

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE EL USO DE GAVIONES Y
GEOCELDAS COMO ESTRUCTURAS DE DEFENSA
RIBEREÑA

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Daniel Alberto Aguilar Aguinaga

Asesor: Ing. José Arias Mesía

Lima, marzo de 2016

Resumen

El presente trabajo de tesis compara dos revestimientos contra la erosión ribereña mediante tres variables técnicas. Los revestimientos analizados son los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto, mientras que las variables definidas para la comparación son la resistencia a la erosión y durabilidad, la rugosidad de la superficie y la estabilidad del sistema de protección.

Con la finalidad de lograr una comparación objetiva de las variables definidas, se propone el caso del proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla en Tumbes para servir como marco de condiciones de diseño de los recubrimientos evaluados. Este proyecto de construcción de defensas ribereñas se dio en el marco de cooperación entre el Perú y Ecuador para mitigar los efectos de las inundaciones producto de la influencia de la oscilación climática del sur, conocida como el fenómeno de “El Niño”.

Así mismo, se realiza una propuesta de diseño para cada tipo de revestimiento con el objetivo de mostrar los criterios generales que influyen en la concepción y diseño de estas estructuras. Luego de realizar este diseño, se procede con el análisis de las variables definidas para la comparación. Estas variables han sido determinadas para representar las características básicas de análisis de los revestimientos comparados.

Se ha demostrado que los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto poseen la capacidad de resistir las sollicitaciones mínimas del proyecto. Sin embargo, en base al análisis realizado, se ha determinado que las geoceldas con relleno de concreto tienen el mejor desempeño como recubrimiento contra la erosión ribereña. Por último, si bien se concluye que las geoceldas son el recubrimiento más adecuado, se recomienda el uso conjunto de estos recubrimientos como parte de una solución integral.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA

PUCP

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Comparación técnica entre el uso de gaviones y geoceldas como estructuras de defensa ribereña"

Área : Medio Ambiente y Recursos Hídricos

Asesor : José Eduardo Arias Mesia

Alumno : Daniel Alberto Aguilar Aguinaga

Código : 2009.2029.412

Tema N° : 63

Fecha : 20-07-2015

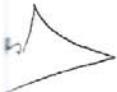


DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se busca comparar dos revestimientos contra la erosión ribereña. Por un lado, los colchones de gaviones han sido utilizados en numerosos proyectos en el Perú, mientras que las geoceldas con relleno de concreto son una alternativa diferente al mecanismo de los colchones. Adicionalmente, cada vez se hace más necesario el uso de alternativas diferentes a los gaviones, debido a la explotación excesiva de las canteras de piedra para la construcción de defensas contra inundaciones. De esta manera, este proyecto aporta con la difusión y el entendimiento de una metodología de recubrimiento de márgenes para la protección contra las inundaciones en el norte del país.

OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo es comparar de manera técnica el uso de gaviones y geo-celdas para la defensa contra la erosión ribereña. El alcance de este proyecto de tesis es el de comparar los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto como recubrimientos contra la erosión de sistemas estructurales que sirven para la defensa de inundaciones ribereñas. Adicionalmente, se establecen las definiciones de los revestimientos y sus componentes, del mismo modo, se determinan los criterios generales de diseño. Esta tesis utiliza para el diseño de los revestimientos comparados, los diques diseñados en el proyecto de construcción de defensas ribereñas en el río Zarumilla como parte del Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (Ecuador-Perú). Las variables técnicas definidas en el marco teórico para la comparación son las siguientes: la rugosidad de la superficie, la resistencia a la erosión y durabilidad y la estabilidad del sistema de


FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA

PUCP

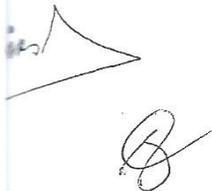
protección. La comparación de estas variables se realiza mediante un análisis cualitativo.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS ESPERADOS

El enfoque de este proyecto de tesis es cualitativo, se basa en una realidad contextualizada, sigue un proceso no experimental y los resultados se basan en datos estadísticos medidos en investigaciones anteriores. El alcance es explicativo, se busca recopilar información para sustentar y comparar las variables establecidas. En ese sentido, se usan variables cualitativas y cuantitativas. Los instrumentos utilizados fueron la revisión de bibliografía en libros, artículos de investigación, bases de datos, expedientes técnicos, guías de diseño, catálogos de productos y fuentes de primer orden. Las etapas que se siguieron en el proyecto son las siguientes: preparación del proyecto, revisión de la literatura y el marco teórico, formulación de la metodología, ejecución del análisis y redacción del informe. El resultado esperado del proyecto es poder definir un tipo de revestimiento como el más adecuado para el caso analizado, así mismo, se debe definir las condiciones más adecuadas para cada revestimiento.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



Índice

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Alcances de la investigación	4
1.4	Justificación de la investigación	4
1.5	Delimitación de la investigación	5
1.6	Limitaciones de la investigación.....	5
1.7	Metodología de investigación.....	6
2	Marco Teórico.....	7
2.1	Revestimientos contra la erosión en defensas ribereñas	7
2.2	Colchones de gaviones	8
2.2.1	Predimensionamiento de gaviones tipo colchón	14
2.2.2	Verificación del arrastre de colchones por velocidad	18
2.2.3	Verificación del arrastre del material de los colchones	19
2.2.4	Verificación de deformaciones.....	23
2.2.5	Verificación de erosión entre el colchón y el material base	26
2.2.6	Protección del pie de talud	29
2.3	Geoceldas con relleno de concreto.....	31
2.3.1	Criterios para la selección del material de relleno.....	38
2.3.2	Dimensionamiento de las geoceldas.....	40
2.3.3	Análisis de estabilidad para el cálculo de anclajes y tendones	41
2.3.4	Anclajes de talud.....	47
2.3.5	Cálculo del número de tendones	48
2.3.6	Protección del pie de talud	48
2.4	Variables propuestas para la comparación de la estructura	49
3	Dimensionamiento de los Sistemas de Revestimiento de Protección	58
3.1	Proyecto de defensas ribereñas en el río Zarumilla.....	58
3.2	Revestimiento del colchón de gaviones.....	60
3.3	Revestimiento de geoceldas con relleno de concreto	69
4	Análisis de Resultados.....	76
4.1	Resistencia a la erosión y durabilidad.....	76

4.2	Rugosidad de la superficie	79
4.3	Estabilidad del sistema de protección.....	82
5	Conclusiones y Recomendaciones.....	88
5.1	Conclusiones	88
5.2	Recomendaciones.....	89
5.3	Línea de Investigación Futura.....	90



Lista de Figuras

Figura 2-1: Gavión tipo caja.....	10
Figura 2-2: Gavión tipo saco.....	11
Figura 2-3: Gavión tipo colchón.....	12
Figura 2-4: Gavión tipo colchón.....	12
Figura 2-5: Revestimiento de cauce mediante colchones.....	13
Figura 2-6: Revestimiento de cauce del río Ica mediante colchones de gaviones.....	13
Figura 2-7: Revestimiento de cauce del río Zarumilla mediante colchones de gaviones.....	14
Figura 2-8: Velocidad crítica (V_c) que causa el movimiento de las partículas en función de su tamaño	19
Figura 2-9: Distribución de fuerza tractiva en una sección trapezoidal del canal.	21
Figura 2-10: Esquema del movimiento de piedras al interior de los colchones.	23
Figura 2-11: Relación entre el parámetro de deformación y el coeficiente eficaz de Shields.....	25
Figura 2-12: Velocidad del agua entre el colchón y el fondo	26
Figura 2-13: Velocidades máximas permisibles en suelos cohesivos.	28
Figura 2-14: Protección de pie de talud para profundidades pequeñas de erosión	29
Figura 2-15: Protección de pie de talud para profundidades grandes de erosión	30
Figura 2-16: GeoWeb, sistema de confinamiento celular.	31
Figura 2-17: GeoWeb, componentes del sistema	32
Figura 2-18: GeoWeb, sistema de confinamiento celular.	33
Figura 2-19: Dimensiones de las celdas GeoWeb	34
Figura 2-20: Geocell	35
Figura 2-21: Relleno de agregados.	35
Figura 2-22: Relleno de concreto	36
Figura 2-23: Tensores.	36
Figura 2-24: Anclaje de superficie ATRA	37

Figura 2-25: Anclaje de coronación Helicoidal..... 37

Figura 2-26: Geoceldas sobre geotextil..... 38

Figura 2-27: Altura de las geoceldas con relleno de concreto según las velocidades máximas promedio. 41

Figura 2-28: Tipos de anclajes a tierra 42

Figura 2-29: Esquema de la protección del pie de talud según la profundidad de socavación 49

Figura 3-1: Dimensiones de la sección crítica que se considera para el diseño en este proyecto..... 60

Figura 3-2: Diseño del revestimiento con colchones de gaviones..... 68

Figura 3-3: Diseño del revestimiento con geoceldas con relleno de concreto. 75



Lista de Tablas

Tabla 2-1: Espesor de colchones y diámetro de material de relleno (Campaña del Toro, 2014).....	16
Tabla 2-2: Dimensiones y pesos aproximados de las piezas de colchones de gaviones (Maccaferri, 2015).....	17
Tabla 2-3: Coeficientes de rugosidad tipo para revestimientos de Geoweb rellenos con concreto (Presto, 2000).....	40
Tabla 2-4: Resistencias de diseño de tendones (Presto, 2000).....	48
Tabla 3-1: Rango de velocidades y espesor.....	61
Tabla 3-2: Piedras de relleno, dimensiones y d50	61
Tabla 3-3: Resultados del predimensionamiento dimensiones del colchón..	62
Tabla 4-1: Resumen de los valores calculados para la comparación de la variable Resistencia a la erosión y durabilidad entre los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto	79
Tabla 4-2: Coeficientes de rugosidad de la superficie de colchones Reno encontrados mediante recopilación de aplicaciones prácticas y pruebas especificadas (Maccaferri, 2015).....	80
Tabla 4-3: Resumen de los valores del coeficiente n establecidos para cada recubrimiento	82
Tabla 4-4: Resumen de los Factores de Seguridad calculados para la comparación de la variable Estabilidad del sistema de protección	86
Tabla 4-5: Resumen del análisis de las variables de comparación	87

1 Introducción

Los ríos son recursos naturales sumamente importantes para el desarrollo de la vida. Este recurso ha sido aprovechado y utilizado desde tiempos remotos, junto a sus márgenes se han fundado ciudades, se los ha aprovechado para desarrollar agricultura, ganadería y otras actividades importantes para el desarrollo del ser humano. Sin embargo, en su relación con las ciudades, los ríos siempre han sido los dominantes, ya que “el río puede vivir sin la ciudad, pero la ciudad no puede vivir sin el río” (Rocha, 2011, pp. 5). Debido a esta dependencia de parte de las ciudades hacia los ríos, es necesario defendernos de la ocurrencia de posibles eventos extremos en los que se dañe la integridad de las personas y sus bienes. Para lo cual se utiliza la siguiente definición de una defensa ribereña. La Autoridad Autónoma Cuenca Hidrográfica Chira-Piura (AACHC) (2007) define las defensas ribereñas como.

Estructuras construidas para proteger de las crecidas máximas de los ríos las áreas aledañas a estos recursos de agua durante la crecida. El caudal en un recurso de agua aumenta en tales proporciones que el lecho del río puede resultar insuficiente para contenerlo, implica por lo tanto que la protección no es contra un acontecimiento regular sino extraordinario (p.66).

En esta investigación se comparan los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto, estos recubrimientos se utilizan como revestimiento superficial de la cara mojada de diques de tierra, no cumplen la función de impermeabilizar, sino de proteger las márgenes contra la erosión de tal manera que los diques no fallen y se produzca una inundación (Suarez, 2001). La comparación que se realiza entre estas estructuras es en base a tres variables: la resistencia a la erosión y durabilidad, la rugosidad de la superficie y la estabilidad del sistema de protección. Luego de definir los criterios generales de dimensionamiento de ambos recubrimiento, se utiliza el caso del proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla (Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes, 2015) como un ejemplo de diseño, en el cual se aplican los criterios mencionados. Finalmente, se compara las

especificaciones de cada estructura según las variables definidas en base a lo propuesto por los criterios de dimensionamiento, los resultados obtenidos en otras investigaciones y los datos recopilados de diversos casos de estudio alrededor del mundo.

1.1 Antecedentes

Los diques que se construyen como defensas ribereñas son medidas estructurales de mitigación ante los daños potenciales que pueden producir las inundaciones (Jasen, van Bendegon, van den Berg, de Vries y Zanen, 1979). Para proteger estos diques contra los efectos de la erosión del flujo del canal, se utilizan revestimientos de diversos materiales y características. Según Pilarczyk (2004) los revestimientos en base a rocas, bloques y asfalto son comunes en las obras de ingeniería, debido a lo cual, los conocimientos de diseño y los criterios necesarios para su correcto funcionamiento se han difundido ampliamente. Sin embargo, afirma que el uso de otro tipo de revestimientos como los gaviones, matrices de concreto y geosintéticos, en muchos casos carecen de metodologías de diseño establecidas de manera adecuada debido a su uso relativamente reciente.

Así mismo, es básico reconocer la importancia de los revestimientos contra la erosión en las obras ribereñas, debido a que la erosión o socavación es la principal causa de falla de estas obras, así por ejemplo aproximadamente el 60 % de las estructuras, como los puentes, fallan por falta de una adecuada protección contra la erosión (Rocha, 2014). Por otro lado, la construcción masiva de estructuras de defensa contra inundaciones en base a rellenos de piedra ha depredado este recurso en el norte del país (Otiniano, Grimaldo y Cardozo, 2012). Es por esto que ante la necesidad de una nueva opción de revestimiento de las defensas, se plantea el uso de las geoceldas con relleno de concreto.

1.2 Objetivos

Objetivos Generales del proyecto de investigación:

- Identificar las variables técnicas que permitan comparar el comportamiento de los sistemas de revestimiento contra la erosión de colchones de gaviones y de geoceldas con relleno de concreto en el proyecto de defensa ribereña del río Zarumilla.
- Comparar los resultados del análisis de las variables técnicas definidas y establecer, en base a esta comparación, el revestimiento contra la erosión más adecuado para el proyecto de defensas ribereñas en el río Zarumilla.

Objetivos Específicos del proyecto de investigación:

- Establecer mediante la recopilación de información el marco teórico que defina ambas estructuras.
- Recopilar los criterios de dimensionamiento de estructuras de revestimiento de colchones de gaviones y de geoceldas con relleno de concreto para la defensa contra la erosión ribereña.
- Identificar, mediante la información recopilada, las variables que permitan una comparación objetiva entre ambas estructuras.
- Calcular las dimensiones de ambos tipos de revestimiento para una sección predeterminada del río Zarumilla del proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes.
- Comparar los resultados del análisis para definir el recubrimiento que sea más adecuado en el proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla.

1.3 Alcances de la investigación

El alcance de esta investigación es el de comparar los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto como recubrimientos contra la erosión de sistemas estructurales que sirven para la defensa contra inundaciones ribereñas. Las variables técnicas definidas en el marco teórico para la comparación son las siguientes: la resistencia a la erosión y durabilidad, la rugosidad de la superficie y la estabilidad del sistema de protección. No se recurrirá a una comparación económica del uso de los revestimientos, debido a que el enfoque será únicamente de variables técnicas. Adicionalmente, se establecen las definiciones de los revestimientos y sus componentes, del mismo modo, se determinan los criterios generales de dimensionamiento. Esta investigación utiliza, para comparar los revestimientos en cuestión, una sección de los diques diseñados en el proyecto de construcción de defensas ribereñas en el río Zarumilla, los cuales fueron parte del Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (Ecuador-Perú). La comparación de estas variables se realiza mediante un análisis cuantitativo en el marco de las condiciones establecidas por el proyecto de construcción de defensas ribereñas en el río Zarumilla, recopilación de datos estadísticos de investigaciones y casos de estudio a nivel mundial.

1.4 Justificación de la investigación

El motivo de esta investigación es el de comparar dos revestimientos contra la erosión ribereña, para lo que se va a determinar variables de comparación más allá del aspecto económico y que sustenten la toma de decisiones. Por un lado, se tiene que los colchones de gaviones han sido utilizados en numerosos proyectos en el Perú, mientras que las geoceldas con relleno de concreto son una alternativa que funciona con un mecanismo diferente al de los colchones (Otiniano y otros, 2012). Adicionalmente, cada vez se hace más necesario el uso de alternativas distintas a los gaviones rellenos de piedra, debido a la explotación excesiva de las canteras de piedra para la construcción de defensas contra inundaciones (Otiniano y

otros, 2012). Este proyecto aporta con la difusión y el entendimiento de una metodología de comparación entre recubrimientos para la protección contra las inundaciones en el norte del país.

1.5 Delimitación de la investigación

El estudio se enfoca en el marco del proyecto de Defensas Ribereñas del Río Zarumilla-Tumbes, el cual se dio a cabo desde el año 2000 hasta 2010 con el fin de comparar las dos estructuras de revestimiento definidas, de manera complementaria se utilizará datos de investigaciones anteriores y de la recopilación de experiencias de otros proyectos. No se efectúa una comparación económica debido a que este análisis distorsiona la interacción de las variables elegidas para la comparación. Además, el dimensionamiento de los revestimientos se realizará para una sección crítica del análisis hidráulico. Por otro lado, los criterios de dimensionamiento definidos, solo son parte de los criterios generales a tomar en cuenta en un proyecto específico, ya que es necesario se realice en cada caso un análisis local de las condiciones determinantes de cada proyecto.

