

Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos

Analysis of slope stability in embankment still 18 m heights through the limit equilibrium methods and the finite element method

Milena Mesa Lavista¹, Eduardo Tejeda Piusseaut²

^{1,2}Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: milenaml@civil.cujae.edu.cu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional 

Recibido: 20 de septiembre de 2017 Aprobado: 20 de noviembre de 2017

Resumen

El análisis de estabilidad de taludes es uno de los parámetros en el diseño de terraplenes de carreteras que el proyectista debe considerar para que sean construidos de manera estable y segura. Las normas técnicas del ámbito nacional e internacional recomiendan pendientes de taludes en función de los tipos de suelos y la topografía del terreno hasta alturas de 12 m. En el presente trabajo se emplean los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos para la determinación del factor de seguridad en la estabilidad de taludes para terraplenes de carreteras cuando se modifican la altura y pendientes del talud. En la modelación de los terraplenes se concibieron tres variantes de diseños de experimento, para tener en cuenta diferentes alturas (hasta 6 m, 12 m y 18 m). Como principal resultado se definen las pendientes donde los taludes son estables en terraplenes mayores de 12 m de altura, según el tipo de suelo empleado en este trabajo.

Palabras claves: estabilidad de taludes, terraplenes altos, factor de seguridad

Abstract

This The slope stability analysis is one of the parameters in the design of road embankments that the designer should consider to be constructed stable and secure manner. The technical standards of national and international recommended slope slopes based on soil types and topography to heights of 12m. In this paper the methods of limit equilibrium and finite for determining the safety factor in slope stability for road embankments elements are used when the height and slope pending change. In the modeling of embankments three variants of designs experiment to look at different heights (up to 6m, 12m and 18m) were conceived. The main result slopes where slopes are stable in landfills over 12m in height, depending on the type of soil used in this study are defined.

Key words: slope stability, high embankment, safety factor

INTRODUCCIÓN

Los análisis de la estabilidad de taludes se basan en determinar las pendientes que permitan construirlos de una manera estable y segura, evitando las fallas por deslizamientos, vuelco, desprendimientos, etc. El problema puede ser abordado con diferentes enfoques. Cuando se habla de estabilidad, se trata de encontrar la altura crítica del talud o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, para una geometría y características de suelo dados. Evaluar la estabilidad de un talud implica un estudio en el cual se debe, entre otros eventos: caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil del talud, así como las condiciones de filtración y agua subterránea, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, finalmente, a partir de este factor de seguridad (el cual se elige en base al destino del talud) se deberá determinar la superficie de falla crítica.

Para el análisis y cálculo del factor de seguridad mínimo en el problema de la estabilidad de los taludes se han empleado los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), que supone un factor de seguridad constante a lo largo de la línea de deslizamiento y que puede conducir a resultados del lado de la inseguridad. Por otro lado, actualmente, se tratan algunos métodos numéricos, dentro de los cuales se puede nombrar el Método de Elementos Finitos (MEF), que no son tan conservadores y brindan resultados en un menor espacio de tiempo.

Los problemas en la estabilidad de taludes resueltos usando el MEF tienen dos importantes distinciones con el MEL.

- Primero, la ecuación de la estabilidad del talud por elementos finitos es determinada; por lo tanto, no es necesario que se hagan suposiciones para poder completar los cálculos.
- Segundo, la ecuación del factor de seguridad es lineal, porque la tensión normal en la base es conocida.

El método de los elementos finitos puede usarse para estudiar la estabilidad de taludes usando una definición de falla similar a la de los métodos de equilibrio límite, estos proponen en principio, una superficie de deslizamiento para luego examinar el valor del coeficiente de seguridad de la misma, el cual se define como la relación entre la resistencia al corte disponible y la resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie [1].

