

ARMADURAS DE CONCRETO PREFABRICADO S.A. DE C.V

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA.

CONTRATO DE SERVICIOS:
CLAVE IMTA: HC 1607.3

**EL ESTUDIO PARA VERIFICAR LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA AL FLUJO
DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN DE 2 TIPOS DE
TAPETES CON 3 ESPESORES CADA UNO RESPECTIVAMENTE.**

SISTEMA ARMORSHIELD

INFORME FINAL

30/11/2016

Jefe de proyecto:

Gilberto Salgado Maldonado.

Participación profesional de:

Wendoly Flores Alarcón

Prácticas profesionales de:

Miguel Alejandro Martínez Rodríguez

Jovani de Jesús Estudillo Cherón

Elaborado para:

***Armaduras de concreto prefabricado,
S. A. de C. V.***

Coordinación ARMORTECH

Hugo de Jesús Pinedo Vargas

Coordinación IMTA

José Raúl Saavedra Horita

José Alfredo Gonzales Verdugo

CONTENIDO

Antecedentes.....	1
Resultados esperados.....	1
Metodología.....	1
Recopilación de la información del sistema y visitas a sitios de instalación. Diseño del modelo	2
Revisión analítica	3
Marco teórico.....	3
Ecuación de la cantidad de movimiento	3
Aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento	6
Arrastre y sustentación.....	9
Cálculo de la fuerza de arrastre.....	12
Conclusión de los resultados analíticos de la fuerza de arrastre.	16
COEFICIENTE DE FRICCIÓN.	17
Ley universal de velocidades	17
Capa límite y rugosidad superficial.....	19
Estudio en modelo físico	21
Diseño y montaje del modelo físico.....	21
Descripción del Modelo	22
Diseño de experimentos.....	27
Programa de experimentos.	30
Consideraciones para el planteamiento de los ensayos.....	30
Instrumentación.....	30
Pruebas preliminares.....	32
Serie 1, 2, 3 y 4. Pruebas sin tapete.....	33
Prueba 1.3	35
Prueba 2.3	35
Prueba 3.2	35
Prueba 4.1	36
Modelación en HEC-RAS para pruebas sin tapete, series 1 a la 4.....	36
Serie 5, 6, 7 y 8 con Tapete D1 Armorshield con un espesor de 12cm.....	38

Montaje del tapete articulado de D1 con un espesor de 12 cm.....	38
Prueba 5.1	39
PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE ARRASTRE LÍMITE PARA EL SISTEMA.....	43
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN (NÚMERO DE MANNING)	44
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD DEL SISTEMA ARMORSHIELD MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO GEOSTUDIO.	46
Aplicación al caso de estudio:	48
CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS	54
ANEXO “A”. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL SISTEMA Armorshield 4510.....	56
ANEXO “B”. CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DEL SISTEMA ARMORSHIELD	57
ANEXO “C”. ESQUEMAS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CON EL MODELO GEOSTUDIO.	58

ANTECEDENTES

EL sistema ARMORSHIELD® está diseñado para controlar el proceso de erosión provocada por escurrimientos hidráulicos sobre cualquier superficie de suelo. Los elementos de concreto (bloques) que conforman cada uno de los sistemas se encuentran ligados con cable de poliéster (ARMORSHIELD®). Las dimensiones del tapete Armorshield son: 2.42m de ancho por 6.11m de largo constituido por 90 elementos de concreto de 12.0cm, 17.0cm y 23.0cm de espesor respectivamente.

RESULTADOS ESPERADOS

- Determinar las propiedades de estabilidad hidrodinámicas del Sistema: ARMORSHIELD® con sus 3 diferentes espesores de 12.0cm 17.0cm y 23.0cm.
- Determinar el coeficiente de rugosidad del Sistema: ARMORSHIELD®.
- Determinar la pendiente máxima del talud sobre el que se puede instalar el sistema ARMORSHIELD® antes de presentar deslizamiento de los bloques.

METODOLOGÍA

La empresa Armaduras de Concreto Prefabricado S.A. de C.V. proporcionó al IMTA la información de diseño y fabricación de los sistemas ARMORSHIELD®, así como varias muestras físicas con la finalidad de obtener los valores promedio de las características físicas de cada sistema en los diferentes espesores. El IMTA recabo la información complementaria disponible. Tomando en cuenta la información recopilada, el IMTA realizó una revisión analítica de la estabilidad del sistema considerando para ello las teorías de empuje hidrodinámico del flujo sobre un cuerpo. Simultáneamente, el IMTA diseñó y montó el modelo físico, elaboró el programa y realizó los ensayos necesarios para evaluar el comportamiento del sistema. El modelo físico es sin distorsión, escala 1:4.14, que se determinó de acuerdo a las dimensiones del sistema ARMORSHIELD®, y las correspondientes al canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi del IMTA, en el cual fue probado.

Los bloques de concreto Armorshield cuentan con un dissipador de energía de altura y ángulo variable el cual por las características específicas de este estudio se determinó no integrarlo pues su altura en la pieza de concreto a escala real es de 1mm. A la escala 1:4.14 no sería factible reproducirlo y su efecto para la prueba de estabilidad al flujo tendría que someterse con otro planteamiento de escala. En el ANEXO A, se observa el detalle de la forma de este dissipador.

Para determinar la pendiente máxima del talud sobre el que se pueden instalar el sistema: ARMORSHIELD® antes de presentar deslizamiento de los bloques, se utilizó el programa numérico GeoStudio® para evaluar los sistemas en un canal con los taludes inclinados a base de suelo similar al de Tabasco, arcilla-limo-arena.

Observaciones:

1. La empresa Armaduras de Concreto Prefabricado S.A. de C.V. proporciono al IMTA la información de diseño y fabricación del sistema ARMORSHIELD®, así como varias muestras físicas con la finalidad de obtener los valores promedio de las características físicas de cada sistema en los tres diferentes espesores.
2. Los modelos a escala 1:4.14 con sus accesorios fueron elaborados por parte de Armaduras de Concreto Prefabricado S.A. de C.V. El IMTA proporciono las características del diseño.
3. El día 27 de abril se recibieron los primeros tres juegos completos de los tapetes ARMORSHIELD para espesores de 12 y 17 cm.

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN DEL SISTEMA Y VISITAS A SITIOS DE INSTALACIÓN. DISEÑO DEL MODELO

La información recopilada consistió principalmente en las características geométricas y físicas del sistema, las cuales se describen en el cuadro 1, Ilustración 1:

CARACTERÍSTICAS DE LOS TAPETES PROTOTIPO								
Dimensiones de la unidad:				Dimensiones del tapete				
Pieza	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Peso Kg	Piezas @ tapete	Ancho (m)	Largo (m)	Peso tapete
D1	0.45	0.40	0.12	34.60	90	2.42	6.11	3,114
D1	0.45	0.40	0.17	49.20	90	2.42	6.11	4,428
D1	0.45	0.40	0.23	69.00	90	2.42	6.11	6,210

Cuadro 1.- Características físicas del prototipo del tapete D1 (ARMORSHIELD)

$$F = \frac{d(Mv)}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde las fuerzas externas son de dos tipos:

Fuerzas de superficie que actúan sobre la masa del fluido y a su vez pueden ser:

- Fuerzas F_p , normales a la frontera de la masa, que se pueden evaluar en términos de las intensidades de presión sobre la misma. Conviene aquí observar que la presión comprende, además de la presión estática, la dinámica ejercida por el flujo.
- Fuerzas F_τ , tangenciales a las fronteras de la masa que se pueden medir en términos del esfuerzo tangencial sobre la misma.
- Fuerzas de cuerpo F_c , generalmente las del peso propio.

La masa que fluye en la unidad de tiempo, a través de un elemento de superficie dA , como la que define en el volumen de control que se muestra en la ilustración 2, es $\rho v dA$, donde v es la velocidad media del elemento de masa.

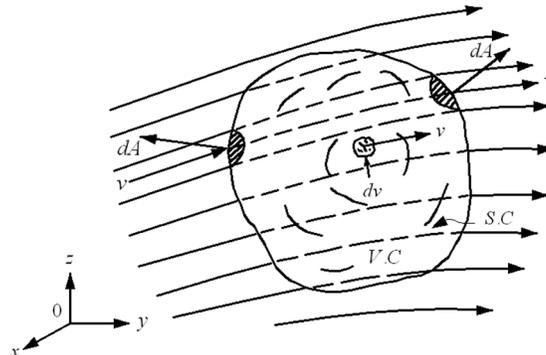


Ilustración 2. Derivación de la ecuación de la continuidad de movimiento para un volumen de control. (Sotelo, 2003)

Si se considera que la magnitud del vector dA es igual al área del elemento de superficie; su dirección normal al mismo elemento, y por convención se toma como positivo si se dirige hacia fuera del volumen. Por lo tanto $\rho v dA$ es positivo si el fluido sale del volumen, dado que el producto escalar tendrá ese signo y negativo en caso contrario, (Sotelo, 2003) y (Streeter, 1988).

Para el flujo permanente, es decir que no varía con el tiempo y si además de permanente es incompresible, ρ es constante, como es el caso del agua, la solución es:

$$F_p + F_\tau + F_c = \sum (\rho Q \beta V) \quad \text{Ecuación 2}$$

que es llamada ecuación vectorial **de cantidad de movimiento** y es la más general que puede obtenerse para el volumen de control fijo. El término $\sum (\rho Q \beta V)$ corresponde a la suma de las cantidades de movimiento del total de partes del área en que se ha dividido la superficie de control. Para nuestro caso se trata de flujo unidimensional, el cuerpo libre estudiado sería como el que se muestra en la Ilustración 3:

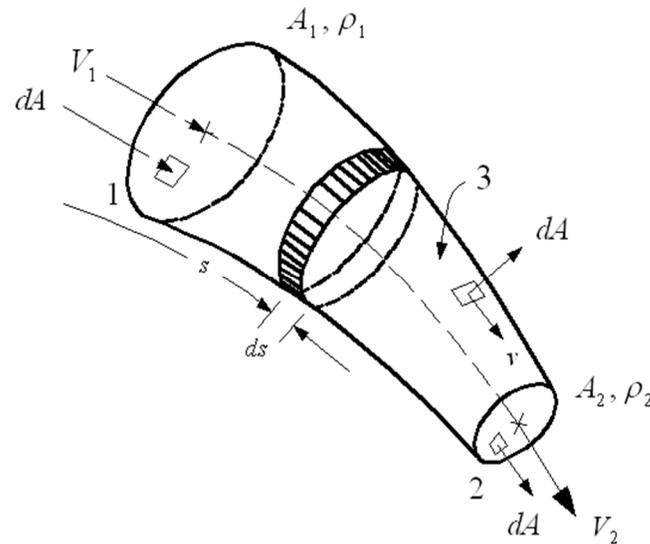


Ilustración 3. Volumen de control para una vena líquida (flujo unidimensional). (Sotelo, 2003)

ecuación vectorial que se puede escribir a través de sus componentes a saber:

$$F_{px} + F_{\alpha x} + F_{cx} = \rho \sum (Q\beta V_x) \quad \text{Ecuación 2a}$$

$$F_{py} + F_{\alpha y} + F_{cy} = \rho \sum (Q\beta V_y) \quad \text{Ecuación 2b}$$

$$F_{pz} + F_{\alpha z} + F_{cz} = \rho \sum (Q\beta V_z) \quad \text{Ecuación 2c}$$

Cabe mencionar que esta ecuación vectorial se puede describir en los siguientes pasos:

- i. Se elige el volumen de control con la amplitud que tenga interés en el estudio y se trata como un cuerpo libre; dicho volumen debe estar completamente lleno de líquido.
- ii. Las fuerzas de superficie F_p y F_τ se consideran acciones debidas a la presión y esfuerzo cortante, respectivamente, que se aplican desde el exterior hacia el volumen de control, por lo tanto, las acciones del líquido sobre sus fronteras son iguales, pero de sentido opuesto. Por lo que respecta a las fuerzas de presión, estas pueden ser de tipo estático y dinámico y en ocasiones conviene separarlas en la forma:

$$F_p = F_{pe} + F_{pd} \quad \text{Ecuación 3}$$

Las fuerzas debidas al esfuerzo cortante se consideran como la acción de la fricción desde la frontera hacia el líquido y en ocasiones puede ser difícil evaluarlas.

- iii. Las fuerzas de cuerpo pueden ser de cualquier tipo, pero en general serán fuerzas debidas al peso del volumen de control y aplicadas en su centro de gravedad.
- iv. V representa el vector velocidad media del gasto Q que atraviesa una cierta porción de la superficie de control, se considera que está aplicado en el centro de gravedad y en la dirección normal a las porciones de la sección de control.

De forma similar, la ecuación de cantidad de movimiento se obtiene considerando el volumen de control limitado por las secciones 1 y 2 de la ilustración 3. Las paredes y la superficie del flujo unidimensional permanente e incompresible, cuyo gasto no cambia en toda su longitud. La ecuación de la cantidad de movimiento para dicho volumen resultado de eliminar el término correspondiente al tiempo en la ecuación general obtenida, anteriormente y en la forma vectorial resulta:

$$F_p + F_\tau + F_c = \rho[(Q\beta V)_2 - (Q\beta V)_1] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

F_p fuerza resultante de la presión ejercida sobre las superficies de frontera del volumen de control.

F_τ fuerza resultante producida por el esfuerzo tangencial generado sobre el fondo y paredes del volumen de control.

F_c fuerza de cuerpo debida al peso del volumen de control.

Q gasto en la sección

V vector velocidad media en la sección

β coeficiente de Boussinesq, para considerar el efecto que tiene la distribución irregular de la velocidad en el cálculo de la cantidad de movimiento con la velocidad media, cuya representación es adimensional.

La ecuación representa el cambio en la cantidad de movimiento entre el flujo que entra y el que sale, con las reglas mencionadas anteriormente, es decir que Q es positivo cuando sale y negativo cuando entra.

Es importante destacar el carácter vectorial de la ecuación de movimiento.

Aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento

Las ecuaciones de la energía y de cantidad de movimiento se aplican de manera diferente y, si se hace correctamente, ellas describirán un flujo con idénticos grados de exactitud. Sus principales diferencias se encuentran en sus estructuras: mientras que la ecuación de la cantidad de movimiento es vectorial y engloba fuerzas totales y condiciones externas (sin tomar en cuenta los cambios internos de energía), la ecuación de energía es por el contrario escalar y toma en cuenta los cambios internos de energía y no las fuerzas totales y condiciones externas.

En muchos casos, una de las ecuaciones es suficiente para el análisis de un problema; la elección entre ellas depende que sean las fuerzas totales o la energía del flujo la que se necesita en la solución. En otros casos, por el contrario, la naturaleza del problema es tal que resulta necesario usar las dos ecuaciones simultáneamente para estudiar la solución completa, (Sotelo, 2003).

En general, cualquiera que sea el sistema de ecuaciones por usar, éste se deberá plantear entre secciones finales con condiciones de frontera perfectamente definidas, es decir, entre

aquellas secciones de la conducción en las que se conozcan con exactitud los valores de la energía de posición, de presión y de velocidad y, por lo mismo, la energía total.

Para nuestro caso, esta sección es la superficie libre del líquido, en un recipiente al cual se conecta el conducto. Canal de pendiente variable

Es conveniente conocer la importancia de los coeficientes de Coriolis y Boussinesq, que afectan, tanto a la ecuación de la energía como a la de la cantidad de movimiento, dada su

magnitud, por $\alpha = \frac{1}{A} \iint_A \left(\frac{v}{V}\right)^3 dA$ y $\beta = \frac{1}{A} \iint_A \left(\frac{v}{V}\right)^2 dA$ respectivamente, se observa que ésta

depende principalmente de la forma que tiene la distribución de velocidades en la sección considerada.

Suponga que la distribución de velocidades en una sección cualquiera de una vena líquida es como la mostrada en la ilustración 4, con un valor medio de la velocidad V . Si se considera que la velocidad en un punto cualquiera de la sección se puede determinar con el valor de la media, más una fracción de la misma. Se puede escribir que:

$$v = V + kV = (1+k)V$$

Donde: $-1 < k \leq 1$, siendo k una función de punto.

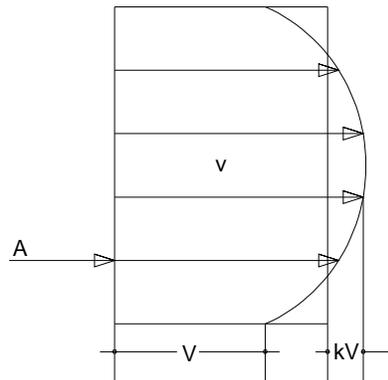


Ilustración 4. Distribución de velocidades en una sección de un conducto cerrado

Se observa que por ser $k \leq 1$, los coeficientes α y β son siempre mayores de 1. En el caso de escurrimientos donde la distribución de velocidades se aproxima a la media (escurrimientos turbulentos), los valores de α y β se aproximan a 1; y en caso contrario (escurrimientos laminares), α y β alcanzan los valores máximos de 2 y 1.33, respectivamente. Sin embargo, en el caso de escurrimientos laminares, la carga de velocidad es pequeña en comparación con las restantes.

La evaluación de los coeficientes α y β requiere, obviamente, el conocimiento previo de la distribución de velocidades en cada sección; en la mayoría de los problemas de hidráulica los escurrimientos son turbulentos y es común considerar que $\alpha \approx \beta \approx 1$. Sin embargo, debe tenerse presente que es posible inducir con ello un error de consideración, sobre todo en aquellos escurrimientos, aun turbulentos, en que existan problemas locales de separación o

de otra índole, que modifiquen completamente el perfil de velocidades respecto del uniforme, (Sotelo, 2003).

A menos de ser indispensable, es común suponer que ambos coeficientes valen 1 y que son más importantes otros factores (de índole estimativa) que el error que por este factor pueda cometerse.

Cuando se conoce por medición directa la magnitud de la velocidad en diferentes puntos de una sección, a cada punto se le considera un área de influencia ΔA_i (Ilustración 5) y, tanto la magnitud de la velocidad media como la de los coeficientes, se puede determinar por incrementos finitos en la forma aproximada. Ecuaciones 5, 6 y 7.

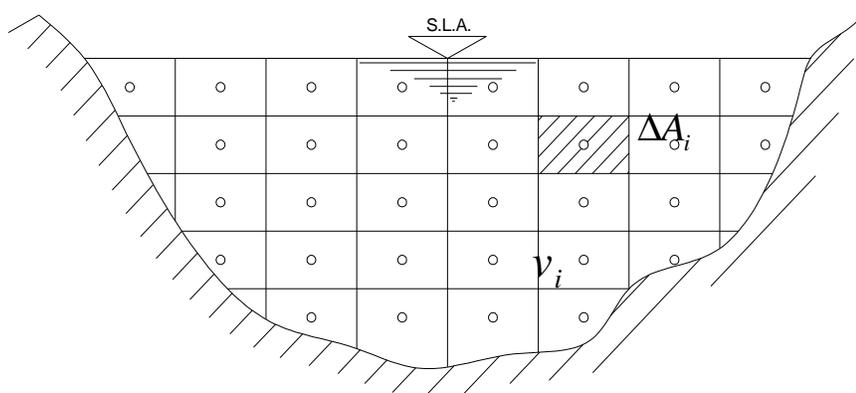


Ilustración 5. Sección transversal de un río. (Sotelo, 2003)

$$V \approx \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n v_i \Delta A_i \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\alpha \approx \frac{1}{AV^3} \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta A_i \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\beta \approx \frac{1}{AV^2} \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta A_i \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde n es el número de elementos ΔA_i elegidos. Si los incrementos de área ΔA_i son todos iguales, las ecuaciones anteriores se simplifican a la forma siguiente:

$$V \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\alpha \approx \frac{1}{nV^3} \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\beta \approx \frac{1}{nV^2} \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

Si se combinan las ecuaciones 13 y 14, se obtiene:

$$\beta \approx 1 + \frac{\alpha - 1}{3} \quad \text{Ecuación 11}$$

y es suficiente calcular α para conocer de inmediato a β .

Arrastre y sustentación

En el caso de fluidos de viscosidad relativamente pequeña, como es el caso del agua, el efecto de fricción interna es apreciable en una región muy cercana a las fronteras sólidas del flujo; conocida como capa límite. El fenómeno de separación de la capa límite origina vórtices y turbulencias, los cuales impiden el tratamiento con base en las ecuaciones de flujo con potencial.

Sin embargo, existen en la ingeniería problemas de gran importancia relacionados con el flujo en torno a cuerpos con fronteras rugosas en las que ocurren evidentemente fenómenos de separación de flujo, con todas sus consecuencias.

Es aquí donde la investigación experimental ofrece una técnica eficaz para el estudio y donde los resultados obtenidos con un modelo físico reducido pueden ser confiables, siempre que en la reproducción del fenómeno se incluyan los factores más importantes.

Un concepto intuitivo, fácil de comprender es el de resistencia o arrastre que un fluido en movimiento ejerce sobre un cuerpo sumergido en aquél. Esta acción consiste en una fuerza dinámica causada por dos factores: uno es que el esfuerzo cortante que produce fuerzas tangenciales sobre la superficie del cuerpo, en razón de la viscosidad y del gradiente transversal de velocidades dentro de la capa límite; otro, que las intensidades de presión al variar sobre la superficie del cuerpo por efectos dinámicos o de turbulencia, producen fuerzas normales a la frontera.

La suma vectorial de las fuerzas de superficie normales y tangenciales integradas sobre el total de la frontera del cuerpo, conduce a una fuerza resultante. La componente de esta fuerza en la dirección de la velocidad general del flujo, recibe el nombre de **arrastre**; la componente normal se llama **sustentación**.

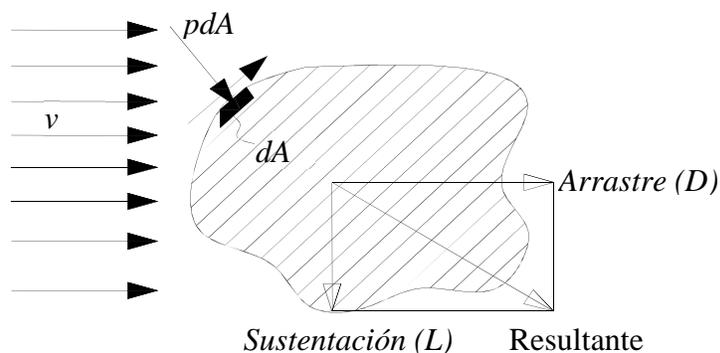


Ilustración 6. Diagrama de cuerpo libre que ilustra las fuerzas de arrastre y sustentación.

Tanto el arrastre como la sustentación comprenden, a su vez, componentes producto de la fricción y presión sobre el cuerpo de modo que el arrastre total es:

$$D = D_f + D_p \quad \text{Ecuación 12}$$

Siendo D el arrastre total y las componentes D_f y D_p los arrastres por fricción y presión respectivamente.

El arrastre por presión, que depende principalmente de la forma del cuerpo, se conoce también como arrastre de **forma**; el arrastre de fricción, llamado también de **superficie**, se debe a la componente del esfuerzo tangencial friccionante sobre la frontera del sólido.

Las fuerzas de arrastre por fricción y presión se definen en términos de los coeficientes de arrastre como:

$$D_f = C_f \rho \frac{v_o^2}{2} A_f \quad \text{Ecuación 13}$$

$$D_p = C_p \rho \frac{v_o^2}{2} A_p \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde A_f y A_p son áreas de referencia adecuadamente elegidas. Para la resistencia de superficie, A_f es por lo general el área real sobre la que actúan los esfuerzos tangenciales que producen a D_f . Para el arrastre de forma, A_p es usualmente el área transversal normal a la velocidad v_o . Los coeficientes de arrastre C_f y C_p no tienen dimensiones y se pueden determinar de las ecuaciones anteriores, utilizando valores teóricos o experimentales de las variables que en ellas intervienen.

El arrastre total D generalmente se define por la relación:

$$D = C_D \rho \frac{v_o^2}{2} A \quad \text{Ecuación 15}$$

En la que C_D es el coeficiente de arrastre total que reúne a las componentes del sistema de fuerzas, en la dirección del arrastre; vale:

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} \quad \text{Ecuación 16}$$

Además, A es el área transversal normal a v_o , de suerte que siendo $A = A_p$, el coeficiente:

$$C_D = C_f \left(\frac{A_f}{A_p} \right) \quad \text{Ecuación 17}$$

Así mismo, ρ es la densidad del fluido en el que el cuerpo se encuentra sumergido; la velocidad v_o es la velocidad de llegada medida en una sección antes del cuerpo, de tal forma que las características del flujo no sean afectadas por su presencia.

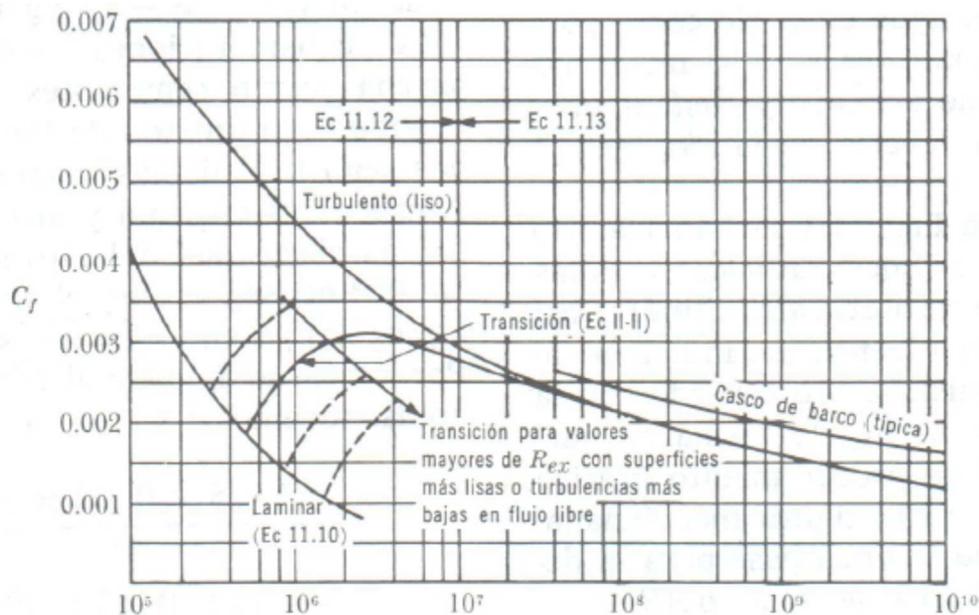
Para la fuerza de sustentación, no es costumbre separar las componentes de fricción y de presión. Cabe aclarar que dentro de las fuerzas de sustentación no se incluye la fuerza hidrostática de flotación que actúa sobre cualquier cuerpo sumergido. La fuerza de sustentación se evalúa como sigue:

$$L = C_L \rho \frac{v_0^2}{2} A \quad \text{Ecuación 18}$$

Los coeficientes de arrastre y sustentación no tienen dimensiones, es de esperarse entonces que dependan de la geometría del cuerpo y de los parámetros adimensionales que describen el comportamiento dinámico del fluido en movimiento permanente, esto es, de los números de Reynolds (Re), Froude (Fr) y de Euler (Eu), las cuales relacionan fuerzas viscosas, de fuerza y presión respectivamente.

Las ideas y conceptos del párrafo anterior fueron extraídas de la referencia 4 (Sotelo, G., 2002). Lo arriba descrito implica que los valores de los coeficientes dependen de la viscosidad del fluido, así como de las fuerzas dinámicas y de presión del flujo.

El arrastre debido al esfuerzo cortante, puramente viscoso, sobre una placa se puede calcular a partir de la ecuación 13, para la cual es necesario conocer el coeficiente de arrastre por fricción C_f . Dicho coeficiente depende de que la capa límite sea laminar o turbulenta. Si la capa límite es laminar, C_f depende del número de Reynolds del flujo, basado en su velocidad media v_0 y de la longitud de la placa x . Si la capa límite es turbulenta, C_f depende del número de Reynolds, de la rugosidad de la placa y de la localización de la transición de la capa límite laminar a turbulenta, la cual a su vez depende de la rugosidad de la placa y del grado de turbulencia del flujo.



$$Re_x = \frac{v_0 x}{\nu}$$

Coefficiente de arrastre por fricción para superficies planas lisas, paralelas al flujo. (Mediciones de Wieselsberger, Gerber, Froude, Kempf y Schoenherr.)

Ilustración 7. Gráficas experimentales del coeficiente de arrastre por fricción para superficies planas, lisas paralelas al flujo. Hidráulica General. G. Sotelo. 2002

Para el caso que nos ocupa, el escenario más importante es con flujo turbulento y placa rugosa, lo anterior motiva que la capa límite claramente se vuelva turbulenta, así el coeficiente de fricción se puede determinar de la siguiente forma:

Para: $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$

$$C_f = \frac{0.072}{Re_x^{1/5}} \quad (\text{Blasius}) \text{ ecuación 8}$$

Para: $10^6 < Re_x < 10^9$

$$C_f = \frac{0.455}{(\log Re_x)^{2.58}} \quad (\text{Prandtl}) \text{ ecuación 9}$$

Donde:

$$Re_x = \frac{v_0 x}{\nu}$$

ν viscosidad cinemática del agua

x longitud de la placa en el sentido del flujo

Cálculo de la fuerza de arrastre

La revisión analítica consistió en determinar las fuerzas de arrastre y sustentación para una gama de combinaciones de velocidades y profundidades del flujo (números de Froude) que pueden ser simulados en el canal de pendiente variable.

Es importante destacar que la fuerza de arrastre por presión se considera nula debido a que no se presenta una superficie franca a la dirección del flujo, así fue acondicionado el modelo, por lo que:

$$D_p = C_p \rho \frac{v_0^2}{2} A_p; \quad A_p=0; \quad D_p=0$$

Tomando en cuenta las dimensiones del canal y la capacidad del sistema de bombeo, se realizaron los análisis mostrados en la tabla 1 e ilustraciones 8 y 9.

Los valores utilizados en el análisis son hipotéticos, pero muestran una aproximación teórica que sirvió de referencia al análisis de los resultados del modelo físico.