1.6 Limitaciones de la investigación

Al realizar la investigación se tuvo diversas limitaciones, entre estas, la principal fue que la información que se compartió durante el proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla fue difícil de recopilar debido a que pertenece a diferentes empresas. Así mismo, debido a que entre los primeros análisis del proyecto de defensas ribereñas y la ejecución de este pasó mucho tiempo (del 2000 al 2010), fue complicado que se pueda consultar con las fuentes primarias de información. Por otro lado, la información pública disponible no es muy abundante respecto a proyectos en los que se ha utilizado geoceldas, esto se debe a que son productos con patentes protegidas por empresas. Otra limitación es el no haberse podido realizar una comparación mediante modelos físicos debido a restricciones económicas. Esta investigación es aplicable solo a proyectos que se definan

con las mismas condiciones y características que el establecido en esta investigación. Del mismo modo, es válido para la región geográfica analizada y tendrá vigencia temporal definida por el desarrollo tecnológico.

1.7 Metodología de investigación

El enfoque de este proyecto de tesis es cuantitativo; es decir, se basa en una realidad contextualizada y compara datos de medición numérica, sigue un proceso no experimental y los resultados se basan en datos estadísticos medidos en investigaciones anteriores. El alcance es explicativo, se busca recopilar información para sustentar y comparar las variables establecidas. En ese sentido, se usan variables cuantitativas. La población en la que se realiza el análisis corresponde únicamente al caso del proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla y lo establecido por la recopilación del marco teórico. Los instrumentos utilizados fueron la revisión de bibliografía en libros, artículos de investigación, bases de datos, expedientes técnicos, guías de diseño, catálogos de productos y fuentes de primer orden. Las etapas que se siguieron en el proyecto son las siguientes: Preparación del proyecto, revisión de la literatura y el marco teórico, formulación de la metodología, ejecución del análisis y redacción del informe. A continuación, en el marco teórico se tiene las definiciones y criterios de dimensionamiento de ambos revestimientos, luego, se definen las variables de comparación y su correlación con el desempeño de las estructuras estudiadas. Posteriormente, se presentan las condiciones del proyecto de defensas ribereñas en el río Zarumilla y se realiza el dimensionamiento en la sección propuesta. Luego, mediante las variables definidas se efectúa el análisis de los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones y línea futura de investigación futura.

2 Marco Teórico

2.1 Revestimientos contra la erosión en defensas ribereñas

El fenómeno de la erosión y los revestimientos

En términos generales se denomina erosión, socavación o degradación a la remoción que efectúa el flujo de agua de las partículas que constituyen el cauce, lo cual repercute en la profundización o expansión del lecho (Rocha, 2014). Sin embargo, los factores que determinan este fenómeno son muy complejos y no dependen únicamente de la interacción simple entre el flujo y el lecho, se puede mencionar que las variables generales que participan son las siguientes: las características geológicas, el tipo de suelo, la hidrología, la topografía de la zona de análisis, las variables hidráulicas, los sedimentos del flujo y las alteraciones de origen antrópico (Suarez, 2001).

Por otra parte, se debe tener en cuenta que las inundaciones no solo implican la crecidas del flujo de agua de los ríos, también se produce un aumento en la carga de sedimentos y otros materiales que se transportan por medio del flujo, por lo que, debido a estos factores, se incrementa el potencial erosivo sobre las márgenes (Chen, Zhao, Mo y Mi, 2014).

Se considera que la erosión inicia con el desprendimiento de las partículas en el perímetro del cauce por acción de la fuerza tractiva (t_a) cuando esta es mayor que la fuerza tractiva crítica (t_c) de los sedimentos del lecho (Chow, 1994). Mientras que los revestimientos son estructuras de refuerzo que se utilizan para proteger la base, sobre la que se apoyan, de los esfuerzo tractivos producidos por el fluido circulante. De manera general, se puede definir un revestimiento por la composición de los siguientes elementos: armadura o manto superficial de protección, filtro o base protectora contra la erosión debajo de la armadura, protección contra la socavación en el pie del talud revestido y protección o anclaje del revestimiento en la cresta del revestimiento (Suarez, 2001).

A continuación, se define ambas estructuras de revestimiento, así mismo, se presenta la recopilación de los criterios de dimensionamiento que se utilizan para el diseño de estas estructuras.

2.2 Colchones de gaviones

En líneas generales “una estructura de gaviones es una combinación de mallas de cable y rocas de relleno” (Neermal, 2012, pp. 37). De este tipo de estructuras existen diversas patentes; es decir, cada fabricante y proveedor puede manejar definiciones y criterios particulares para sus productos. Sin embargo, se pueden generalizar muchas características.

Según Neermal (2012) las características de las estructuras de gaviones son las siguientes:

- **Monolitismo:** Debido a la facilidad de unión de los elementos que forman la estructura, esta puede responder a la incidencia de fuerzas en tres dimensiones.
- **Flexibilidad:** La alta resistencia de la malla de cables permite que los elementos se deformen. Dentro de los límites aceptables de deformación, la flexibilidad le otorga a las estructuras de gaviones la capacidad de resistir condiciones en las que estructuras más rígidas colapsarían.
- **Permeabilidad:** Los vacíos presentes en el relleno de la estructura permiten el flujo de líquidos a través de esta. Debido a esto, la presión hidráulica de los fluidos no afectan su comportamiento.
- **Durabilidad:** Las capas de elementos anticorrosivos como GalFan o el recubrimiento de PVC permiten que la malla resista condiciones bastante severas de exposición ante agentes corrosivos. Además, la ruptura de una sección del cable no necesariamente implica el colapso del elemento gracias al efecto de la torsión del mallado.

- Versatilidad: Los gaviones pueden ser construidos bajo diversas condiciones ambientales, en temporadas secas o de lluvias y con temperaturas extremas. Además, pueden ser construidos por personal sin gran especialización y se puede utilizar como relleno sacos con arena, bloques de concreto, ladrillos y otros.
- Integración con el medio ambiente: La capacidad de permeabilidad y la naturaleza del relleno de piedras permite que las estructuras de gaviones se integren al medio ambiente, mediante la aparición de vegetación y partículas de suelo, con el paso del tiempo o mediante tratamientos especiales.

Los gaviones han sido utilizados a lo largo del tiempo en las siguientes aplicaciones: Construcción de diques, espigones, vertederos, encauzamiento de ríos, muros de contención, revestimiento de canales, en diversos tipos de defensas ribereñas y muros ornamentales (Bianchini Ingeniero S.A., 2015). Esta investigación hace referencia solo del uso de gaviones como parte de un revestimiento de canal de un sistema de defensa ribereña.

Los tipos de gaviones según las dimensiones y características de la malla que forma la caja es la siguiente:

- Tipo caja: Las cajas forman paralelepípedos que típicamente se caracterizan por tener áreas en la base de 1 m^2 y alturas de 0,50 a 1 m. La separación interna de las cajas en elementos se hace mediante diafragmas espaciados cada metro, de esta manera, se facilita el montaje, relleno y la flexibilidad de los elementos. Son elementos muy versátiles que utilizan en prácticamente todas las aplicaciones de uso de gaviones mencionadas. La malla está conformada por acero de bajo contenido de carbono, revestido con aleación GalFan, además, se puede utilizar un revestimiento plastificado adicional contra exposiciones severas de corrosión (Maccaferri, 2008). La Figura 2-1 muestra el dibujo de un gavión tipo caja.

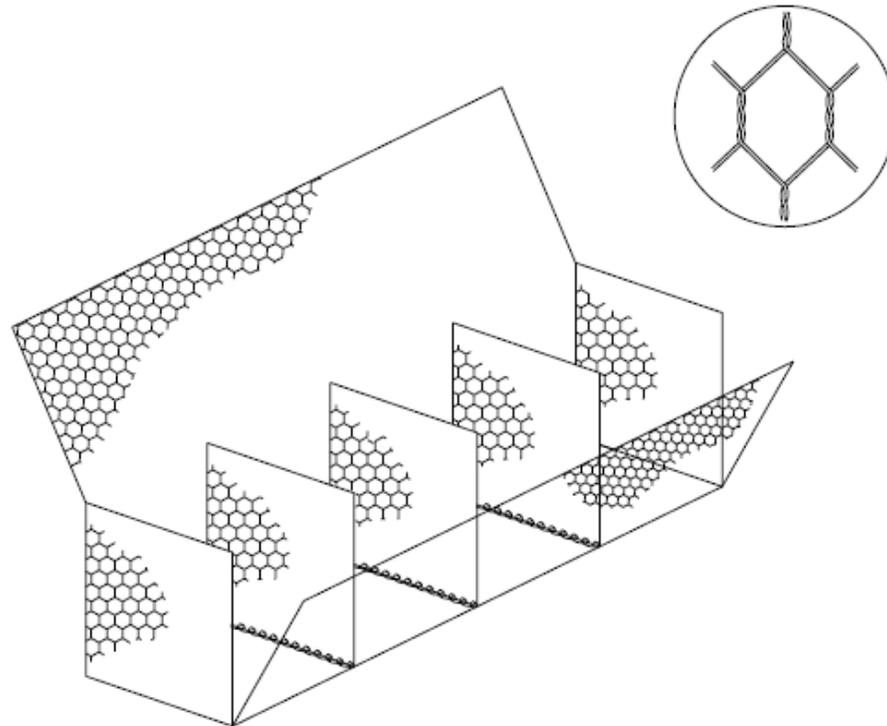


Figura 2-1: Gavión tipo caja (Maccaferri, 2008).

- Tipo Saco: Son gaviones constituidos por un solo paño de malla y un alambre grueso que se pasa de manera alternada por la malla para ser sellado. Las dimensiones estandarizadas de este tipo de gavión varían de 2 a 5 metros de largo y el diámetro de alrededor de 0,65 m. Este gavión está diseñado para ser rápidamente llenado e izado con maquinaria para su montaje. Se utiliza para conformar estructuras en obras de emergencia o donde no hay fácil acceso. La malla está conformada por acero de bajo contenido de carbono, revestido con aleación GalFan, además, se puede utilizar un revestimiento plastificado adicional contra exposiciones severas de corrosión (Maccaferri, 2008). La Figura 2-2 muestra un gavión tipo saco.



Figura 2-2: Gavión tipo saco (Maccaferri, 2008).

- Tipo Colchón: El gavión tipo colchón es el utilizado en estructuras de recubrimiento para protección contra la erosión en ríos y para estructuras de disipación. Estos gaviones se caracterizan por tener espesores de 17 a 30 cm, ancho de 2 metros y largos de 3-6 m. Además, se suele utilizar de 3 a 5 diafragmas dependiendo de las características de la estructura y el proyecto. La malla está conformada por acero de bajo contenido de carbono, revestido con aleación GalFan, además, se puede utilizar un revestimiento plastificado adicional contra exposiciones severas de corrosión (Maccaferri, 2008). La figura 2-3 muestra el dibujo de un gavión tipo colchón.

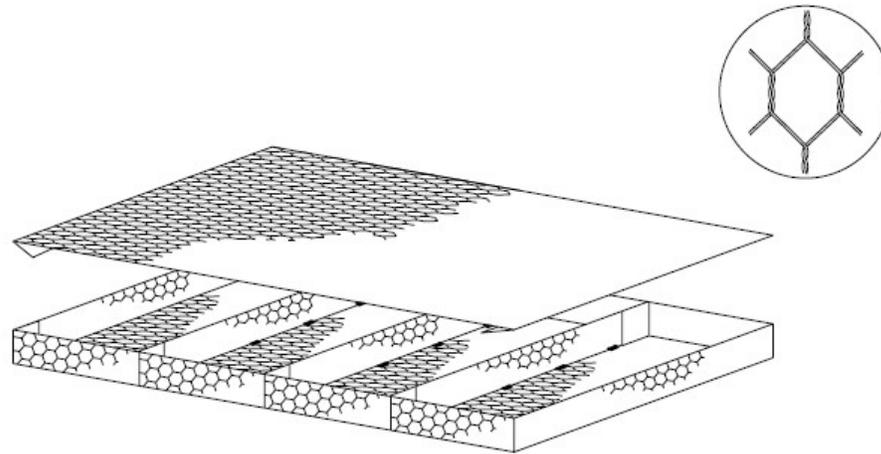


Figura 2-3: Gavión tipo colchón (Maccaferri, 2008).

Los colchones son estructuras que se utilizan principalmente para el control de erosión del lecho, contención de inundaciones y construcción de estructuras de disipación de energía. En la Figura 2-4 se puede apreciar mejor este tipo de gavión, se muestra el detalle de la caja de malla que conforma un gavión tipo colchón.

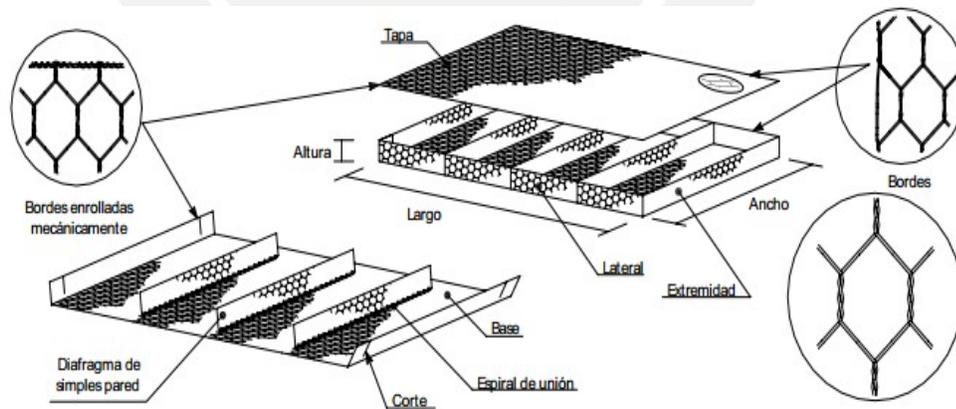


Figura 2-4: Gavión tipo colchón (Maccaferri, 2010).

La Figura 2-5 muestra el revestimiento de cauce mediante colchones. Esta vista permite apreciar la disposición de las cajas y división de estas con los diafragmas. En la Figura 2-6 y la Figura 2-7 se observa revestimientos de

colchones de gaviones en las márgenes de los ríos Ica y Zarumilla respectivamente.

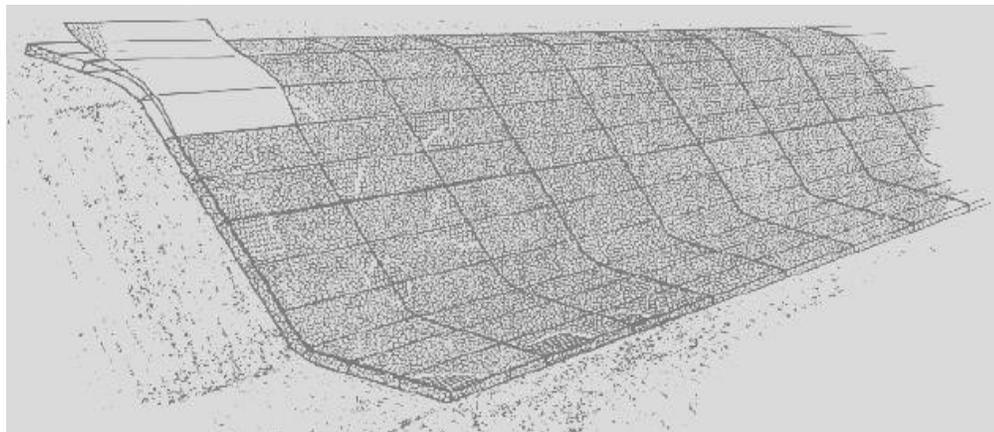


Figura 2-5: Revestimiento de cauce mediante colchones (Bianchini Ingeniero, 2015).



Figura 2-6: Revestimiento de cauce del río Ica mediante colchones de gaviones (TDM, 2015).



Figura 2-7: Revestimiento de cauce del río Zarumilla mediante colchones de gaviones (TDM, 2015).

Debido a que en esta investigación es importante definir y conocer los criterios de dimensionamiento de las estructuras de revestimiento. A continuación, se presenta el procedimiento de dimensionamiento de gaviones, el cual se basa en la guía de diseño presentada en “Introducción a los proyectos de defensa ribereña” de Campaña del Toro (2014) que fue realizada para el Instituto Nacional de Recursos Naturales del Ministerio de Agricultura y la guía de diseño de colchones de gaviones de la empresa Maccaferri (2015).

2.2.1 Predimensionamiento de gaviones tipo colchón

El predimensionamiento inicia con los valores de velocidad, fuerzas tractivas actuantes y la profundidad de socavación obtenidos mediante los resultados del análisis de la modelación del régimen de flujo en el cauce, el cual puede realizarse mediante la simulación de modelos numéricos computarizados. Independientemente del tipo de modelo que se utilice, para

iniciar el procedimiento de dimensionamiento de colchones de gaviones se utiliza un valor de la velocidad actuante del flujo según las especificaciones de cada proyecto, llamada también velocidad de diseño, para seleccionar valores iniciales de las dimensiones de la caja de mallas y del material de relleno.