En el presente trabajo se realiza un análisis de estabilidad de taludes de terraplenes de carreteras según pendientes hasta 12 m, que establecen las normas cubanas [2-5]. Se modelan geometrías de terraplenes con taludes superiores a los 12 m, para las que se realizan recomendaciones de pendientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos para evaluar la estabilidad de los taludes son diversos. Los de equilibrio límite están basados en el método de las dovelas, dividiendo la masa de suelo en dovelas o rebanadas. Un análisis de equilibrio límite permite obtener un factor de seguridad teniendo en cuenta los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez que se han determinado las propiedades de resistencia a cortante de los suelos y las propiedades geométricas del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad (FS).

El análisis de estabilidad permite determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud y la base para soportar los esfuerzos que pueden causar la falla por cortante y deslizamiento. Se asumen condiciones de equilibrio estático para una superficie de deslizamiento supuesta y se determina en esta el factor de seguridad (definido como la relación entre fuerzas o momentos resistentes, y fuerzas o momentos motores). Repitiendo este procedimiento en diferentes superficies supuestas, se ubica aquella en la que el FS es mínimo. La diferencia entre los distintos métodos de cálculo del FS (Fellenius, Bishop, Janbú, Morgenstern - Price) radica en las simplificaciones para reducir la indeterminación de las fuerzas entre las dovelas [6].

Es así como surgen métodos para suelos granulares y para suelos cohesivos, aquellos que utilizan una superficie de falla circular, el de las dovelas (Fellenius y Bishop) [7, 8] y fallas no circulares (Janbú) [9]. También se pueden dividir los métodos de equilibrio límite de acuerdo con las ecuaciones de equilibrio que satisfagan. El método de Bishop satisface todas las ecuaciones de equilibrio estático. Los métodos como el de Morgenstern - Price y el de Spencer [10, 11] satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio. Estos últimos son referidos como métodos de equilibrio completo. Aun así, estos métodos llamados completos o de solución rigurosa no pueden ser vistos como rigurosos en el sentido estrictamente mecánico, ya que las ecuaciones de equilibrio no se satisfacen para cada punto de la masa de suelo. Tampoco se satisfacen la regla de flujo, las condiciones de compatibilidad y las relaciones constitutivas prefalla.

El Método de los Elementos Finitos resuelve muchas de las deficiencias de los métodos de equilibrio límite, este método fue introducido por Clough y Woodward [12]. El método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos [13]. El método típicamente

utilizado es el de la formulación de desplazamientos, que presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. Aunque es una herramienta muy poderosa, su utilización es muy compleja y su uso muy limitado para resolver problemas prácticos. En trabajos precedentes se ha realizado una calibración matemática de forma simultánea para la determinación del tipo de elementos finito y densidad de malla óptima, que mejor aproxima la solución a los problemas de terraplenes de carretera cuando se emplea el MEF [14-17].

Suelos empleados

Cada país, con sus normas vigentes (Tabla 1), tiene exigencias para cada una de las partes componentes de los terraplenes. En la práctica se ha comprobado que al emplear los materiales locales procedentes de las excavaciones, se disminuyen cuantiosamente los costos y gastos de proyectos siempre que estos materiales sean apropiados para su uso, a pesar de que se empleen en menor cuantía los materiales de préstamos o de canteras, lo que compromete en cierto grado la estabilidad, así como pueden presentarse posibles fallos durante la explotación del terraplén [18, 19].

Tabla 1. Resumen de las exigencias de los suelos según normas nacionales e internacionales para la construcción de terraplenes [20-22]

País	Norma Vigente	Tipos de suelo para la conformación del terraplén	Porcentaje de compactación
Estados Unidos	American Association of States Highway and Transportation Officials (AASHTO)	A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5	Mayor del 95 %
Francia	“Serviced’ Etudes Techniques des Routes et Autoroutes” (SETRA 1976), y “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées” (LCPC 1981)	Suelos granulares	---
España	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales, PG-3 de la Dirección General de Carreteras, 2004	Suelos seleccionados o adecuados con especificaciones de LL, IP y CBR	Mayor del 95 %
Alemania	-	Suelos gruesos y finos con diferente grado de compactación en función de la profundidad de la corona	
Perú	EG/CBT, 2008	A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-6 y A-3, (según clasificación de AASHTO)	Mayor del 95 % en la corona Mayor del 90 % en el resto del terraplén
Cuba	NC 052 – 042 de 1978 NC – 334 del 2004 RC – 3013 de 1981	A-1, A-2, A-3 y A-4. (según clasificación de AASHTO) con especificaciones de LL, IP y CBR	Mayor del 95 %

