



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Av. 12 de Abril s/n, Cuenca

**ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ECONÓMICO COMPARATIVO ENTRE DIQUES
CONSTRUIDOS CON MATERIALES ARCILLOSOS Y GRAVOSOS EN EL
PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES DEL RÍO CAÑAR**

Director:

Ing. MSc. Rolando Armas Novoa

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN

DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Tutor:

Ing. MSc. Jorge Víctor León Rodríguez

Autores:

Edgar Antonio Lligüi Ortega

Paul Eduardo Ñauta Ñauta

Cuenca – Ecuador

Febrero, 2014

*Autores: Edgar Antonio Lligüi Ortega
Paúl Eduardo Ñauta Ñauta*



Resumen.

La presente tesis tiene como objetivo analizar desde el punto de vista geotécnico, las alternativas de diques planteadas en el proyecto Control de Inundaciones del río Cañar; mediante la construcción a escala real de 4 diques de prueba para determinar la opción más apropiada, a fin de implementarse en el proyecto.

Se estableció una metodología de construcción apropiada y un control de calidad durante cada etapa del proceso constructivo para garantizar la funcionalidad, características estructurales y de resistencia de los diques una vez terminados.

Mediante ensayos de laboratorio efectuados en los materiales arcillosos y granulares existentes en la zona, con los cuales se conformará los diques de prueba, se confirmó que cumplen con los parámetros necesarios para su posterior empleo en la construcción definitiva.

Para evitar cualquier tipo de fallas catastróficas, se efectuaron análisis de permeabilidad y estabilidad en cada uno de los diques de prueba y se verificó que sí cumplen con los parámetros establecidos en el diseño del proyecto.

Finalmente se pudo determinar que todas las alternativas de diques tienen un correcto comportamiento estructural y de resistencia, razón por lo cual es factible la utilización de cualquiera de las 4 alternativas planteadas; aunque desde el punto de vista económico, se establece que la soluciones más apropiadas son: el dique con pantalla de arcilla y espaldón granular, y el dique homogéneo de arcilla, el primero será construido en las márgenes de los ríos, y el segundo a lo largo del by-pass.

PALABRAS CLAVES: Diques, Características estructurales y de resistencia, Metodología de construcción, Fallas catastróficas, Análisis de estabilidad y permeabilidad, Análisis económico.



Abstract

The present study aims to analyze from a geotechnical perspective, alternatives to existing methods employed for flood control by the Cañar River project. By building four full-scale test embankments, the project was able to determine the most effective option to be implemented. Particular attention was given to construction methodology and quality control during each stage of the construction process to ensure the functionality, features and structural strength of the levees after completion. By laboratory tests carried out on subsurface conditions and materials in the area, it was confirmed that the required parameters for implementation in the final construction project were met. Furthermore, to avoid any catastrophic failures, each embankment was subjected to permeability and stability analysis. All four were found to comply with the appropriate design criteria. Finally, it was determined that each of the four alternatives were of optimum levee structural strength and implementable if so desired by the project; although from the economic perspective states that the most appropriate solutions are the clay dike screen and granular shoulder, and homogeneous clay dam, the first will be built on the banks of rivers, and the second along the bypass.

Keywords: Dams, Structural and strength properties, Construction methodology, Catastrophic failures, Stability and Permeability Analysis, Economic Analysis.



Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Contenido.....	4
Listado de Figuras.	6
Listado de Tablas.....	7
Lista de Símbolos	10
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.....	18
1.1 Introducción.....	18
1.2 Objetivo General	19
1.3 Objetivos Específicos	19
1.4 Justificación.....	19
1.5 Alcance.....	20
CAPITULO 2: MARCO TEORICO.....	21
2.1 Nociones generales.....	21
2.2 Clasificación de los diques.....	21
2.3 Definición de términos.....	22
2.4 Clasificación de los diques.....	23
2.4.1 Secciones homogéneas.....	23
2.4.2 Secciones graduadas	23
2.4.3 Secciones mixtas	24
2.5 Criterios preliminares de diseño.....	25
2.5.1 Altura del Dique	25
2.5.2 Ancho de la corona.....	25
2.5.3 Taludes Laterales	26
2.5.4 Revestimiento de taludes.....	26
2.5.5 Núcleo.....	27
2.5.6 Pantallas.....	28



2.5.7 Unión del cuerpo de la presa con el cimiento. 28

2.6 Tipos de fallas de los diques. 28

2.6.1 Agrietamiento..... 29

2.6.2 Sifonamiento mecánico..... 31

2.6.3 Deslizamiento de taludes..... 31

2.6.4 Pérdidas por filtración 41

2.6.5 Sismos 42

2.6.6 Licuación..... 42

CAPÍTULO III: MATERIALES Y PROCESO CONSTRUCTIVO..... 43

3.1 Características de la arcilla utilizada. 43

3.2 Características de la grava..... 45

3.3 Características de la mezcla (arcilla y material de río). 46

3.3.1 Características de la mezcla (arcilla y material de río cribado). 46

3.3.2 Características de la mezcla (arcilla y material de río sin cribar). 47

3.4 Metodología de construcción..... 48

3.4.1 Desbroce del terreno. 48

3.4.2 Retiro de la capa vegetal. 49

3.4.3 Excavación y preparación del material en los préstamos. 49

3.4.4 Transporte del material. 49

3.4.5 Colocación y conformación del material en el terraplén..... 50

3.4.6 Proceso de mezclado. 50

3.4.7 Compactación..... 51

3.5 Forma de construcción y porcentajes de materiales utilizados. 52

3.6 Control de Compactación en campo. 52

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS. 57

4.1 Análisis de permeabilidad..... 57

4.2. Análisis de estabilidad de taludes. 62

4.3 Análisis de los diferentes tipos de fallas. 77



4.3.1 Agrietamiento..... 77

4.3.2 Sifonamiento mecánico..... 78

4.3.3 Sismos..... 78

4.3.4 Rebase de la cortina..... 79

4.3.5 Licuación..... 79

4.4 Análisis Económico..... 80

4.4.1 Replanteo y nivelación..... 81

4.4.2 Desbroce, desbosque y limpieza..... 82

4.4.3 Retiro y acopio de capa vegetal..... 82

4.4.4 Conformación y compactación de la subrasante..... 82

4.4.5 Relleno..... 83

4.4.6 Acarreo de materiales..... 83

Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 85

REFERENCIAS..... 88

ANEXOS..... 89

Listado de Figuras.

Figura 2.1: Elementos que constituyen un dique..... 23

Figura 2.2: Dique de sección homogénea..... 23

Figura 2.3: Dique de sección graduada (De pantalla)..... 24

Figura 2.4: Dique de sección graduada (De núcleo)..... 24

Figura 2.5: Dique de secciones mixtas..... 24

Figura 2.6: Especificaciones para el diseño preliminar del núcleo..... 27

Figura 2.7: Especificaciones para el diseño de pantallas..... 28

Figura 2.8: Agrietamiento transversal..... 29

Figura 2.9: Grietas Longitudinales..... 30

Figura 2.10: Grietas interiores..... 30

Figura 2.11: Estado de fuerzas actuantes en una rebanada de terreno..... 33

Figura 2.12.: Coordenadas X_0 , Y_0 para el círculo crítico (Janbú 1968)..... 36

Figura 2.13: Factor de reducción por carga adicional por el método de Janbú..... 37



Figura 2.14: Factor de reducción por sumergencia (μ_w) e infiltración (μ_w').....	38
Figura 2.15: Factor de reducción por grieta de tracción sin presión hidrostática en la grieta	38
Figura 2.16: Factor de reducción por grieta de tracción con presión hidrostática en la grieta.	39
Figura 2.17: Numero de estabilidad N_{cf}	41
Figura 4.1: Esquema de pozo de infiltración para prueba de Porchet	57
Figura 4.2: Gráfica de descenso de nivel de agua en la grava compactada.....	59
Figura 4.3: Gráfica de descenso de nivel de agua en la arcilla compactada.	60
Figura 4.4: Gráfica de descenso de nivel de agua en la mezcla de arcilla y material de río cribado, compactados.....	61
Figura 4.5: Gráfica de descenso de nivel de agua en mezcla de arcilla y material de río sin cribar, compactados.....	62
Figura 4.6: Esquema del talud en la cara húmeda durante la operación.	63
Figura 4.7: Esquema de talud en la cara húmeda para el caso de vaciado rápido.....	63
Figura 4.8: Esquema de talud cara seca para el caso de vaciado rápido.	63
Figura 4.9: Esquema de la geometría y nomenclatura de diques para cálculo de cantidades de obra. ...	81

Listado de Tablas.

Tabla 2.1: Anchos de la corona en función de la altura del dique.	25
Tabla 2.2: Anchos de la corona en función del caudal de diseño.....	25
Tabla 2.3: Pendientes de taludes recomendados en función de la altura del dique.	26
Tabla 2.4: Pendientes de taludes recomendados en función de la altura del dique.	26
Tabla 2.5: Efectos de un sismo sobre los diques de tierra.	42
Tabla 3.1: Clasificación de las diferentes muestras de arcillas.	43
Tabla 3.2: Resultados del ensayo Proctor Estándar para las arcillas.....	44
Tabla 3.3: Propiedades mecánicas de las muestras de arcilla.....	44
Tabla 3.4: Resultados de los ensayos de permeabilidad de carga variable de las muestras de arcilla. ..	44
Tabla 3.5: Clasificación de las diferentes muestras de suelos granulares.	45
Tabla 3.6: Resultados de los ensayos de compactación Proctor Modificado del material granular.	45
Tabla 3.7: Clasificación de las diferentes muestras de la mezcla (arcilla y material de río cribado).....	46
Tabla 3.8: Resultado del ensayo de compactación Proctor Modificado de la mezcla (arcilla y material de río cribado).....	46
Tabla 3.9: Clasificación de las diferentes muestras de la mezcla (arcilla y material de río sin cribar).....	47
Tabla 3.10: Resultados del ensayo de compactación Proctor Modificado de la mezcla (arcilla y material de río sin cribar).....	47



Tabla 3.11: Control de compactación del dique conformado por material granular (60%) con pantalla de arcilla (40%) 54

Tabla 3.12: Control de compactación del dique conformado por la mezcla de arcilla (50%) y material granular de diámetro máximo 10 cm (50%) 55

Tabla 3.13: Control de compactación del dique conformado por la mezcla de arcilla (50%) y material granular sin cribar (50%)..... 55

Tabla 3.14: Control de compactación del dique conformado íntegramente de arcilla. 56

Tabla 4.1: Descenso de nivel de agua en la grava compactada. 58

Tabla 4.2: Descenso de nivel de agua en la arcilla compactada..... 59

Tabla 4.3: Descenso de nivel de agua en la mezcla de arcilla y material de río cribado, con un diámetro de partículas no mayores a 10 cm y compactado. 60

Tabla 4.4: Descenso de nivel de agua para mezcla de arcilla y material de río sin cribar, compactados. 61

Tabla 4.5: Resultados de pruebas de infiltración en campo empleando el Método de Porchet 62

Tabla 4.6: Cálculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 1. 66

Tabla 4.7: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 1. 67

Tabla 4.8: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara húmeda del dique # 2. . 68

Tabla 4.9: Cálculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 2. 69

Tabla 4.10: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 2. 70

Tabla 4.11: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara húmeda del dique # 3. 71

Tabla 4.12: Cálculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 3. 72

Tabla 4.13: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 3. 73

Tabla 4.14: Calculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara húmeda del dique # 4. 74

Tabla 4.15: Calculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 4. 75

Tabla 4.16: Calculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 4. 76

Tabla 4.17: Resultados del análisis de estabilidad empleando los ábacos de Janbú. 76

Tabla 4.18: Rubros utilizados para el análisis de costos de construcción de los diques..... 80

Tabla 4.19: Costos de replanteo y nivelación de los diques de prueba..... 81

Tabla 4.20: Costos de desbroce, desbosque y limpieza de los diques de prueba. 82

Tabla 4.21: Costos de retiro y acopio de capa vegetal de los diques de prueba..... 82

Tabla 4.23: Costos de relleno del dique # 1. 83

Tabla 4.24: Costos de relleno del dique # 2. 83

Tabla 4.25: Costos de relleno del dique # 3. 83



Tabla 4.26: Costos de relleno del dique # 4. 83
Tabla 4.27: Costos de acarreo de materiales del dique # 1. 84
Tabla 4.28: Costos de acarreo de materiales del dique # 2. 84
Tabla 4.29: Costos de acarreo de materiales del dique # 3. 84
Tabla 4.30: Costos de acarreo de materiales del dique # 4. 84
Tabla 4.31: Costos totales de construcción de los diques de prueba..... 84

Listado de Fotografías

Fotografía 1. Ubicación del Proyecto..... 89
Fotografía 2. Desbroce, desbosque y limpieza..... 90
Fotografía 3. Retiro y acopio de la capa vegetal..... 90
Fotografía 4. Conformación y preparación de la subrasante 91
Fotografía 5. Compactación de la subrasante 91
Fotografía 6. Excavación y obtención de arcilla en la mina. 92
Fotografía 7. Excavación y obtención de material granular en el margen del río Cañar..... 92
Fotografía 8. Cribado del material granular proveniente del río..... 93
Fotografía 9. Colocación de materiales. 93
Fotografía 10. Colocación de materiales 94
Fotografía 11. Mezcla de materiales..... 94
Fotografía 12. Material arcilloso compactado con rodillo vibratorio pata de cabra, autopulsado..... 95
Fotografía 13. Material granular compactado con rodillo vibratorio liso, autopulsado. 95
Fotografía 14. Comprobación del porcentaje de compactación y control de humedad. 96
Fotografía 15. Verificación de cotas luego del colocado de cada capa. 96
Fotografía 16. Conformación del dique mediante capas 97
Fotografía 17. Perfilado de taludes..... 97



Lista de Símbolos

H	Altura del dique.
I_p	Índice plástico.
$N.A.M$	Nivel de aguas máximo.
$N.A.N$	Nivel de aguas normales.
LL	Límite líquido.
LP	Límite plástico.
GW	Grava bien graduada.
GP	Grava mal graduada.
CH	Arcilla de alta plasticidad.
$\omega_{\text{ópt}}$	Humedad óptima.
$\rho_d\text{-máx}$	Densidad seca máxima.
P	Carga sobre la superficie de rotura.
W	Peso de la cuña de tierra.
q	Sobrecarga ejercida en el suelo.
α	Ángulo que forma la superficie de rotura con la horizontal.
Φ	Ángulo de rozamiento interno del terreno.
c	Cohesión del terreno
Δx	Grosor de la rebanada
D	Factor de profundidad.
γ	Peso específico del suelo.
A	Superficie de la cuña del terreno que forma la rebanada.
H_w	Altura de agua fuera del talud.
γ_w	Peso unitario del agua.
μ_q	Factor de reducción por sobrecarga.
μ_w	Factor de reducción por sumergencia.
μ_t	Factor de reducción por grieta de tensión.
N_{cf}	Número de estabilidad.
FS	Factor de seguridad.
D_{10}	Diámetro efectivo.
C_u	Coeficiente de uniformidad.
$\rho_d\text{-terraplén}$	Densidad seca del terraplén
$\rho_d\text{-máx}$	Densidad seca máxima
f	Tasa de infiltración.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, Edgar Antonio Lligüi Ortega, autor de la tesis "ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ECONÓMICO COMPARATIVO ENTRE DIQUES CONSTRUIDOS CON MATERIALES ARCILLOSOS Y GRAVOSOS, EN EL PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES DEL RÍO CAÑAR", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Febrero de 2014

Edgar Antonio Lligüi Ortega
C.I. 0301851317

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Paul Eduardo Ñauta Ñauta, autor de la tesis "ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ECONÓMICO COMPARATIVO ENTRE DIQUES CONSTRUIDOS CON MATERIALES ARCILLOSOS Y GRAVOSOS, EN EL PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES DEL RIO CAÑAR", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Febrero de 2014

Paul Eduardo Ñauta Ñauta
C.I. 0104370788

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999
Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Edgar Antonio Lligüi Ortega, autor de la tesis "ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ECONÓMICO COMPARATIVO ENTRE DIQUES CONSTRUIDOS CON MATERIALES ARCILLOSOS Y GRAVOSOS EN EL PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES DEL RIO CAÑAR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Febrero de 2014

Edgar Antonio Lligüi Ortega

C.I. 0301851317

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca – Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Paul Eduardo Ñauta Ñauta, autor de la tesis "ANÁLISIS GEOTÉCNICO-ECONÓMICO COMPARATIVO ENTRE DIQUES CONSTRUIDOS CON MATERIALES ARCILLOSOS Y GRAVOSOS EN EL PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES DEL RIO CAÑAR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Febrero de 2014

Paul Eduardo Ñauta Ñauta

C.I. 0104370788

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



DEDICATORIA

A mis padres quienes con su cariño y esfuerzo, han sido el pilar fundamental, para poder concluir con éxito esta etapa importante en mi vida.

A mis hermanos Zoila, Laura, Isabel y Milton, que han sido parte importante y un apoyo más a lo largo de toda mi carrera universitaria, ya que con su cariño y sus consejos me supieron siempre dar el aliento necesario para seguir adelante, en pos de mis metas.

A mi amigo Paul con quien durante toda la carrera hemos compartido momentos gratos y momentos duros, pero al final de todo este esfuerzo, hoy hemos logrado concluir con éxito la meta propuesta.

Edgar



DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida profesional.

A mis padres Ignacio y Balvina, quienes siempre me acompañaron durante mi trayecto estudiantil y de vida, demostrándome siempre su cariño y apoyo incondicional, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis hermanos Mayra, Freddy, Andrea y María, quienes siempre estuvieron junto a mí alentándome y guiándome en cada decisión que tomé, confiando siempre en mis conocimientos y demostrándome con el ejemplo que con sacrificio todo es posible en la vida.

A Edgar, porque además de ser un buen compañero ha demostrado ser un buen amigo durante toda mi carrera universitaria y gracias al equipo que formamos logramos concluir esta meta.

A mi enamorada Mónica, a quien amo mucho y ha sido mi motivación y apoyo para la culminación de este trabajo.

Paúl



AGRADECIMIENTO

Al Ing. MSc. Rolando Armas Novoa director de nuestro proyecto de tesis, quien con toda su sabiduría y experiencia nos ha guiado a lo largo de todo el proyecto.

Al Ing. MSc. Jorge León, amigo y compañero de trabajo, quien ha aportado mucho con sus conocimientos en nuestra tesis.

A los Ing. Rubén Jerves y Esteban Pacheco, quienes fueron los gestores para que nuestra tesis se realice en un proyecto de gran importancia para el país, y en cual logramos adquirir gran experiencia en el campo laboral.

Al Ing. Gerard Fernández Subdirector del Consorcio Cañar, quien nos ha brindado su apoyo incondicional para que nuestro trabajo pueda concluirse de la mejor manera.

A todos los compañeros y amigos del Consorcio Cañar, y a cada una de las personas que de una u otra manera han contribuido en la consecución del mismo.

*Edgar Lligüi
Paúl Ñauta*



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.

1.1 Introducción.

Las Inundaciones de la época invernal que han afectado a la cuenca baja del río Guayas han sido un problema de todos los años. Es por esto que el Gobierno Nacional, fundamentado en sus Planes y Políticas de Desarrollo, así como en el estado de emergencia que generaron las inundaciones de la estación invernal del año 2008, asignó recursos para la realización de varios estudios por lo que, en cumplimiento de sus funciones institucionales, SENAGUA, consideró el proyecto de Control de Inundaciones del Río Cañar.

El proyecto consiste en la implementación de un sistema integral de medidas de ingeniería para el control de inundaciones y estabilización de cauces en los sistemas hídricos, siendo una de las obras más importantes la construcción de diques de protección aprovechando los materiales existentes en la zona y con el objetivo de establecer defensas fluviales para contrarrestar las inundaciones y desbordes que conllevan consecuencias socio-económicas graves, tras 36 años de espera por los habitantes de esta zona beneficiada.

En el proyecto control de inundaciones del río Cañar, los diques vienen a ser estructuras empleadas con el objetivo de disipar la energía proveniente de la corriente del río y encauzarla por su lecho natural; como consecuencia protegiendo áreas aledañas; en su gran mayoría zonas agrícolas, siendo de gran importancia económica para la población afectada.

Debido a todos estos factores, la construcción de los diques de prueba se convierte en una obra de gran importancia en la ejecución del proyecto; ya que solo mediante un análisis geotécnico de los mismos se podrá determinar si las alternativas de diques planteadas, cumplen con los parámetros necesarios para obtener un correcto funcionamiento y desempeño de estos. Además, gracias a estos ensayos experimentales, se dispondrá de una metodología constructiva adecuada, para lograr un mayor rendimiento en la construcción definitiva de los diques.



