



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REPARACIÓN POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y
CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA**

Alan Vásquez Dardón

Asesorado por el Ing. Abdel Vásquez Domínguez

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REPARACIÓN POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y
CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ALAN VÁSQUEZ DARDÓN

ASESORADO POR EL ING. ABDEL VÁSQUEZ DOMÍNGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Ing. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

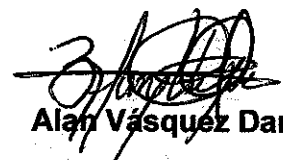
DECANO	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REPARACIÓN POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 4 de septiembre de 2014.


Alan Vásquez Dardón



Guatemala, 12 de octubre 2016

**INGENIERO
HUGO LEONEL MONTENEGRO FRANCO
DIRECTOR DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Ingeniero Montenegro:

Por este medio hago constar que he revisado el contenido del trabajo de tesis del estudiante Alan Vásquez Dardón titulado **"PROPUESTA TECNICA PARA LA REPARACION POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA SANTA MARIA"**, el cual en mi carácter de Asesor doy por aceptado, ya que reúne la información técnica suficiente para ser sometido a su aprobación, y continuar con el trámite correspondiente.

Atentamente,

ING. ABDEL VÁSQUEZ DOMÍNGUEZ
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA -EGEE-
Tel: 24221958





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
11 de noviembre de 2016

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REPARACIÓN POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Alan Vásquez Dardón, quien contó con la asesoría del Ing. Abdel Vásquez Domínguez.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA TODOS

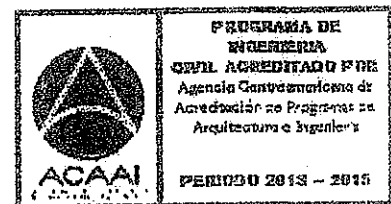
Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Abdel Vásquez Domínguez y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón, al trabajo de graduación del estudiante Alan Vásquez Dardón, titulado **PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REPARACIÓN POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

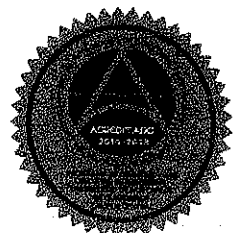

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, Febrero 2017

/mrrm.

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.D.102.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REPARACIÓN POR DESGASTE DE VERTEDEROS Y CANAL DE DESFOGUE DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA SANTA MARÍA**, presentado por el estudiante universitario **Alan Vásquez Dardón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2017



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el pilar de mi vida, mi fuerza, mi paz, mi todo.
Mis padres	Abdel Vásquez Domínguez y Rosa Elieth Dardón Flores de Vásquez, por su apoyo incondicional, su amor y dedicación.
Mi hermana	Eliet Vásquez Dardón, por ser parte importante en mi vida y estar conmigo en todo momento.
Mi hermano	Abdel Vásquez Dardón, por ser mi compañero incondicional y el mejor amigo.
Mi abuelo	Rogelio Vásquez Martínez, por ser la mayor inspiración que acompañó mi carrera.
Mis abuelitas	Oralia Domínguez de Vásquez y Etelvina viuda de Dardón, por ser una importante influencia en mi vida.
Mis primos	Roaldo Vásquez Arriaga y Alejandro Vásquez González, con cariño especial.

Mis amigos

Débora Calderón, Ariel Cano, Raúl Carrera, Mynor Aroche, Leonel Aguirre, Sergio Berducido, Luis Nájera. Juan Pablo y Estuardo Salazar, Obed y Ricardo Contreras.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi querida Guatemala	Por darme la oportunidad de realizar mi carrera profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> que me brindó los conocimientos universales para el ejercicio profesional.
Facultad de Ingeniería	Por el aprendizaje profesional adquirido.
Ing. Venancio Dimas de Paz	Por su apoyo, dedicación y orientación en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. RESEÑA HISTÓRICA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA.....	1
2. DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	5
2.1. Localización.....	5
2.2. Obras de derivación	5
2.2.1. Canal auxiliar	5
2.2.2. Embalse de regulación	5
2.2.3. Presa	6
2.2.4. Bocatoma.....	10
2.2.5. Desarenador	11
2.2.6. Cámara de carga	12
2.3. Tubería de baja presión.....	13
2.4. Chimenea de equilibrio	13
2.5. Casa de válvulas	13
2.5.1. Válvula de protección de tubería	14
2.5.2. Válvula niveladora de presiones.....	14
2.5.3. Válvula para desagüe	14

2.6.	Tubería de alta presión	14
2.7.	Casa de máquinas	15
2.8.	Desfogue	17
2.9.	Subestación	17
3.	ESTADO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	19
3.1.	Desempeño en generación	19
3.2.	Funcionamiento de estructuras	19
4.	ESTUDIO GEOLÓGICO	27
4.1.	Aspectos geotécnicos	27
4.1.1.	Depósitos coluviales.....	27
4.1.2.	Depósitos aluviales	28
4.1.3.	Depósitos de origen volcánico.....	30
4.1.4.	Lavas volcánicas	32
4.2.	Geología regional	34
4.3.	Geología local	34
4.4.	Hidrogeología e Hidrología.....	40
5.	ESTUDIO HIDRÁULICO	47
5.1.	Caracterización básica	47
5.2.	Análisis de crecidas.....	48
5.2.1.	Análisis de frecuencia de serie anual de caudales máximos.....	48
5.2.2.	Análisis de frecuencias.....	50
5.2.3.	Caudales pico.....	54
5.3.	Análisis hidráulico.....	54
5.3.1.	Capacidad hidráulica del sistema de vertederos	54
5.4.	Problemas en presa	56

5.4.1.	Desgaste en la superficie de vertedero 6	56
5.5.	Análisis de la calidad del agua	57
6.	ESTUDIO TOPOGRÁFICO	59
6.1.	Levantamiento en planta	59
6.2.	Perfil longitudinal	60
7.	ESTUDIO DE SUELOS Y ANÁLISIS DEL CONCRETO	61
8.	SÍNTESIS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS Y PROPUESTAS TÉCNICAS	67
8.1.	Solución para los vertederos	67
8.2.	Solución para el canal de desfogue.....	68
8.2.1.	Diseño del nuevo canal de desfogue.....	68
8.2.2.	Cuantificación de materiales para la reconstrucción del nuevo canal de desfogue.....	73
8.2.2.1.	Diseño de mezcla de concreto.....	74
8.2.2.2.	Cálculo de la cantidad de concreto y volumen de agregados	80
8.2.2.3.	Cálculo del acero de refuerzo	81
8.2.3.	Cuantificación de materiales para obras complementarias.	87
8.2.3.1.	Relleno de concreto bajo nuevo canal de desfogue	87
8.2.3.2.	Muro de concreto para anclaje final de la solera del canal de desfogue	89
8.3.	Propuesta del nuevo canal de desfogue para la hidroeléctrica Santa María.....	90

CONCLUSIONES.....95
RECOMENDACIONES97
BIBLIOGRAFÍA.....99
APÉNDICE103
ANEXOS.....105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Fotografía de la presa vista aguas abajo	8
2. Vista del canal de desfogue desde la corona de la presa	8
3. Ubicación y vías de acceso proyecto hidroeléctrico Santa María	9
4. Fotografía de Bocatoma.....	10
5. Plano de bocatoma	11
6. Plano de Desarenados.....	12
7. Vista inferior de la sección puente-canal del canal auxiliar.	20
8. Desfase de la trayectoria del río Samalá en la entrada al embalse	21
9. Estado actual del canal de desfogue	22
10. Daños identificados en canal de desfogue.....	23
11. Daños al costado del canal de desfogue.....	24
12. Refuerzo expuesto en losa del canal de desfogue.....	24
13. Coluvios y depósitos de suelos en margen izquierda del río, en zona de vertedero.....	29
14. Lavas andésicas margen derecha, aguas abajo con base del vertedero.....	33
15. Mapa geológico regional	35
16. Mapa geológico – estructural. Área presa y embalse Santa María.	36
17. Suelos gravas y bloques por eventos de crecidas recientes.....	38
18. Depósitos de sedimentos finos de antigua terraza y paleocauce de río Samalá, margen izquierda, aguas abajo de presa.....	39
19. Lavas andesíticas en la base de presa y aguas debajo de embalse de hidroeléctrica Santa María.....	40

20. Régimen de lluvia anual, desde 1990 al 2003	44
21. Temperatura mensual promedio, desde 1990 al 2003.....	44
22. Régimen de vientos, desde 1990 al 2003.....	45
23. Mapa de estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Samalá.	49
24. Hidrograma de crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1979 y 2013.....	50
25. Crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1979 y 2013 junto a curvas de frecuencia teóricas utilizadas en el análisis.....	51
26. Crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1996 y 2013 junto a la curva de frecuencia que se estima la más apropiada.	52
27. Crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1979 y 2013, sin el valor de las crecidas durante el Agatha (2010) y 12E (2011) junto a curvas de frecuencias teóricas utilizadas en el análisis.	53
28. Comparación de curvas de frecuencia con y sin considerar los eventos durante los ciclones 12E en 2011 y Agatha en 2010.	53
29. Vista de la presa y sus seis vertederos.....	55
30. Planta del canal de desfogue.....	59
31. Perfil longitudinal del canal de desfogue.....	60
32. Puntos de extracción de núcleos en la losa del piso del vertedero, hidroeléctrica Santa María.....	64
33. Perfil longitudinal de la nueva propuesta para el canal de desfogue.....	71
34. Detalle de armado y anclaje	72
35. Armado de losa No. 9	83
36. Isométrico de la propuesta del canal de desfogue.....	91
37. Planta de la propuesta del canal de desfogue	92
38. Perfil de la propuesta del canal de desfogue	93

39. Armado de muro de anclaje	94
-------------------------------------	----

TABLAS

I. Características principales del embalse	6
II. Características principales de la presa.....	7
III. Características de la tubería presión.....	15
IV. Características de la casa de máquinas.....	16
V. Características de las turbinas	16
VI. Características de los generadores.....	16
VII. Propiedades geotécnicas de rocas presentes en el área.....	33
VIII. Leyenda de mapa geológico – estructural (figura 15)	36
IX. Leyenda de mapa geológico – estructural (figura 16)	37
X. Serie de caudales máximos instantáneos, QMX (m ³ /s) en la estación El Túnel.....	48
XI. Caudales máximos (m ³ /s) con diferente periodo de retorno (Tr) en la estación El Túnel y traslados al sitio de presa Santa María, en función del incremento del área tributaria	54
XII. Capacidad de desfogue de los vertederos, según las dimensiones proporcionadas por el INDE	56
XIII. Análisis de calidad del agua	57
XIV. Resultado del análisis de laboratorio sobre sedimentos	61
XV. Resultado de las pruebas de resistencia de concreto no destructivo (martillo Schmidt)	63
XVI. Resultados de resistencia a compresión del concreto de la losa de piso del vertedero.....	65
XVII. Características de los materiales	73

XXVIII.	Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra	75
XIX.	Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto.....	77
XX.	Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.....	79
XXI.	Proporciones materiales para un metro cúbico de mezcla de concreto	79
XXII.	Características geométricas de losas que conforman el canal de desfogue	80
XXIII.	Resumen de materiales para la reparación del canal de desfogue	85
XXIV.	Resumen de acero para anclaje de la nueva losa del canal de desfogue	86
XXV.	Acero para el relleno de concreto bajo nuevo canal de desfogue.....	88
XXVI.	Acero para anclajes del relleno de concreto bajo nuevo canal de desfogue	88
XXVII.	Volúmenes de concreto para muro de anclaje.....	89
XXVIII.	Acero de refuerzo para la base de la solera del canal	89
XXIX.	Acero de refuerzo de muro para anclaje	90

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
cm²	Centímetros cuadrados
cm³	Centímetros cúbicos
\emptyset_{barra}	Diámetro de barra
°C	Grados Celsius
h	Horas
kg	Kilogramo
lts	Litros
MW	Mega watts o Mega vatios
m	Metros
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos
msn	Metros sobre el nivel del mar
μS/cm	Micro siemen por centímetro
mm	Milímetros
mm²	Milímetros cuadrados
mg/L	Miligramos por litro
%	Porcentaje
qq	Quintales
UTN	Unidades Nefelométricas de turbidez

GLOSARIO

Aliviadero	Estructura hidráulica cuya finalidad es derivar un caudal de agua.
AMM	Administrador del mercado mayorista.
Basalto	Roca ígnea volcánica de color oscuro, de composición máfica, rica en silicatos de magnesio y hierro.
Batimetría	Conjunto de técnicas para la medición de las profundidades del mar, ríos, entre otros, y el estudio de la distribución de las plantas y animales en sus diversas capas o zonas.
Bocatoma	Estructura destinada a emanar desde unos cursos de agua, una cantidad considerable del agua que esta tiene disponible.
Borde libre de presa	Distancia máxima entre la cresta de la presa y la altura máxima del agua en el vertedero para la inundación de diseño.
Casa de máquinas	Estructura donde se albergan los equipos como turbinas, generadores, grúas, paneles de control, sistemas de regulación, equipos de protección,

seccionadores, bobina de choque, barras de potencia, bodega de repuestos, la sala de operadores, entre otros.