La Tabla 2-1 muestra rangos del espesor del colchón a utilizar, además, los valores para definir las dimensiones aceptables de los diámetros del material de relleno que se utilizarían en la estructura. Para definir este rango, se debe tener como valor inicial la velocidad máxima actuante que se obtuvo como uno de los resultados del análisis hidráulico. Según Campaña del Toro (2014), se define velocidad crítica como: velocidad que puede soportar sin inicio de movimiento de piedras en el colchón. Además, la velocidad límite: velocidad que puede soportarse admitiendo modesta deformaciones debido al movimiento de piedras en el colchón. El valor de la velocidad de diseño seleccionada de los análisis hidráulicos debe estar entre los valores de la velocidad crítica y velocidad límite mostrados en la Tabla 2-1 para cumplir que no existirá arrastre de los elementos del revestimiento.

Tabla 2-1: Espesor de colchones y diámetro de material de relleno (Campaña del Toro, 2014).

Tipo	Velocidad crítica m/s	Velocidad límite m/s	Espesor m	Piedras de Relleno	
				Dimensiones mm	d50
Colchones Reno	3,5	4,2	0,17	70 a 100	0,085
	4,2	4,5		70 a 150	0,110
	3,6	5,5	0,23 -	70 a 100	0,085
	4,5	6,1	0,25	70 a 150	0,120
	4,2	5,5	0,30	70 a 120	0,100
	5,0	6,4		100 a 150	0,125
Gaviones	5,8	7,6	0,50	100 a 200	0,150
	6,4	8,0		120 a 250	0,190

d50: diámetro medio de las piedras del relleno.

Con el espesor seleccionado de la Tabla 2-1 se procede a seleccionar las siguientes dimensiones del colchón: alto, largo, ancho, número de diafragmas, volumen y el peso por pieza de malla de colchón en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Dimensiones y pesos aproximados de las piezas de colchones de gaviones (Maccaferri, 2015).

Así mismo, según Simons y otros (1984) en el caso de los colchones de gaviones se puede utilizar la Ecuación 2.1 para el cálculo del coeficiente n de Manning, esta ecuación fue propuesta por Meyer-Peter y Müller para obtener el valor teórico de la rugosidad superficial en cauces compuestos por suelos granulares.

Ecuación de la rugosidad superficial en cauces con revestimiento de colchones de gaviones.

2.2.2 Verificación del arrastre de colchones por velocidad

Para verificar el arrastre de los colchones por velocidades, en esta segunda parte del proceso se utiliza la ecuación del número de Froude (Ecuación 2.2) y el diámetro medio (d_{50}) de las piedras de relleno estimado en la Tabla 2-1 para obtener el valor de la velocidad crítica (V_c) en el gráfico de la Figura 2-8. El número de Froude representa la relación entre las fuerzas inerciales del flujo y las fuerzas gravitacionales (Chow, 1994).

El número de Froude se calcula mediante la siguiente ecuación (Chow, 1994):



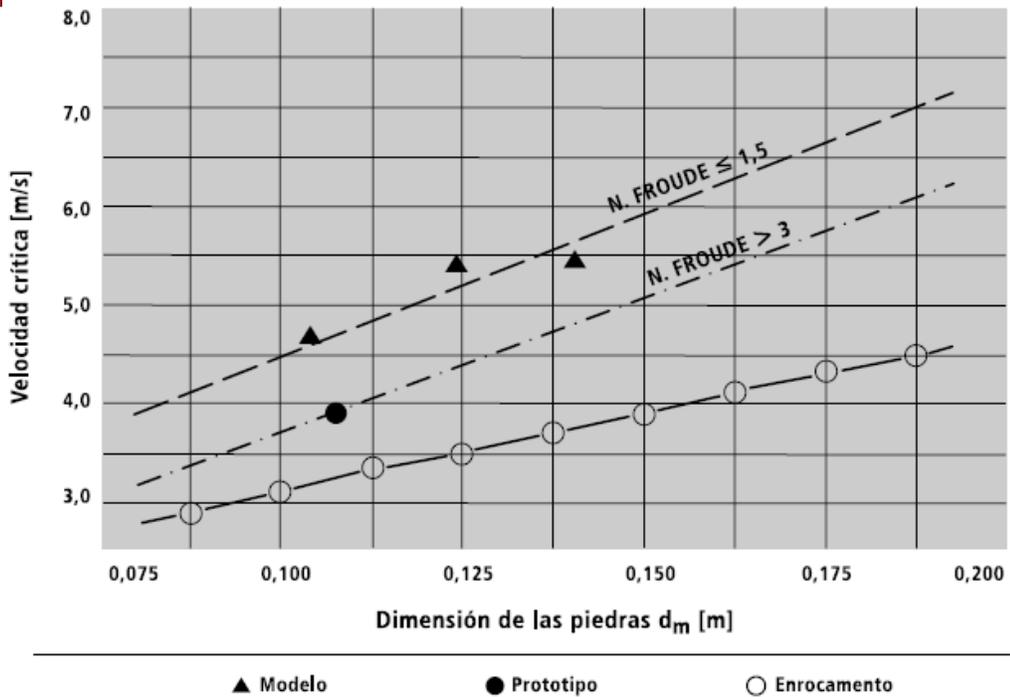


Figura 2-8: Velocidad crítica (V_c) que causa el movimiento de las partículas en función de su tamaño (Maccaferri, 2015).

Luego de obtener el valor de la velocidad crítica, este debe ser comparado respecto a la velocidad de diseño (V). Si la velocidad crítica (V_c) es menor que la velocidad de diseño (V), se producirá arrastre de colchones, entonces es necesario aumentar el espesor del colchón y realizar la comprobación nuevamente (Campaña del Toro, 2014).

2.2.3 Verificación del arrastre del material de los colchones

Para realizar esta verificación, se calcula el esfuerzo de arrastre actuante (t_a) y el esfuerzo arrastre crítico (t_c) que soporta el material, luego se compara ambos valores con la espera de que se cumpla que t_c sea mayor que t_a . Este cálculo y comparación debe realizarse tanto para el fondo como para las márgenes (Maccaferri, 2015).

A) Determinación de esfuerzos arrastre actuantes.

La condición crítica del arrastre de las piedras “se define como ‘primer movimiento’ e individualiza el punto crítico para la estabilidad del revestimiento” (Maccaferri, 2015). Para esto es necesario calcular la fuerza tractiva por unidad de área o esfuerzo arrastre de la sección (Ecuación 2.3), la cual se define como “el empuje del agua sobre el área mojada” (Chow, 1994). Este cálculo debe hacerse tanto para el fondo como para las márgenes. El valor de la fuerza tractiva también puede ser obtenido como resultado de un análisis de modelamiento hidráulico.

El esfuerzo de arrastre actuante en el fondo se calcula mediante la siguiente ecuación (Chow, 1994):

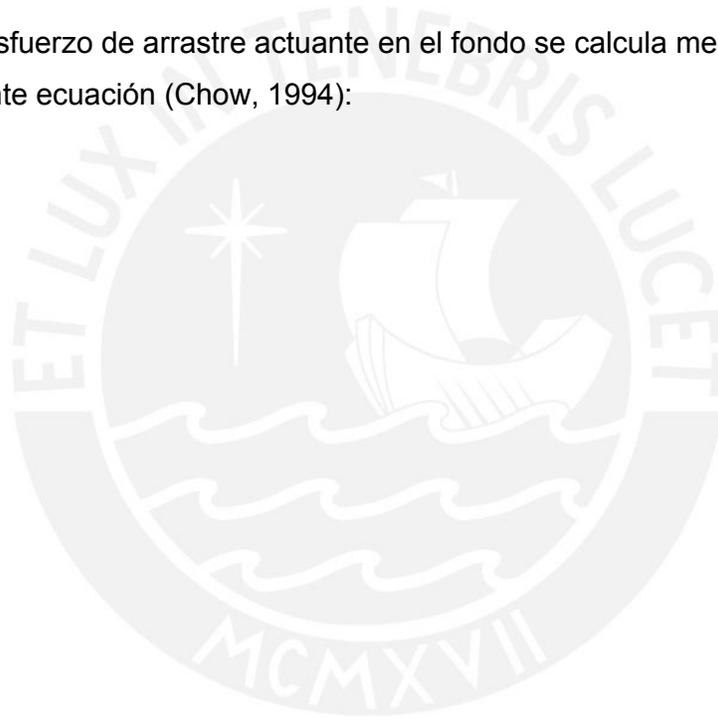


Figura 2-9: Distribución de fuerza tractiva en una sección trapezoidal del canal (Chow, 1994).

De la Figura 2-9 se considera que el esfuerzo máximo actuante en la margen (τ_{am}) del cauce es equivalente a $0,75 \cdot \tau_{a0}$. Una vez que se define la fuerza arrastre por unidad de área, se debe definir el esfuerzo cortante crítico.

A) Determinación de esfuerzos cortantes críticos.

El esfuerzo de arrastre crítico (Ecuación 2.4) es la tensión tangente permitida en la situación crítica de movimiento.

El esfuerzo de arrastre crítico en el fondo mediante el parámetro de Shields se calcula mediante la siguiente ecuación (Simons, Chen y Swenson, 1984):

γ_s : Peso específico de la piedra del colchón (kg/m^3).

γ_w : Peso específico del agua (kg/m^3).

d_m o d_{50} : Diámetro medio de la piedra del colchón (m).

Para el cálculo del esfuerzo de arrastre crítico en las márgenes (t_{cm}), se utiliza la Ecuación 2.4 y se multiplica este resultado con el obtenido de la Ecuación 2.5. Esta ecuación sirve para calcular una relación teórica entre los esfuerzos del fondo y las márgenes (Chow, 1994).



cumplirse la resistencia a los esfuerzos actuantes, el recubrimiento debe ser aumentado en espesor para cubrir este déficit.

2.2.4 Verificación de deformaciones

La verificación de las deformaciones en los colchones se realiza para analizar la condición del recubrimiento una vez superado el primer movimiento (Maccaferri, 2015). La Figura 2-10 muestra el esquema de deformación de la malla debido al movimiento de las piedras dentro de los colchones, y compara la situación inicial de la malla y el relleno con la situación mínima de funcionamiento del sistema, la cual corresponde a la menor presencia aceptable de material de relleno dentro de los colchones. En primer lugar debe determinarse el coeficiente de Shields. Luego, se realiza el cálculo de la deformación del colchón para realizar la verificación.

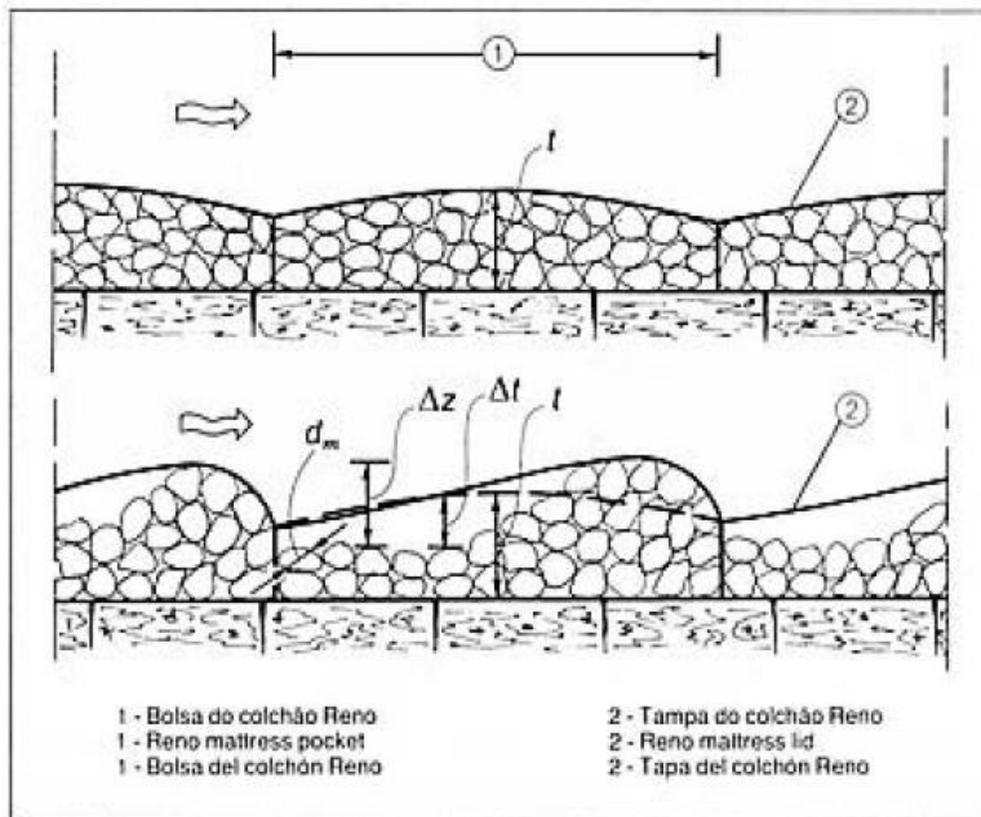


Figura 2-10: Esquema del movimiento de piedras al interior de los colchones (Maccaferri, 2015).

Para que la protección sea eficaz tiene que cumplirse la condición de la Ecuación 2.6 (Simons y otros, 1984):



B) Cálculo de la deformación del colchón.

La deformación del colchón se halla mediante la relación de la gráfica de la Figura 2-11. Se utiliza el coeficiente de Shields calculado con la Ecuación 2.8 y se encuentra la relación $\Delta z/dm$, la cual sirve para calcular Δt mediante Δz con la Ecuación 2.7 (Maccaferri, 2015).



Figura 2-11: Relación entre el parámetro de deformación y el coeficiente eficaz de Shields (Maccaferri, 2015).

C) Verificación.

La verificación de una correcta función del recubrimiento ante la deformación se realiza mediante la Ecuación 2.9 (Simons y otros, 1984):

Donde E_{min} (recubrimiento mínimo) debe ser mayor que d_m (Ecuación 2.6), para que las deformaciones del colchón sigan manteniendo las condiciones mínimas de funcionamiento del relleno como recubrimiento contra la erosión de la base y el talud de las márgenes revestidas (Maccaferri, 2015). Este proceso debe repetirse para verificar los valores de las márgenes.

2.2.5 Verificación de erosión entre el colchón y el material base

Los colchones deben proteger la base de la erosión de la corriente, para esto se debe verificar esta condición mediante el cálculo de la velocidad actuante sobre la base del cauce y la velocidad que esta resiste.

A) Determinación de la velocidad del agua en el espacio entre el colchón y el material base.

La siguiente ecuación se utiliza para calcular la velocidad del agua entre el colchón y el fondo. Debido a que los colchones no son impermeables existe un flujo de agua que va a incidir directamente en el material base (ver Figura 2-12), la velocidad de este flujo se relaciona con la erosión del fondo (Maccaferri, 2015).

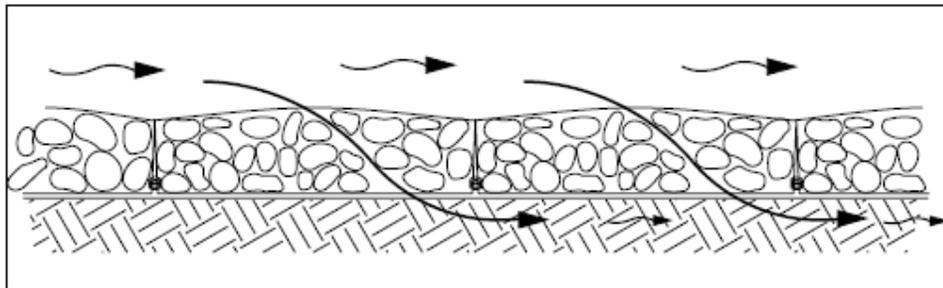


Figura 2-12: Velocidad del agua entre el colchón y el fondo (Maccaferri, 2015).

La velocidad del agua entre el colchón y el fondo se calcula mediante la siguiente ecuación (Maccaferri, 2015):



dm: Diámetro medio de partículas del suelo base (m).

Por otro lado, en el caso de los suelos cohesivos se utiliza el gráfico de la Figura 2-13, en el cual mediante el porcentaje de vacíos y el nivel de compactación del suelo se halla la velocidad que resiste el suelo sin ser erosionado.