Se considera que la capacidad máxima de puede conducirse por el canal de pendiente variable es de 300 l/s, de acuerdo con las dimensiones de la sección transversal y las pendientes que pueden alcanzarse:

Base de la sección: 60 cm

Altura de la sección: 90cm

Pendiente máxima: 0.008

También fue importante cubrir el mayor rango de números de Froude con diferentes combinaciones de gasto-profundidad. En el cuadro 2, ilustraciones 5 y 6, se muestran los cálculos de la revisión analítica de la fuerza de arrastre por fricción para el tapete

Armorshield. Dado que las características de la cara que se encuentra en contacto con el flujo, son las mismas para los tres espesores del tapete, se supone que el coeficiente de arrastre también lo es, por lo que los resultados son aplicables indistintamente del espesor del tapete.

			$D_f = C_f \rho \frac{V_o^2}{2} A_f$ $Re_x = \frac{v_o x}{\nu}$		Para: $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$	Para: $10^6 < Re_x < 10^9$				
					$C_f = \frac{0.072}{Re_x^{1/5}}$	$C_f = \frac{0.455}{(\log Re_x)^{2.58}}$				
					(Blasius)	(Prandtl)				
B:	0.60 m	Base del canal de pendiente variable								
x:	8.00 m	Longitud del tapete								
v:	0.0000017 m ² /s	viscosidad cinemática del agua a 18°C								
ρ:	101.97 kg seg ² /m ⁴	Densidad del agua								
Gasto (m ³ /s)	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds (Re _x)	Número de Froude	C _f Blasius	C _f Prandtl	D _f Blasius (kg)	D _f Prandtl (kg)		
0.300	0.500	1.000	4,705,882	0.45	0.003333	0.003399	0.816	0.832		
0.300	0.450	1.111	5,228,758	0.53	0.003263	0.003339	0.986	1.009		
0.300	0.400	1.250	5,882,353	0.63	0.003187	0.003275	1.219	1.252		
0.300	0.350	1.429	6,722,689	0.77	0.003103	0.003203	1.550	1.600		
0.300	0.300	1.667	7,843,137	0.97	0.003009	0.003124	2.046	2.124		
0.300	0.250	2.000	9,411,765	1.28	0.002901	0.003033	2.840	2.969		
0.300	0.200	2.500	11,764,706	1.78	0.002775	0.002927		4.477		
0.200	0.500	0.667	3,137,255	0.30	0.003614	0.003642	0.393	0.396		
0.200	0.450	0.741	3,485,839	0.35	0.003539	0.003576	0.475	0.480		
0.200	0.400	0.833	3,921,569	0.42	0.003457	0.003505	0.587	0.596		
0.200	0.350	0.952	4,481,793	0.51	0.003365	0.003427	0.747	0.761		
0.200	0.300	1.111	5,228,758	0.65	0.003263	0.003339	0.986	1.009		
0.200	0.250	1.333	6,274,510	0.85	0.003146	0.003240	1.369	1.410		
0.200	0.200	1.667	7,843,137	1.19	0.003009	0.003124	2.046	2.124		
0.100	0.500	0.333	1,568,627	0.15	0.004152	0.004116	0.113	0.112		
0.100	0.450	0.370	1,742,919	0.18	0.004065	0.004038	0.136	0.136		
0.100	0.400	0.417	1,960,784	0.21	0.003971	0.003954	0.169	0.168		
0.100	0.350	0.476	2,240,896	0.26	0.003866	0.003862	0.215	0.214		
0.100	0.300	0.556	2,614,379	0.32	0.003749	0.003759	0.283	0.284		
0.100	0.250	0.667	3,137,255	0.43	0.003614	0.003642	0.393	0.396		
0.100	0.200	0.833	3,921,569	0.59	0.003457	0.003505	0.587	0.596		
0.050	0.500	0.167	784,314	0.08	0.004769	0.004680	0.032	0.032		
0.050	0.450	0.185	871,460	0.09	0.004670	0.004588	0.039	0.039		
0.050	0.400	0.208	980,392	0.11	0.004561	0.004487	0.048	0.048		
0.050	0.350	0.238	1,120,448	0.13	0.004441	0.004377	0.062	0.061		
0.050	0.300	0.278	1,307,190	0.16	0.004306	0.004255	0.081	0.080		
0.050	0.250	0.333	1,568,627	0.21	0.004152	0.004116	0.113	0.112		
0.050	0.200	0.417	1,960,784	0.30	0.003971	0.003954	0.169	0.168		

Cuadro 2. Revisión analítica de la fuerza de arrastre por fricción del tapete Armorshield

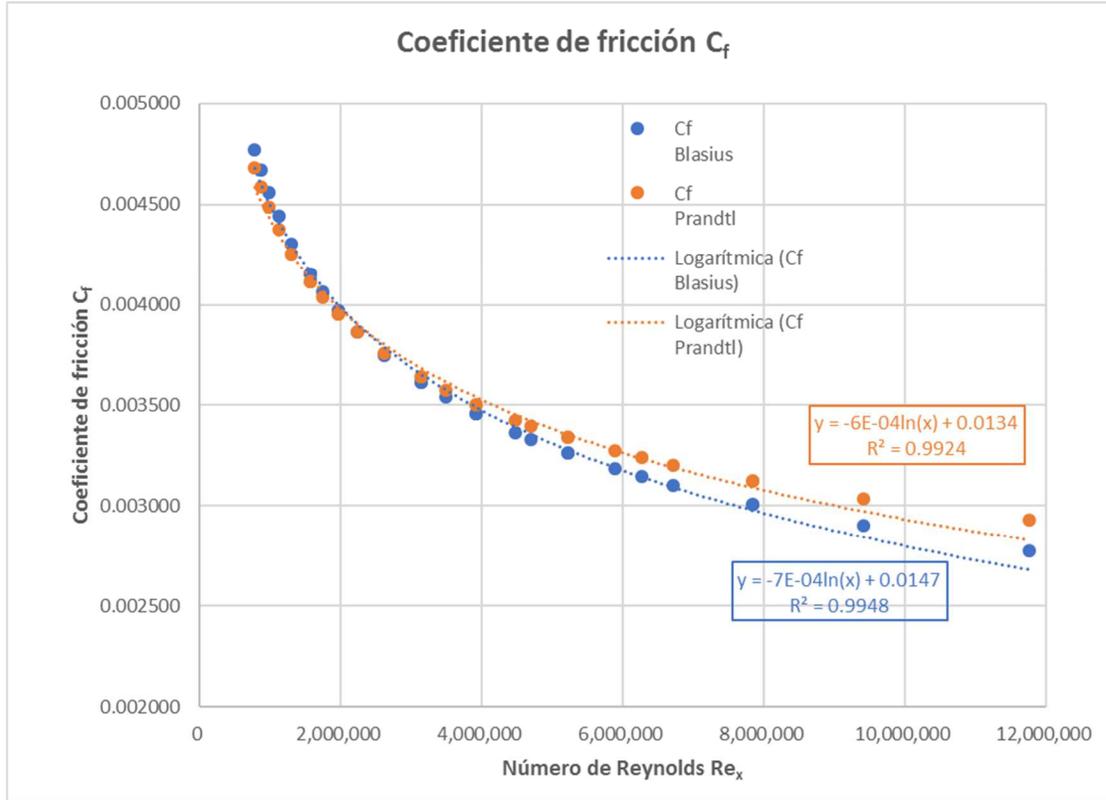


Ilustración 8. Gráfica de los resultados de los coeficientes de arrastre por fricción del sistema Armorshield.

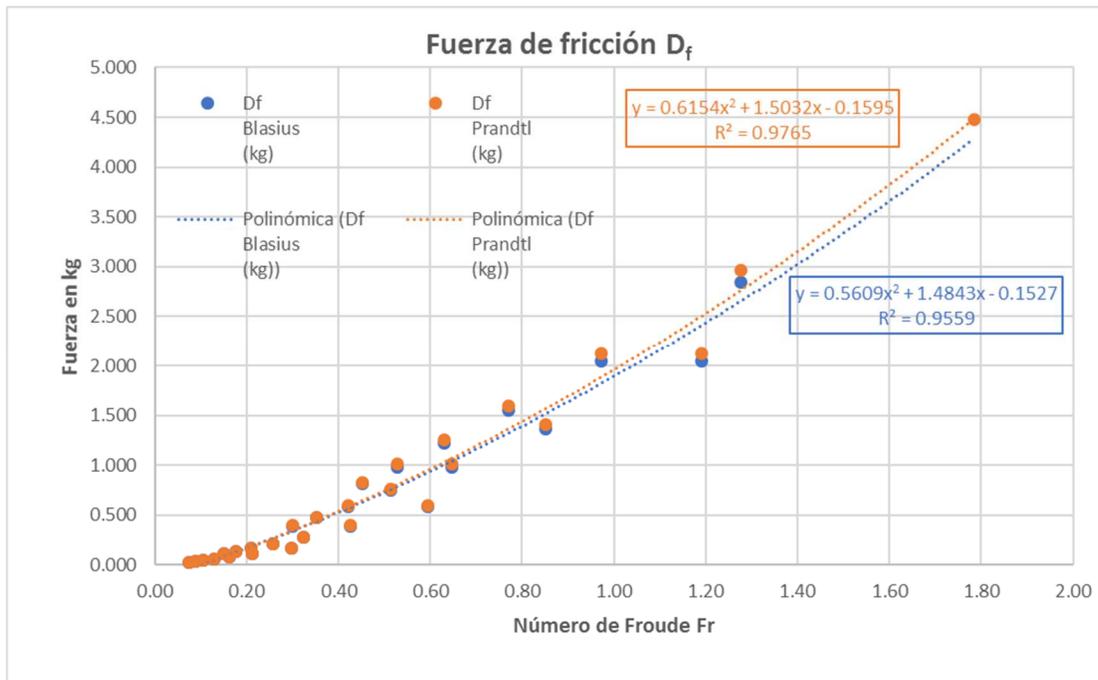


Ilustración 9. Gráfica de los resultados de las fuerzas de arrastre por fricción del sistema Armorshield.

Conclusión de los resultados analíticos de la fuerza de arrastre.

Los resultados analíticos muestran un comportamiento muy regular, conforme las fórmulas para determinar los coeficientes de fricción y los parámetros hidráulicos en función del número de Froude en la determinación de los coeficientes y la fuerza de arrastre. Además, son congruentes, considerando que el coeficiente y la fuerza son directamente proporcional a los números de Reynolds y Froude, respectivamente. Estos resultados serán comparados con los obtenidos con el modelo físico en el capítulo correspondiente. Sin embargo, deben tomarse con reserva, ya que los valores de los coeficientes utilizados corresponden a geometrías y casos que existen en la literatura pero que no son precisamente los más adecuados para el caso que nos ocupa, de aquí se desprende la necesidad imperante de determinar experimentalmente las fuerzas de arrastre y sustentación en el modelo físico.

COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Ley universal de velocidades

El aspecto más importante en la evaluación del esfuerzo cortante consiste en determinar la distribución de velocidades del perfil del flujo. En la ilustración 10 se presenta una gráfica idealizada de la distribución de velocidades en un flujo bidimensional a superficie libre en un canal, en donde se aprecia la distribución de velocidades clásica.

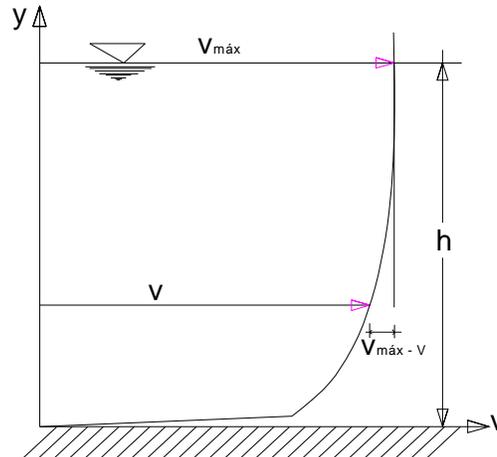


Ilustración 10. Distribución de velocidades de un flujo bidimensional a superficie libre.

Perfiles similares se esperan obtener en el presente estudio. Estos perfiles son modificados debido a la presencia del elemento que se interpone al flujo, principalmente en el fondo y las paredes del canal; es decir, en las zonas donde la variación de la velocidad es muy rápida, conocida como capa límite. Con el análisis de esta zona y de la distribución del flujo general en cada sección se determinarán los coeficientes de fricción, arrastre y sustentación.

Varios investigadores han comprobado experimentalmente que es común en un perfil de velocidades de flujo turbulento se distingan tres zonas de comportamiento, como se muestra en la ilustración 11.

La zona o-a es una capa muy delgada en la que el esfuerzo viscoso predomina y el turbulento es despreciable. La zona a-b, inmediatamente arriba, es de transición y en ella el esfuerzo viscoso y el turbulento son del mismo orden de magnitud. Lejos de la pared (zona b-e) se tiene un área turbulenta donde el esfuerzo viscoso puede ser totalmente despreciado, en comparación del turbulento.

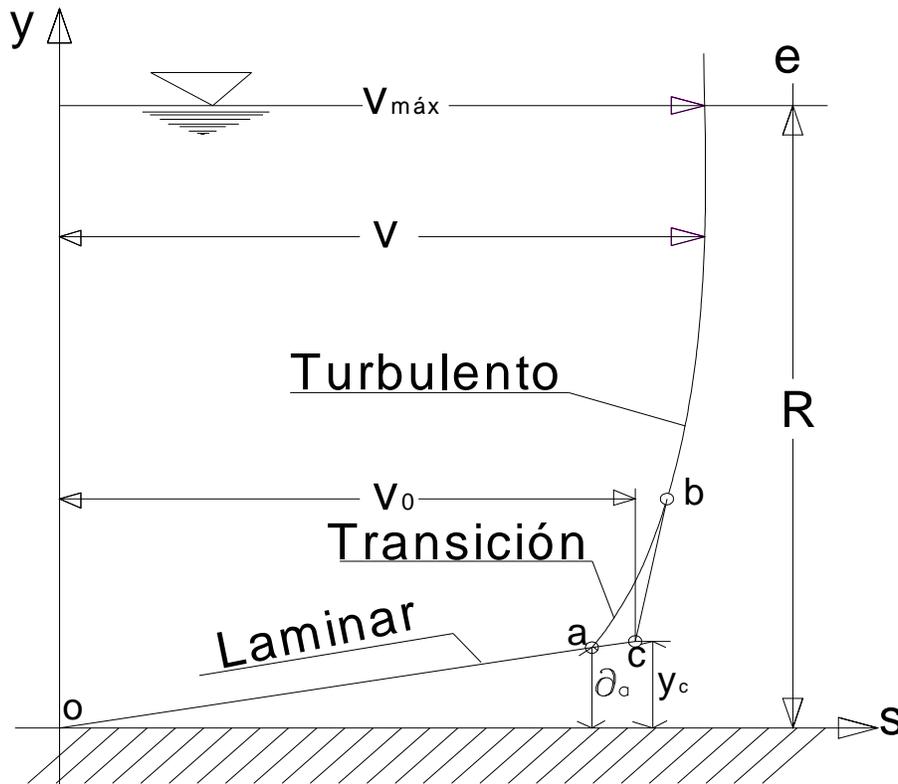


Ilustración 11. Perfil vertical de velocidad de flujo turbulento, fondo liso.

Es importante mantener presente estos conceptos, ya que el esfuerzo cortante y por consiguiente los coeficientes de pérdidas por fricción varían de acuerdo a la distribución de velocidades aquí descritas.

El concepto de pérdida en un canal es igual al que se utiliza en el cálculo de conductos a presión, es decir, en un canal existen también pérdidas por fricción y locales. En lo relativo a la fricción, la pendiente hidráulica en los conductos a presión es constante debido a que el diámetro también lo es en tramos largos y, por lo mismo, la velocidad. En cambio, en un canal, aun de sección y rugosidad constantes, el flujo puede ser variado, lo que hace que la pendiente hidráulica cambie continuamente de una sección a otra. Solo en un flujo uniforme se encuentra la misma inclinación en la plantilla, superficie libre y línea de energía. Para lograr esto se requiere de tramos lo suficientemente largos para que se alcance dicha uniformidad.

Por estas razones, es más común en canales asociar la pérdida de fricción en un tramo con la pendiente media de fricción en el mismo.

Cuando se conocen las correspondientes, velocidad media, la velocidad de fricción, y el valor de la rugosidad, de acuerdo con el tipo de flujo, en este caso turbulento, y el comportamiento de la pared, se puede aplicar la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2}; \quad R_h = A/P_m$$

Donde:

- V velocidad media del flujo
- R_h radio hidráulico que es el área dividida por el perímetro mojado.
- A área hidráulica: $A = b d$
- P_m perímetro mojado $P_m = 2d + b$
- S_f pendiente media de fricción
- d profundidad media del flujo
- b ancho del canal

Para un flujo uniforme se entiende que la pendiente media de fricción es paralela al fondo del canal.

Capa límite y rugosidad superficial

Un principio universalmente aceptado en la mecánica de fluidos es el que establece que la velocidad de las partículas en contacto con una frontera sólida estacionaria es cero. Esto significa que el perfil de distribución de la velocidad de cualquier flujo sobre dicha frontera es el resultado de que la fuerza de fricción, generada sobre la frontera, ejerce su influencia hacia el interior del flujo. Debido a que el agua tiene una viscosidad dinámica (μ) es muy pequeña, es frecuente que su efecto se confine a una capa delgada en la inmediata vecindad de la frontera, conocida como subcapa laminar. En esta la diferencia de presión en la dirección transversal es despreciable, debido a que su espesor es muy pequeño en comparación con las dimensiones típicas lineales del flujo. Fuera de la subcapa laminar el fluido se comporta como si no tuviera viscosidad.

Los problemas de fricción que se presentan en la práctica son en general en canales rugosos con flujo turbulento plenamente desarrollado y comportamiento de su pared como se ha discutido.

Un canal puede tener factores de fricción distintos en el fondo y en las paredes. Por ejemplo, el fondo de los canales de experimentación en laboratorio puede tener mayor rugosidad para simular condiciones naturales, pero sus paredes pueden ser lisas, constituidas por material transparente (vidrio o acrílico). El factor de fricción de la sección compuesta se determina comúnmente a partir de mediciones de la pendiente de la superficie libre del agua y del radio hidráulico; sin embargo, el correspondiente solo al fondo permanecería desconocido, Para obtenerlo es indispensable conocer previamente el de las paredes.

Vanoni y Brooks (referencia 10), en 1957, desarrollaron un método para determinar el factor de fricción en el fondo de canales en esta condición, con base en las siguientes consideraciones:

- El área hidráulica se divide en dos partes: una en la que el flujo produce esfuerzo tangencial sobre el fondo y otra en que lo causa sobre las dos paredes. Sobre la línea de frontera de ambas partes, el esfuerzo tangencial vale cero y el perímetro que corresponde a dichas líneas no se incluye en el mojado de la sección completa.
- La velocidad media V_b en la subsección del fondo es igual a la media V_w en la subsección de las paredes y, cualquiera que sea la distribución del área en dichas subsecciones, V_w es igual a la velocidad, media V en toda la sección.
- Las subsecciones de flujo del fondo y paredes actúan como canales independientes, y sus rugosidades son homogéneas, si bien diferentes.



Ilustración 12. Definición de la sección de rugosidad compuesta.

Si se considera que las paredes son lisas, su factor de fricción f_w sería función únicamente del número de Reynolds de la sección que a ellas corresponde y, en principio, se desconoce.

En el presente estudio, esta consideración se resolvió aplicando el modelo numérico unidimensional HEC-RAS, el cual permite aplicar diferentes coeficientes de rugosidad n para las paredes y el fondo del canal, utilizando los resultados obtenidos en el modelo físico.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO

El análisis en el modelo físico se basó en determinar las fuerzas que actúan sobre el sistema de protección (tapete), mediante la determinación de la variación de cantidad de movimiento entre la sección entrada, tres diferentes secciones, hasta la sección de salida del volumen de control. De esta forma se conoce la fuerza hidrodinámica que es tomada por el sistema la cual se debe a las fuerzas de arrastre, que a su vez pueden ser interpretadas como pérdidas de energía debidas a la rugosidad y viscosidad del fluido en las fronteras sólidas del volumen de control. Con el análisis de estos resultados, es posible estimar los coeficientes de arrastre del tapete.

Las fuerzas de presión y sustentación no se consideran en el análisis dado que no se presenta en el modelo una frontera perpendicular al flujo.

Diseño y montaje del modelo físico

Cada una de las fronteras de los modelos físicos, así como el patrón de flujo, los campos de velocidad y aceleraciones del sistema conduce a observar el campo de fuerzas, es decir, satisfacer las ecuaciones de inercia, de gravedad, de viscosidad, de presión, etc. (similitud cinemática y dinámica).

Debido a que, para este caso, el flujo de prueba se presenta a superficie libre, y a que los elementos que se están probando se encuentra sumergido es importante la componente de presión en el fenómeno estudiado, el comportamiento hidráulico es dominado por fuerzas de gravedad, presión e inercia, y las leyes de similitud correspondientes son las de Euler (E_u) y Froude (F_r) y para los efectos viscosos la de Reynolds (R_e). Por otro lado, debido a que se utiliza en el modelo el mismo fluido que en el prototipo, agua, se presenta también simultaneidad entre E_u y F_r . Por lo que se puede utilizar cualquiera de las dos relaciones como ley de similitud. Para este caso se utilizó la teoría de similitud de Froude (F_r) para el diseño y análisis del modelo, relación suficiente, siempre y cuando se mantenga el flujo dentro de la condición de flujo turbulento. En tabla 2 se muestra el análisis de escalas para la similitud de Froude.

La selección de la escala se realizó considerando las dimensiones y capacidad de las instalaciones existentes que se utilizaron en el laboratorio, como lo es el ancho, alto y gasto disponible en el canal de pendiente variable principalmente. Así, la escala más adecuada resultó ser 1:4.14 para los criterios de Euler y Froude. El material del tapete modelo será de concreto simple de tal forma que cumpla con la escala de fuerzas. La tabla 2 muestra las escalas de las variables hidráulicas involucradas en el fenómeno. Las principales escalas características del modelo físico son:

Escala de líneas verticales y horizontales; $E_L = 1:4.14$

Escala de áreas; $E_A = E_L^2 = 17.14$

Escala de velocidades; $E_V = E_L^{1/2} = 2.035$

Escala de gastos; $E_Q = E_L^{5/2} = 1:34.874$

Escala de fuerzas; $E_F = E_L^3 E_\gamma = 1: 70.96$. (mismo material y fluido que el prototipo, por tanto, $E_\gamma=1$)

Escala de rugosidad, número de Manning; $E_n = E_L^{1/6} = 1:1.267$

Dadas las características de los materiales que conforman el modelo; acrílico en las paredes y fondo del canal sin tapete de prueba, y concreto con la geometría de los tapetes a escala en el fondo, se tendrían valores de rugosidad siguientes:

$n_{acrílico} = 0.008$ a 0.010 (según Chow, Sotelo, Referencia 4)

$n_{tapete} =$ por determinar en el presente estudio

El planteamiento del estudio radicó básicamente en determinar las fuerzas de arrastre generadas por el tapete y el coeficiente de rugosidad correspondiente.

Descripción del Modelo

El modelo físico a escala reducida se montó en el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica Enzo Levi, de 60cm de ancho, 70cm de altura y 18m de longitud, con la facilidad de modificar la pendiente desde -0.006 a 0.012. Para las pruebas de arrastre, el tapete se colocó a cinco metros del ingreso del flujo al canal con la finalidad de permitir la transición a una distribución de velocidades uniforme, la longitud del modelo fue de cinco tapetes (7.30m aproximadamente). En las pruebas para determinar el coeficiente de rugosidad se utilizaron 12 tapetes (17.52m aproximadamente), se ocupó prácticamente toda la longitud del canal. Las fotografías 1 y 2 muestran la disposición de los tapetes en el canal, el cuadro 4 las características físicas de los tapetes probados, y las ilustraciones 13 a 16 muestran la geometría de sus piezas individuales.

Es importante recordar que los bloques de concreto Armorshield cuentan con un dissipador de energía de altura y ángulo variable el cual por las características específicas de este estudio se determinó no integrarlo pues su altura en la pieza de concreto a escala real es de 1mm. A la escala 1:4.14 no sería factible reproducirlo y su efecto para la prueba de estabilidad al flujo tendría que someterse con otro planteamiento de escala. En el ANEXO A, se observa el detalle de la forma de este dissipador.

CONDICIÓN DE SIMILITUD

Parámetros	EULER		FROUDE		REYNOLDS	
	Escala	Valor	Escala	Valor	Escala	Valor
	$E = \frac{v^2 \rho}{p}$		$F_r = \frac{v^2}{yg}$		$R_e = \frac{vy}{\nu}$	
Longitud (E_L):	E_L	4.14	E_L	4.14	E_L	4.14
Area (E_A):	E_L^2	17.14	E_L^2	17.14	E_L^2	17.14
Volumen (E_V):	E_L^3	70.96	E_L^3	70.96	E_L^3	70.96
Tiempo (E_t):	$(E_L/E_g)^{1/2}$	2.03	$(E_L/E_g)^{1/2}$	2.03	E_L^2/E_v	17.14
Velocidad (E_v):	$(E_L E_g)^{1/2}$	2.03	$(E_L E_g)^{1/2}$	2.03	E_v/E_L	0.24
Gasto (E_Q):	$(E_L^5/E_g)^{1/2}$	34.87	$(E_L^5/E_g)^{1/2}$	34.87	$E_L E_v$	4.14
Fuerza (E_F):	$E_L^3 E_\gamma$	70.96	$E_L^3 E_\gamma$	70.96	$E_\rho E_v^2$	1.00
Presión (E_p):	$E_\gamma E_L$	4.14	$E_\gamma E_L$	4.14	$E_\rho E_v^2/E_L^2$	0.06
Pendiente (E_s):	1.000	1.00	1.000	1.00	1.000	1.00

Dimensiones:	Ancho	Largo	Unidad.
Area del prototipo por representar:	2.42	6.11	m
Area disponible en la mesa:	0.58	10.00	m
Velocidad máxima a representar:	4.00		m/s
Tirante máximo a representar:	2.00		m
Gasto máximo a representar:	10.46		m ³ /s
Velocidad mínima a representar:	1.00		m/s
Tirante mínimo a representar:	1.14		m
Gasto mínimo a representar:	2.76		m ³ /s
Coefficiente de rugosidad (Manning) en prototipo:	0.014		
Coefficiente de Chezy en prototipo:	93.03		
Ancho medio de la SLA En prototipo:	2.44		m
Tirante hidráulico Y:	2.00		m
Área hidráulica media en prototipo:	4.88		m
Viscocidad cinemática:	1.06E-06		m ² /s
Coefficiente de rugosidad del acabado del modelo:	0.010		
Número de Reynolds del prototipo**:	1.08E+06		

ESCALAS			DIMENSIONES EN MODELO			GASTOS EN LITROS POR SEGUNDO			Número de Reynolds del modelo**	Criterio
Horizontal	Distorsión	Vertical	Ancho	Largo	Prof. @ 1m.	Escala	Mínimo	Máximo		
4.14	1	4.14	0.58	1.48	0.2415	34.9	79.1	299.9	127,673	Euler y Froude
4.15	1	4.15	0.58	1.47	0.2410	35.1	78.6	298.1	127,212	Euler y Froude
4.40	1	4.4	0.55	1.39	0.2273	40.6	67.9	257.6	116,525	Euler y Froude
4.65	1	4.65	0.52	1.31	0.2151	46.6	59.2	224.3	107,255	Euler y Froude
4.14	1	4.14	0.58	1.48	0.2415	4.1	666.3	2526.6	1,075,472	Reynolds
4.15	1	4.15	0.58	1.47	0.2410	4.2	664.7	2520.5	1,075,472	Reynolds
4.40	1	4.4	0.55	1.39	0.2273	4.4	627.0	2377.3	1,075,472	Reynolds
4.65	1	4.65	0.52	1.31	0.2151	4.7	593.2	2249.5	1,075,472	Reynolds
4.9	1	4.9	0.49	1.25	0.2041	4.9	563.0	2134.7	1,075,472	Reynolds

Escalas de líneas recomendables para un modelo de de obras con flujo a superficie libre: El 1:10 a 1:100, sin distorsión

** Número de Reynolds para el gasto mínimo del flujo en la sección modelo considerando : $Re=VY/\nu$

Cuadro 3. Análisis de Escalas para el modelo físico



En la fotografía 2 se aprecian los medidores de nivel ultrasónicos utilizados en las pruebas. Es importante mencionar que el tramo inicial del canal, antes del tapete, se cubrió con una capa de material de espesor igual al del tapete, con la finalidad de evitar que el tapete presente directamente al flujo, el área proyectada de su espesor, de esta forma se tiene como componente de arrastre solo la de fricción.