En la modelación de los terraplenes del presente trabajo, se escogió un suelo granular A-2, con densidad seca máxima del Próctor modificado de 19,64 kN/m³ y humedad del 12 %; las simulaciones se realizaron para un ángulo de fricción interna de 35 ° y cohesión de 20 kPa. Las características del suelo de la cimentación fueron las correspondientes a un CBR del 5 % (mínimo permisibles para terraplenes de carreteras) con una humedad 10 % y densidad natural 20 kN/m³, en las simulaciones se empleó un ángulo de fricción de 30 ° y coeficiente de cohesión de 10 kPa.

Empleo de berma

Las bermas son elementos estabilizadores de los taludes de los terraplenes, pudiendo servir de protección contra inundaciones, de la erosión pluvial y para aumentar la seguridad ante posibles fallos en presencia de taludes de terraplenes altos. Sirven de confinamiento lateral de la superficie de rodadura, controlan la humedad y las posibles erosiones por lo que el ancho es preferiblemente de 1 m a 2 m y se colocan a alturas entre 5 m y 7 m aproximadamente, dependiendo de la calidad de los suelos y coincidiendo con sitios de cambio de pendiente del talud. En suelos erosionables la berma debe tener una pendiente de 5 a 10 % hacia adentro del talud y se debe construir una cuneta revestida en su parte inferior para el control y manejo de las aguas de escorrentía.

En relación con los aspectos geométricos y el empleo de bermas, la Norma Cubana de Diseño Geométrico de Carreteras [23] solo realiza acotaciones en los terraplenes de carreteras especificando las pendientes de los taludes en función del tipo de suelo y la categoría de la vía, por debajo y por encima de los 3 m de altura.

Por otra parte, la Norma Cubana de Explanación de Vías Férreas [4] plantea especificaciones en las pendientes de los taludes según tipo de suelo hasta los 12 m de altura (figura 1), realizando un cambio en la pendiente a los 6 m; esta norma también plantea algunas observaciones acerca de la colocación de bermas cada 6 m de altura para asegurar la estabilidad del talud.

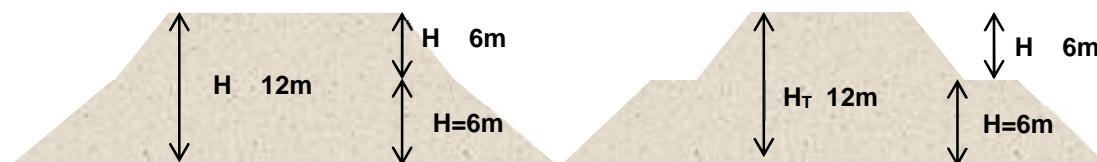


Fig. 1. Diferentes geometrías para la conformación del terraplén y el aseguramiento de la estabilidad de los taludes, según las normas cubanas

La Norma Cubana de Carreteras-Explanaciones-Requisitos de Diseño [5] plantea igualmente pendientes de taludes hasta 12 m, pero en este caso el cambio de pendiente se especifica realizarlo de 0 m a 3 m y de 3 m a 12 m con la posible inclusión de bermas entre los 6 y 12 m de altura según cuestiones tecnológicas.