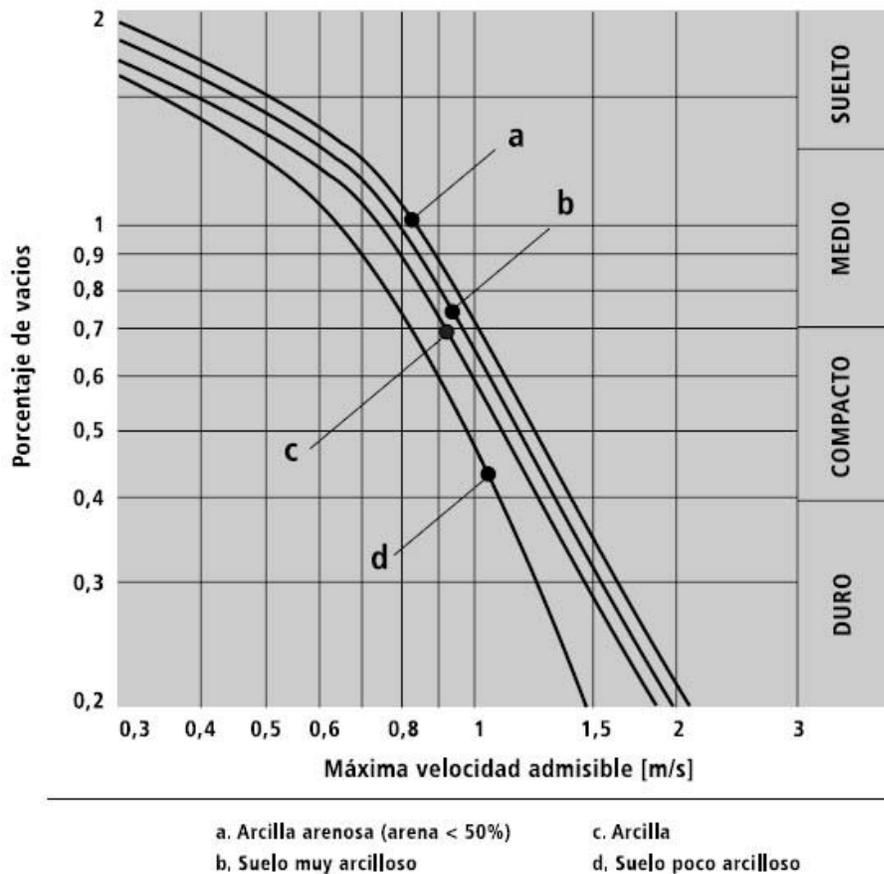


Figura 2-13: Velocidades máximas permisibles en suelos cohesivos (Maccaferri, 2015).

C) Verificación.

Luego de haber calculado la velocidad del agua entre los colchones y el fondo (V_a) y velocidad que soporta el suelo sin ser erosionado (V_e), se

procede a comparar los resultados obtenidos, bajo la condición de que V_a no sea mayor a V_e . El uso de filtros de geotextil o de grava cambia el valor de estas variables, y deben considerarse en el proceso del diseño. Se considera que el uso de geotextiles puede reducir la velocidad del agua entre el geotextil y el suelo base entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del valor de V_a (Maccaferri, 2015).

2.2.6 Protección del pie de talud

El diseño de la protección del pie de talud depende de los resultados de la profundidad de erosión calculados. Se va a considerar dos tipos de protección según el nivel de la erosión. La Figura 2-14 muestra el método de protección para profundidades de erosión menores a 1,5 metros, en el cual se debe profundizar hasta Δz . La variable Δz corresponde al valor de la erosión según los cálculos y estudios realizados en cada proyecto de protección ribereña, el cual también puede obtenerse de modelos numéricos (Campaña del Toro, 2014).

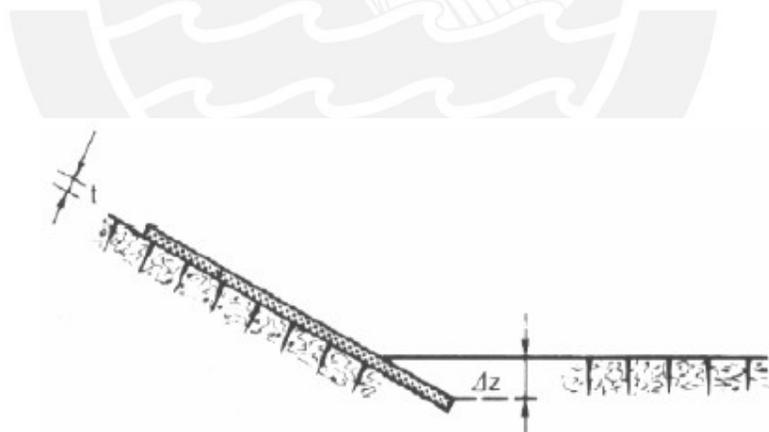


Figura 2-14: Protección de pie de talud para profundidades pequeñas de erosión (Campaña del Toro, 2014).

Ecuación para calcular la extensión del colchón para la protección del pie del talud:



Donde:

Δx : Longitud de extensión del colchón bajo el lecho (m).

Δz : Profundidad de erosión del cauce (m).

2.3 Geoceldas con relleno de concreto

Las geoceldas son geosintéticos utilizados para mejorar las condiciones del suelo, originalmente fueron desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés) (Webster, Alford, 1977). Consisten en celdas formadas mediante tiras laminares de Polietileno de alta densidad (HDPE) o Polietileno (PE) unidas mediante soldadura ultrasónica en los anchos de las tiras (Chen, Chiu, 2007). La Figura 2-16 muestra la vista de las tiras sintéticas que forman las celdas. Existen diversas concepciones del sistema de geoceldas, esto se debe a la numerosa cantidad de patentes que existen en el mercado y la forma en la que estas son aplicadas para solucionar problemas ingenieriles particulares.

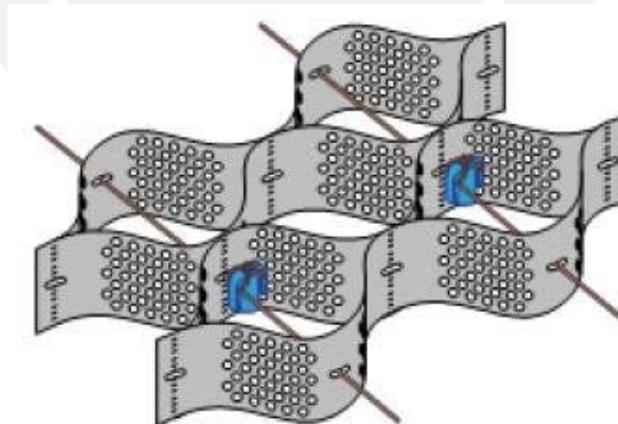


Figura 2-16: GeoWeb, sistema de confinamiento celular (Colorado State University, sf).

Este proyecto trabaja en base a las definiciones y características recopiladas de investigaciones universitarias, así como las realizadas por algunas empresas que han patentado tipos de sistemas de geoceldas.

En la Figura 2-17 se presenta un esquema general de geoceldas aplicadas a una estructura de recubrimiento de canales. La parte superior de esta imagen refiere a una vista en planta y la parte inferior a una sección transversal, además, se muestran los elementos que forman parte del sistema total.

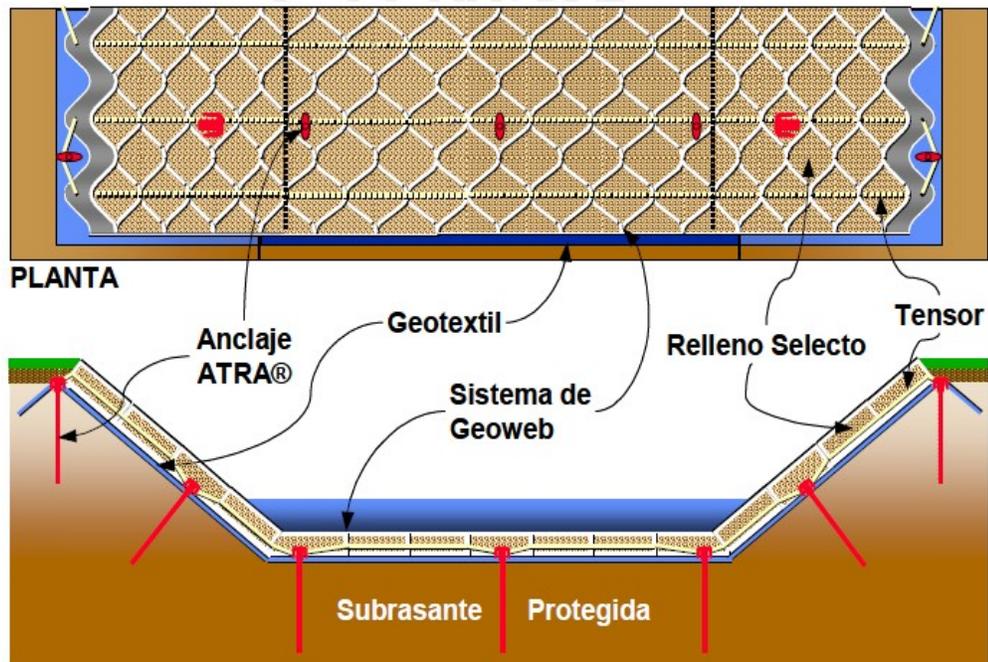


Figura 2-17: GeoWeb, componentes del sistema (Presto, 2000).

Los componentes y la distribución de estos dependen del uso que se dé a las geoceldas. Como se ha mencionado, inicialmente se utilizaban con la finalidad de otorgar una mayor capacidad portante a los suelos; sin embargo, con el paso del tiempo y el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación se ha diversificado el uso de estas en la ingeniería civil (Presto, 2000). Este

proyecto solo se enfoca en el uso de geoceldas como parte de un sistema de revestimiento contra erosión ribereña.

A continuación se detallan los componentes que forman una estructura de geoceldas para el revestimiento de canales (Presto, 2000).

- La celda: Consiste en la unidad de confinamiento del relleno que utiliza el sistema. Este elemento de contención puede ser de diferentes áreas transversales, alturas y puede tener agujeros para la interconexión del relleno entre las celdas adyacentes (ver Figura 2-18 y 2-19). La altura que se escoge para las celdas determina el espesor del recubrimiento. En el talud se tiene en cuenta el ángulo de inclinación de este, así como el ángulo de reposo del material de relleno.



Figura 2-18: GeoWeb, sistema de confinamiento celular (Colorado State university, sf).

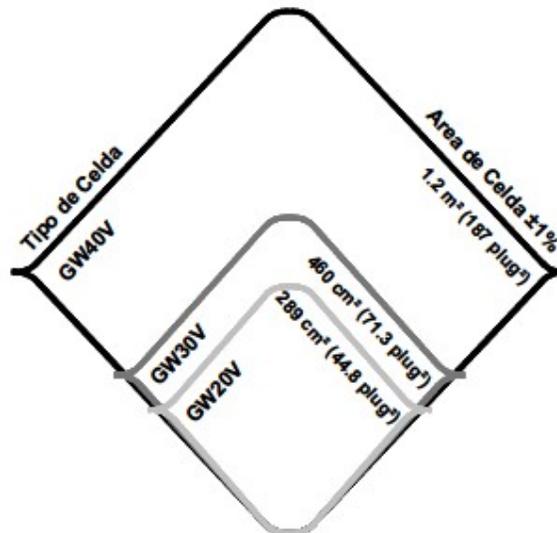


Figura 2-19: Dimensiones de las celdas GeoWeb (Presto, 2000).

- Material de relleno: Los materiales convencionales más utilizados para el relleno de las geoceldas son la capa vegetal (Figura 2-20), los agregados (Figura 2-21) y el concreto (Figura 2-22). Cada tipo de material aporta al sistema de recubrimiento características propias. En ese sentido, se debe tener en cuenta la resistencia a la erosión, el peso del sistema, la durabilidad, el mantenimiento requerido, la flexibilidad, las condiciones ambientales, etc. Esta tesis solo abarca el uso de geoceldas con relleno de concreto.

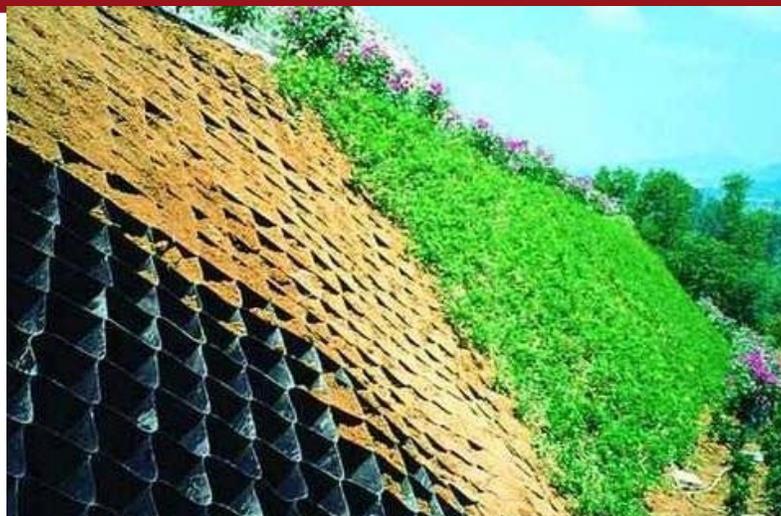


Figura 2-20: Geocell (Presto, 2015).



Figura 2-21: Relleno de agregados (TDM, 2015).



Figura 2-22: Relleno de concreto (TDM, 2015).

- **Tensores:** Distribuyen el peso del sistema a través de los elementos de anclaje intermedios. Además, sirven como conexión entre los anclajes extremos de base y coronación. Los tipos de tensor se diferencian por su resistencia mínima a la rotura. La Figura 2-23 muestra los tensores (se ven como tiras de color blanco).



Figura 2-23: Tensores (TDM, 2015).

- **Anclajes de terreno:** Son elementos que brindan estabilidad al sistema. Se puede utilizar diferentes tipos de anclajes, desde estacas

de acero corrugado hasta anclajes patentados. El uso de anclajes intermedios no solo permiten una mejor distribución de los pesos, del mismo modo, son importantes para resistir las fuerzas de empuje hidrostático (ver Figura 2-24). Mientras que los anclajes de coronación soportan el peso total de las franjas transversales de geoceldas (ver Figura 2-25).

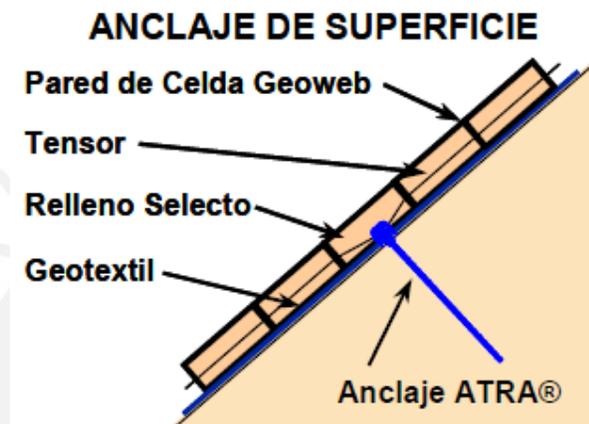


Figura 2-24: Anclaje de superficie ATRA (Presto, 2000).

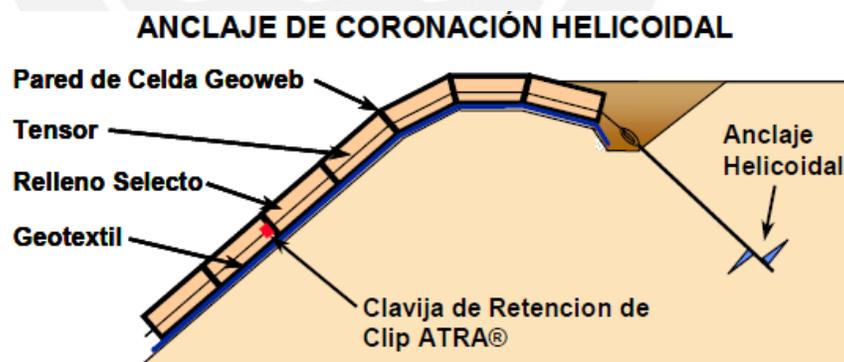


Figura 2-25: Anclaje de coronación Helicoidal (Presto, 2000).

- Subcapa de geotextiles: Para el diseño y selección de los geotextiles se utilizan los procedimientos convencionales. Este elemento actúa

como filtro de suelo y sistema de drenaje, se recomienda instalarlo no tejido y perforado por agujas (ver Figura 2-26).

Figura 2-26: Geoceldas sobre geotextil (TDM, 2015).

Los criterios de diseño de las geoceldas son muy diversos, no solo dependen del tipo de patente con el que se trabaja, sino, también de las condiciones de los proyectos juegan un papel sumamente importante. Es por esto, que la existencia de una guía de diseño estricta no puede ser posible en el caso de las geoceldas (Alfaro, 2015). Como resultado de esta particularidad los profesionales de ingeniería deben analizar en cada proyecto que solución es la más adecuada para este. Para fines de esta investigación se presenta una recopilación de criterios de dimensionamiento de geoceldas con relleno de concreto.

2.3.1 Criterios para la selección del material de relleno

El material de relleno que se utiliza en las geoceldas depende de las condiciones a las que será expuesto dicho material para un proyecto determinado (Geoproducts, 2011). En ese sentido, se debe tener en cuenta

los siguientes criterios recomendados para la selección del material de relleno basados en la tecnología Geoweb (Presto, 2000): Velocidades de flujo máximas, fuerzas de arrastre actuantes máximas, tiempo de exposición a las condiciones máximas, inclinación del talud y ángulo de fricción interna del material, factibilidad económica del uso del material.

A) Relleno con capa vegetal.

Se utiliza para revestir canales con flujos intermitentes y moderados, dado que de lo contrario, las fuerzas de arrastre de un flujo continuo pueden erosionar la protección de las raíces en el revestimiento. Se recomienda que la duración del flujo sea menor a 24 horas y con velocidades máximas de 6 m/s. Aunque en ciertas condiciones, puede soportar hasta velocidades promedio de 8 m/s.

B) Relleno con agregados.