DIMENSIONES PROMEDIO DE TAPETES PROBADOS EN EL MODELO ESC: 4.14						
Tipo	Espesor m	Numero de piezas	Ancho m	Largo m	Peso kg	% error en peso
D1	0.029	90	0.592	1.457	43.767	0.000%
	0.041	90	0.585	1.467	60.740	0.001%
	0.056	90	0.590	1.460	84.000	0.001%

Cuadro 4. Características físicas del modelo del tapete D1 (ARMORSHIELD)

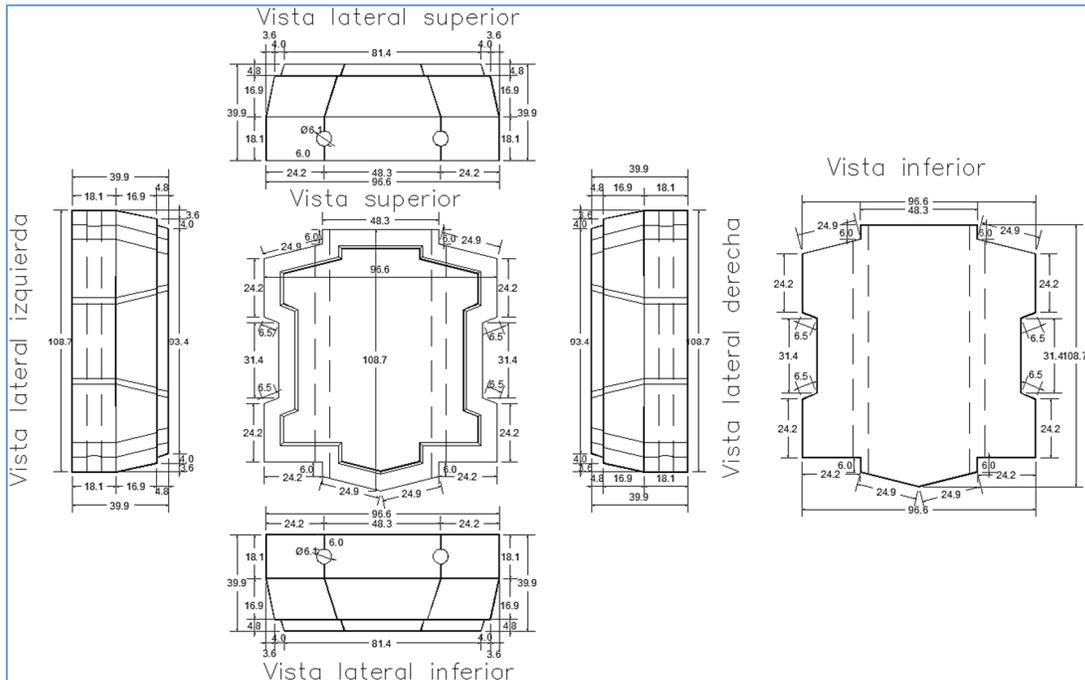


Ilustración 15 Pieza del modelo del Tapete D1 de 17 cm de espesor Acotaciones en mm. Estas piezas pueden ser observadas con su disipador de energía en el ANEXO "A"

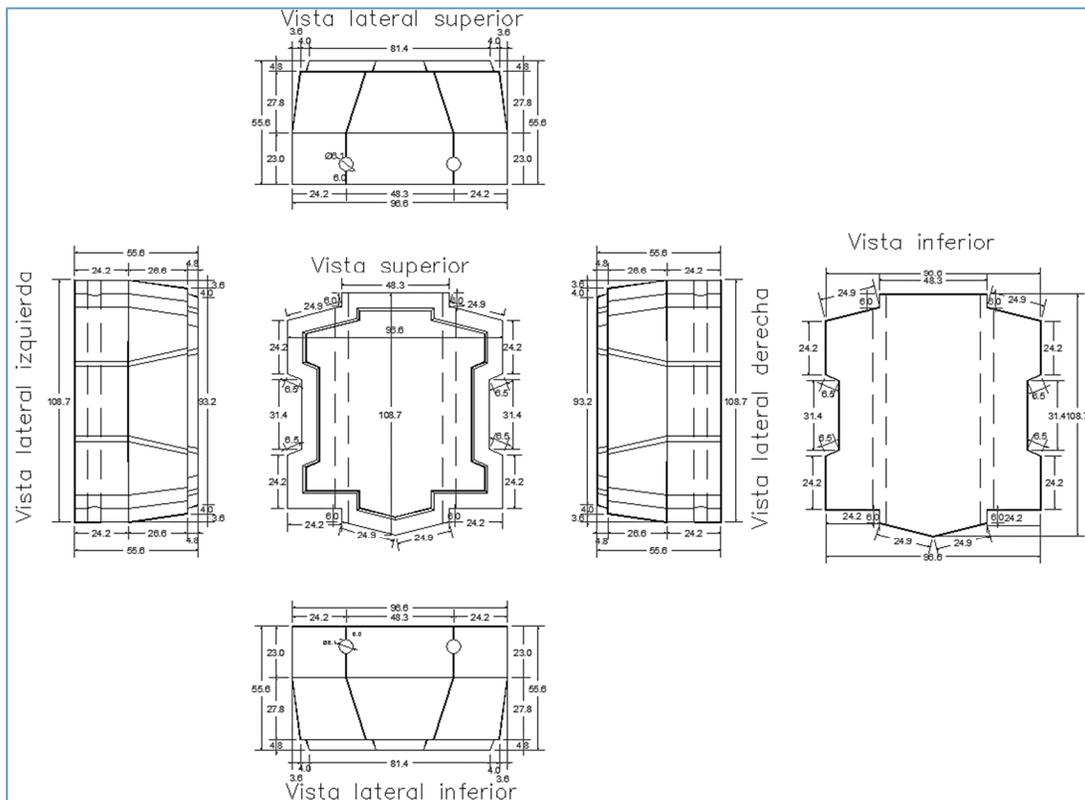


Ilustración 16 Pieza del modelo del Tapete D1 de 23 cm de espesor Acotaciones en mm. Estas piezas pueden ser observadas con su disipador de energía en el ANEXO "A"

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con la finalidad de definir y acotar los experimentos, se realizó un análisis hidráulico con los parámetros que pueden ser variados considerando la capacidad de las instalaciones del laboratorio. De esta forma se obtuvo el número de Froude máximo, y el mínimo manteniendo en régimen turbulento el flujo. La tabla 5 y la ilustración 17 muestran los resultados de éste análisis.

En el análisis para régimen permanente se aplicó la fórmula de Manning. A continuación, se muestran las fórmulas utilizadas:

<i>Fórmula de Manning:</i>	$V = \frac{1}{n} S^{1/2} R^{2/3}$	Ecuación 19
<i>Radio hidráulico:</i>	$R = \frac{A}{P_m}$	Ecuación 20
<i>Área hidráulica:</i>	$A = B y$	Ecuación 21
<i>Gasto del flujo:</i>	$Q = AV$	Ecuación 22
<i>Número de Froude:</i>	$F_r = \frac{v^2}{gy}$	Ecuación 23
<i>Número de Reynolds:</i>	$R_e = \frac{vy}{\nu}$	Ecuación 24

Donde:

V. Velocidad en metros por segundo (m/s)

S. Pendiente geométrica del canal (adimensional)

R. Radio hidráulico (m)

A. Área hidráulica (m²)

Q. Gasto del flujo (m³/s)

B. Ancho del canal (m)

y. Profundidad del flujo (m)

F_r. Número de Froude (adimensional)

R_e. Número de Reynolds (adimensional)

g. Valor de la aceleración de la gravedad (9.81m/s²)

ν. Viscosidad cinemática del agua a 20° C (1.007E⁻⁶m²/s)

El análisis de la tabla 5 muestra la gama de experimentos que podrían realizarse en el canal de pendiente variable, la curva característica entre el número de Froude y la relación gasto tirante (Q/d, dado que el ancho es fijo), se graficó la ilustración 17.

Con la finalidad de resumir aún más las pruebas, se agruparon las pendientes de la línea de energía en cinco pendientes físicas, cuadro 6, los colores corresponden a los grupos seleccionados del cuadro 5.

MODELO					PROTOTIPO									
Gasto Q(m³/s)	Velocidad V(m/s)	Base b(m)	Profundidad d(m)	n	Pendiente de energía S _E	Froude	Longitud Canal	Desnivel canal	Q/d (m²/s)	Gasto Q(m³/s)	Velocidad V(m/s)	Base b(m)	Profundidad d(m)	n
0.300	2.000	0.600	0.25	0.010	0.0057	1.277	18.00	0.1026	1.200	10.462	4.069	2.484	1.035	0.013
0.300	1.667	0.600	0.30	0.010	0.0035	0.972	18.00	0.0627	1.000	10.462	3.391	2.484	1.242	0.013
0.300	1.429	0.600	0.35	0.010	0.0023	0.771	18.00	0.0418	0.857	10.462	2.907	2.484	1.449	0.013
0.300	1.250	0.600	0.40	0.010	0.0016	0.631	18.00	0.0295	0.750	10.462	2.543	2.484	1.656	0.013
0.300	1.141	0.600	0.44	0.010	0.0013	0.550	18.00	0.0234	0.685	10.462	2.322	2.484	1.814	0.013
0.300	0.966	0.600	0.52	0.010	0.0009	0.429	18.00	0.0154	0.580	10.462	1.966	2.484	2.143	0.013
0.300	0.909	0.600	0.55	0.010	0.0007	0.391	18.00	0.0132	0.545	10.462	1.850	2.484	2.277	0.013
0.200	1.333	0.600	0.25	0.010	0.0025	0.851	18.00	0.0456	0.800	6.975	2.713	2.484	1.035	0.013
0.200	1.111	0.600	0.30	0.010	0.0015	0.648	18.00	0.0279	0.667	6.975	2.261	2.484	1.242	0.013
0.200	0.996	0.600	0.33	0.010	0.0012	0.550	18.00	0.0209	0.598	6.975	2.027	2.484	1.385	0.013
0.200	0.842	0.600	0.40	0.010	0.0007	0.427	18.00	0.0135	0.505	6.975	1.713	2.484	1.639	0.013
0.200	0.741	0.600	0.45	0.010	0.0005	0.353	18.00	0.0097	0.444	6.975	1.507	2.484	1.863	0.013
0.100	0.667	0.600	0.25	0.010	0.0006	0.426	18.00	0.0114	0.400	3.487	1.356	2.484	1.035	0.013
0.100	0.556	0.600	0.30	0.010	0.0004	0.324	18.00	0.0070	0.333	3.487	1.130	2.484	1.242	0.013
0.050	0.333	0.600	0.25	0.010	0.0002	0.213	18.00	0.0028	0.200	1.744	0.678	2.484	1.035	0.013
0.050	0.278	0.600	0.30	0.010	0.0001	0.162	18.00	0.0017	0.167	1.744	0.565	2.484	1.242	0.013

Cuadro 5. Características hidráulicas para la programación de la gama de ensayos posibles en el canal de pendiente variable

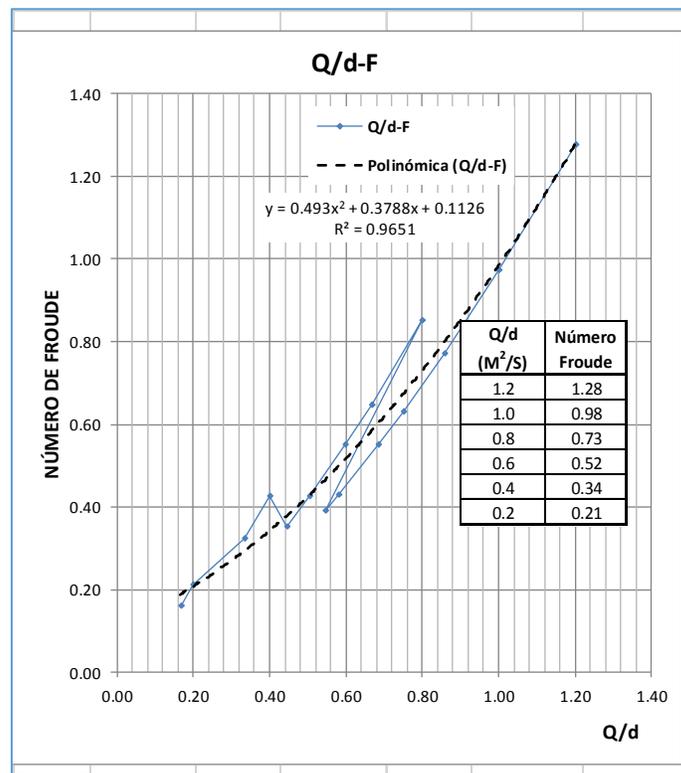


Ilustración 17. Relación entre el número de Froude y las variables del modelo: gasto (Q) y profundidad (d) para cubrir el rango requerido de ensayos.

Desnivel canal (m)	Pendientes utilizadas D1
0.103	0.0060
0.063	0.0037
0.042	0.0024
0.015	0.0009
0.004	0.0002

Cuadro 6. Pendientes físicas seleccionadas para las pruebas en el modelo.

Finalmente, considerando los tres espesores, se diseñaron seis pruebas de evaluación y al menos dos preliminares, calibración y ajuste para cada tapete, es decir ocho pruebas por serie.

Considerando lo anterior, se programaron 37 pruebas para el estudio del sistema Armorshield. La duración de cada serie fue de dos días hábiles en promedio, incluye la preparación, prueba y análisis, el tiempo efectivo total estimado de pruebas resultó entonces de cuatro meses aproximadamente. El cuadro 7 muestra, en color los parámetros de cada prueba.

Q/d (m ² /s)	Número Froude	Sin tapete			Sin tapete			Sin tapete			Sin tapete		
		Serie 1	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 2	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 3	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 4	Q (m ³ /s)	d (m)
1.2	1.28	Serie 1.1	0.300	0.25	Serie 2.	0.200	0.17	Serie 3.	0.100	0.08	Serie 4.	0.050	0.04
1.0	0.98	Serie 1.2	0.300	0.30	Serie 2.1	0.200	0.20	Serie 3.	0.100	0.10	Serie 4.	0.050	0.05
0.8	0.73	Serie 1.3	0.300	0.38	Serie 2.2	0.200	0.25	Serie 3.	0.100	0.13	Serie 4.	0.050	0.06
0.6	0.52	Serie 1.4	0.300	0.50	Serie 2.3	0.200	0.33	Serie 3.	0.100	0.17	Serie 4.	0.050	0.08
0.4	0.34	Serie 1.5	0.300	0.75	Serie 2.4	0.200	0.50	Serie 3.1	0.100	0.25	Serie 4.	0.050	0.13
0.2	0.21	Serie 1.6	0.300	1.50	Serie 2.	0.200	1.00	Serie 3.2	0.100	0.50	Serie 4.1	0.050	0.25
		Con tapete D1 (e=12cm)			Con tapete D1 (e=12cm)			Con tapete D1 (e=12cm)			Con tapete D1 (e=12cm)		
Q/d (m ² /s)	Número Froude	Serie 5	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 6	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 7	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 8	Q (m ³ /s)	d (m)
1.2	1.28	Serie 5.1	0.300	0.25	Serie 6.	0.200	0.17	Serie 7.	0.100	0.08	Serie 8.	0.050	0.04
1.0	0.98	Serie 5.2	0.300	0.30	Serie 6.1	0.200	0.20	Serie 7.	0.100	0.10	Serie 8.	0.050	0.05
0.8	0.73	Serie 5.3	0.300	0.38	Serie 6.2	0.200	0.25	Serie 7.	0.100	0.13	Serie 8.	0.050	0.06
0.6	0.52	Serie 5.4	0.300	0.50	Serie 6.3	0.200	0.33	Serie 7.	0.100	0.17	Serie 8.	0.050	0.08
0.4	0.34	Serie 5.5	0.300	0.75	Serie 6.4	0.200	0.50	Serie 7.1	0.100	0.25	Serie 8.	0.050	0.13
0.2	0.21	Serie 5.6	0.300	1.50	Serie 6.	0.200	1.00	Serie 7.2	0.100	0.50	Serie 8.1	0.050	0.25
		Con tapete D1 (e=17cm)			Con tapete D1 (e=17cm)			Con tapete D1 (e=17cm)			Con tapete D1 (e=17cm)		
Q/d (m ² /s)	Número Froude	Serie 9	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 10	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 11	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 12	Q (m ³ /s)	d (m)
1.2	1.28	Serie 9	0.300	0.250	Serie 10	0.200	0.17	Serie 11.	0.100	0.08	Serie 12.	0.050	0.04
1.0	0.98	Serie 9	0.300	0.300	Serie 10	0.200	0.200	Serie 11.	0.100	0.10	Serie 12.	0.050	0.05
0.8	0.73	Serie 9.1	0.3000	0.3750	Serie 10	0.200	0.250	Serie 11.	0.100	0.13	Serie 12.	0.050	0.06
0.6	0.52	Serie 9.2	0.3000	0.5000	Serie 10.1	0.200	0.33	Serie 11.	0.100	0.17	Serie 12.	0.050	0.08
0.4	0.34	Serie 9.3	0.3000	0.5000	Serie 10.2	0.200	0.50	Serie 11.1	0.100	0.25	Serie 12.	0.050	0.13
0.2	0.21	Serie 9.6	0.300	1.50	Serie 10.	0.200	1.00	Serie 11.2	0.100	0.50	Serie 12.1	0.050	0.25

Cuadro 7. Programación de pruebas para el tapete D1.

Q/d (m ² /s)	Número Froude	Con tapete D1 (e=23cm)											
		Serie 13	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 14	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 15	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 16	Q (m ³ /s)	d (m)
1.2	1.28	Serie 13.1	0.300	0.25	Serie 10.	0.200	0.17	Serie 11.	0.100	0.08	Serie 12.	0.050	0.04
1.0	0.98	Serie 13.2	0.300	0.30	Serie 14.1	0.200	0.20	Serie 11.	0.100	0.10	Serie 12.	0.050	0.05
0.8	0.73	Serie 13.3	0.300	0.38	Serie 14.2	0.200	0.25	Serie 11.	0.100	0.13	Serie 12.	0.050	0.06
0.6	0.52	Serie 13.4	0.300	0.50	Serie 14.3	0.200	0.33	Serie 11.	0.100	0.17	Serie 12.	0.050	0.08
0.4	0.34	Serie 9.5	0.300	0.75	Serie 14.4	0.200	0.50	Serie 15.1	0.100	0.25	Serie 12.	0.050	0.13
0.2	0.21	Serie 9.6	0.300	1.50	Serie 10.	0.200	1.00	Serie 15.2	0.100	0.50	Serie 16.1	0.050	0.25

Cuadro 7. Programación de pruebas para el tapete D1 (continuación)

Las pruebas sin tapete se realizaron con la finalidad de tener una referencia comparativa de las condiciones hidráulicas del canal con los tapetes.

El detalle de cada serie se redefinió conforme al avance el estudio, dependiendo del desarrollo de la prueba y el comportamiento del flujo, así como las condiciones para lograr medir sus parámetros.

PROGRAMA DE EXPERIMENTOS.

Consideraciones para el planteamiento de los ensayos.

El programa de ensayos fue rediseñado conforme a los resultados obtenidos al final de cada serie de pruebas realizadas, principalmente en la combinación de gastos y profundidades y sus relaciones con el número de Froude.

Las pruebas se iniciaron con ensayos para números de Froude altos, gasto de 300 litros por segundo con profundidades de mayor a menor.

Instrumentación

Para tomar el perfil de velocidades a 3 cm del fondo del canal se utilizó un medidor de velocidades Vectrino Profiler es un instrumento acústico Doppler de alta resolución que se utiliza para medir la turbulencia y la velocidad del agua en 3 dimensiones en una amplia variedad de aplicaciones. Su utilización es con la finalidad de visualizar la capa límite en la frontera del fondo ver fotografías 3 y 4.



Fotografía 3. Vectrino Profiler



Fotografía 4. Instalación del medidor Vectrino Profile

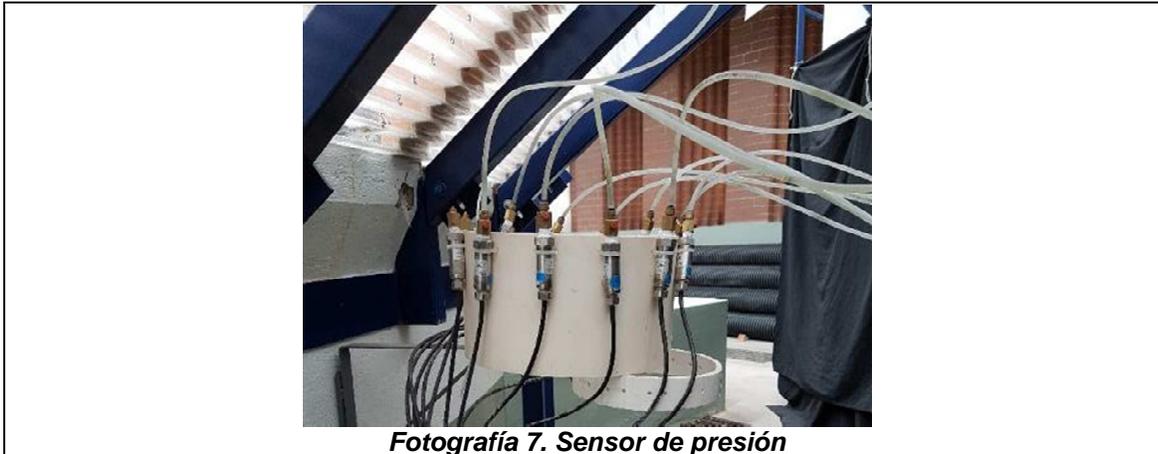
Se utilizaron 5 sensores de nivel SITRANS Probe LU (Ultrasonic) con precisión de decimas de mm, con el cual se determinaron las profundidades en las cinco secciones del canal, tres de las cuales se encuentran en el tramo del tapete.



Fotografía 5. SITRANS Probe LU (Ultrasonic)



Fotografía 6. Vista del canal de pendiente variable con sensores de nivel.

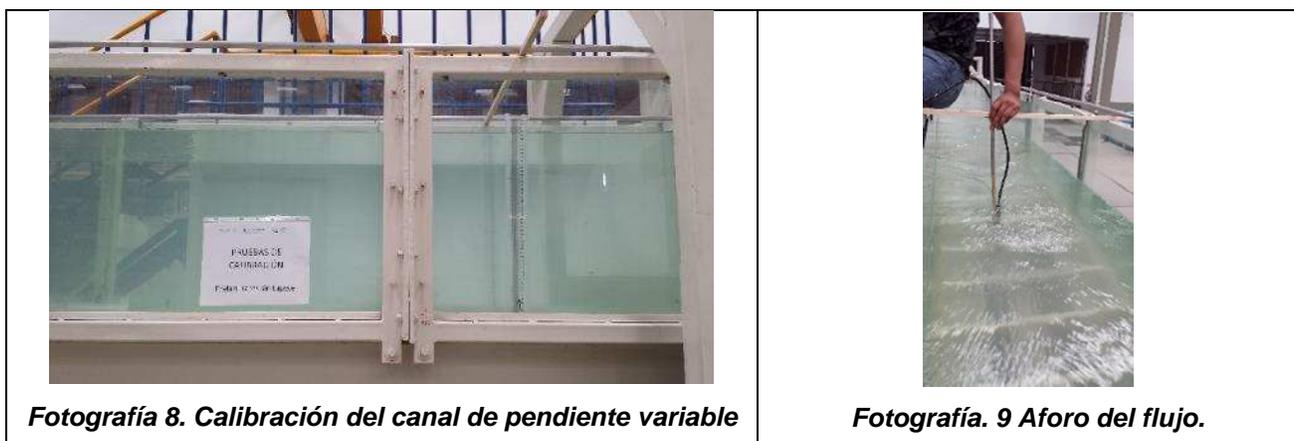


Se midieron presiones utilizando sensores electrónicos de presión en 5 diferentes puntos del fondo del canal. Los sensores tienen una precisión de un mm.

Pruebas preliminares

Estos ensayos fueron base para ajustar y calibrar la apertura de las válvulas, pendiente del canal y verificar las condiciones y límites de este y de los dispositivos de control, medición y las condiciones del canal de pendiente variable.

La calibración de la válvula se llevó a cabo realizando aperturas por cuartos de vuelta y aforando el gasto en el canal de pendiente variable, en la ilustración 18 se muestran los resultados de esta calibración.



La serie de pruebas preliminares ayudaron a reconocer las condiciones del flujo en el canal de tal forma que permitiera realizar las mediciones correspondientes. De aquí que durante las pruebas de calibración se redefinieron nuevas relaciones de gastos y profundidades, dependiendo principalmente del comportamiento del flujo, estos nuevos escenarios se aplicaron en las pruebas de evaluación sin tapete.

CALIBRACIÓN DE LA VÁLVULA PARA EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE			
No. Vueltas	Y cm	Compuerta cm	Q l/s
5	38.7	30.5	29.3
5 1/4	40.8	30.5	39.8
5 1/2	42	30.5	49.1
5 3/4	43.8	30.5	59.2
6	44.6	30.5	67.7
6 1/2	47	30.5	85.8
7	49.1	30.5	101.9
7 1/4	50	30.5	109.5
7 3/4	51.7	30.5	124.5
8	52.6	30.5	134.3
8 1/2	43.3	20	146.8
9	44.5	20	159.9
9 1/2	45.8	20	177.9
10	29.6	5.5	196.4
10 1/2	30.9	5.5	213.9
11	44.6	15	230.2
11 1/2	45.5	15	244.4
12	46.6	15	258.3
12 1/2	47.7	15	271.5
13	48.6	15	285.5
13 1/2	49.6	15	295.1
13 3/4	50	15	300.6

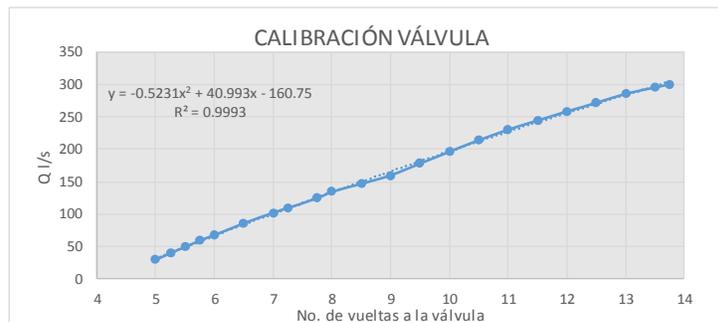


Ilustración 18. Tabla y curva de calibración de la válvula de alimentación del canal de pendiente variable

Serie 1, 2, 3 y 4. Pruebas sin tapete

Esta serie consiste en probar los gastos de 50, 100, 200 y 300 l/s con distintas pendientes y profundidades, como se plantea en los cuadros 8 y 9, definidos en las pruebas preliminares. Se realizaron aforos en 3 secciones distintas a 1.33 m, a 8.72 m y a 16.29 m del inicio del canal, con velocidades a 5, 15, 25 y 35 cm según el tirante utilizado en la prueba dividiendo el ancho del canal en 6 dovelas como se muestra en la ilustración 19.

Q/d (m ² /s)	Número Froude	Sin tapete		Sin tapete		Sin tapete			Sin tapete				
		Serie 1	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 2	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 3	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 4	Q (m ³ /s)	d (m)
1.2	1.28	Serie 1.1	0.300	0.25	Serie 2.	0.200	0.17	Serie 3.	0.100	0.08	Serie 4.	0.050	0.04
1.0	0.98	Serie 1.2	0.300	0.30	Serie 2.1	0.200	0.20	Serie 3.	0.100	0.10	Serie 4.	0.050	0.05
0.8	0.73	Serie 1.3	0.300	0.41	Serie 2.2	0.200	0.25	Serie 3.	0.100	0.13	Serie 4.	0.050	0.06
0.6	0.52	Serie 1.4	0.300	0.50	Serie 2.3	0.200	0.30	Serie 3.	0.100	0.17	Serie 4.	0.050	0.08
0.4	0.34	Serie 1.5	0.300	0.75	Serie 2.4	0.200	0.50	Serie 3.1	0.100	0.25	Serie 4.	0.050	0.13
0.2	0.21	Serie 1.6	0.300	1.50	Serie 2.	0.200	1.00	Serie 3.2	0.100	0.50	Serie 4.1	0.050	0.25

Cuadro 8. Series de calibración 1, 2, 3 y 4. Canal sin tapete

Pendiente S	Desnivel canal (m)
0.0057	0.103
0.0035	0.063
0.0023	0.042
0.0015	0.027
0.0007	0.015
0.0004	0.004

Cuadro 9. Pendientes del canal para las pruebas sin tapete.

Los colores muestran la pendiente del canal para las condiciones hidráulicas requeridas. Las celdas achuradas representan escenarios que no se consideraron necesarios probar.

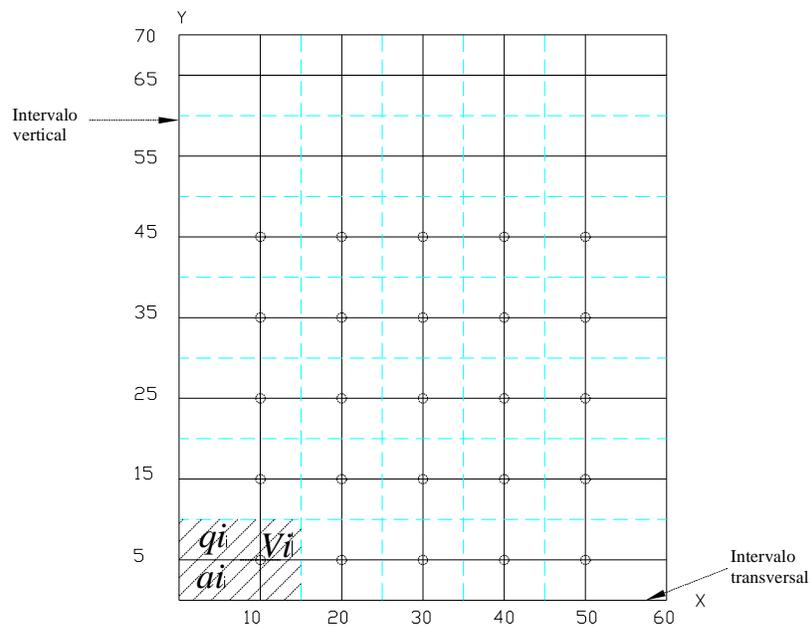


Ilustración 19 Retícula de medición de velocidades en las secciones del canal.

Prueba 1.3

Con un tirante de 50 cm, una pendiente 0.0015 y un gasto de 300 l/s. Para obtener el tirante se levantó la compuerta al final del canal a una altura de 15 cm. Se midió un promedio de velocidades de 1.06 m/s. El flujo se simuló en el modelo numérico HEC-RAS para obtener el número de Manning.



Prueba 2.3

Con un tirante de 30 cm, una pendiente 0.0015 y un gasto de 200 l/s. Para obtener el tirante se levantó la compuerta al final del canal a una altura de 15 cm. Se midió un promedio de velocidades de 0.86 m/s. El flujo se simuló en el modelo numérico HEC-RAS para obtener el número de Manning.



Prueba 3.2

Con un tirante de 50 cm, una pendiente 0.0002 y un gasto de 99.9 l/s. Para obtener el tirante se levantó la compuerta al final del canal a una altura de 30.3 cm. Se midió un promedio de

velocidades de 0.36 m/s. El flujo se simuló en el modelo numérico HEC-RAS para obtener el número de Manning.