En este proyecto las alternativas planteadas se construyeron con materiales arcillosos y granulares existentes en la zona, de la siguiente manera:

Dique # 1.- Este dique está constituido por material granular proveniente del río (60%) con una pantalla de arcilla (40%).

Dique # 2.- Este dique está constituido de una mezcla entre arcilla (50%) y material granular proveniente del río (50%), con diámetro máximo de 10cm.

Dique # 3.- Este dique está constituido de una mezcla entre arcilla (50%) y material granular de río sin cribar (50%).

Dique # 4.- Este dique está constituido íntegramente de arcilla (100%).

1.2 Objetivo General

Analizar desde el punto de vista geotécnico, el proceso constructivo de los diques de prueba, para determinar la opción más apropiada, a fin de implementarse en el proyecto Control de inundaciones del Río Cañar.

1.3 Objetivos Específicos

- Establecer una metodología de construcción apropiada, mediante la construcción a escala real de 4 diques de prueba.
- Analizar los parámetros y características de los materiales utilizados en cada dique.
- Analizar la estabilidad, permeabilidad y los factores que pueden producir fallas en las estructuras.

1.4 Justificación.

Las estructuras más importantes empleadas en el control de inundaciones serán los diques ubicados a lo largo de las márgenes de los ríos, para lo cual es necesario conocer la opción más adecuada para su posterior empleo y construcción en el proyecto, es decir analizar y determinar la que cumpla con todos los parámetros geotécnicos requeridos y, a la vez, que sea de fácil construcción y con el menor costo.



Una elección adecuada de dique, es decir, que cumpla con los criterios de diseño necesarios para un correcto funcionamiento, y que sea económicamente favorable para el proyecto; mitigará los riesgos bio-ambientales que generan las precipitaciones en sectores de alto conflicto de las provincias del Guayas y Cañar, que integran parte de sus cuencas hidrográficas.

La implementación de los diques permitirá el desarrollo social y económico de la región y facilitará fomentar mecanismos que demanda la conservación y remediación ambiental, dados los riesgos de desastres naturales que son comunes en las partes media y baja de la cuenca del río Guayas.

1.5 Alcance.

El presente estudio tiene como finalidad analizar desde un punto de vista geotécnico el proceso constructivo de diques de materiales locales, provenientes de la zona, para el proyecto control de inundaciones del Rio Cañar; con la finalidad de determinar la opción más adecuada y económica a emplearse en el proyecto.

El análisis se determinará de manera experimental con la construcción de cuatro diques a escala real, los mismos que se construirán con diferentes dosificaciones de material y con distintas especificaciones constructivas, con el propósito de establecer el modelo de dique más conveniente, que cumpla con todos los parámetros geotécnicos necesarios para obtener un dique estable, económico y de fácil construcción.



CAPITULO 2: MARCO TEORICO.

2.1 Nociones generales.

Los suelos son el más antiguo de los materiales de construcción y el más complejo de cuantos se conocen. Su variedad es enorme y sus propiedades, variables en el tiempo y el espacio, son difíciles de entender y medir. El siglo XX constituyó el de mayor esfuerzo de los científicos para resolver los problemas que enfrentaba la Mecánica de Suelos y con ello el diseño y construcción de presas de tierra.[2]

Las presas de tierra han sido utilizadas desde los principios de la civilización para embalsar agua para riego [1]. El diseño y construcción de una presa de materiales locales se realiza con el objetivo de garantizar que no se produzcan fallas graves o catastróficas a lo largo de su vida útil [2].

Los diques se diferencian de las presas de tierra en el tiempo en que se encuentran expuestos a la acción del agua. Como las presas sirven para almacenar agua, están expuestas durante todo el tiempo a la acción del agua, no así los diques que al ser obras construidas para el control de inundaciones, éstas actúan únicamente durante las crecidas de los ríos, es decir durante cortos periodos de tiempo.

2.2 Clasificación de los diques.

La clasificación de los diques se lo hace de dos maneras, dependiendo del material de construcción, y de la forma de resistir la acción de las fuerzas producidas por el agua.

Según los materiales de construcción:

- Diques de materiales locales.
- Diques de hormigón armado.
- Diques de otros materiales.

Según la forma de resistir las fuerzas producidas por el agua:



- Diques de gravedad.
- Diques de arco.
- Diques de contrafuertes.
- Diques anclados.

Los diques que se construyen en el proyecto control de inundaciones del río Cañar son diques de materiales locales y, como su propio peso es el encargado de resistir el empuje del agua, se los clasifica como diques de gravedad.

En los diques de gravedad el empuje del agua es transmitido hacia el suelo, por lo que éste debe ser suficientemente estable para soportar el peso del dique y del empuje del agua. Constituyen los diques de mayor durabilidad y que menor mantenimiento requieren.

2.3 Definición de términos.

Los principales partes que constituyen un dique son:

Corona: Sirve de vía de circulación para los diques una vez terminados. Es necesario emplear equipos de compactación para una adecuada terminación y posterior uso como vía.

Dentellón: Permite cortar o disminuir el flujo de agua a través del cimientó.

Revestimientos: Sirven de protección de los taludes contra la acción del flujo de agua en la cara húmeda y de la acción de la lluvia en la cara seca.

Núcleo y pantalla: Disminuyen el caudal de filtración en los diques.

Espaldón: Prisma de material aguas arriba y aguas abajo que sirven para dar estabilidad a los diques.

Nivel de Aguas Normales (NAN): Es el máximo nivel que puede alcanzar el agua del embalse en un régimen normal de explotación, sin que se produzca el vertido en el aliviadero.

Nivel de Aguas Máximas (NAM): Es el máximo nivel de diseño que se alcanza en el embalse si se produce la creciente extrema, es decir la acción laminadora, definida por los hidrólogos.

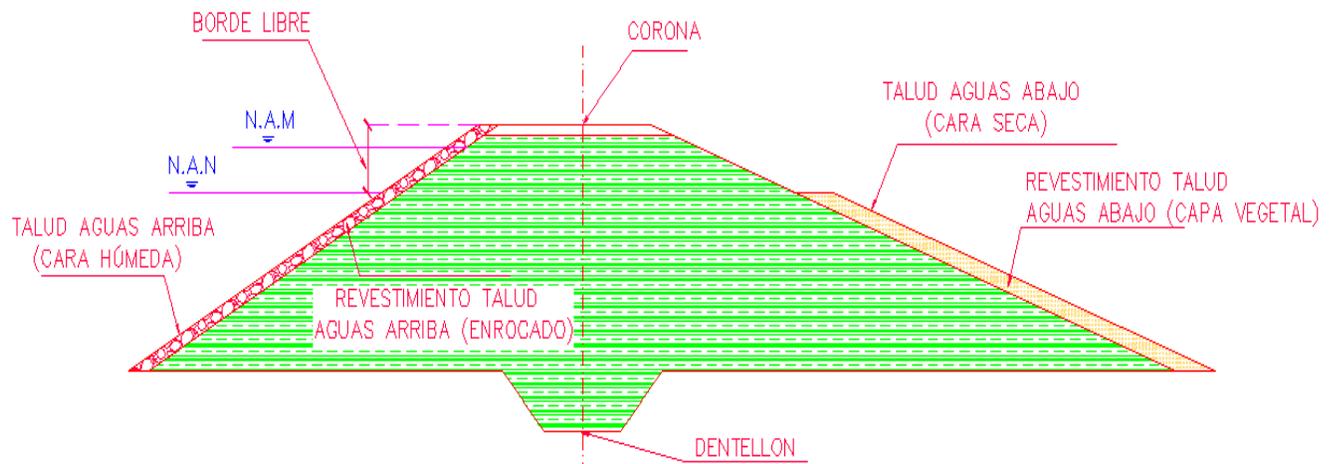


Figura 2.1: Elementos que constituyen un dique.

2.4 Clasificación de los diques.

Los diques construidos con materiales locales se clasifican también en tres grupos, dependiendo del material que estén constituidas.

2.4.1 Secciones homogéneas.- Este tipo de diques están constituidos de un solo material (arcilla, arena arcillosa, limo, arena, etc.). También pueden tener otros materiales que no contribuyen en nada a la estabilidad de la presa, como los enrocamientos en la cara húmeda y el recubrimiento de capa vegetal en la cara seca, que sirven para la protección de los taludes únicamente.(Figura 2.2)

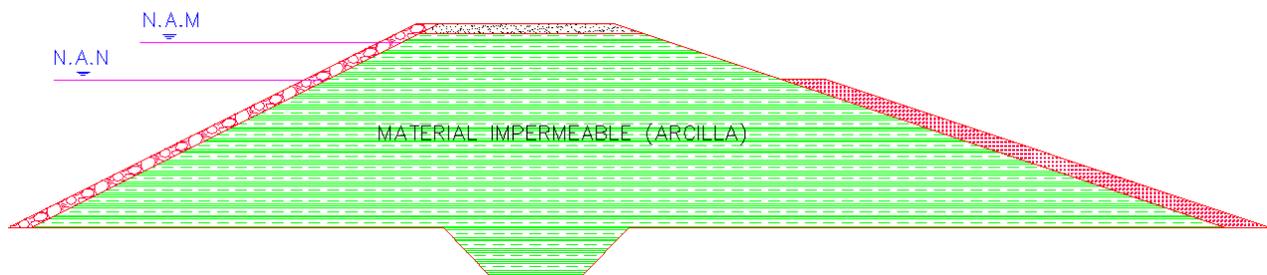


Figura 2.2: Dique de sección homogénea.

2.4.2 Secciones graduadas.- Las secciones de estos diques están constituidos de varios materiales que son colocados en orden, con cantidades similares; estos diques se pueden dividir además en diques de pantalla y de núcleo, dependiendo de la colocación de los materiales.

De pantalla: Si los materiales impermeables están colocados hacia la cara húmeda. (Figura 2.3)

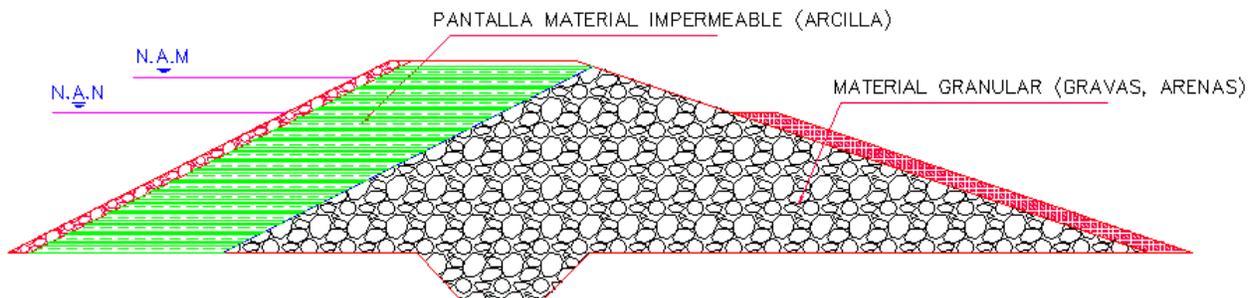


Figura 2.3: Dique de sección graduada (De pantalla).

De núcleo: Si los materiales impermeables están colocados en el centro del dique y rodeados de los materiales permeables. (Figura 2.4)

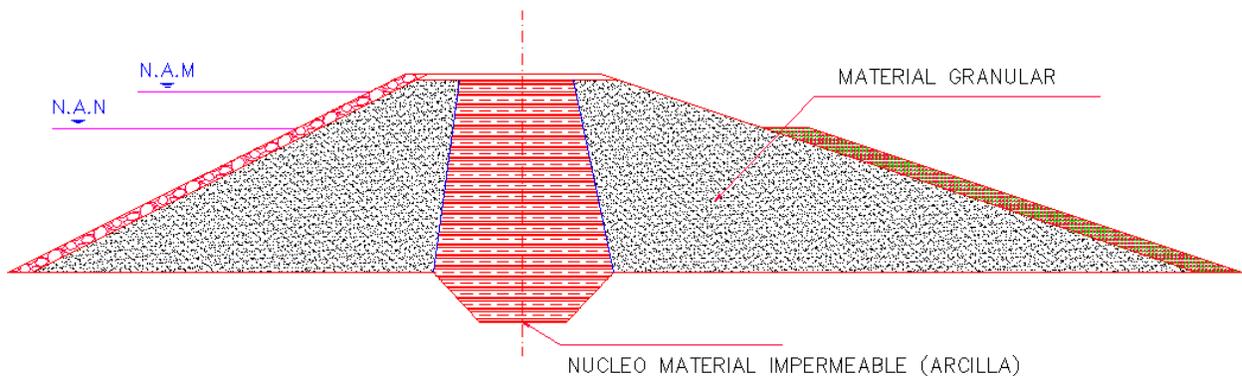


Figura 2.4: Dique de sección graduada (De núcleo).

2.4.3 Secciones mixtas.- Son diques que constan de dos materiales; uno impermeable y otro resistente, con capas de filtro entre uno y otro. Pueden ser de pantalla y de núcleo. (Figura 2.5)

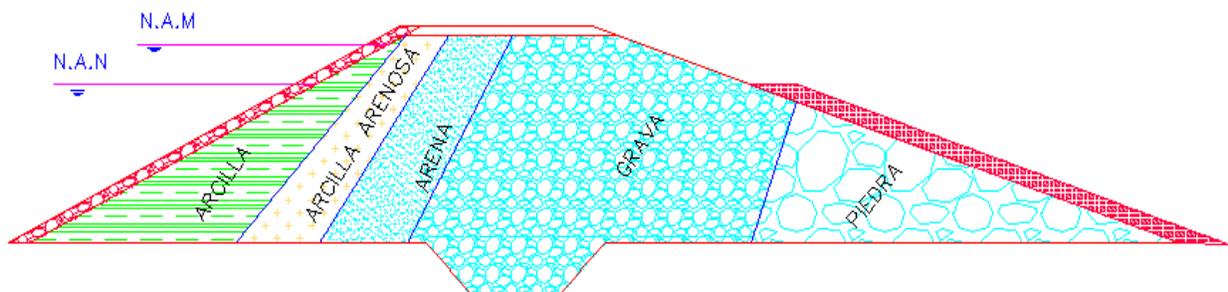


Figura 2.5: Dique de secciones mixtas.



2.5 Criterios preliminares de diseño.

En el diseño preliminar de los diques se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

2.5.1 Altura del Dique.- La altura del dique se determina con el estudio hidrológico, mediante el nivel de agua que puede alcanzar el río cuando se produzca una crecida máxima. Hay que considerar, además en la altura del dique, el borde libre, que es la distancia vertical medida desde la cota de la corona a la cota del nivel de aguas normales.

La altura de los diques establecidos en el diseño definitivo del proyecto Control de Inundaciones del río Cañar es de 4m.

2.5.2 Ancho de la corona.- Para definir el ancho de la corona algunas publicaciones dan sugerencias, en función de la altura del dique; estas sugerencias se presentan en la Tabla 2.1

Altura de la presa (H) (m)	Ancho de la corona (m)
$H \leq 15$	4
$15 < H \leq 30$	5
$H > 30$	> 5

Tabla 2.1: Anchos de la corona en función de la altura del dique.

Así también, otras publicaciones dan sugerencias para el ancho de la corona de los diques, en función del caudal de descarga; así, si el caudal a descargarse es menor a $500 \text{ m}^3/\text{s}$, se recomiendan coronas de mínimo 4 m de ancho y si los caudales de descarga están entre 500 y $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, se recomienda disponer de coronas de al menos 5 m de ancho; como se observa en la Tabla 2.2

Caudal de Diseño (m^3/s)	Ancho de la Corona (m)
< 500	4
500 - 2000	5

Tabla 2.2: Anchos de la corona en función del caudal de diseño.

El ancho de corona, establecido en función de los caudales para los que se ha diseñado el proyecto Control de Inundaciones del río Cañar, es de 4m.



2.5.3 Taludes Laterales.- Para determinar la inclinación de los taludes del dique se debe tener en cuenta algunas consideraciones, como la altura del dique, el tipo de material del que está constituido, el tipo de cimiento y las fuerzas que actúan sobre los taludes. Sin embargo, el valor definitivo de la pendiente se lo determina mediante el cálculo de estabilidad de taludes, por lo que normalmente se supone un valor y luego se comprueba.

En la Tabla 2.3 se dan algunos valores más usuales para presas homogéneas de suelos arcillosos sobre cimientos rígidos.

ALTURA DE LA PRESA (H) (m)	PENDIENTE DE LOS TALUDES	
	CARA HÚMEDA	CARA SECA
$H \leq 10$	1V:2H	1V:1.5H
$10 < H \leq 15$	1V:2H - 1V:2.5H	1V:1.5H - 1V:2H
$15 < H \leq 30$	1V:2.5H - 1V:3H	1V:2H - 1V:2.5H
$30 < H \leq 50$	1V:3H - 1V:3.5H	1V:2.5H - 1V:3H
$H > 50$	1V:4H - 1V:5H	1V:3.5H - 1V:4H

Tabla 2.3: Pendientes de taludes recomendados en función de la altura del dique.

En la Tabla 2.4 se presenta más valores de inclinación de taludes en función del tipo de material del dique.

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	PENDIENTE DE LOS TALUDES	
	CARA HÚMEDA	CARA SECA
GW, GP, SW, SP	No adecuado	No adecuado
GC, GM, SC, SM	1V:2.5H	1V:2H
CL, ML	1V:3H	1V:2.5H
CH, MH	1V:3.5H	1V:2.5H

Tabla 2.4: Pendientes de taludes recomendados en función de la altura del dique.

2.5.4 Revestimiento de taludes.- Generalmente debido a los materiales utilizados en la construcción de los diques, es necesario protegerlos de la erosión y de las filtraciones de agua. Los factores que debemos tener en cuenta para determinar el tipo de revestimiento son:

- Fluctuaciones del nivel del embalse
- Material del dique
- Condiciones climáticas
- Importancia de la obra

Los revestimientos utilizados para la cara húmeda pueden ser de diferentes tipos:

- Enrocamiento.
- Losas de hormigón.
- Hormigón asfáltico.
- Estabilización con cemento.
- Césped.

En la cara seca el revestimiento es necesario debido a la erosión que provoca la lluvia; existen dos tipos de revestimiento:

- Capas de grava y piedras.
- Capa vegetal.

2.5.5 Núcleo.- El dimensionamiento preliminar del núcleo puede determinarse mediante un análisis contra el agrietamiento.

El ancho de la parte superior del núcleo dependerá de las condiciones constructivas de la obra por lo que el ancho oscila entre 3 – 4 m. El ancho del núcleo en la base del dique depende de las gradientes de filtración, las mismas que no pueden ser mayores de diez ni menores a cuatro.

En la Figura 2.6 se muestran las especificaciones para el diseño preliminar del núcleo.

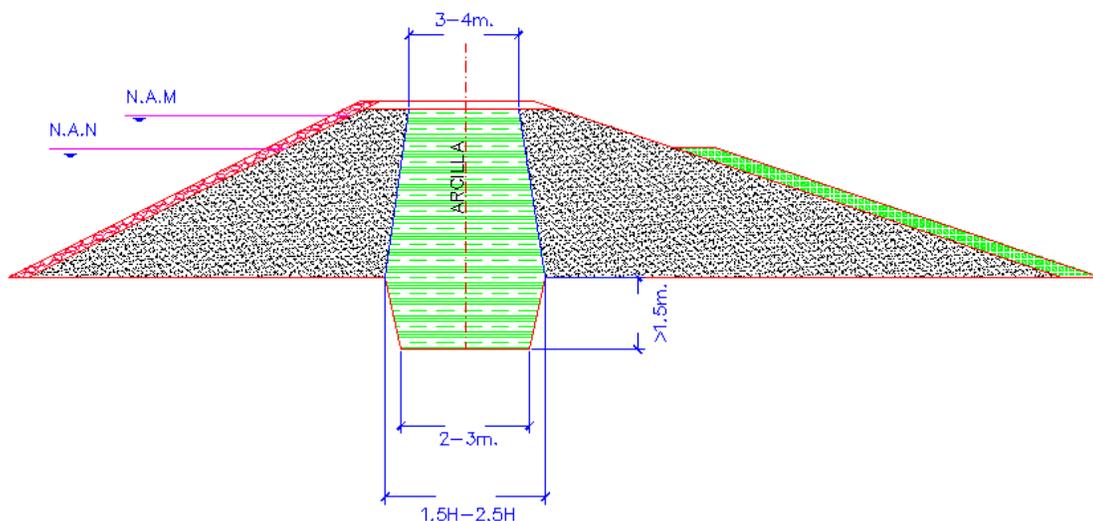


Figura 2.6: Especificaciones para el diseño preliminar del núcleo.