El desempeño del relleno con agregados depende de la granulometría del material, la dimensión de las celdas y las condiciones de flujo en el canal. Fuerzas tractivas importantes pueden generar la falla de la estructura, por lo que estas variables deben ser determinadas adecuadamente. En ese sentido, flujos importantes de larga duración son perjudiciales para su integridad. Un rango de agregados con d_{50} de 14 a 150 mm, pueden resistir velocidades de entre 1,50 a 5,00 m/s.

C) Relleno de concreto.

El revestimiento con concreto proporciona una protección duradera, resistente y flexible gracias al sistema de confinamiento celular de las geoceldas. Este material de relleno se utiliza en condiciones de flujo de alta velocidad, duración prolongada, turbulentos o con choque hidrodinámico. Las velocidades promedio que soporta van de 6 a 8 m/s para la altura

mínima de geoceldas de 3”, mediante la combinación de más accesorios se puede superar este rango de velocidades. Así mismo, los diversos niveles de pulido de la superficie del concreto brinda valores de n en el rango de 0,012 a 0,04, según las herramientas con las que ha sido trabajada la superficie de concreto, ver Tabla 2-3 (Presto, 2000).

Tabla 2-3: Coeficientes de rugosidad tipo para revestimientos de Geoweb rellenos con concreto (Presto, 2000).

Acabado de la superficie del revestimiento de Geoweb relleno con concreto	Rango de los valores de n
Badilejo metálico liso	0,012-0,014
Espátula de madera	0,013-0,015
Cepillado	0,016-0,018
Rastrillado	0,020-0,022
Grava o roca parcialmente incrustada	0,030-0,040

2.3.2 Dimensionamiento de las geoceldas

Una vez seleccionado el material de relleno adecuado, la dimensión de las celdas debe ser determinada considerando la variación de las propiedades del sistema. En el caso de las geoceldas con relleno de concreto, aumentar la altura de las celdas va a incrementar la rigidez a la flexión y la resistencia del sistema al empuje (Presto, 2000). A lo largo del cauce de un río existen diferentes condiciones que pueden ocasionar que se utilicen espesores diferentes, esto puede darse por encontrar zonas con mayor potencial de socavación o debido al peligro de que la corriente arrastre materiales que dañen el revestimiento (Otiniano y otros, 2012). Así mismo, celdas de mayor área aumentan la estabilidad al posible movimiento de los elementos en la dirección perpendicular a su plano de apoyo (Pilarczyk, 2004). En la Figura 2-27 se muestra un gráfico basado en las velocidades máximas que puede soportar el revestimiento según el espesor.

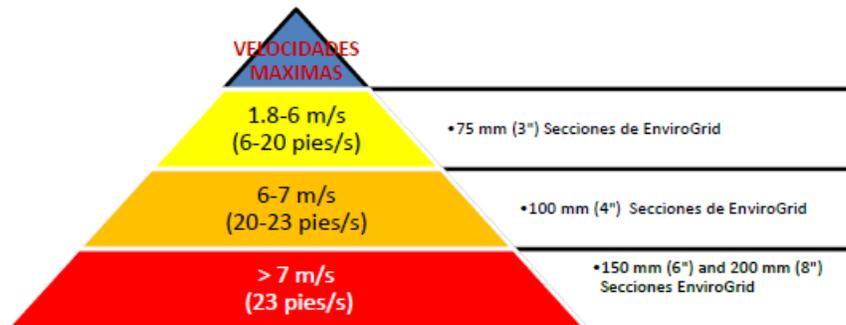


Figura 2-27: Altura de las geoceldas con relleno de concreto según las velocidades máximas promedio (Geoproducts, 2011).

Entonces las consideraciones que intervienen en la selección de las dimensiones del revestimiento son las siguientes:

- Inclinación del talud y ángulo de fricción interna del material.
- Las características hidrodinámicas del flujo.
- El uso de los elementos de resistencia de las cargas de gravedad y de arrastre de los elementos.
- Verificación del comportamiento de flexibilidad y estabilidad del sistema.

Mediante casos de estudio y recopilación de experiencias en campo, Presto (2000) ha determinado que para flujos con velocidades máximas promedio de 8 m/s e inclinaciones de talud mayores a 20° se utilicen geoceldas de 460 cm² (ver Figura 2-19).

2.3.3 Análisis de estabilidad para el cálculo de anclajes y tendones

Los anclajes y los tendones deben ser evaluados para las condiciones más desfavorables que afronta el sistema de geoceldas. Según Sengupta (2011) en el caso de los revestimientos de defensa ribereña esto se da para

la condición seca del cauce, al no estar presente el empuje del agua las fuerzas que inducen el deslizamiento en dirección de la sección transversal se consideran en toda su magnitud, por lo que esta debe ser analizada como una condición crítica del sistema de anclajes y tendones. La otra condición de estabilidad que se analiza es el arrastre en dirección de la corriente cuando el revestimiento está sumergido (Suarez, 2001).

Se utilizan diversos métodos de anclaje junto con los tendones para resistir las cargas de un sistema de geoceldas, la Figura 2-28 muestra los métodos más utilizados de anclaje.

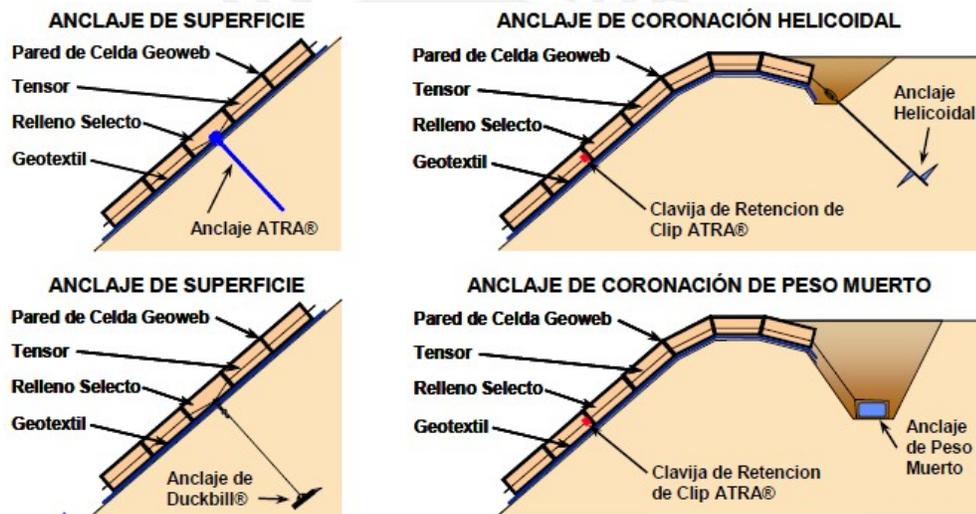


Figura 2-28: Tipos de anclajes a tierra (Presto, 2000).

A) Análisis de los esfuerzos en la dirección transversal del canal para la condición seca del revestimiento.

La condición seca del revestimiento es el caso en el que las fuerzas actuantes son más críticas debido a que no existe el empuje del agua (Sobhan, 2011). El análisis se realiza mediante la comparación de los esfuerzos que inducen y resisten el movimiento en la dirección transversal del talud. Los esfuerzos que inducen el deslizamiento en esta condición son

los producidos por el peso del revestimiento, calculados mediante la Ecuación 2.14.

Ecuación 2.14 de los esfuerzos producto de la fuerza de gravedad en condición seca (Presto, 2000).



γ_c : Peso específico del concreto (kg/m^3).

θ : Ángulo de inclinación del talud ($^\circ$).

ϕ : Ángulo de fricción entre las geoceldas y el relleno ($^\circ$).

Luego se define la Ecuación 2.16, en la que se analiza mediante el factor de seguridad la resistencia al movimiento, el cual puede variar de acuerdo al requerimiento de las condiciones de cada proyecto, y permite calcular el valor de la resistencia de las estacas (t_e) (Presto, 2000).



de arrastre actuante, se utiliza de la Ecuación 2.3 para calcular la fuerza de arrastre actuante.

Ecuación de la fuerza de arrastre por peso del revestimiento en condición sumergida (Chow, 1994):



Ecuación 2.19 de la fricción entre el revestimiento y la base sobre la que este se apoya en condición sumergida (Chow, 1994).



FS: Factor de seguridad.

t_e : Esfuerzo de resistencia de las estacas (Kg/m^2).

t_f : Esfuerzo de fricción en el fondo del canal (kg/m^2).

t_i : Esfuerzos que inducen el movimiento (Kg/m^2).

2.3.4 Anclajes de talud

Los anclajes de talud son utilizados para brindar un sistema de soporte y sujeción al revestimiento en taludes empinados mediante una cuadrícula uniforme sobre toda la capa de geoceldas. El tamaño, tipo de material y distribución de los anclajes varía de acuerdo con la geometría del talud, el subsuelo, el tipo de protección y las sobrecargas que puedan presentarse (Presto, 2000).

Ecuación 2.21 para calcular el empuje pasivo mediante la longitud mínima de la estaca en suelos cohesivos según la teoría de Rankine (Das, 2011):

Luego, mediante el empuje pasivo se calcula la resistencia por estaca (R_e) al multiplicar el empuje pasivo (P_p) con el diámetro de la estaca. Finalmente, mediante el esfuerzo de resistencia de las estacas (t_e) y la expresión de la Ecuación 2.22 se calcula el área de distribución de las estacas según la dirección del talud.



Aunque, según las condiciones del proyecto que se desarrolle se deben realizar especificaciones adicionales (Presto, 2000).

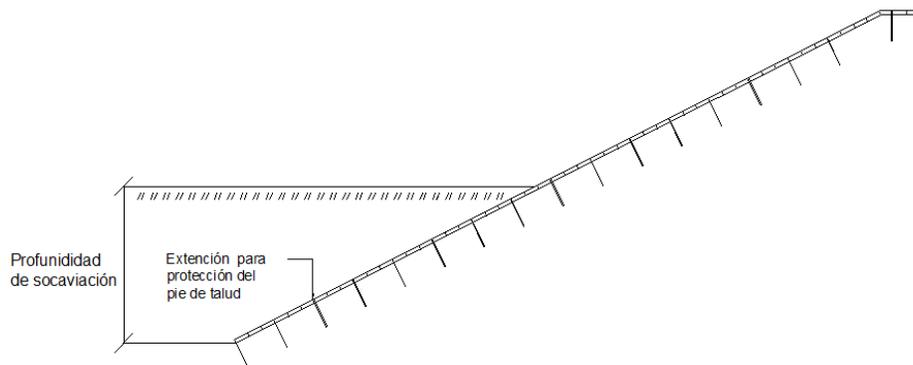


Figura 2-29: Esquema de la protección del pie de talud según la profundidad de socavación.

2.4 Variables propuestas para la comparación de la estructura

Se ha definido tres variables para la comparación de las estructuras de revestimiento: resistencia a la erosión y durabilidad, rugosidad de la superficie y la estabilidad del sistema de protección. Estas variables han sido elegidas basándose en las verificaciones de dimensionamiento y considerando que van a ser utilizadas en comparaciones prácticas y en busca de resultados confiables que sirvan para tomar decisiones en obra respecto al tipo de recubrimiento a utilizar. Así mismo, no se realizará una comparación económica del uso de un determinado revestimiento respecto a otro, debido a que el análisis se concentra en fundamentos técnicos. Consecuentemente a lo explicado, este análisis será complemento importante de una comparación económica, ya que brindará la información técnica para luego decidir los gastos económicos de una solución apropiada.

Las variables elegidas se basan en parámetros utilizados en los procedimientos generales de diseño de revestimientos con colchones de gaviones y geoceldas con relleno de concreto explicado en la sección 2. Así

como, en los procedimientos de diseño de canales erosionables basados en la velocidad y la fuerza tractiva (Chow, 1994). Las variables pueden ser calculadas con la información obtenida de los estudios hidrológicos y los análisis hidráulicos previos a la ejecución del proyecto. De esta manera, se permite tener resultados adecuados de manera práctica. En ese sentido, no se recurrirá a conceptos de posibles mecanismos de falla durante la vida útil o eventos extremos e interacciones complejas del flujo y las estructuras. Debido a que esto requeriría un mayor nivel de recopilación de datos y experimentación con modelos computacionales y físicos, lo cual, reduciría la facilidad de uso del método de análisis planteado a continuación. La primera variable evalúa la funcionabilidad de los revestimientos mediante la comparación de la resistencia a la erosión y durabilidad, para lo cual, se utilizan los conceptos de la velocidad máxima permisible y la resistencia a los esfuerzos de arrastre. La segunda, compara la rugosidad de la superficie mediante el coeficiente de rugosidad n de Manning, el cual, corresponde a un parámetro hidráulico simple de análisis de la resistencia al flujo, y de fácil cálculo. La tercera variable evalúa la estabilidad del sistema mediante factores de seguridad ante el deslizamiento en las direcciones transversales y longitudinales a la corriente según condición sumergida y seca.

A continuación, se definen de manera más detallada las variables propuestas para la comparación entre las estructuras estudiadas.

A) Resistencia a la erosión y durabilidad

Los factores físicos y las condiciones de campo que determinan el comportamiento de la erosión de la superficie de los canales son muy complejos, debido a la interacción entre la gran variabilidad del flujo y las características propias de cada tipo de recubrimiento (Suarez, 2001). En consecuencia a esta complejidad y para lograr una comparación entre parámetros sencillos e importantes, esta investigación utiliza las siguientes definiciones. Según Prosser, Rutherford, Olley, Young, Wallbrink y Moran (2001) la resistencia a la erosión y la durabilidad del revestimiento de protección, tanto para una carga hidráulica de larga como de corta duración,

pueden ser cuantificadas y comparados mediante la velocidad máxima permisible, es así que una mayor velocidad de resistencia indica que el recubrimiento desarrolla un mejor performance de sus funciones durante los eventos extremos. Del mismo modo, el esfuerzo de corte generado por el flujo sobre la superficie del canal es un indicador directo y relevante respecto al proceso de erosión de la superficie del canal (Chen y otros, 2014). En consecuencia, para comparar de manera simple las características de este revestimiento, se evalúa la resistencia a la erosión mediante la velocidad máxima permisible y la resistencia a los esfuerzos de arrastre.

La velocidad máxima permisible, la cual para fines de comparación se calcula como velocidad crítica, es definida como la mayor velocidad promedio que puede resistir el recubrimiento y no causar erosión en el canal, su valor es definido en base a la experiencia en proyectos, así como experimentación en condiciones de laboratorio (Chow, 1994). Por otro lado, el esfuerzo de arrastre permisible es la máxima fuerza de arrastre por unidad de área que va a resistir el revestimiento sin ser erosionado de manera importante, este esfuerzo será comparado mediante el esfuerzo de arrastre crítico que se calcula en base a experimentos de laboratorio y experiencia en proyectos anteriores. La Ecuación 2.4 muestra una expresión basada en el parámetro de Shields para el cálculo del esfuerzo de arrastre crítico en el lecho de un canal formado por material granular (Simons y otros, 1984). Esta ecuación es utilizada en el diseño de colchones de gaviones y puede ser utilizada para la comparación las geoceldas con relleno de concreto (Pilarczyk, 2004).

La evaluación final de estas variables se realiza mediante la comparación cuantitativa de los valores propuestos de resistencia de la velocidad crítica y el esfuerzo de arrastre crítico de cada revestimiento.

B) Rugosidad de la superficie

La rugosidad de la superficie se analiza entre ambas estructuras mediante el uso del coeficiente de rugosidad n de Manning ($s \cdot m^{-1/3}$). Este coeficiente proviene de la modificación de la ecuación propuesta por el ingeniero

irlandés Robert Manning en 1889. La Ecuación 2.23 esta expresada en unidades métricas, fue propuesta para el cálculo del flujo en canales abiertos debido a la simplicidad de su forma y lo satisfactorios de sus resultados para fines prácticos (Chow, 1994).

Ecuación de Manning:



- Sedimentación y socavación: la sedimentación puede cambiar un canal muy irregular y darle cierta uniformidad, mientras la socavación hace lo contrario.
- Obstrucción: la naturaleza, tamaño y forma de la obstrucción puede incrementar el valor de n .
- Nivel y caudal: el valor de n disminuye con el aumento del nivel y el caudal.
- Cambio estacional: debido al crecimiento estacional de plantas acuáticas el coeficiente puede aumentar en la estación de crecimiento.
- Material en suspensión y carga del lecho: este material, este en movimiento o no, causan una pérdida de energía y aumentan la rugosidad aparente del canal.

De la Ecuación 2.23 se deduce que la relación del coeficiente n es inversa con respecto a la velocidad media del flujo, por consiguiente, valores mayores de n implican menores velocidades en el canal. Así mismo, según Einstein y Barbarossa (1952), al analizar de manera teórica los factores que repercuten en la resistencia al flujo en un canal, se determina que los factores principales son el radio hidráulico debido a la rugosidad superficial y el radio hidráulico debido a la rugosidad causada por los sedimentos del lecho. Dado que ambos revestimientos estarían sometidos a la misma condición de carga de sedimentos, la interacción con el flujo está determinada por la rugosidad superficial. Por esta razón, con la finalidad de producir un descenso de los niveles de la superficie de agua mediante el aumento de las velocidades en el canal, se debe utilizar un coeficiente de rugosidad superficial del revestimiento que sea el menor posible (Jasen y otros, 1979).