CNNE

Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Corona de presa

Representa la parte más alta de la presa.

Cresta de una presa

Altura máxima de una presa, donde inician los vertederos.

Detritos

Resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas.

Erosión

Arrastre de partículas constituyentes del suelo debido la acción del agua en movimiento o la acción del viento.

Facies

Conjunto de características de una roca o terreno consideradas desde el punto de vista de su formación.

Factor de planta

Relación entre la energía real producida por una central generadora en un período dado, y la energía máxima que hubiera producido si se hubiera mantenido siempre a plena carga.

Factor de potencia

Medida de la capacidad de una carga de absorber potencia activa, relación entre la potencia activa y la

potencia aparente.

Lahares

Flujos de materiales volcánicos generados cuando el agua meteórica, la de escorrentía superficial, la del deshielo parcial de glaciares o fusión de nieve, se mezcla con estos materiales y se desplaza transportándolos en masa por los barrancos y cauces fluviales que tienen sus cabeceras en las laderas del volcán.

Presa

Estructura construida en el cauce de un río u otro cuerpo de agua que tiene como objeto embalsar o derivar el agua.

SNI

Sistema Nacional Interconectado, sistema integrado por los elementos del Sistema de Transmisión y las instalaciones eléctricas asociadas a las empresas de generación y distribución de energía eléctrica.

Turbina

Máquina que consiste en una rueda en el interior de un tambor provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido haciendo que esta gire.

Turbina Francis

Turbinas hidráulicas diseñadas para un amplio rango de saltos y caudales, son capaces de operar en rangos de desnivel que van de los dos metros hasta varios cientos de metros.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación presenta la solución a los problemas del canal de desfogue y los vertederos de la presa, dos estructuras principales de la hidroeléctrica Santa María. Se basa en la síntesis de estudios hidráulicos, geológicos, topográficos y un análisis de la calidad de los materiales de la losa del canal de desfogue.

Se describen, en términos generales los componentes de la central hidroeléctrica Santa María y el funcionamiento de la misma en términos operativos y estructurales, a partir de un análisis técnico realizado en conjunto con la División de Ingeniería del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

En la parte teórica se expone una recopilación de toda la información disponible en el INDE relacionada con la problemática en estudio, sintetizada en cuatro capítulos. Estos exponen las condiciones geológicas de la cuenca, estudio hidráulico, levantamiento topográfico del canal de desfogue existente y un análisis de suelo y de concreto.

En la parte práctica se realiza una síntesis de la información recopilada y, sobre esta base, se hace una propuesta para la reparación del canal de desfogue incluyendo características de los materiales por utilizar, cuantificación de materiales y planos estructurales. Además se plantean sugerencias para aumentar la capacidad hidráulica de los vertederos de la presa.

OBJETIVOS

General

Presentar una propuesta técnica para la reparación por desgaste de vertederos y el canal de desfogue de la central hidroeléctrica Santa María.

Específicos

1. Realizar un estudio de los antecedentes de daños ocasionados en estas estructuras y las soluciones previas para delimitar el rango de acciones que se tomarán.
2. Analizar los factores geológicos, hidrológicos y estructurales que afectan el funcionamiento de los vertederos y del canal de desfogue.
3. Seleccionar los materiales adecuados para cerrar las grietas en vertederos y cerrar todo punto de filtración hacia los mismos.
4. Crear un diseño de mezcla para proteger el desgaste y erosión causado por el paso de los sedimentos y rocas en el canal de desfogue

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales suscitados en los últimos años han afectado la hidroeléctrica Santa María. Entre ellos, están la tormenta tropical Stan (2005), tormenta tropical Agatha (2010), depresión tropical 12E (2011), entre otros. Estos fenómenos han causado daños considerables en sus estructuras, como el canal de desfogue, estructuras auxiliares y en el cuerpo de la presa, además de evidenciar limitaciones de las obras de derivación de caudal.

El canal de desfogue ha sufrido problemas por procesos de erosión de la losa existente, además de presentar fracturas derivadas por el impacto de cargas dinámicas. Esto puede provocar deformaciones, daños estructurales y comprometer enormemente la estabilidad de la presa. Para evitar esto, se propone una modificación en la geometría del perfil del canal de desfogue y se analizan soluciones viables para los vertederos.

El presente estudio sugiere un diseño del canal de desfogue suavizando la pendiente, así como la modificación en las características del concreto por utilizar. Presenta la cuantificación de materiales y planos estructurales de obras complementarias que serán necesarias para el nuevo diseño del canal y contiene una síntesis de estudios hidrológicos y geológicos que permiten recomendar soluciones para aumentar la capacidad hidráulica de los vertederos de la presa.

1. RESEÑA HISTÓRICA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA

La construcción del Ferrocarril Eléctrico Nacional de los Altos y la lucha por su realización duró muchos años, se iniciaron los trámites burocráticos el 25 de febrero de 1899. El Presidente Manuel Estrada Cabrera y el señor Juan Luís Buerón firmaron el contrato. La obra se inauguró 31 años después y costó diez millones de quetzales. Los fondos para la construcción se obtuvieron mediante la emisión de bonos avalados por el gobierno de la República en el año 1924. El 23 de mayo de 1921, se emite el Decreto Legislativo número 1119, creando el impuesto de tres quetzales sobre cada botella de aguardiente destinado, exclusivamente, para la construcción del ferrocarril.¹

La construcción corre a cargo de la firma Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG) de Berlín, Alemania. Debido a lo rocoso del terreno se tiende un puente curvo en Santa María de Jesús, Zunil, con una pendiente de 9.1%, lo que le valió un registro mundial del ferrocarril con línea férrea de mayor pendiente de acuerdo con la época.

Se construyó la planta hidroeléctrica en Santa María para movilizar el tren teniendo una línea férrea por terreno irregular con una longitud de 50 kilómetros. A su vez, la hidroeléctrica inició su funcionamiento.

¹ CALDERÓN, José. *Breve Historia económica de Guatemala del siglo XX*. p. 9.

La hidroeléctrica se encuentra a 1 540 metros sobre el nivel del mar, para su funcionamiento se aprovecha el caudal, de 7,2 metros cúbicos por segundo en época de seca, del río Samalá. La presa tiene 48 metros de altura y se estima que el embalse cuenta con una capacidad de almacenamiento de 40,000 metros cúbicos de acuerdo con la batimetría año 2001.²

El Ferrocarril Nacional Eléctrico de Los Altos, representó gran progreso tanto para Quetzaltenango, como para la región del Occidente. Se inauguró el 30 de marzo de 1930, con su estación central, réplica de la de Hamburgo, Alemania, en el barrio La Democracia y otra estación terminal en San Felipe Retalhuleu, con estaciones intermedias.

La catástrofe del 19 de septiembre de 1933, causada por un temporal dañó puentes y líneas férreas. Los habitantes de Quetzaltenango lucharon para reparar los daños con su trabajo voluntario, pero por diversas razones, entre ellas la negativa del presidente de la República, Jorge Ubico, no fue posible efectuar la restauración para rehabilitar el ferrocarril de los Altos.

La hidroeléctrica Santa María se construyó durante el gobierno de José María Orellana. Cuando el ferrocarril desapareció, las autoridades del gobierno decidieron que la planta hidroeléctrica se orientaría a cubrir la demanda de los departamentos del suroeste del altiplano del país.

La Hidroeléctrica fue inaugurada en el año 1926. Su capacidad instalada es de 6.880 MW. Aunque se han hecho mejoras, la central hidroeléctrica

² Instituto Nacional de Electrificación. *Evaluación de la seguridad y concepto de reparación, proyecto hidroeléctrico Santa María.* p. 5.

conserva la mayor parte de su infraestructura, especialmente, en la obra civil. Actualmente, brinda energía a diversas poblaciones del sur occidente del país. Sus beneficios sociales y económicos permiten que el INDE aporte fondos para la tarifa social.³

³ Instituto Nacional de Electrificación. *Evaluación de la seguridad y concepto de reparación, proyecto hidroeléctrico Santa María*. p. 5.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

2.1. Localización

La presa se encuentra ubicada en la aldea Santa María de Jesús, municipio de Zunil del Departamento de Quetzaltenango. Por la carretera CA-2, se llega a la Aldea Santa María de Jesús y en el kilómetro 201,5 se encuentra el camino que conduce a la Presa, cuya distancia es de aproximadamente 300 metros de la carretera principal hacia la presa, como se muestra en la figura 3.

2.2. Obras de derivación

Son todas aquellas que se disponen con el fin de aprovechar una fuente de agua superficial de forma controlada, de manera que se puedan conducir hacia su sitio de aprovechamiento. A continuación se detallan las obras de derivación que dispone la hidroeléctrica Santa María.

2.2.1. Canal auxiliar

Este canal tiene por objeto transportar el agua desde el inicio del embalse hacia el desarenador. Funciona cuando se le da mantenimiento al embalse; esa acción permite mantener la generación a filo de agua en la central.

2.2.2. Embalse de regulación

Es el lugar donde se almacena el agua que sirve para generar la energía con una regulación diaria. Posee un volumen de almacenamiento de 215 500

metros cúbicos como volumen útil. El agua se conduce hacia la casa de máquinas a través de una tubería de presión de 0,614 km de longitud.

Tabla I. **Características principales del embalse**

Volumen total	259 600,00 m ³
Volumen útil	215 500,00 m ³
Volumen mínimo	130 000,00 m ³
Nivel máximo normal	1 535,30 msnm
Nivel mínimo	1 529,00 msnm
Área en superficie	22 640,00 m ²
Área de espejo de agua	22 000,00 m ²
Profundidad promedio	28,00 m
Profundidad máxima	30,00 m

Fuente: elaboración propia, con base en información proporcionada por el INDE.

2.2.3. Presa

Es una estructura de concreto con una figura curva, cuya masa está edificada de concreto ciclópeo, cubierta en sus caras exteriores con roca labrada y diseñada como una estructura de gravedad, con una altura de 28.5 m retiene un volumen embalsado de 259,600.00 m³. Dispone de un aliviadero de labio fijo con 6 vanos. En la presa no se aprecian juntas de contracción, por lo que se puede considerar una estructura monolítica. No existen galerías de inspección o control en el cuerpo de la presa.

La presa dispone de cuatro compuertas de fondo que sirven para evacuar sedimentos que trae el río, tres de estas son maniobradas por sistemas hidráulicos y una por sistema mecánico, estas vierten al pie de la presa. El canal de descarga es una estructura de concreto armado localizado al pie de la presa. No existe un elemento específico de disipación de energía (cuenca,

cuenco amortiguador o trampolín) para el caudal evacuado al río, aunque el pie de aguas abajo está debidamente protegido. "La presa está mayormente cementada en roca basáltica de tipo andésitico de formación reciente. Los basaltos con características mecánicas, generalmente buenas, han cubierto una capa de lahares y detritos. El estribo derecho está totalmente constituido de rocas basálticas de buena calidad".⁴

Las condiciones geológicas del estribo izquierdo son más complejas debido a varios fenómenos de reciente vulcanismo. En este estribo, aguas abajo solamente la parte superior es constituida de basaltos. Por debajo de esta formación se encuentran lahares con muy poca cementación. Estos lahares incluyen bloques angulares correspondientes a diferentes etapas de depósito.