2.5.6 Pantallas.- Las pantallas se construyen de preferencia de suelos arcillosos, las pantallas rígidas se usan rara vez.

Las especificaciones para determinar espesor, y la elevación por encima del nivel máximo son las mismas que para los núcleos. Se debe cubrir las pantallas con una capa de 1.5 – 2 m de material grueso con su filtro.

En la Figura 2.7 se muestra las especificaciones para pantallas.

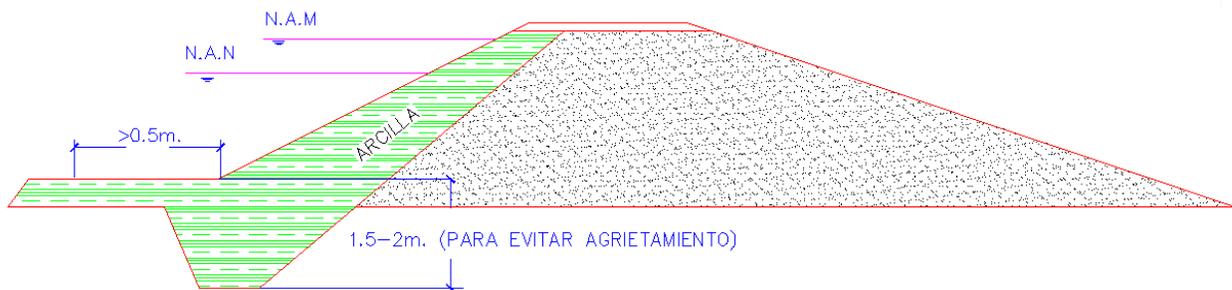


Figura 2.7: Especificaciones para el diseño de pantallas.

2.5.7 Unión del cuerpo de la presa con el cimiento.- Para que exista una unión segura entre el dique y el cimiento, y así reducir al máximo las filtraciones se deben tomar las siguientes medidas:

- ✓ Eliminar la capa vegetal o materiales sueltos en el sitio de construcción del dique.
- ✓ Prolongar los elementos impermeables hasta la profundidad necesaria
- ✓ Asegurar que en la unión con otras estructuras el flujo tenga velocidades que no produzcan arrastre de partículas de suelo impermeable. Para lograr esto se debe garantizar una buena compactación en la unión del dique con el cimiento.

2.6 Tipos de fallas de los diques.

Las fallas que pueden ocurrir en los diques de materiales locales es la principal preocupación de los diseñadores, inversionistas, y de todas las personas que pueden ser afectadas por las fallas de los mismos.

Las fallas graves o catastróficas en presas de materiales locales según el orden de ocurrencia son:

1. Agrietamiento.
2. Sifonamiento mecánico.
3. Deslizamiento de taludes.
4. Pérdidas por filtración.
5. Sismos.
6. Licuación.

A continuación presentamos las principales características de estos tipos de fallas en los diques, así como sus medidas y medios para evitar que ocurran.

2.6.1 Agrietamiento.- El agrietamiento puede presentarse por deformación de la cortina en donde se presentan posibles zonas de tracción.

Se reportan como agrietamientos, aquellos que no pueden pasar inadvertidos, pero posiblemente muchas fallas de presas que se achacan a otras causas, principalmente sifonamiento, tienen su origen en la aparición de grietas y fisuras no muy grandes en la masa del suelo [3].

El agrietamiento ocurre cuando se presentan deformaciones diferenciales en diferentes partes del terraplén, produciéndose zonas de tracción. Las grietas pueden ser transversales y longitudinales.

2.6.1.1 Grietas transversales.- Las grietas transversales son muy peligrosas, pues atraviesan el dique desde la cara húmeda hasta la cara seca, facilitando el flujo en la zona del terraplén.

Se originan por asentamientos diferenciales en tramos adyacentes del terraplén; el agrietamiento se agrava si el terreno en la zona del cauce está formado por estratos compresibles. La Figura 2.8 muestra un agrietamiento transversal.

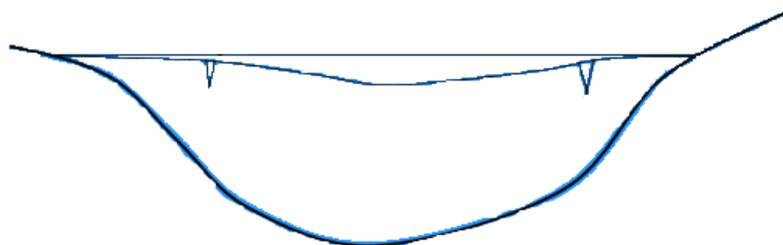


Figura 2.8: Agrietamiento transversal [3].

2.6.1.2 Grietas longitudinales.- Son menos peligrosas que las transversales, se presentan a menudo en presas grandes que tiene espaldones de enrocamiento. En la Figura 2.9 se muestra este tipo de agrietamiento.

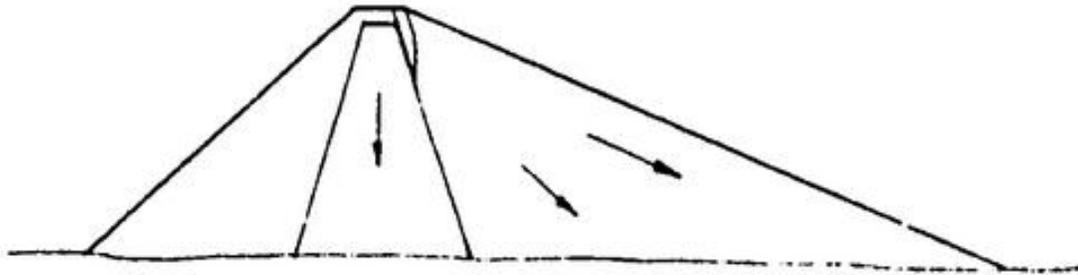


Figura 2.9: Grietas Longitudinales [3].

2.6.1.3 Grietas interiores.- Estas grietas son invisibles, ya que se pueden producir en zonas cubiertas con capas de grava que las ocultan. Pueden producirse cuando un tramo corto de terraplén se asienta sobre una zona mucho más comprensible que las demás zonas bajo el terraplén; cuando se pronostique esto se debe compactar los materiales impermeables del lado húmedo.

La Figura 2.10 muestra un tipo de agrietamiento interno.

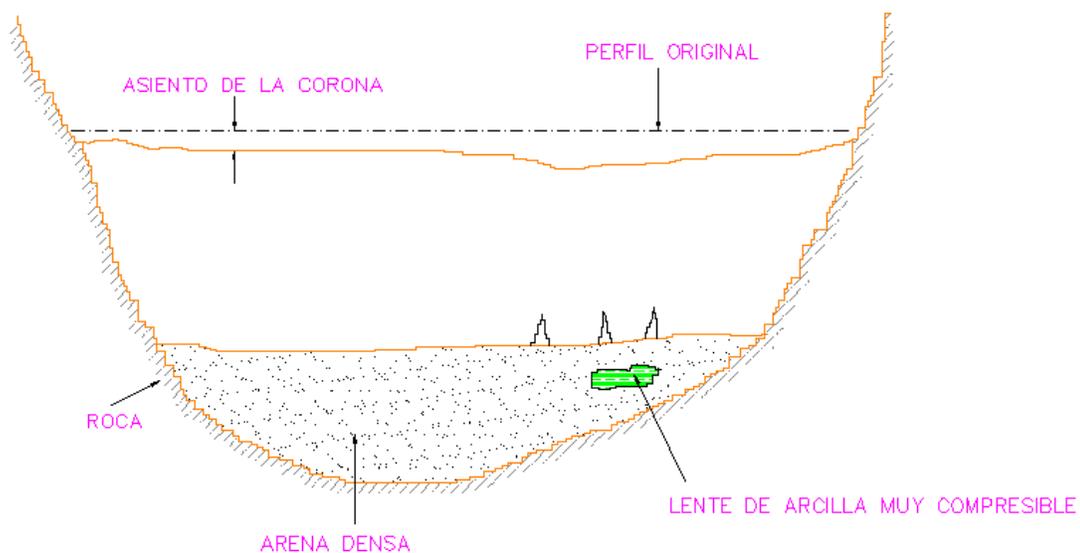


Figura 2.10: Grietas interiores [3].



En la actualidad existen métodos matemáticos que nos ayudan a pronosticar las posibles zonas de tracción y agrietamiento en los diques.

La medida más acertada para evitar que se produzcan fallas por agrietamientos es la selección de la forma de compactar los suelos arcillosos; los suelos compactados en el lado húmedo son más flexibles que los compactados en lado seco.

2.6.2 Sifonamiento mecánico.- Se produce cuando una fuga de agua se concentra y erosiona el suelo progresivamente, hasta formar un conducto que une al embalse con el pie del talud aguas abajo [3].

Uno de los principales factores que influyen en el sifonamiento es la deficiencia en la compactación del terraplén, que deja alguna capa suelta o floja.

Otro motivo, y no menos importante, de falla de los diques se debe a la presencia de arcillas dispersivas; estos tipos de suelos se erosionan debidos a que las partículas coloidales se quedan en suspensión en el agua.

Algunos requerimientos para evitar que se produzca el sifonamiento son la homogeneidad del terraplén y el grado de compactación. En la práctica moderna se incluye también medidas para evitar el fenómeno, tales como:

- Disminuir el gradiente hidráulico bajo la presa, con lo que se logra reducir la velocidad del agua y, por ende, la erosión de las partículas.
- Control de salida de agua, para que no se produzcan arrastre de partículas, para lo cual se construye filtros y drenajes. Esta medida hace que disminuya la presión de poros en la zona donde se instalan, por lo tanto aumenta la resistencia del suelo.

2.6.3 Deslizamiento de taludes.- El deslizamiento de taludes ocurre cuando por una determinada superficie de falla se presentan esfuerzos de corte mayores que la resistencia del suelo. El fallo por deslizamientos de taludes ha sido una causa frecuente en diques de tierra.

Los fallos por deslizamientos de talud se han producido con mayor frecuencia durante los primeros cinco años de construido el dique.

Los suelos muy finos están también asociados a la mayoría de deslizamientos ocurridos.



Los deslizamientos pueden agruparse de tres maneras:

- ✓ **Deslizamientos durante la construcción:** no producen pérdidas de vidas humanas, pero sí daños materiales costosos. Ocurren cuando la base del dique es de arcilla blanda, frágil o sensitiva.
- ✓ **Deslizamiento del talud aguas abajo durante la operación:** tienen más grado de peligrosidad. Se producen debido a que las presiones de poro de la red de flujo disminuyen las tensiones efectivas y por lo tanto, la resistencia a cortante es inferior al esfuerzo cortante aplicado.
- ✓ **Deslizamiento del talud aguas arriba luego de un vaciado rápido:** suele producirse durante el primer vaciado, puede ser catastrófico únicamente si se ubicara sobre la obra de toma, pues se interrumpiría el desagüe y por ende se produce el rebase de la cortina.

Los métodos de análisis de estabilidad de taludes se encasillan entre los de análisis límite, que consisten en imaginar un mecanismo de falla para el talud y aplicar a tal mecanismo los criterios de resistencia del material, de manera de ver si, con tal resistencia, hay o no posibilidad de que el mecanismo supuesto llegue a presentarse.

Existen varios métodos de análisis cuantitativo, la mayoría de ellos son de origen semi-empírico, que tratan de relacionar las características del suelo con las sollicitaciones a las que este se ve sometido.

Uno de los métodos más simples para el cálculo del factor de seguridad, es el método de Fellenius, el mismo que consiste en dividir la cuña de deslizamiento en rebanadas, estudiando el estado de fuerzas de cada una de ellas, como se muestra en la Figura 2.11.

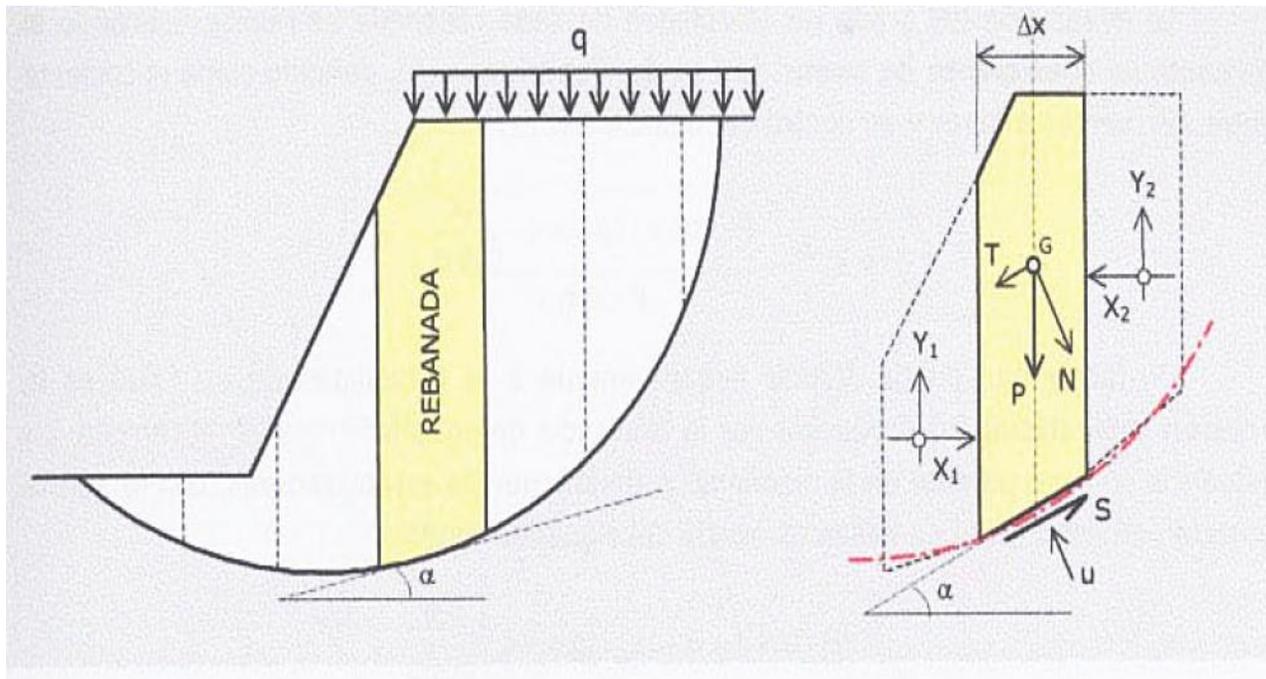


Figura 2.11: Estado de fuerzas actuantes en una rebanada de terreno.

En este método, el factor de seguridad se obtiene de la relación entre las fuerzas estabilizadoras y las fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre cada rebanada, por lo que para obtener un talud estable es necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superiores a las desestabilizadoras

Las fuerzas estabilizadoras (S) están compuestas por las fuerzas cohesión y rozamiento interno del terreno

$$S = F_R + F_C = P \cos \alpha \tan \phi + c \frac{\Delta x}{\cos \alpha} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

P es la carga sobre la superficie de rotura ($P = W + q\Delta x$, siendo W el peso de la cuña de tierra y q la sobrecarga de uso)

α es el ángulo que forma la superficie de rotura con la horizontal.

ϕ es el ángulo de rozamiento interno del terreno

c es la cohesión del terreno

Δx es el grosor de la rebanada



Las fuerzas desestabilizadoras (T) se identifican con la componente tangencial de las cargas sobre la superficie de rotura.

$$T = P \sin \alpha = (W + q\Delta x) \sin \alpha = (\gamma A + q\Delta x) \sin \alpha \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

γ = Peso específico del suelo

A = Superficie de la cuña del terreno que forma la rebanada.

La estabilidad, como se mencionó anteriormente, se determina mediante el factor de seguridad (F), que es el coeficiente entre la fuerzas a favor y en contra del deslizamiento, por lo tanto.

$$F = \frac{S}{T} \quad \text{Ec. 3}$$

Para los taludes simples homogéneos, como es el caso de los taludes de nuestro proyecto, se han desarrollado ábacos que permiten un cálculo rápido del factor de seguridad. Existe una gran cantidad de métodos desarrollados por diferentes autores.

El primero de estos métodos fue desarrollado por Taylor en 1966. Desde entonces, han sido presentados varios métodos sucesivamente por Bishop y Morgenstern (1960), Hunter y Schuster (1968), Janbú (1968), Morgenstern (1963), Spencer (1967), Terzaghi y Peck (1967) y otros.

Para el análisis de estabilidad de taludes de los diques de prueba del proyecto Control de Inundaciones del río Cañar, se empleará los ábacos de Janbú.

2.6.3.1 Procedimiento a seguir para determinar el factor de seguridad mediante los ábacos de Janbú para $\phi > 0$.

El método desarrollado por Janbú (1968) permite el análisis de diferentes condiciones geotécnicas y factores de sobrecarga en la corona del talud, incluyendo los niveles freáticos y grietas de tensión. A continuación se presenta el procedimiento a seguir para la determinación del factor de seguridad.

1. Parámetros que se requieren para el análisis.

- Altura de cada suelo H (metros)



- Pendiente del talud β (grados)
- Cohesión del suelo C_u (kN/m^2)
- Altura del nivel freático H_w (m)
- Peso específico del suelo γ (kN/m^3)
- Perfil geotécnico incluyendo todos los mantos del suelo
- Profundidad hasta el manto de suelo duro impenetrable D (metros)

2. Calcular el factor de profundidad “d”.

Para calcular el factor “d” se emplea la siguiente ecuación:

$$d = \frac{H_w}{H} \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

H_w = Altura del nivel freático

H = Profundidad del pie del talud al punto más bajo del círculo de falla.

3. Obtener la localización del círculo crítico (X_o , Y_o).

Para determinar la localización del centro del círculo crítico X_o , Y_o , se emplea la Figura 2.12. Para los taludes más empinados $\beta > 53^\circ$, el círculo crítico pasa por el pie. Para taludes con $\beta < 53^\circ$, el círculo crítico pasa tangente a la superficie firme o roca.

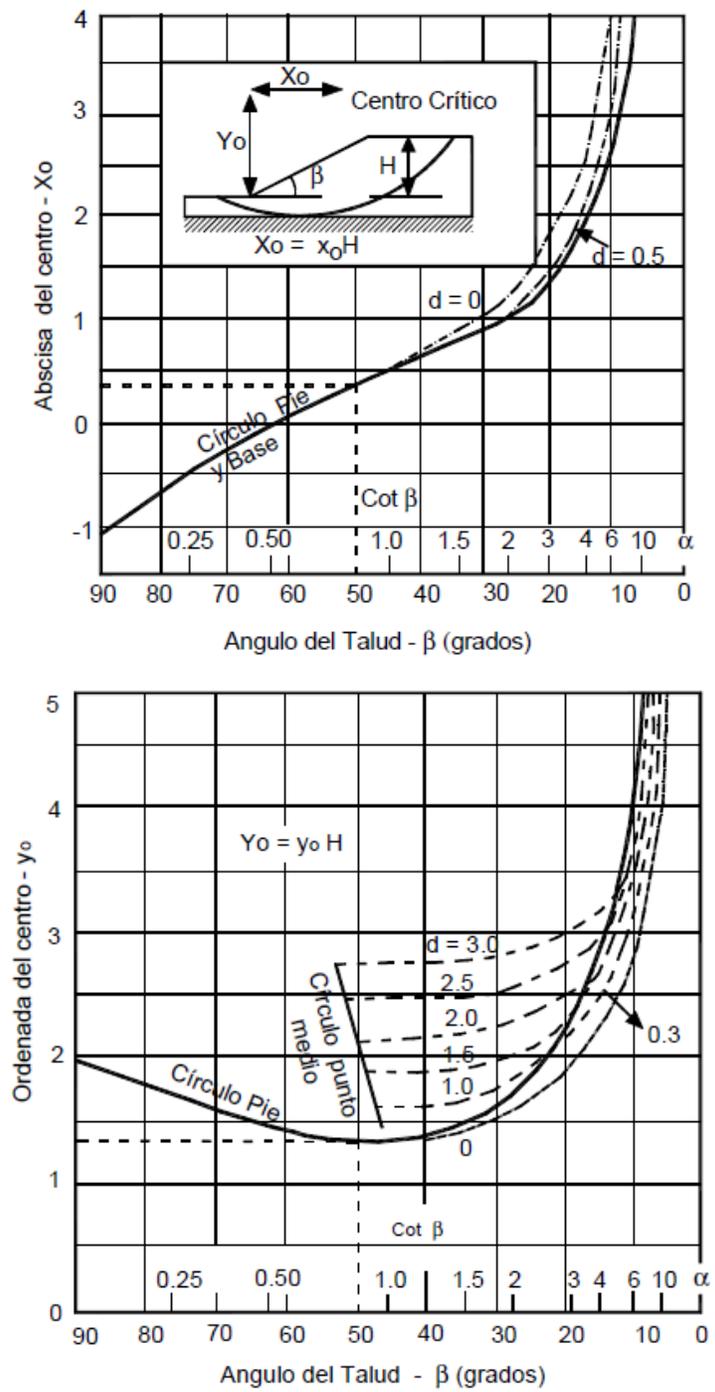


Figura 2.12.: Coordenadas X_0, Y_0 para el círculo crítico (Janbú 1968)

4. Calcular C promedio.

Utilizando como guía el círculo estimado, se determina el valor promedio de la resistencia C . Esto se realiza calculando el promedio ponderado de las resistencias a lo

largo del arco de falla, con el número de grados interceptado por cada tipo de suelo como factor de ponderación.