Finalmente, aquella estructura que posee el menor valor del coeficiente de rugosidad de Manning es la más adecuada para funcionar como revestimiento. El valor de este coeficiente en cada revestimiento va diferenciarse según el tipo de superficie de acabado final. Por un lado, según Simons y otros (1984) en el caso de los colchones de gaviones se puede utilizar la Ecuación 2.1 para el cálculo del coeficiente n . Por otro lado, en el

caso de los revestimientos de geoceldas con relleno de concreto el coeficiente de rugosidad varía de acuerdo al pulido o tipo de acabado que se utilice en el concreto y se obtiene en base a información recopilada por mediciones en laboratorios (Presto, 2000).

C) Estabilidad del sistema de protección

La estabilidad del sistema va a estar sometida a diferentes fenómenos que ponen en riesgo la integridad de la estructura de revestimiento. Los elementos de recubrimiento son influidos por las fuerzas tractivas y de gravedad a lo largo del canal, dichas fuerzas junto con las características geométricas de la sección influyen en la capacidad de mantener el estado de equilibrio de la estructura, debido a que van a inducir el movimiento en los elementos estructurales (Chow, 1994). Dada la influencia de estas fuerzas, según Maccaferri (2015) y Presto (2000) los revestimientos deben analizarse para evitar que se produzcan deslizamientos tanto en la dirección del flujo, como en la dirección transversal de la sección. Según Suarez (2001), el análisis de estas direcciones de deslizamiento, también debe estar sometido a condiciones específicas de comparación. Las condiciones definidas son las siguientes: deslizamiento en la dirección del flujo para la condición sumergida del revestimiento y deslizamiento en la dirección transversal de la sección para la condición seca del revestimiento. La comparación de estas direcciones según la condición se realiza mediante el cálculo de un factor de seguridad contra el deslizamiento, el cual se define en la Ecuación 2.25 como el cociente entre los esfuerzos que resisten el deslizamiento (ERD) y los esfuerzos que inducen el deslizamiento (EID). Estos esfuerzos se definen a continuación según la dirección de análisis.

Ecuación del factor de seguridad contra deslizamiento.

En la dirección del flujo en condición de revestimiento sumergido, debe analizar el deslizamiento de los elementos que conforman la armadura superficial de protección y el deslizamiento de la armadura superficial completa. Para el caso de los elementos de la armadura, los ERD son el esfuerzo de arrastre crítico definidos según la variable de resistencia a la erosión y durabilidad (Ecuación 2.4), mientras que los EID son los esfuerzos de arrastre actuantes debido al flujo. En el caso de la armadura superficial completa, los ERD en los colchones se componen por el esfuerzo de arrastre crítico del relleno y la resistencia de la malla (Ecuación 2.4 más un 20% de sobre resistencia por la malla), para el caso de las geoceldas son los esfuerzos que se producen por la fricción entre el revestimiento y la base sobre la que este se apoya (Ecuación 2.26). Por otro lado, los EID son los esfuerzos de arrastre actuantes debido al flujo y el peso actuante de la armadura (Ecuación 2.27).

Los esfuerzos de fricción entre el revestimiento y la base sobre la que este se apoya en condición sumergida se calcula mediante la siguiente ecuación (Chow, 1994).

Los esfuerzos de arrastre actuantes debido al flujo y al peso de la armadura se calculan mediante la siguiente ecuación:



Donde:

t_r : Esfuerzo de induce el movimiento por peso del revestimiento (kg/m^2).

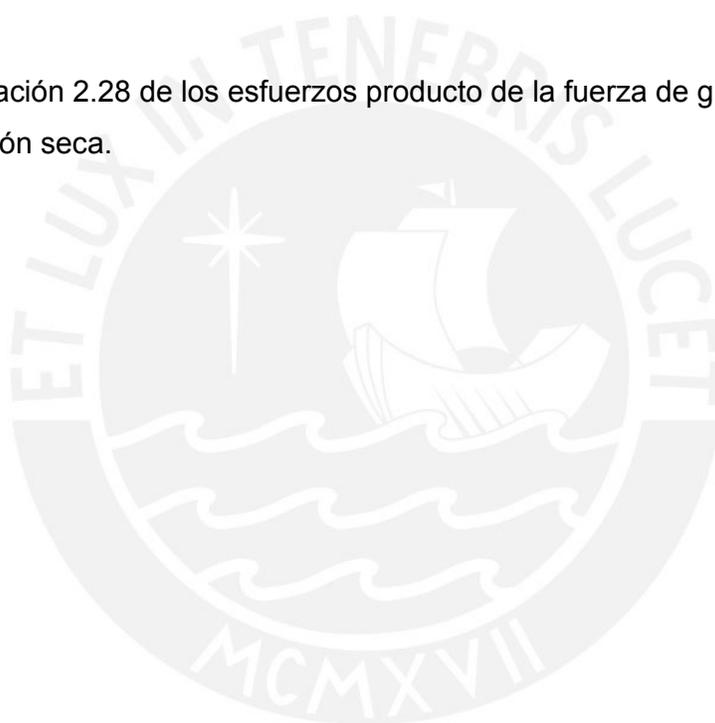
t : Espesor del revestimiento (m).

γ_a : Peso específico de la armadura del revestimiento (kg/m^3).

ϕ : Ángulo de fricción entre la armadura y la base ($^\circ$).

Θ : Ángulo de inclinación del talud ($^\circ$).

Ecuación 2.28 de los esfuerzos producto de la fuerza de gravedad en condición seca.



3 Dimensionamiento de los Sistemas de Revestimiento de Protección

Para el dimensionamiento de ambos revestimientos se utiliza como caso el proyecto de defensas ribereñas en el río Zarumilla. Las condiciones y antecedentes del proyecto se presentan a continuación. En base a esta información, se propone una sección crítica (ver Figura 4-1) y las condiciones de diseño. El dimensionamiento que se presenta busca presentar información necesaria para contextualizar el proceso de análisis y para la comparación de los resultados obtenidos en esta investigación.

3.1 Proyecto de defensas ribereñas en el río Zarumilla

El 27 de setiembre de 1971 fue creado el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT), el cual se basa en el convenio suscrito entre el Perú y Ecuador para el aprovechamiento de las cuencas hidrográficas de los ríos Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira. Bajo este marco, el órgano ejecutivo de la componente Peruana integrante del proyecto, llamada PEBPT, tiene entre sus funciones principales la regulación de caudales, el control de inundaciones y la protección de áreas agrícolas mediante el manejo de cuencas (PEBPT, 2015).

Consideraciones del Proyecto en el río Zarumilla.

La información presentada a continuación es parte de una recopilación de los informes presentados por profesionales y empresas que participaron en el proyecto y de la exposición Geoweb en Defensas Ribereñas Río Zarumilla-Tumbes del evento GeoAmericas 2012 (ver Apéndice E).

Las defensas ribereñas del río Zarumilla en Tumbes, zona limítrofe con el Ecuador, constituyen 15,72 Km de diques desde la bocatoma La Palma hasta 500 metros aguas abajo del puente Bolsico y protegen zonas agrícolas muy importantes que han sido frecuentemente dañadas por inundaciones.

En el año 2000 se presentaron los resultados de los estudios del modelamiento realizado con el software HEC-RAS de las 68 secciones de

control que se consideraron en los estudios del proyecto. Este modelo representa 13 240 metros lineales de las futuras obras de protección. Para un caudal de 300 m³/s, correspondiente a 5 % de probabilidad de excedencia y periodo de retorno de 100 años, se obtiene como resultado de este modelo que la velocidad media máxima determinada es de 3,5 m/s y el esfuerzo hidráulico de corte máximo es de 10 kg/m². De manera adicional, los niveles de socavación dieron como resultados valores hasta de 3 metros (Consorcio Fronterizo, 2013).

Las obras de control de erosión de ríos se diseñaron según una vida útil de 5 años, 5 % de riesgo de excedencia y periodo de retorno de 100 años. Los diques fueron diseñados para caudales de avenidas con probabilidad de ocurrencia de 1% y 2%, correspondientes a los periodos de retorno de 100 y 50 años respectivamente (Consorcio Fronterizo, 2013).

La primera solución que se diseñó como estructura de revestimiento fue un colchón de gaviones de 0.17 m con relleno de piedra de $d_{50} = 0,085$ m y $d_{90} = 0,095$ m de diámetro.

Otiniano y otros (2012):

Sin embargo, la explotación indiscriminada de las canteras de piedra para las obras de prevención contra el fenómeno del Niño 2008 agotaron este recurso y las canteras disponibles más cercanas (Piura) representaban un alto costo para esta partida, esto motivó una actualización y replanteamiento de la alternativa (pp. 1).

A lo largo del lecho se ha caracterizado los siguientes materiales: arenas limosas, arenas de baja plasticidad y arenas limpias pobremente graduadas, tendientes a grano grueso. Las márgenes del canal están conformadas por diques de arcilla con dos secciones típicas:

- Tipo 1: Dique de arcilla compactada con talud y cara húmeda 2:1.
- Tipo 2: Dique de arena compactada con talud y cara húmeda 3:1.

En esta tesis se utiliza una sección crítica del cauce conformada por un talud de arcilla compactada con talud 2:1 y porcentaje de vacíos de 0,6, tirante de 2,6 m y la con una pendiente longitudinal del canal de 0,0015 (Otiniano y otros, 2012). La figura 4-1 muestra el esquema de la sección crítica definida para el diseño.

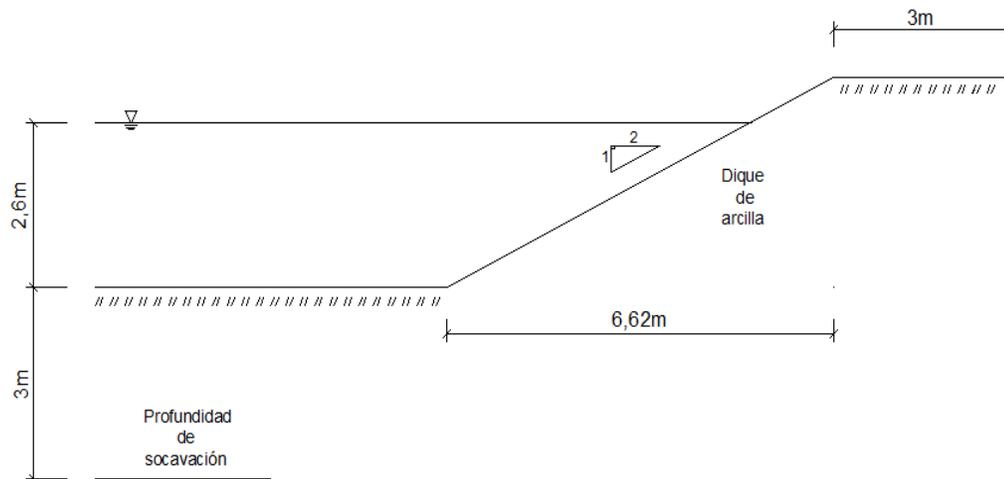


Figura 3-1: Dimensiones de la sección crítica que se considera para el diseño en esta investigación.

A continuación, se realiza el dimensionamiento de la sección propuesta mediante los dos tipos de revestimientos evaluados: Colchones de gaviones y geoceldas con relleno de concreto. En base a estos resultados, luego se llevará a cabo el proceso de comparación y análisis.

3.2 Revestimiento del colchón de gaviones

1) Predimensionamiento.

Se utiliza la velocidad máxima determinada en los estudios:

$$V_{\max} = 3,5 \text{ m/s}$$

Luego, mediante V_{max} se determina en la Tabla 2-1 en que intervalo de Velocidad crítica – Velocidad límite se encuentra, para definir el espesor del colchón de gaviones y del mismo modo las características de las piedras de relleno.

Los resultado determinados a partir de la Tabla 2-1 se muestran en la Tabla 3-1, la cual muestra que V_{max} se encuentra en el primer intervalo de velocidades y le corresponde un espesor de 0.17 metros de colchón. Adicionalmente, la Tabla 3-2 muestra que para las piedras de relleno se considera lo siguiente: Dimensiones 70-100 mm y $d_{50} = 0.085$.

Tabla 3-1: Rango de velocidades y espesor.

Rango de velocidades	
V_{max} (m/s)	3,50
V crítica (m/s)	3,50
V límite (m/s)	4,20
Espesor (m)	0,17

Tabla 3-2: Piedras de relleno, dimensiones y d_{50} .

Piedras de relleno	
Dimensiones (mm)	70-100
d_{50}	0,085

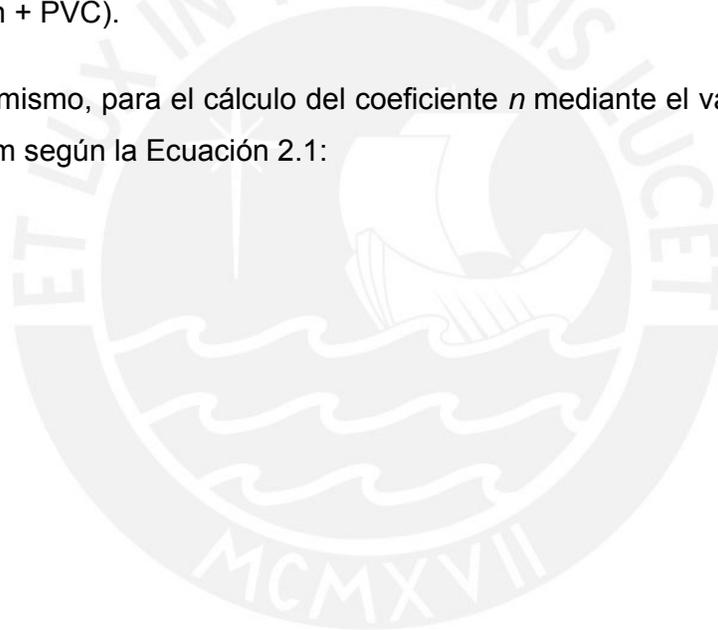
El siguiente paso es utilizar la Tabla 2-2 que corresponde a las dimensiones de las piezas de malla del colchón. Se ingresa a esta tabla mediante el espesor del colchón determinado anteriormente y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-3: Resultados del predimensionamiento dimensiones del colchón.

Dimensiones	
Espesor (m)	0,17
Largo (m)	4,00
Ancho (m)	2,00
N° de diafragmas	3,00
Volumen (m ³)	1,36

La malla será de abertura 6 x 8 cm producida con alambre de diámetro 2,00 mm (por estar siempre en contacto con el agua el revestimiento será GalFan + PVC).

Así mismo, para el cálculo del coeficiente n mediante el valor del $d_{90} = 0,095$ m según la Ecuación 2.1:



Luego, mediante el $dm = 0,085$ y debido a que $Fr = 0,69$ es menor a $1,5$, se utiliza el gráfico de la Figura 2-7 para obtener el valor de la velocidad crítica. De manera consecuente, este valor es equivalente a $4,2$ m/s y se comprueba que la velocidad crítica es mayor que la velocidad actuante. Por lo tanto, el espesor del colchón que se ha elegido cumple con esta primera condición.

3) Verificación de arrastre de material de colchones.

A) Determinación de esfuerzos arrastre actuantes.

En el proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla, el valor de los esfuerzos arrastre actuantes en los taludes se ha hallado mediante un modelamiento hidráulico utilizando el software Hec-Ras.

Al ser el esfuerzo máximo del fondo (ta_o) igual a 10 kg/m², los esfuerzos máximos en los taludes (ta_m) equivalen a multiplicar ta_o por $0,75$; es decir, $ta_m = 0,75$ kg/m².

B) Determinación del esfuerzo arrastre crítico.

Mediante la Ecuación 2.4 se calcula el esfuerzo arrastre crítico en el fondo del canal, se utilizará el coeficiente de Shields sugerido por Simons y otros (1984) en su investigación sobre criterios de diseño de colchones de gaviones ($C' = 0,1$). Del mismo modo, los valores de los pesos específicos de la piedra del colchón y del agua también se toman de los valores sugeridos por Maccaferri. El diámetro que se ha escogido corresponde al dm del material de relleno utilizado. Mientras que para el término K (2.05) el valor del ángulo θ es 27° debido a las características de la sección y el ángulo ϕ equivale aproximadamente a 40° por el tipo de material de relleno en los colchones (Chow, 1994).

Donde:

Coeficiente de Shields (C'): 0,1.

Peso específico de la piedra del colchón (γ_s): 2500 kg/m³.

Peso específico del agua (γ_w): 1000 kg/m³.

Diámetro medio de la piedra del colchón (d_m): 0.085 m.



Esfuerzo de arrastre actuante en el fondo (t_{a_0}): 10 kg/m^2 .

Esfuerzo de crítico en el fondo (t_{a_0}): $12,75 \text{ kg/m}^2$.

Peso específico de la piedra del colchón (γ_s): 2500 kg/m^3 .

Peso específico del agua (γ_w): 1000 kg/m^3 .

Diámetro medio de la piedra del colchón (d_m): 0.085 m .



Por lo tanto, el valor de la distancia vertical entre el punto más bajo y el más alto de la superficie asumida para el pedrisco equivale a:



Donde:

dm: 0,085 m.

Pendiente del canal (S): 0,0015.

Rugosidad de la base (n_f): 0,02.



C) Verificación.

Se comprueba que se cumple la condición de $V_e > V_a$ y $V_{em} > V_a$, por lo tanto el suelo base resistirá sin ayuda de un filtro la velocidad del agua.