Tabla II. **Características principales de la presa**

Tipo de presa	De gravedad con planta curva
Tipo de construcción	Concreto, revestido con roca labrada
Altura de la cresta	25,45 m
Altura de la corona	28,50 m
Longitud	75,00 m
Vertedero tipo	Umbral sin compuertas, 6 secciones
Desagües de fondo	Tres compuertas hidráulicas y dos mecánicas
Aporte total promedio	208 mil m ³
Volumen total de embalse	259 600,00 m ³
Volumen útil	215 500,00 m ³
Nivel máximo	1 535,30 m.s.n.m.
Nivel mínimo	1 529,00 m.s.n.m.
Nivel corona	1 535,30 m.s.n.m.

Fuente: elaboración propia, con base en información proporcionada por el INDE.

⁴ Instituto Nacional de Electrificación. *Evaluación de la seguridad y concepto de reparación, proyecto hidroeléctrico Santa María*. p. 5.

Figura 1. Fotografía de la presa vista aguas abajo



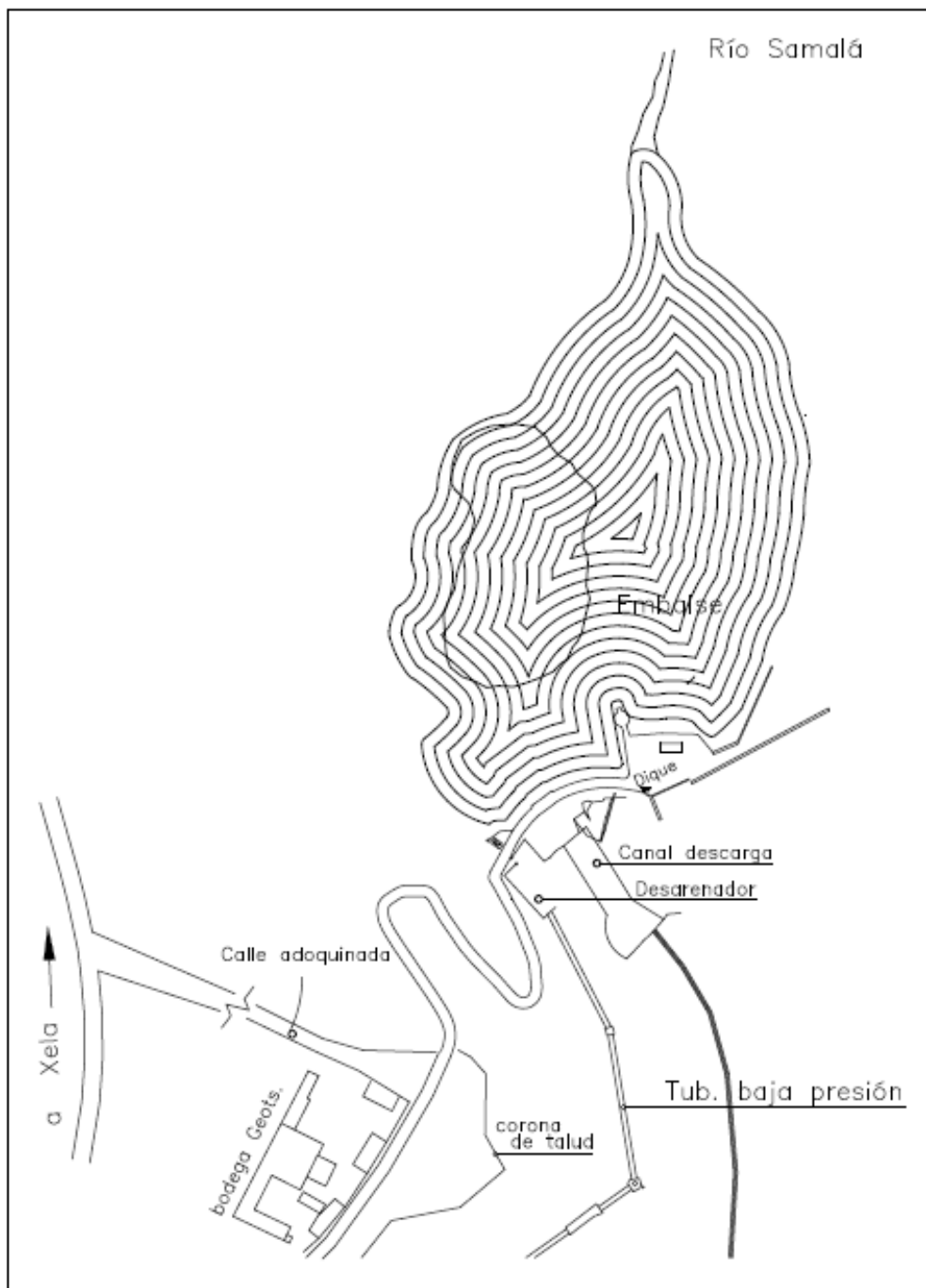
Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

Figura 2. Vista del canal de desfogue desde la corona de la presa



Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

Figura 3. **Ubicación y vías de acceso proyecto hidroeléctrico Santa María**



Fuente: Unidad de Planificación, INDE.

2.2.4. Bocatoma

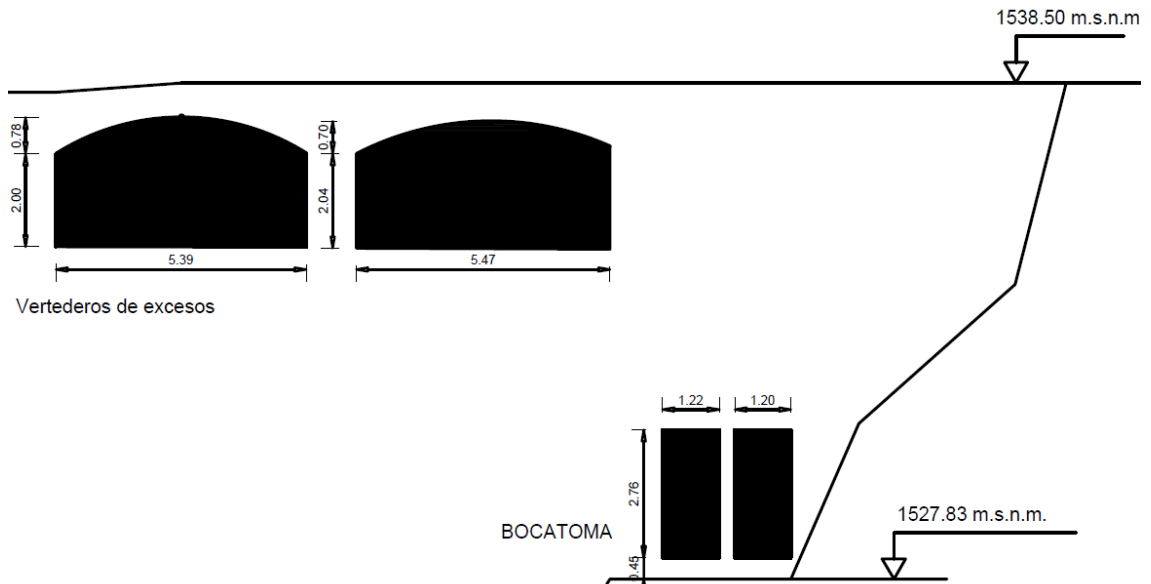
Se define así a la estructura cuya finalidad es derivar el caudal necesario hacia el desarenador. Está ubicada en la cota 1 538,50 msnm en la margen derecha de la presa, posee una geometría de 2,76 m x 2,76 m, se divide en dos vanos de 1,22 m x 2,76 m. Según planos proporcionados por la división de ingeniería del INDE, cuenta con un reja en la toma que evita el paso de sólidos y desechos transportados por el río, para su mantenimiento está colocado un limpia reja de accionamiento manual.

Figura 4. **Fotografía de Bocatoma**



Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

Figura 5. Plano de bocatoma



Fuente: Plano de perfil frontal del dique, Unidad de Planificación de Obra Civil, División de Ingeniería, INDE, junio 2003.

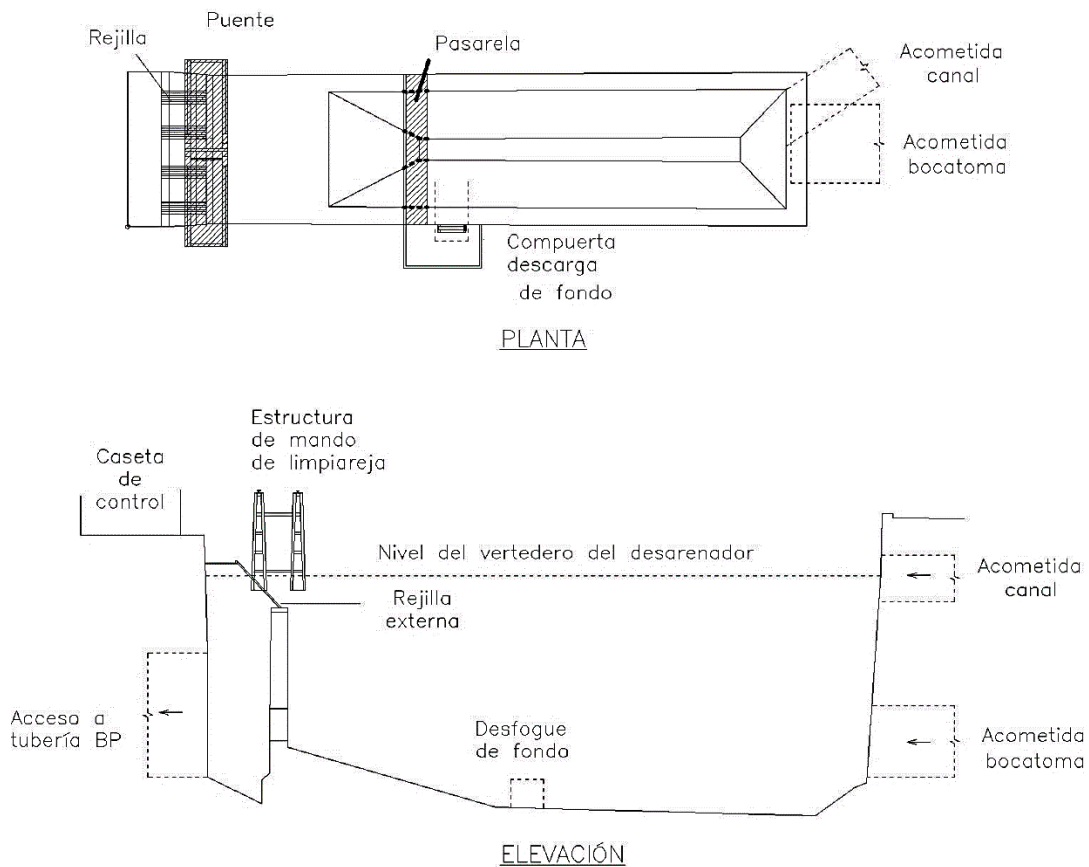
2.2.5. Desarenador

Área que se utiliza para realizar la limpieza final del agua que será turbinada. En la admisión del desarenador convergen los caudales provenientes de la bocatoma en su funcionamiento regular; y del canal auxiliar cuando se realiza la limpieza de sedimentos en el embalse. Posee una geometría rectangular vista en planta de 4,63 m x 17,80 y una trapezoidal, vista en elevación con una profundidad máxima de 9,26 m.

Cuenta con un desagüe de fondo que se utiliza para evacuar los sedimentos depositados. Además antes de la admisión de la tubería de baja presión cuenta con una rejilla para sólidos suspendidos y un limpia reja de

accionamiento manual. Se debe destacar que en la actualidad la capacidad del desarenador no es adecuada, por lo que su desempeño no es el óptimo.

Figura 6. **Plano de Desarenados**



Fuente: Plano 1, Detalles de posición de rejilla y limpia reja, desarenador Santa María, Unidad de Planificación de Obra Civil, División de Ingeniería, INDE, octubre 2004.

2.2.6. Cámara de carga

Es la conexión de la presa hacia la casa de válvulas mariposa. Conducen el agua por medio de dos secciones de tubería de baja presión. La presa se conecta a la casa de válvulas por medio de dos secciones de tuberías de baja

presión, la segunda sección se conecta con cinco tomas, cinco válvulas de mariposa, desde donde se controlan los caudales a generar.

