

Diseño De La Rehabilitación Del Dique Del Río Cauca Entre El km 18 + 925 a km 19 + 025 Empleando Cuatro Materiales Disponibles En La Ciudad De Cali

Jessica Gil Ruiz

Johan Andres Orozco Collazos

Resumen

Durante la temporada de lluvias en Colombia y específicamente cuando se presenta el fenómeno de la Niña, el caudal de las principales fuentes hídricas se ve afectado por un aumento súbito del agua. Debido a este crecimiento, las barreras construidas conocidas como diques, asentadas a la rivera de los cursos de agua para proteger campos de cultivo o zonas habitadas por una comunidad entran en funcionamiento, permitiendo resguardar de inundaciones determinadas áreas ante el evento que se presente un desborde de los ríos. Por lo tanto, ante la amenaza inminente de futuras inundaciones se realizó una propuesta para reforzar el dique que se encuentra actualmente sobre el margen izquierdo del río Cauca a su paso por la ciudad de Cali.

En ese sentido, el dique cuenta con problemas de estabilidad generados por circunstancias socio económico, fauna silvestre y contratiempos relacionados al cambio climático, que de originar una falla en la estructura dejarían a una parte de Cali bajo el agua.

Con el objetivo de prevenir inundaciones la propuesta que se llevó a cabo fue la implementación del refuerzo para un tramo de 100 metros del dique del río Cauca, donde se analizaron cuatro escenarios empleando suelos de fuentes diferentes y verificando su desempeño mediante el método de equilibrio límite en el software (Slide v6), que permitió seleccionar el material más apto para la rehabilitación del dique donde el más apto es el suelo residual volcánico (Rv).

Introducción

Las frecuentes pérdidas por inundaciones son ocasionadas principalmente por el incremento de la población en áreas inundables y de alto riesgo, al igual que los cambios en el tipo de uso de suelo los cuales incluye urbanización, deforestación y actividades sobre la red de drenaje. También son provocadas por el hundimiento del terreno que puede darse de forma natural como los son los procesos geológicos o por causas de la minería y obras de protección.

Debido a la gran cantidad de problemas generados por las inundaciones, la alternativa de solución más empleada en la ciudad que permite controlar en cierta medida las inundaciones provocadas por los desbordamientos, son las estructuras de contención tipo dique, que permite proteger las zonas de riesgo al aumentar la capacidad de transporte de los cauces.

Los diques, también conocidos como barreras artificiales de suelo compactado, son la primera línea de defensa con la que cuenta Santiago de Cali y se encuentran distribuidos por tramos a lo largo de los ríos Cauca, Cali, Meléndez y el canal del sur. El problema actual son los puntos en los tramos de los diques que se encuentran debilitados, no cumplen con los valores mínimos de resistencia o

su capacidad de permeabilidad y estabilidad están llegando al límite, presentando en diferentes situaciones la ruptura de la estructura, permitiendo desbordamiento del canal, inundaciones y catástrofes, que son el resultado de la falta de planeación, parámetros de diseño, materiales de construcción y filtraciones que atentan contra la estructura. Por tal motivo, con la prioridad de reducir el deterioro de los diques y aumentar el nivel de seguridad de la población es necesario encontrar alternativas que permitan la reparación de los diques existentes, llegado el caso que ayuden en la construcción de nuevas barreras donde sea necesario.

Debido a que la alternativa de solución se encuentra ligada a la construcción de una estructura tipo terraplén con materiales de suelo compactado, es necesaria la búsqueda de materiales que cumplan con los parámetros de diseño, permitiendo una estructura capacitada para el control de inundaciones.

El trabajo que se plantea a continuación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de un material de suelo compactado para verificar sus propiedades mecánicas en términos de resistencia y permeabilidad con diferentes condiciones de compactación. Finalmente, se pretende realizar la simulación de un dique con el material seleccionado con el fin de evaluar la estabilidad de la estructura.

Fundamentación Teórica

Es indispensable conocer cada uno de los elementos que lo componen, su comportamiento, las causas de falla y algunos criterios de diseño. También se debe tener en cuenta el material que constituye el dique y su comportamiento como suelo compactado. A continuación son presentados algunos elementos teóricos que ayudan a contextualizar el problema.

Definición de dique: Se denomina dique, la estructura construida a lo largo de un curso de agua, que actúa como barrera para prevenir inundaciones. El material que lo compone es suelo cohesivo compactado, sin embargo, puede ser de roca o concreto para mejorar la estabilidad de la estructura y prevenir efectos del agua sobre las partículas de suelo en la barrera (TAW, 1998).

Los diques se construyen en forma de trapecio invertido donde se pueden apreciar tres rasgos geométricos fundamentales como: la corona, el lado húmedo y el lado seco. Adicionalmente, el dique puede estar compuesto por otros elementos que complementan la tarea de encausar el flujo del curso de agua. Sin embargo, un dique puede tener los elementos que se muestran en la figura 1, donde solo cambia la geometría de algunas piezas, dependiendo si la barrera es para río o mar.