5. Calcular el factor de reducción.

Puede encontrarse factor de reducción por carga adicional, factor de reducción por sumergencia e infiltración, factor de reducción por grieta de tracción sin presión hidrostática en la grieta y factor de reducción por grieta de tracción con presión hidrostática en la grieta. A continuación se presentan las figuras que se emplearán según el caso que se presente.

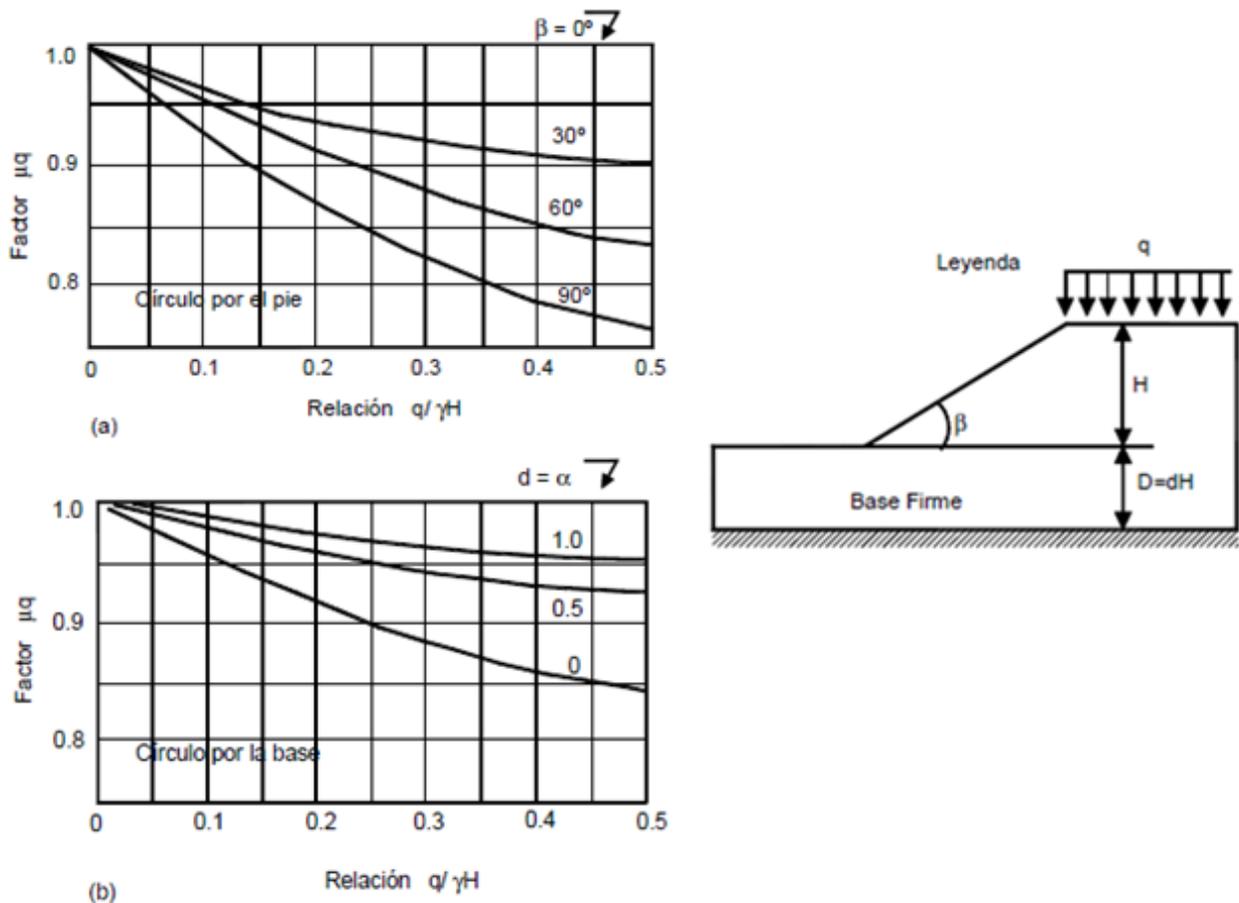


Figura 2.13: Factor de reducción por carga adicional por el método de Janbú

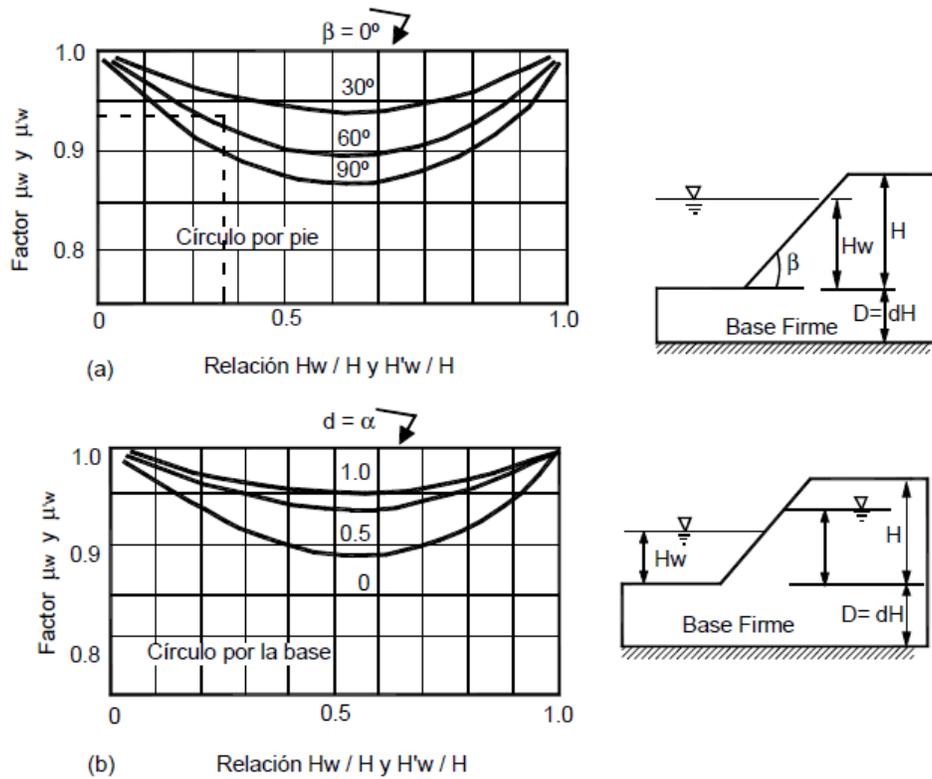


Figura 2.14: Factor de reducción por sumergencia (μ_w) e infiltración (μ_i).

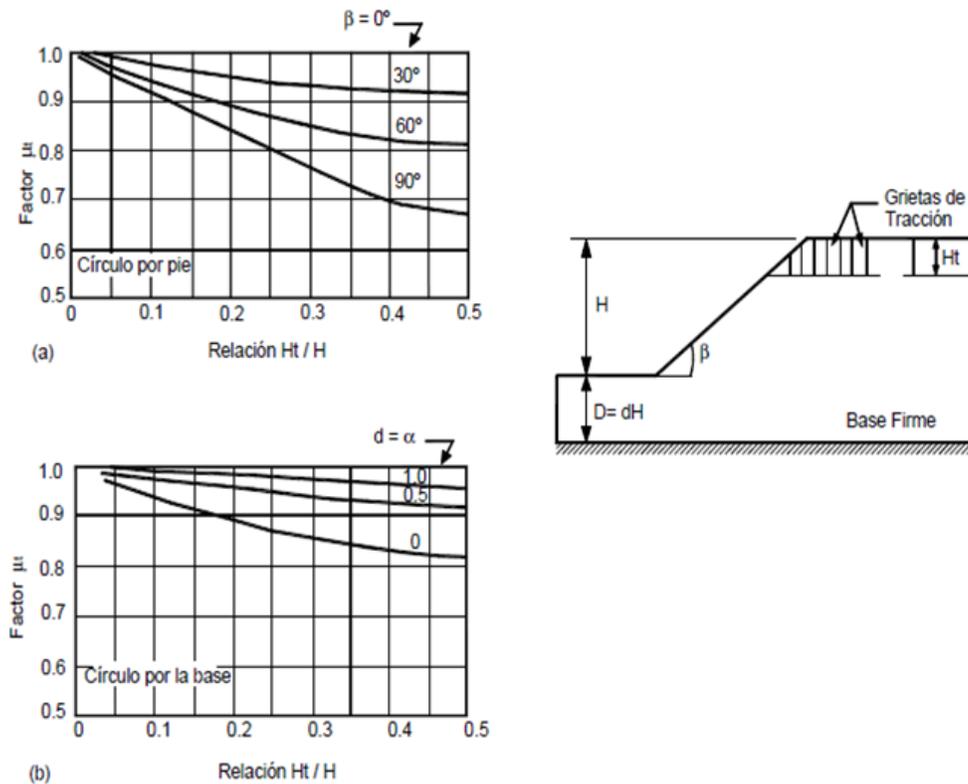


Figura 2.15: Factor de reducción por grieta de tracción sin presión hidrostática en la grieta

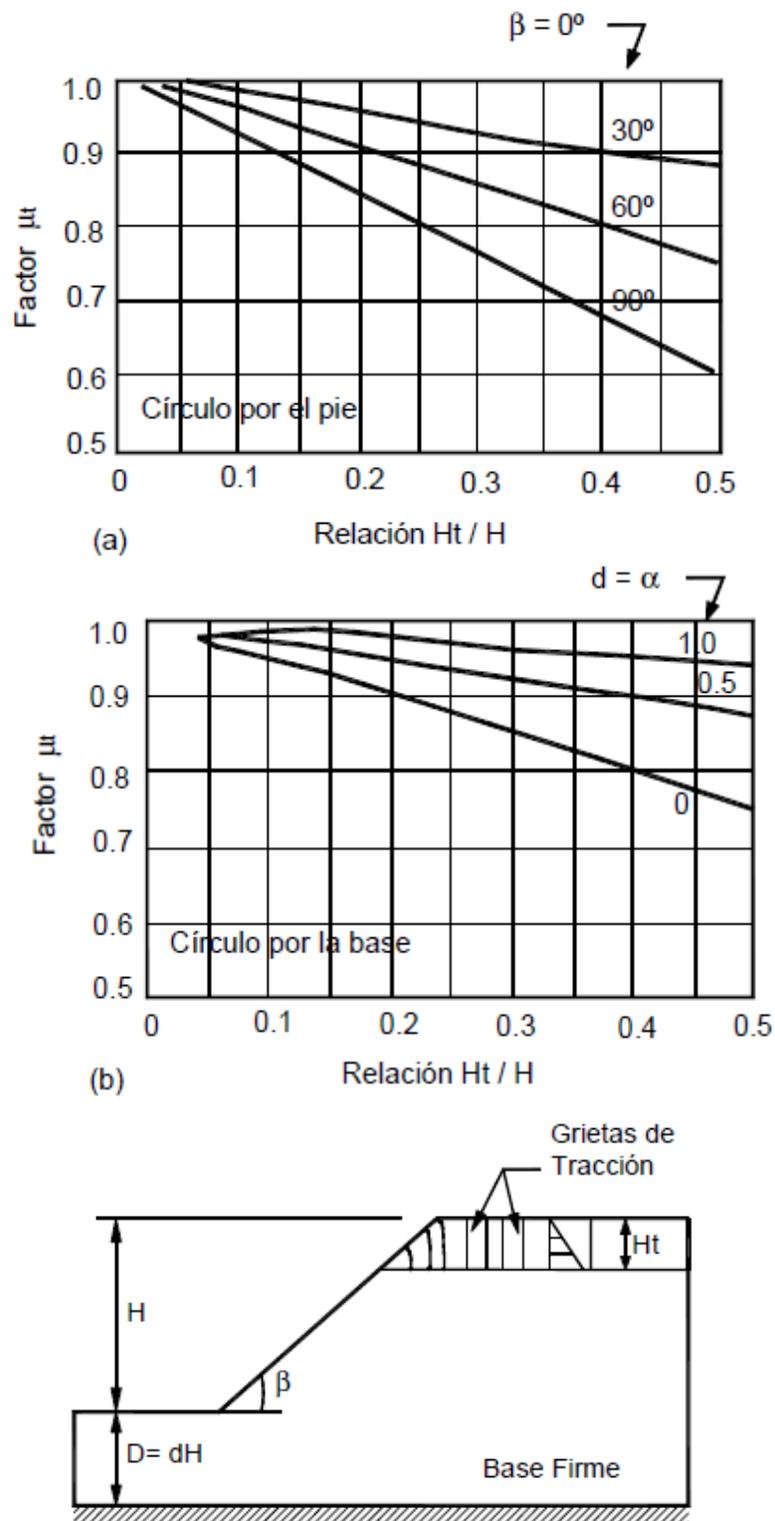


Figura 2.16: Factor de reducción por grieta de tracción con presión hidrostática en la grieta.



6. Calcular P_d

P_d se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_d = \frac{(\gamma H) + q - (\gamma_w H_w)}{\mu_q \mu_w \mu_t} \gamma \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

- γ = Peso unitario promedio del suelo.
- H = Altura del talud.
- q = Sobrecarga.
- γ_w = Peso unitario del agua.
- H_w = Altura de agua fuera del talud.
- μ_q = Factor de reducción por sobrecarga.
- μ_w = Factor de reducción por sumergencia.
- μ_t = Factor de reducción por grieta de tensión.

Si no hay sobrecarga se puede considerar $\mu_q = 1$; si no hay sumergencia $\mu_w = 1$ y si no hay grieta de tensión $\mu_t = 1$. Así también se puede suponer $q = 0$, $\mu_q = 1$ para la condición no consolidada.

7. Calcular P_e .

P_e se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{(\gamma H) + q - (\gamma_w H'_w)}{\mu_q \mu'_w} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

- H'_w = altura del agua dentro del talud.
- μ'_w = factor de reducción por infiltración.

Si la sobrecarga se aplica rápidamente, de modo que no hay suficiente tiempo para que los suelos se consoliden bajo la sobrecarga, se toma $q = 0$ y $\mu_q = 1$ en la fórmula de P_e . Si no existe sobrecarga, $\mu_q = 1$, y si no existe infiltración, $\mu'_w = 1$.

8. Calcular el parámetro adimensional $\lambda C \phi$.

Este parámetro es calculado con la siguiente fórmula:

$$\lambda C \phi = \frac{P_e \tan \phi}{C} \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

- $\tan \phi$ = valor promedio de $\tan \phi$.
- C = valor promedio de las cohesiones

9. Calcular el número de estabilidad N_{cf}

Para calcular este número de estabilidad, se usa la siguiente figura:

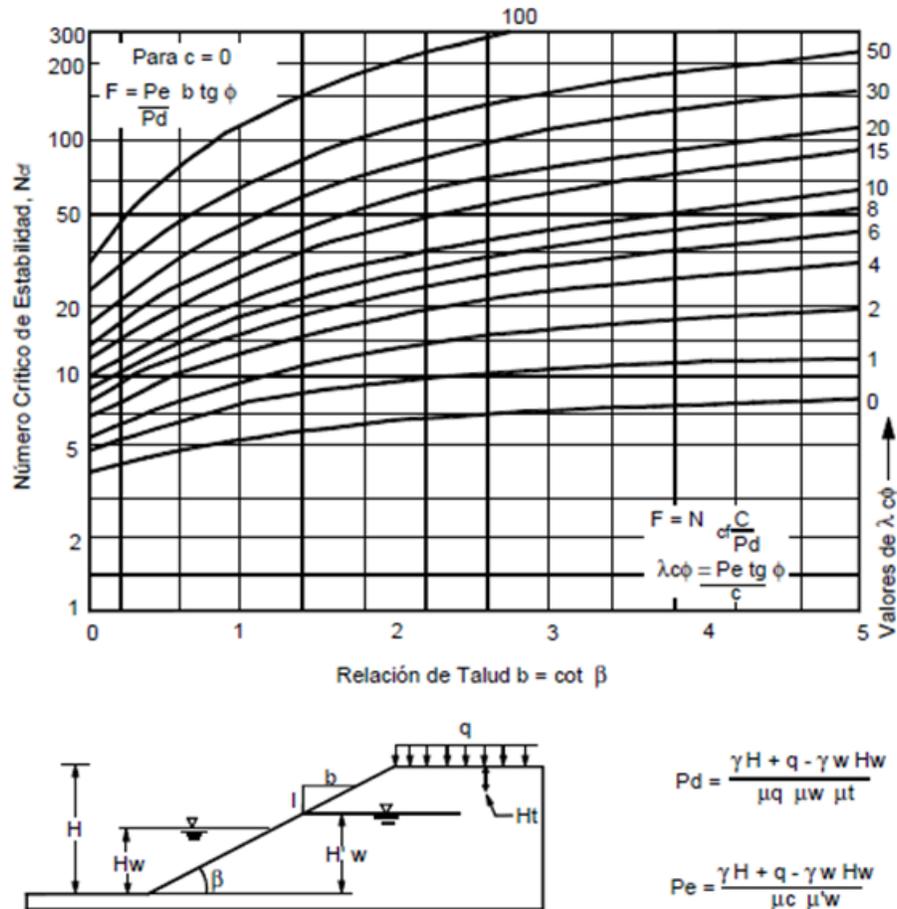


Figura 2.17: Numero de estabilidad N_{cf}

10. Calcular el factor de seguridad

El factor de seguridad se calcula con la siguiente fórmula:

$$F.S = N_{cf} \frac{C}{P_d} \quad \text{Ec. 8}$$

2.6.4 Pérdidas por filtración.- Este tipo de falla resulta grave, pero no catastrófica, cuando el objetivo de la presa sea el almacenamiento.

Para evitar este tipo de fallas se debe determinar en el estudio geológico las zonas de fallas, zonas cársicas y suelos permeables. Una recomendación para disminuir las



filtraciones a través del terraplén es compactar con humedades superiores a la óptima de la prueba de Proctor Estándar.

2.6.5 Sismos.- Las fallas en dique producidos por los sismos presentan las siguientes características.

- a) Se presentan grietas longitudinales en la corona de la presa.
- b) Los daños se producen por la componente horizontal del sismo.
- c) Las fallas por deslizamiento debido a los temblores son pocas.
- d) Los sismos que más daño causan a una presa son los de mayor periodo.
- e) Espaldones granulares mal compactados o con muchos finos producen asientos fuertes que afectan al material impermeable.
- f) Del sismo puede emanar el riesgo de la falla por licuación.

En la Tabla 2.5 presentamos los efectos que un sismo puede causar en las presas y sus formas de evitar.

EFEECTO	COMO SE PRODUCE	POSIBLE MANERA DE EVITAR
Asientos de la coronación	Se consolida el suelo debido a la vibración	Disponer de un resguardo amplio
Licuación de los materiales del cimiento	Presencia de suelos finos	Estudio geológico para descartar este tipo de materiales
Agrietamiento del cuerpo de la presa	Corona vibra más que la base	Aumentar ancho de la corona. Talud cerca de la corona más suave
Oleaje	Movimiento del agua	Borde libre más amplio
Deslizamientos	Producen una ola	
Fallas geológicas	Disminuye capacidad del embalse	Evitar emplazar la obra en esta zona

Tabla 2.5: Efectos de un sismo sobre los diques de tierra.

2.6.6 Licuación.- La falla por licuación ocurre debido a la presencia de suelos finos no cohesivos, de estructura suelta y saturados.

Arenas sueltas con $D_{10} < 0.1$ mm y $C_u < 5$, limos con $I_p < 6$ % son materiales más peligrosos, tanto en el cimiento como en el terraplén.

La única forma de evitar este tipo de falla es mediante el estudio geológico, con el cual se debe evitar colocar el cimiento sobre este tipo de materiales, así como también se debe buscar zonas de préstamo que no contengan estos suelos.



CAPÍTULO III: MATERIALES Y PROCESO CONSTRUCTIVO.

De acuerdo a los estudios realizados durante la fase previa, los materiales que serían útiles para la conformación de los diques del Proyecto Cañar están constituidos por gravas, arenas, arcillas y/o limos, que es necesario protegerlos de la erosión y de las filtraciones de agua.