2.3. Tubería de baja presión

Es la encargada de transportar el agua desde el desarenador hacia la casa de válvulas. Esta tubería posee una longitud de 227 m, con un diámetro interno de 2,1 m y un espesor de lámina de 0,009 m. Cuenta con tres juntas de expansión que se encuentran distribuidas a través de toda la trayectoria de la tubería, a la vez que existen cambios de diámetro en tubos con ligera forma cónica. En toda la trayectoria existen dos tubos con esta forma, el primero cambia el diámetro de 2,1 m a 2 m y el segundo de 2 m a 1,9 m. En esta tubería existen solamente dos codos, uno en el inicio de la tubería y otro al final de la casa válvulas.

2.4. Chimenea de equilibrio

Es una estructura complementaria cuya función es absorber las sobrepresiones y subpresiones causadas por el golpe de ariete. Se localiza al final de la tubería de baja presión, tiene una altura de 9,00 m y un diámetro de 1,25 m, construida con lámina de hierro, sentada sobre cinco anclajes metálicos en una base de concreto armado que forma parte del acoplamiento de la tubería de baja presión a la cámara de carga.

2.5. Casa de válvulas

En la casa de válvulas se bifurcan las tres tuberías de presión; las válvulas instaladas son de tipo mariposa. CHUC, Leandor., hace referencia a las principales válvulas dentro de la central hidroeléctrica, entre las que menciona:

2.5.1. Válvula de protección de tubería

"Está ubicada en el extremo superior de la tubería de presión y su función es impedir vaciar la tubería de baja presión en caso de fugas o trabajos de mantenimiento. Esta válvula es de tipo mariposa y está dotada con un servomotor el cual es operado desde la casa de máquinas. Esta válvula se encuentra instalada en cada una de las tuberías".⁵

2.5.2. Válvula niveladora de presiones

Es de tipo compuerta y su accionamiento es completamente manual.

2.5.3. Válvula para desagüe

Es de tipo compuerta y su accionamiento es completamente manual.

2.6. Tubería de alta presión

"Las tuberías de alta presión son las tuberías individuales para cada una de las unidades que va desde la casa de válvulas hasta la casa de máquinas. Por eso, la tubería es igual para cada una de las unidades ya que tienen cambios de diámetro interno de 1,15 a 1,05 y 0,95 metros con tubos de 0,008 metros de espesor en los tramos rectos y de 0,01 metros en los codos y en lo único que cambian es en su longitud".⁶

⁵ CHUC, Leandro. *Propuesta para el mejoramiento de las protecciones de los generadores de la hidroeléctrica Santa María de Jesús, implementando relevadores digitales multifunción*. p. 3.

⁶ *Ibíd.*

Tabla III. **Características de la tubería presión**

Tubería No. 1	Tubería No. 2	Tubería No. 3
Longitud 215,40 m	Longitud 200,60 m	Longitud 198,00 m
Diámetro escalonado	Diámetro escalonado	Diámetro escalonado
1150/1050/930/950 mm	1150/1050/950/800 mm	1050/959/850 mm

Fuente: elaboración propia, con base en la información proporcionada por INDE.

2.7. Casa de máquinas

La casa de máquinas está situada en un terraplén en la base de un talud. Es un edificio de tres niveles con paredes de concreto y techado con lamina; dentro del cual se albergan los siguientes equipos: turbinas, generadores, grúas, paneles de control, sistemas de regulación, sistemas de lubricación, equipos de protección, interruptores de potencia, seccionadores, bobina de choque, barras de potencia, taller de mantenimiento, bodega de repuestos y la sala de operadores.⁷

Cuenta con tres turbinas tipo Francis, de eje horizontal. Las tres unidades generadoras son de diferente capacidad; la unidad No. 1 con 2,48 MW, las unidades Nos. 2 y 3 con 2,2 MW. El salto o caída que utiliza esta central es de 101 m, con un caudal hídrico de 2,35 m³/seg para las unidades No. 1 y No. 2; y 104 m y 2,42 m³/seg para la unidad No. 3. La capacidad total instalada es de 6 MW.

⁷ CHUC, Leandro. *Propuesta para el mejoramiento de las protecciones de los generadores de la hidroeléctrica Santa María de Jesús, implementando relevadores digitales multifunción*. p. 4.

Tabla IV. Características de la casa de máquinas

Característica	Unidad No. 1	Unidad No. 2	Unidad No. 3
Caída de diseño:	101,00 m	101,00 m	104,00 m
Caudal de diseño:	2,35 m ³ /seg	2,35 m ³ /s	2,42 m ³ /s
Cota de restitución:	1 428,15 m.s.n.m		
Cota de cámara de carga:	1 532,15 m.s.n.m		

Fuente: elaboración propia, con base en la información proporcionada por el INDE.

Tabla V. Características de las turbinas

Característica	Turbina No. 1	Turbina No. 2	Turbina No. 3
Marca:	Fritz Neumeller	Fritz Neumeller	Volth
Tipo	Francis Espiral	Francis Espiral	Francis Espiral
Tipo de eje	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Velocidad	720 rpm	720 rpm	720 rpm
Potencia	2 500 CV	2 500 CV	2 900 HP
Alabes móviles	13	13	13
Alabes fijos	14	14	---

Fuente: elaboración propia, con base en la información proporcionada por INDE.

Tabla VI. Características de los generadores

Característica	Generador No. 1	Generador No. 2	Generador No. 3
Marca:	Schorch Werke A.G.	A. Van Kaick	AEG
Tipo:	W77236/10	DIDB 160GH/10D	S7068/10
Serie	M59039401/01	872,0556	252/775
Potencia Nominal:	3,10 MW	2,75 MW	2,75 MW
Potencia Activa:	2,48 MW	2,20 MW	2,20 MW

Fuente: elaboración propia, con base en la información proporcionada por INDE.

2.8. Desfogue

El desfogue final del proceso de generación se realiza en la casa de máquinas, directamente hacia el caudal del río. Es importante resaltar que el flujo de agua vertida no contiene ningún tipo de contaminación, más bien, se ve favorecida la calidad del agua por el proceso de aireación mediante el turbinamiento.

2.9. Subestación

Está ubicada en la corona del talud de la casa de máquinas, aproximadamente, a 300 m. Su función es modificar y establecer los niveles de tensión eléctrica, el voltaje de generación de 2,3 kW es elevado a voltajes de las líneas de transmisión de 50 kW y 69 kW. La potencia instalada es de 6,40 MW, potencia confiable de 5,00 MW. La energía de la planta de generación Santa María de Jesús, es entregada a través de dos líneas de 138 kW, a las subestaciones en línea simple.

3. ESTADO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

3.1. Desempeño en generación

Actualmente, la central hidroeléctrica trabaja con una potencia de 6 MW, utilizando sus tres unidades instaladas según los registros del INDE. Presenta un aporte aproximado del 1,30 % de la potencia efectiva total que registra la Institución en recurso hidráulico. En términos de potencia disponible del INDE y del Sistema Nacional Interconectado para el año 2013, se registró la Potencia Efectiva en concepto hidráulico de 454 MW (84 %), térmico 38,5 MW (7 %), e INDE Privados de 49,5 MW (9 %).

Las nueve plantas del INDE (Chixoy, Aguacapa, Jurún, Salto, Santa María, Porvenir, Palín II, Chichaic) presentan un factor de planta promedio de 0,57. Santa María opera un factor de planta aproximado de 0,69. Para la programación estacional 2013 - 2014 la AMM aplicó un coeficiente de disponibilidad para la hidroeléctrica de 0,885.

3.2. Funcionamiento de estructuras

Actualmente, la central hidroeléctrica presenta algunos daños estructurales provocados por diversos factores, como el clima, fatiga de materiales, deterioro por erosión, entre otros.

Se identificaron daños en el tramo que trabaja como puente canal, el cual está conformado por una estructura metálica y sobre ésta fundida la losa de piso del canal. La estructura metálica presenta graves problemas de corrosión, a tal punto que presenta una amenaza significativa para la operación del canal.

Figura 7. **Vista inferior de la sección puente-canal del canal auxiliar**



Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

Además se identificaron daños en la margen derecha del lecho del río justo al borde de la compuerta de admisión del canal auxiliar. Esto puede provocar daños al canal ya que el cauce del río podría pasar atrás de la compuerta y debilitar la estructura o bien fracturarla.

La presa, actualmente, sus desagües de fondo trabajan con un 75% de eficiencia, ya que la compuerta de accionamiento mecánico no funciona correctamente.

Figura 8. **Desfase de la trayectoria del río Samalá en la entrada al embalse**



Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

La estructura de desfogue al pie la presa es uno de los principales problemas que presenta. La erosión ha dañado totalmente el canal de desfogue, dado que se ha presentado desde hace años. La figura 9 muestra el estado actual del canal de desfogue. Se asume que la causa de la erosión es el arrastre de sólidos y sedimentos durante el mantenimiento del embalse y por la caída de agua que pasa por los vertederos de demasías, especialmente, en el aumento de caudal provocados por fenómenos naturales que afectan la hidrología de la zona, por ejemplo la tormenta tropical Stan (2005), la tormenta tropical Agatha (2010), la depresión tropical 12E (2011), entre otros.

Figura 9. Estado actual del canal de desfogue



Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

Es evidente que la acción del agua ha erosionado el concreto pasando de ser una falla superficial, a una desintegración parcial de la losa que deja expuesto el acero de refuerzo. La figura 9 muestra como la fuerza del agua ha trazado sus cauces individuales formando canales de sección cóncava que se extienden longitudinalmente en toda la losa. La superficie de concreto del canal ha sufrido distorsiones superficiales que han causado un resalto hidráulico en el flujo del agua. Esto provoca un choque constante entre el concreto y el flujo, por lo cual ha perdido por completo su función de medio conductor del flujo.

Figura 10. Daños identificados en canal de desfogue



Fuente: Central Hidroeléctrica Santa María, INDE.

La figura 10 muestra diversos daños visibles que van desde el pie de la presa y se extiende en toda la estructura de desfogue. Existen fisuras en la estructura de protección extendida en el lecho rocoso de la margen izquierda. Además, en algunos tramos el acero de refuerzo ha quedado expuesto, ya que la acción de las aguas de rebalse ha logrado desprender porciones de concreto del mismo como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Daños al costado del canal de desfogue



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Figura 12. Refuerzo expuesto en losa del canal de desfogue



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

La figura 12 permite ver el grado de exposición del acero de refuerzo. Es evidente que la erosión del concreto ha excedido la profundidad de las barras de acero, por lo cual se puede estimar que la profundidad de dicha erosión está alrededor de los 25 cm. En el capítulo 7 se amplía el estudio de suelos y análisis del concreto efectuado en el 2013.

La pendiente actual que posee el canal de desfogue es muy pronunciada, lo cual favorece directamente a la degradación de la losa de concreto y del área al pie de este. Por ello, se plantea un nuevo diseño geométrico, en el cual se extiende el largo del canal y se modifica la caída de la pendiente para disminuir la energía del flujo y suaviza su escurrimiento.

Los efectos hidrológicos de la cuenca, el tipo de sedimento y el material que puede ser conducido por el río Samalá afectan el arrastre de sedimentos a lo largo de su recorrido. Ambos factores contribuyen a la erosión del concreto del canal de desfogue. Las características geológicas y la actividad hidrológica del área se amplían en los capítulos 4 y 5, respectivamente.

4. ESTUDIO GEOLÓGICO

4.1. Aspectos geotécnicos

A continuación, se presenta un resumen de las características generales de la cuenca geológica dentro de la cual se encuentra ubicada la central hidroeléctrica. Con esta información es posible tomar acciones para un manejo de la cuenca geológica, además de realizar una caracterización de sedimentos para proponer un plan de control de la carga de sedimento rocoso que converge al embalse y que puede causar daños en obras y estructuras que conforman la planta.