Diseño del experimento

Para la obtención de las pendientes admisibles de taludes, se concibieron tres diseños de experimento para considerar las posibles variantes de altura y pendientes de los terraplenes viales, los dos primeros para revisar las recomendaciones incluidas en las normas, y un tercer caso para taludes superiores a 12 m. Los diseños de experimento son los siguientes:

- A. Variante A. Terraplenes menores de 6 m de altura. Se empleó un diseño de experimento 2^2 variando la altura del terraplén y la pendiente en dos niveles: 3 m y 6 m de altura con pendientes de 2:1 y 1,5:1.
- B. Variante B. Terraplenes de 7 m a 12 m de altura. Se empleó un diseño de experimento 3^2 variando la altura y la pendiente en tres niveles: 7 m, 10 m y 12 m de altura con pendientes de 2:1, 1,5:1 y la combinación de ambas (figura 2).
- C. Variante C. Terraplenes de 13 m a 18 m de altura. Se empleó un diseño de experimento de 2^2 al igual que en el primer caso, en esta ocasión la altura se varió en 13 m y 18 m y las pendientes se modelaron como la combinación de 2:1 y 1,5:1, con y sin el empleo de bermas (figura 2).

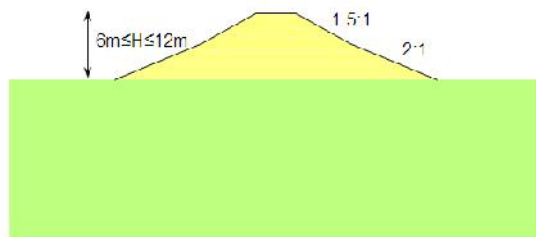


Fig. 2. Pendientes de taludes aconsejadas para terraplenes entre 6 m y 12 m de altura

RESULTADOS

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo del factor de seguridad por diferentes procedimientos, donde pueden apreciarse ciertas diferencias en los valores. El factor de seguridad empleando los Elementos Finitos es superior al resto de los métodos, excepto en algunos casos, aunque las diferencias no son significativamente elevadas. Este resultado indica que en los métodos de Equilibrio Límite (Bishop, Fellenius, Morgenstern -Price y Janbú) resultaron más conservadores que el de Elementos Finitos. En la figura 3 se pueden apreciar estos resultados, y que los procedimientos Fellenius y Janbú presentan resultados muy semejantes, diferenciándose del resto.

En todos los casos se observa la influencia de la pendiente del talud, es decir, el factor de seguridad se reduce con el incremento de pendiente. Sin embargo, la combinación de dos pendientes diferentes en el talud (2:1 y 1,5:1) en lugar de una sola (1,5:1) contribuye con el incremento de la seguridad. Un efecto similar se obtiene con el uso de bermas; su empleo incrementa el factor de seguridad en la misma magnitud que con el uso combinado de pendientes en el talud.

Tabla 2. Resultados del factor de seguridad del talud aplicando diferentes métodos

Altura del terraplén	Talud	Métodos de Equilibrio Límite				Elementos Finitos
		Bishop	Fellenius	M-Price	Janbú	
3 m	2:1	3,384	3,138	3,373	3,153	3,437
	1,5:1	3,039	2,817	3,034	2,869	3,028
6 m	2:1	2,621	2,393	2,603	2,396	2,683
	1,5:1	2,353	2,156	2,339	2,167	2,539
7 m	2:1	2,620	2,296	2,606	2,303	2,452
	1,5:1	2,342	2,049	2,332	2,091	2,409
	2:1 y 1,5:1	2,491	2,266	2,417	2,261	2,540
10 m	2:1	2,308	2,065	2,288	2,062	2,238
	1,5:1	2,024	1,805	2,001	1,816	1,988
	2:1 y 1,5:1	2,215	1,974	2,191	1,972	2,282
12 m	2:1	1,743	1,523	1,643	1,502	1,765
	1,5:1	2,094	1,854	2,069	1,857	2,163
	2:1 y 1,5:1	1,918	1,718	1,898	1,720	1,924
13 m	con bermas	2,370	2,076	2,357	2,081	2,305
	sin bermas	1,627	1,511	1,621	1,532	1,673
18 m	con bermas	2,135	1,853	2,109	1,850	2,077
	sin bermas	1,501	1,362	1,502	1,375	1,602