Como se dijo, los materiales por utilizar en los diques deben cumplir con cierto grado de permeabilidad, evitando pérdidas excesivas de agua que puedan afectar la estabilidad y funcionalidad de la obra.

La disminución de gastos de transporte de los materiales de construcción, producirá una considerable reducción en el costo total del proyecto. Generalmente, el tipo de dique más económico será aquel para el que se encuentren los materiales en suficiente cantidad y a una distancia razonable del emplazamiento de los diques.

3.1 Características de la arcilla utilizada.

Las arcillas utilizadas para la construcción de los diques fueron extraídas de la mina by-pass, ubicada entre las abscisas 18+554 y 19+500 del Proyecto Control de inundaciones del Río Cañar. La clasificación de las mismas se realizó de acuerdo a las normas internacionales del sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) y de la AASHTO.

En la Tabla 3.1 se presenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos de granulometría y plasticidad, a las muestras de arcilla utilizadas para la construcción de los diques.

CLASIFICACIÓN DE LA ARCILLA								
# Muestra	% pasa	% pasa	LL	LP	IP	% ω	CLASIFICACIÓN	
	# 200	# 4	(%)	(%)	(%)	Natural	(SUCS)	(AASHTO)
Muestra 1	51	100	37	20.50	16.50	18.20	CL	A-6 (5)
Muestra 2	54	100	36.3	21.05	15.25	20.39	CL	A-6 (5)
Muestra 3	50	100	36.4	21.08	15.30	17.44	CL	A-6 (4)

Tabla 3.1: Clasificación de las diferentes muestras de arcillas.



De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3.1 Las muestras se clasifican:

- Según la ASSHTO como “Suelos Arcillosos”
- Según la SUCS “Arcilla ligera arenosa”

Los resultados del ensayo de compactación Proctor Estándar realizado en laboratorio para el material arcilloso, se muestran en la Tabla 3.2

RESULTADOS DE ENSAYOS PROCTOR ESTANDAR PARA ARCILLAS				
# Muestra	% ω ópt.	pd-máx (Kg/m³)	0.95 pd-máx (Kg/m³)	Rango ω ópt (%)
Muestra 1	21.32	1680	1596	19-24
Muestra 2	21.45	1650	1567.5	19 - 24
Muestra 3	14.11	1702	1616.9	12.5 - 16.8

Tabla 3.2: Resultados del ensayo Proctor Estándar para las arcillas.

Las propiedades mecánicas de las muestras de arcilla se determinaron en laboratorio, mediante el ensayo de corte directo. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 3.3.

# MUESTRA	COHESION (c)	ANGULO DE FRICCIÓN(ϕ)	PESO ESPECIFICO HUMEDO
Muestra 1	25 kPa	15°	17 kN/m ³
Muestra 2	20 kPa	18°	16 kN/m ³
Muestra 3	23 Kka	17°	16 kN/m ³

Tabla 3.3: Propiedades mecánicas de las muestras de arcilla.

Estas propiedades mecánicas de las muestras de arcilla se utilizarán más adelante, en el capítulo 4, para determinar la estabilidad de taludes.

La determinación del coeficiente de permeabilidad de las arcillas se realizó en el laboratorio, mediante el ensayo de carga variable, debido a que en suelos finos las tasas de flujo a través del suelo son muy pequeñas. Los resultados se presentan en la Tabla 3.4

ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE CARGA VARIABLE				
# Muestra	Q (cm³)	A (cm²)	T (s)	k (cm/s)
Muestra 1	1.66	81.07	172800	1.18E-07
Muestra 2	3.19	81.07	172800	2.28E-07
Muestra 3	2	81.07	172800	1.43E-07
Muestra 4	4.86	81.07	172800	3.47E-07
PROMEDIO				2.09E-07

Tabla 3.4: Resultados de los ensayos de permeabilidad de carga variable de las muestras de arcilla.



3.2 Características de la grava.

El material granular se obtuvo de las márgenes del río Cañar y fue utilizado en diferentes proporciones en los diques uno, dos y tres.

La clasificación de las diferentes muestras de material granular de río de acuerdo a las normas, tanto de la SUCS como de la AASHTO, luego de realizados los ensayos de granulometría y plasticidad, se presentan en la Tabla 3.5.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES GRANULARES										
# Muestra	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	LL	LP	Ip	% ω	CLASIFICACIÓN	
	# 200	# 4	# 10	# 40	(%)	(%)	(%)	natural	(SUCS)	(AASHTO)
Muestra 1	15.72	17.09	16.64	15.96	Np	Np	Np	2.90	GM	A-1-b (0)
Muestra 2	11.02	11.64	11.52	11.15	Np	Np	Np	2.20	GP-GM	A-1-a (0)
Muestra 3	11.00	11.60	11.43	11.12	Np	Np	Np	3.41	GP-GM	A-1-a (0)
Muestra 4	13.08	13.96	13.77	13.39	Np	Np	Np	0.99	GM	A-1-a (0)

Tabla 3.5: Clasificación de las diferentes muestras de suelos granulares.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 3.5, las muestras se clasifican:

- Según la ASSHTO como “Fragmentos de piedra, grava y arena”
- Según la SUCS como “Grava limosa”
-

Los resultados del ensayo de compactación Proctor Modificado del material granular aparecen en la Tabla 3.6.

RESULTADOS ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO PARA MATERIAL GRANULAR				
# MUESTRA	ω ópt	pd-máx (Kg/m ³)	0.95 pd-máx	RANGO ω ópt (%)
MUESTRA 1	7.72	2085	1980.75	5-11.2
MUESTRA 2	8.65	2073	1969.35	6-11.0
MUESTRA 3	8.33	2164	2055.80	6-10.5
MUESTRA 4	7.68	2138	2031.10	4.9-10.8

Tabla 3.6: Resultados de los ensayos de compactación Proctor Modificado del material granular.



3.3 Características de la mezcla (arcilla y material de río).

Luego de colocar los materiales en el sitio de la obra para la conformación de los diques, se procedió al mezclado de los mismos, 50% de arcilla y 50% de material granular proveniente del río.

Después de realizada la mezcla se procedió a la toma de muestras para los ensayos correspondientes, de los cuales se obtuvieron las propiedades geotécnicas que se presentan a continuación.

3.3.1 Características de la mezcla (arcilla y material de río cribado).

Las muestras para los diferentes ensayos de granulometría y plasticidad del dique constituido por la mezcla de arcilla (50%) y material de río de tamaño máximo 10 cm (50%) se tomaron en las capas 3, 5, 7 y 9. Los resultados se presentan en la Tabla 3.7

CLASIFICACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE ARCILLA (50%) Y MATERIAL DE RIO CRIBADO (50%)										
Muestra	% pasa # 200	% pasa # 4	% pasa # 10	% pasa # 40	LL	LP	Ip	% ω natural	CLASIFICACIÓN	
									(SUCS)	(AASHTO)
Capa 3	9.4	57.7	49.33	31.9	28.45	14.98	13.47	10.34	SC-SP	A-2-6 (0)
Capa 5	28.84	54.04	49.67	40.34	28.85	14.97	13.88	11.63	GC	A-2-6 (0)
Capa 7	29.46	57.3	51.39	40.47	33.8	19.99	13.81	8.18	GC	A-2-6 (0)
Capa 9	26.3	50.66	46.06	37.85	30.3	18.73	11.57	12.91	GC	A-2-6 (0)

Tabla 3.7: Clasificación de las diferentes muestras de la mezcla (arcilla y material de río cribado).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3.7, las muestras se clasifican:

- Según la ASSHTO como “Grava y arena arcillosa”
- Según la SUCS como “Grava arcillosa con arena”

El resultado del ensayo de compactación Proctor Modificado de la mezcla de arcilla con material del río cribado se muestra en la Tabla 3.8.

RESULTADO DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO DE LA MEZCLA ENTRE ARCILLA (50%) Y MATERIAL DE RIO CRIBADO (50%)			
% ω ópt	pd-máx Kg/m ³	0.95 pd-máx	RANGO ω ópt (%)
19.69	1825	1733.8	16-24

Tabla 3.8: Resultado del ensayo de compactación Proctor Modificado de la mezcla (arcilla y material de río cribado).



3.3.2 Características de la mezcla (arcilla y material de río sin cribar).

La clasificación de las diferentes muestras del dique número tres, constituido por la mezcla de arcilla (50%) y material del río sin cribar (50%), se realizó de acuerdo a las normas, tanto de la SUCS como de la AASHTO. Los resultados se presentan en la Tabla 3.9

CLASIFICACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE ARCILLA (50%) Y MATERIAL DE RIO SIN CRIBAR (50%)										
Muestra	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	LL	LP	Ip	% ω natural	CLASIFICACIÓN	
	# 200	# 4	# 10	# 40					(SUCS)	(AASHTO)
1	50.7	72.58	66.08	52.45	28.5	17.4	11.1	10.08	CL	A-6 (3)
2	35.32	62.64	57.26	47.28	28.8	14.14	14.66	13.08	GC	A-2-6 (1)
3	34.09	60.84	54.73	44.58	29.7	18.25	11.45	10.42	GC	A-2-6 (0)

Tabla 3.9: Clasificación de las diferentes muestras de la mezcla (arcilla y material de río sin cribar).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3.9, las muestras se clasifican:

- Según la ASSHTO como “Grava y arena arcillosa”
- Según la SUCS como “Grava arcillosa con arena”

El resultado del ensayo de compactación Proctor Modificado de la mezcla de arcilla con material del río sin cribar se muestra en la Tabla 3.10.

RESULTADO DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO DE MEZCLA ENTRE ARCILLA (50%) Y MATERIAL DE RIO SIN CRIBAR (50%)			
% ω ópt	pd-máx Kg/m ³	0.95 pd-máx	RANGO ω ópt (%)
19	1840	1748.0	16.5-23.5

Tabla 3.10: Resultados del ensayo de compactación Proctor Modificado de la mezcla (arcilla y material de río sin cribar).

Los ensayos de permeabilidad del material de río y de las mezclas con arcilla no se realizaron en el laboratorio, se determinaron únicamente en campo mediante el empleo del método de Porchet, el cual nos permite obtener la tasa de infiltración en terreno; que se puede considerar como una estimación aproximada del coeficiente de permeabilidad del suelo. Esta información se presenta en el capítulo 4.



3.4 Metodología de construcción.

El proceso constructivo de los diques comprende diversas etapas y operaciones encaminadas a conseguir un correcto funcionamiento del mismo.

Una mala ejecución puede ocasionar diversos problemas como una humectación o compactación deficiente, lo cual provocará asentamientos excesivos del terraplén que fisurarán y alabearán la superficie de rodadura; la incorrecta ejecución de la subrasante de los diques puede provocar problemas de inestabilidad, ocasionando el colapso y desmoronamiento de la obra. Dentro del proceso de construcción de los diques, pueden distinguirse diversas etapas de ejecución:

- Desbroce del terreno.
- Retiro de la capa vegetal.
- Excavación y preparación del material en los préstamos.
- Transporte del material
- Colocación y conformación en capas del material en el terraplén
- Compactación

3.4.1 Desbroce del terreno.

El desbroce consiste en extraer y retirar, de la zona afectada por el proyecto, de todos los árboles, plantas, maderas caídas, maleza, escombros o cualquier otro material indeseable, que pueda acarrear perjuicios al normal desarrollo de las obras o al futuro comportamiento de los diques. (Ver Fotografía 2, Anexos).

Como regla general es recomendable extraer toda la maleza y raíces, especialmente aquellas de diámetro superior a 10 cm, que deberán ser eliminados hasta una profundidad de al menos 50 cm por debajo de la superficie natural del terreno. De esta manera se evitan heterogeneidades que pueden dar lugar a pequeños asentamientos diferenciales, causantes de baches y alabeos en la capa de rodadura, especialmente en terraplenes de poca altura.

Los huecos causados por la extracción de este tipo de elementos, así como los agujeros existentes en la zona de explanación, deberán rellenarse y compactarse adecuadamente, para evitar que estas zonas se comporten como puntos débiles en la estructura del terreno.



3.4.2 Retiro de la capa vegetal.

Luego de haber realizado el desbroce del terreno, es de gran importancia la remoción de la capa superficial de terreno, generalmente compuesta por un alto porcentaje de materia orgánica (humus), que como sabemos debe ser evitada a toda costa, dada la susceptibilidad que presenta a procesos de oxidación y mineralización. Por ello, la tierra vegetal que no haya sido eliminada durante el desbroce deberá removerse de la zona y almacenarse adecuadamente, para su posterior empleo en la revegetación de terraplenes, dado su extraordinario poder fertilizante. (Ver Fotografía 3, Anexos).

Si el terraplén tuviera que construirse sobre terreno inestable o formado por turba, arcillas expansivas, fangos o limos de mala calidad, también deberá eliminarse dicha capa o procederse a su estabilización en el caso de tener un espesor considerable.

3.4.3 Excavación y preparación del material en los préstamos.

Una vez realizado el desbroce y la limpieza de la capa superficial de las áreas de préstamo y de las áreas de construcción de los diques, se procede a la excavación de los materiales.

Para el proyecto control de inundaciones del río Cañar, el material gravoso se obtiene directamente del río, en las zonas adjuntas a los diques, aprovechando la abundancia y buenas características del material necesario para la construcción de los mismos.

En cuanto a la arcilla se estableció una cantera que se encuentra ubicada a 8.5 km de distancia de la zona de construcción de los diques de prueba. (Ver Fotografías 6 - 8, Anexos).

3.4.4 Transporte del material.

Una vez preparado el material en el préstamo en la forma indicada, es cargado y transportado a los diques. El transporte se lo realiza mediante volquetas, con capacidad de 15 m³.

Las labores de transporte de los diferentes materiales, desde los préstamos a la presa, tienen una incidencia importante en el costo total de la obra. Como regla general deben utilizarse, en la medida de lo posible, los préstamos más cercanos al sitio de los diques.



3.4.5 Colocación y conformación del material en el terraplén.

Los materiales transportados a los diques son descargados por la parte posterior de las volquetas mediante volteo, para luego mediante motoniveladoras colocarlos en forma definitiva en el terraplén. Una vez descargado el material se procede a su conformación. Esta consiste en extenderlo de manera uniforme, en forma de capas, que tienen generalmente un espesor comprendido entre 25 y 30 cm en el caso de suelos arcillosos y entre 30 y 40 cm en materiales permeables granulares (grava, arena).

Antes de compactar la capa se hacen los ajustes finales de la humedad (si ello es necesario), requiriéndose a veces una humectación complementaria y el mezclado del material en el terraplén para alcanzar la humedad óptima.

Para los terraplenes de los diques de prueba del proyecto Control de Inundaciones del río Cañar, se especifica colocarlo en capas de 30 cm de espesor compactadas, con un contenido de humedad de 0 a ± 3 % de la óptima y con una densidad mínima del 95% de la densidad seca máxima según Proctor Estándar para arcillas y Proctor Modificado para gravas y mezclas. (Ver Fotografías 9 y 10, Anexos).

3.4.6 Proceso de mezclado.

El tendido y mezclado de los materiales se realiza empleando motoniveladoras, las cuales realizan una mezcla homogénea y un tendido uniforme de los materiales. La humectación y el mezclado se repiten las veces que sea necesario para alcanzar la humedad óptima y el porcentaje de compactación requerido.

Si el material tiene una humedad natural superior a la óptima debe ser secado, lo cual se hace normalmente escarificándolo y dejándolo expuesto al sol y al aire el tiempo necesario. El secado del material siempre es una operación más lenta y complicada que el humedecimiento, llegándose incluso, en algunos casos, a descartar un préstamo por esta razón. (Ver Fotografía 11, Anexos).



3.4.7 Compactación.

La compactación es el proceso de densificación (apisonado) de los suelos que constituyen los terraplenes de los diques. Esta se efectúa por medios mecánicos y consiste en lograr una mayor proximidad e imbricación de las partículas sólidas.

Los diques de tierra se compactan para:

- Mejorar las propiedades mecánicas del terraplén, básicamente para aumentar la densidad seca ρ_d , el ángulo de fricción Φ , la cohesión c y el coeficiente de permeabilidad k .
- Homogeneizar el material, evitando la presencia de zonas débiles poco densas e incluso la existencia de cavidades que podrían propiciar la erosión interna o tubificación de la presa.
- Reducir el volumen de materiales de la presa. Los terraplenes compactados permiten utilizar taludes estables más inclinados que en el caso de suelos sueltos, por lo que las presas compactadas ocupan un espacio menor.

La compactación consiste en apisonar el material aplicándole una carga repetida. Esto se efectúa utilizando diferentes equipos. Los equipos de compactación que se utilizan en los diques son del tipo rodante (excepto los equipos pequeños manuales), tienen un peso de varias toneladas y pueden actuar sobre el relleno estáticamente, dinámicamente o en combinación.

La compactación en los diques de prueba se la realiza mediante rodillos vibratorios autopropulsados; lisos para los materiales del río y pata de cabra para las mezclas y materiales arcillosos. (Ver Fotografías 12 y 13, Anexos).

Es importante luego de conformar y compactar cada capa de los diques, comprobar que se mantenga la huella del rodillo compactador pata de cabra, caso contrario es necesario realizar una escarificación previo la colocación de la siguiente capa, con el objetivo de homogeneizar el material y devolverle las características prefijadas en la ejecución del proyecto. Esta pérdida de huella generalmente se produce por el tránsito de los equipos de carga y maquinaria empleada en la ejecución de la obra.



3.5 Forma de construcción y porcentajes de materiales utilizados.

Los terraplenes de los diques se construyen mediante la colocación y compactación de capas sucesivas de material. Estas son prácticamente horizontales, con una pequeña pendiente transversal al eje longitudinal de la presa, para facilitar el drenaje del agua de lluvia.

En el dique zonificado el terraplén se va construyendo de manera simultánea en los distintos materiales integrantes del mismo (pantalla y espaldón), subiendo el dique uniformemente, con tan solo pequeñas diferencias de altura entre los distintos materiales. (Ver Fotografías 16 y 17, Anexos).

La compactación debe ser especialmente cuidadosa para evitar zonas débiles, poco densas, que propicien las filtraciones.

Los materiales para la conformación de los diques de prueba, se emplearon en diferentes porcentajes; de la siguiente manera:

El dique # 1 está constituido por material granular proveniente del río (60%) con una pantalla de arcilla (40%)

El dique # 2 está constituido de una mezcla entre arcilla (50%) y material cribado proveniente del río (50%), con diámetro máximo de 10cm.

El dique # 3 está constituido de una mezcla entre arcilla (50%) y material granular de río sin cribar (50%).

El dique # 4 está constituido íntegramente de arcilla (100%).

3.6 Control de Compactación en campo.

La compactación de campo, al igual que la de laboratorio, es función de la humedad, del peso específico seco y de la energía de compactación. La energía de compactación en el campo depende de:

- ✓ Tipo, peso y número de pases del equipo de compactación
- ✓ Tipo de suelo
- ✓ Espesor de capa



Sin embargo, esta energía de compactación de campo no puede ser cuantificada como hicimos en el laboratorio con la energía dinámica, tipo Proctor, entre otras cosas porque la energía que se aplica en el campo es de tipo estática, por vibración y por amasado, o una combinación de éstas en la mayoría de los casos.

Es por ello que para controlar la compactación en el campo se recurre a un parámetro que relaciona el peso específico seco que se alcanza en el terraplén con el peso específico seco máximo obtenido en el laboratorio con el Proctor correspondiente. Este parámetro se conoce como grado o porcentaje de compactación y viene dado por la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Compactación} = \frac{\rho_{d-\text{terraplén}}}{\rho_{d-\text{máx}}} * 100 \quad \text{Ec. 9}$$

El control de compactación en el campo, como parte del control de calidad del terraplén compactado, consiste en alcanzar un grado de compactación en un rango de humedades fijado, para garantizar las propiedades mecánicas por las que se compacta, de la forma más económica. [11].

El grado de compactación se fija en función de la importancia económica del terraplén compactado y con relación al patrón de compactación a utilizarse en el laboratorio. Para los terraplenes de los diques del proyecto Control de Inundaciones del río Cañar, se especifica compactar los materiales con un contenido de humedad de 0 a $\pm 3\%$ de la óptima y con una densidad mínima del 95% de la densidad seca máxima según Proctor Estándar para arcillas y Proctor Modificado para el material del río y las mezclas

Para el control de compactación en campo se utilizó un método radioactivo, mediante el empleo de un densímetro nuclear; el cuál mide en situ varias características de los materiales para luego ser comparadas con valores obtenidos sobre muestras patrones en laboratorio. (Ver Fotografía 14 y 15, Anexos).