6) Protección del pie de talud.

El diseño de la protección del pie del talud inicia con el resultado del análisis de la erosión en el canal. Para este cálculo se utiliza el valor máximo de erosión obtenido del modelamiento hidráulico.

$$\Delta z \text{ (profundidad de erosión)} = 3 \text{ m.}$$

Debido a que Δz es mayor que 1,5 metros, se utiliza una protección extendida sobre el lecho de canal. Se calcula Δx mediante la Ecuación 2.13 para profundidades grandes de erosión.

3.3 Revestimiento de geoceldas con relleno de concreto

1) Selección del material.

Mediante investigaciones se ha obtenido que la velocidad máxima promedio que puede soportar un sistema convencional de geoceldas rellenas de concreto es de 8 m/s para que este se comporte adecuadamente y no se comprometa la estabilidad de los elementos (Suárez, 2001). Del mismo modo, se sigue las recomendaciones de Geoproducts (2011) y Presto (2000), empresas que sugieren este valor, como velocidad crítica de un sistema convencional, en base a sus estudios y la experiencia de la aplicación del revestimiento en múltiples proyectos.

En este proyecto:

$$V \text{ crítica del revestimiento} = 8 \text{ m/s.}$$

$$V_{\text{max}} = 3,5 \text{ m/s.}$$

Se cumple que la V crítica del revestimiento es mucho mayor que la velocidad actuante máxima.

Del mismo modo los esfuerzos máximos de arrastre actuantes en el canal equivalen a 10 kg/m^2 . Valor que las geoceldas rellenas con concreto de un espesor mínimo de 3" pueden resistir sin ningún problema, ya que en investigaciones se ha determinado que en condiciones óptimas se puede lograr incluso resistencias de $102,042 \text{ kg/m}^2$ (Colorado State University, sf).

Por otro lado, se utilizará el coeficiente n de Manning de 0,013, el cual equivale al valor promedio para una superficie acabada con badilejo metálico liso, según Tabla 2-3.

2) Dimensionamiento de las geoceldas.

Una vez definido el material de relleno, en este caso el concreto, se debe establecer las dimensiones de las geoceldas que contendrán este material. Se sugiere que para taludes de más 20° de inclinación se utilice elementos

con un espesor de 3" (Presto, 2000), de esta manera el concreto puede ser vaciado y pulido adecuadamente. En este proyecto, el talud de apoyo para el revestimiento es de relación 2:1 (H: V); es decir, cumple con lo recomendado. Del mismo modo, al revisar lo indicado en el gráfico de la Figura 2-23, se comprueba que el espesor de 3" es adecuado también para las características de la velocidad del flujo (Geoproducts, 2011).

Mediante investigaciones realizadas en diversos revestimientos formados por bloques de concreto se han determinado velocidades límite en relación al peso del bloque y la flexibilidad del sistema (Hewlett, Boorman y Bramley, 1987). Para bloques en contacto cara a cara en menos del 75% de su longitud se ha determinado una velocidad máxima de diseño de 8 m/s y se requiere un peso por área de 135 kg/m². Para una geocelda de 3", se cumple que el área de contacto cara a cara es del 100% y que el peso por área es de 177 kg/m² (Presto, 2000).

Finalmente, bajo estas condiciones, se sigue la sugerencia de Presto (2000) que se utilice la geocelda GW30V (ver Figura 2-15) con altura de 3" y área de 460 cm².

3) Análisis de estabilidad para el cálculo de anclajes y tendones.

A) Análisis de los esfuerzos en la dirección transversal del canal para la condición seca del revestimiento.

De la Ecuación 2.14 para calcular el esfuerzo que induce el movimiento por peso del revestimiento.

Donde:

Espesor de las geoceldas (t): 0,075 m.

Peso específico del material de relleno (γ_r): 2 300 kg/m³.

Ángulo de inclinación del talud (Θ): 27 °.





4) Anclajes de talud.

Ecuación 2.21 para calcular el empuje pasivo mediante la longitud mínima de la estaca que se ha elegido de una barra de acero estructural para concreto armado.

Donde:

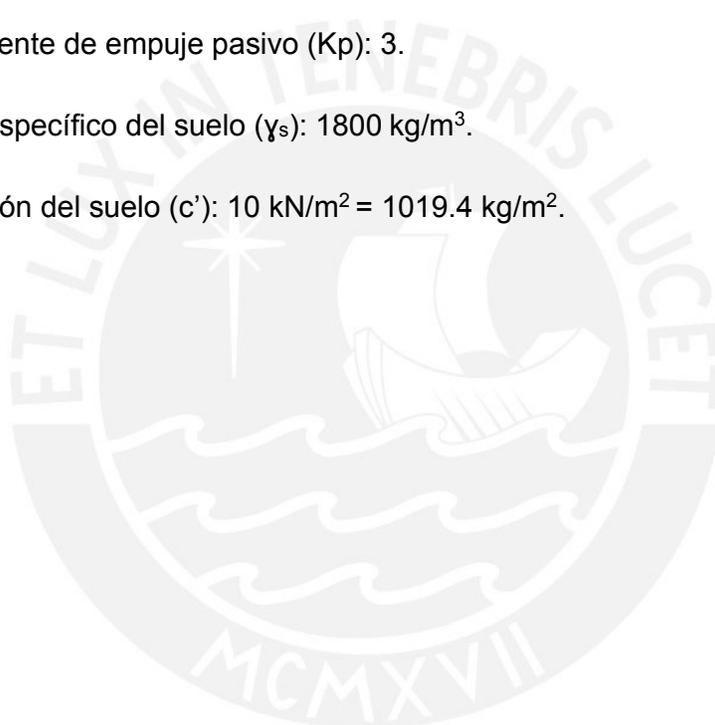
Longitud mínima del anclaje (l): 0,50 m.

Diámetro de la barra (d): 0,0127 m.

Coefficiente de empuje pasivo (K_p): 3.

Peso específico del suelo (γ_s): 1800 kg/m³.

Cohesión del suelo (c'): 10 kN/m² = 1019.4 kg/m².



5) Cálculo del número de tendones.

Las geoceldas GW30V de área 460 cm^2 ($28,7 \times 32 \text{ cm}$), permite que se utilicen tres celdas por metro lineal, lo cual da un máximo de 3 tendones por metro lineal si se quiere tener una distribución continua de tendones.

Donde:

Aceleración de la gravedad (g): $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$.

Peso en la condición seca = $78,3 \text{ kg/m}^2$.

Longitud del talud = $7,2 \text{ m}$.

FS=2.



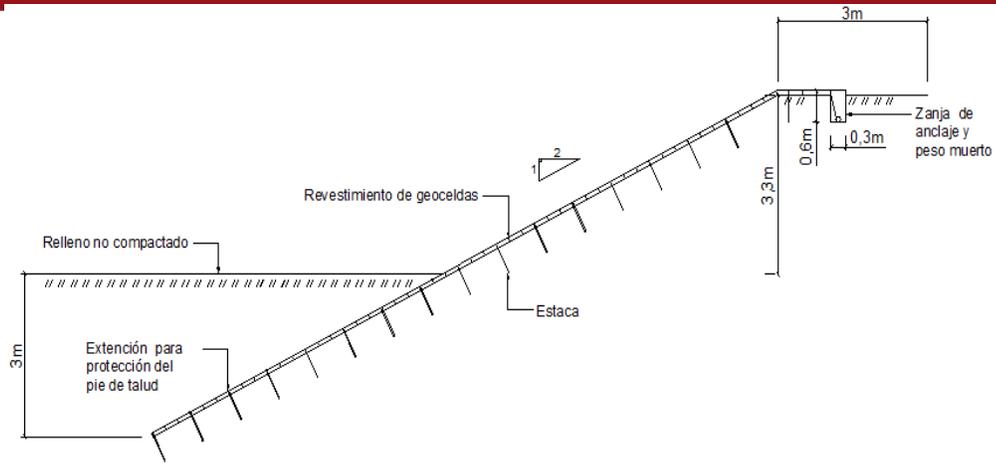


Figura 3-3: Diseño del revestimiento con geoceldas con relleno de concreto.



4 Análisis de Resultados

4.1 Resistencia a la erosión y durabilidad

Producto de la oscilación climática que sufre la costa norte del Perú, esta zona, que es normalmente catalogada por tener un clima árido, adquiere características de un clima tropical, condición que se presenta de manera particular en el aumento de las lluvias en toda la región que en ocasiones repercute en inundaciones (SENAMHI, 2014). Al presentarse las crecidas en climas áridos, en los cuales la mayor parte del tiempo las precipitaciones son incipientes, los flujos de agua arrastran consigo gran cantidad de sedimentos como es el caso de las inundaciones en el norte del Perú. Debido a esto, la naturaleza del flujo cambia y debe tenerse en cuenta el transporte de la carga de sedimentos suspendida y de fondo (Castillo, Martín y Marín, 2009). El aumento de la fuerza erosiva del flujo no solo se debe al aumento del caudal y las velocidades producto de la inundación, sino que se agrava debido al arrastre de sedimentos y empalizadas por parte del flujo (Chen y otros, 2014). Debido a esto, el potencial erosivo del flujo es mayor que el calculado sin considerar el arrastre de sedimentos. Con lo cual, se deduce que no es suficiente un análisis básico del flujo, es decir, es necesario que en los estudios se considere los efectos de este arrastre de partículas. Así mismo, las guías de diseño y los valores de resistencia recomendados por las empresas productoras de los revestimientos analizados, en muchos casos, no consideran este aumento en el potencial erosivo. En consecuencia, es importante que los especialistas a cargo de los proyectos sean capaces de analizar las situaciones de peligro según las condiciones locales del proyecto para determinar los valores adecuados de resistencia requeridos según las necesidades de protección de la estructura a diseñar. A continuación, se expondrán las características a comparar de ambos revestimientos.

Las geoceldas de 3 pulgas (7,5 cm) de altura y 460 cm² de área (28,7 x 32 cm), equivalente al modelo GW30V de Presto, han sido analizadas en condiciones de laboratorio bajo diversos niveles de descarga para medir su performance (Colorado State University, sf). De este experimento, se

determinó que dichas geoceldas, bajo condiciones muy favorables, pueden resistir velocidades de hasta 10,88 m/s y esfuerzos cortantes de 102,042 kg/m² como magnitudes pico durante cuatro horas de experimentación. Estos valores son bastante superiores respecto a los actuantes en el proyecto del río Zarumilla, en el cual se tienen esfuerzos máximos de 10 kg/m². Sin embargo, se debe tener en cuenta que las condiciones en las que fue aplicado el experimento han sido mantenidas lo más estables posibles, situación que no puede ser comparada con la compleja interacción de variables a las que se someten estas estructuras en su función como defensas ribereñas. Por esta razón, se considera que la resistencia a los esfuerzos de arrastre de las geoceldas es potencialmente mayor a los actuantes en el río Zarumilla, pero no según el mismo nivel establecido por la investigación de la universidad de Colorado. Mediante la expresión de Shields (Ecuación 2.4) se calcula un esfuerzo crítico teórico que pueda ser comparado respecto al esfuerzo crítico de los colchones de gaviones, para esto se utiliza un coeficiente de Shields de 0,1 igual que el de los colchones, y diámetro de los elementos (dm) corresponde a la menor dimensión de ancho de las geoceldas GW30V equivalente a 0,287 cm.

elegidos para el proyecto es aproximadamente 4,2 m/s, mientras que la V_{max} es 3,5 m/s, de esta manera se garantiza una resistencia adicional del revestimiento al arrastre del flujo. Por otro lado, el esfuerzo crítico de los colchones (tc_o) es igual a 12,75 kg/m², el cual es mayor que los 10 kg/m² actuantes. Adicionalmente, las propiedades de la malla de acero garantizan que mediante un adecuado diseño y construcción el sistema de mallas aporta una sobre resistencia del 20% (se tendría $tc_o = 15,3$ kg/m²), siempre que el núcleo de acero de los cables se mantenga protegido por el revestimiento anticorrosivo (Maccaferri, 2015). De esta manera, aunque se produzca una deformación de las cajas contenedoras debido al arrastre del relleno, el sistema de recubrimiento seguirá cumpliendo su función incluso hasta que debido a la deformación solo queden zonas protegidas con el doble del diámetro medio del relleno, ver Figura 2-9.

Al comparar los resultados de ambos revestimientos se determina que ante las condiciones de velocidad y esfuerzo de arrastre expuestos tienen la capacidad de resistir de manera adecuada. Aunque, las geoceldas demuestran tener características superiores a los colchones de gaviones, el análisis no debe quedar de esta manera y, a continuación, se presentarán observaciones complementarias respecto a la durabilidad y la resistencia a la erosión.

La durabilidad de las grandes obras de defensas ribereñas es una necesidad, debido a que el efecto de las inundaciones sobre las poblaciones es catastrófico. Del mismo modo, el uso intensivo de recursos para construcción de estas estructuras significa también una alteración, en muchos, casos no recuperable del medio ambiente (Zevengergen, Cashman, Evelpidou, Pasche, Garvin y Ashley, 2010). Es por esto que se debe elegir la estructura que este mejor concebida en cuanto a resistencia a la erosión y garantice la mayor durabilidad, en este caso, según el análisis son las geoceldas con relleno de concreto. La Tabla 4-1 muestra los valores de las magnitudes actuantes y resistentes según los parámetros analizados. Para cada revestimiento corresponde una respectiva magnitud de resistencia, mientras que ambos revestimientos serán afectados por las mismas

condiciones de los parámetros como magnitudes actuantes. Así mismo, se muestra el cociente entre la magnitud resistente y la actuante en cada tipo de revestimiento.

Tabla 4-1: Resumen de los valores calculados para la comparación de la variable Resistencia a la erosión y durabilidad entre los colchones de gaviones y las geoceldas con relleno de concreto.

	Magnitudes que Resistien		Magnitudes Actuantes	Resistente/Actuante	
	Colchones	Geoceldas		Colchones	Geoceldas
Velocidad Crítica	4,2 m/s	8 m/s	3,5 m/s	1,2	2,29
Esfuerzo de Arrastre Crítico	15,3 kg/m ²	37,31 kg/m²	10 kg/m ²	1,53	3,73

Luego de realizar el análisis de esta variable se tiene que ambos revestimientos superan los valores mínimos establecidos por el proyecto. En el caso de los colchones respecto a las magnitudes actuantes poseen 1,2 de resistencia ante la velocidad de arrastre y 1,53 de resistencia respecto al esfuerzo de arrastre crítico. Por otro lado, las geoceldas poseen factores de 2,29 respecto a la velocidad de arrastre y 3,73 frente al esfuerzo de arrastre crítico. Mediante este análisis se determina que las geoceldas son el recubrimiento con mejor resistencia a la erosión y durabilidad.

4.2 Rugosidad de la superficie

A continuación se realizará el análisis de la variable de Rugosidad de la Superficie.

Mediante la Ecuación 2.1 se calculó un valor de la rugosidad de la superficie de los colchones de gaviones (n) equivalente a 0,026 (Sección 3.2, Predimensionamiento). Así mismo, los colchones de gaviones han sido analizados mediante pruebas de laboratorio especificadas y se ha recopilado datos sugeridos por la experiencia en otros proyectos (Maccaferri, 2015). Es así que se tienen valores de n entre el rango de 0.0222 a 0.027 según la

calidad del relleno y las especificaciones de colocación, ver Tabla 4-1. Mediante los valores sugeridos por esta tabla se observa que el coeficiente teórico calculado con la Ecuación 2.1, $n=0.026$, corresponde a un valor alto del coeficiente de rugosidad superficial. Para el caso de las geoceldas, el revestimiento y acabado final es el de una superficie de concreto, la cual, puede realizarse bajo niveles de pulido diversos y de esa manera variar el valor de n , ver Tabla 2-3 (Presto, 2000). Las geoceldas pueden tener diferentes métodos de acabado según las herramientas con las que ha sido pulida la superficie de concreto, lo cual brinda valores de n en el rango de 0,012 a 0,04. Para este proyecto se considera el valor promedio de $n = 0,013$, el cual corresponde a un acabado mediante badilejo metálico liso (Presto, 2000).

Tabla 4-2: Coeficientes de rugosidad de la superficie de colchones Reno encontrados mediante recopilación de aplicaciones prácticas y pruebas especificadas (Maccaferri, 2015).

Naturaleza del Canal	$n (s \cdot m^{-\frac{1}{3}})$
Canales revestidos con colchones llenados con material bien seleccionado y colocado en obra con mucho cuidado.	0,0222
Canales revestidos con colchones llenados con material bien seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0250
Canales revestidos con colchones llenados con material no seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0270

La repercusión de la variación de este coeficiente en la superficie del canal radica de manera directa en las velocidades del flujo, debido a que, al tener menores valores de n , disminuye la resistencia de la superficie del canal y permite que se desarrollen mayores velocidades (Chow, 1994). Así mismo, el cambio de la rugosidad en la sección transversal del río, debido a que el revestimiento solo se utiliza como protección de los diques y la otra margen no lo posee, va generar que las características del flujo se modifiquen de manera importante (Wang, Yang, Guo, Xie, Fu, y Guo, 2012). En este caso, la sección del fondo durante el flujo de una inundación será compuesta por el revestimiento y la planicie de inundación aledaña, esta composición de rugosidades genera una diferencia entre las velocidades del borde del revestimiento y el lecho sin revestir. De manera complementaria, al permitir mayores velocidades en el lecho se producirá un descenso de los niveles de la superficie de agua, lo cual será relativo al caudal (Jasen y otros, 1979). Por otro lado, esta variación de la rugosidad podría producir una fosa de socavación debido a la turbulencia que se puede generar en el borde entre el revestimiento y el lecho de la planicie de inundación, para contrarrestar este efecto se puede modificar la protección de pie de talud y hacerla más profunda (ver y comparar Anexo B con Anexo D).

