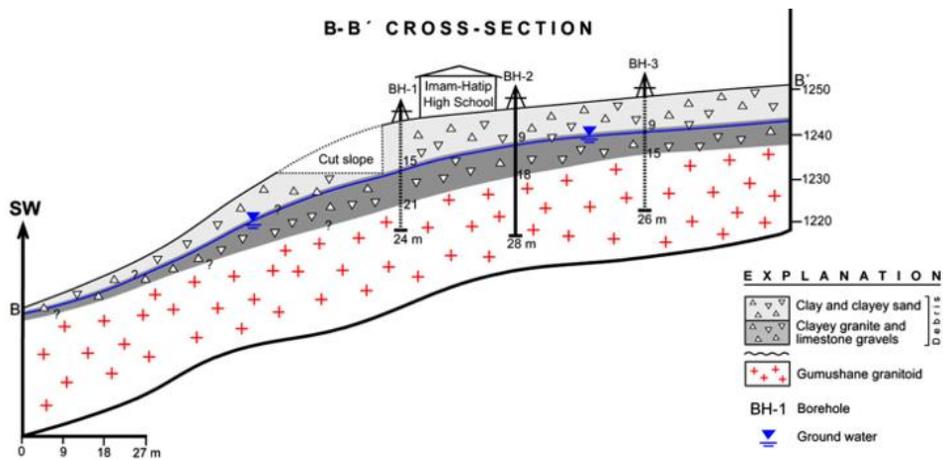


Figura 65. Cortes principales, caso 12. (Kaya et al., 2016)

CASO 12

MODELADO

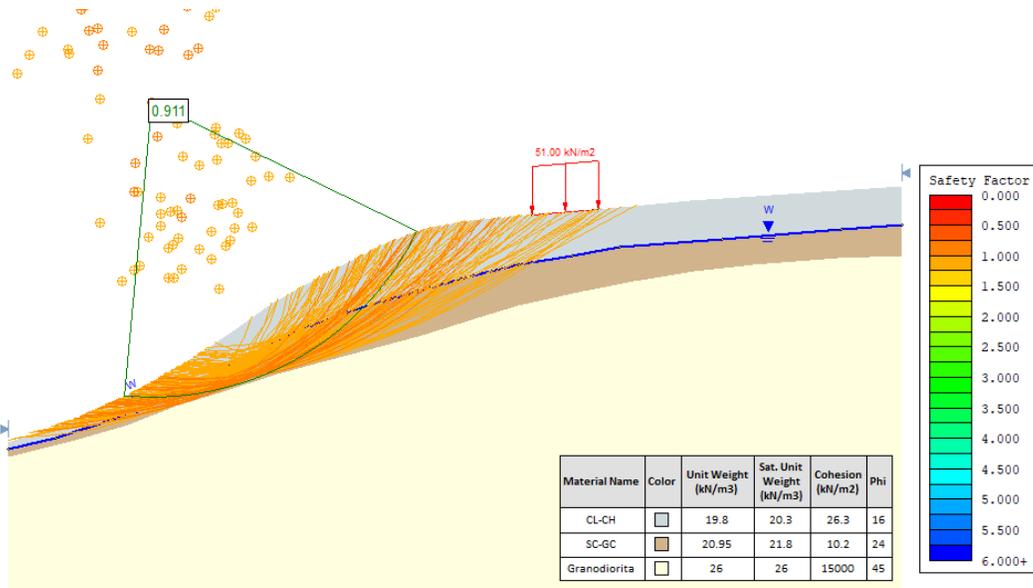


Figura 66. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 12. Fuente Propia

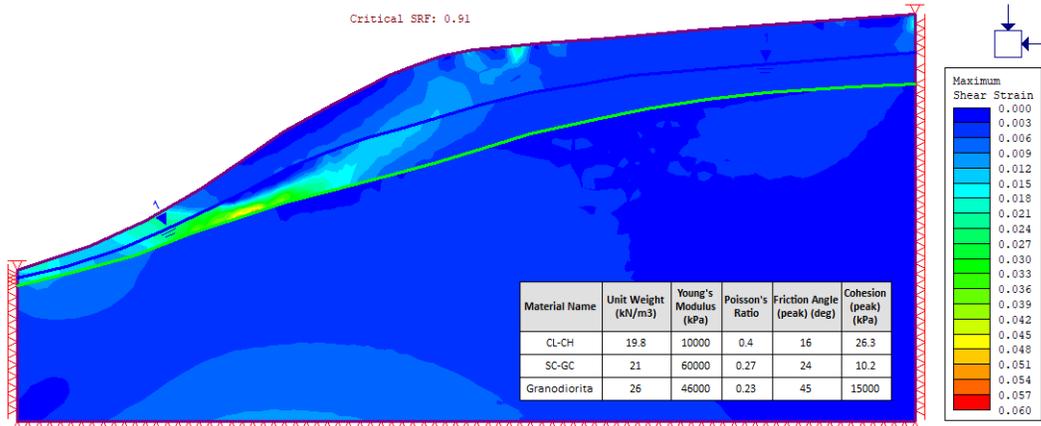


Figura 67. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 12. Fuente Propia

CASO 12

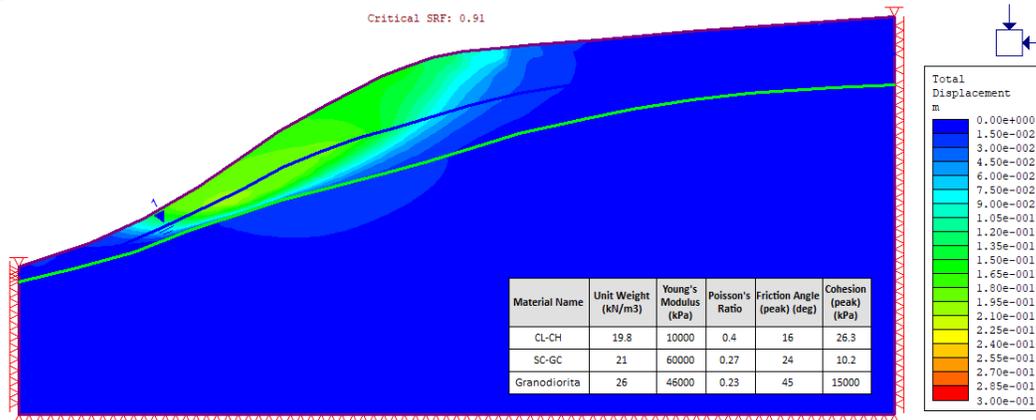


Figura 68. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento (Phase 2) Caso 12. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Del análisis de estabilidad para la ladera de este caso, realizado por los métodos de Bishop y Janbu, se encontraron varias superficies de falla circulares que involucran la sección más inclinada del corte transversal en su totalidad, el menor factor de seguridad encontrado es de 0.91 y fue obtenido mediante la aplicación del método de equilibrio límite de Janbu. El análisis por elementos finitos muestra la distribución de los esfuerzos máximos de forma coherente con la geometría de las fallas encontradas en SLIDE y localiza el esfuerzo con la mayor magnitud, en donde se supera la resistencia disponible del material residual, en el contacto con la roca madre (Ver Figura 67). El factor de reducción de resistencia al corte tiene la misma magnitud que el factor de seguridad mínimo y las zonas de falla que exhiben ambos modelos es la misma, esto indica que los resultados de los dos análisis son consistentes.

Adicionalmente, se observó que los movimientos rotacionales obtenidos en las modelaciones, cuyos desplazamientos tienen valores de hasta 20 cm, cuando el factor de reducción de resistencia es crítico, como se muestra en la Figura 68, reflejan el comportamiento real de la masa térrica que en consecuencia del deslizamiento lento activo que ha generado grietas severas y otros daños estructurales a las instalaciones educativas.

Considerando que aún en condición seca el talud presenta falla, se establece que el contacto entre los materiales que conforman el perfil, particularmente el contacto entre el suelo y la roca y la pendiente de la estratificación en la zona de falla, son los principales factores que contribuyen a la existencia del deslizamiento.

CASO 12

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 34. Resultados caso 12.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Granular	24	10.2	21	30%	0.91	0.91

Fuente: Kaya, Alemdağ, Dağ, & Gürocak (2016) y propia.

13. Estabilización del deslizamiento de Cortiana en el noreste de Italia.

CASO 13	
TÍTULO ORIGINAL:	FLOATING ANCHORS IN LANDSLIDE STABILIZATION: THE CORTIANA CASE IN NORTH-EASTERN ITALY
UBICACIÓN / AÑO:	Cortiana, Vicenza, Italia / 2010
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El deslizamiento de Cortiana, es un deslizamiento reactivado después de las fuertes lluvias ocurridas en la zona, en noviembre de 2010. El deslizamiento es considerado complejo, con una componente rotacional y otra traslacional y tiene un volumen de 200.000 m ³ . Como resultado del movimiento, la estabilidad de una vía se vio afectada y adicionalmente, el flujo generado que se depositó en la pata del talud, genero daños en las viviendas más

CASO 13	
	<p>cercanas.</p> <p>Los materiales involucrados incluyen 20 m de depósitos coluviales y materiales provenientes de antiguos deslizamientos, ubicados en una pendiente media de 40°. La superficie del deslizamiento se encontró entre los 15 m y 20 m de profundidad, en donde se localiza una capa delgada de material arcilloso. Después del deslizamiento se instrumentó la zona encontrando que en 11 meses la masa se había deslizado hasta 1.5 m.</p>
GEOLOGÍA	<p>El depósito superficial del cuaternario corresponde a coluviales de litología homogénea, aunque en la zona también es común la presencia de depósitos heterogéneos con bloques en matriz arcillosa. Debajo del depósito coluvial se encuentran unidades compuestas por areniscas y rocas volcánicas. Entre el coluvión y la roca, se identificó una capa delgada de arcilla roja, originada de la meteorización de la roca madre. Justo sobre la zona del deslizamiento se localiza un sistema de fallas, normales e inversas,</p>
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento complejo (rotacional-traslacional)
POSIBLES CAUSAS	Lluvias
TIPO DE SUELO:	Residual arcilloso.

CASO 13

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

Los parámetros definidos para la modelación del deslizamiento, los cuales se muestran en la Tabla 35, corresponden al análisis de los resultados de laboratorios y retrocálculos hechos por Bisson, Cola, Tessari, & Floris (2015). La relación de Poisson se asignó a cada material de acuerdo con el numeral 1.1.1.3, considerando que el lecho rocoso corresponde a arenisca y los estratos superficiales son arcillosos.