Fotografía 14. Velocidades en la sección 1 Sin tapete $y=30$ cm



Fotografía 15. Velocidades en la sección 3 Sin tapete $y=30$ cm

Prueba 4.1

Con un tirante de 25 cm, una pendiente 0.0002 y un gasto de 51.5 l/s. Para obtener el tirante se levantó la compuerta al final del canal a una altura de 13 cm. Se midió un promedio de velocidades de 0.36 m/s. El flujo se simuló en el modelo numérico HEC-RAS para obtener el número de Manning.

De forma similar se realizaron las 10 pruebas de estas series.

Modelación en HEC-RAS para pruebas sin tapete, series 1 a la 4

La modelación del canal en el programa HEC-RAS se realizó para determinar el número de Manning, se configuró el modelo para 18 m del canal con un ancho de 0.60 m y una altura de 70 cm. Se probaron los gastos de 51.5, 99.90, 197.40 y 300.60 l/s. Las condiciones de frontera que se impusieron son los tirantes aguas arriba y aguas abajo del canal, modificando el número de Manning en diferentes secciones hasta lograr los tirantes medidos en el modelo físico. Se obtuvo un valor promedio del número de Manning de $n=0.004$. Este valor corresponde al acrílico que conforman el fondo y las paredes del canal. Las ilustraciones 20 y 21 muestran los resultados de estas simulaciones.

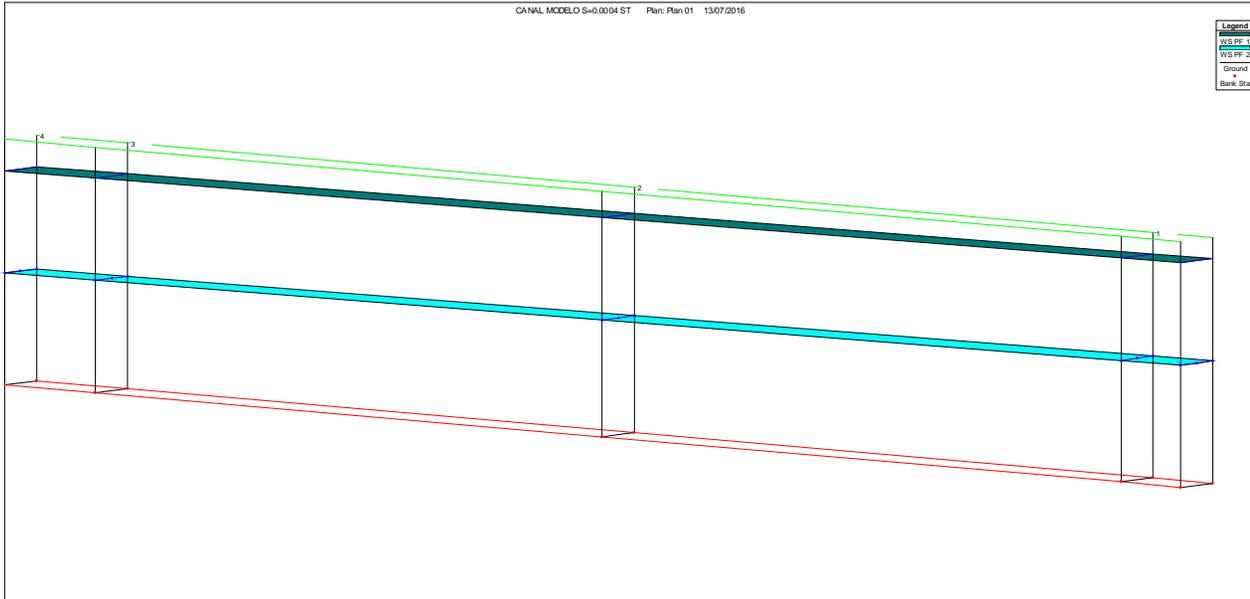


Ilustración 20. Perfil del canal para diferentes profundidades, y con pendiente de 0.0002 para gastos de 51.5 l/s y 99.9 l/s.

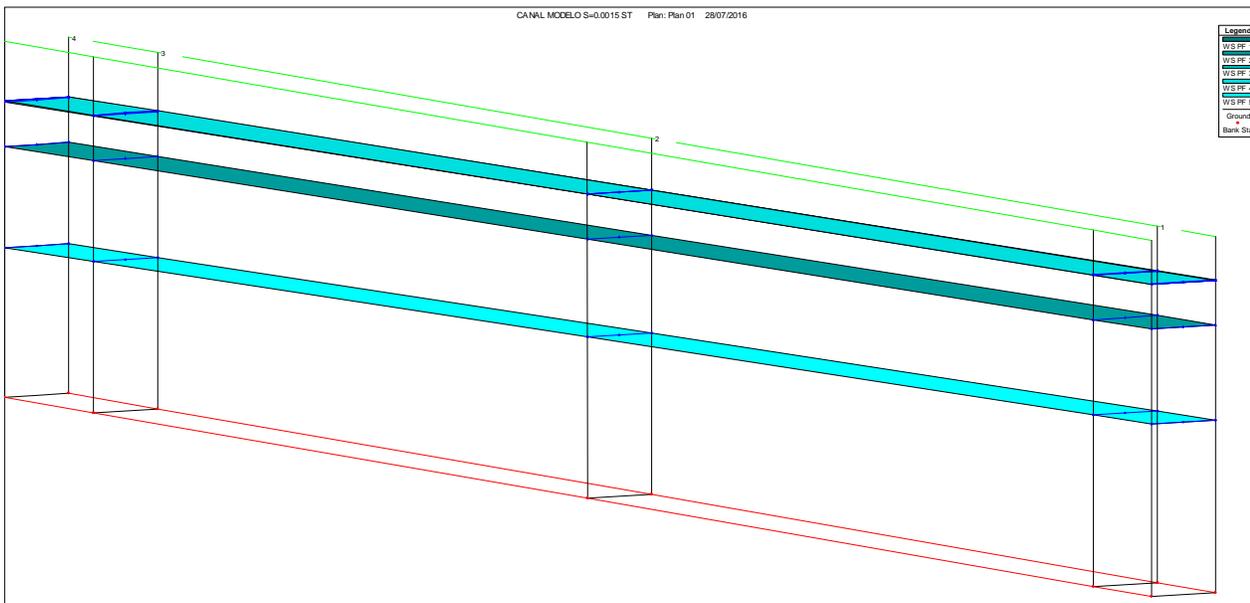


Ilustración 21 Perfil del canal para distintas profundidades, y con pendiente de 0.0015 para gastos de 197.4 l/s y 300.6 l/s.

Serie 5, 6, 7 y 8 con Tapete D1 Armorshield con un espesor de 12cm.

Montaje del tapete articulado de D1 con un espesor de 12 cm.



Fotografía 16. Colocación de tapetes D1 Armorshield de 12 cm de espesor.



Fotografía 17. Amarre entre tapetes.

Se montaron 5 tapetes Armorshield D1 de 12 cm de espesor, en el canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica Enzo Levi, los cuales fueron entrelazados uno con otro de tal forma que se obtiene un tapete continuo de 7.374m de longitud, como se observa en la fotografía 16. Se reprogramaron los ensayos con 5 diferentes pendientes, con diferentes profundidades y gastos como se muestra en los cuadros 10 y 11.

Q/d (m ² /s)	Número Froude	Con tapete D1 (e=12cm)		Con tapete D1 (e=12cm)		Con tapete D1 (e=12cm)			Con tapete D1 (e=12cm)				
		Serie 5	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 6	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 7	Q (m ³ /s)	d (m)	Serie 8	Q (m ³ /s)	d (m)
1.2	1.28	Serie 5.1	0.300	0.25	Serie 6.	0.200	0.17	Serie 7.	0.100	0.08	Serie 8.	0.050	0.04
1.0	0.98	Serie 5.2	0.300	0.30	Serie 6.1	0.200	0.20	Serie 7.	0.100	0.10	Serie 8.	0.050	0.05
0.8	0.73	Serie 5.3	0.300	0.38	Serie 6.2	0.200	0.25	Serie 7.	0.100	0.13	Serie 8.	0.050	0.06
0.6	0.52	Serie 5.4	0.300	0.50	Serie 6.3	0.200	0.33	Serie 7.	0.100	0.17	Serie 8.	0.050	0.08
0.4	0.34	Serie 5.5	0.300	0.75	Serie 6.4	0.200	0.50	Serie 7.1	0.100	0.25	Serie 8.	0.050	0.13
0.2	0.21	Serie 5.6	0.300	1.50	Serie 6.	0.200	1.00	Serie 7.2	0.100	0.50	Serie 8.1	0.050	0.25

Cuadro 10. Pruebas realizadas para el Tapete D1 e=12 cm.

Desnivel canal (m)	Pendientes utilizadas D1 12 CM
0.103	0.0060
0.063	0.0037
0.042	0.0024
0.015	0.0009
0.004	0.0002

Cuadro 11. Pendientes utilizadas en las pruebas de evaluación del tapete D1 de 12 cm de espesor.

La prueba consistió en dividir el canal en 5 secciones, en donde se midieron velocidades a distintas profundidades con el medidor de velocidades de flujo ultrasónico Flow-Tracker Handheld ADV.



Fotografía 18. Medición de velocidades con el Flow-Tracker

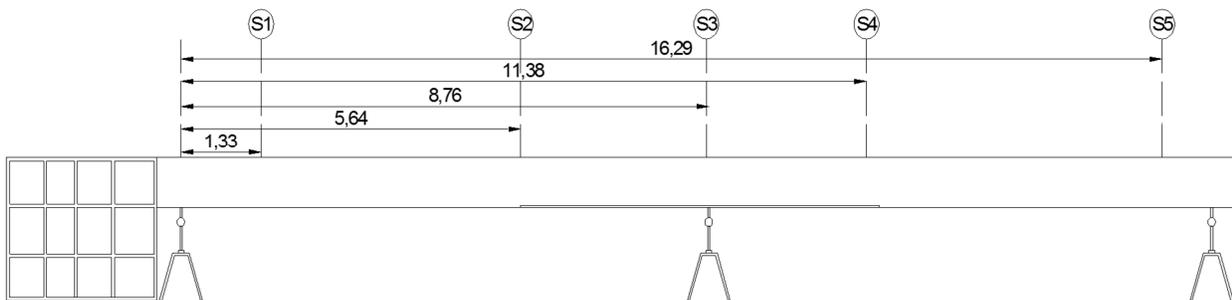


Ilustración 22. Esquema de las secciones de aforo en el canal de pendiente variable

Prueba 5.1

A manera de mostrar el procedimiento utilizado en el modelo físico para determinar la fuerza de arrastre, se describe la realización de la prueba 5.1, para un número de Froude de 1.588.

Se probó un gasto de 291.7 l/s para una profundidad de 0.48 m y pendiente de 0.0060, se tomaron velocidades en las 5 secciones antes mencionadas en donde se obtuvieron perfiles verticales y horizontales similares a los mostrados en la ilustración 23.



Fotografía 19. Vista del perfil de toma de velocidades en la sección 2.



Fotografía 20. Perfil del flujo se observa que el tirante va creciendo al pasar por encima del tapete.

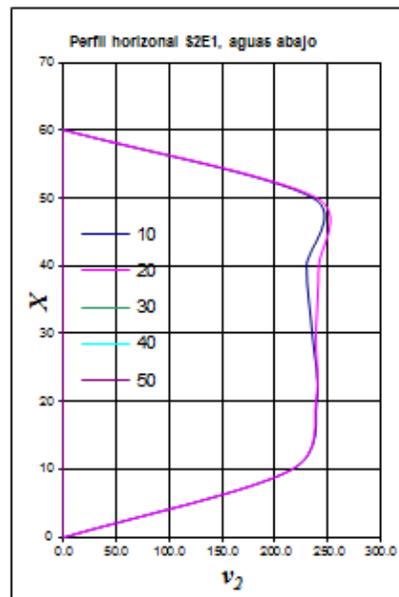
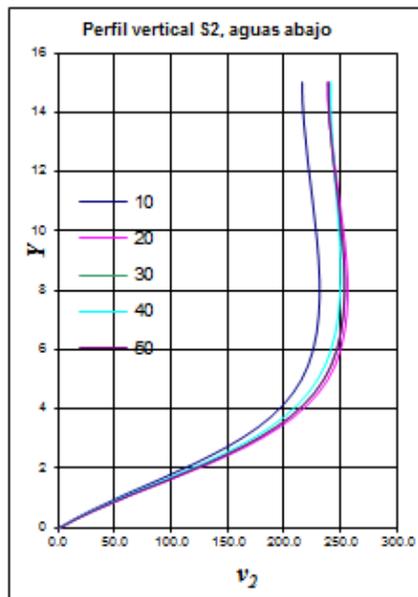


Ilustración 23 Serie 5.1, perfil de velocidades de la segunda sección que se encuentra en la sección inicial del tapete D1 E=12 cm.

La determinación del arrastre sobre el tapete consistió básicamente en aplicar la ecuación de cantidad de movimiento entre las secciones medidas aguas arriba y aguas abajo del tapete:

$$F = \frac{\beta_1 y_1^2}{2} - \frac{\beta_2 y_2^2}{2} - \frac{\gamma}{g} Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1)$$

La integración de las áreas, velocidades, gastos y los coeficientes de Boussinesq y Coriolis se realizaron aplicando:

$$A = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \Delta A_i$$

$$V = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n v_i \Delta A_i$$

$$\alpha = \frac{1}{AV^3} \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta A_i$$

$$\beta = \frac{1}{AV^2} \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta A_i$$

$$R = \frac{VY}{v}$$

$$Q = \beta VA$$

donde:

F.- Fuerza impuesta por el tapete, incluye las fuerzas de presión, tangenciales y de cuerpo.

*B*₂.- Ancho del canal en la sección aguas arriba

*B*₄.- Ancho del canal en la sección aguas abajo

*y*₂.- Tirante del flujo en la sección aguas arriba

*y*₄.- Tirante del flujo en la sección aguas abajo

γ.- peso específico del agua

Q.- Gasto del flujo

*β*₂.- Coeficiente de Boussinesq determinado en la sección aguas arriba

*β*₄.- Coeficiente de Boussinesq determinado en la sección aguas abajo

*V*₂.- Velocidad media del flujo en la sección aguas arriba

*V*₄.- Velocidad media del flujo en la sección aguas abajo

El análisis se realizó utilizando una hoja de cálculo, los resultados obtenidos son:

F= 28.636 Kg para el análisis considerando las secciones 2 y 4 aguas arriba y abajo respectivamente del tapete.

En el cuadro 12 e ilustración 24, se muestran los resultados de las pruebas de arrastre. Se realizaron en total 21 pruebas; 11 para el espesor de 12 cm y 5 para los espesores de 17 y 23 cm, es importante tener en mente que la fuerza de arrastre corresponde a todo el tapete probado, es decir 450 elementos, equivalente a una superficie de 4.42 m² en modelo y de 75.83 m² en prototipo. En la ilustración 24, se aprecia que para números de Froude del orden de 0.60, la fuerza de arrastre se encuentra en un rango de 1.5 kg y 10 kg, con un promedio de 3.86 kg, aproximadamente. El resultado para la prueba con número de Froude 1.588, resulta de 28.636 kg, dicha prueba presentó perturbaciones fuertes del flujo que dificultaron la medición de sus parámetros, sin embargo, la fuerza generada se debe principalmente a la velocidad del flujo, independientemente de la turbulencia.

RESULTADOS DE PRUEBAS DE TAPETES ARTICULADOS ARMORSHIELD														
	PRUEBA	Ql/s	Pendiente S	Y m S1	Y m S2	Y m S3	Y m S4	Y m S5	F Kg	V2 m/s	V4 m/s	Froude Sección 2	Froude Sección 4	VV/Q
				1.33	5.64	8.72	10.1426	16.29						
SIN TAPETE	4.1	51.50	0.0002	0.25		0.25		0.25		0.358	0.358	0.229	0.228	0.00173935
	3.2	99.90	0.0002	0.498		0.501		0.5		0.359	0.362	0.162	0.163	0.00178787
	2.3	197.40	0.0015	0.415		0.432		0.425		0.860	0.832	0.426	0.407	0.00180799
	1.3	300.60	0.0015	0.497		0.5		0.501		1.068	1.066	0.484	0.481	0.00176554
TAPETE D1 E12 CM	8.1	48.10	0.0002	0.22	0.22	0.22	0.21	0.25	0.642	0.404	0.407	0.276	0.281	0.00183193
	7.2	92.70	0.0002	0.464	0.464	0.466	0.461	0.5	0.827	0.369	0.367	0.173	0.173	0.00184923
	7.1	116.70	0.0009	0.231	0.229	0.215	0.208	0.25	2.733	0.895	1.003	0.597	0.702	0.00175586
	6.4	190.70	0.0009	0.468	0.46	0.466	0.464	0.496	1.102	0.717	0.721	0.337	0.338	0.00172876
	6.3	190.70	0.0009	0.322	0.312	0.292	0.286	0.33	4.631	1.056	1.155	0.604	0.690	0.00172755
	6.2	205.60	0.0024	0.31	0.31	0.298	0.295	0.35	2.703	1.102	1.141	0.632	0.671	0.00166199
	5.4	286.00	0.0009	0.486	0.476	0.47	0.46	0.499	4.462	1.121	1.163	0.519	0.548	0.00186548
	5.3	285.00	0.0024	0.43	0.427	0.42	0.41	0.465	4.239	1.222	1.245	0.597	0.621	0.00183079
	5.2	278.10	0.0037	0.43	0.41	0.428	0.415	0.48	1.230	1.283	1.267	0.640	0.628	0.00189148
	5.1	291.70	0.0060	0.23	0.22	0.27	0.38	0.48	28.636	2.333	1.385	1.588	0.717	0.00175952
	5.1.1	273.88	0.0060	0.43	0.44	0.465	0.48	0.552	10.970	1.184	1.079	0.570	0.497	0.00190163
	TAPETE D1 E17 CM	9.1	296.11	0.0037	0.41	0.43	0.44	0.44	0.5	2.593	1.251	1.240	0.609	0.597
9.3		297.5	0.0009	0.46	0.47	0.47	0.46	0.501	2.77	1.126	1.117	0.525	0.526	0.00177936
10.1		198.52	0.0009	0.34	0.35	0.34	0.338	0.385	2.459	0.983	1.047	0.530	0.575	0.0017329
10.2		198.52	0.0009	0.445	0.465	0.46	0.456	0.5	2.47	0.741	0.759	0.347	0.359	0.00173614
11.1		93.39	0.0009	0.21	0.214	0.207	0.194	0.25	2.432	0.781	0.779	0.539	0.564	0.00178849
TAPETE D1 E23 CM	13.1	276.37	0.0037	0.424	0.407	0.413	0.414	0.46	1.713	1.233	1.210	0.617	0.600	0.00181565
	13.2	289.72	0.0009	0.486	0.461	0.45	0.445	0.518	4.32	1.111	1.113	0.522	0.533	0.00176718
	14.1	207.52	0.0009	0.33	0.314	0.298	0.279	0.365	6.182	1.115	1.248	0.635	0.755	0.00168636
	14.2	207.55	0.0009	0.46	0.434	0.43	0.427	0.498	1.796	0.802	0.817	0.388	0.399	0.00167599
	15.1	121.84	0.0009	0.253	0.226	0.207	0.186	0.271	4.909	0.928	1.050	0.624	0.777	0.00172208

Cuadro 12. Resumen de resultados de las pruebas de arrastre para el sistema Armorshield

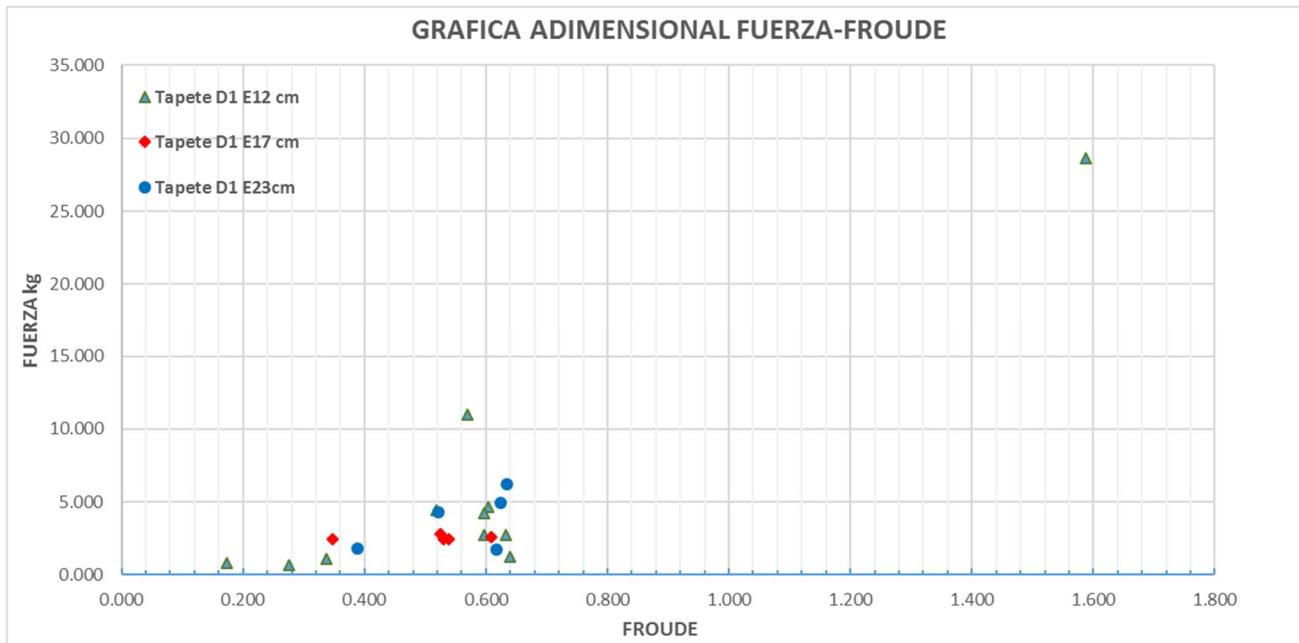


Ilustración 24. Gráfica de resultados de las pruebas de arrastre para el sistema Armorshield

Aun considerando la condición más crítica, con la fuerza de arrastre mayor obtenida en las pruebas, 28.636 kg, dividida en el número total de elementos, 450 elementos, la fuerza de arrastre distribuida es de 63.6 gramos por elemento en modelo, 4.52 kg por elemento en prototipo. Por otro lado, el peso de cada elemento de 12 cm de espesor es de 34.51 kg en

prototipo, 7.63 veces mayor a la fuerza de arrastre que actúa sobre el mismo elemento. Por lo anterior, el elemento es estable bajo las condiciones presentadas en el laboratorio.

PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE ARRASTRE LÍMITE PARA EL SISTEMA

Esta prueba consiste en tomar las velocidades con la que el tapete inicia su desplazamiento, esperando el momento de falla del mismo, para esto fue necesario modificar la pendiente, las velocidades del flujo se midieron constantemente en un punto cercano aguas arriba del tapete como se observa en la fotografía 21, se incrementó paulatinamente la velocidad esperando la falla del tapete. Para el caso del Tapete D1, Armorshield $e=12$ cm, solo se prueba una pendiente de 0.0087 hasta alcanzar el gasto máximo que proporciona el sistema, con lo que se alcanza a una velocidad medida de 2.398 m/s (4.88m/s en prototipo) y un tirante de 0.256 m (1.06m en prototipo) no se consiguió la falla del tapete ver fotografía 21 y 22.



Fotografía 21. Prueba de arrastre del tapete D1 $e=12$ cm, para un $Q=296.029$ l/s y $s=0.0087$.



Fotografía 22. Vista de perfil de prueba de arrastre del tapete D1 $e=12$ cm.

De forma similar se realizaron pruebas para el sistema Armorshield de 17 y 23 cm de espesor ver cuadros 13 y 14. No se consiguió la falla del tapete. Fotografías 23 y 24.



Fotografía 23. Prueba de arrastre del tapete D1 $e=17$ cm, para un $Q=298.384$ l/s y $s=0.0087$.



Fotografía 24. Vista de perfil de prueba de arrastre del tapete D1 $e=17$ cm.



Fotografía 25. Prueba de arrastre del tapete D1 e=23 cm, para un Q=295.658 l/s y s=0.0087.



Fotografía 26. Vista de perfil de prueba de arrastre del tapete D1 e=23 cm.

Tapete	Tirante en modelo en m	Tirante en prototipo en m	Q en modelo en l/s	Velocidad medida en modelo m/s	Velocidad en prototipo m/s
D1 E=12 cm	0.256	1.06	296.029	2.398	4.88
D1 E=17 cm	0.272	1.13	298.384	2.413	5.54
D1 E=23 cm	0.278	1.15	295.658	2.451	4.99

Cuadro 13. Resultados de Pruebas de Arrastre para el Tapete Armorshield D1

Importante mencionar que las velocidades medidas en el modelo no corresponden necesariamente a las velocidades medias en la sección. El cuadro 14 muestra las velocidades medias correspondientes.

Tapete	Velocidad media en modelo m/s	Velocidad media en prototipo m/s
D1 E=12 cm	1.927	3.921
D1 E=17 cm	1.828	3.72
D1 E=23 cm	1.773	3.607

Cuadro 14. Resultados de Pruebas de Arrastre para el Tapete Armorshield D1

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN (NÚMERO DE MANNING)

Con la finalidad de obtener la rugosidad del sistema Armorshield, se realizaron ensayos en modelo físico, considerando la teoría del capítulo COEFICIENTE DE FRICCIÓN del MARCO TEÓRICO y la metodología planteada en las pruebas sin tapete, series 1 a la 4.

El modelo se preparó colocando 12 tapetes unidos de tal forma que se formara una sola pieza, con una longitud total de 17.69m. Se configuró el modelo para 13.27 m del canal con un ancho de 0.60 m y una altura de 70 cm. Se probaron los gastos de 25.0, 51.2, 110.0, 157.9, y 213.14 l/s. Las condiciones de frontera que se impusieron son los tirantes aguas arriba y aguas abajo del canal, modificando el número de Manning en diferentes secciones

hasta lograr los tirantes medidos en el modelo físico. La modelación del canal en el programa HEC-RAS se realizó para determinar el número de Manning. El cuadro 15 muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Q l/s	Sección	Fr	n	v m/s	y m	Reynolds	Rh m	E	Rh/E
25	1	0.6461	0.007	0.555	0.075	6981132.08	0.06	0.09069954	0.66152485
25	2	0.6567	0.007	0.561	0.074	7151963.28	0.05935829	0.09004083	0.6592375
25	3	0.6857	0.007	0.577	0.072	7560272.54	0.05806452	0.08896886	0.65263866
25	4	0.7141	0.007	0.593	0.07	7991913.75	0.05675676	0.08792299	0.64552808
25	5	0.7536	0.007	0.615	0.068	8532186.46	0.05543478	0.08727752	0.63515532
25	6	0.9149	0.007	0.7	0.06	11006289.3	0.05	0.08497452	0.58841171
25	7	1.0481	0.01	0.766	0.054	13382250.2	0.04576271	0.08390601	0.54540443
51.2	1	0.5586	0.016	0.566	0.151	3536173.93	0.10044346	0.16732803	0.60027873
51.2	2	0.5691	0.016	0.573	0.149	3627959.98	0.09955457	0.1657344	0.60068739
51.2	3	0.6007	0.016	0.594	0.144	3891509.43	0.0972973	0.16198349	0.60066183
51.2	4	0.6329	0.017	0.615	0.139	4174019.28	0.09498861	0.15827752	0.60013961
51.2	5	0.6768	0.017	0.641	0.133	4546744.22	0.09214781	0.15394195	0.59858802
51.2	6	0.9483	0.017	0.726	0.118	5804285.26	0.084689	0.14486422	0.58460947
51.2	7	0.9878	0.021	0.736	0.116	5985686.4	0.08365385	0.14360938	0.58250963
110	1	0.5527	0.017	0.82	0.224	3453504.04	0.12824427	0.25827115	0.49654897
110	2	0.5643	0.017	0.831	0.221	3547340.56	0.12725528	0.25619679	0.49670911
110	3	0.5992	0.017	0.865	0.212	3849234.6	0.12421875	0.25013583	0.49660518
110	4	0.6329	0.017	0.897	0.205	4127933.73	0.12178218	0.24600963	0.49503012
110	5	0.6768	0.017	0.938	0.196	4514824.8	0.11854839	0.24084424	0.49222015
110	6	0.9483	0.017	1.175	0.156	7105708.76	0.10263158	0.22636825	0.45338328
110	7	0.9878	0.017	1.207	0.152	7491310.82	0.10088496	0.22625326	0.44589393
157.9	1	0.5432	0.02	0.914	0.288	2993972.75	0.14693878	0.3305788	0.44448941
157.9	2	0.5543	0.02	0.926	0.284	3076003.19	0.14589041	0.32770418	0.44518935
157.9	3	0.5871	0.02	0.962	0.274	3312215.95	0.14320557	0.3211684	0.44588937
157.9	4	0.6189	0.02	0.997	0.264	3562750.14	0.14042553	0.31466305	0.44627271
157.9	5	0.6611	0.021	1.042	0.253	3885450.07	0.13725136	0.30833965	0.44513041
157.9	6	0.9059	0.021	1.285	0.205	5913483.66	0.12178218	0.2891603	0.42115802
157.9	7	0.9407	0.021	1.318	0.2	6216981.13	0.12	0.28853843	0.41588914
213.4	1	0.5542	0.02	1.024	0.348	2775970.51	0.16111111	0.40144424	0.40132874
213.4	2	0.5634	0.02	1.035	0.344	2838415.97	0.16024845	0.39859862	0.4020296
213.4	3	0.5919	0.021	1.07	0.333	3031333.22	0.15781991	0.39135372	0.40326665
213.4	4	0.6207	0.022	1.104	0.322	3234501.35	0.15530547	0.3841211	0.40431381
213.4	5	0.6577	0.022	1.148	0.31	3493609.25	0.15245902	0.37717146	0.40421674
213.4	6	0.9434	0.022	1.46	0.244	5644911.85	0.13455882	0.35264424	0.38157102
213.4	7	0.9787	0.022	1.496	0.238	5929919.14	0.13271375	0.35206809	0.37695479

Cuadro 15. Resumen de resultados obtenidos de la modelación física y numérica (HEC-RAS) para determinar el número de Manning del sistema Armorshield

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD DEL SISTEMA ARMORSHIELD MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO GEOSTUDIO.