4.1.1. Depósitos coluviales

Son materiales de erosión transportados por gravedad. Su origen es local, producto de la alteración *in situ* de las rocas y, posteriormente, transporte como derrubios de ladera o depósitos de solifluxión. Frecuentemente, están asociados a masas inestables. Su composición depende de la roca de la que proceden, están formados por fragmentos angulares y heterométricos, generalmente, de tamaño grueso, englobados en una matriz de limo-arcillosa. Su espesor suele ser escaso, aunque puede ser muy variable.

Tienen una gran importancia geotécnica cuando se trata de masas inestables. La resistencia de estos materiales es baja, sobre todo, en la zona de contacto con el sustrato rocoso y cuando se desarrollan altas presiones intersticiales como consecuencia de lluvias intensas. La identificación de estos materiales es fundamental en cualquier estudio geológico-geotécnico y por

tanto constituye una prioridad de las investigaciones *in situ*. Su presencia, a priori puede suponer un problema. "Estos depósitos se encuentran en el área de estudios asociados con desprendimiento de masas de suelos poco cohesivos de antiguas terrazas aluviales en la margen izquierda del embalse, cerca del sitio de presa".⁸

Estos deslizamientos y zona de erosión ven acelerado su proceso con crecidas periódicas que rebasan el nivel de la presa y desfogan su energía por este lado de la presa que también constituye su zona más débil y con mayor tendencia a erosionar, por lo que debe ser protegida con algún tipo de revestimiento que mitigue este fenómeno.

4.1.2. Depósitos aluviales

Son materiales transportados y depositados por el agua. Su tamaño varía desde la arcilla hasta las gravas gruesas, cantos y bloques. Las facies más gruesas presentan bordes redondeados. Se distribuyen en forma estratiforme, con cierta clasificación, variando mucho su densidad.

Están muy desarrollados en los climas templados, ocupando cauces y valles fluviales, llanuras y abanicos aluviales, terrazas y paleocauces.

Son suelos muy anisotrópicos en su distribución, con prioridades geotécnicas altamente variables, estrechamente relacionadas con la granulometría. Su continuidad es irregular, pudiendo tener altos contenidos en

⁸ Instituto Nacional de Electrificación. *Definición de alcances de los trabajos que posibiliten las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María.* p. 7.

materia orgánica en determinados medios. La permeabilidad depende de la granulometría. Generalmente, presentan un nivel freático alto. La investigación geotécnica precisa de un elevado número de reconocimientos, dada su heterogeneidad y anisotropía.

Figura 13. **Coluvios y depósitos de suelos en margen izquierda del río, en zona de vertedero**



Fuente: Informe final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

En el área del proyecto, se presentan principalmente en la zona de embalse, donde es el principal aporte para el azolvamiento de la presa, los cuales tienen que ser dragados anualmente y vertidos aguas abajo de la presa. Debido a la alta pendiente del cauce y curso encañonado no forman playas y se depositan de forma temporal, mientras las subsiguientes crecidas los arrastran

aguas abajo. Son depósitos provenientes de crecidas históricas, principalmente los bloques grandes ⁹

"El análisis de laboratorio realizado en arenas recientes depositadas en el embalse (5 m de profundidad) indican que se trata de arenas limosas, color café claro y gris, con densidad húmeda de 1 813 kg/m³, gravedad específica 2,566, sin límite líquido, no cohesión y ángulo de fricción de 28°. Se trata de sedimentos compuestos casi enteramente por granos de rocas volcánicas tipo lavas andésíticas y basálticas, sueltos y sin contenido de arcillas."¹⁰

4.1.3. Depósitos de origen volcánico

Los suelos volcánicos pueden ser residuales por alteración de los materiales subyacentes, resultando depósitos limo-arenosos y arcillas, y transportados como productos de las emisiones volcánicas dando lugar a acumulaciones de piroclásticos, de tipo lacustre o aluvial cuando son transportados por el agua. (INDE, 2013)

Los minerales procedentes de las rocas volcánicas son altamente inestables frente a la meteorización, transformándose rápidamente en productos de alteración y arcillas, abundan las halloysitas, las alófanas y las esmectitas. El predominio de alguno de estos minerales depende de las condiciones de drenaje y geoquímica del medio.

⁹ Instituto Nacional de Electrificación. *Definición de alcances de los trabajos que posibiliten las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María.* p. 9.

¹⁰ *Ibíd.*

Las arcillas volcánicas tienden a formar fábricas oolíticas y agregaciones de arcillas, esto da como resultado granulometrías y plasticidades correspondientes a suelos de mayor tamaño. Los suelos residuales pueden ser muy susceptibles, comportándose de forma inestable frente a rápidos aumentos de presión intersticial, o cargas cíclicas por terremotos, en cuyo caso se pueden producir deslizamientos o flujos de tierras.

Otro grupo importante lo forman los depósitos de piroclásticos. Están formados por partículas de tamaños variables, desde cenizas ($\varnothing < 2$ mm) hasta lapillis ($\varnothing 2$ mm – 64 mm), o fragmentos de mayor tamaño. Se acumulan en capas estratiformes, de acuerdo con la dirección del viento, o dirección de la nube de cenizas o colada de piroclásticos. Forman estructuras esponjosas de muy baja densidad y alta porosidad. Cuando las cenizas se consolidan o cementan, forman tobas blandas, muy alterables y colapsables frente a cargas relativamente bajas.

Si los piroclastos están aún fundidos en el momento de su sedimentación, se aglomeran formando una toba compacta. Si durante la deposición y enfriamiento se desarrollan fuertes uniones entre sus partículas por soldamiento o compactación de los productos vítreos, su resistencia aumenta dando elevados ángulos de rozamiento interno y cohesiones aparentes altas.

Este tipo de depósitos y los paleosuelos producto de su alteración, debido a su carácter débil y poco resistente, no resiste un ambiente de alta energía como el de la cuenca alta del río Samalá. Por ello, su presencia es marginal como sedimento en el río, y no se observan gravas o rocas púmiticas. Estos suelos están enriquecidos por nutrientes del río, pero también contaminados por

el alto contenido de desechos de aguas servidas y basura que transporta el río.¹¹

4.1.4. Lavas volcánicas

Dentro de esta categoría de rocas se agrupan los basaltos, las andesitas y las brechas con matriz basáltica, las cuales poseen propiedades mecánicas similares. Estas son rocas duras y a menudo muy fracturadas. En superficie aparecen alteradas y a veces recubiertas de una capa delgada argilítica. La zona de alteración es generalmente muy delgada, como máximo de algunos metros de espesor.

"El peso volumétrico seco de las lavas volcánicas, según los ensayos efectuados está comprendido entre 1,86 y 2,75 ton/m³. La resistencia a la compresión simple está comprendida entre los 202 kg/cm² y 1 640 kg/cm². La resistividad de las lavas volcánicas está comprendida entre 500 y 600 ohm-m, cuando están sanas, y cuando están fracturadas está comprendida entre los 100 y 500 ohm-m, de acuerdo con el grado de alteración. Estas rocas afloran en la base del vertedero y forman la margen derecha del estribo de la presa." ¹²

¹¹ Instituto Nacional de Electrificación. *Definición de alcances de los trabajos que posibiliten las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María.* p. 9.

¹² *Ibíd.* p. 10.

Figura 14. **Lavas andésticas margen derecha, aguas abajo con base del vertedero**



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

En la siguiente tabla se presentan, de forma general, los parámetros geomecánicos más importantes que presentan las rocas volcánicas presentes en el área del proyecto.

Tabla VII. **Propiedades geotécnicas de rocas presentes en el área**

Roca	Peso específico (g/cm ³)	Porosidad (%)	Permeabilidad K (m/s)	Resistencia a la compresión (kP/cm ²)	Cohesión C (kP/cm ²)	Ángulo de fricción básico (grados)
Andesita	2,2 – 2,35	10 – 15	10 ⁻⁷ – 10 ⁻¹²	1 000 – 5 000	280	45
Basalto	2,7 – 2,9	0,2 – 2		600 – 3 500	200 – 600	48 – 55
Toba	1,9 – 2,3	14 – 40		100 – 460	7	

Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013

4.2. Geología regional

La hidroeléctrica de Santa María, desde el punto de vista geológico, estructural y geomorfológico se encuentra controlada por el complejo volcánico Santa María – Santiaguito.

Originalmente el complejo estaba conformado únicamente por el Volcán Santa María el cual estuvo inactivo entre 500 a muchos miles de años hasta que ocurriera la gran erupción de 1902, la cual generó columnas eruptivas de hasta 28 km de altura, flujos piroclásticos, caída de trefa y ceniza y enormes depósitos volcanoclásticos en los alrededores. Se calcula que esta enorme erupción pliniana arrojó alrededor de 10 km³ de material volcánico dacítico en un periodo de 36. Estos materiales fueron mayoritariamente depósitos pumicíticos los cuales se esparcieron en una superficie de 273 000 km² hacia el nor-oeste del volcán llegando a producir espesores de hasta 5 m en los alrededores. Se tienen registros que solamente este evento, el segundo más grande del siglo pasado (Índice de Explosividad Volcánica de 6), pudo haber matado al menos a 5 000 personas, provocó un enorme cráter de explosión en el flanco sur del volcán y oscureció los cielos de la región durante algunos días. (Barillas et al, 2003). A pesar de la ocurrencia de eventos volcánicos de moderada a gran magnitud (erupción de 1902, flujos de lava en los 70 y colapso del domo Santiaguito y flujos piroclásticos de 1929 y 1973), está bien claro para muchos autores, para la población y para la comunidad geocientífica relacionada con estos volcanes, que los materiales volcánicos aportados a la red hidrográfica local (ríos Nimá I y II, El Tambor y Samalá) constituyen el mayor peligro para las poblaciones, infraestructura crítica y actividad agrícola de la zona. Anualmente, ocurren destructivos “flujos de lodo” que impactan contra poblaciones como El Palmar, Pomarrosal, San Felipe y varias fincas cafetaleras, contra infraestructura crítica (Puente “Castillo Armas” y Carretera Panamericana CA-2), Hidroeléctrica Santa María y contra las zonas cultivadas.¹³

4.3. Geología local

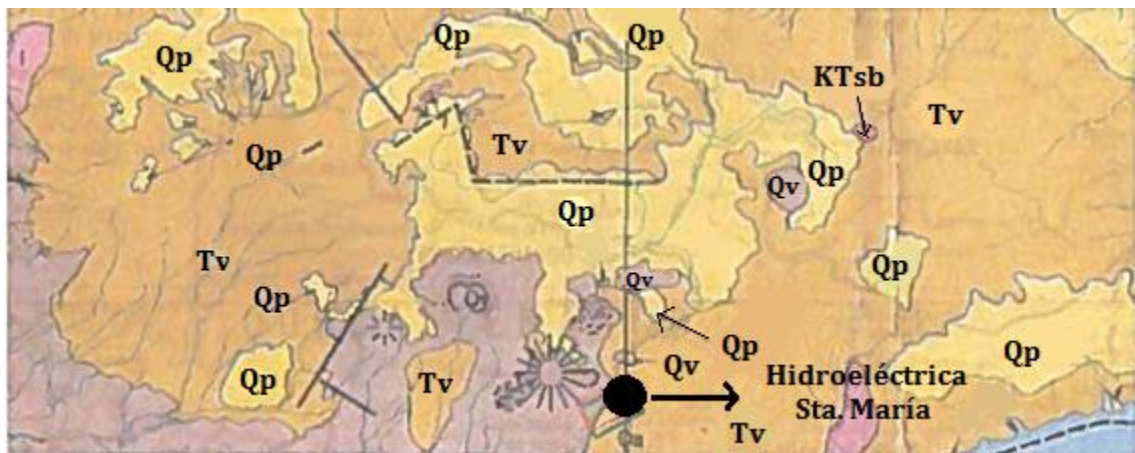
"Los principales rasgos geomorfológicos del área son el cañón excavado por el río Samalá que corre controlando estructuralmente por la falla de Zunil, cuya principal expresión superficial es el mismo cañón del río. En ambos lados

¹³ BARILLAS, Manolo. *Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del Río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu, Guatemala. Retalhuleu, Guatemala.* p. 7.

destacan aparatos volcánicos del Cuaternario, con el complejo activo Santa María-Santiago al oeste y cuyos flujos de lodo y lahares representan el mayor aporte de sedimentos de diversa granulometría al cauce del río Samalá. El volcán Santo Tomas, al este, aporta sedimentos en menor proporción."¹⁴

La litología de ambos volcanes es similar con lavas andesíticas, sin embargo, el volcán Santa María es de constitución más básica, andesítica basáltica. En el mapa de la figura 16 se observa la geología estructural y litología del área de estudio.