Tabla 35. Parámetros geotécnicos caso 13.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Coluvión	Cohesivo	30	10	20	500	0.4
Arcilla	Cohesivo	20	8	20	500	0.4
Lecho rocoso	Roca	36	150	24	8000	0.31

Fuente: (Bisson et al., 2015)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

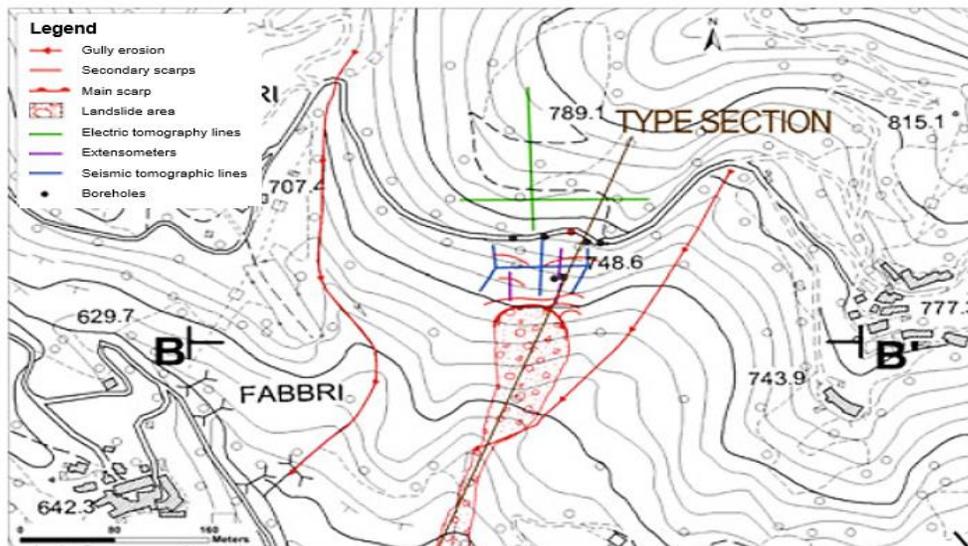


Figura 69. Planta general del deslizamiento, caso 13. (Bisson et al., 2015)

CASO 13

PERFIL

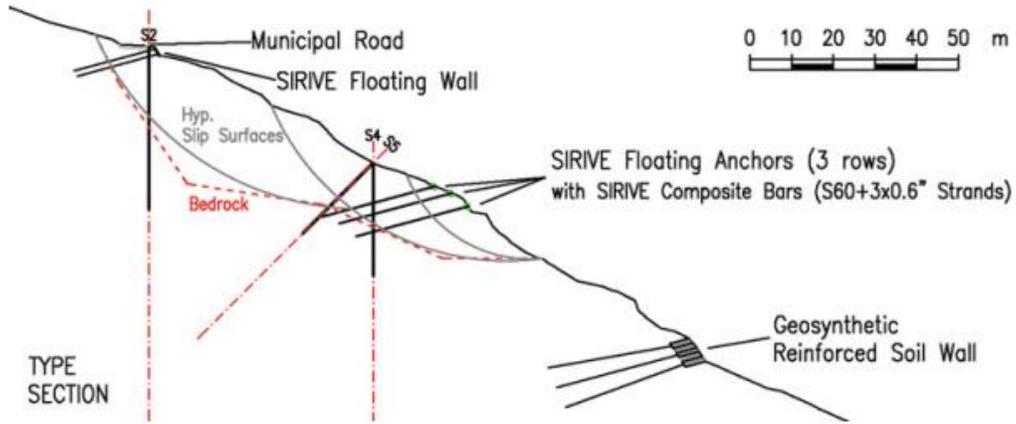


Figura 70. Cortes principales, caso 13. (Bisson et al., 2015)

MODELADO

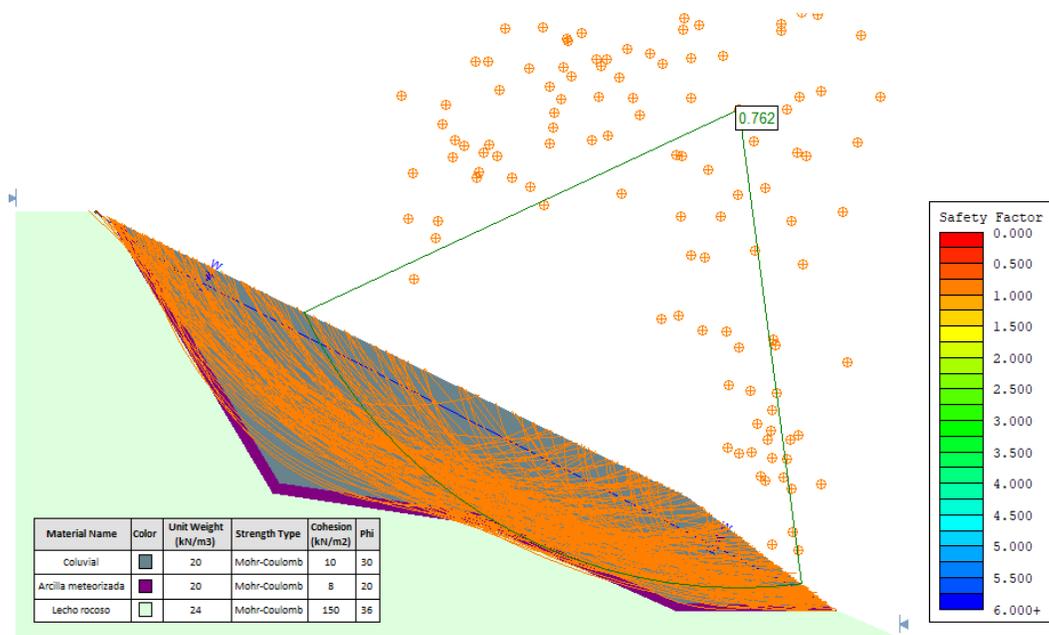


Figura 71. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 13. Fuente Propia

CASO 13

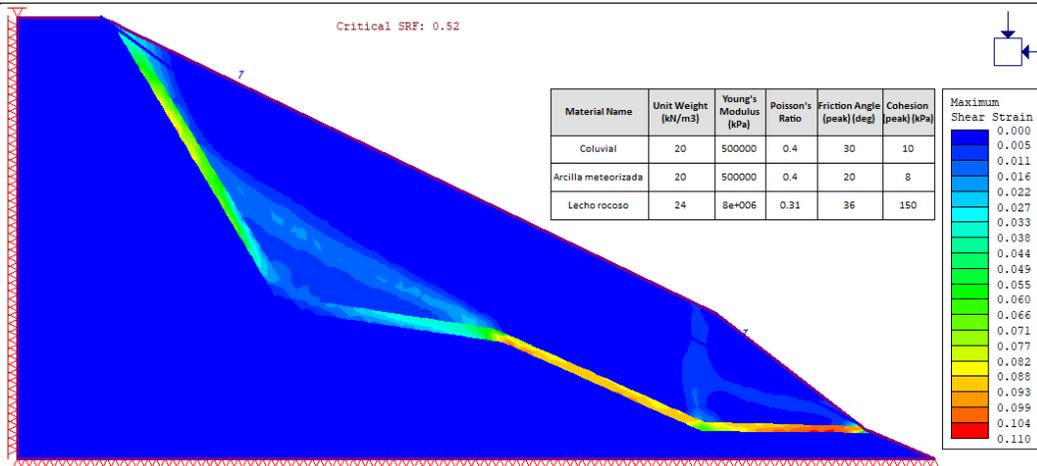


Figura 72. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 13. Fuente Propia

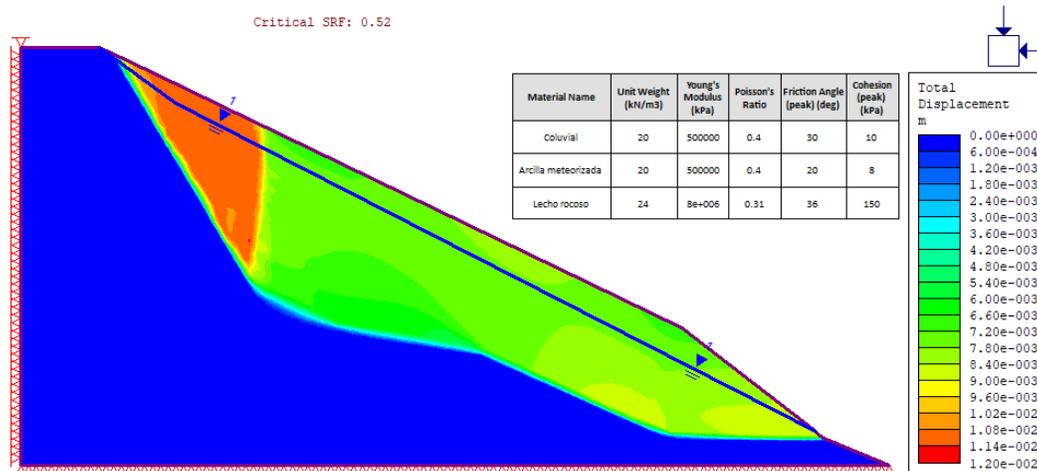


Figura 73. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 13. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El caso fue analizado mediante el método de equilibrio límite de Bishop y Janbu, encontrando un factor de seguridad mínimo de 0.76 con el método de Janbu. La superficie de la falla se localiza en la parte media baja de la ladera, sin embargo, el resultado del análisis muestra que los estratos cohesivos generan una condición de inestabilidad en la totalidad el talud, ya que se generan múltiples superficies de falla en donde la resistencia del material es superada.

Del mismo modo, del análisis por elementos finitos, se reconoce el incremento en el esfuerzo máximo tanto en el estrato coluvial como en el estrato arcilloso, sin embargo los mayor esfuerzos

CASO 13

se presentan en la capa delgada en contacto con la roca, adicionalmente del análisis de estabilidad se observa que todas las superficies de falla están relacionadas con esta capa de arcilla, por lo que la generación de la falla se considera en este material. El factor de reducción obtenido en el análisis numérico tiene un valor de 0.52.

Los valores del factor de seguridad y el factor de reducción de resistencia se consideran relativamente consistentes con una magnitud baja, lo que obedece a que antes del deslizamiento que provoco los daños más significativos, la masa hacia parte de un deslizamiento preliminar, además de ubicarse sobre un sistema de fallas geológicas, por lo que probablemente una condición de inestabilidad ya se estaba presentando en el talud con anterioridad; incluso después del evento, los equipos de monitoreo registraron desplazamientos de hasta 1.5 m, razón por la que la estabilización objeto de la investigación se llevó a cabo, además de lo anterior el nivel freático también contribuye con la inestabilidad del talud.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 36. Resultados caso 13.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	20	8	20	30	0.76	0.52

Fuente: Bisson et al. (2015) y propia.