Descripción general del programa

El programa SLOPE/W es parte de un grupo de subrutinas de GeoStudio, y utiliza los criterios de momento y factor seguridad. Por ejemplo, el método Morgenstern-Price satisface tanto los criterios de fuerza y de momento de equilibrio. Esta formulación general hace que sea fácil de calcular el factor de seguridad para una variedad de métodos y entender fácilmente las relaciones y las diferencias entre todos los métodos.

SLOPE/W puede utilizar esfuerzos calculados con elementos finitos de las subrutinas SIGMA/W o QUAKE/W para calcular un factor de estabilidad determinando tanto la resistencia total de cizallamiento y transportando tensión de cizallamiento a lo largo de toda la superficie de deslizamiento, de esta forma calcula un factor de estabilidad local para cada sector.

El análisis probabilístico se puede realizar mediante el uso de funciones de distribución normal para variar las propiedades del suelo y las condiciones de carga. Utilizando un enfoque de Monte Carlo, SLOPE/W calcula la probabilidad de fallo y del factor de seguridad convencional.

Características:

- Los métodos de límite de equilibrio incluyen Morgenstern-Price, GLE, Spencer, Bishop, Ordinary, Janbu y más.
- Los modelos de la resistencia del suelo incluyen Mohr-Coulomb, Spatial Mohr-Coulomb, Bilinear, sin drenaje ($\Phi = 0$), la fuerza anisotrópico, cizalla / función normal, y muchos tipos de funciones de fuerza.
- Especifica tipos de funciones de fuerza normal entre cortes.
- Opciones de presión del agua intersticial incluyen coeficientes R_u , líneas piezométricas, curvas de nivel de presión, una cuadrícula de valores, funciones espaciales, o cabezas calculadas de elementos finitos o presiones.
- Define posibles superficies de deslizamiento por una cuadrícula de centros y líneas de radio, bloques de puntos de la superficie de deslizamiento, rangos de entrada y salida, formas totalmente especificados, o automática.
- Usa las propiedades del suelo probabilísticos, cargas de línea y líneas piezométricas.
- Análisis de estabilidad transitoria

Usando el límite de equilibrio, SLOPE/W puede modelar tipos de suelo heterogéneos, geometría de la superficie de deslizamiento y estratigráfica compleja, y las condiciones de presión del agua intersticial variables utilizando una gran selección de modelos de suelo.

Los análisis de estabilidad de taludes se pueden realizar utilizando los parámetros de entrada determinísticos o probabilísticos calculadas por un análisis de tensiones de elementos finitos, se pueden usar además de los cálculos de equilibrio límite, para el análisis

más completa estabilidad de la pendiente disponible. Con esta amplia gama de características, PENDIENTE / W puede ser utilizado para analizar casi cualquier problema de estabilidad de taludes que se encontrará en sus proyectos geotécnicos, y de ingeniería civil.

Métodos de cálculo utilizados:

El programa permite realizar los cálculos de estabilidad a través de una gran variedad de métodos:

- Ordinario (fellenius)
- Bishop implificado
- Janbu simplificado
- Spencer
- Morgenstern-Price
- Cuerpo de ingenieros Americanos (lyll)
- Lowe-Karafiath
- Sarma
- Método de equilibrio límite generalizado (GLE)
- Método de los elementos finitos

Geometría y estratigrafía:

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones.
- Definición de grietas de tracción Parcialmente sumergidos

Superficie de deslizamientos:

Dispone de distintos sistemas de modernización de las superficies de rotura:

- Malla de centros y límites de radios
- Superficies de rotura poligonales, con o sin centro
- Por bloques
- Zonas de entrada salida acotando los posibles círculos de rotura
- Búsqueda automática de superficies de rotura
- Optimización de búsqueda de superficies de rotura
- Posicionamiento automático de tracción

Presión hidrostática:

Se puede modelar las acciones del agua en el terreno a través de los siguientes sistemas:

- Coeficiente de presión del agua RU
- Superficie piezométrica
- Presión hidrostática para cada punto
- Contornos de presiones hidrostáticas

Propiedades de los suelos:

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento

- Tensiones totales y efectivas
- Resistencias al corte sin drenaje ($\phi=0$), $k=c$
- Resistencia al corte cero (agua, $c=0$ y $\phi=0$)
- Materiales impenetrables (lechos rocosos)
- Criterios de rotura bilineales
- Incrementos de la cohesión con la profundidad
- Resistencia al corte anisótropa
- Criterios de rotura específicos
- Modelos de Hoek y Brown para taludes rocosos

Tipos de cargas:

- Cargas superficiales
- Cargas lineales
- Cargas sísmicas
- Anclajes y bulones (activos y pasivos)
- Suelo reforzado.

Aplicación al caso de estudio:

La revisión de la estabilidad de los taludes protegidos con los tapetes articulados del sistema ARMOSHIELD®, se realizó para escenarios iguales, en cuanto sus elementos, variando los ángulos. En la tabla 14 se muestran los valores de los parámetros utilizados.

Materiales.

Tabla 1. Valores de materiales utilizados en el análisis de estabilidad de taludes

Elemento	Tipo	Peso unitario (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Fricción interna (α)
Cuerpo del talud	Arcilla limosa	21	4.9	35°
Geotextil	Arena	10	1	15°
Tapete articulado	Concreto	24	-----	-----

Los valores representativos y comunes encontrados en la mayoría de los casos que requieren protección contra erosión.

Para simular el geotextil consideró como una capa “débil”, en cuanto a la resistencia por fricción y cohesión, un peso unitario bajo para reducir el efecto de sobrecarga. Esta consideración es aceptable, ya que en el análisis no se supone deformación del material, solo los esfuerzos estáticos entre las dovelas analizadas.

Para el caso de el tapete articulado, se consideró este material con la opción del Geostudio “high strength” que permite simular un material de alta resistencia, impenetrable a menos que se asigne una condición de frontera de fisura en alguna sección de la capa. Para este análisis, se considera una losa articulada sobre el talud, sin fisuras. Al igual que el geotextil, esta consideración es aceptable, ya que en el análisis no se supone deformación del material, solo los esfuerzos estáticos entre las dovelas analizadas. Las ilustraciones 25 y 26 muestran la configuración general del modelo.

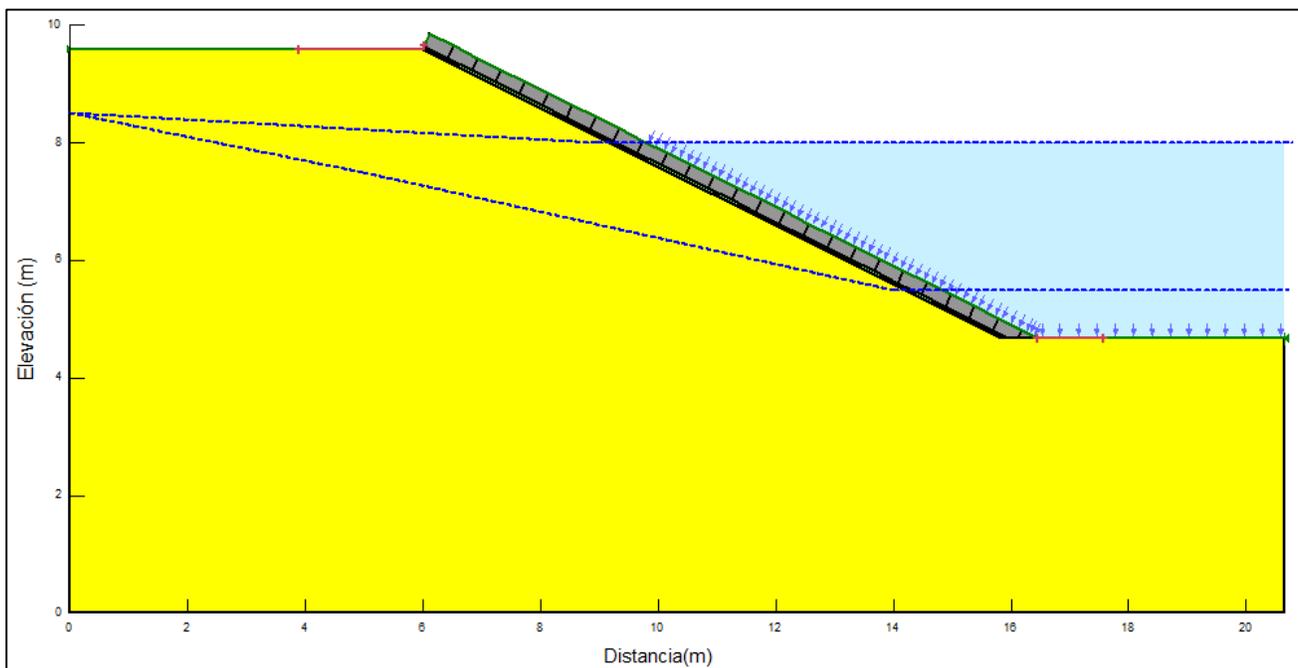


Ilustración 25. Configuración de la condición inicial para la prueba del tapete articulado con espesor de de 23 cm y talud 2:1

En la ilustración 25, las líneas discontinuas azules representan las condiciones de la superficie libre del agua al inicio y final del vaciado, Las líneas rojas son el rango de entrada

y salida del círculo de falla. El detalle de las capas de materiales se muestra en la ilustración 26.

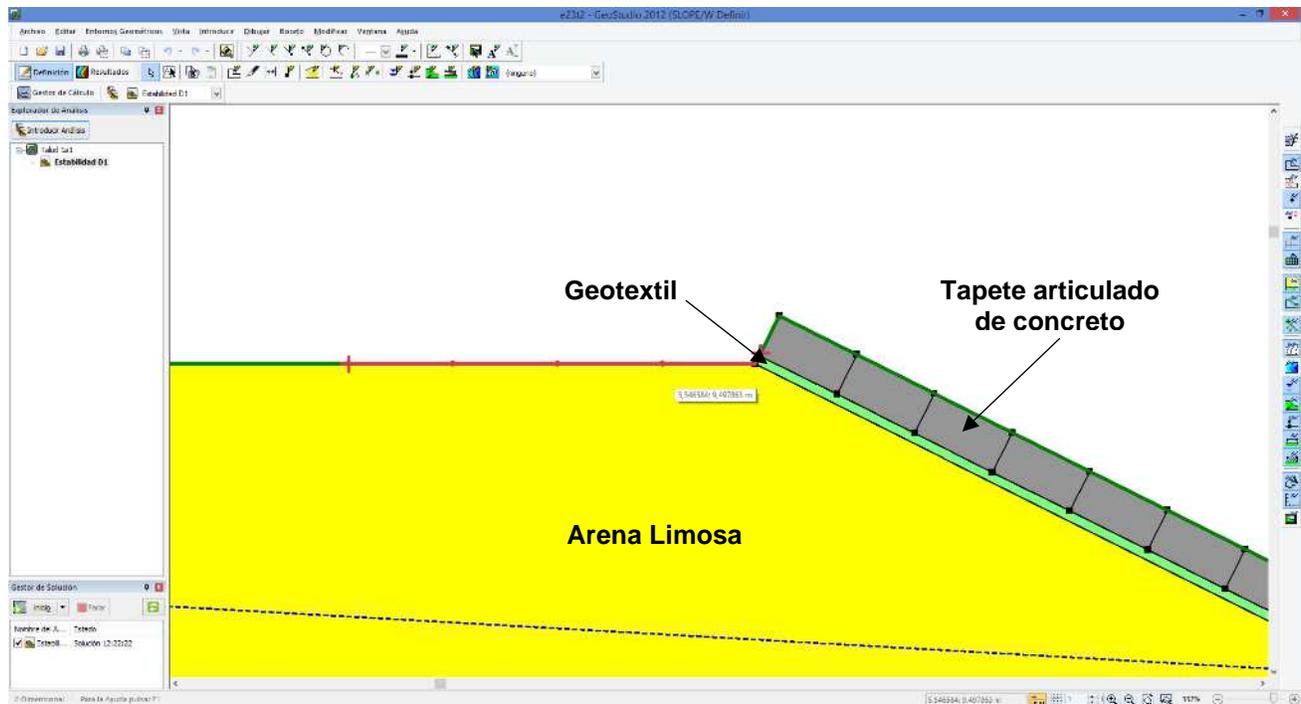


Ilustración 26. Configuración de la condición inicial para la prueba del tapete articulado con espesor de de 23 cm y talud 1:2. Detalle de las capas configuradas en el modelo.

Taludes.

El análisis consistió básicamente en comparar los resultados de los taludes bajo las mismas condiciones de material y flujo. Los cinco taludes probados son 1.0:1, 1.25:1, 1.50:1, 1.75:1 y 2.0:1.

Variaciones súbitas de la superficie libre del agua (vaciado rápido).

La variación del nivel de la superficie libre del agua genera un gradiente hidráulico dentro del cuerpo del bordo y por tanto un empuje sobre el geotextil y el tapete articulado. Este esfuerzo es calculado como una fuerza activa (que tiende a la falla del talud). Este fenómeno induce una reducción en el factor de seguridad (F.S.).

De acuerdo a la bibliografía consultada (Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. June 2015 Edition. GEO-SLOPE International Ltd.), las condiciones de análisis representan situaciones desfavorables que se presentan en la realidad.

El análisis se realizó para escenarios de falla circular y definida considerando que la superficie de falla pasa por el geotextil.

Por lo anterior, los resultados del análisis son representativos para los espesores de los tapetes, sin importar la geometría del mismo.

Las ilustraciones 27 y 28 muestran, como ejemplo, los resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular y definida en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 2:1.

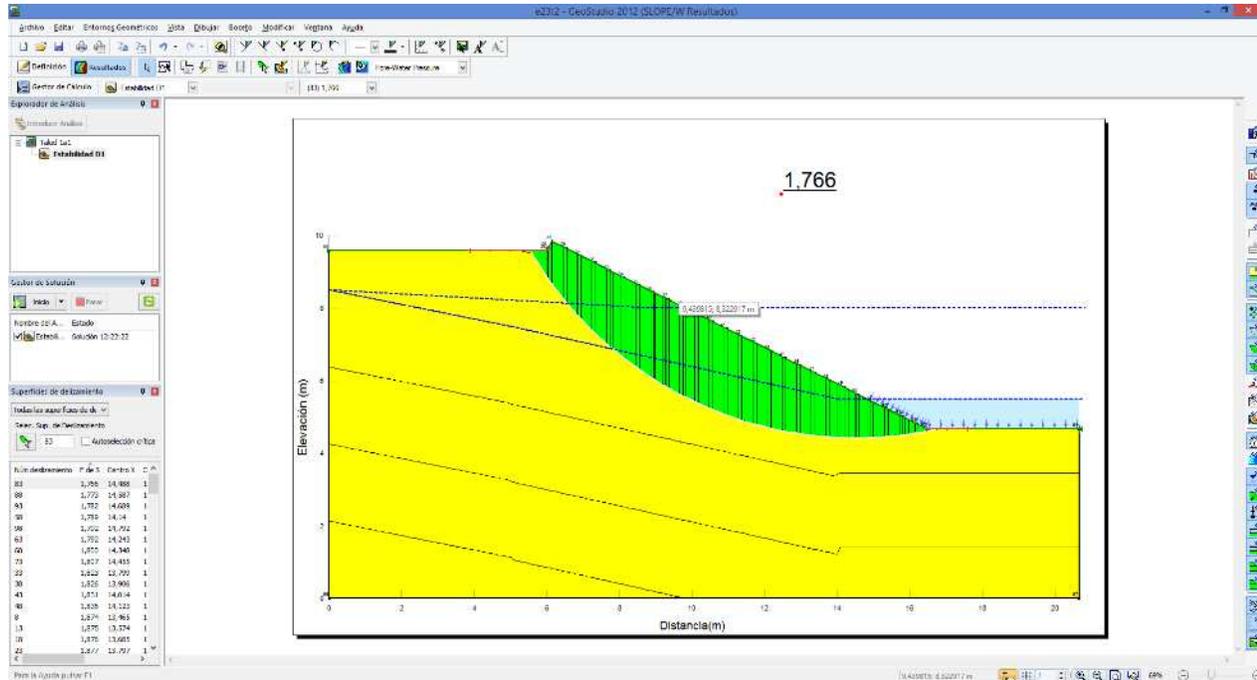


Ilustración 27. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 2:1.

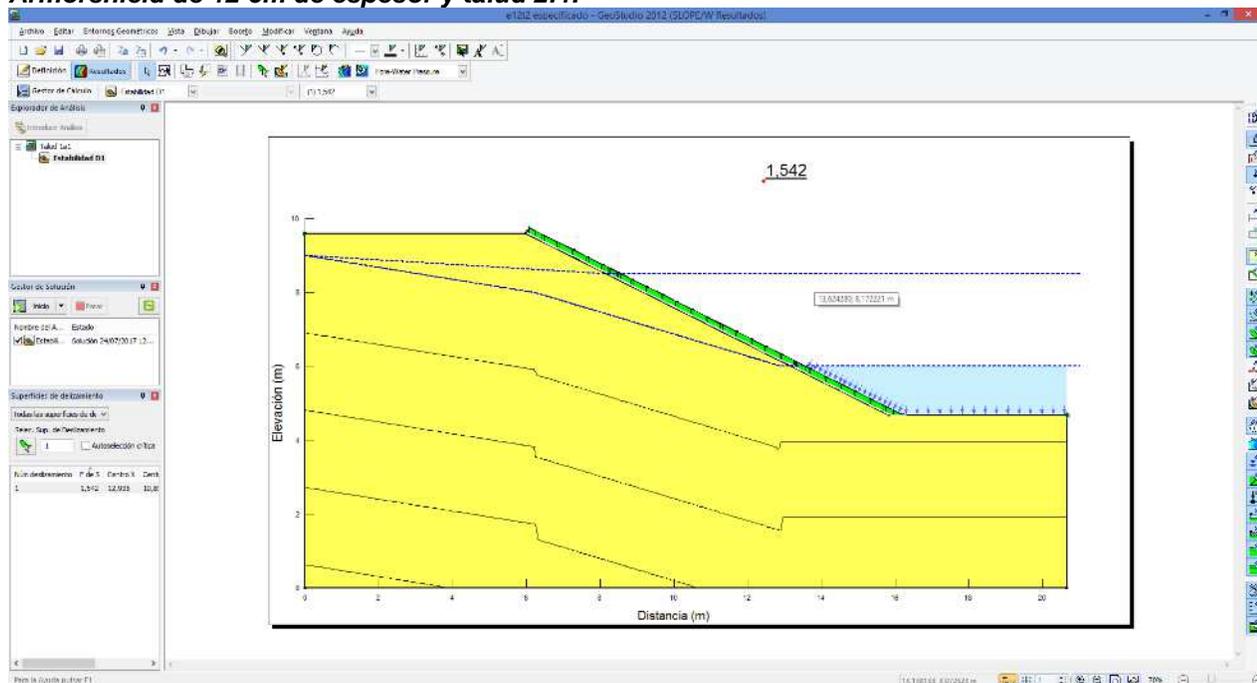


Ilustración 28. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 2:1.

El resto de los esquemas de resultados para fallas circulares y definidas se anexan en este documento.

En total se realizaron 30 corridas, los cinco taludes para cada uno de los tres espesores. La tabla 15 y la ilustración 29 muestran los resultados obtenidos con el análisis.

Tabla 2. Factores de Seguridad obtenidos en el análisis de la estabilidad de taludes para fallas circulares

TALUD/ESPESOR:	e=0.12	e=0.17	e=0.23
1.00	1.209	1.192	1.202
1.25	1.33	1.333	1.366
1.50	1.453	1.456	1.471
1.75	1.616	1.623	1.627
2.00	1.769	1.774	1.781

Tabla 3. Factores de Seguridad obtenidos en el análisis de la estabilidad de taludes para fallas definidas por el geotextil

TALUD/ESPESOR:	Ge=0.12	Ge=0.17	Ge=0.23
1.00	0.921	0	0
1.25	1.081	0.861	0.774
1.50	1.237	0.988	0.867
1.75	1.379	1.113	0.943
2.00	1.542	1.25	1.027

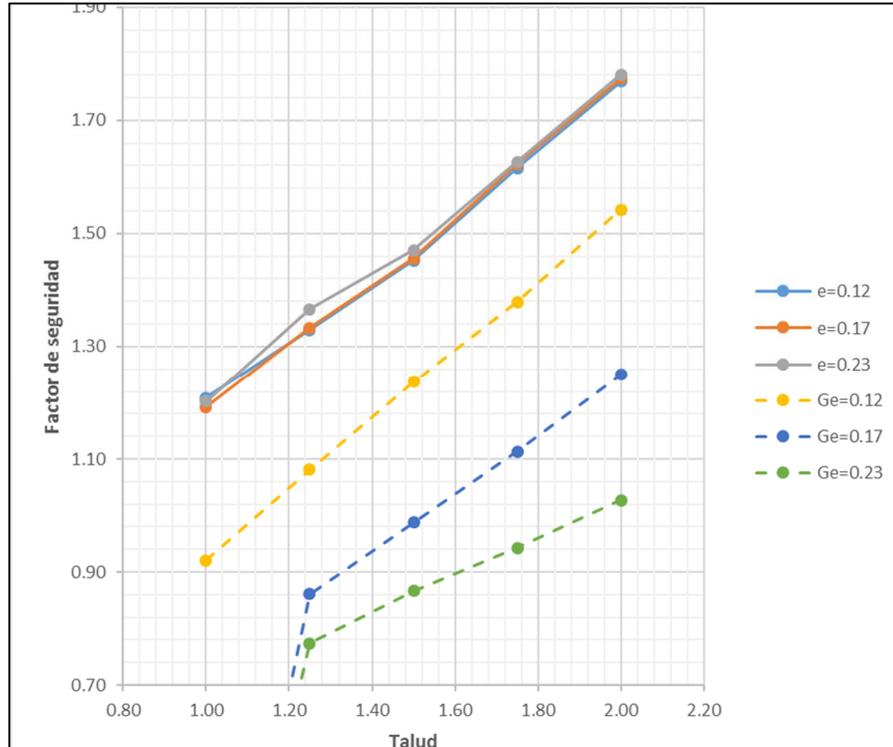


Ilustración 29. Factores de Seguridad obtenidos con el análisis de la estabilidad de taludes. (e para falla circular, Ge para falla definida por la capa de geotextil)

El deslizamiento incipiente del sistema, correspondiente a un F.S.=1.00, se presenta para una pendiente del talud menor a 1:1.

Para este tipo de obras, el factor de seguridad requerido es de al menos 1.50. Para todas las condiciones probadas con falla circular, el talud que cumple con este requisito es de 1.60:1 aproximadamente. Para el caso con falla definida por el geotextil, solo el tapete de 12 cm de espesor alcanza el coeficiente de seguridad requerido. Para los espesores de 17 y 23 cm, el programa no alcanza a definir su F. S.

Sin embargo, el valor del F.S. requerido debería ser determinado considerando, además del tipo de obra o estructura, la consecuencia que tendría su falla y la incertidumbre del modelo numérico para la determinación de las condiciones hidráulicas del canal (ref. 9).

CONCLUSIONES

En general, la fuerza de arrastre tiende a incrementarse en forma proporcional al número de Froude hasta valores de 0.6, para valores mayores se aprecia una ligera tendencia a disminuir.

Para números de Froude del orden de 0.60, la fuerza de arrastre se encuentra en un rango de 1.5 kg y 10 kg, con un promedio de 4 kg, aproximadamente. El resultado para la prueba con número de Froude 1.588, que difícilmente se presenta en los sitios donde se coloca este tipo de protecciones, resulta de 28.63kg, sin embargo, la fuerza de arrastre de cada elemento de prototipo resulta de 4.52 Kg mientras que el peso de cada elemento de 12 cm de espesor es de 34.51 kg en prototipo, 7.63 veces mayor a la fuerza de arrastre que actúa sobre el mismo elemento. Por lo anterior, el elemento se considera estable bajo las condiciones presentadas en el laboratorio, como se demostró en la prueba de arrastre límite para el sistema.

Por lo anterior, una condición de diseño recomendable es para un número de Froude de al menos 0.60.

En la prueba de arrastre límite, en la cual se incrementó el gasto a la capacidad máxima de la instalación, no se logró alcanzar la falla del sistema, es decir, este soporta las condiciones impuestas en el modelo.

Resultados de Pruebas de Arrastre límite para el Tapete Armorshield D1.

Tapete	Tirante en modelo en m	Tirante en prototipo en m	Q en modelo en l/s	Velocidad medida en modelo m/s	Velocidad en prototipo m/s
D1 E=12 cm	0.256	1.06	296.029	2.398	4.88
D1 E=17 cm	0.272	1.13	298.384	2.413	5.54
D1 E=23 cm	0.278	1.15	295.658	2.451	4.99

Es muy importante mencionar que, en la práctica, los flujos de diseño se encuentran en el rango de régimen subcrítico, del orden de 0.6 a 0.8 máximo, por lo que las condiciones máximas logradas en esta prueba prácticamente no se presentan en los sitios donde se

requiere colocar este tipo de protecciones. Con lo anterior, un parámetro importante de diseño es definir las condiciones para un número de Froude de 0.60.

Los coeficientes de Manning obtenidos en el estudio, resultaron en un rango desde 0.007 a 0.022, en modelo, que equivale a un rango de .0089 a 0.0279 en prototipo. Por lo que se recomienda utilizar el valor del coeficiente de 0.028.

El deslizamiento incipiente del sistema, correspondiente a un F.S.=1.00, se presenta para una pendiente del talud menor a 1:1.

Para este tipo de obras, el factor de seguridad requerido es de al menos 1.50. Para todas las condiciones probadas con falla circular, el talud que cumple con este requisito es de 1.60:1 aproximadamente. Para el caso con falla definida por el geotextil, solo el tapete de 12 cm de espesor alcanza el coeficiente de seguridad requerido. Para los espesores de 17 y 23 cm, el programa no alcanza a definir su F. S.

Sin embargo, el valor del F.S. requerido debería ser determinado considerando, además del tipo de obra o estructura, la consecuencia que tendría su falla y la incertidumbre del modelo numérico para la determinación de las condiciones hidráulicas del canal.

Dado los resultados obtenidos en el estudio, en condiciones ordinarias de operación, cada elemento funciona prácticamente en forma independiente, por lo que una vez colocado el tapete, los cables que lo unen, teóricamente, no toman esfuerzo alguno. Por lo anterior, la mayor demanda de resistencia de dichos cables es en el momento de la colocación del tapete.

Para el dimensionamiento de cable según cada espesor de Armorshield consultar las recomendaciones de la empresa incluidas en el "ANEXO "B"

Por todo lo anterior, el uso del tapete Armorshield es recomendable tanto para canales, protecciones marginales en ríos, escotaduras y cualquier revestimiento que requiera una efectiva protección contra la erosión, siempre y cuando se respeten las condiciones de diseño hidráulicos aquí planteadas.

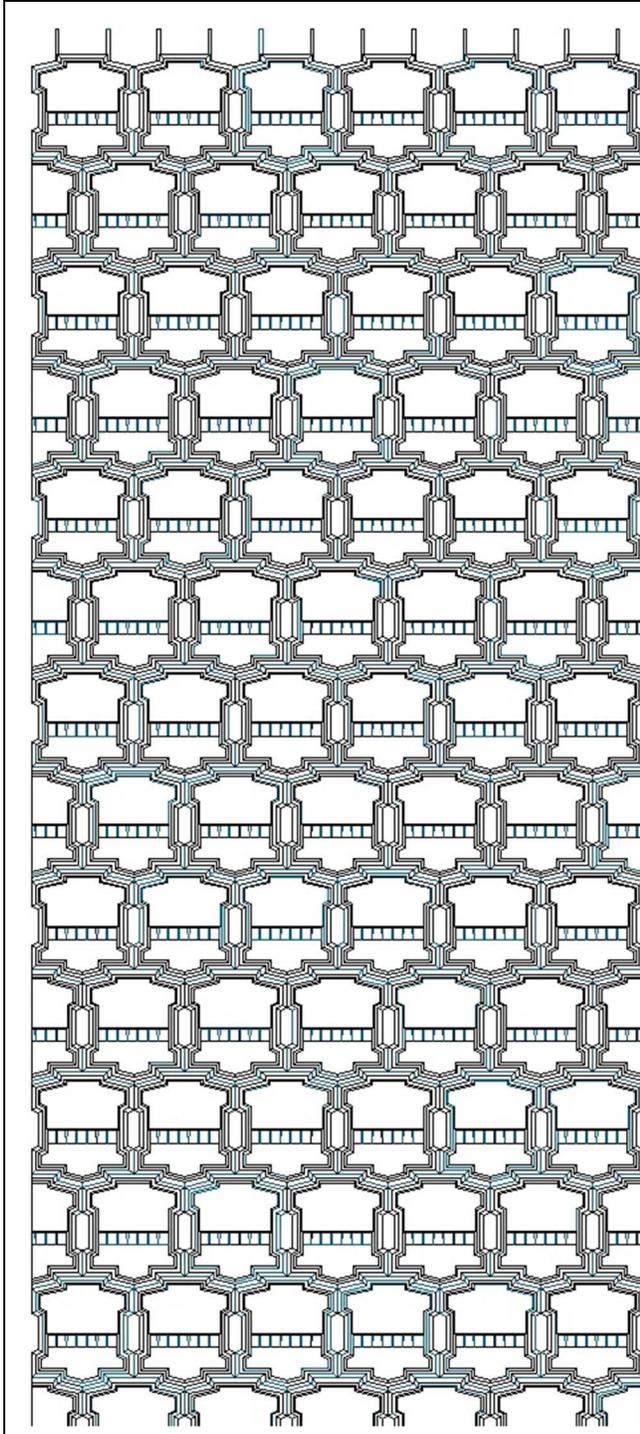
REFERENCIAS

1. United States Bureau of Reclamation: *Diseño de Presas Pequeñas*. Publicación Técnica de Recursos Hidráulicos. Washington, D. C. (1981).
2. G. Sotelo: *Hidráulica General, volumen 1. Fundamentos*. Limusa, Noriega Editores México, D. F. (2002).
3. G. Sotelo: *Hidráulica de canales*. FI-UNAM, México, D. F. (2009).
4. Vergara S. Miguel A., *Técnicas de modelación en Hidráulica*, 1995, Alfaomega.
5. Gabriel Echávez Aldape, *Introducción a los modelos Hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*, 1996, UNAM, CONACYT Y AMH.
6. Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia, A.2.10, Obras de Excedencia*. México (1980).
7. FlowScience, I. (2008). *FLOW 3D User Manual, Version 9.3*. FlowScience, Inc.