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos del control de compactación efectuado en los cuatro diques de prueba, para cada capa durante la conformación de los mismos.



DIQUE 1 (MATERIAL GRANULAR 60% CON PANTALLA DE ARCILLA 40%)								
# CAPA	MATERIAL	ESPESOR (cm)	# PASADAS	pd-máx (kg/m ³)	W ópt. (%)	pd -terraplén (kg/m ³)	% w terraplén	% COMPACTACION
1	ARCILLA	25,3	5	1680	21,32	1598,3	25,4	95,1
	GRAVA	25,5	4	2085	7,72	2160	5,1	103,6
2	ARCILLA	22,3	6	1680	21,32	1628,1	22,1	96,9
	GRAVA	22,2	4	2085	7,72	2115,5	6,2	101,5
3	ARCILLA	32	5	1680	21,32	1685,7	19,6	100,3
	GRAVA	32,2	4	2085	7,72	2134,9	6,5	102,4
4	ARCILLA	29,1	4	1650	21,45	1674	24,2	101,5
	GRAVA	29,3	4	2085	7,72	2254,1	7,2	108,1
5	ARCILLA	33,4	4	1650	21,45	1584,7	25,5	96,0
	GRAVA	33,1	4	2164	8,33	2191,6	7,6	101,3
6	ARCILLA	30,4	4	1650	21,45	1705,3	23,8	103,4
	GRAVA	30,7	4	2164	8,33	2095	3,8	96,8
7	ARCILLA	30	4	1650	21,45	1654,5	20,2	100,3
	GRAVA	30,2	4	2164	8,33	2267,7	6,9	104,8
8	ARCILLA	33,4	6	1650	21,45	1586,9	19,6	96,2
	GRAVA	33,8	4	2164	8,33	2093,2	7,8	96,7
9	ARCILLA	32,5	4	1702	14,11	1749,2	16,3	102,8
	GRAVA	32,2	4	2164	8,33	2254,6	8,4	104,2
10	ARCILLA	33,4	5	1702	14,11	1684,7	17,2	99,0
	GRAVA	33,6	4	2164	8,33	2131,5	7,1	98,5
11	ARCILLA	36,5	4	1702	14,11	1679,1	15,5	98,7
	GRAVA	36,2	4	2138	7,68	2194,7	6,5	102,7
12	ARCILLA	31,2	4	1702	14,11	1653,8	14,5	97,2
	GRAVA	31,5	4	2138	7,68	2136,4	6,9	99,9

Tabla 3.11: Control de compactación del dique conformado por material granular (60%) con pantalla de arcilla (40%)



DIQUE 2 (MEZCLA DE ARCILLA 50% Y GRAVA DE TAMAÑO MAX 10 cm 50%)							
CAPA	ESPEJOR (cm)	# PASADAS	pd-máx (kg/m ³)	W ópt. (%)	pd -terraplén (kg/m ³)	% w terraplén	% COMPACTACION
1	36,2	6	1825	19,69	1852,7	18,3	101,5
2	26,5	6	1825	19,69	1870	24,7	102,5
3	31,3	5	1825	19,69	1879	18,6	103,0
4	28,4	6	1825	19,69	1815,7	19,9	99,5
5	28,9	4	1825	19,69	1853,6	18,7	101,6
6	28,4	4	1825	19,69	1785,3	19,4	97,8
7	29,7	5	1825	19,69	1845,1	19,6	101,1
8	30,5	4	1825	19,69	1876,2	18,6	102,8
9	31,1	4	1825	19,69	1812,5	17,8	99,3
10	29,8	4	1825	19,69	1795,6	18,2	98,4
11	30,3	4	1825	19,69	1872,4	19,3	102,6
12	31,4	4	1825	19,69	1787,9	18,7	98,0

Tabla 3.12: Control de compactación del dique conformado por la mezcla de arcilla (50%) y material granular de diámetro máximo 10 cm (50%)

DIQUE 3 (MEZCLA DE ARCILLA 50% Y GRAVA SIN CRIBAR 50%)							
CAPA	ESPEJOR (cm)	# PASADAS	pd-máx (kg/m ³)	W ópt. (%)	pd -terraplén (kg/m ³)	% w terraplén	% COMPACTACION
1	38,5	6	1840	19	1854,3	18,7	100,8
2	30,1	7	1840	19	1793	17,2	97,4
3	34,4	6	1840	19	1876,3	20,1	102,0
4	31,6	4	1840	19	1885,4	18,3	102,5
5	31,9	4	1840	19	1844	19,4	100,2
6	34,6	4	1840	19	1842	17,7	100,1
7	30,5	5	1840	19	1834,9	18,1	99,7
8	28,7	4	1840	19	1811,3	17,3	98,4
9	33,1	4	1840	19	1826,4	18,7	99,3
10	30,7	4	1840	19	1898,5	19,2	103,2
11	31,2	4	1840	19	1823	18,4	99,1
12	29,8	4	1840	19	1862,1	19,9	101,2

Tabla 3.13: Control de compactación del dique conformado por la mezcla de arcilla (50%) y material granular sin cribar (50%).



DIQUE 4 (ARCILLA 100%)							
CAPA	ESPESOR (cm)	# PASADAS	pd-máx (kg/m ³)	W ópt. (%)	pd -terraplén (kg/m ³)	% w terraplén	% COMPACTACION
1	37	7	1680	21,32	1709,6	24,2	101,8
2	32	5	1680	21,32	1679,2	21,3	100,0
3	34	6	1680	21,32	1651,4	20,2	98,3
4	26,8	4	1650	21,45	1646,7	20	99,8
5	36,3	4	1650	21,45	1582,5	19,8	95,9
6	30,3	4	1650	21,45	1682,8	21,2	102,0
7	33,1	5	1650	21,45	1682,9	22,5	102,0
8	32,7	4	1650	21,45	1637,3	23,6	99,2
9	29,5	4	1650	21,45	1599,7	21,9	97,0
10	34,2	4	1702	14,11	1653,1	16,3	97,1
11	31,9	6	1702	14,11	1715	15,8	100,8
12	28,8	4	1702	14,11	1693,8	14,7	99,5

Tabla 3.14: Control de compactación del dique conformado íntegramente de arcilla.

En la mayoría de proyectos solo se fija como control de compactación alcanzar el grado de compactación deseado, sin fijar en qué rango de humedades se debe obtener, esto se demuestra que es un grave error, en el aspecto económico y en el aspecto técnico; ya que para alcanzar el grado de compactación requerido con humedades tan bajas, se debe incrementar la energía de compactación, y por tanto el costo, por encima de la energía del patrón de laboratorio.[11].

En el caso de los diques por ser el agrietamiento una de las causas de falla catastrófica que con mayor interés debe atender el proyecto y la construcción, el control de compactación de los diques debe basarse en alcanzar: primero, el rango de humedades de compactación exigido por el proyecto y segundo, el grado de compactación.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

Luego de realizados los diferentes ensayos a los materiales utilizados en la construcción de los diques y una vez determinadas sus propiedades geotécnicas, se procede a analizar el comportamiento de los mismos, pero ahora trabajando en conjunto, para comprobar que los diques construidos no presenten ninguna de las fallas comunes en este tipo de estructuras.

4.1 Análisis de permeabilidad.

La permeabilidad representa la resistencia que ofrece el suelo al flujo de un fluido. El parámetro que determina esta propiedad es el coeficiente de permeabilidad k y se basa en la aplicación de la ley de Darcy.

Los ensayos de permeabilidad de los diques de prueba se realizaron en campo mediante el empleo del método de Porchet, el cual nos permite obtener la tasa de infiltración en terreno; que se puede considerar como una estimación aproximada del coeficiente de permeabilidad del suelo en un Flujo Darciano.

El método de Porchet consiste en excavar un cilindro de radio R , llenarlo con agua hasta una altura h y medir el descenso del nivel del agua en el tiempo. (Ver Figura 4.1).

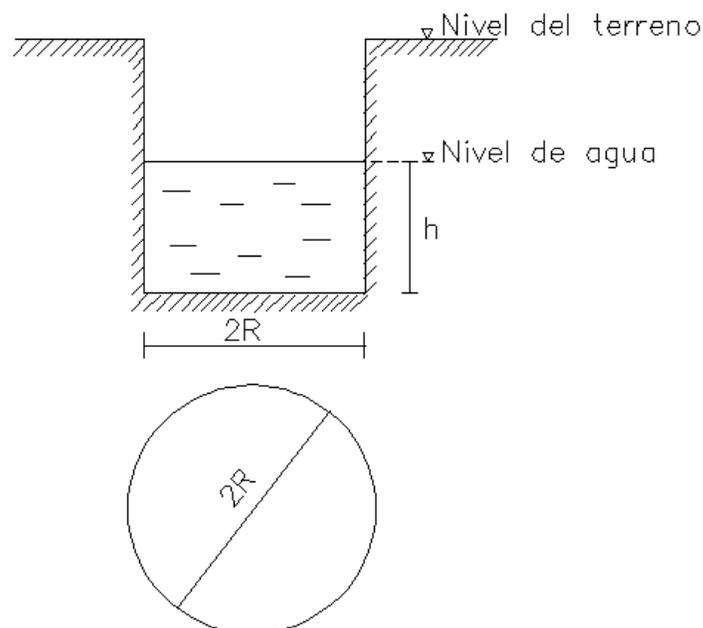


Figura 4.1: Esquema de pozo de infiltración para prueba de Porchet



La tasa de infiltración viene dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \cdot \ln \left(\frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

h_1 = altura del agua para el tiempo t_1 .

h_2 = altura del agua para el tiempo t_2

t_1 = tiempo inicial de infiltración.

t_2 = tiempo final de infiltración.

R = radio del cilindro excavado.

Se procedió a realizar 4 pruebas de infiltración, uno en cada dique de prueba; una en el material del río, otra en la zona de arcilla y las restantes en las mezclas. Para la realización de los ensayos se efectuaron pozos de 60 cm de diámetro y 60 cm de profundidad.

Así pues, es necesario medir los valores (h_1 , t_1) y (h_2 , t_2), para determinar la tasa de infiltración f con la ecuación anterior. Los resultados se presentan a continuación:

TIEMPO (min)	ALTURA (cm)
R = 30 cm	
0	30
5	23,1
10	18,3
15	14,6
20	11,2
25	7,9
30	4,7
35	1,5

t1 (seg) =	0	t2 (seg) =	2100
h1 (cm) =	30	h2 (cm) =	1,5
f =	$7,17 \times 10^{-3}$	(cm/seg)	

Tabla 4.1: Descenso de nivel de agua en la grava compactada.

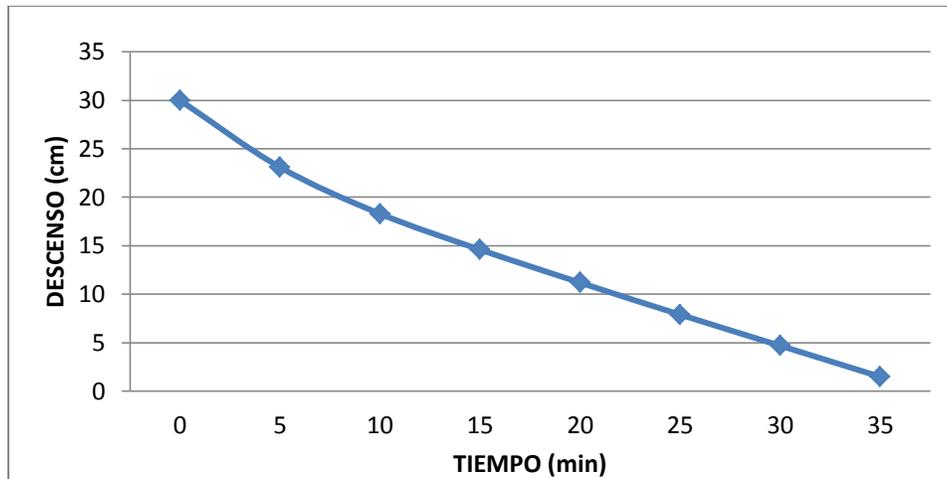


Figura 4.2: Gráfica de descenso de nivel de agua en la grava compactada.

Los resultados obtenidos de la Tabla 4.1 y de la Figura 4.2 muestran la alta permeabilidad del material de río compactado.

En la Tabla 4.2 se muestra el registro de descenso de nivel de agua en la arcilla compactada, utilizada en la construcción del dique con pantalla de arcilla y del dique homogéneo de arcilla.

TIEMPO (min)	ALTURA (cm)
R = 30 cm	
0	30
15	29,5
30	29,1
45	28,7
60	28,5
90	28,3
120	28,2
150	28,1
180	27,9
210	27,8
240	27,8
270	27,7
300	27,7
330	27,6
360	27,6
390	27,6

t1(seg) =	0	t2(seg) =	23400
h1 (cm)=	30	h2(cm) =	27,6
f =	$3,51 \times 10^{-5}$	(cm/seg)	

Tabla 4.2: Descenso de nivel de agua en la arcilla compactada.

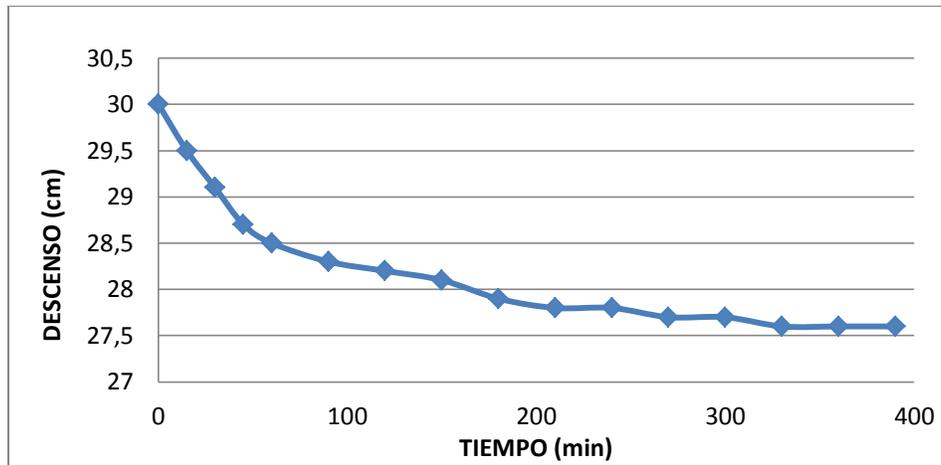


Figura 4.3: Gráfica de descenso de nivel de agua en la arcilla compactada.

De los resultados de la Tabla 4.2 y de la Figura 4.3 observamos que la arcilla compactada tiene baja tasa de infiltración, condición que es importante para disminuir la infiltración de agua y una posible falla por sifonamiento mecánico.

En la Tabla 4.3 y Figura 4.4 se muestran el registro de descenso de nivel de agua en la mezcla constituida por arcilla y material de río, cribado con un diámetro de partículas no mayores a 10 cm y compactado.

TIEMPO (min)	ALTURA (cm)
R = 30 cm	
0	30
15	28,4
30	26,9
45	25,6
60	24,5
90	21,7
120	19,2
150	16,8
180	14,6
210	12,6
240	11
270	9,8
300	8
330	6,7
360	5,8
390	4,7

t1(seg) =	0	t2(seg) =	23400
h1 (cm)=	30	h2(cm) =	4,7
f =	$5,30 \times 10^{-4}$	(cm/seg)	

Tabla 4.3: Descenso de nivel de agua en la mezcla de arcilla y material de río cribado, con un diámetro de partículas no mayores a 10 cm y compactado.

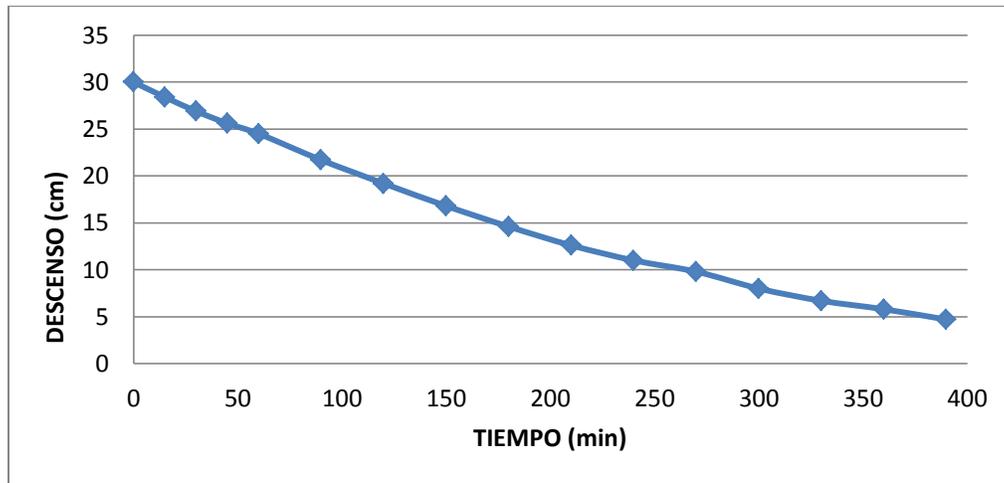


Figura 4.4: Gráfica de descenso de nivel de agua en la mezcla de arcilla y material de río cribado, compactados

En la Tabla 4.4 y Figura 4.5 se muestran el registro de descenso de nivel de agua para la mezcla de materiales arcilla y material de río sin cribar.

TIEMPO (min)	ALTURA (cm)
R = 30 cm	
0	30
15	27,8
30	25,7
45	23,6
60	21,6
90	18,1
120	15,2
150	12,3
180	9,5
210	7,1
240	4,9
270	2,6

t1(seg) =	0	t2 (seg) =	16200
h1 (cm)=	30	h2(cm) =	2,6
f =	$8,69 \times 10^{-4}$	(cm/seg)	

Tabla 4.4: Descenso de nivel de agua para mezcla de arcilla y material de río sin cribar, compactados.

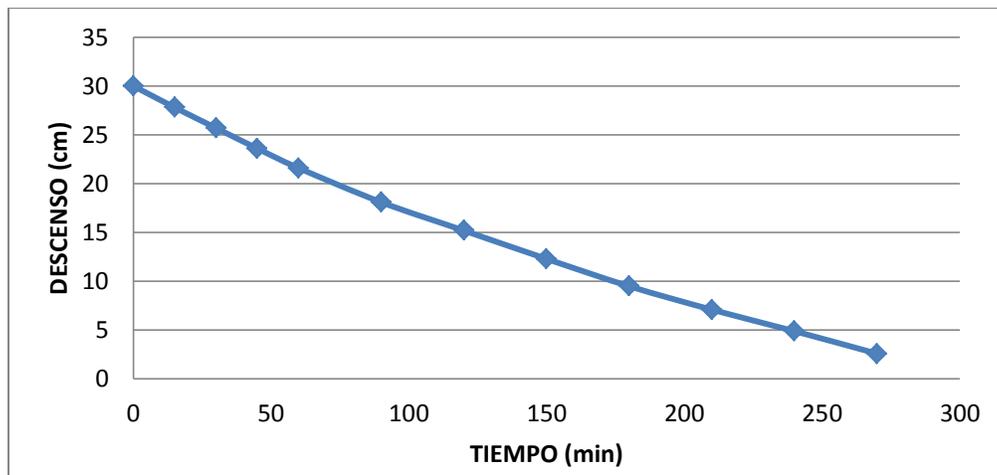


Figura 4.5: Gráfica de descenso de nivel de agua en mezcla de arcilla y material de río sin cribar, compactados.

Los resultados de las pruebas de infiltración efectuadas en los diques de prueba permiten establecer, tal y como era de esperar, que el material de río posee una tasa de infiltración alta, las mezclas una tasa de infiltración media y la arcilla una tasa de infiltración baja.

A continuación se presenta en una tabla los resultados obtenidos en los ensayos.

RESULTADOS DE PRUEBAS DE INFILTRACION EN CAMPO EMPLEANDO METODO DE PORCHET	
MATERIAL	TASA DE INFILTRACIÓN (cm/s)
Grava Compactada	$7,17 \times 10^{-3}$
Arcilla Compactada	$3,51 \times 10^{-5}$
Mezcla de arcilla (50%) y grava (50%), cribada con un diámetro de partículas no mayor a 10 cm	$5,30 \times 10^{-4}$
Mezcla de arcilla (50%) y grava sin cribar (50%)	$8,69 \times 10^{-4}$

Tabla 4.5: Resultados de pruebas de infiltración en campo empleando el Método de Porchet

4.2. Análisis de estabilidad de taludes.

Una de las fallas catastróficas que ocurren en los diques de tierra son las producidas por los deslizamientos. Por lo tanto, es importante realizar el análisis de estabilidad de cada uno de los taludes de los diques del Proyecto Control de Inundaciones del río Cañar.