14. Estudio del caso en un deslizamiento en el sur de Italia.

CASO 14

TÍTULO ORIGINAL:	FLOW-TYPE LANDSLIDES IN PYROCLASTIC SOILS ON
-------------------------	--

CASO 14	
	FLYSCH BEDROCK IN SOUTHERN ITALY: THE BOSCO DE' PRETI CASE STUDY
UBICACIÓN / AÑO:	Campania, Sur de Italia / 2005
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El caso describe principalmente el deslizamiento ocurrido en el área de Bosco de' Preti, ubicada al sur de Italia, en donde se desencadenó un deslizamiento superior que generó tres deslizamientos de flujos en la pata de la ladera, la cual cuenta con pendientes entre 10° y 20°. El factor detonante del evento se relaciona con las fuertes lluvias del 4 de marzo de 2005. Este movimiento considerado complejo, tiene una altura total de aproximadamente 35 m y una longitud de 180 m, la zona de iniciación del deslizamiento tiene una inclinación que varía entre 12° y 30° y una altura aproximada de 15 m.
GEOLOGÍA	La zona del deslizamiento se encuentra en el sector noreste de Campania, se presenta una morfología con crestas y colinas principalmente compuestas de rocas carbonatadas. Toda la zona se encuentra cubierta por varios metros de depósitos piroclásticos, constituidos por cenizas y piedra pómez, producto de las erupciones del volcán Somma-Vesubio. (Rolandi, 2000). El lecho de roca de carbonato (cretáceo) es parte de la unidad estratigráfica de Mts. Partenio y atraviesa las principales fallas regionales que originaron las secuencias estratigráficas profundas.
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento complejo, rotacional, traslacional y flujo.
POSIBLES CAUSAS	Temporada de lluvias.
TIPO DE SUELO:	Residual de comportamiento cohesivo

CASO 14

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

Para la modelación geológica geotécnica del deslizamiento, la investigación ejecutada por Santo et al. (2018) incluye siete perforaciones mecánicas, 4 SPT, 6 CPT, y muestras inalteradas para la ejecución de ensayos de laboratorio. De los resultados de los ensayos de clasificación (de acuerdo con la curva granulométrica presentada en el artículo), se considera que el depósito superficial de origen piroclástico tiene un tamaño predominante de arena, con densidad suelta según las observaciones en el sitio. El cuanto al depósito residual proveniente de la roca madre de tipo Marga, este tiene cerca del 40 % de partículas de tamaño limo y el 60% restante corresponde a arcilla, su límite líquido tiene un valor medio cercano a 1, mientras el límite plástico corresponde aproximado a 0. Los resultados del depósito profundo se seleccionaron teniendo en cuenta los valores medios de los tipos de arcilla encontrados en esta capa (arcilla amarilla y arcilla azul). En la Tabla 37 se resumen los parámetros geotécnicos considerados, los coeficientes elásticos se seleccionaron según lo descrito en el numeral 1.1.1.3.

Tabla 37. Parámetros geotécnicos caso 14.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Depósitos de origen piroclástico	Granular	37	0	12.11* 7.11	20	0.25
Arcilla residual de Marga	Cohesivo	22	8.8	17.8* 13.3	33	0.40

*Peso unitario saturado

Fuente: (Santo et al., 2018)

CASO 14

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

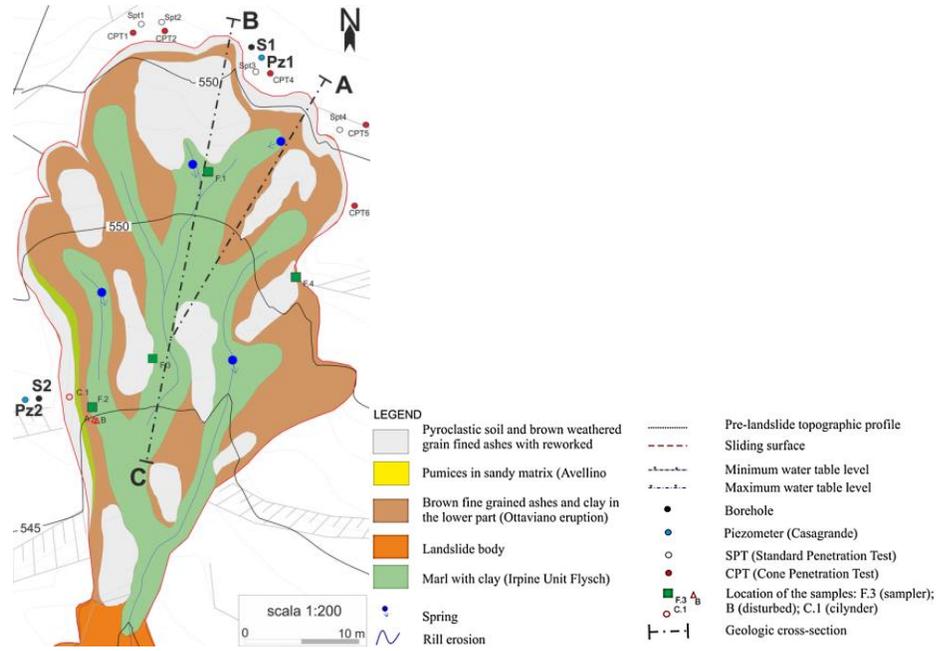


Figura 74. Planta general del deslizamiento, caso 14. (Santo et al., 2018)

PERFIL

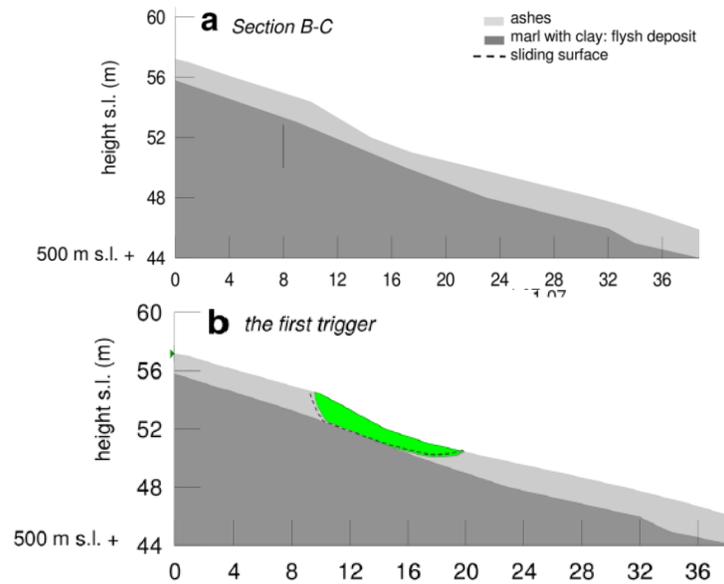


Figura 75. Cortes principales, caso 14. (Santo et al., 2018)

CASO 14

MODELADO

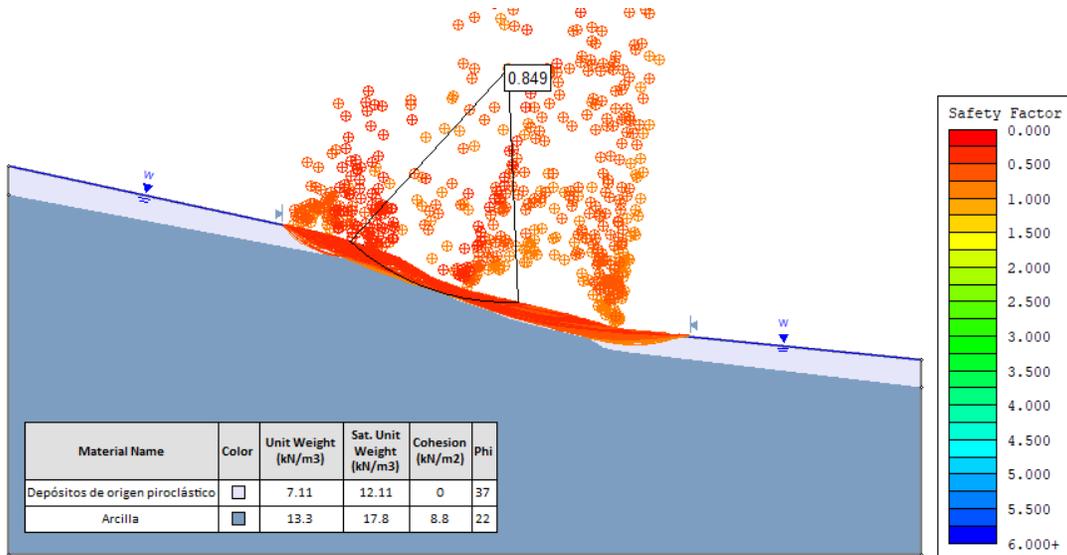


Figura 76. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 14. Fuente Propia

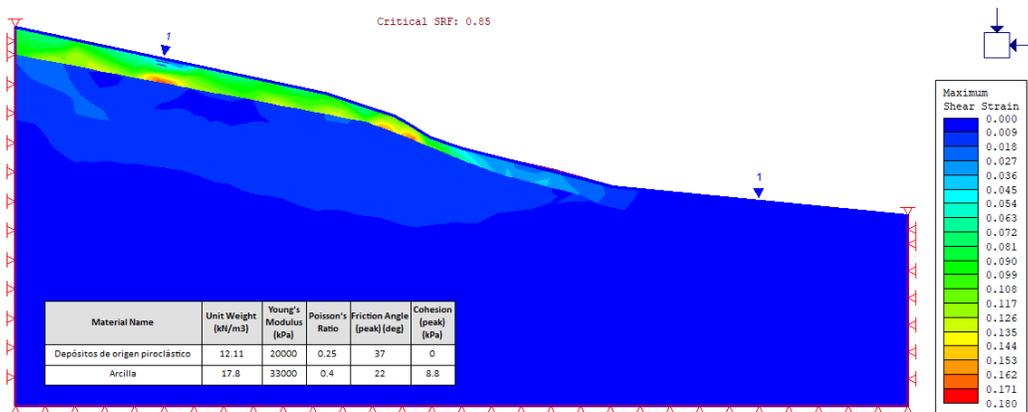


Figura 77. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 14. Fuente Propia

CASO 14

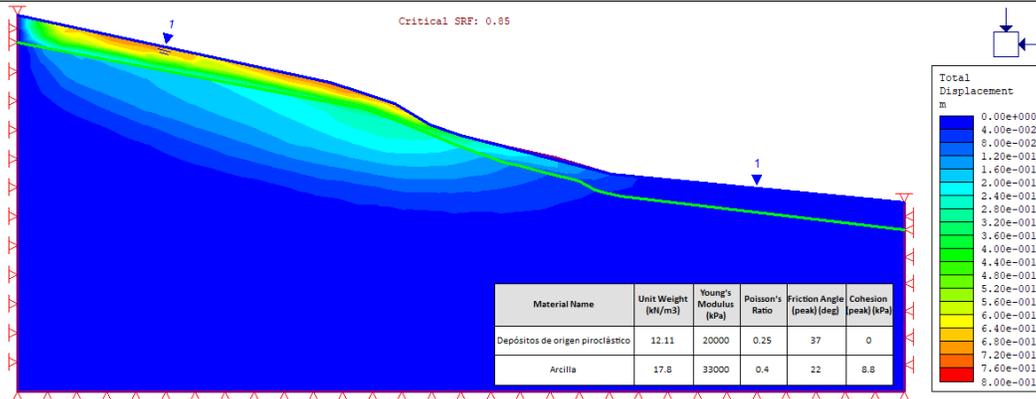


Figura 78. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 14. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El resultado del análisis de estabilidad de la zona de iniciación del deslizamiento, muestra múltiples superficies de falla asociadas a factores de seguridad menores que 1.0, las cuales se desarrollan principalmente en el material cohesivo de la sección transversal. El factor de seguridad mínimo tiene un valor de 0.85 y fue encontrado por el método de Janbu.