8. Salgado M. Gilberto. *Estudio en Modelo Físico para determinar coeficientes de arrastre en sistemas de protección contra erosión de cauces*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México 2008.

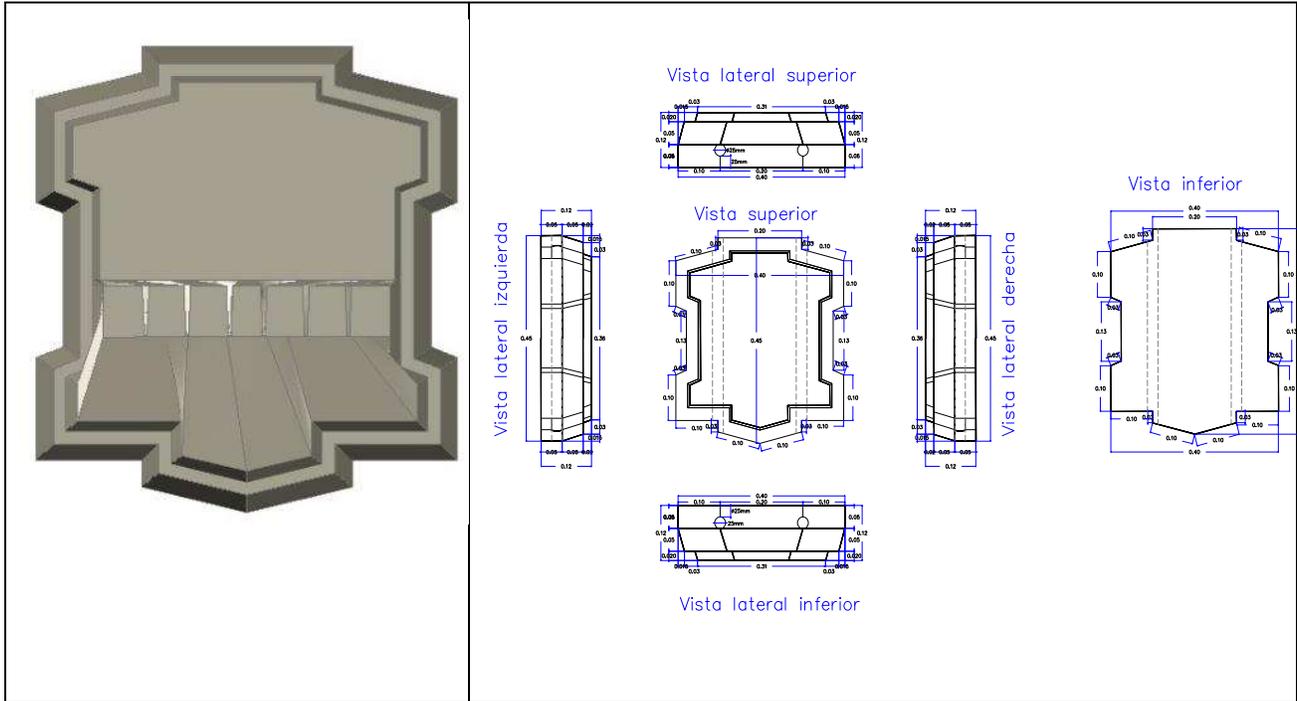
ANEXO "A". CARACTERÍSTICAS ARMORSHIELD 4510

GEOMÉTRICAS DEL SISTEMA



Tapete de Concreto Articulado
Con dissipador de energía Hidráulica integrado

Espesor: 0.12m.
Ancho: 2.42m.
Largo: 6.11m.
Piezas: 90
Peso al aire: 3,114kg.
Peso sumergido: 1,779kg.
Tipo de dissipador:
Integrado al bloque. Perpendicular al flujo.
Altura según proyecto.
Tipo de bloque:
Celda cerrada
Resistencia $F'c = 282.5\text{kg/cm}^2$.
Tipo de cable:
Poliéster TR
Diámetro: 3/8"
Resistente a rayos UV
Resistencia tensión: 1,362kg.
Conexiones:
Nudo de acero galvanizado



ANEXO “B”. CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DEL SISTEMA ARMORSHIELD

En el sistema Armorshield de acuerdo a las condiciones ensayadas en el presente estudio los cables de poliéster que unen las piezas no toman esfuerzo alguno por lo tanto se determinó el esfuerzo a la tensión requerido para maniobras de carga y descarga de cada cable en cada uno de los 3 espesores Armorshield de 12.0cm 17.0cm y 23.0cm respectivamente utilizando el peso al aire del sistema compuesto por 90 piezas en medidas de 2.42m de ancho por 6.11m de longitud utilizando cable de poliéster de torsión rígida obteniendo los siguientes resultados expresados en la Tabla R-1 utilizando un Factor de Seguridad F.S. = 5.0 de tal manera que no comprometa la seguridad en dichas maniobras.

Espesor Armorshield	Piezas por tapete	peso por pieza	Peso por tapete (kg)	número de cables	peso por cable (kg)	Factor de Seguridad	Tensión por cable con FS=5	Diámetro Cable	Resistencia Cable (Lbs)	Resistencia Cable (Kg)
12	90	34.60	3,114	12	259.50	5	1,297.50	3/8"	3,000.00	1,362.00
17	90	49.20	4,428	12	369.00	5	1,845.00	1/2"	4,500.00	2,043.00
23	90	69.00	6,210	12	517.50	5	2,587.50	9/16"	6,000.00	2,724.00

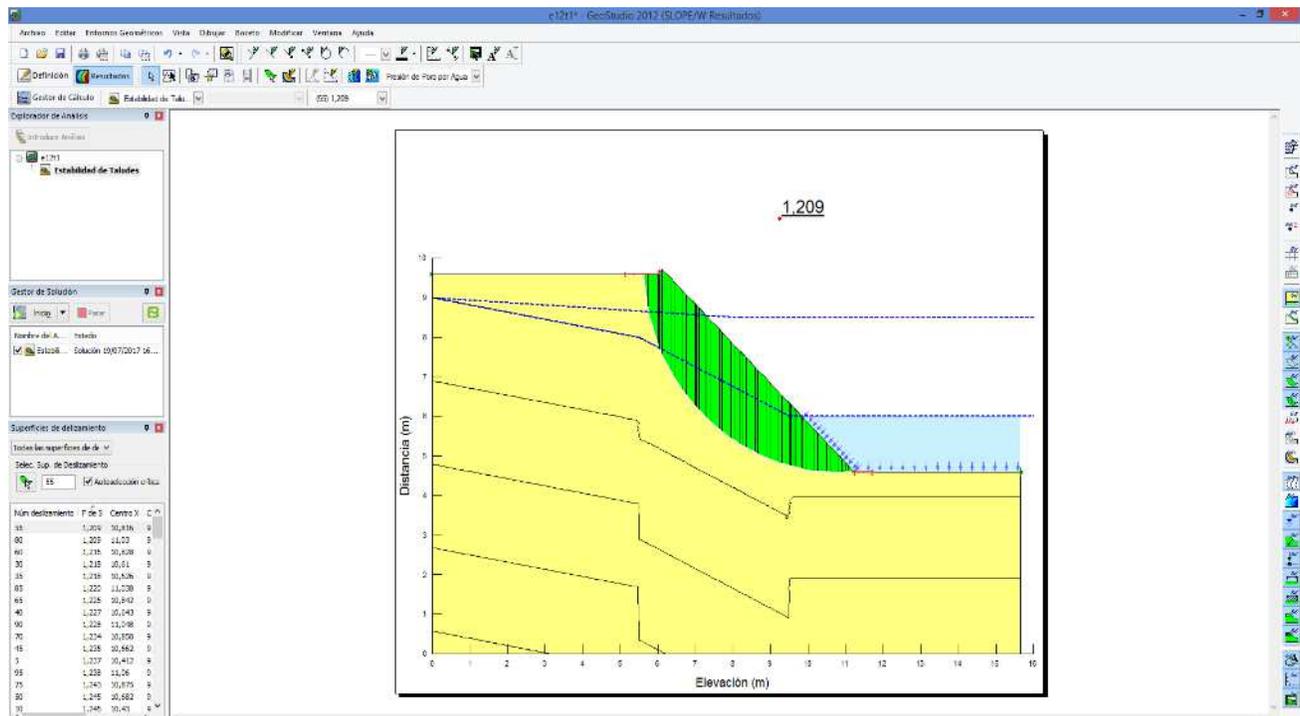
De manera que de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis numérico presentado en la tabla el sistema Armorshield puede funcionar con los siguientes diámetros y tensiones de cable poliéster cumpliendo satisfactoriamente con un Factor de Seguridad de 5.0

Armorshield 12cm (4510) Diametro de cable 3/8" Tension minima 3,000 LBS.

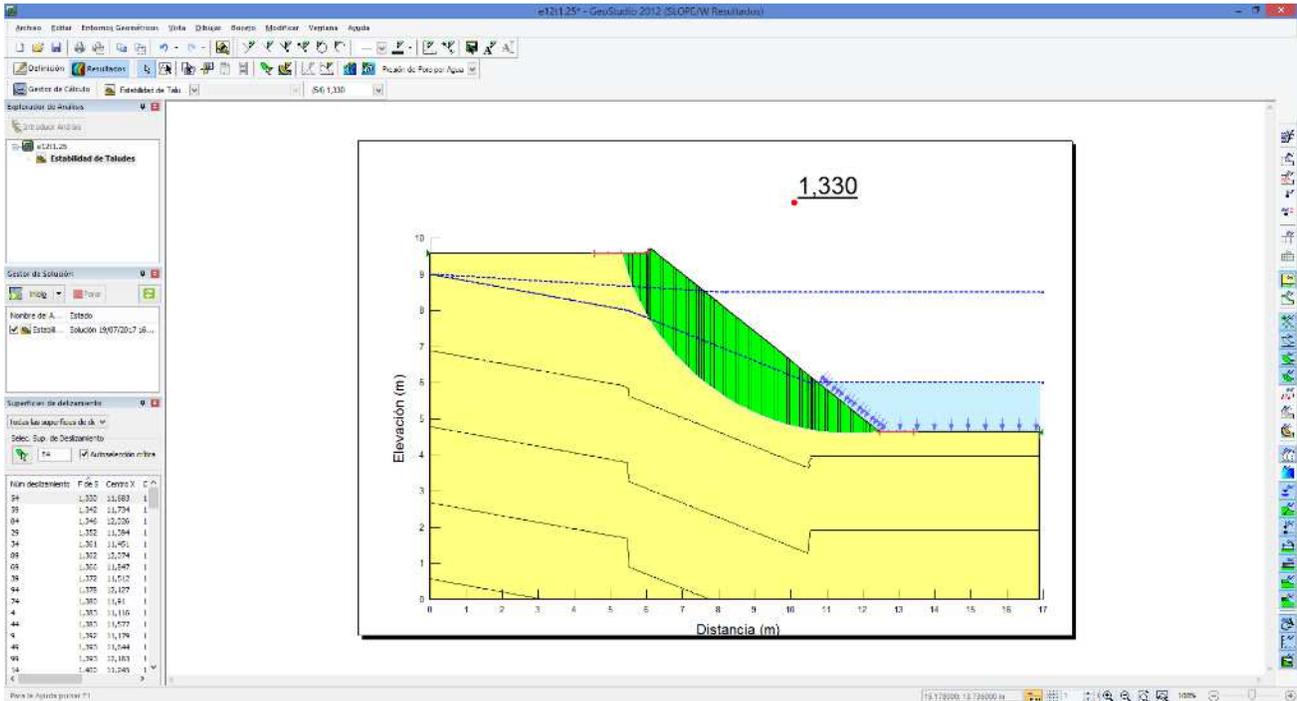
Armorshield 17cm (7510) Diametro de cable 1/2" Tension minima 4,500 LBS.

Armorshield 23cm (9010) Diametro de cable 9/16" Tension minima 6,000 LBS.

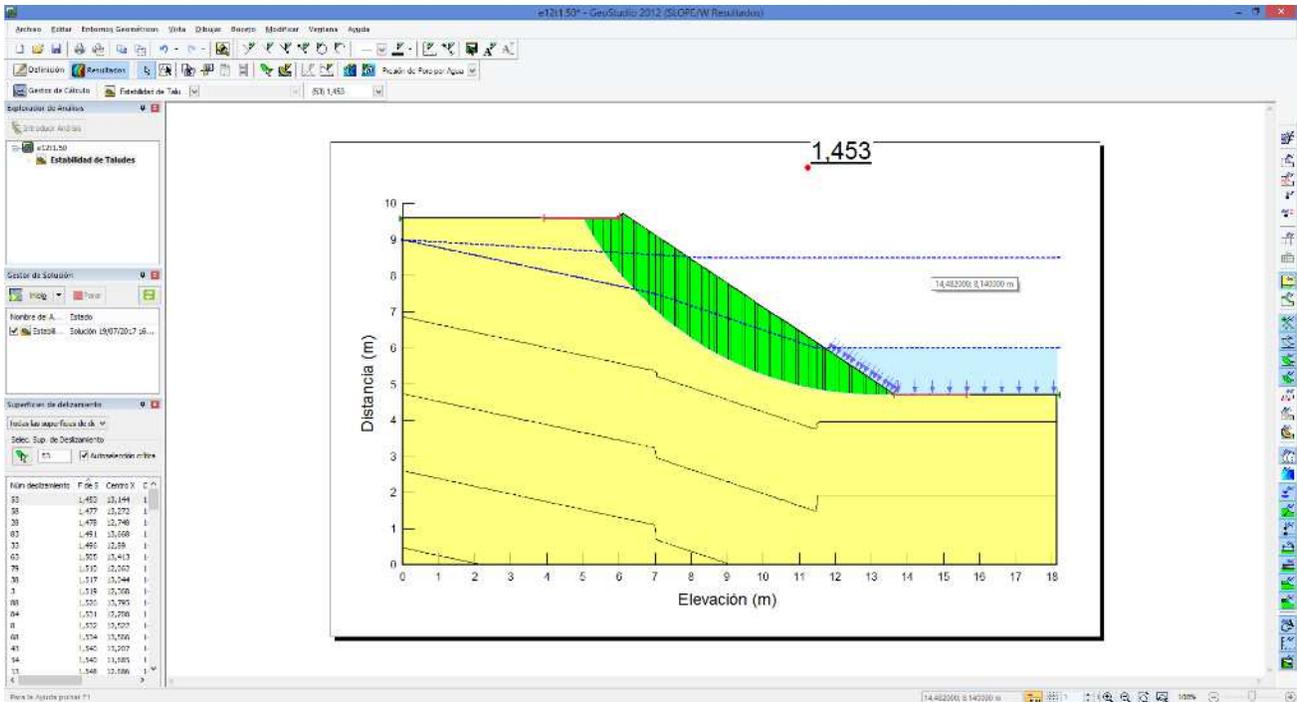
ANEXO "C". ESQUEMAS DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CON EL MODELO GEOSTUDIO.



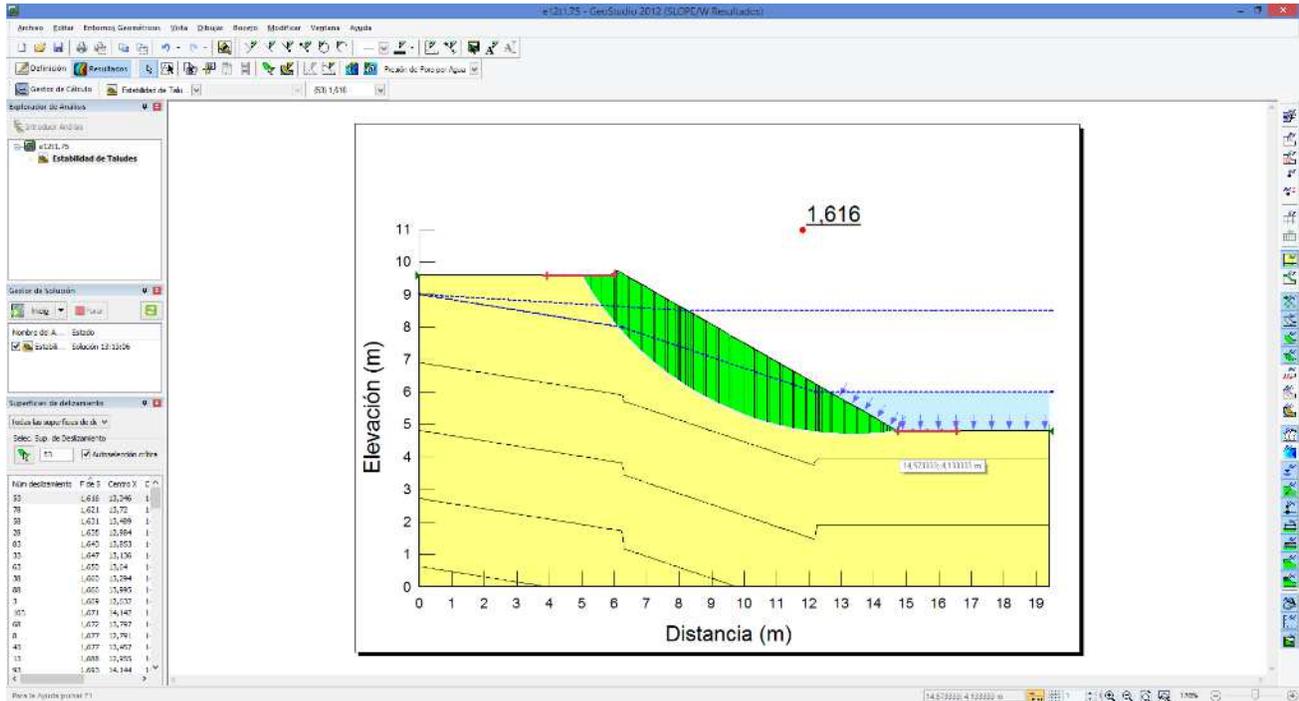
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1:1.



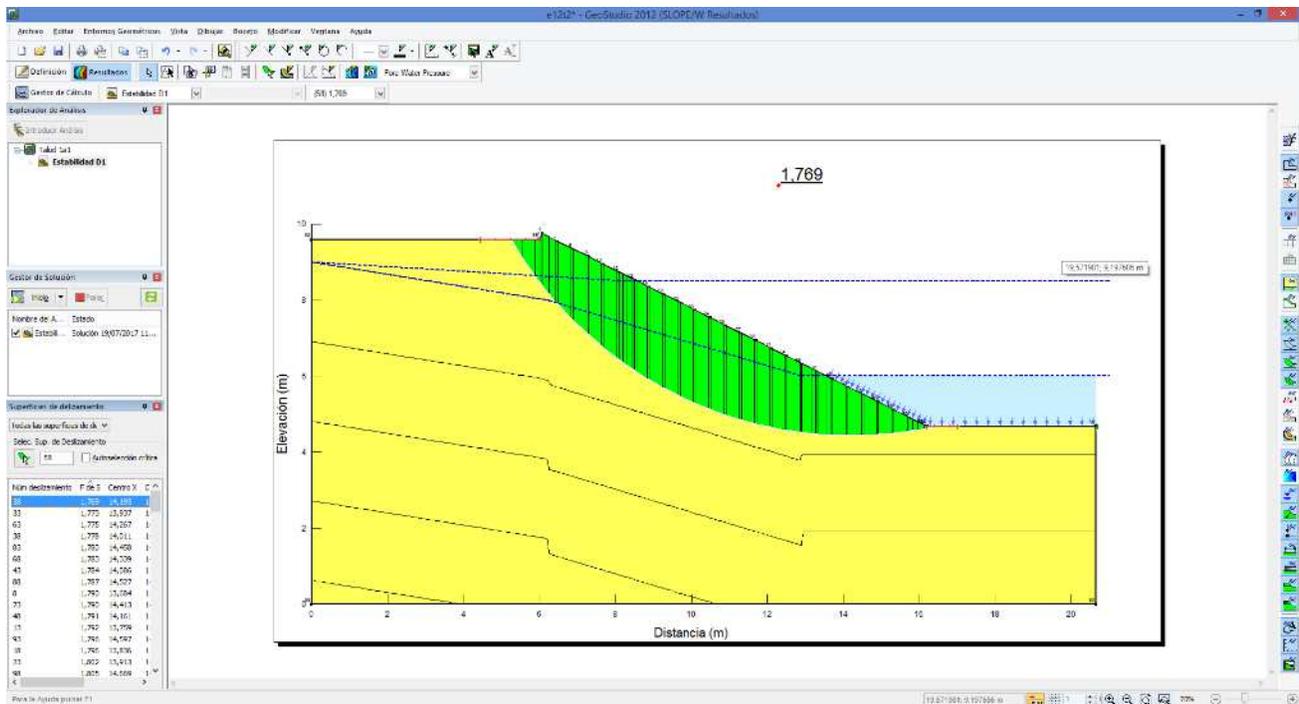
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1.25:1.



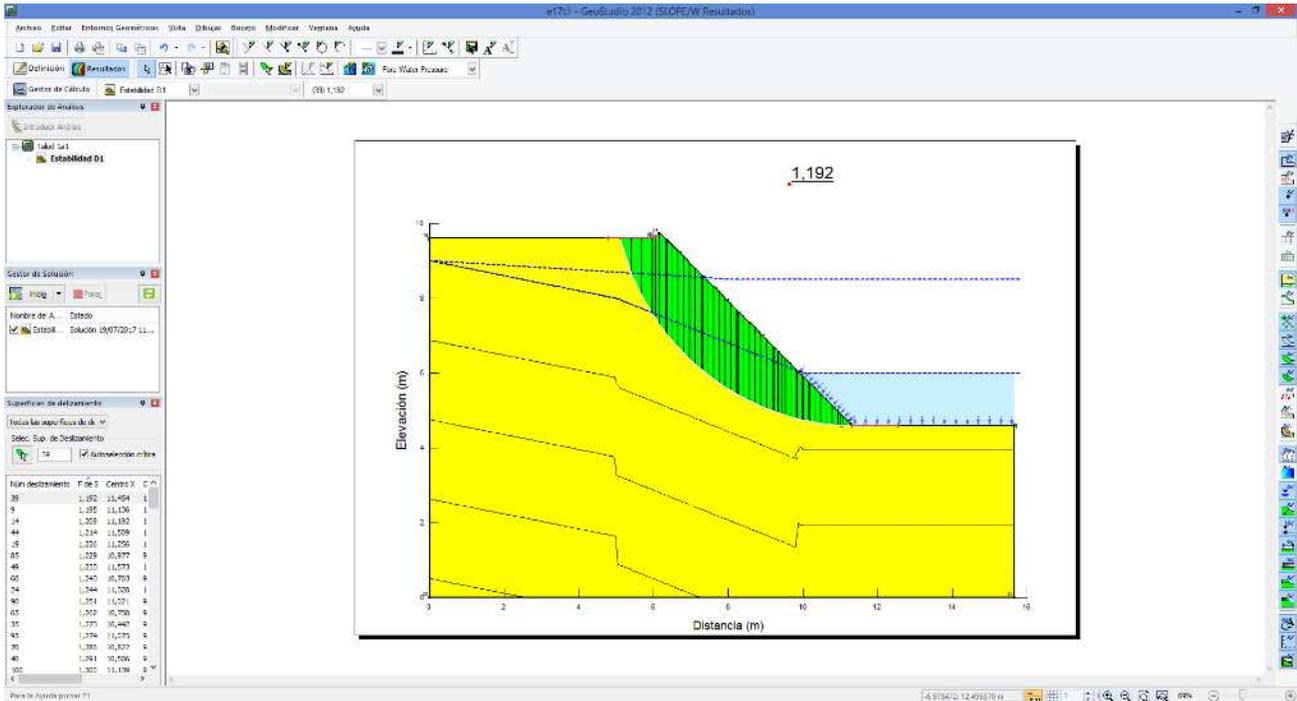
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1.50:1.



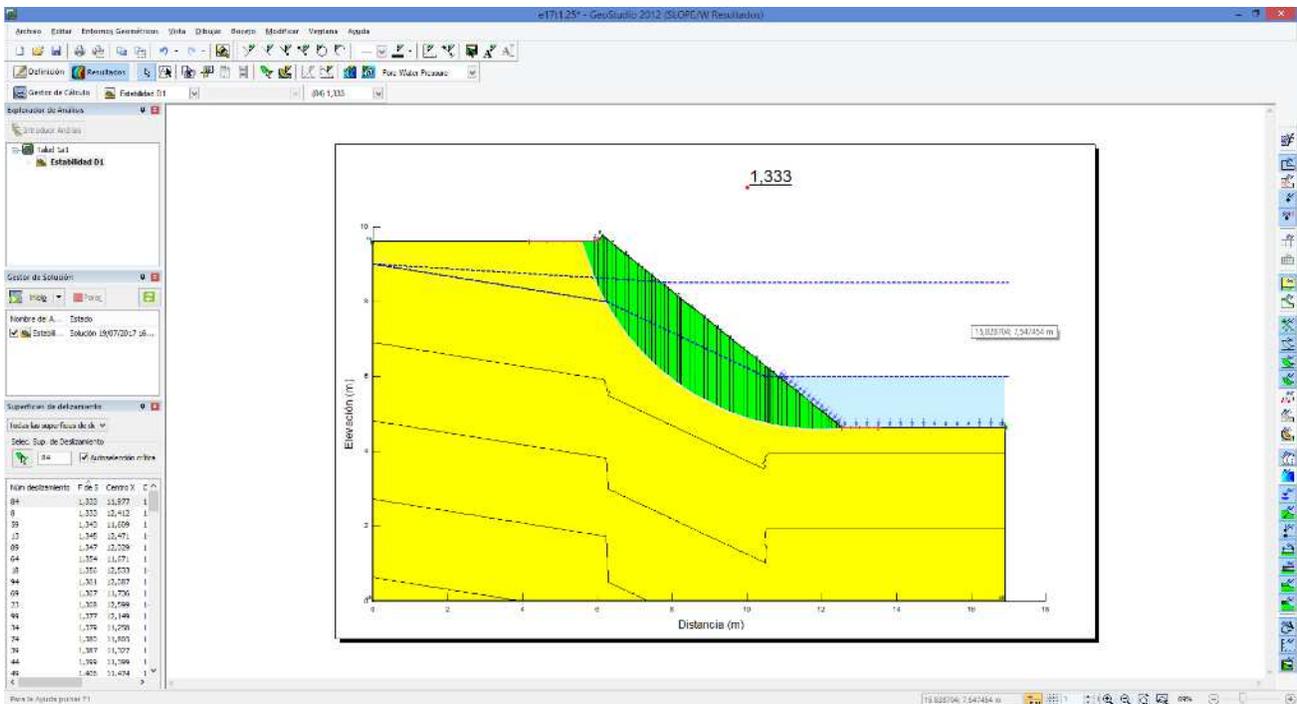
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1.75:1.



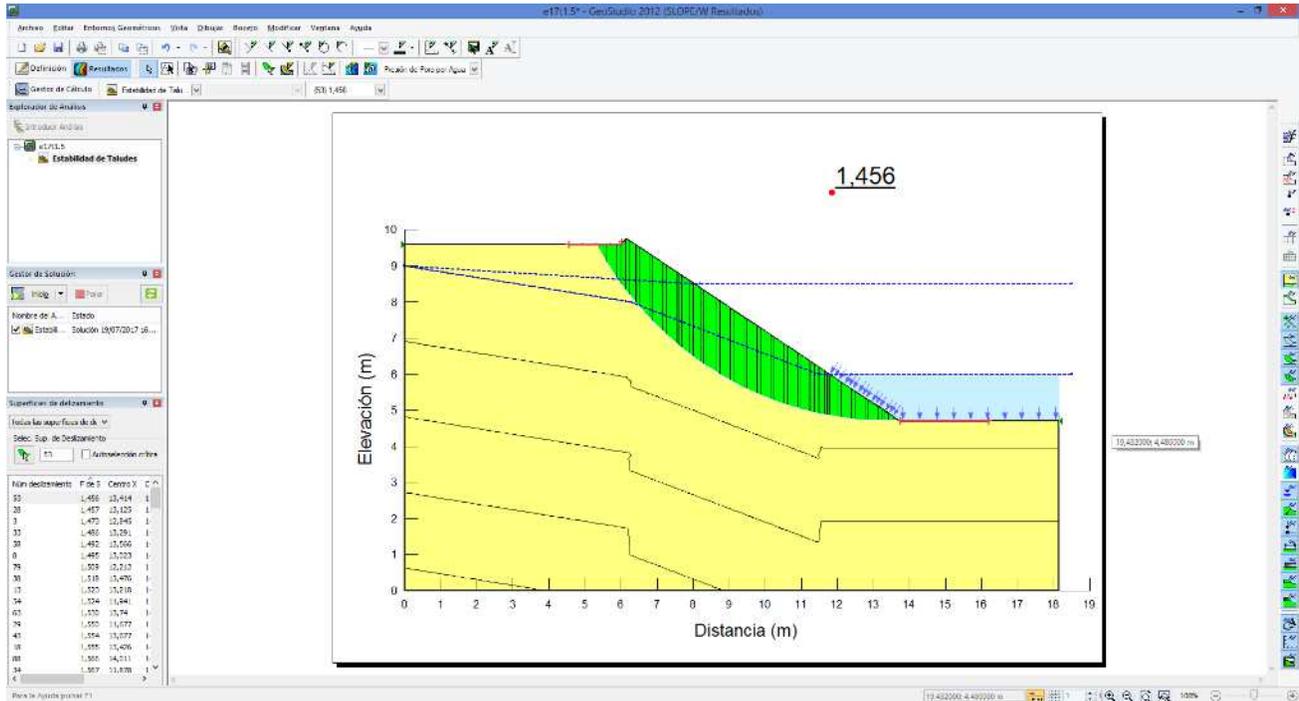
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 2:1.