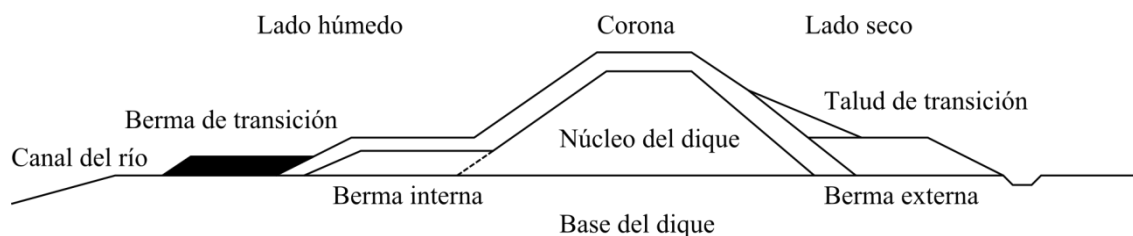


Figura 1. Elementos que conforman un dique (TAW, 1998).

Nivel mínimo del dique (MTOL): Es la altura mínima requerida para la parte superior del dique, la cual puede ser medida a lo largo de la línea central de este. Es aquella que proporciona un factor de seguridad apropiado para una proyección de inundación con un periodo de retorno de 200 años. Por otra parte el método del FEMA utiliza el borde libre para suministrar este factor de seguridad. En el USACE, el factor de seguridad es proporcionado por la combinación del borde libre y el uso de DWSE con un alto grado de seguridad del 90% o 95%.

Los diques que cumplen con el requisito de MTOL se consideran lo suficientemente aptos para mantener el agua fuera de la zona inundable teniendo en cuenta un periodo de retorno de 200 años, por el contrario de los diques que son inferiores a la MTOL carecen de un factor de seguridad adecuado para la contención y son menos propensos a mantener el agua fuera de la zona inundable, a menos que dichos diques estén diseñados como reboses.

Estabilidad de taludes para diques con carga intermitente:

Estabilidad de Taludes del lado seco del dique: El análisis de estabilidad de taludes del lado seco del dique se utiliza para disponer el apropiado nivel freático asociado al diseño de elevación superficial del agua (DWSE) con el máximo nivel hidráulico del dique (HTOL), este ensayo se realiza si el (HTOL) está por encima del (DWSE) 0,5 pies, de lo contrario, no. El factor de seguridad mínimo de 1,4 se requiere para fallas superficiales basadas en el (DWSE) donde la falla genera la ruptura del dique en el lado seco a unos pocos pies de la base. Se requiere un factor mínimo de seguridad de 1,2 para fallas en la superficie del dique provocadas por el (HTOL), esta falla también atraviesa la corona del dique a unos pocos pies del talud del dique.

Estabilidad de Taludes del lado húmedo del dique: Un descenso rápido del nivel de agua ocasionando una reducción veloz de la carga en el lado húmedo del dique. Existen diversos factores por los que se genera este fenómeno, incluyendo la disminución del reservorio aguas arriba, la disminución de flujo de entrada de drenaje en la superficie, entre otros. La rápida reducción de la carga se considera desde el (DWSE). Según la USACE, el factor de seguridad requerido para la estabilidad del talud húmedo va de 1,0 hasta 1,2, dependiendo del grado de saturación generado por el DWSE en el lado húmedo del dique. (California, 2012)

Análisis de los mecanismos de falla en diques:

Según USACE (2000) las principales causas de fallas en los diques corresponden a:

- Desbordamiento;
- Erosión superficial;
- Erosión interna – Tubificación

De acuerdo a Duncan & Houston (1983), se realizó una investigación donde identificaron y clasificaron los factores que mayor influencia tenían en las fallas de los diques. En esa investigación se encontraron que los diques contienen una mezcla heterogénea de diferentes tipos de relleno como limo arena y turba. Las primeras fallas anteriores al 1950 se debieron principalmente a los deslizamientos puesto que los diques se asientan de forma continua gracias a la compresión de la turba y para ello se requiere un mantenimiento continuo lo cual permite conservar las elevaciones

de la cresta. Consecutivamente las fallas más recientes desde 1950 se evidenciaron en la inestabilidad de los taludes del dique, en casi todos los casos las fallas se produjeron en lugares donde no se tuvieron en cuenta la erosión y filtraciones de tuberías.

Macro-estabilidad

Se define como la capacidad de soporte que tiene un dique para no sufrir una ruptura general, esto quiere decir que no se fracture, deslice, sufra deformaciones por corte en planos de falla rectos o circulares. Situación provocada posiblemente por ruptura plástica en el lado seco del dique. La falla en el dique principalmente se debe a la diferencia entre la rigidez del material que lo compone y el suelo adyacente, lo que produce un desequilibrio de fuerzas, generando el deslizamiento y posterior falla. Existen dos formas de calcular la estabilidad de la estructura que son: cálculo de planos de deslizamiento por el método de equilibrio límite y el método de elementos finitos.