Así como con la aplicación del método de equilibrio límite, la modelación numérica evidenció la distribución de los esfuerzos máximos en el estrato superior. El factor de reducción de resistencia por este método se obtuvo con una magnitud de 0.85, igual al resultado obtenido en SLIDE, lo que indica la inestabilidad de la ladera, y dadas las condiciones pluviométricas de la zona, que saturaron el medio alterando el estado de esfuerzos, la falla fue ineludible, ocasionando el flujo de cenizas y arcilla en el sector bajo de la ladera. Por lo tanto, se considera que los resultados son consistentes con el proceso evidenciado en campo.

La posición del nivel freático es fundamental para el desarrollo de la falla, los autores mencionan que durante meses el grado de saturación de la capa superficial fluctuó en proporción a las lluvias. Durante las 2 semanas previas al evento desencadenante, cayeron 224 mm de lluvia y todo el depósito superficial se saturó por completo. Representando esta condición un factor predisponente a los deslizamientos de tierra. Dentro de los resultados de la investigación, también se encontró que la lluvia concentrada en 1 día puede modificar el factor de seguridad de 1.03 a menos de 1.

Se resalta la facilidad con que el incremento del nivel freático puede desencadenar fácilmente la falla en un suelo permeable poco profundo localizado sobre un suelo impermeable.

CASO 14

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 38. Resultados caso 14.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Cohesivo	22	8.8	17.8	21%	0.85	0.85

Fuente: Santo et al. (2018) y propia.

15. Estudio de deslizamientos en temporada de lluvias con análisis numérico.

CASO 15

TÍTULO ORIGINAL:	PREVENTING LANDSLIDES IN TIMES OF RAINFALL: CASE STUDY AND FEM ANALYSES
UBICACIÓN / AÑO:	Alasht, Irán / 2009.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	La zona de estudio se localiza al norte de Irán con una elevación superior a los 1500 m, en esta zona son comunes los deslizamientos superficiales que involucran coluviones, debido principalmente a las fuertes lluvias que se infiltran rápidamente. El caso seleccionado que se presenta en las cercanías de la zona urbana de Alasht, sucedió después de una fuerte lluvia ocurrida en noviembre de 2009.
GEOLOGÍA	El área se considera activa tectónicamente, las unidades geológicas se formaron principalmente en el cenozoico con formaciones específicamente en el eoceno y posteriores del

CASO 15

	cuaternario. Superficialmente, los materiales de la zona consisten en limos arcillosos o arcillas limosas con mezclas de gravas y bloques provenientes de arenitas, caliza o dolomita
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento compuesto rotacional - traslacional.
POSIBLES CAUSAS	Elevación del nivel freático y saturación.
TIPO DE SUELO:	Coluvial arcilloso

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

A partir de los resultados de los ensayos de laboratorio, hechos para la caracterización del material deslizante (coluvión arcilloso), Moayedi et al. (2011) obtuvieron rangos de valores para cada parámetro. Para la presente investigación, se seleccionó el peso unitario medio y se realizó un análisis de sensibilidad para seleccionar los valores de los parámetros de resistencia que condujeran a un factor de seguridad de 0.99.

En cuanto a los parámetros del lecho rocoso (identificado como arenisca), Moayedi et al. (2011) asegura que la masa deslizante corresponde únicamente al coluvión, por lo que se consideró un tipo de resistencia infinito para la modelación y su peso unitario fue definido según Bowles (1997). Los parámetros de deformación se asignaron de acuerdo con el numeral 1.1.1.3 del presente documento. En la Tabla 39 se presentan los parámetros geotécnicos seleccionados para el caso. Adicionalmente, Moayedi et al. (2011) reportan dentro de las propiedades índice del material arcilloso, una fracción de arcilla media de 45%, índice de plasticidad medio de 25% y contenido de agua medio de 22%.

Tabla 39. Parámetros geotécnicos caso 15.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Coluvión arcilloso	Cohesivo	21.3	22	20.5	33	0.40
Lecho rocoso	Roca	-	-	23.2	29900	0.31

Fuente: Modificado de Moayedi et al. (2011).

CASO 15

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO



Figura 79. Planta general del deslizamiento, caso 15. Fuente: Google Earth según coordenadas e imágenes satelitales de Moayedi et al. (2011)

PERFIL

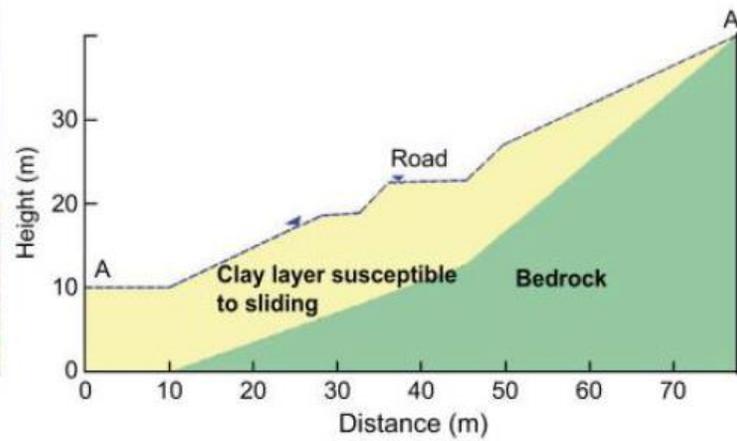


Figura 80. Fotografía del deslizamiento (a) y corte principal (b), caso 15. (Moayedi et al., 2011)

CASO 15

MODELADO

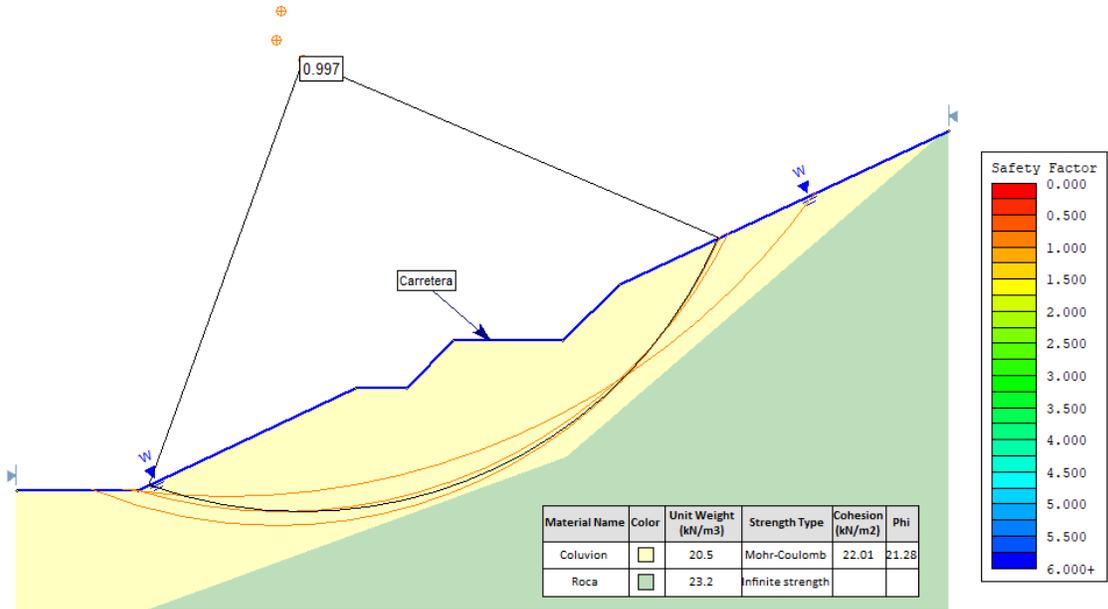


Figura 81. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 15. Fuente Propia

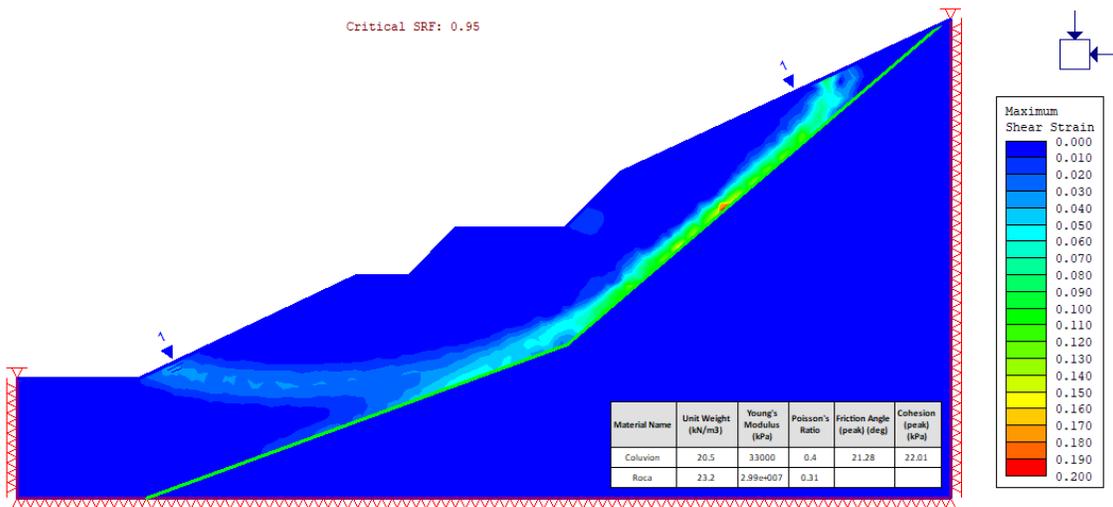


Figura 82. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 15. Fuente Propia

CASO 15

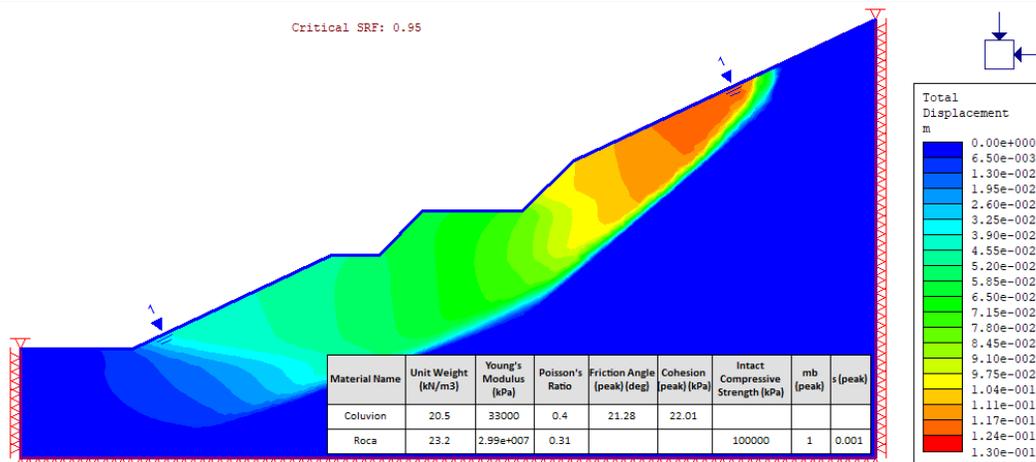


Figura 83. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 15. Fuente Propria

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El análisis de estabilidad se llevó a cabo considerando la sensibilidad del sistema en falla a la variación de los parámetros de resistencia. La superficie de falla fue obtenida para un factor de seguridad de 0.99, encontrando que la mayor sensibilidad se presenta en la cohesión y en menor medida el ángulo de fricción. El resultado obtenido es consistente con la superficie de falla identificada in situ, que como se ve en la Figura 80 (a) afecta la sección arriba y abajo de la carretera, en consistencia con los resultados de la Figura 81.