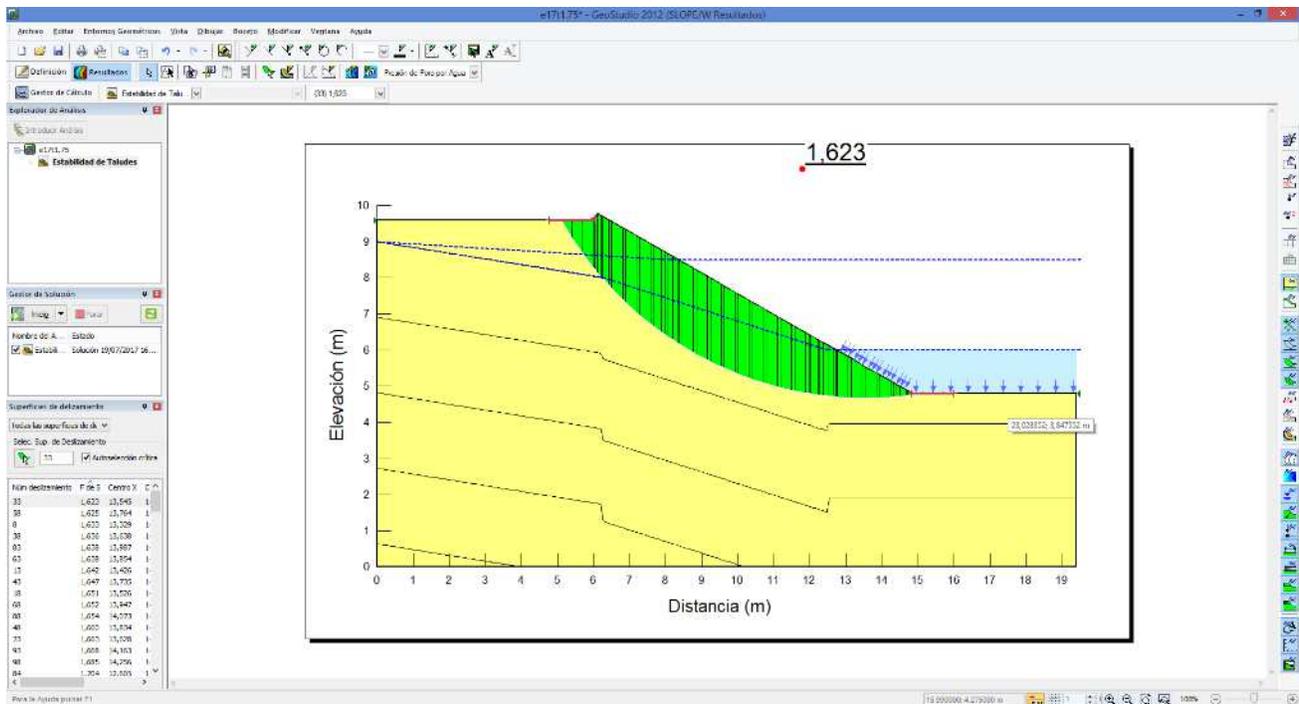
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1:1.



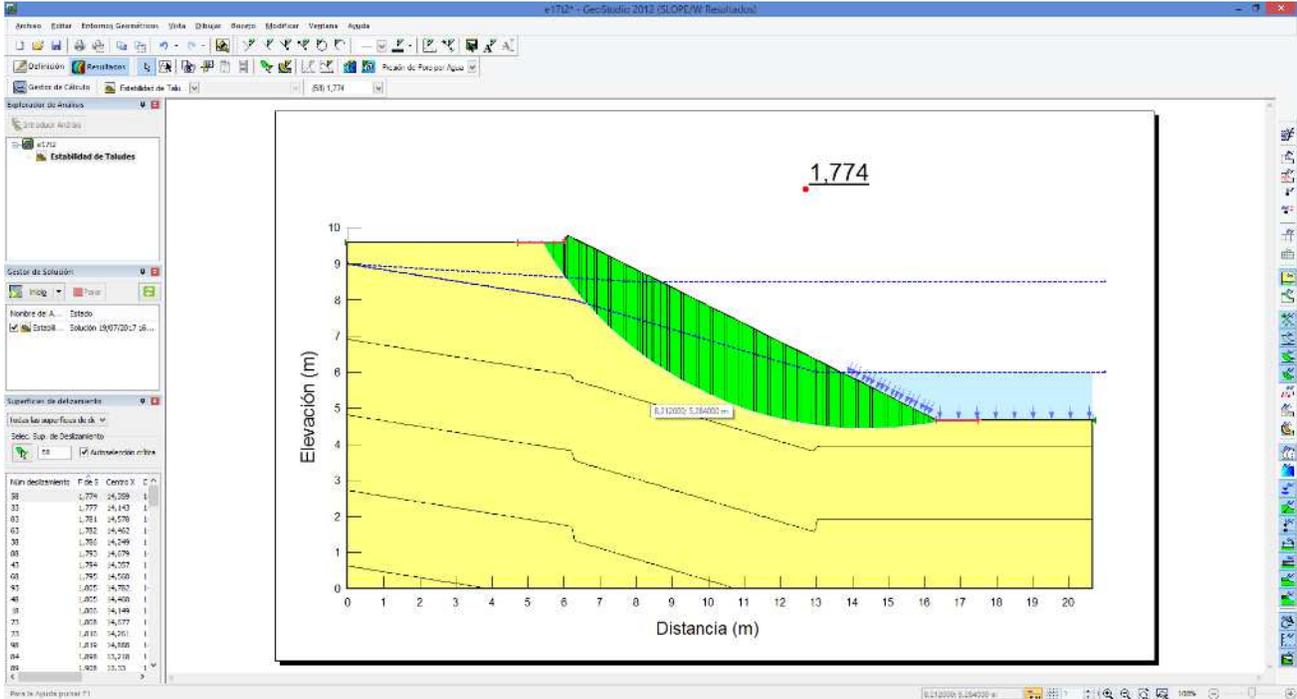
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1.25:1.



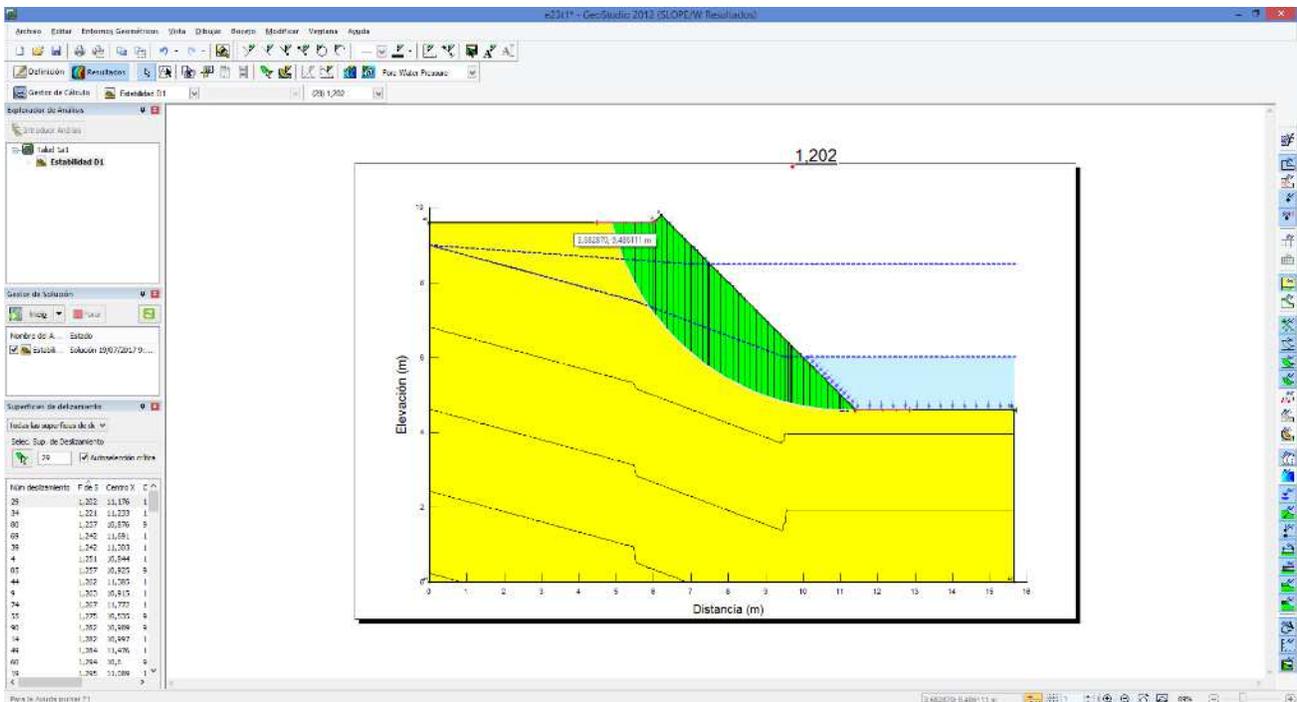
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1.5:1.



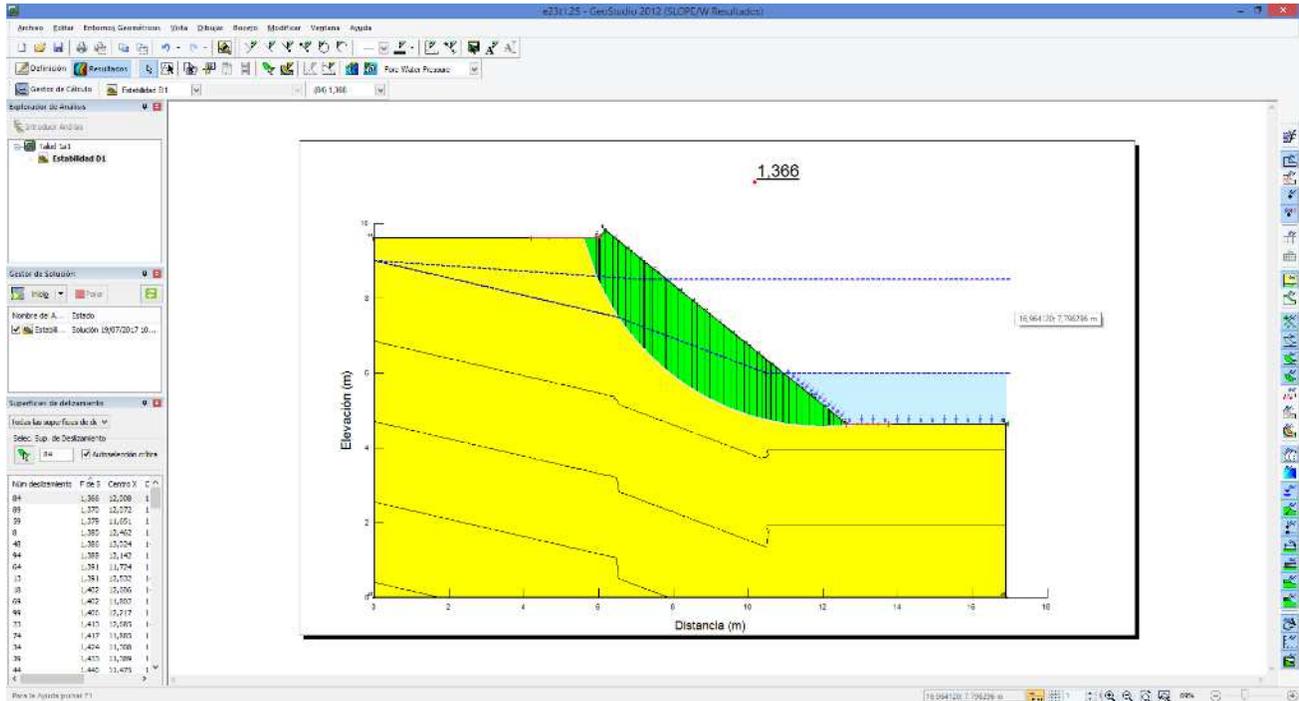
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1.75:1.



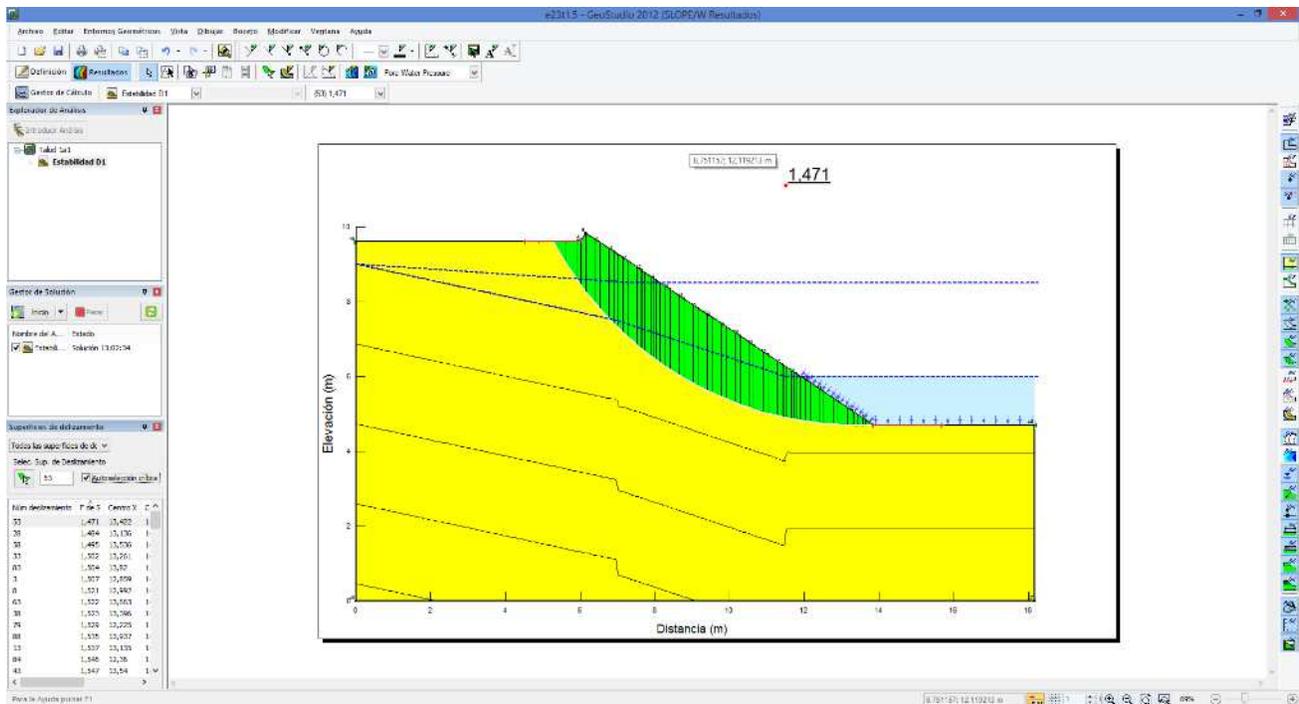
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 2:1.



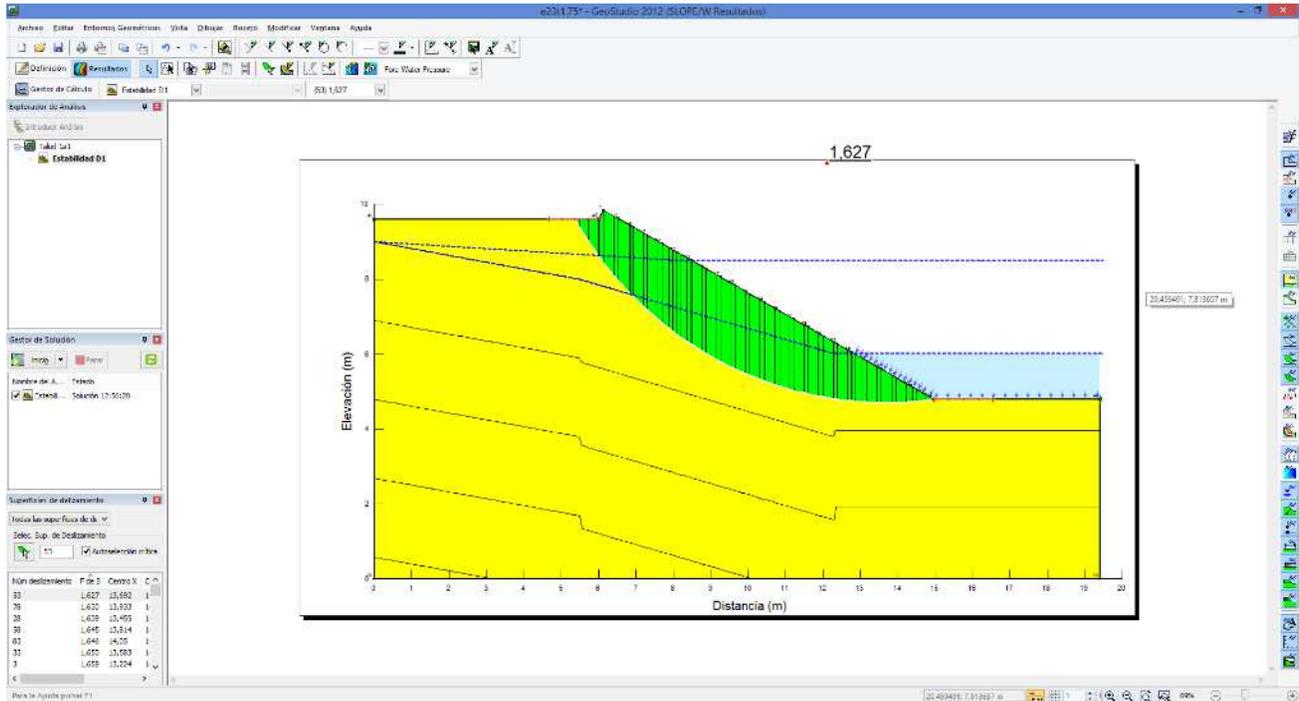
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1:1.



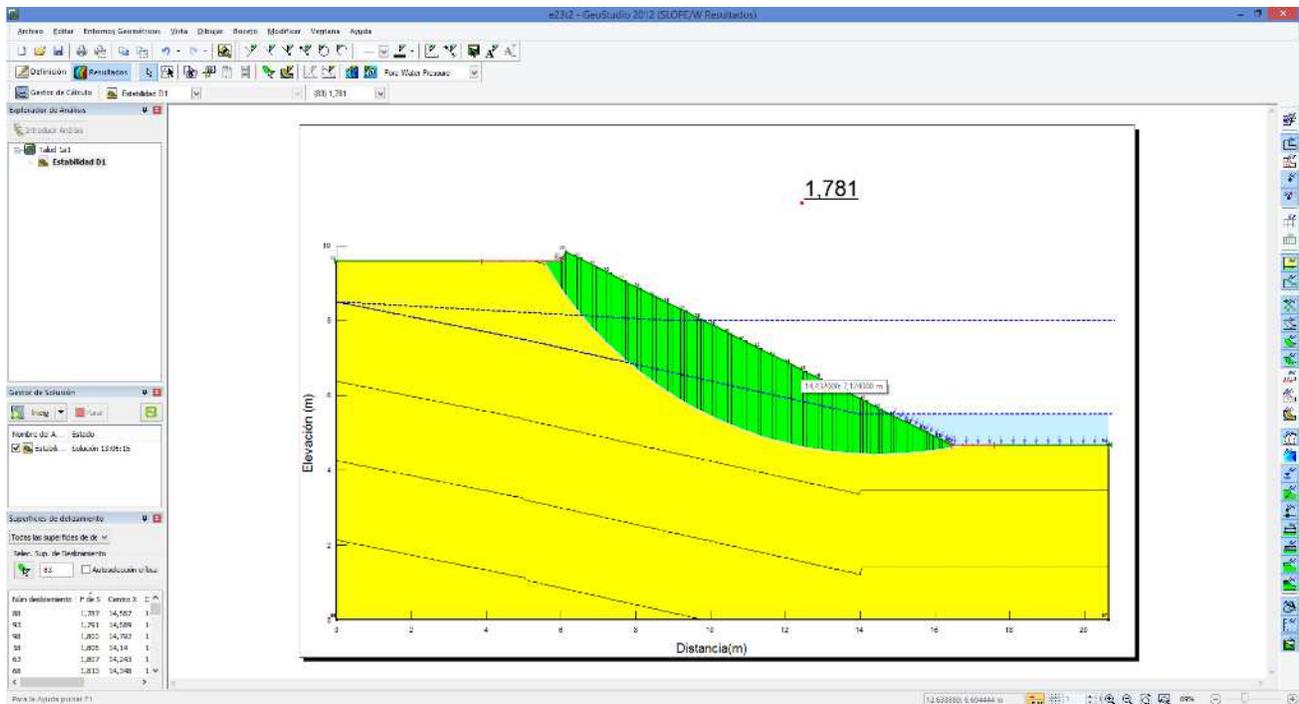
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1.25:1.



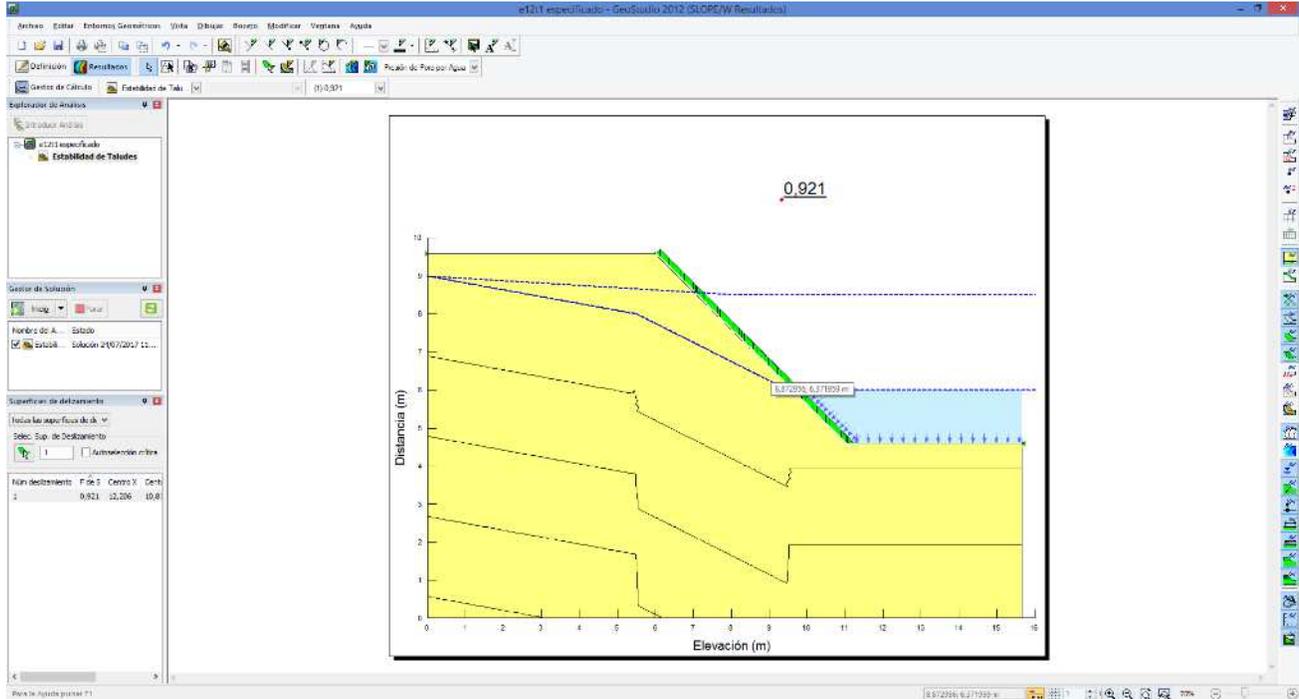
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1.5:1.



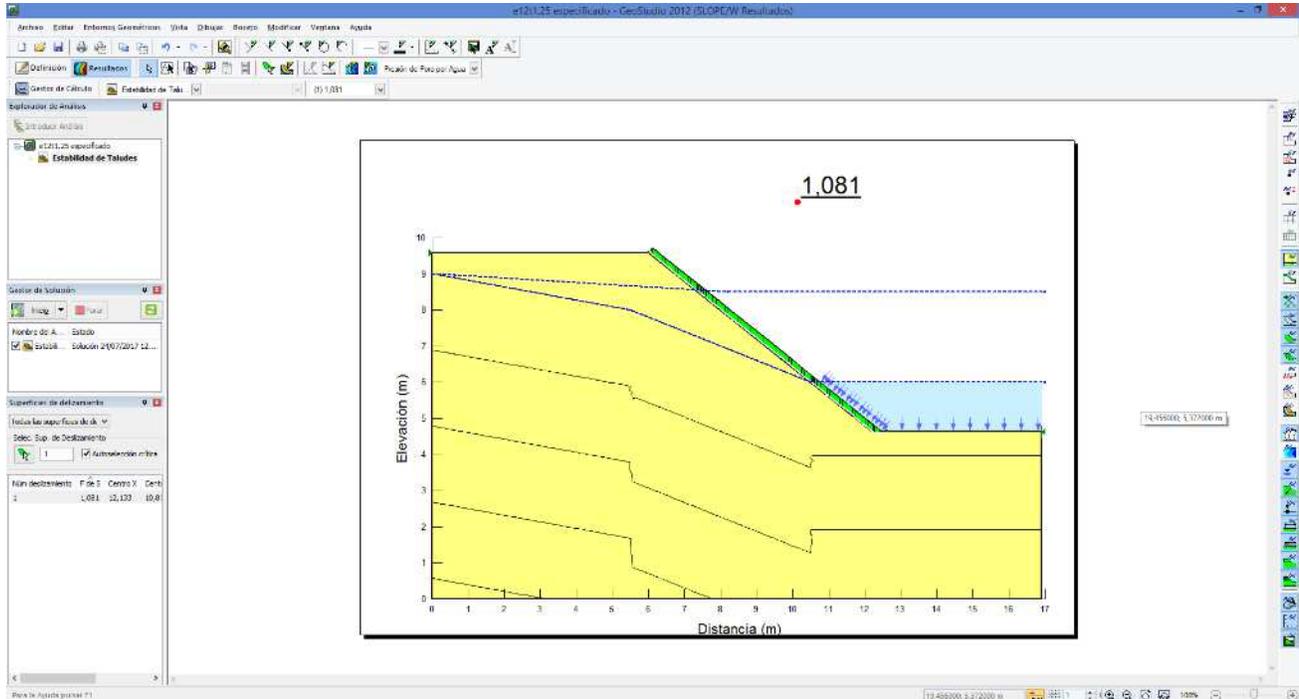
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1.75:1.



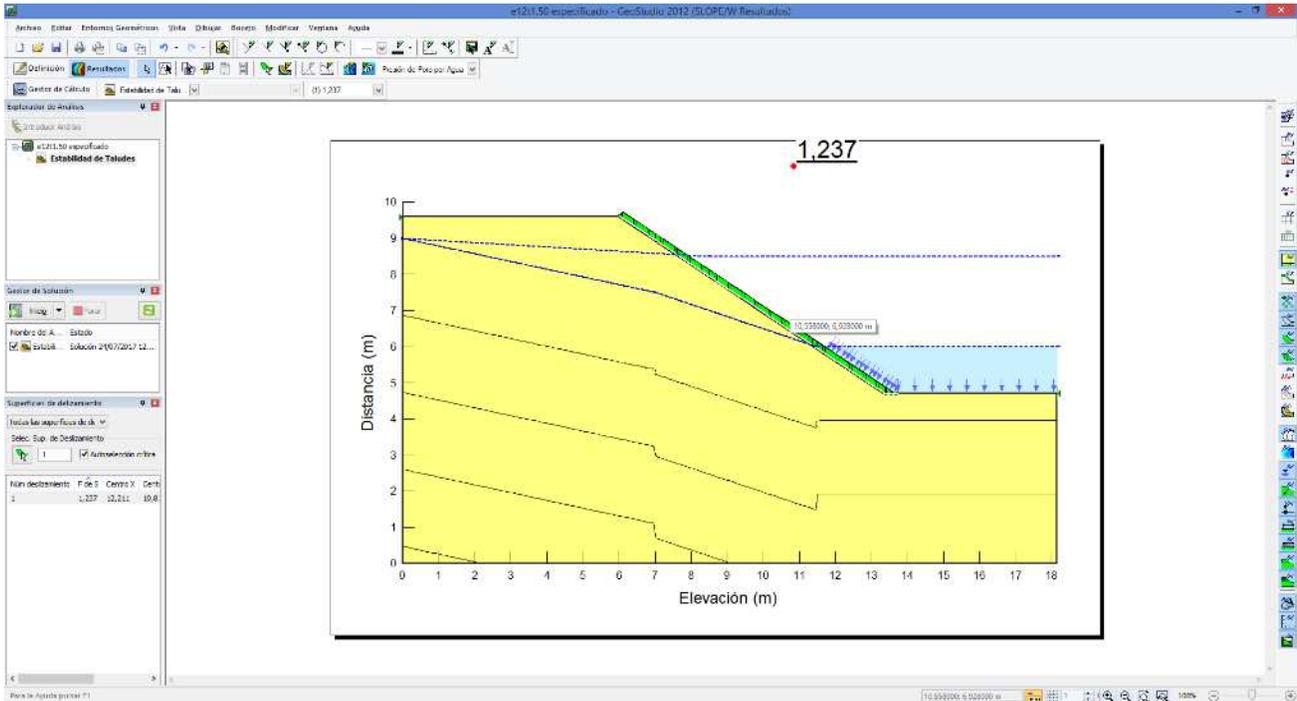
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla circular en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 2:1.