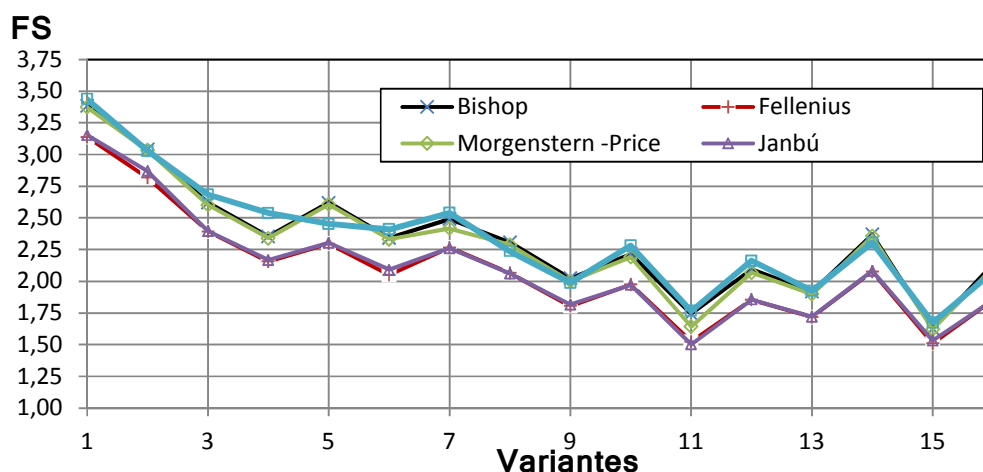


Fig. 2. Comparación de los resultados del factor de seguridad del talud por diferentes métodos

DISCUSIÓN

Los factores de seguridad obtenidos para cada variante se comparan con el factor de seguridad permisible, que para el caso de terraplenes de carreteras es 1,5.

Se pudo comprobar con los resultados de la variante A, que con las especificaciones que plantean las normas en cuanto a las pendientes de los taludes cumplen con el factor de seguridad permisible teniendo en cuenta los suelos empleados en la presente investigación.

Los resultados de la variante B, muestran que:

- Con talud 1,5:1 los factores de seguridad disminuyen, aunque cumplen con lo permisible; en ocasiones los valores se encuentran próximos al límite (1,5), lo que no es aconsejable.
- Con talud 2:1 se obtuvieron valores mayores, pero en algunos casos muy por encima del valor exigido, lo que no resulta favorable desde el punto de vista económico, inconveniente que se incrementa en la medida en que el terraplén supera los 6 m de altura.
- Con la combinación de pendientes en el talud (figura 2), el factor de seguridad a la estabilidad es mayor que el límite permisible.

Con relación a los resultados de la variante C, es evidente que los factores de seguridad cuando no se emplean bermas son menores y en determinados casos no cumplen con el permisible según análisis realizado a los resultados. Por tal motivo, se recomienda el empleo de bermas en taludes para terraplenes cuya altura supere los 12 m (figura 4).

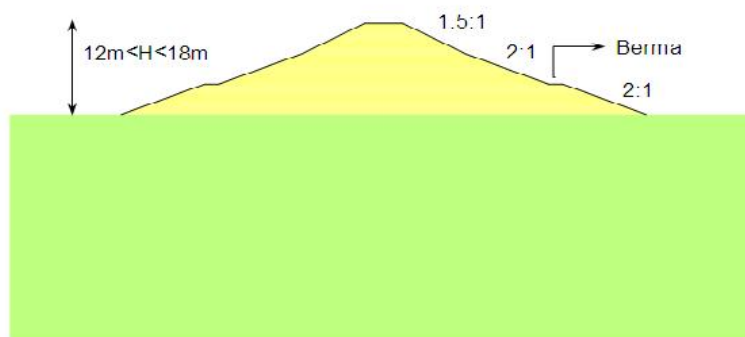


Fig. 4. Combinación de pendientes de taludes que resultaron estables empleando bermas, para alturas del terraplén entre 12 m y 18 m