Del análisis numérico se obtuvo un factor de reducción de resistencia relativamente similar al factor de seguridad, con un valor de 0.95, el cual demuestra la consistencia de los análisis y la inestabilidad de la ladera.

En cuanto a los esfuerzos máximos, estos se presentan en el contacto con la roca, principalmente en la parte superior, tal como describen Moayedi et al. (2011), es la generalidad de los múltiples movimientos que ocurren en la zona de estudio, además, la saturación del terreno debida al ascenso del nivel freático contribuye en gran medida con la generación de la falla.

CASO 15**TABLA DE RESULTADOS****Tabla 40.** Resultados caso 15.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Coluvial	Cohesivo	21.3	22	20.5	25	0.99	0.95

Fuente: Moayedi et al. (2011) y propia.

16. Estudio de análisis de estabilidad en una zona de alta complejidad en los Alpes Italianos.

CASO 16

TÍTULO ORIGINAL:	SLOPE STABILIZATION IN DIFFICULT CONDITIONS: THE CASE STUDY OF A DEBRIS SLIDE IN NW ITALIAN ALPS
UBICACIÓN / AÑO:	Valle de Aosta, noroeste de Italia / 2009
DESCRIPCIÓN DEL CASO	Durante el año 2009, después de un período de lluvias prolongadas, se produjo un deslizamiento de tierra con un volumen aproximado de 35.000 m ³ en el valle de Valgrisenche, que afecto la carretera SR25. El deslizamiento de tierra fue anticipado por una serie de pequeñas caídas de rocas desde los acantilados rocosos; la falla se extendió de

CASO 16	
	1.220 a 1.310 m.s.n.m. con una longitud total de 120 m y un ancho máximo de 80 m y estaba ubicado en una gruesa capa de depósitos coluviales que están presentes de manera irregular a lo largo del valle. (Barla et al., 2013)
GEOLOGÍA	Estos depósitos coluviales de grano grueso, datan aproximadamente de la edad cuaternaria y están compuestos por cantos rodados, bloques, guijarros y gravas, embebidos en una matriz limo arenosa. Todo este compuesto se encuentra de manera discontinua sobre un lecho de roca que corresponde a un granate prepermídico, micas y paragneisses con abundantes intercalaciones con rocas de origen metamórfico. (Barla et al., 2013)
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Movimiento traslacional.
POSIBLES CAUSAS	Temporada de lluvias.
TIPO DE SUELO:	Coluvial de comportamiento granular.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Se realizaron cuatro perforaciones de recuperación continua, se instalaron piezómetros y adicionalmente se hicieron ensayos de refracción sísmica y se monitorearon desplazamientos. Con base en el análisis de la información resultante de la exploración geotécnica, Barla, Antolini, & Barla (2013) definieron los parámetros de resistencia que se presentan en la</p> <p>Tabla 41.</p> <p>Para los pesos unitarios de los materiales, que no se presentan en el documento de referencia, se realizó un análisis de sensibilidad, encontrando que la variación en un rango entre 10 KN/m³ y 30 KN/m³ en los tres estratos no afecta significativamente el factor de seguridad, por lo que se selecciona un peso unitario típico de 20 KN/m³ para el coluvión y 25 KN/m³ para la roca.</p> <p>Los parámetros de elasticidad usados en la modelación numérica se asignaron de acuerdo con lo</p>	

CASO 16

estipulado en el numeral 1.1.1.3, considerando el tipo de roca de la zona (Gneiss) y la matriz arenosa del coluvión. Para la roca profunda se usó el criterio de Hoek-Brown usando el UCS de 75 MPa y el GSI de 70 reportado en el documento de referencia.

Tabla 41. Parámetros geotécnicos caso 16. (Barla et al., 2013)

Geología	Tipo de suelo		Parámetros geotécnicos			
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Depósito Coluvial superficial	Granular	27	10	20	500	0.3
Depósito Coluvial profundo	Granular	31	50	20	1400	0.3
Roca profunda	Roca	-	-	25	5500	0.3

Fuente: (Barla et al., 2013).

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

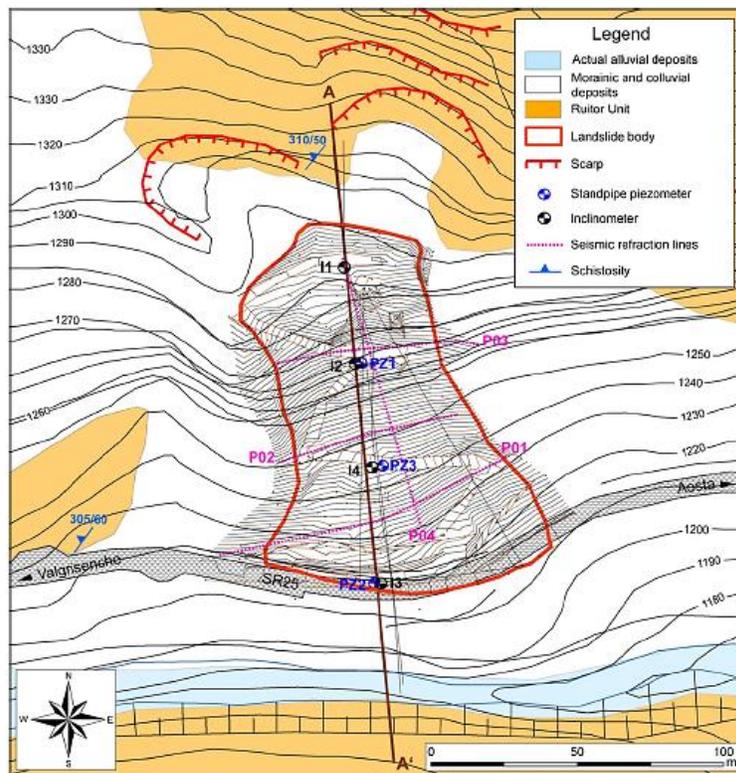


Figura 84. Planta general del deslizamiento, caso 16. (Barla et al., 2013)

CASO 16

PERFIL

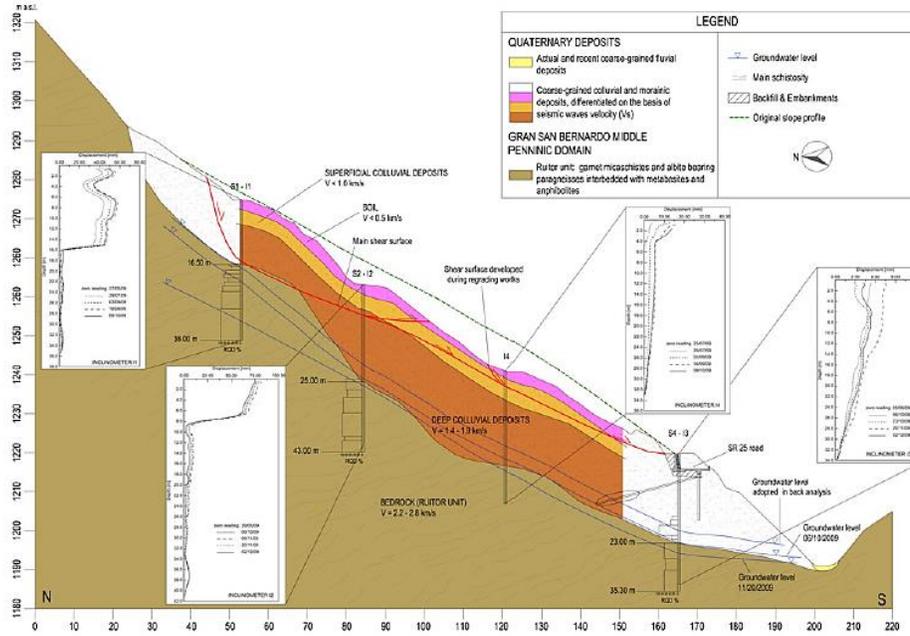


Figura 85. Cortes principales, caso 16. (Barla et al., 2013)

MODELADO

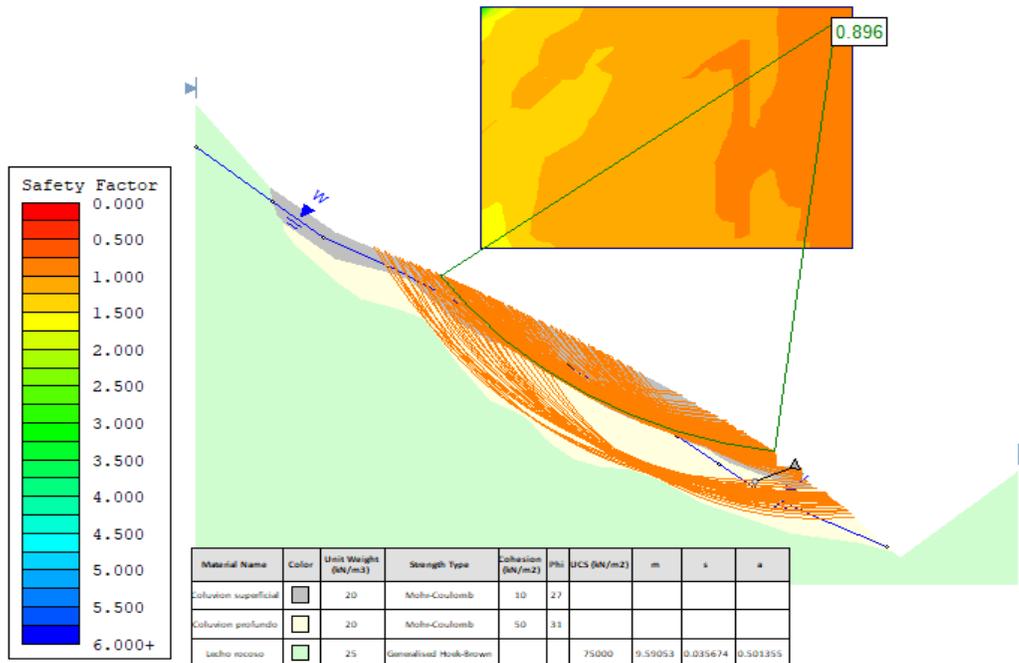


Figura 86. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 16. Fuente Propia.