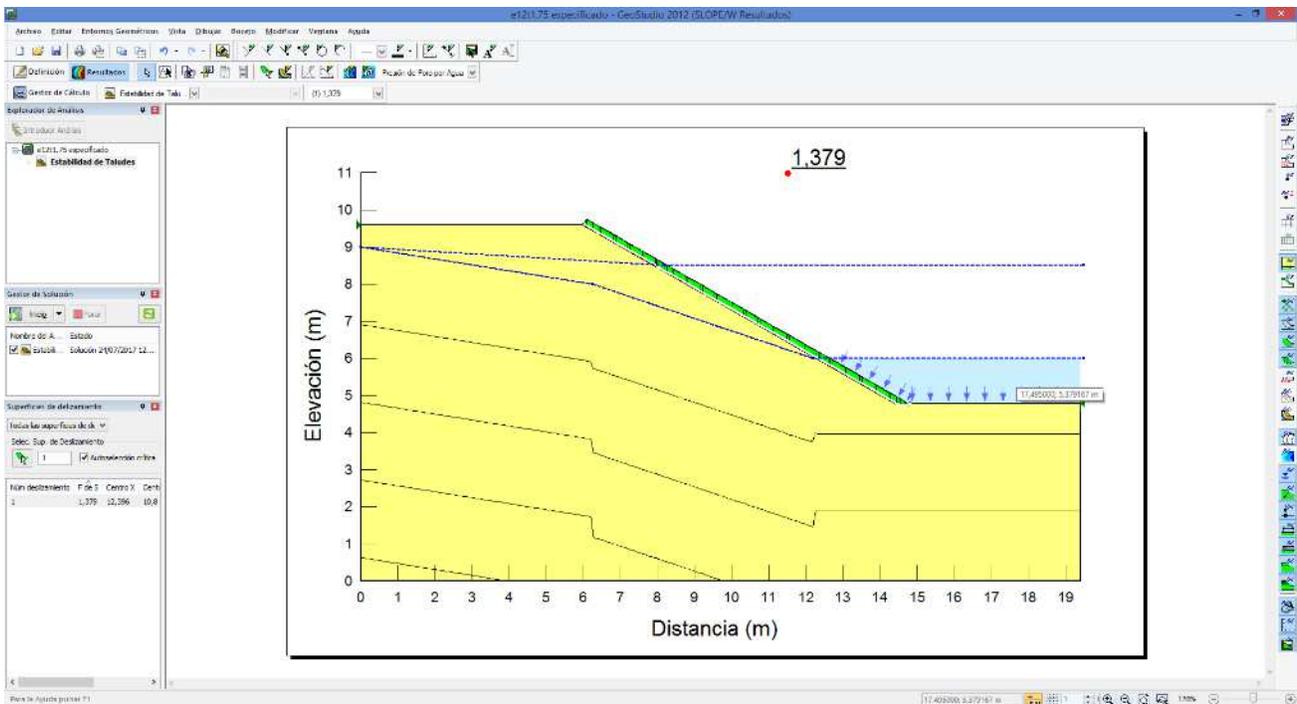
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1:1.



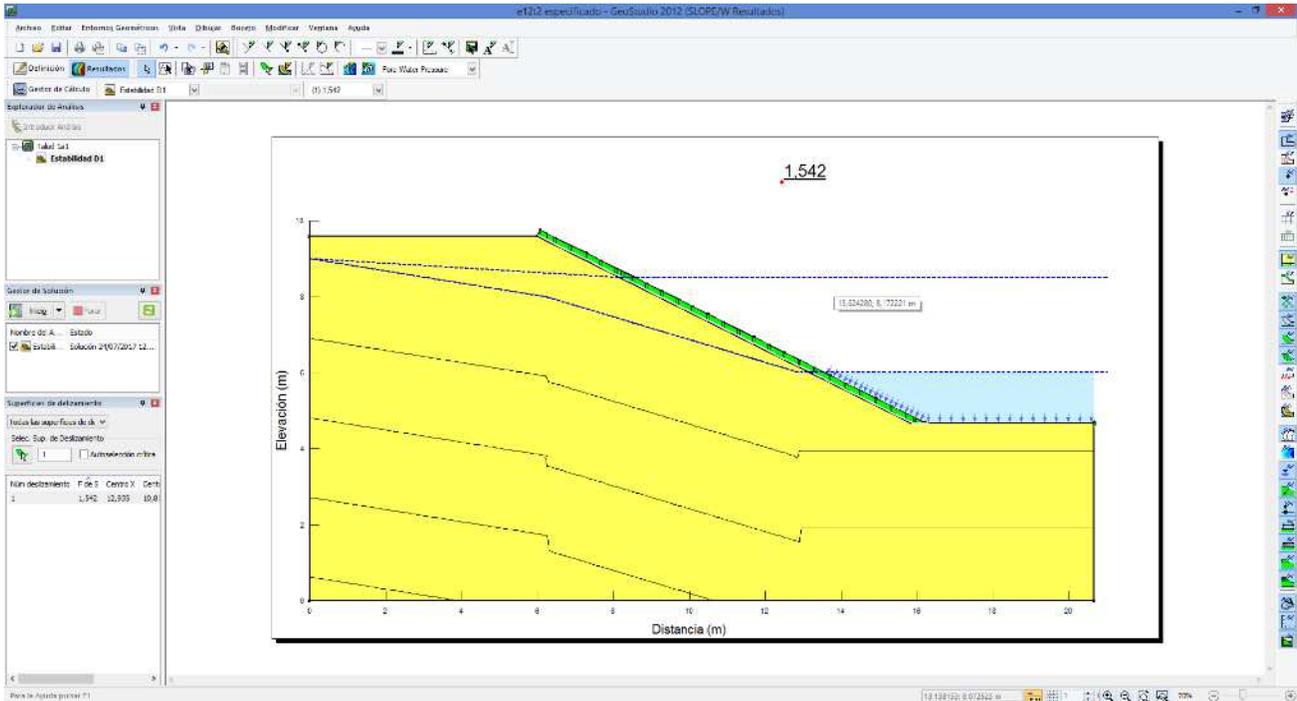
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1.25:1.



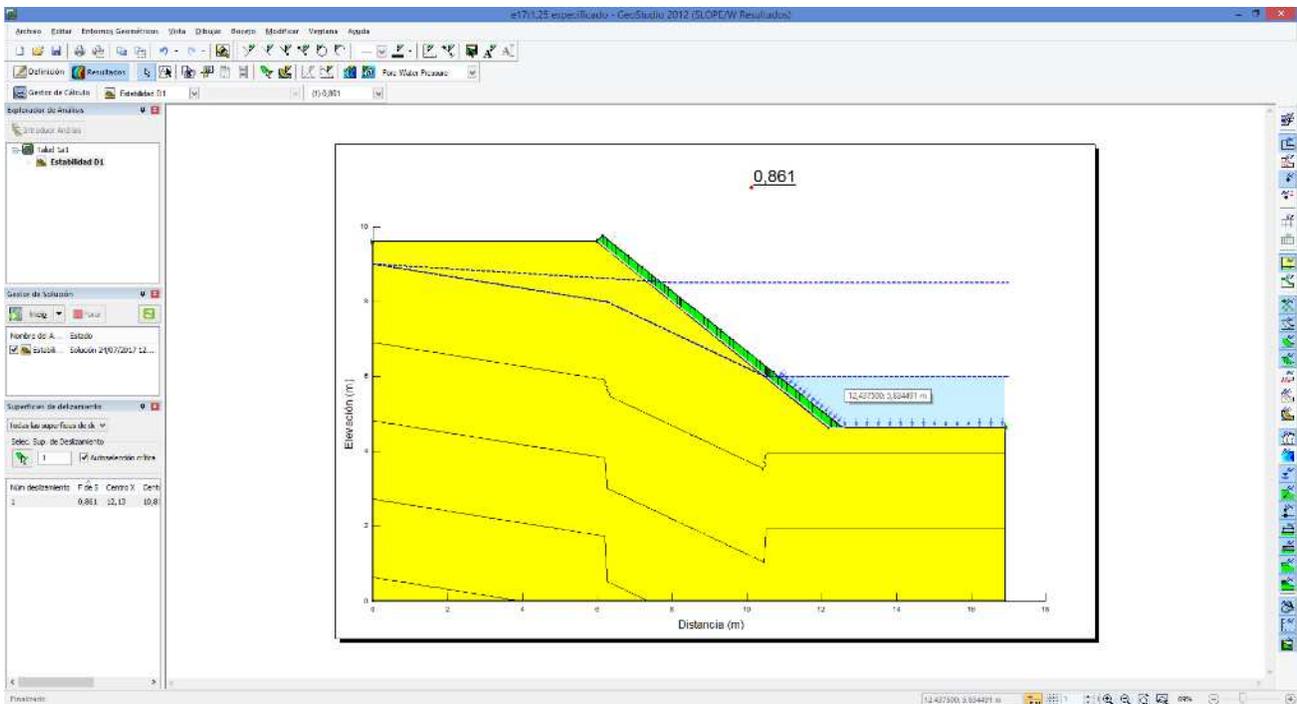
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1.5:1.



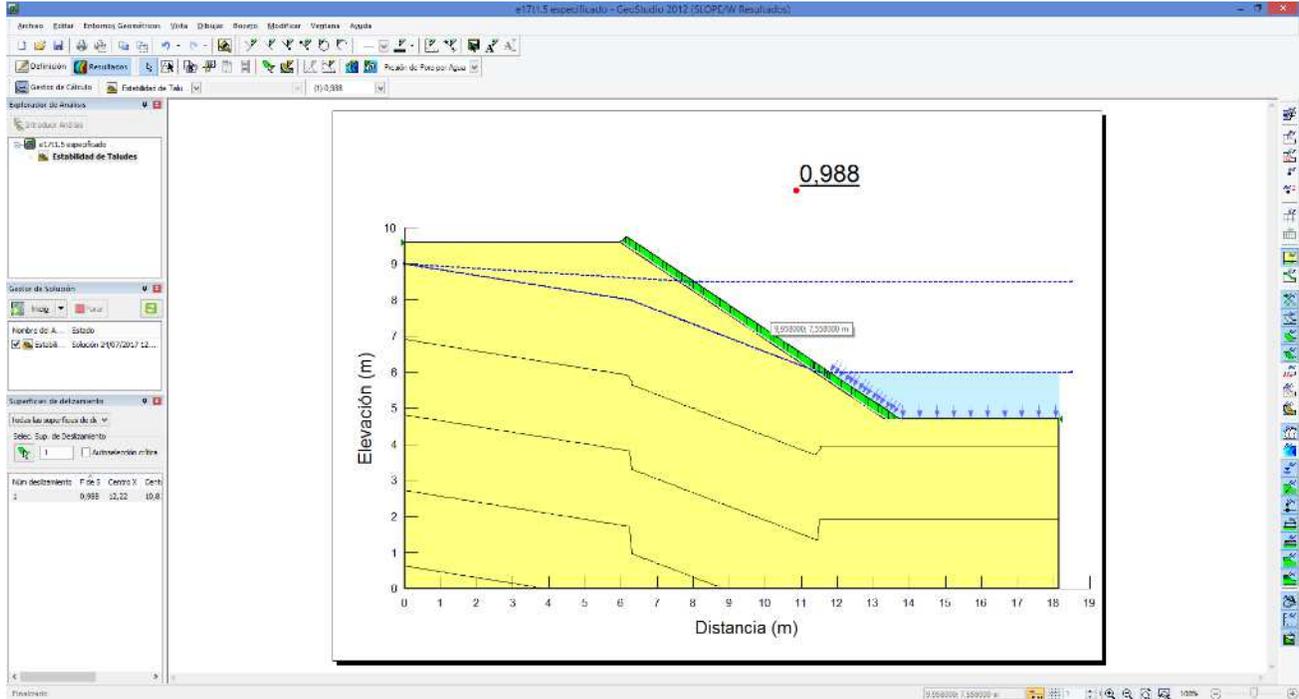
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 1.75:1.



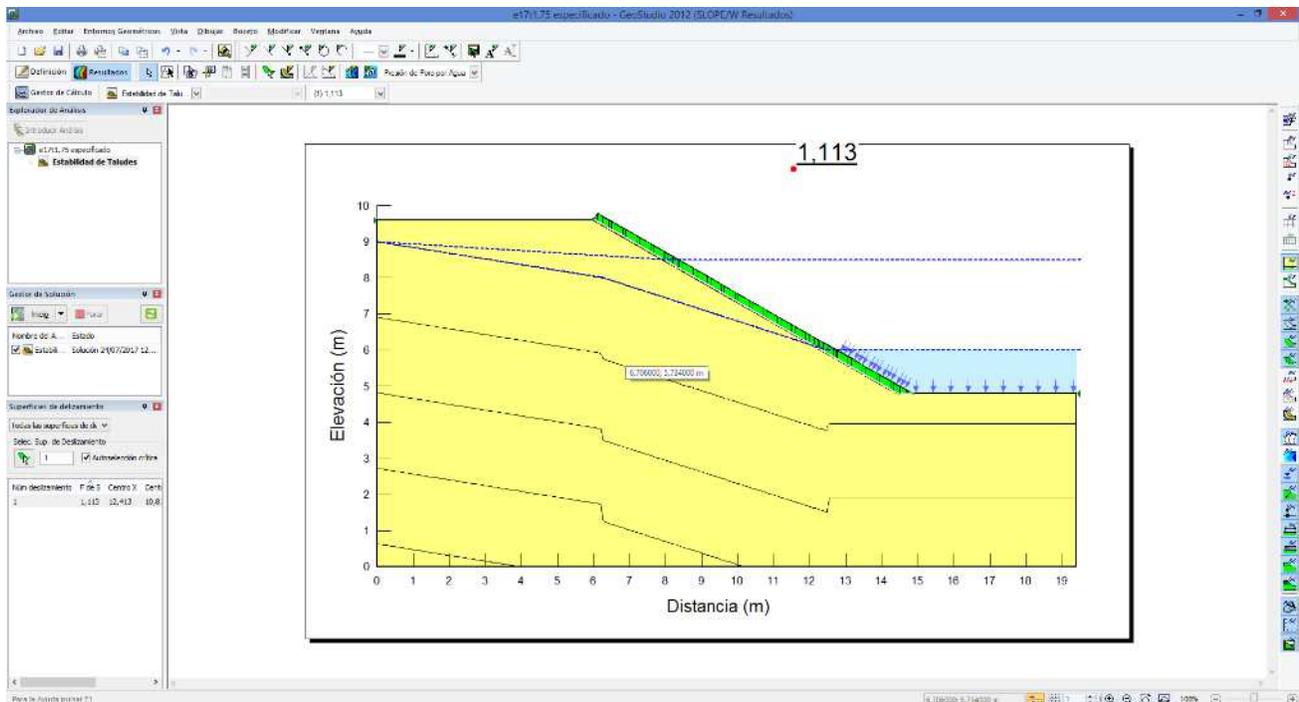
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 12 cm de espesor y talud 2:1.



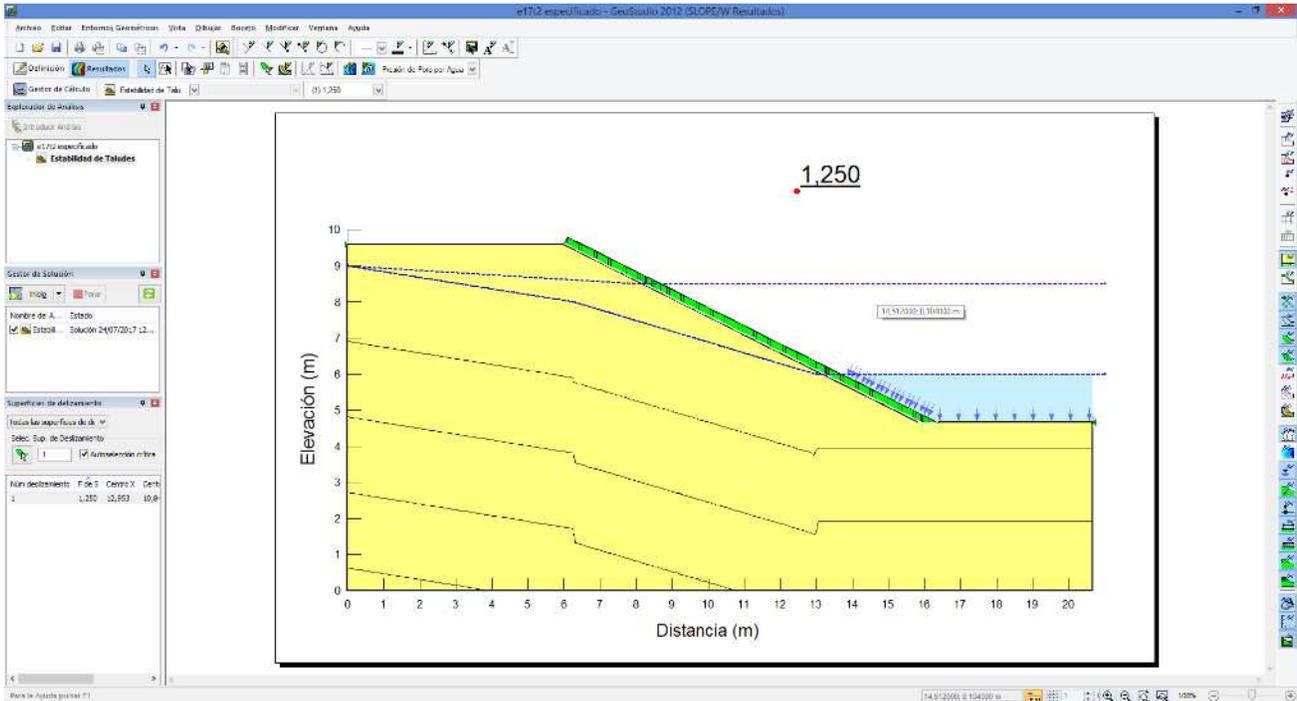
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1.25:1.



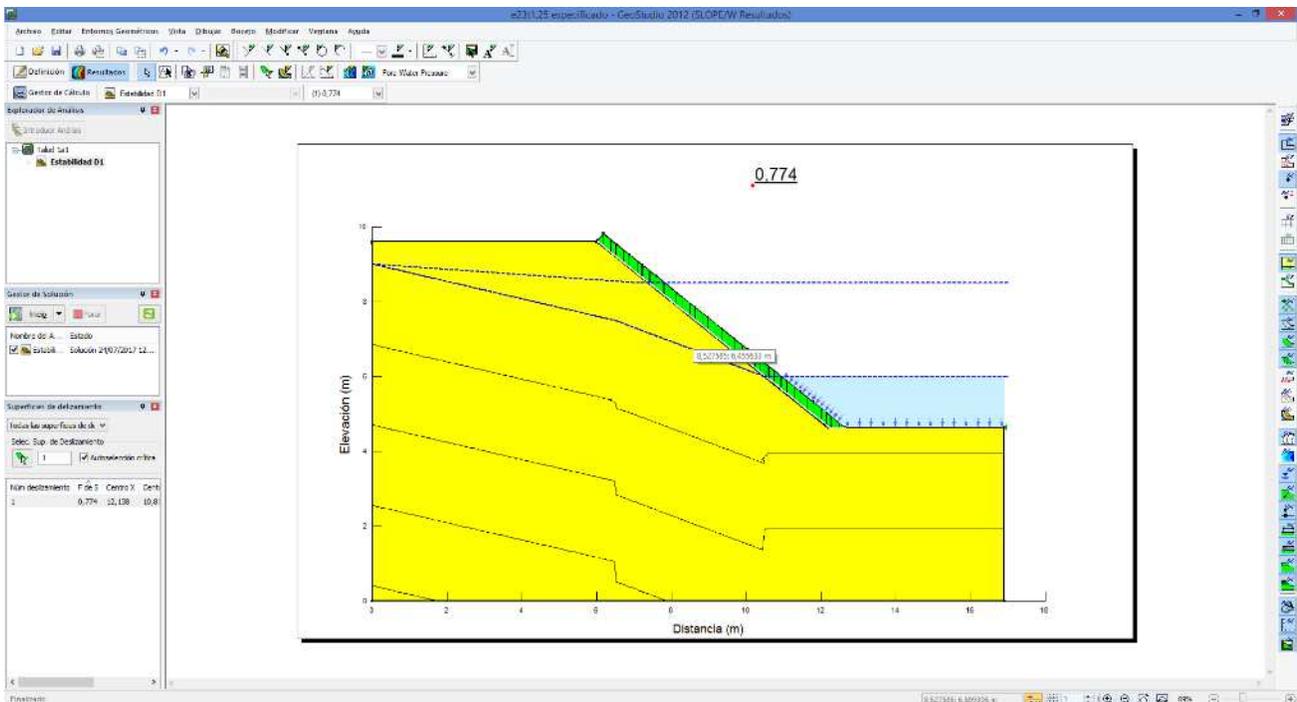
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1.5:1.



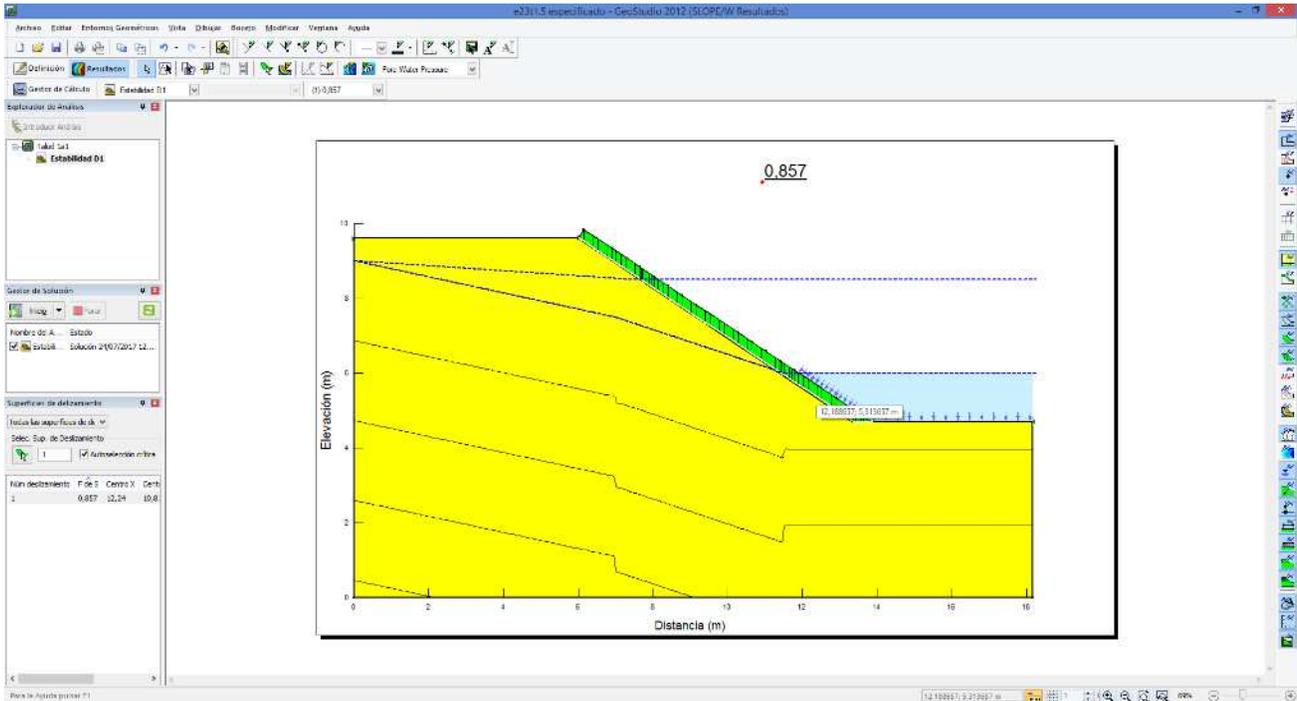
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 1.75:1.



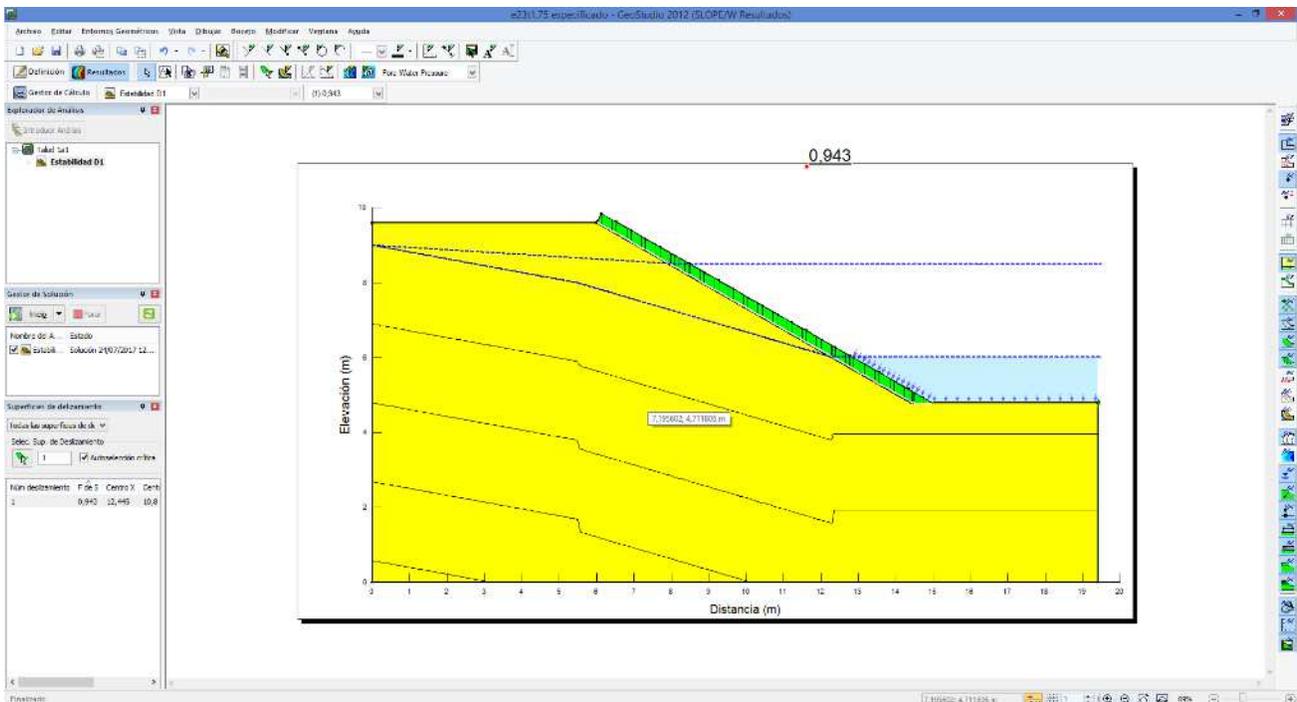
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 17 cm de espesor y talud 2:1.



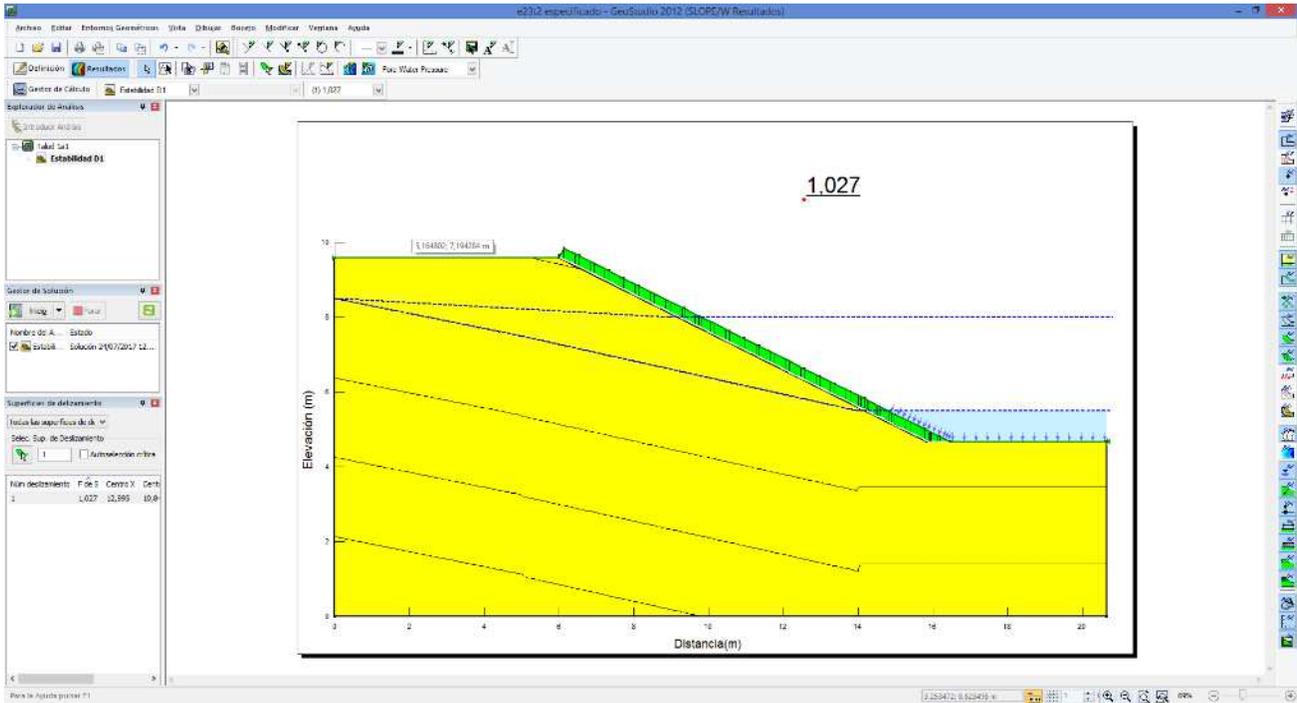
Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1.25:1.



Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1.5:1.



Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 1.75:1.



Resultados obtenidos del análisis de estabilidad para falla definida sobre geotextil en el sistema Armorshield de 23 cm de espesor y talud 2:1.