Los diques del proyecto son construidos sobre una base de material de río (aluvión) que se puede considerar como un estrato firme, es por esto que en los análisis se considera la profundidad al estrato resistente $D = 0$.

Debido a que los diques construidos solo estarán en contacto permanente con el agua una vez que entren en funcionamiento, el análisis de estabilidad no se efectúa durante la construcción, sino al final de la misma, y durante un desembalse rápido para los taludes húmedos. Las alturas de nivel de agua consideradas para este caso, son alturas experimentales realizadas en los diques de prueba.

En las siguientes Figuras se muestra la geometría de los taludes de los diques de prueba, utilizadas en los análisis.

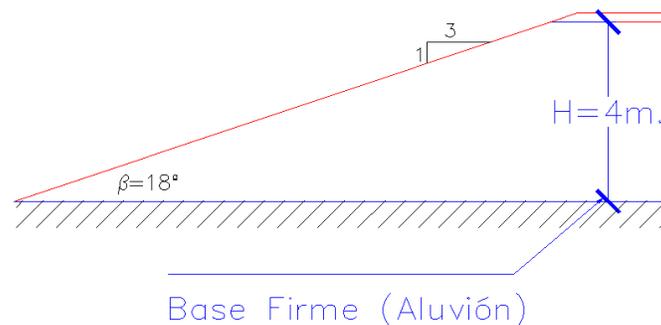


Figura 4.6: Esquema del talud en la cara húmeda durante la operación.

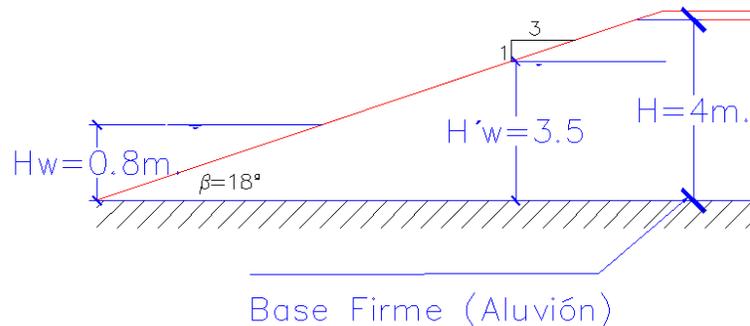


Figura 4.7: Esquema de talud en la cara húmeda para el caso de vaciado rápido.

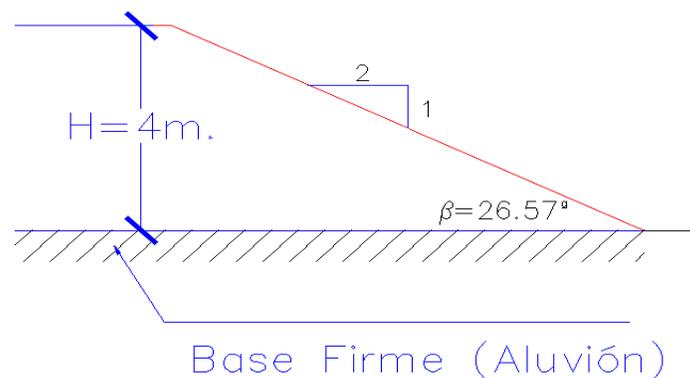


Figura 4.8: Esquema de talud cara seca para el caso de vaciado rápido.



El análisis de estabilidad se lo realizara utilizando las tablas de Janbú, cuyo procedimiento de cálculo está descrito en el capítulo 2, subcapítulo 2.6.3.1

El peso unitario del agua se tomara igual a 9.81 kN/m^3

ANÁLISIS DIQUE # 1.

✓ TALUD CARA HÚMEDA. (3H : 1V)

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	20	kN/m^2
H_w	0	m
H'_w	0	m
γ_{suelo}	16	kN/m^3
ϕ	18	°

Obtenemos el factor de profundidad “d”

$$d = \frac{H_w}{H} = \frac{0}{4} = 0$$

De la Figura 2.12 para $\beta = 18^\circ$ y $d = 0$, se obtienen los valores $x_0 = 2$, $y_0 = 1.9$; y a partir de estos valores encontramos las coordenadas del círculo crítico.

$$X_0 = x_0 H = 2 (4) = 8 \text{ m.}$$

$$Y_0 = y_0 H = 1.9 (4) = 7.6 \text{ m.}$$

Obtenemos el valor promedio de las cohesiones a partir del círculo crítico, como el cuerpo del dique es de material homogéneo entonces, el valor de $C = 20 \text{ kN/m}^2$ que es igual al valor de la cohesión del suelo determinada en el laboratorio.

Determinamos ahora los factores de reducción, que para este caso no existen debido a la condición no consolidada, por lo tanto: $q = 0 \text{ kN/m}^2$; $\mu_w = 1$; $\mu_q = 1$; $\mu'_w = 1$; $\mu_t = 1$.

Calculamos P_d a partir de la ecuación 5:

$$P_d = \frac{(\gamma H) + q - (\gamma_w H_w)}{\mu_q \mu_w \mu_t} = \frac{((16)(4)) + 0 - ((9.81)(0))}{(1)(1)(1)} = 64 \text{ kN/m}^2$$



Calculamos P_e a partir de la ecuación 6:

$$P_e = \frac{(\gamma H) + q - (\gamma_w H'_w)}{\mu_q \mu'_w} = \frac{(16(4)) + 0 - (9.81(0))}{1(1)} = 64 \text{ kN/m}^2$$

Calculamos el parámetro adimensional $\lambda C \phi$ a partir de la ecuación 7:

$$\lambda C \phi = \frac{P_e \tan \phi}{C} = \frac{64(\tan 18)}{20} = 1.04$$

Luego empleando la Figura 2.17 del Capítulo 2, obtenemos el valor del número crítico de estabilidad $N_{cf} = 11$

El factor de seguridad queda determinado a partir de la ecuación 8:

$$FS = N_{cf} \frac{C}{P_d} = 11 \frac{20}{64} = 3.44$$

El procedimiento anterior se repetirá para todos los demás taludes que se analicen, es por esto que en los siguientes análisis solamente se mostrara tablas de datos y resultados.

- **Análisis de estabilidad después de un vaciado rápido.**

Para el caso de vaciado rápido, la altura de agua dentro del talud, será la misma que el agua alcanzo antes del vaciado que es de 3,5 m. para luego descender hasta una altura de 0,80 m; estos valores se obtuvieron de los ensayos realizados en los diques de prueba. El valor del peso unitario utilizado es el correspondiente al peso unitario saturado.

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	20	kN/m ²
H_w	0.8	m
H'_w	3.5	m
γ_{sat}	17.5	kN/m ³
ϕ	18	°



Seguendo el procedimiento anterior, se obtienen los resultados mostrados en Tabla 4.6:

RESULTADOS		
d	0.20	adimensional
X0	6.80	m
Y0	8.00	m
C	20.00	kN/m ³
q	0.00	kN
μ_q	1.00	adimensional
μ_w	0.98	adimensional
μ'_w	0.97	adimensional
μ_t	1.00	adimensional
P _d	63.42	kN/m ²
P _e	36.77	kN/m ²
$\lambda C\phi$	0.60	adimensional
N _{cf}	8	adimensional
FS	2.52	

Tabla 4.6: Cálculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 1.

✓ *TALUD CARA SECA. (2H: 1V)*

Para el caso del talud seco únicamente se analiza al final de la construcción.

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	26.57	°
c	0	kN/m ²
H _w	0	m
H' _w	0	m
γ_{suelo}	22.45	kN/m ³
ϕ	35	°

Los resultados se muestran en la Tabla 4.7



RESULTADOS		
d	0	adimensional
Xo	4.4	m
Yo	6.4	m
C	0	kN/m ³
q	0	kN
μ_q	1	adimensional
μ_w	1	adimensional
μ'_w	1	adimensional
μ_t	1.00	adimensional
P _d	89.8	kN/m ²
P _e	89.8	kN/m ²
b	2	adimensional
FS	1.5	

Tabla 4.7: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 1.

ANÁLISIS DIQUE # 2.

✓ *TALUD CARA HÚMEDA. (3H : 1V)*

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	8.83	kN/m ²
H _w	0	m
H' _w	0	
γ_{suelo}	21	kN/m ³
ϕ	27	°

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados para los datos anteriores:



RESULTADOS		
d	0	adimensional
X0	8	m
Y0	7.6	m
C	8.83	kN/m ³
q	0	kN
μ_q	1	adimensional
μ_w	1	adimensional
μ'_w	1	adimensional
μ_t	1.00	adimensional
P _d	84	kN/m ²
P _e	84	kN/m ²
$\lambda C\phi$	4.85	adimensional
N _{cf}	30	adimensional
FS	3.15	

Tabla 4.8: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara húmeda del dique # 2.

- **Análisis de estabilidad después de un vaciado rápido.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	8.83	kN/m ²
H _w	0.80	m
H' _w	3.5	
γ_{sat}	22.5	kN/m ³
ϕ	27	°

La Tabla 4.9 muestra los resultados del análisis de estos datos:



RESULTADOS		
d	0.20	adimensional
X _o	6.80	m
Y _o	8.00	m
C	8.83	kN/m ³
q	0.00	kN
μ _q	1.00	adimensional
μ _w	0.98	adimensional
μ' _w	0.97	adimensional
μ _t	1.00	adimensional
P _d	83.83	kN/m ²
P _e	57.39	kN/m ²
λCφ	3.31	adimensional
N _{cf}	20	adimensional
FS	2.10	

Tabla 4.9: Cálculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 2.

✓ *TALUD CARA SECA. (2H: 1V)*

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	26.57	°
c	8.83	kN/m ²
H _w	0	m
H' _w	0	m
γ _{suelo}	21	kN/m ³
φ	27	°



El análisis de resultados se muestra en la Tabla 4.10

RESULTADOS		
d	0	adimensional
X ₀	4.4	m
Y ₀	6.4	m
C	8.83	kN/m ³
q	0	kN
μ _q	1	adimensional
μ _w	1	adimensional
μ' _w	1	adimensional
μ _t	1	adimensional
P _d	84	kN/m ²
P _e	84	kN/m ²
λCφ	4.85	adimensional
N _{cf}	20.1	adimensional
FS		
	2.11	

Tabla 4.10: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 2.

ANÁLISIS DIQUE # 3.

✓ *TALUD CARA HÚMEDA. (3H : 1V)*

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	5.89	kN/m ²
H _w	0	m
H' _w	0	
γ _{suelo}	20	kN/m ³
φ	25	°



Los resultados se muestran en la Tabla 4.11

RESULTADOS		
d	0	adimensional
X0	8	m
Y0	7.6	m
C	5.89	kN/m ³
q	0	kN
μ_q	1	adimensional
μ_w	1	adimensional
μ'_w	1	adimensional
μ_t	1	adimensional
P _d	80	kN/m ²
P _e	80	kN/m ²
$\lambda C\phi$	6.33	adimensional
N _{cf}	38	adimensional
FS	2.8	

Tabla 4.11: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara húmeda del dique # 3.

- **Análisis de estabilidad después de un vaciado rápido.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	5.89	kN/m ²
H _w	0.8	m
H' _w	3.5	
γ_{sat}	21	kN/m ³
ϕ	25	°

Los resultados del cálculo se presentan en la Tabla 4.12



RESULTADOS		
d	0.20	adimensional
Xo	6.80	m
Yo	8.00	m
C	5.89	kN/m ³
q	0.00	kN
μ_q	1.00	adimensional
μ_w	0.98	adimensional
μ'_w	0.97	adimensional
μ_t	1.00	adimensional
P _d	77.71	kN/m ²
P _e	51.20	kN/m ²
$\lambda C\phi$	4.05	adimensional
N _{cf}	25	adimensional
FS	1.9	

Tabla 4.12: Cálculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 3.

✓ *TALUD CARA SECA. (2H: 1V)*

- ***Análisis de estabilidad al final de la construcción.***

DATOS		
H	4	m
β	26.57	°
c	5.89	kN/m ²
H _w	0	m
H' _w	0	m
γ_{suelo}	20	kN/m ³
ϕ	25	°

Los resultados se muestran en la Tabla 4.13.



RESULTADOS		
d	0	adimensional
X _o	4.4	m
Y _o	6.4	m
C	5.89	kN/m ³
q	0	kN
μ _q	1	adimensional
μ _w	1	adimensional
μ' _w	1	adimensional
μ _t	1	adimensional
P _d	80	kN/m ²
P _e	80	kN/m ²
λCφ	4.05	adimensional
N _{cf}	28	adimensional
FS	2.06	

Tabla 4.13: Cálculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 3.

ANÁLISIS DIQUE # 4.

✓ TALUD CARA HÚMEDA. (3H : 1V)

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	20	kN/m ²
H _w	3.5	m
H' _w	0	m
γ _{suelo}	16	kN/m ³
φ	18	°

Los resultados se muestran en la Tabla 4.14.



RESULTADOS		
d	0	adimensional
Xo	8	m
Yo	7.6	m
C	20	kN/m ³
q	0	kN
μ_q	1	adimensional
μ_w	1	adimensional
μ'_w	1	adimensional
μ_t	1	adimensional
P _d	64	kN/m ²
P _e	64	kN/m ²
$\lambda C \phi$	1.29	adimensional
N _{cf}	14	adimensional
FS	3.5	

Tabla 4.14: Calculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara húmeda del dique # 4.

- **Análisis de estabilidad después de un vaciado rápido.**

DATOS		
H	4	m
β	18	°
c	20	kN/m ²
H _w	0.8	m
H' _w	3.5	m
γ_{sat}	17.5	kN/m ³
ϕ	18	°

La Tabla 4.15 muestra los resultados:



RESULTADOS		
d	0.20	adimensional
X _o	6.80	m
Y _o	8.00	m
C	20.00	kN/m ³
q	0.00	kN
μ _q	1.00	adimensional
μ _w	0.98	adimensional
μ' _w	0.97	adimensional
μ _t	1.00	adimensional
P _d	63.42	kN/m ²
P _e	36.77	kN/m ²
λCφ	0.86	adimensional
N _{cf}	10	adimensional
FS		
	3.15	

Tabla 4.15: Calculo del factor de seguridad después de un vaciado rápido en la cara húmeda del dique # 4.

✓ *TALUD CARA SECA. (2H: 1V)*

- **Análisis de estabilidad al final de la construcción.**

DATOS		
H	4	m
β	26.57	°
c	20	kN/m ²
H _w	0	m
H' _w	0	m
γ _{suelo}	16	kN/m ³
φ	18	°

Los resultados se muestran en la Tabla 4.16.



RESULTADOS		
d	0	adimensional
X0	4.4	m
Y0	6.4	m
C	20	kN/m ³
q	0	kN
μ_q	1	adimensional
μ_w	1	adimensional
μ'_w	1	adimensional
μ_t	1	adimensional
P _d	64	kN/m ²
P _e	64	kN/m ²
$\lambda C\phi$	1.04	adimensional
N _{cf}	11	adimensional
FS	3.44	

Tabla 4.16: Calculo del factor de seguridad al final de la construcción en la cara seca del dique # 4.

Una vez realizado el análisis de estabilidad en los cuatro diques de prueba, se obtuvieron los factores de seguridad que se muestran en la siguiente tabla.

# Dique	FS después de la construcción	FS después de un lavado rápido	Talud
1	3.44	2.52	Húmedo
	1.5		Seco
2	3.15	2.10	Húmedo
	2.11		Seco
3	2.80	1.90	Húmedo
	2.06		Seco
4	3.5	3.15	Húmedo
	3.44		Seco

Tabla 4.17: Resultados del análisis de estabilidad empleando los ábacos de Janbú.



4.3 Análisis de los diferentes tipos de fallas.

4.3.1 Agrietamiento.

De La bibliografía consultada, podemos dar algunas medidas que se deben tomar en consideración, para evitar que se produzca el agrietamiento.

- a) Utilizar suelos plásticos en la medida de lo posible. Se recomienda suelos con $I_p \geq 15 \%$, que son materiales no propensos al agrietamiento.
- b) Compactar los mismos con energías de compactación baja, similares a las del Proctor Estándar estudiado en el laboratorio, cuyo valor de la humedad óptima se encuentra, frecuentemente, próxima al LP, de los suelos finos.
- c) Compactar con humedades en un rango de valores entre $\pm 2 \%$ de la humedad óptima del Proctor Estándar y grados de compactación por encima del 90 % de dicha energía en diques de tierra de 4ta categoría y por encima del 95 % en diques de tierra de 3ra, 2da y 1ra categoría.
- d) Si contrario al inciso (a) y bastante común, el suelo seleccionado tiene un $I_p < 15 \%$, entonces el suelo se considera propenso al agrietamiento y la única medida a considerar para evitar esta falla, está en cómo compactarlo. Para ello se exige compactar el suelo con humedades por encima de la óptima del Proctor Estándar y siempre por encima del LP, del suelo. Bajo ninguna circunstancia se puede admitir compactar, en este caso, con humedades por debajo del LP, y menos aún no alcanzar grados de compactación superiores al 90 % de la energía del Proctor Estándar en diques de 4ta categoría y al 95 % en el resto de los diques con categorías de 3ra, 2da y 1ra.

De acuerdo con los criterios anteriores y con los resultados de los ensayos de los materiales, podemos decir que los diques del proyecto Control de Inundaciones del río Cañar, no están propensos al agrietamiento, debido a que tienen un $IP = (15-16)$ como se observa en la Tabla 3.1 en el Capítulo 3.

Además, la compactación en campo se realizó con energías similares a la del Proctor Estándar y se verificó que el grado de compactación fuera superior al 95 %, como se observa en la Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13 y Tabla 3.14, en el Capítulo 3



4.3.2 Sifonamiento mecánico.

Las medidas para evitar este tipo de fallas, están en función de la selección de los materiales a utilizar y la forma de colocarlos en la obra, y tienen que supeditarse a las recomendaciones dadas para evitar el agrietamiento. Esto se debe a que para evitar el sifonamiento mecánico el proyectista tiene otras medidas efectivas, como son la colocación de drenes con filtro invertido y el diseño de elementos contra filtraciones como son: dentellones, paredes de suelo, tablestacas, delantales e inyecciones, que tienen como objetivo reducir el gradiente hidráulico, “ i ”, en la cimentación.

El sifonamiento mecánico puede producirse también debido a la presencia de suelos dispersivos como materiales de construcción.

De acuerdo a lo anterior, nuestros diques no estarían propensos a este tipo de fallas, una vez que se tomaron todas las medidas para evitar el agrietamiento, además los diques estarán en contacto con el agua durante cortos periodos de tiempo, solamente durante una avenida, por lo que el agua no lograría infiltrarse completamente en el cuerpo del dique, con lo que se reduce el riesgo de arrastre de partículas, que es lo que produce el sifonamiento mecánico.

De acuerdo a observaciones de los suelos, realizados en la zona se puede determinar que, las arcillas que se utilizaran en la construcción de los diques, no se encuentran en zonas con alto contenido de sodio, ni sales disueltas, con lo que se descarta la presencia de arcillas dispersivas.

4.3.3 Sismos.

El efecto de un sismo en los diques, puede causar grietas longitudinales y asentamientos en la corona del dique, puede ocurrir también debido al sismo el fenómeno de licuación, cuando los materiales utilizados en la construcción del mismo, se tratan de suelos licuables.

El efecto de los sismos es notorio cuando se trata de presas de tierra de gran altura, podemos decir entonces, que el efecto de los sismos, en los diques del proyecto, serían casi nulos debido a que son de pequeña altura, además los materiales con los



que se construyen son materiales plásticos, que ayudarían a dar mayor flexibilidad y evitar el agrietamiento que los sismos puedan ocasionar.

4.3.4 Rebase de la cortina.

La falla debido al rebase de la cortina es una falla que depende del estudio hidrológico de la cuenca, pero este problema no está dentro del objetivo de nuestro proyecto, pues el propósito de este proyecto, es analizar el problema de los diques desde un aspecto geotécnico. Sin embargo el rebase de la cortina puede producirse debido asentamientos excesivos en los cimientos y en la cortina, nuestro proyecto está fuera del alcance de este tema, sin embargo se da algunas recomendaciones tomadas de la literatura consultada, para evitar este tipo de falla: como son la colocación de bermas, aguas arriba y aguas abajo, para distribuir las cargas en una mayor área; con lo que reduce los agrietamientos interiores en la presa. Debe preverse además, por el proyecto, el recrecimiento de la cortina.

4.3.5 Licuación.

Este fenómeno de la licuación está asociado a limos y arenas no plásticas. En el caso de una presa de tierra, la licuación de materiales en la cortina conduce a un derrame de los mismos en grandes áreas, hasta adoptar taludes irregulares y muy tendidos, que en algunos casos pueden sobrepasar el valor 10:1.