CASO 16

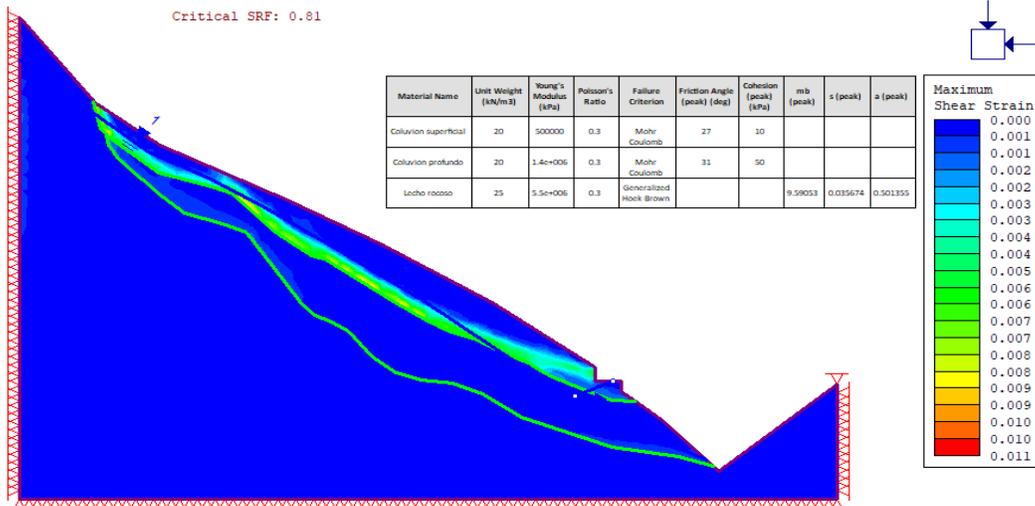


Figura 87. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 16. Fuente Propia

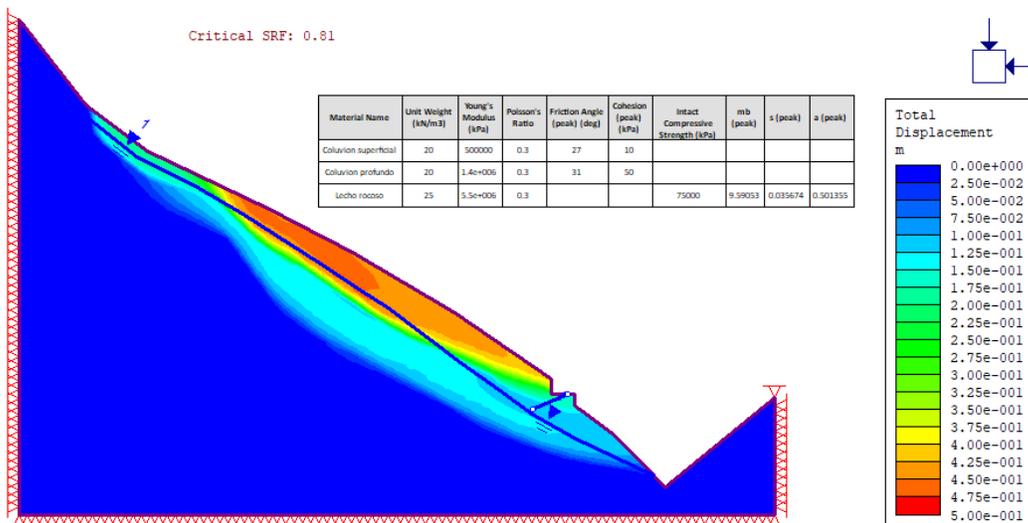


Figura 88. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 16. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

El caso 16 presenta una inestabilidad del coluvión superficial, esto posiblemente se debe a que es el coluvión más reciente y por tanto menos consolidado, adicionalmente las fluctuaciones del nivel freático deducidas mediante las lecturas de los piezómetros y el retroanálisis hecho por Barla et al. (2013) afectan principalmente este estrato.

Del análisis de estabilidad de taludes se encontró un Factor de Seguridad mínimo global de 0.896, con superficies de falla desarrolladas como se comentó anteriormente, sobre el depósito

CASO 16

coluvial superior. Para el análisis de elementos finitos se presenta el mismo comportamiento; la resistencia al esfuerzo cortante crítico se genera en la zona de contacto de los dos coluviones y presenta un factor de reducción de resistencia de 0.81, el cual es relativamente similar al factor de seguridad y refleja la misma condición de inestabilidad.

Es posible deducir que los resultados tienen una buena correlación con la naturaleza del deslizamiento, y que como se evidenció, los esfuerzos cortantes superados en la zona de contacto de los coluviones a lo largo de la ladera, afectan la estabilidad de la vía.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 42. Resultados caso 16. (Barla et al., 2013)

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Coluvial	Granular	27	10	20	29%	0.896	0.81

Fuente: Barla et al. (2013) y propia.

17. Modelación con elementos finitos para la evaluación de la estabilidad de taludes de roca y detritos.

CASO 17

TÍTULO ORIGINAL:	FINITE ELEMENT MODELING APPROACH TO ASSESS THE STABILITY OF DEBRIS AND ROCK SLOPES: A CASE STUDY FROM THE INDIAN HIMALAYAS
-------------------------	--

CASO 17	
UBICACIÓN / AÑO:	Pipalkoti, carretera nacional (NH-58), India/2010
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El estudio de referencia comprende el análisis de la estabilidad de tres taludes, distribuidos en 1.5 km de la NH-58 en las cadenas montañosas de Garhwal (Himalaya). El caso seleccionado corresponde a un deslizamiento superficial de suelo residual proveniente de dolomitas. El movimiento incluye el flujo de materiales en la ladera arriba y abajo de la carretera (Ver Figura 90), en un tramo de 100 m. El deslizamiento pudo iniciar debido a un proceso de excavación en la carretera, además de fuertes precipitaciones ocurridas antes del evento.
GEOLOGÍA	Las formaciones de la zona corresponden a rocas calizas dolomíticas con efectos diversos de meteorización producidos por las condiciones extremas de precipitación y temperatura. Las discontinuidades del macizo están orientadas desfavorablemente, con una inclinación similar a la del talud. El talud de análisis está compuesto por una capa superficial de 0.9 m de grano fino café (arena) y una capa intermedia de suelo meteorizado de la roca madre que corresponde a dolomita, esta capa intermedia tiene 4 m de espesor, 3.5 m correspondientes a un suelo gris arenoso y en los 0.5 m restantes el material es un polvo fino.
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Flujo de detritos
POSIBLES CAUSAS	Procesos de excavación y fuerte precipitación.
TIPO DE SUELO:	Suelo residual de dolomita.

CASO 17

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS

De las capas identificadas en campo, se extrajeron muestras inalteradas del material expuesto para realizar ensayos de resistencia y muestras alteradas en las que se llevaron a cabo ensayos de clasificación, entre estos últimos se encuentran la distribución granulométrica y el contenido de humedad.

En la Tabla 43 y en la Tabla 44 se presentan los resultados medios de los ensayos de clasificación para la dolomita altamente meteorizada, y los valores seleccionados para las modelaciones, según Kanungo, Pain, & Sharma (2013).

Es importante resaltar que de acuerdo con los resultados de la granulometría, el material localizado en el contacto con la roca se califica como limo, sin embargo, de los ensayos de resistencia se concluye un comportamiento granular, adicionalmente, se hace notar que en el talud de estudio de la investigación de referencia en donde no se presentó falla (ubicado en la misma zona de estudio), el suelo de contacto con la roca se clasifico como arena limosa, por lo que se consideran estos parámetros para clasificar el suelo de falla..

Tabla 43. Distribución granulométrica y humedad natural suelo residual (Dolomita altamente meteorizada)

Granulometría				Clasificación USCS	Humedad natural (%)
Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)		
35	28	33	4	SM	15

Fuente: (Kanungo et al., 2013)

Tabla 44. Parámetros geotécnicos caso 17.

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Suelo superficial	Granular	34	20	18.6	100	0.3
Suelo residual	Granular	43	12	20.3	100	0.3

CASO 17

Dolomita meteorizada	Granular	33	8	20.3	100	0.3
Roca-Dolomita	Roca	-	-	27	10700	0.25

Fuente: (Kanungo et al., 2013)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

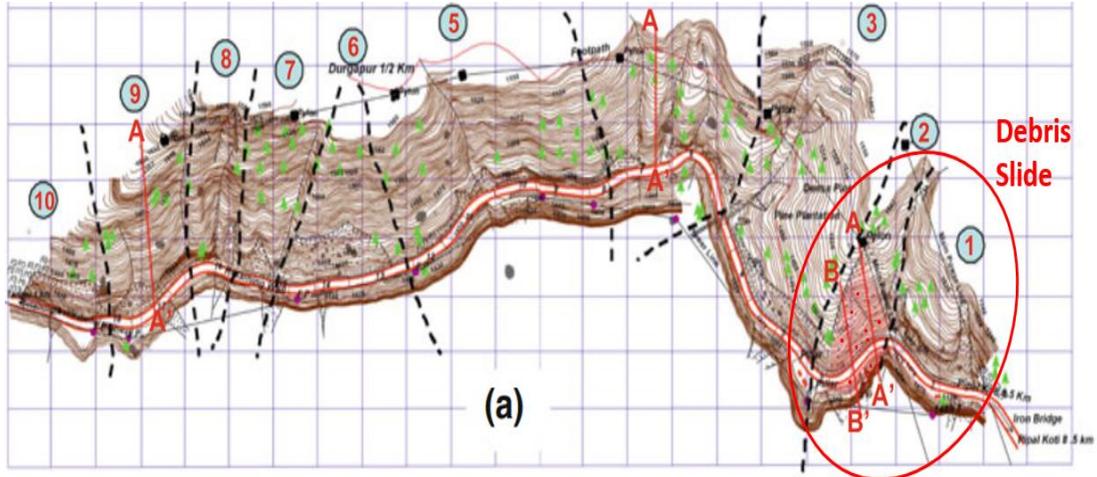


Figura 89. Planta general del deslizamiento, caso 17. (Kanungo et al., 2013)