Figura 15. Mapa geológico regional



Fuente: Informe Final, "Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María", INDE, 2013

¹⁴ Instituto Nacional de Electrificación. *Definición de alcances de los trabajos que posibiliten las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María*. p. 36.

Tabla VIII. **Legenda de mapa geológico – estructural (figura 15)**

Simbología	Formación/Litología	Edad	Descripción
<i>KTsb</i>	Formación Subinal	Terciario	Rocas de edad Cretácica - Terciaria, identificadas como material de capas rojizas.
<i>Qa</i>	Aluviones	Cuaternario	Depósitos de roca resiente producto de transporte y depositación del río Samalá, que continúan su formación.
<i>Qp</i>	Cenizas volcánicas	Cuaternario	Rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso, su formación es muy reciente.
<i>Qv</i>	Rocas volcánicas	Cuaternario	Incluye coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos, formadas al inicio del periodo Cuaternario.
<i>Tv</i>	Rocas volcánicas sin dividir	Terciario	Incluye tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos.

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Mapa geológico – estructural. Área presa y embalse Santa María**



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Tabla IX. **Leyenda de mapa geológico – estructural (figura 16)**

Simbología	Formación/Litología	Edad	Descripción
<i>Qal</i>	Aluvión y coluvión	Cuaternario	
<i>Qsm</i>	Lavas Basálticas y andesíticas	Cuaternario	Coladas y rocas sueltas de erupciones históricas del complejo Santa María-Santiago.
<i>Qst</i>	Andesitas	Cuaternario	Coladas de lavas andesíticas de volcanes Zunil y Santo Tomás.
<i>Ql</i>	Lahares	Cuaternario	Flujos de lodo y lahares de actividad reciente de volcán Santiago.
— — — —			Falla o lineamiento geológico inferido.

Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

En la zona de presa y embalse la base está constituida por flujos de lava de tipo basáltico andesítico, de gran dureza y poco fracturamiento y lo sobreyacen depósitos aluviales recientes transportados por el río Samalá y crecidas de las quebradas que bajan del volcán Santa María.

La zona en estudio se localiza en una zona con tres factores que han dado origen a distintos tipos de litología. La actividad volcánica, geológicamente reciente, dio origen a la formación de dos aparatos volcánicos, que son parte de la cadena volcánica, con Santo Tomás al este, un volcán sin actividad histórica y en proceso de erosión en su flanco este.

Por el oeste se encuentra el volcán Santa María, cuya erupción catastrófica en 1902 y la formación del cono parasítico Santiago en 1922, actualmente activo, genera constantes flujos de lodo y lahares que afectan la parte baja de la cuenca del Samalá y las poblaciones del sur. Estas crecidas

también arrastran rocas y sedimentos sueltos de las zonas altas y de gran pendiente del volcán Santa María. Todo ello ocasiona ocasionan constantes daños en las compuertas y base del vertedero de Santa María, además de provocar un incremento en la tasa de azolvamiento del embalse de la hidroeléctrica.¹⁵

Figura 17. **Sueltos gravas y bloques por eventos de crecidas recientes**



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013

¹⁵ Instituto Nacional de Electrificación. *Definición de alcances de los trabajos que posibiliten las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María*. p. 39.

Figura 18. **Depósitos de sedimentos finos de antigua terraza y paleocauce del río Samalá, margen izquierda, aguas abajo de presa**



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013

El tercer factor que influye sobre la geología y el tipo de material es la falla Samalá, que corre paralela al río Samalá y corta el área de embalse y presa, así como zonas de sismicidad asociada.

Figura 19. Lavas andesíticas en la base de presa y aguas debajo de embalse de la hidroeléctrica Santa María



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013

4.4. Hidrogeología e Hidrología

El río Samalá, desde su formación en las montañas del altiplano de Quetzaltenango y Totonicapán hasta el sitio de la presa en Santa María, presenta una pendiente media y corre sobre rocas volcánicas, también muestra depósitos piroclásticos de gran espesor, producto de la formación de las calderas de Quetzaltenango y Atilán.

La erosión e intemperismo de esta litología forman depósitos sedimentarios depositados por el cauce antiguo del río. Estos depósitos han configurado un valle estrecho y encañonado tanto en su cabecera como a partir del tramo entre Salcajá y Cantel, cuyo ancho promedio es de menos de 100 metros. En la parte de la meseta del altiplano, entre San Cristóbal, Totonicapán y Salcajá el río discurre en una zona de baja pendiente y con cauce de valle más abierto. La parte norte de la cuenca está controlada por la estructura semicircular de la caldera de Quetzaltenango, en cuyo borde norte corre desde San Carlos Sija hasta San Cristóbal Totonicapán. Luego, transcurre sobre el fondo de esta estructura que corresponde al valle de Quetzaltenango hasta su rompimiento sur a la altura de Cantel. El área se encuentra en una zona donde existen rocas volcánicas y volcanoclásticas con las siguientes características hidrogeológicas que determinan la existencia y magnitud de los acuíferos. Esas rocas son aluviones Cuaternarios en el cauce del río Samalá que consisten en materiales de diversos tamaños como gravas arenas y arcillas, procedentes de la erosión de los depósitos volcánicos cuaternarios y terciarios de las montañas y tierras altas de la zona de Quetzaltenango y parte de Totonicapán. Los espesores de los piroclastos son de varias decenas y hasta centenares de metros en la zona de caldera correspondiente al valle de Quetzaltenango. Dado que es una zona de erosión más que de depositación los espesores de arenas, gravas y cantos no son considerables para el área del proyecto. Además, la forma encañonada del cauce impide la acumulación de estos materiales. Son formaciones muy permeables y de escasa distribución superficial en el área estudiada. La litología principal en la parte de influencia directa de la cuenca está conformada por las lavas y los flujos del Cuaternario, los cuales comprenden todo el complejo eruptivo de los volcanes Cerro Quemado y Santa María al oeste de Zunil y Santo Tomás al este. Tanto las lavas como sus productos de alteración presentan, generalmente, una intensa fracturación, causada por condiciones de enfriamiento rápido por actividad tectónica secundaria. Esto permite que todo el conjunto tenga un elevado grado de permeabilidad, lo cual permite una circulación del agua subterránea notablemente desarrollada. La fracturación se presenta más intensa cerca de la superficie y disminuye en profundidad. Sobre esta formación se encuentra la zona estudiada.¹⁶

“La cuenca del río Samalá, tiene como límites al norte las cuencas de los ríos Chixoy y Cuilco, al este las cuencas de los ríos Nahualate y Sis-Icán, al oeste las cuencas de los ríos Naranjo y Ocosito y al sur el Océano Pacífico en el cual desemboca, luego de drenar 1 499 km²”.¹⁷

¹⁶ Instituto Nacional de Electrificación. *Definición de alcances de los trabajos que posibiliten las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la hidroeléctrica Santa María.* p. 40.

¹⁷ BARILLAS, Manolo. *Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del Río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu, Guatemala.* Retalhuleu, Guatemala. p. 7.

Es una de las cuencas con más alta incidencia de desastres naturales en Guatemala. Entre ellos están las inundaciones anuales que provoca el río Samalá, la actividad moderada del volcán Santiaguito, lahares y flujos de lodo derivados de la interacción del volcán Santiaguito y río Samalá y deslizamientos en la parte media-alta.

La parte norte de la cuenca del Río Samalá tiene un promedio de 30 km de ancho. Hacia el centro forma una cintura de 6 km de anchura; luego, se extiende hacia el sur, donde alcanza un promedio de 13 km de ancho. La línea de agua o divisoria superficial tiene una longitud de 287 kilómetros y en ella se encuentra el segundo punto de mayor elevación de la cuenca, correspondiente al volcán de Zunil (3 542 msnm). Entre los accidentes geográficos principales están el Cerro Tuicacaix (3 322 msnm), Cerro Los Veinte Palos (3 082 msnm), Cerro Tzantocutuj (3 200 msnm), Cerro Tená (33 120 msnm) y Cerro Patená (3 300 msnm). Incluye, además, seis volcanes: Santiaguito (2 500 msnm), Santa María (3 772 msnm) que es el punto de mayor elevación de la cuenca, Siete Orejas (3 200 msnm), Cerro Quemado (2 800 msnm), Zunil (3 542 msnm) y Santo Tomás Pecul (3 505 msnm).¹⁸

Desde el punto de vista de riesgo y erosión es importante tener en cuenta que el proyecto se encuentra entre los dos puntos de mayor elevación de la cuenca y que 5 de esos 6 volcanes aportan sedimentos directamente al área del proyecto.

El embalse de Santa María es la zona de captación directa de, al menos, cuatro zanjones que bajan directamente de las cumbres de los Volcanes de Santa María y Santo Tomás, los cuales, durante lluvias intensas y crecidas aportan enormes cantidades de sedimentos que van desde arenas hasta bloques de gran tamaño que azolvan el embalse y dañan el canal de descargas cuando se abren las compuertas de fondo que desaguan los sedimentos de diverso diámetro durante el invierno.

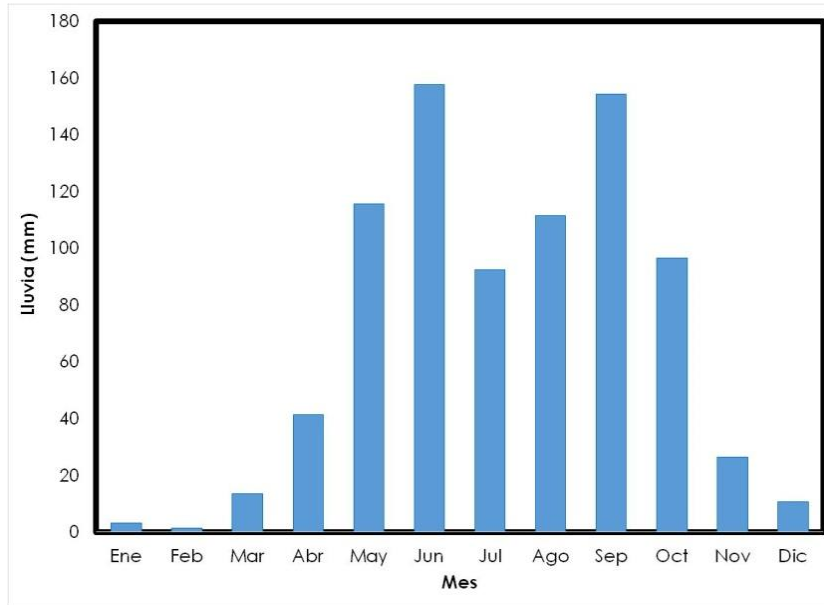
¹⁸ CAHUEX, Alfredo. *Evaluación de caudales de crecida en la cuenca del río Samalá: modelos lluvia-escorrentía, con fines de evaluación de amenazas de origen hidrometeorológico* p.15.

El régimen de lluvias en el área de aporte al embalse es muy variable en el transcurso del año. La época lluviosa va de mayo a octubre, cuya precipitación media mensual es de 121,3 mm. La tendencia que se muestra en la figura 20 evidencia que las precipitaciones máximas anuales se presentan en junio, según los registros de la estación meteorológica Labor Ovalle, ubicada en Quetzaltenango.

La evaporación media en el área es de aproximadamente de 126,7 mm anualmente. La tendencia es bastante uniforme a lo largo del año, lo que es congruente con la uniformidad de la temperatura la cual se mantiene en un promedio mensual de 14,7 °C (ver figura 21).