Como ya se dijo, los suelos más susceptibles a la licuación son los finos, no cohesivos, de estructura suelta y saturados. Estas características describen a las arenas finas y uniformes y a los finos no plásticos, o sus mezclas.

Las arenas sueltas con $D_{10} < 0,1\text{mm}$ y coeficiente de uniformidad, $C_u < 5$ y los limos con $I_p < 6\%$ son los materiales más peligrosos, tanto en la cortina como en el terreno de cimentación de una presa de tierra.

Los materiales utilizados en nuestro proyecto no se encuentran dentro de este rango por lo que la probabilidad de falla debido a este problema es baja.



4.4 Análisis Económico.

Luego de realizado el análisis geotécnico de cada uno de los diques de prueba, se procederá también a analizar el costo de cada uno, con el fin de determinar el dique más favorable para el proyecto, de tal manera que se obtenga un dique seguro y con el menor costo.

El análisis económico se efectuará empleando los rubros establecidos en el diseño definitivo del proyecto, calculando las cantidades o volúmenes de los mismos, y a partir de los precios unitarios fijados para cada rubro, se estimará el costo de construcción de cada alternativa de dique.

En la Tabla 4.18 se muestran los rubros utilizados para el análisis de costos.

RUBRO No.	DESCRIPCION	Unidad	P. Unitario (\$)
503045	Replanteo y nivelación	Km	674.10
503022	Desbroce, desbosque y limpieza	Ha	612.96
503008	Retiro y acopio de capa vegetal	m ³	0.90
503051	Conformación y compactación de la subrasante	m ²	0.49
507014	Relleno con material de banco local incluye excavación, material y compactación, no se paga transporte	m ³	2.93
501002	Relleno con material de banco local incluye excavación, material , compactación y mezclado, no se paga transporte	m ³	3.87
501008	Relleno con material de banco local incluye excavación, material ,compactación, mezclado y cribado, no se paga transporte	m ³	5.64
507021	Relleno con material de río o By-Pass	m ³	2.93
503041	Acarreo de Materiales	m ³ -Km	2.93

Tabla 4.18: Rubros utilizados para el análisis de costos de construcción de los diques.

Hay que tener en cuenta, que las cuatro alternativas de diques tienen las mismas características geométricas, la diferencia está en el porcentaje de material utilizado en cada dique.

En las Figura 4.9 se muestra la geometría de los diques y su nomenclatura utilizada en la medición de las cantidades de obra.

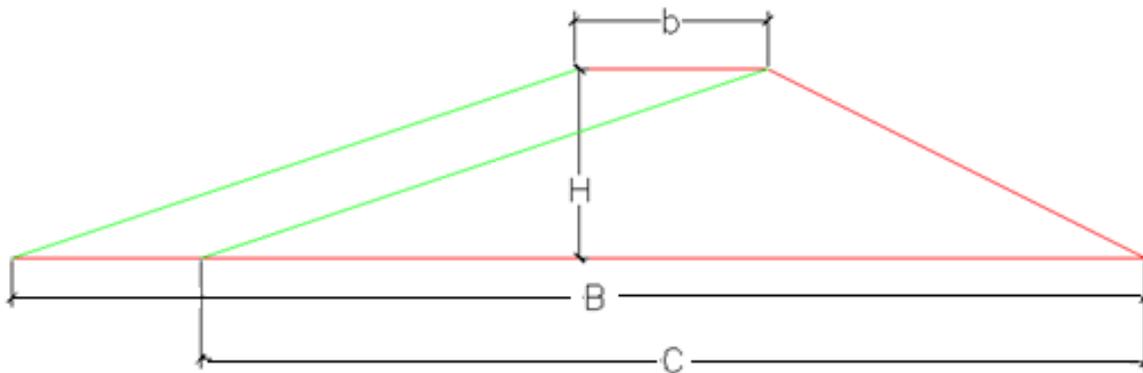


Figura 4.9: Esquema de la geometría y nomenclatura de diques para cálculo de cantidades de obra.

Dónde:

H = altura del dique

B = ancho de la base

b= ancho de la corona

C = ancho de la base del triángulo formado por el espaldón en el dique de pantalla de arcilla

L= longitud del dique

h = espesor de capa para el retiro y acopio de capa vegetal

La medición de las cantidades de obra para cada uno de los rubros, realizada en los diques de prueba se presenta a continuación:

4.4.1 Replanteo y nivelación.

El replanteo y nivelación se pagará de acuerdo a la longitud del eje del dique construido en km. Los resultados se muestran en la Tabla 4.21.

# Dique	L (km)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
1	0,05	674,1	33,71
2	0,05	674,1	33,71
3	0,05	674,1	33,71
4	0,05	674,1	33,71

Tabla 4.19: Costos de replanteo y nivelación de los diques de prueba.



4.4.2 Desbroce, desbosque y limpieza.

El área de desbroce se determina a partir del ancho de la base (B) multiplicado por longitud (L) de cada uno de los diques. La unidad de medida será la hectárea. Los resultados se muestran en la Tabla 4.20

# Dique	B (m)	L (m)	Área (ha)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
1	25	50	0,125	612,96	76,62
2	25	50	0,125	612,96	76,62
3	25	50	0,125	612,96	76,62
4	25	50	0,125	612,96	76,62

Tabla 4.20: Costos de desbroce, desbosque y limpieza de los diques de prueba.

4.4.3 Retiro y acopio de capa vegetal.

El retiro y acopio de capa vegetal se mide en m^3 , cuyo volumen es el resultado de multiplicar la longitud del dique, por el área de su base y por un espesor de treinta cm. Los resultados se muestran en la Tabla 4.21

# Dique	L (m)	B (m)	h (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
1	50	25	0,3	1250	375	0,9	337,50
2	50	25	0,3	1250	375	0,9	337,50
3	50	25	0,3	1250	375	0,9	337,50
4	50	25	0,3	1250	375	0,9	337,50

Tabla 4.21: Costos de retiro y acopio de capa vegetal de los diques de prueba

4.4.4 Conformación y compactación de la subrasante.

La conformación y compactación de la subrasante se mide en m^2 , a partir de la longitud del dique por el ancho de su base. (Ver Fotografías 4 y 5, Anexos). Los resultados se muestran en la Tabla 4.22

# Dique	L (m)	B (m)	Área (m^2)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
1	50	25	1250	0,49	612,5
2	50	25	1250	0,49	612,5
3	50	25	1250	0,49	612,5
4	50	25	1250	0,49	612,5

Tabla 4.22: Costos de conformación y compactación de la subrasante de los diques de prueba



4.4.5 Relleno.

El relleno del dique se mide en m^3 , el volumen se determina en función del área de sección transversal del dique por la longitud del mismo. Para el caso del dique con pantalla de arcilla, se debe determinar al área de sección transversal, tanto de la pantalla de arcilla como del espaldón conformado por material de río. Los resultados se muestran en las Tablas 4.23-4.26.

DIQUE # 1						
PANTALLA DE ARCILLA						
L (m)	H (m)	b (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
50	4	4	16	800	2,93	2344
ESPALDÓN CON MATERIAL GRANULAR DE RIO						
L (m)	C (m)	H (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
50	21	4	42	2100	2,93	6153
TOTAL						8497

Tabla 4.23: Costos de relleno del dique # 1.

DIQUE # 2							
L (m)	B (m)	b (m)	H (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	P. Unitario (\$)	P Total (\$)
50	25	4	4	58	2900	5,64	16356

Tabla 4.24: Costos de relleno del dique # 2.

DIQUE # 3							
L (m)	B (m)	b (m)	H (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	P. Unitario (\$)	P Total (\$)
50	25	4	4	58	2900	3,87	11223

Tabla 4.25: Costos de relleno del dique # 3.

DIQUE # 4							
L (m)	B (m)	b (m)	H (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)	P. Unitario (\$)	P Total (\$)
50	25	4	4	58	2900	2,93	8497

Tabla 4.26: Costos de relleno del dique # 4.

4.4.6 Acarreo de materiales.

La unidad de medida del acarreo de materiales es el m^3 por km, debemos considerar en el costo del acarreo que cuando existe relleno de banco local, no se paga el transporte del material, por lo que en los diques 1, 2, 3 solamente se paga el transporte del volumen arcilla, además para los diques 2 y 3 el volumen transportado es la 50 % del volumen de dique, debido a que los diques están conformados por 50% de arcilla y 50 % de material de río. Los resultados se muestran en las Tablas 4.27-4.30.



DIQUE # 1				
Distancia (Km.)	Volumen (m ³)	Volumen transportado (m ³ *Km)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
8	800	6400	0,25	1600

Tabla 4.27: Costos de acarreo de materiales del dique # 1.

DIQUE # 2				
Distancia (Km.)	Volumen (m ³)	Volumen transportado (m ³ *Km)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
8	1450	11600	0,25	2900

Tabla 4.28: Costos de acarreo de materiales del dique # 2.

DIQUE # 3				
Distancia (Km.)	Volumen (m ³)	Volumen transportado (m ³ *Km)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
8	1450	11600	0,25	2900

Tabla 4.29: Costos de acarreo de materiales del dique # 3.

DIQUE # 4				
Distancia (Km.)	Volumen (m ³)	Volumen transportado (m ³ *Km)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
8	2900	23200	0,25	5800

Tabla 4.30: Costos de acarreo de materiales del dique # 4.

Luego de analizados cada uno de los rubros, el costo total de cada dique se indica en la Tabla 4.31.

DESCRIPCIÓN	# DIQUE			
	1	2	3	4
Replanteo y nivelación	33,71 \$	33,71 \$	33,71 \$	33,71 \$
Desbroce, desbosque y limpieza	76,62 \$	76,62 \$	76,62 \$	76,62 \$
Retiro y acopio de capa vegetal	337,50 \$	337,50 \$	337,50 \$	337,50 \$
Conformación y compactación de la subrasante	612,50 \$	612,50 \$	612,50 \$	612,50 \$
Relleno de dique	8497,00 \$	16356,00 \$	11223,00 \$	8497,00 \$
Acarreo de materiales	1600,00 \$	2900,00 \$	2900,00 \$	5800,00 \$
COSTO TOTAL	11157,33 \$	20316,33 \$	15183,33 \$	15357,33 \$

Tabla 4.31: Costos totales de construcción de los diques de prueba.

La Tabla 4.31 indica que el dique de menor costo es el dique # 1 construido con pantalla de arcilla y espaldón granular.



Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

✓ Del proceso constructivo de los diques de prueba se pudo concluir que es necesario seguir una metodología de construcción apropiada, que comprenda el siguiente procedimiento:

- Desbroce del terreno.
- Retiro de la capa vegetal.
- Excavación y preparación del material en los préstamos.
- Transporte del material
- Colocación y conformación en capas del material en el terraplén.
- Compactación

Estos procesos son muy necesarios para garantizar un correcto funcionamiento estructural y de resistencia, exigido en los diques del proyecto Control de Inundaciones del río Cañar.

Así también, de los diques de prueba se pudo determinar que los materiales deben colocarse en capas de 30 cm de espesor compactadas, con un contenido de humedad de 0 a $\pm 3\%$ de la óptima y con una densidad seca en campo del 95% de la densidad seca máxima en laboratorio, según los ensayos Proctor Estándar para arcillas y Proctor Modificado para gravas y mezclas.

Los materiales arcillosos que se encuentran en estado natural con humedades altas, por su baja permeabilidad, es recomendable emplear una energía de compactación baja, ya que un incremento de la energía de compactación aumenta la rigidez de los diques, poniendo en peligro la falla por agrietamiento ante la presencia de asentamientos diferenciales en la base de los mismos. Por ello se recomienda compactar estos terraplenes con humedades por encima del Límite Plástico, que en la inmensa mayoría de los suelos está muy cercana a la humedad óptima de la prueba Proctor Estándar.

Los materiales provenientes del río que se encuentran en estado natural con humedades bajas, por su alta permeabilidad se deben emplear energías de compactación altas, ya que un incremento de la energía de compactación logra incrementos sustanciales del peso específico seco, y por ende de la resistencia, justificándose por tanto el incremento de los costos de compactación.



- ✓ Los resultados obtenidos en los análisis de las diferentes muestras de arcilla de la mina by-pass, utilizadas en la construcción de los diques, nos muestran que son arcillas de media a baja plasticidad (CL), con IP entre 15 y 16, y una permeabilidad promedio $K = 2.09 \times 10^{-7}$ cm/seg; por lo que podemos concluir que es una arcilla apta para la construcción de diques, debido a que es una arcilla plástica, y de baja permeabilidad, ideal para evitar problemas como el agrietamiento, y el sifonamiento mecánico.

Los materiales granulares obtenidos del río Cañar, se clasificaron como gravas limosas, con una tasa de infiltración $f = 7,17 \times 10^{-3}$ cm/seg; lo cual supone una permeabilidad alta, por lo que el material solamente puede ser empleado como espaldón en diques con pantalla o núcleo de arcilla y como materiales filtro.

Sin embargo en nuestro proyecto este material también se mezcló con arcilla, aspirando obtener una mezcla homogénea para alcanzar una permeabilidad baja o media, y determinar si estas alternativas de diques eran aptas para la construcción.

Los ensayos de clasificación realizados a las muestras de material mezclado (arcilla y material de río) dieron como resultado una grava arcillosa con arena.

La tasa de infiltración $f = 8.69 \times 10^{-4}$ cm/seg, supone una permeabilidad media, lo cual está dentro de los límites de permeabilidad establecidos en el proyecto.

De todos estos análisis se puede concluir que los materiales encontrados en la zona del proyecto son aptos para la construcción de cualquier tipo de dique.

- ✓ Del análisis de estabilidad podemos determinar que para cada uno de los diques, el estado más crítico, es durante un vaciado rápido. Pero se puede ver que los factores de seguridad (FS) de todos los diques son mayores que 1.5, con lo que podemos concluir que ninguno de los diques presentará una falla catastrófica debido al deslizamiento de taludes.



- ✓ Los análisis de las fallas catastróficas efectuadas en los diques de prueba, fundamentados en las características de los materiales tanto arcillosos como granulares, así como también la permeabilidad de los mismos nos indican que los diques de nuestro proyecto no están propensos a ninguno de este tipo de fallas.

- ✓ Del análisis económico realizado en los diques de prueba se puede concluir que la disminución de gastos de transporte de los materiales de construcción, producirá una considerable reducción en el costo total del proyecto. Generalmente, el tipo de dique más económico será aquel para el que se encuentren los materiales en suficiente cantidad y a una distancia razonable del emplazamiento de los diques. En nuestro proyecto de acuerdo al análisis el dique de menor costo es el dique con pantalla de arcilla y espaldón granular.

- ✓ Finalmente se pudo concluir, que es recomendable utilizar dos de los modelos de prueba: el modelo de pantalla de arcilla y espaldón granular se utilizará en los márgenes de los ríos debido a que la mina de arcilla se encuentra a una distancia considerable, lo que eleva el costo de transporte; y el modelo de dique homogéneo de arcilla, sería conveniente en la construcción del by-pass ya que los materiales arcillosos se obtendrían directamente de la excavación del cauce del mismo y no se necesitaría transporte.

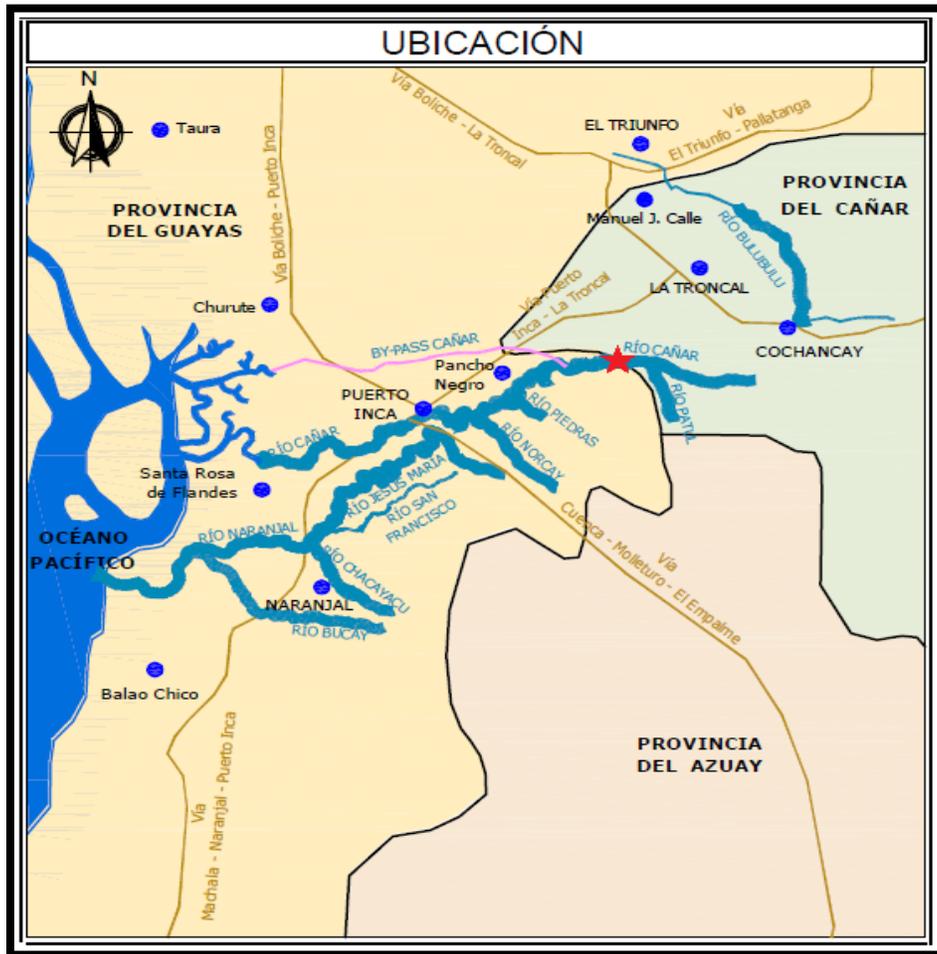


REFERENCIAS

- [1] BUREAU OF RECLAMATION, “Diseño de pequeñas presas”, 2007, Editorial Bellisco, España.
- [2] Armas Novoa, Rolando, “Criterios para diseñar presas de tierra prioridad y secuencia”, 2002, Editorial ISPJAE, Cuba.
- [3] Armas Novoa, Rolando, Horta Mestas, Evelio, “Presas de Tierra”, 2010, Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba
- [4] Das, Braja M, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, 2001, Editorial Teaching and Learning, México.
- [5] Instituto para la mitigación de los efectos del fenómeno del niño, “Diques de Tierra y enrocado”, 2003, Perú.
- [6] Suarez, L. “Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos”, 1993, Editorial CARACAS MARNR, Venezuela.
- [7] Crespo Villalaz, Carlos. “Mecánica De Suelos y Cimentaciones”, 1994, Editorial LIMUSA, S.A de C.V Grupo Noriega Editores, México D.F.
- [8] Bañon Blázquez, Luis; Beviá García, José Francisco. “Manual de carreteras”. Alicante, Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A., 2000. Vol. 2. ISBN 84-607-0123-9, España.
- [9] Juárez Badillo y Rico Rodríguez, “Mecánica de suelos Tomo 1: Fundamentos de la mecánica de suelos”, 2005, Editorial Limusa, México.
- [10] Donald W. Taylor. “Principios fundamentales de mecánica de suelos”, 1961, Compañía editorial Continental, S.A, México 22, D.F.
- [11] Armas Novoa, Rolando, “Compactación de Suelos”, 2006, ISPJAE, Cuba.
- [12] Suarez, Jaime. “Deslizamientos. Análisis geotécnico Vol. 1”, 2009, Universidad Industrial de Santander. Escuela de filosofía, Colombia.



ANEXOS.



Fotografía 1. Ubicación del Proyecto. ★



Fotografía 2. Desbroce, desbosque y limpieza



Fotografía 3. Retiro y acopio de la capa vegetal



Fotografía 4. Conformación y preparación de la subrasante



Fotografía 5. Compactación de la subrasante



Fotografía 6.Excavación y obtención de arcilla en la mina.



Fotografía 7.Excavación y obtención de material granular en el margen del río Cañar.



Fotografía 8.Cribado del material granular proveniente del río.



Fotografía 9.Colocación de materiales.



Fotografía 10.Colocación de materiales



Fotografía 11.Mezcla de materiales



Fotografía 12.Material arcilloso compactado con rodillo vibratorio pata de cabra, autopropulsado.



Fotografía 13.Material granular compactado con rodillo vibratorio liso, autopropulsado.



Fotografía 14.Comprobación del porcentaje de compactación y control de humedad.



Fotografía 15.Verificación de cotas luego del colocado de cada capa.



Fotografía 16.Conformación del dique mediante capas



Fotografía 17.Perfilado de taludes