CONCLUSIONES

1. En terraplenes de pequeña altura, menores a 6 m, se confirma que las pendientes en los taludes de 2:1 y 1.5:1 resultan estables, de acuerdo con las normativas nacionales e internacionales. En este caso resulta conveniente comprobar la estabilidad del talud con otros valores de pendiente, así como diferentes condiciones de suelos, de manera que puedan ofrecerse otras variantes al proyectista.
2. Para terraplenes con alturas entre 6 y 12 m, se comprobó que la combinación de taludes diferentes (1,5:1 y 2:1), favorece la estabilidad, por lo cual resulta una variante más económica por cuanto se reduce el volumen de tierras a mover necesario para su construcción.
3. Cuando el terraplén supera los 12 m de altura se recomienda el empleo de bermas para asegurar la estabilidad del talud, solución que resulta la más favorable desde los puntos de vista técnicos y económicos.

REFERENCIAS

1. Osacar Moller JW, Signorelli M, Stonti A. Mecánica Computacional, 14 Noviembre 2011:(XXX). Rosario, Argentina, 2011.
2. NC-052-042. Terraplenes Especificaciones Constructivas, 1978.
3. NC-53-125. Terraplenes, 1984.
4. NC-53-172. Explanación de Vías Férreas. MICONS, *Norma cubana*. La Habana, 1987.
5. NC-822. Carreteras — Explanaciones — Requisitos de Diseño, 2010.
6. Ortiz Salas CE. Estabilidad de Taludes. Highway, Landslide Taiwan, 2010. <http://es.wikipedia.org/w/index.php>
7. Fellenius W. *Calculation of the Stability of Earth Dams*, vol. 4. Second Congress on Large Dams: Washington D.C., 1936.
8. Bishop CS, Armour DW, Hopkins TC. Design of Highway Embankments on Unstable Natural Slopes, 1986.
9. Janbú N. Slope Stability Evaluations in Engineering Practice, 1996
10. Morgenstern N. PV. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces, vol. 15. Geotechnique: March, 1965.
11. Spencer EA. Method of Analysis of the Stability If Embankments Assuming Paralled Inter-Slice Forces, vol. 17. Geotechnique, 1967.
12. Clough RW WRJ. Analysis of Embankment Stresses and Demormations, July edn Journal of geotechnical division ASCE, 1967Cuba: Universidad de Pinar del Río, 1998.
13. Zienkiewicz OC, Taylor RL. El Método de Los Elementos Finitos, 5ta edn, vol. 1, 2 y 3. CIMNE: Barcelona, España, 2004.
14. Mesa M, Álvarez J. Calibración Numérica de un Problema de Ingeniería Vial. Revista de la construcción 2011; 10 (3): 52-63. 0718-915X. Available in: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000300006>.
15. Mesa M, Álvarez J. Técnicas de Calibración Numérica para Problemas de Ingeniería. Memorias de la XXXIII Convención Panamericana de ingenierías (UPADI) 2012: 12. ISBN: 978-959-247-094-1.
16. Mesa M, Álvarez J, Recarey C. Proceso de Algoritmo para Calibración Matemática. Memorias de la 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura 2012: 13. ISBN: 978-959-261-405-5
17. Mesa M, Guada P. Métodos Empírico-Mecanista Empleados para el Cálculo del Factor de Seguridad en la Estabilidad de Taludes. Monografía. La Habana, 2013. 978-9-592-61431-4.
18. Mesa M, Tejeda E, Lamas F. Métodos Analíticos Empleados para el Cálculo de Asiento en Terraplenes. Monografía. 2011. 978-9-592-61406-2.
19. Tejeda E. Diseño y Construcción de Explanaciones, Universidad de Manabí. Ecuador, 2008.
20. EUROCÓDIGO-7. Proyecto Geotécnico. EUROPEA NORMA, Parte 3: Proyecto asistido por ensayos de campo. AENOR, 2002.
21. PG-3. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. LITEAM EDICIONES, 4ta ed, 2004. 84-95596-51-2.

22. EG/CBT. Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito. Comunicaciones Ministerio de Transporte. Lima-Perú: Dirección general de caminos y ferrocarriles, 2008.
23. Benítez R, Medina A. Diseño Geométrico De Carreteras, 2003.