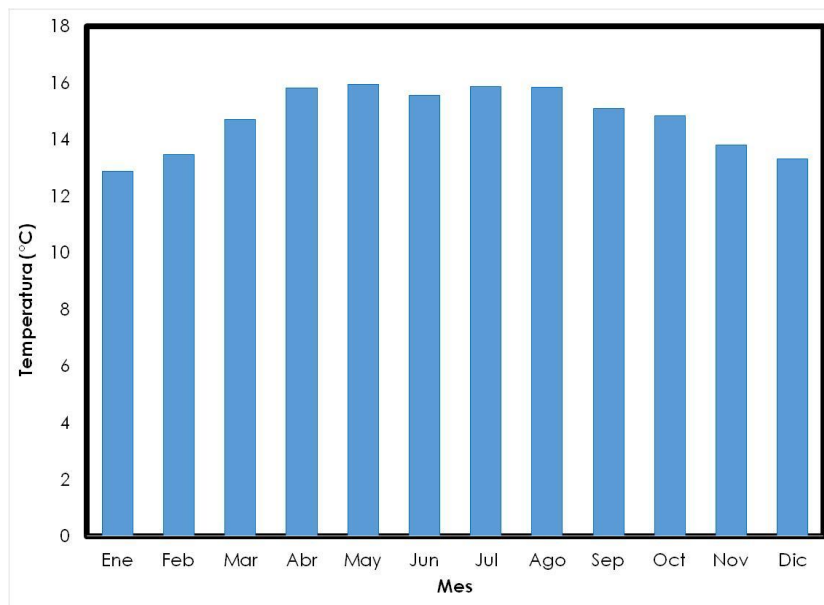
La nubosidad del área es variable; es mayor durante los meses de mayo a octubre (época lluviosa) y disminuye el resto del año. La presión atmosférica media es de 578,6 mm Hg, los vientos son variados, como se muestra en la figura 22. Los máximos registrados son de 5,70 km/h y los mínimos de 3,00 km/h, en la serie histórica de 1990 al 2003.

Figura 20. Régimen de lluvia anual, desde 1990 al 2003



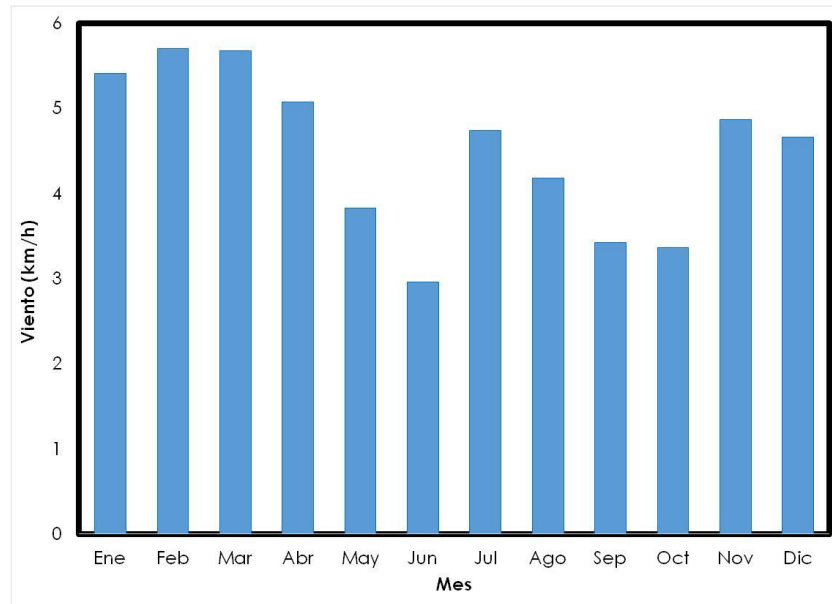
Fuente: Departamento de Hidrología, INDE.

Figura 21. Temperatura mensual promedio, desde 1990 al 2003



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE.

Figura 22. Régimen de vientos, desde 1990 al 2003



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE.

5. ESTUDIO HIDRÁULICO

La capacidad hidráulica de la presa se ha visto superada por fenómenos hidrológicos suscitados en la cuenca del río Samalá. Por ello, es necesario que se evalúen las condiciones estructurales de las obras existentes y se analice la ejecución de trabajos que aumenten la capacidad hidráulica de la presa. De esta manera se protegerá para su desempeño estructural y se evitará cualquier daño a la central hidroeléctrica en general.

A continuación, se presenta el estudio hidrológico derivado de una consultoría requerida por el INDE, específicamente, para analizar la problemática de desgaste en los vertederos de la presa, lechos el río, canal de desfogue y otras estructuras complementarias.

5.1. Caracterización básica

La cuenca del río Samalá, hasta el sitio de la presa, es de 807 km². Cuatro kilómetros aguas arriba de la presa, se ubica la estación hidrométrica El Túnel, en la cual se monitorea, sistemáticamente el caudal de río. El área tributaria hasta dicha estación es de 775 km². La presente investigación, que se encuentra en la documentación del Departamento de Obra Civil del INDE, se basa en el análisis de frecuencia de la serie anual de caudales máximos instantáneos registrados en la estación hidrométrica El Túnel y la información básica fue obtenida de los registros del Instituto Nacional de Electrificación.

5.2. Análisis de crecidas

La estación hidrométrica El Túnel cuenta con registros de caudales máximos instantáneos. Por lo que, el estudio se basa en el análisis de frecuencia de la serie anual de caudales máximos de esta estación.

5.2.1. Análisis de frecuencia de serie anual de caudales máximos

La serie anual de caudales máximos instantáneos observados en la estación El Túnel tiene una longitud de registro desde 1979 al 2013.

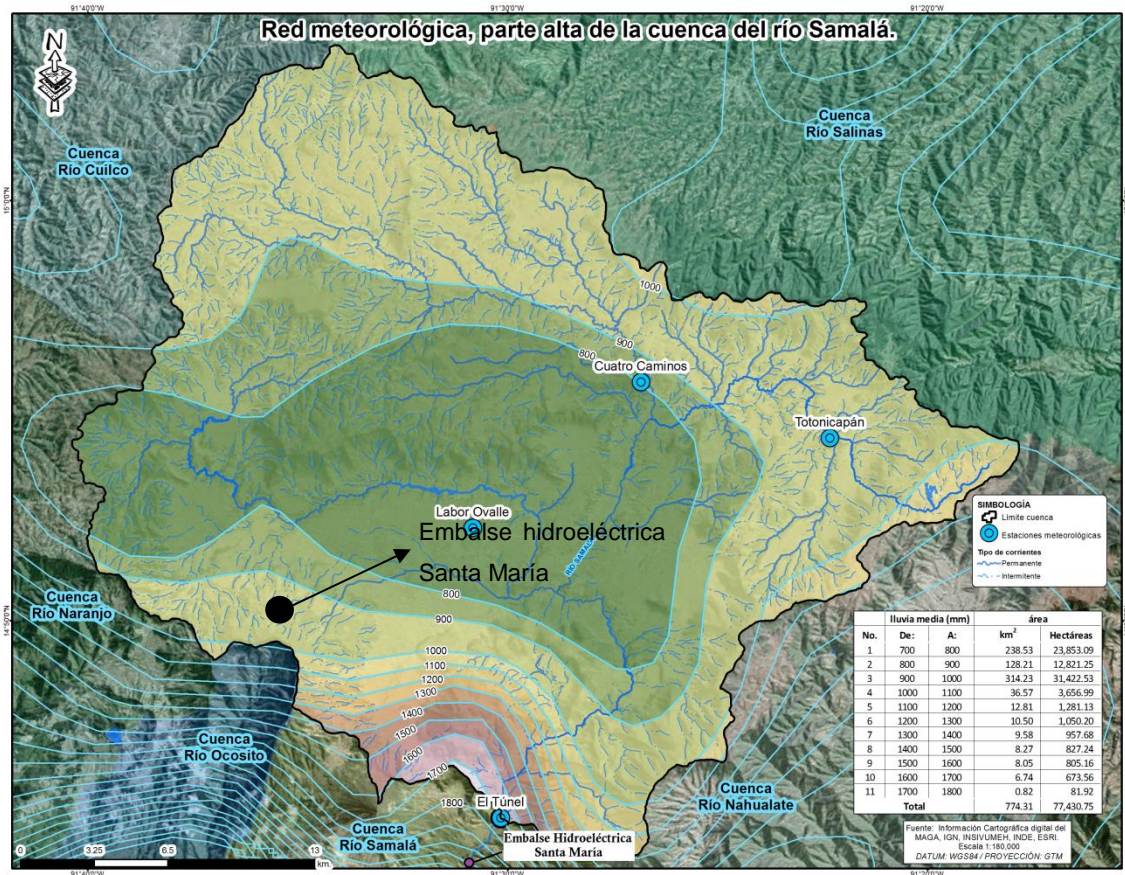
Los valores para los años hidrológicos, a partir de 1998 en adelante, se han estimado en función de curva de descarga de la estación, cuya ecuación es $QMX = 36,78 (h + 0,25)^2$ (INDE, 2013). Donde QMX (m^3/s) es el caudal máximo instantáneo y h (m) es la lectura de la escala.

Tabla X. **Serie de caudales máximos instantáneos, QMX (m^3/s) en la estación El Túnel**

AÑO	QMAX	AÑO	QMAX	AÑO	QMAX	AÑO	QMAX
1979	88	1989	69	1999	63	2009	243
1980	46	1990	29	2000	59	2010	588
1981	70	1991	76	2001	51	2011	428
1982	58	1992	25	2002	84	2012	164
1983	61	1993	31	2003	57	2013	161
1984	72	1994	31	2004	86		
1985	74	1995	107	2005	243		
1986	70	1996	28	2006	72		
1987	44	1997	54	2007	126		
1988	58	1998	77	2008	167		

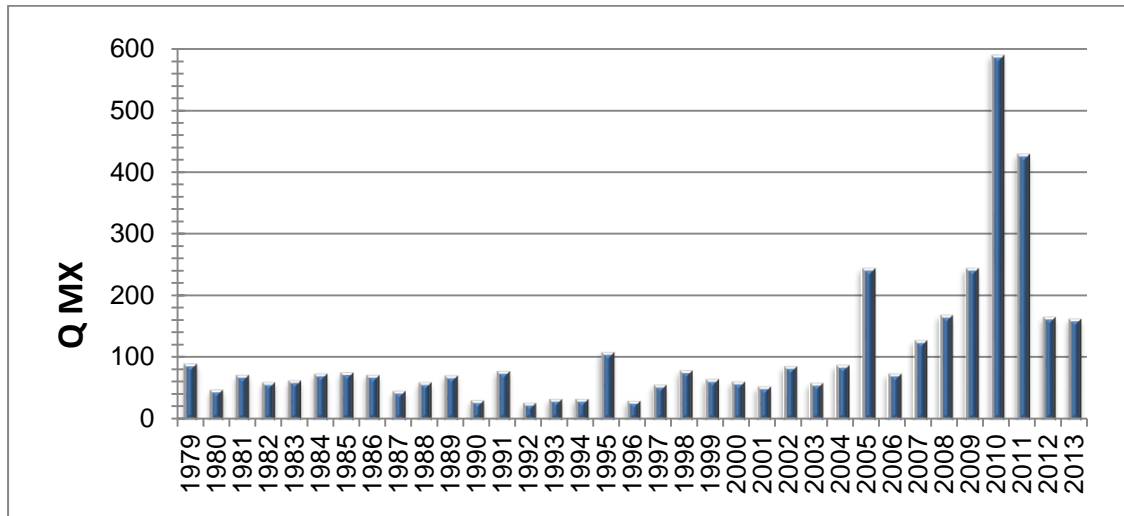
Fuente: Informe Final, "Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María", INDE, 2013.

Figura 23. Mapa de estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Samalá



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE.

Figura 24. **Hidrograma de crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1979 y 2013.**



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Como se observa en la tabla X y figura 24, las crecidas más importantes han ocurrido durante el paso de los ciclones tropicales. La crecida mayor registrada del registro ocurre durante el paso del ciclón tropical Agatha en 2010, la segunda mayor durante el paso del denominado 12E en el 2011.