PERFIL

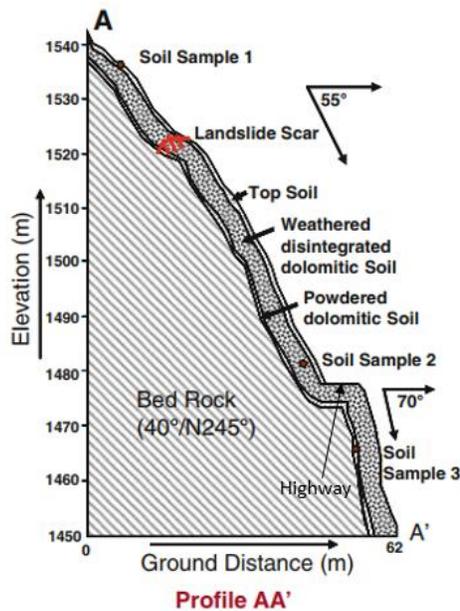


Figura 90. Corte principal Caso 17. (Kanungo et al., 2013)

CASO 17

MODELADO

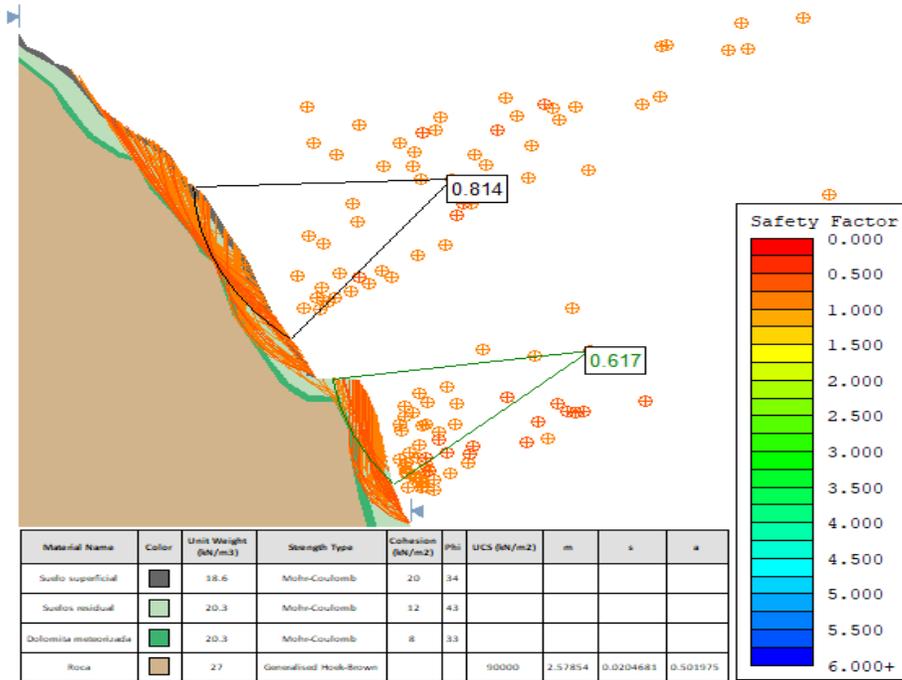


Figura 91. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 17. Fuente Propia.

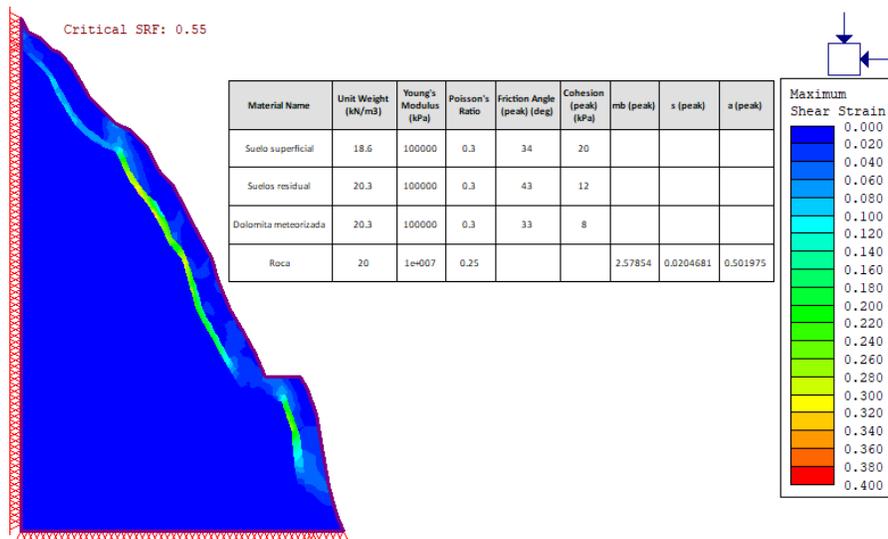


Figura 92. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 17. Fuente Propia

CASO 17

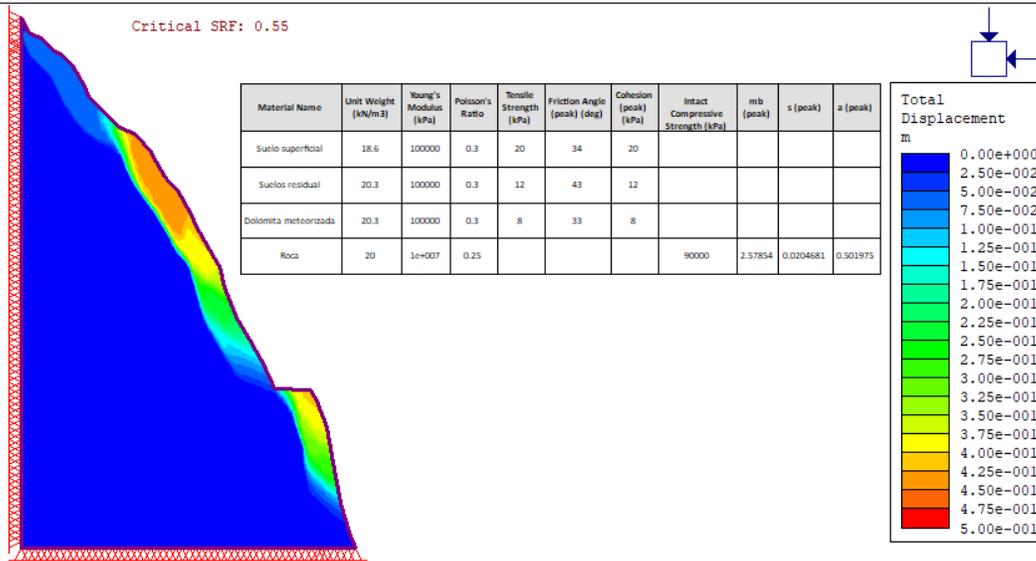


Figura 93. Análisis de elementos finitos, máximo desplazamiento total (Phase 2) Caso 17. Fuente Propia

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Después de realizar el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite por los métodos de Bishop y Janbu, se encontró un factor de seguridad de 0.62 por el método de Janbu, asociado a una superficie de falla ubicada en la sección baja del talud, sin embargo se observa que la capa de suelo residual genera una inestabilidad general, con factores de seguridad menores que uno en toda la sección transversal.

Del mismo modo, el factor de reducción de resistencia obtenido en el programa Phase 2 tiene un valor de 0.55, lo que indica la fuerte inestabilidad de la ladera, y puede explicarse con la pendiente pronunciada del talud, la cual tiene valores de hasta 75°. De acuerdo con los resultados de la modelación, la zona compuesta por el suelo altamente meteorizado proveniente de la dolomita, precisamente en el contorno con la roca madre, es donde se presentan los esfuerzos cortantes máximos, por lo que se asume la generación de la falla en este material, adicionalmente, los resultados de campo evidencian que esta zona de contacto coincide con la superficie de falla del talud.

Por lo tanto, los resultados obtenidos por ambos tipos de análisis muestran una buena correlación

CASO 17

entre sí y con la situación observada en campo.

TABLA DE RESULTADOS**Tabla 45.** Resultados caso 17.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Granular	33	8	20.3	67°	0.62	0.55

Fuente: Kanungo, Pain, & Sharma (2013) y propia.

18. Análisis de un deslizamiento de suelo residual en Rio de Janeiro, Brasil**CASO 18**

TÍTULO ORIGINAL:	BACK ANALYSIS OF A LANDSLIDE IN A RESIDUAL SOIL SLOPE IN RIO DE JANEIRO, BRAZIL
UBICACIÓN / AÑO:	Rio de Janeiro, Brasil/1988.
DESCRIPCIÓN DEL CASO	El caso se refiere a un deslizamiento ocurrido tras un periodo corto de lluvia intensa, que generó un movimiento profundo en un talud revegetalizado compuesto por suelo residual. La falla ocasiono daños estructurales en la edificación residencial adyacente, incluyendo la destrucción total de un apartamento. La cresta del talud tiene una elevación de 384 m y una inclinación de 30° a 55°. Un retroanálisis, se realizó como parte de la investigación para evaluar la condición de infiltración antes de la falla del talud.

CASO 18	
GEOLOGÍA	El perfil encontrado tiene una capa superficial de 15 m originada de roca metamórfica tipo Gneis. El perfil de meteorización está compuesto por un suelo residual de arena arcillosa, con un espesor promedio de 1 m, subyacente por una capa de un suelo residual joven de matriz arenosa (suelo saprolítico), con características mineralógicas bien definidas, heredadas de la roca madre. La transición entre la roca y el suelo saprolítico es una roca muy fracturada y erosionada.
TIPOS DE MOVIMIENTO O DESLIZAMIENTO	Deslizamiento rotacional.
POSIBLES CAUSAS	Lluvias intensas y otros procesos de infiltración que saturaron el suelo residual.
TIPO DE SUELO:	Suelo residual arenoso.
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ENCONTRADAS O ANALIZADAS	
<p>Los parámetros geotécnicos fueron definidos de acuerdo con los resultados de ensayos realizados en muestras inalteradas extraídas en la superficie de falla y en una zona ubicada a 50 m del evento, la cual se considera inalterada. El programa de investigación del subsuelo incluyó 21 perforaciones y ensayos geofísicos (Soares et al., 2011). Se seleccionaron los parámetros de resistencia del suelo residual obtenidos de los ensayos triaxiales y las pruebas hechas en la zona inalterada. Los parámetros de elasticidad usados en la modelación numérica, se asignaron de acuerdo con lo estipulado en el numeral 1.1.1.3., para el tamaño de grano predominante del suelo residual (arena), y para la roca se seleccionan los parámetros presentados por (Duncan, 1999) para el Gneis brasileño. Para la roca profunda se usó el criterio de Hoek-Brown considerando la condición de alta fracturación que se reporta en el documento de referencia, con un GSI de 35 y un UCS de 3000 KPa. En la Tabla 45 y la Tabla 47 se resumen los parámetros seleccionados para cada material.</p>	

CASO 18

Tabla 46. Distribución granulométrica y humedad natural suelo residual arenoso

Granulometría			Humedad natural (%)
Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	
82	9.8	8.2	6.4

Fuente: (Soares et al., 2011)