En esta comparación se ha determinado que las geoceldas poseen una superficie más lisa que los colchones. Mientras que los colchones poseen un valor de n entre 0,0222 - 0,027 y un n calculado igual a 0,026, para las geoceldas se tiene el n promedio de 0,013. Ver en la Tabla 4-3 el resumen de los resultados obtenidos para los valores del coeficiente n de cada revestimiento. Por lo tanto, las geoceldas con relleno de concreto poseen un valor más adecuado de rugosidad de la superficie.

Tabla 4-3: Resumen de los valores del coeficiente n establecidos para cada recubrimiento.

Tipo de Recubrimiento	Valor de Coeficiente n
Colchones de Gaviones	0,026
Geoceldas con Relleno de Concreto	0,013

4.3 Estabilidad del sistema de protección

El sistema de revestimiento está diseñado para cumplir sus funciones una vez se haya iniciado la época de lluvias, durante los meses de enero a mayo en el norte del país, y actuará como parte del sistema de defensa contra inundaciones. Las inundaciones han sido proyectadas debido al efecto de la oscilación climática del sur o fenómeno de “El Niño”. En ese sentido, la comparación del análisis de estabilidad del sistema se realiza considerando las situaciones extremas a las que se expone al revestimiento durante su vida útil: la condición del cauce seco y durante las inundaciones cuando el revestimiento está sumergido. A continuación, se procede con el cálculo y análisis de los factores de seguridad contra deslizamiento.

En la dirección del flujo en condición de revestimiento sumergido.

Análisis para los elementos que conforman la armadura de protección superficial. El EID corresponde al esfuerzo de arrastre actuante equivale a 10 kg/m^2 .

Colchones de gaviones:

Cálculo del ERD mediante Ecuación 2.4 del esfuerzo crítico en el fondo mediante el parámetro de Shields.

Luego se calcula el factor de seguridad contra el deslizamiento mediante, Ecuación 2.25.





Los EID mediante Ecuación 2.29.



Tabla 4-4: Resumen de los Factores de Seguridad calculados para la comparación de la variable Estabilidad del sistema de protección.

Condición y dirección evaluada	Elemento del revestimiento	Colchones	Geoceldas
Condición sumergida, dirección de la corriente	Elementos de la armadura	1,3	3,7
	Armadura	1,48	8,8
Condición seca, dirección transversal	Armadura	1,6	1,5

Se determina que las geoceldas son el recubrimiento con mejor desempeño en el análisis de estabilidad comparativo respecto a los colchones de gaviones. Deben estas características al tener un mayor F.S. en el análisis de deslizamiento de la armadura en dirección del flujo bajo condición sumergida, debido a que la armadura está compuesta por bloques de concreto que otorgan al sistema un alto grado de resistencia respecto a las fuerzas de arrastre y deslizamiento. Así mismo, las estacas que son parte del recubrimiento, permiten que las geoceldas tengan niveles de estabilidad similares al de los colchones en el análisis de deslizamiento en la dirección transversal en la condición seca del revestimiento.

En la Tabla 4-5 se resume los resultados del análisis de comparación de las variables técnicas. En esta tabla se observa que las geoceldas con relleno de concreto son el revestimiento más adecuado para el proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla, debido a que poseen un mejor desempeño según las variables evaluadas. Así mismo, los colchones de gaviones también cumplen con las condiciones mínimas exigidas por el proyecto; sin embargo, son las geoceldas el revestimiento mejor preparado para las condiciones más extremas del río Zarumilla.

Tabla 4-5: Resumen del análisis de las variables de comparación.

Variable	Condición de evaluación según variable		Colchones	Geoceldas	Revestimiento más adecuado
Resistencia a la Erosión y Durabilidad	Velocidad de arrastre (m/s)		4,2	8	Geoceldas
	Esfuerzo de arrastre crítico (kg/m ²)		15,3	37,31	
Rugosidad de la Superficie	Coeficiente de rugosidad de Manning		0,026	0,013	Geoceldas
Estabilidad del Sistema de Protección	Condición sumergida, dirección de la corriente	Elementos de la armadura	1,3	3,7	Geoceldas
		Armadura	1,48	8,8	
	Condición seca, dirección transversal	Armadura	1,6	1,5	



5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Partiendo de los objetivos planteado en la sección 1.2 y en base a la comparación realizada y el tema desarrollado en esta tesis se proceden a definir las siguientes conclusiones:

- Se ha identificado las variables técnicas que permiten la comparación entre ambos revestimientos. Las variables definidas son las siguientes: La resistencia a la erosión y durabilidad, la rugosidad de la superficie y la estabilidad del sistema de protección.
- Se ha comparado el resultado del análisis de las variables identificadas y se ha determinado que las geoceldas con relleno de concreto son el revestimiento más adecuado para funcionar como sistema de protección en el proyecto de defensas ribereñas del río Zarumilla.
- Mediante la recopilación de información se ha logrado establecer el marco teórico que defina ambas estructuras.
- Se ha recopilado los criterios de dimensionamiento de estructuras de revestimiento de colchones de gaviones y de geo-celdas con relleno de concreto para la defensa contra erosión ribereña. De esta manera, se ha identificado adecuadamente las variables y mediante los criterios establecidos se ha efectuado el dimensionamiento de la sección típica de ambos recubrimientos.
- Mediante el análisis de la variable de resistencia a la erosión y durabilidad se ha determinado que las geoceldas con relleno de concreto son el recubrimiento más adecuado, debido a que poseen una mayor magnitud de velocidad de arrastre crítica y una mejor performance ante las fuerzas de arrastre.
- Según los resultados del análisis de la variable de rugosidad de la superficie se demuestra que las geoceldas con relleno de concreto

son el revestimiento con menor coeficiente de rugosidad, por lo tanto, más adecuado para su desempeño en el proyecto.

- El análisis de la variable de estabilidad del sistema ha determinado que las geoceldas con relleno de concreto son los revestimientos con mayor grado de estabilidad del sistema, lo cual ha sido definido mediante el factor de seguridad ante deslizamiento de las condiciones evaluadas.

5.2 Recomendaciones

Se presentan las siguientes recomendaciones sobre el proyecto y lo investigado con la finalidad de complementar el trabajo realizado en este proyecto de tesis:

- Se recomienda que para cualquier tipo de revestimiento elegido se planifique y sea parte del proyecto inicial las condiciones de mantenimiento que tendrá la estructura durante su funcionamiento, esto implica una total concepción del proyecto. No es permisible que se diseñe un sistema que requiera un alto nivel de mantenimiento para prolongar las condiciones óptimas de su vida útil y no sean parte del proyecto las operaciones de mantenimiento.
- Se recomienda que no todas las secciones deban ser diseñadas con un solo tipo de revestimiento, sino que se pueden utilizar diversas soluciones, de esta manera aquellas zonas donde el riesgo de pérdida de estabilidad es menor, puede considerarse a los colchones como revestimientos. Mientras que las zonas que presenten un riesgo de estabilidad importante pueden ser recubiertas mediante geoceldas. Esta propuesta se alinea con el criterio base de que la dinámica fluvial es compleja, por lo tanto, las soluciones no pueden ser generalizadas de manera indiscriminada. Utilizar un solo tipo de recubrimiento es no considerar la naturaleza compleja del fenómeno y aumentar la probabilidad de que la solución no sea la más integral (Rafter, 2008).

- Se recomienda analizar la interacción de la estructura de revestimiento y el flujo de la inundación mediante modelos físicos para determinar de manera experimental el desempeño de las variables analizadas, de esta manera se determinará mejores modelos para el análisis de los recubrimientos contra la erosión ribereña. De esta manera puede analizarse el efecto de los sedimentos transportados en el potencial erosivo del flujo sobre la estructura.
- Se recomienda realizar un análisis adecuado de las características de permeabilidad necesarias para el revestimiento y elegir el método de drenaje más adecuado según el proyecto, ya que este repercute en las condiciones de flexibilidad, estabilidad y durabilidad del sistema. La falta de un mecanismo que permitan un correcto drenaje a través de las estructuras de recubrimiento consiste en una amenaza, ya que es una de las principales causas de falla durante la vida de servicio de la estructura (Raisinghani, Viswanadham, 2010).

5.3 Línea de Investigación Futura

En lo concerniente a la línea de investigación futura, se considera que los siguientes temas:

- Estudiar mediante modelos físicos la correlación entre las variables propuestas en esta investigación, esto permitirá que se desarrolle un mejor entendimiento de la interacción de estas variables y el óptimo desempeño de los revestimientos. Así mismo, mediante los resultados que se obtendrían se puede proponer modelos matemáticos más adecuados para la simulación de modelos computacionales que se basen en las variables estudiadas.
- Investigar mediante estas variables el desempeño de otros revestimientos. Con las variables definidas en esta investigación se pueden realizar comparaciones entre otros revestimientos. Los resultados que se obtendrían de estos análisis permitirán que se desarrolle un mejor entendimiento de las propuestas de protección mediante recubrimientos contra la erosión, así mismo, al tener una

mayor gama de soluciones, se pueden ejecutar mejores propuestas de defensas ribereñas.

- Analizar los mecanismos de falla de los revestimientos. Mediante el uso de modelos físicos y computacionales se puede estudiar las fallas por exceso de presión de poros, migración de finos debajo del revestimiento, deslizamiento del revestimiento, asentamiento diferencial y socavación del pie. Seguir esta investigación permitirá complementar el análisis del performance de los revestimientos. Estos resultados complementarían el análisis de desempeño mediante el entendimiento de las posibles fallas o estados críticos de funcionamiento de los recubrimientos.



Referencias

1. Alfaro, O. (2015). Entrevista personal con la ingeniera Alfaro, jefa de sector minería, hidrocarburos e hidroenergía de la empresa Andex en Perú. Llevada a cabo el 08 de may. de 2015.
2. Autoridad Autónoma Cuenca Hidrográfica Chira-Piura (AACHC). (2007). Resumen del diagnóstico situacional. *Plan de defensas ribereñas y encauzamiento de ríos, (66)*. Recuperado el 7 mar., de <<http://www.ana.gob.pe:8088/media/11691/plan%20de%20defensas%20ribere%C3%B1as%20y%20encauzamiento%20de%20rios%20-%20resumen%20del%20diagnostico%20situacional.pdf>>
3. Bianchini Ingeniero.S.A. (2015) Gaviones. Recuperado el 15 de mar., de <<https://www.abianchini.es/es/catalogos>>
4. Campaña del Toro, R. (2015). Diseño de revestimiento con gaviones. *Introducción a los proyectos de defensas ribereñas*. Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional de Recursos Naturales.
5. Castillo L.G., Martín J.P., Marín D. (2009). Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. I Jornada de ingeniería del agua, CEDEX. Recuperado el 20 de may., de <http://www.upct.es/hidrom/publicaciones/congresos_nacionales/L_Castillo_Transporte_Sedimentos_web.pdf>
6. Chen, R. H., & Chiu, Y.M. (2007). Model test of geocell retaining structures. *Geotextile and Geomenbranes*, 26(1), pp.56-70.
7. Chen, X., Zhao, Y., Mo, B., & Mi, H. (2014). An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *Plos ONE*, 9(6), 1-7. doi:10.1371/journal.pone.0099660.
8. Chow, V. T. (1994). En M. Suarez (ed.), *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, Editorial Nomos.

9. Colorado State University. (sf). Performance test-concrete fill. Engineering research center, Fort Collins.
10. Consorcio Fronterizo. (2013). Tomo II: Estudios básicos. Volumen II: Estudios hidrometeorológicos complementarios. Volumen 2.1: Estudio hidrológico de los ríos Puyango-Tumes y Zarumilla. *Estudio de factibilidad para obras hidrológicas del río Puyango-Tumbes; y, diseño definitivo y ejecución de las obras comunes* (pp. 126). Proyecto Binacional Puyango Tumbes.
11. Das, B. M. (2011). Rankine passive pressure. In Braja M. Das (ed.) *Geotechnical engineering handbook*, (pp. 2-1 to 2-34). USA: J. Ross Publishing.
12. Einstein H.A., Barbarossa H.L. (1952). River Channel Roughness. *Transactions*, Vol. 117. American Society of Civil Engineers.
13. Geoproducts. (2011). Guía de diseño e instalación de geoceldas 3D EnviroGrid para control de erosión. Recuperado el 6 de may. de <<http://geoproducts.org/editoruploads/documents/Spanish%20Docs/M anual%20Control%20de%20Erosi%C3%B3n.pdf>>
14. Hewlett, H. W., Boorman, L. A., & Bramley, M. E. (1987). Erosion resistance of concrete-reinforced grass. *Design of reinforced grass waterways*. CIRIA report 116.
15. Jasen, P., van Bendegon, L., van den Berg, J., de Vries, M., & Zanen, A. (1979). Flood control and drainage of the flood plain. *Principles of river engineering: The non-tidal alluvial river*, 394-413.
16. Maccaferri. (2008). Productos metálicos: Gaviones. Recuperado el 09 de mar., de <<http://www.maccaferri.com.ar/productos/metalicos/gavion-caja/16714-2.html>>
17. Maccaferri. (2010). Gavión tipo colchón. *Dimensionamiento de los revestimientos de colchones Reno y de gaviones*.
18. Maccaferri. (2015). Diseño de colchones Reno. *Dimensionamiento de los revestimientos de colchones Reno y de gaviones*.

19. Neermal, M. (2012). The use of gabions in hydraulic applications. *Civil Engineering (10212000)*, 20(5), 37-39.
20. Otiniano, J., Grimaldo, E., y Cardozo, J. (2012). GeoWeb en Defensas Ribereñas Río Zarumilla-Tumbes. Second Pan American Geosynthetic Conference & Exhibition GeoAmericas 2012.
21. Pilarczyk, K. W. (2004). Design of revetments. Dutch Public Works Department: Hydraulics engineering division.
22. Presto. (2000). Consideraciones generales de diseño. *El sistema GeoWeb de protección de canales*.
23. Presto. (2015). Geoweb cellular confinement system: The world's most complete geocell. Recuperado el 09 de mar., de <<http://www.prestogeo.com/geoweb>>
24. Prosser, I., Rutherford, I., Olley, J., Young, W., Wallbrink, P., & Moran, C. (2001). Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. *Mar. Freshw. Res.*, 52 pp. 81–99.
25. Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT). (2015). Acerca del Proyecto Especial Binacional Puyango. Recuperado el 10 de mar., de Ministerio de Agricultura y Riego del Perú Sitio web: <http://pebpt.gob.pe/index.php/acerca-del-pebpt>.
26. Rafter, D. (2008). In channel armoring. *Control erosion*.
27. Raisinghani, D., Viswanadham, B. (2010). Evaluation of permeability characteristics of a geosynthetic-reinforced soil through laboratory tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), pp.579-588.
28. Rocha, A. (2011). Interacción de la dinámica fluvial y el desarrollo urbano. *Ingeniería Civil. Problemas en el manejo de ríos en áreas urbanas*, 46, (8-15). Recuperado el 5 de mar., de <<http://www.cip-civil.com/wp-content/uploads/revistas/09-2011.pdf>>
29. Rocha, A. (2014). Erosión en pilares y estribos de puentes. *Introducción a la hidráulica de obras viales*.

30. SENAMHI. (2014). El fenómeno El Niño en el Perú. Recuperado el 25 de abr., de <<http://www.minam.gob.pe/fenomenodelnino/que-es-el-nino-y-que-factores-determinan-su-intensidad/evolucion-de-la-definicion-de-el-nino/>>
31. Sengupta, A. (2011). Stability analysis of rigid retaining walls. In Braja M. Das (ed.) *Geotechnical engineering handbook*, (pp. 6-2 to 6-42). USA: J. Ross Publishing.
32. Simons, D. B., Chen, Y. H., & Swenson, L. J. (1984). Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno mattresses. Colorado State University, Fort Collins.
33. Soban, K. (2011). Soil mechanics principles for slope analysis. In Braja M. Das (ed.) *Geotechnical engineering handbook*, (pp. 7-6 to 7-13). USA: J. Ross Publishing.
34. Suárez, J. (2001). Revestimiento con bloques de concreto. *Control de erosión en zonas tropicales*, pp. 424-432. Bucaramanga-Colombia: Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos.
35. TDM. (2015). Revestimientos de ríos mediante colchones de gaviones y geoceldas con relleno de concreto, registro fotográfico.
36. Wang, T., Yang k., Guo, X., Xie, S., Fu, H., Guo, Y. (2012). Experimental study hydraulic roughness for Kan Tin main drainage channel in Hong kong. *Journal of hydrodynamics* 24(5), 776-784.
37. Webster, S. L., & Alford, S. J. (1977). "Investigation of construction concepts for pavement across soft ground." Rep. S-77-1, Soils and Pavements Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
38. Zevengergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S., & Ashley, R. (2010). *Introduction to Urban flood management*, pp. 1-3. Tayler & Francis Group.