Factores de seguridad a considerar en el diseño del dique: El cuerpo de Ingenieros de la Armada Norteamericana presenta una serie de factores mínimos de seguridad para garantizar la estabilidad en el diseño y estabilidad del dique, los factores se presentan en la Tabla 1. Resumen de criterios de diseño para diques urbanos cargados de forma intermitente. WRD (2012).

Tabla 1. Resumen de criterios de diseño para diques urbanos cargados de forma intermitente. WRD (2012).

Filtraciones- Gradiente de salida al pie del dique	Diseño de la elevación de la superficie del agua (DWSE)		Altura hidráulica máxima del dique (HTOL)	
	$\square \geq 17,6\text{kNm}^3$	$\square < 17,6\text{kNm}^3$	$\square \geq 17,6\text{kNm}^3$	$\square < 17,6\text{kNm}^3$
	$i \leq 0,5$	$FS \geq 1,6$	$i \leq 0,6$	$FS \geq 1,3$
Gradiente de salida a las filtraciones al pie de la berma	$i \leq 0,8$	$FS \geq 1,0$	< 20% de la degradación del FS para bermas a menos de 30,5 metros	< 10% de la degradación del FS para bermas a menos de 30,5 metros
Estabilidad de taludes (Lado seco)	$FS \geq 1,4$		$FS \geq 1,2$	
Estabilidad de taludes por desembalse rápido (Lado húmedo)	$FS \geq 1,2$ (Etapa alta prolongada) $FS \geq 1,0$ (Etapa alta de corta duración)			
Vulnerabilidad sísmica	Restaurar grado y dimensiones para WSE al menos de 10 años incrementando 1 m de borde libre o superior para la configuración de vientos elevados y el periodo previo de 8 semanas donde se presenten olas			
Geometría del dique	Para nuevas o extensivas reconstrucciones en una corriente importante, para todos los diques la corona mínima debe ser de 6,1 metros de ancho, pendiente de 3h:1v para el lado húmedo y lado seco, excepto los dique con derivaciones (4H:1V del lado húmedo)			

MODELACIÓN

La modelación contempló el análisis de la macroestabilidad para el lado seco con flujo estacionario con el nivel DWSE para 500 años de periodo de retorno, el caso sísmico pseudoestático, y la estabilidad del lado húmedo bajo el descenso rápido, empleando el programa Slide v6.0 de equilibrio límite mediante el método de equilibrio de fuerzas y momentos de Morgenstern & Price. Debido al carácter longitudinal de la obra se piensa que este análisis de deformación plana es aceptable para la condición real. La revisión de la microestabilidad se hizo con el mismo programa a partir de la condición de flujo bidimensional y revisando el gradiente hidráulico de salida.

La carga por sismo de diseño se evaluó mediante el análisis pseudoestático para una aceleración horizontal de 0,25 g de acuerdo con la zona homogénea de la Mircozonificación Sísmica de Cali Zona 6 ó Zona de Llanura Aluvial, donde se encuentra el tramo. El sector en el que se realiza el estudio del dique del río Cauca se encuentra comprendido entre las abscisas km 18+925 y km 19+025.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los ensayos realizados para los cuatro tipos de suelo se logra encontrar el material apto para ser utilizado en la reparación del dique del río Cauca. Empleando un modelo para el dique que se encuentra ubicado en el río Cauca entre las abscisas km 18+925 y km 19+025, los resultados obtenidos de los laboratorios permitieron escoger el material propicio para la reparación del dique considerando una geometría típica, un escenario y un análisis de estabilidad por equilibrio límite la cual se empleó en el software Slide v6 dando como resultado que cada uno de los materiales estudiados cumple con los requisitos de estabilidad macro y micro. A pesar de esto se propone emplear el material Rv para el refuerzo del dique puesto que en comparación con todos los tres materiales restantes tuvo en general un buen desempeño cumpliendo con los factores de seguridad mínimos, resistencia a la erosión y un menor gradiente hidráulico.

REFERENCIAS

- California, D. of W. R. T. C. N. R. A. S. of. (2012). Urban Levee Design Criteria, (May).
- Duncan, B. J. M., Asce, M., Houston, W. N., & Asce, A. M. (1983). ESTIMATING FAILURE PROBABILITIES FOR CALIFORNIA LEVEES, 109(2), 260–268.
- Otálvaro, I. F. (2013). Comportamiento hidromecánico de un suelo tropical compactado (Tesis Doctoral). Universidad de BrasíliA, BrasíliA, Brasil.
- TAW. (1998). Fundamentals of water retaining structures.
- USACE. (2000). Engineering and Design. Design and Construction of Levees. Manual No. 1110-2-1913. Washington, DC.
- WRD, C. (2012). Urban Levee Design Criteria California Department of Water Resources. Sacramento.