Tabla 47. Parámetros geotécnicos caso 18

Geología	Tipo de suelo	Parámetros geotécnicos				
	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson
Suelo residual arenoso	Granular	34	9.6	17.1	40	0.25
Roca fracturada	Roca	-	-	25	79900	0.24

Fuente: (Soares et al., 2011)

PLANTA DEL DESLIZAMIENTO

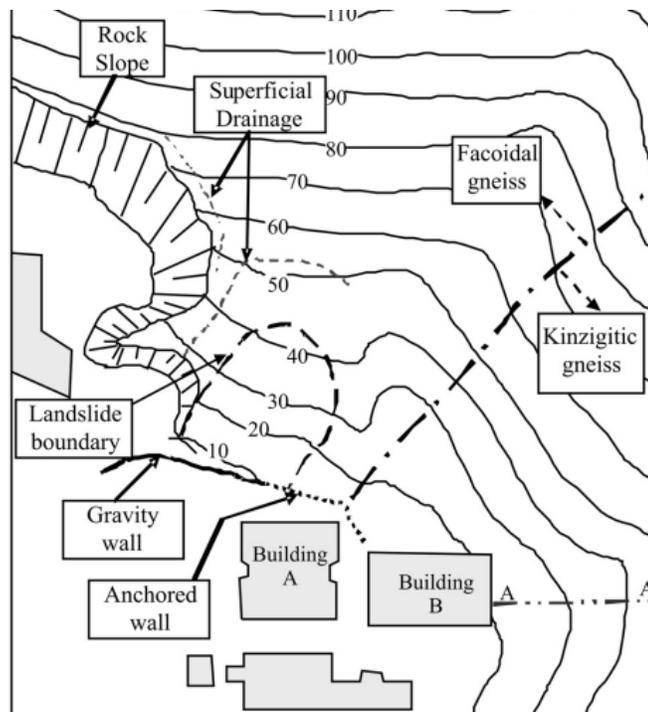


Figura 94. Planta general del deslizamiento, caso 18. (Soares et al., 2011)

CASO 18

PERFIL

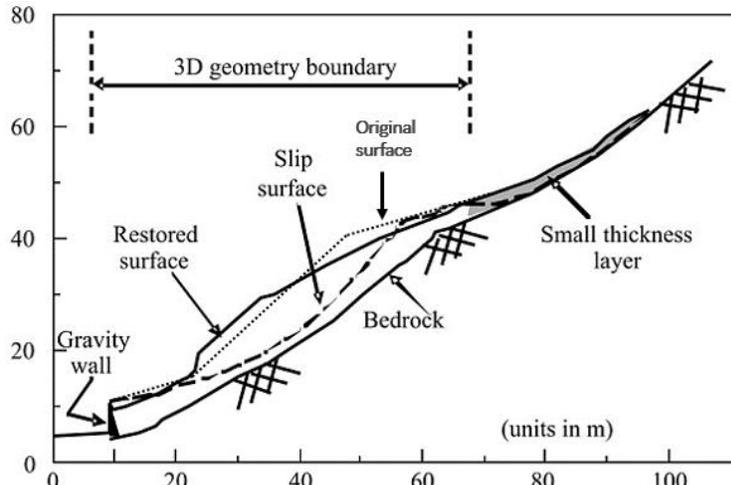


Figura 95. Cortes principales, caso 18. Modificado de Soares et al. (2011).

MODELADO

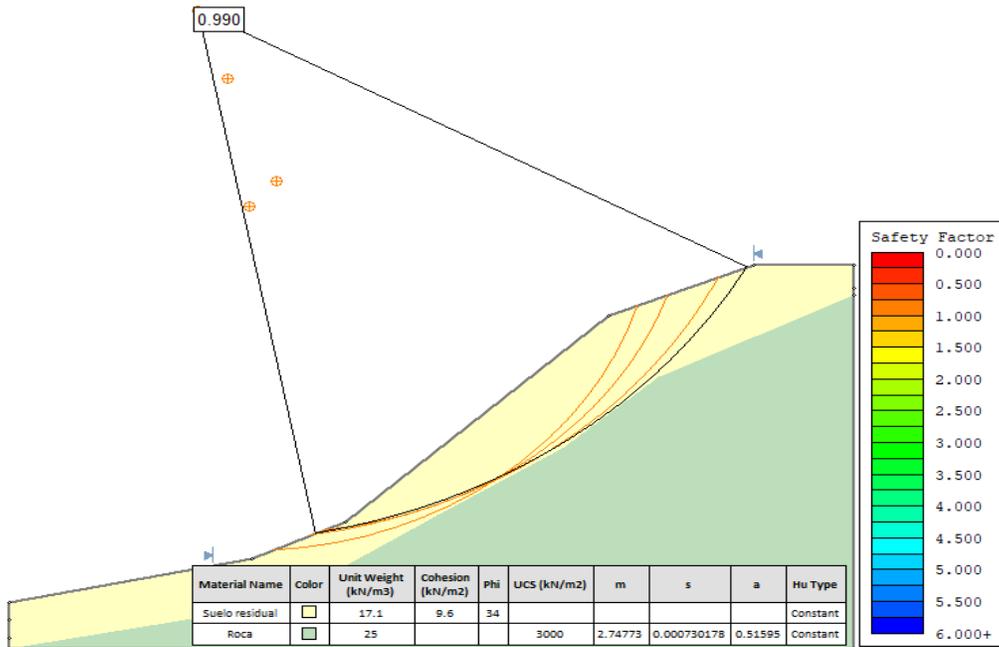


Figura 96. Análisis de estabilidad de taludes (SLIDE) Caso 18. Fuente Propia.

CASO 18

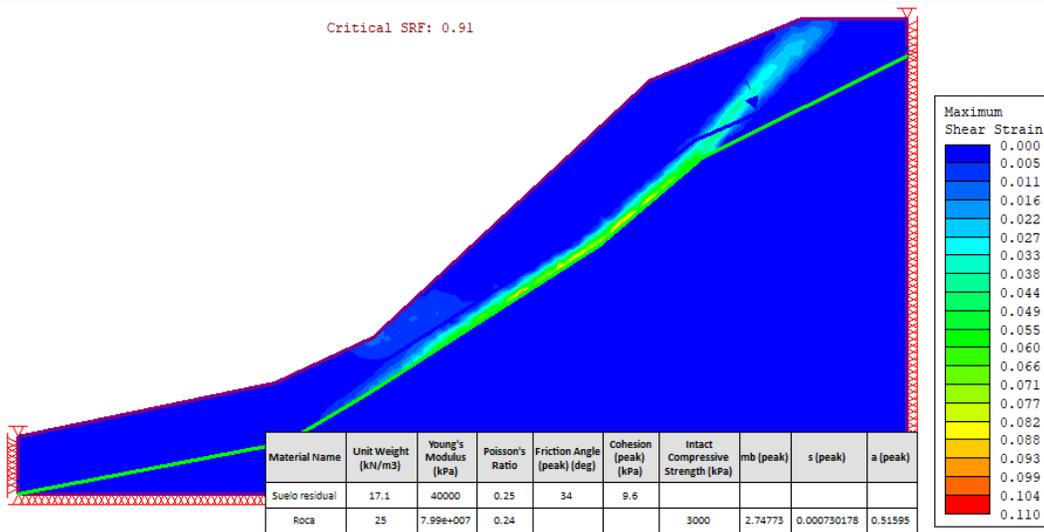


Figura 97. Análisis de elementos finitos, máximo esfuerzo cortante (Phase 2) Caso 18. Fuente Propia.

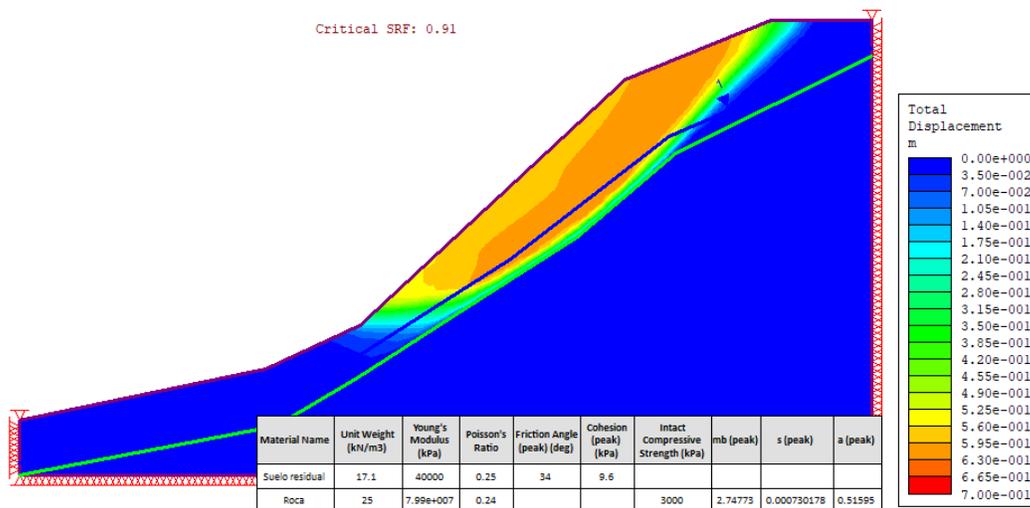


Figura 98: Análisis de elementos finitos, desplazamiento total (Phase 2) Caso 18. Fuente Propia.

ANÁLISIS DE LO ENCONTRADO Y/O MODELADO

Se realizó un análisis de sensibilidad para encontrar la ubicación del nivel freático que provocara la falla del sistema, aplicando el método del equilibrio límite de Janbu y considerando un factor de seguridad de 0.99. Las superficies de falla encontradas indican que el estrato de suelo residual establece una condición de inestabilidad, cabe mencionar que considerando el material saturado, el factor de seguridad global mínimo tiene un valor de 0.57, lo que refleja la sensibilidad del deslizamiento a la posición del nivel freático y una inminente falla tras el periodo de fuertes

CASO 18

lluvias, en consistencia con la situación real.

El factor de reducción obtenido mediante la aplicación del método de los elementos finitos tiene un valor de 0.91, lo cual es consistente con el análisis de estabilidad. La distribución de esfuerzos máximos generados exhibe la falla del material del estrato superior, con valores máximos en el contorno con la roca madre, justo en donde la superficie de falla fue localizada en la exploración geotécnica.

De la misma forma en que el análisis de estabilidad y la modelación numérica describen la naturaleza del movimiento, las deformaciones obtenidas, que se presentan en la Figura 98, con desplazamientos totales máximos de hasta 0.7 m, corresponden a las deformaciones levantadas en el sitio de estudio.

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 48. Resultados caso 18.

Geología - Suelo		Parámetros de resistencia			Pendiente promedio (%)	Estabilidad de taludes	Elementos finitos
Origen	Comportamiento	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso específico (kN/m ³)		Factor de seguridad	Strength reduction factor (SRF)
Residual	Granular	34	9.6	17.1	40	0.99	0.91

Fuente: (Soares et al., 2011)