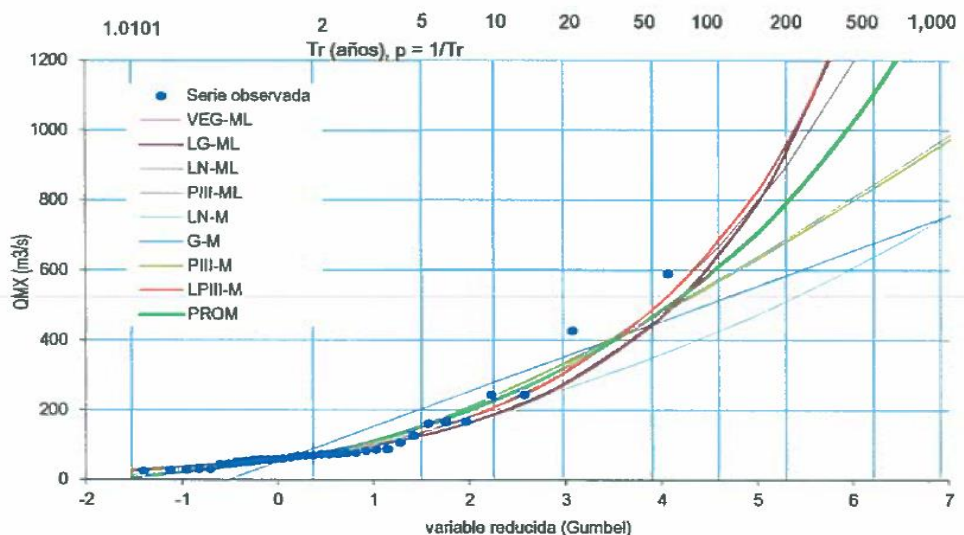
5.2.2. Análisis de frecuencias

A la serie de la tabla X se aplica un análisis de frecuencia el cual consiste en el ajuste de 7 distribuciones teóricas de frecuencia: valor extremo generalizado (VEG), logística generalizada (LG), Pearson III (PIII), Log Pearson III (LPIII), Log Normal (LN) con tres parámetros, Gumble (G), Log Gumbel (LogG), cuyos parámetros se determinaron mediante el método de momentos lineales ponderados probabilísticamente (ML) y el método de momentos convencionales (M). Del análisis de frecuencia se estima que la curva teórica

que representa mejor la tendencia general del régimen de crecidas es la Pearson III ajustada con el método de momentos lineales ponderados probabilísticamente.

En la figura 26 se muestra la tendencia de la serie anual observada junto a las distribuciones teóricas de frecuencia utilizadas en el análisis. En la figura 25 se muestra la curva de frecuencia que se estima la más apropiada. En esta gráfica se resalta la crecida durante el paso del ciclón tropical Agatha, en mayo del 2010.

Figura 25. **Crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1979 y 2013 junto a curvas de frecuencia teóricas utilizadas en el análisis**

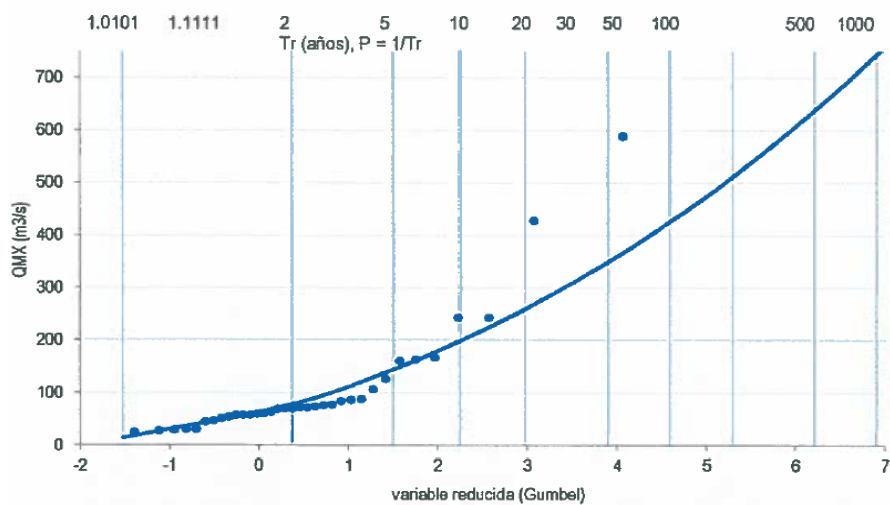


Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Aparentemente, la magnitud de las crecidas durante el paso de los ciclones tropicales Agatha y 12 E en 2010 y 2011, respectivamente son valores atípicos, por la tendencia general de la serie. Esto indicaría que las crecidas de

1998 y 2010 tienen un período de retorno mayor a los 100 años. Para visualizar la tendencia de la serie sin las crecidas de los ciclones Agatha y 12 E, se hace el mismo análisis sin esos valores. En la figura 27 se muestran las curvas de frecuencia.

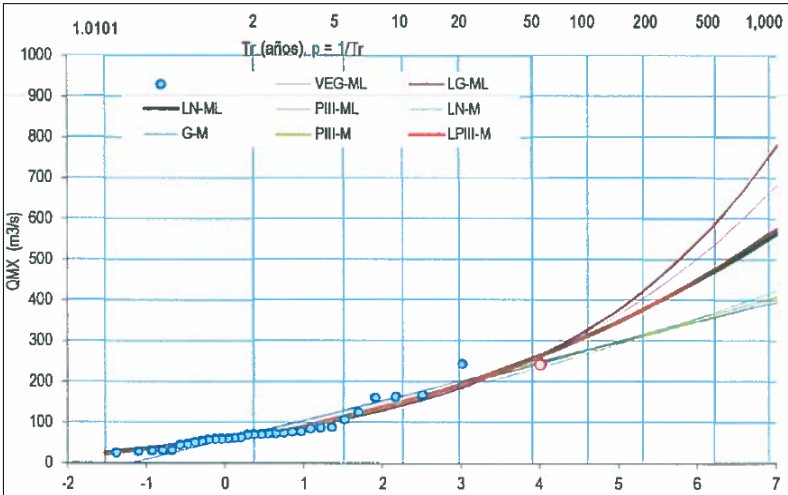
Figura 26. **Crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1996 y 2013 junto a la curva de frecuencia que se estima la más apropiada**



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

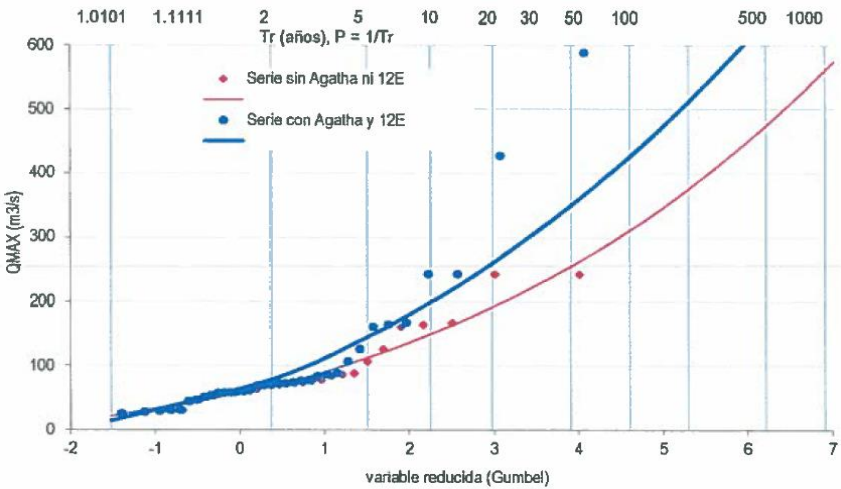
En la figura 26 se muestra la curva que se estima más apropiada para describir la tendencia de las crecidas sin el valor registrado durante los ciclones Agatha y 12E, junto a la curva de frecuencia que se estima la más apropiada considerando el Agatha y la 12E. Por lo anterior, se estima apropiado utilizar los valores deducidos de la curva teórica de frecuencia indicada en la figura 26.

Figura 27. Crecidas observadas en la estación El Túnel entre 1979 y 2013, sin el valor de las crecidas durante el Agatha (2010) y 12E (2011) junto a curvas de frecuencias teóricas utilizadas en el análisis



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Figura 28. Comparación de curvas de frecuencia con y sin considerar los eventos durante los ciclones 12E en 2011 y Agatha en 2010



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

5.2.3. Caudales pico

De acuerdo con el análisis de frecuencia se obtienen los caudales pico asociados a diferentes períodos de retorno indicados en la tabla XI. Los caudales pico estimados en la estación El Túnel son incrementados para la presa Santa María, en función del aumento del área tributaria.

Tabla XI. **Caudales máximos (m³/s) con diferente periodo de retorno (Tr) en la estación El Túnel y traslados al sitio de presa Santa María, en función del incremento del área tributaria**

Tr (años)	Estación el Túnel	Presa Santa María
1 000	745	775
500	639	664
200	512	533
100	427	444
50	350	364
20	260	270
10	200	207

Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

5.3. Análisis hidráulico

A continuación se presenta un análisis hidráulico de la capacidad de los vertederos con base a un estudio realizado por el INDE en el año 2013.

5.3.1. Capacidad hidráulica del sistema de vertederos

La presa cuenta con un sistema de desfogue de caudales de demasías por un grupo de seis vertederos, como se muestran en la figura 29. La cota de la cresta de los vertederos es de 1 335,15 msnm, mientras que la cota de la

corona de la presa (camino), es de 1 538,5 msnm. En la tabla XII se muestra la magnitud del caudal de desfogue de cada vertedero. Los caudales son para una altura de nivel del agua levemente superior a la altura de la sección rectangular de cada vertedero.

El caudal total que puede pasar por el sistema de vertederos, hasta la altura de 2,05 m sobre la corona de los mismos; es decir, hasta la cota de 1 537,20 msnm (1,30 m por debajo de la corona de la presa), es de 200 m³/s. De acuerdo con el análisis de crecidas, esa magnitud es del orden de la crecida con período de retorno de 10 años (ver tabla XI). Para caudales superiores, se corre el riesgo de superar la corona de la presa.

Figura 29. Vista de la presa y sus seis vertederos



Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Tabla XII. **Capacidad de desfogue de los vertederos, según las dimensiones proporcionadas por el INDE**

Vertedero	1	2	3	4	5	6
Q (m ³ /s)	33	33	34	34	32	34

Fuente: Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Para un evento en el cual el nivel del agua en el embalse llegue al nivel de la corona de la presa (cota 1 538,15 msnm), la capacidad de desfogue del conjunto de los seis vertederos se estima en 320 m³/s. Este valor se asocia a un periodo de retorno levemente inferior a los 50 años. Para caudales superiores, el agua necesariamente rebasaría la corona del camino, así como el extremo izquierdo de la corona de la presa.

5.4. Problemas en presa

En los capítulos anteriores se ha evidenciado diferentes problemas que presenta la hidroeléctrica relacionados con efectos hidráulicos, hidrológicos y geológicos. La presa también se ha visto afectada por procesos erosivos.

5.4.1. Desgaste en la superficie de vertedero 6

La caída de agua con alta carga de sedimento que corre en el vertedero 6 (ver figura 29), favorece el desgaste de la superficie del cuerpo de la presa, ya que existe una “tarima” que eleva el flujo del agua y lo cambia del normal escurrimiento que debería de tener, por lo cual el salto que se produce provee al flujo de energía que al momento de la caída provoca daños en el cuerpo de la presa.

5.5. Análisis de la calidad del agua

La fuerte contaminación físico química de las aguas del río Samalá, el cual es el segundo más contaminado luego del río Motagua, según el INSIVUMEH, es el resultado de actividades agrícolas, domésticas e industriales. Cuenca arriba produce una calidad de agua con diversos compuestos que contribuyen a degradar con mayor rapidez el hormigón y el metal de las infraestructuras de la hidroeléctrica.

En 2013 se realizó un análisis de calidad del agua del río Samalá. El punto de toma de muestras fue en N 14°43'21.3", O 91°31'24.62". La toma de la muestra se realizó el 25 de octubre de 2013. El agua se envasó en un recipiente plástico y se cumplió con las normas específicas para recolección, almacenamiento y traslado de la misma. Se almacenó en refrigeración para conservar sus características reales, las cuales fueron evaluadas el 25 de octubre de 2013. A continuación, se muestran los resultados del análisis.

Tabla XIII. Análisis de calidad del agua

Parámetro	Límite de detección	Resultado obtenido
Temperatura (°C)	0,01	18,3
Aspecto	Claro	Turbio
Olor	Inodora	Tierra
Índice de Langelier	-----	-0,18
Turbiedad (UTN)	0,01	166
Color	1	228
PH	0,01	7,77
Conductividad Eléctrica ($\mu S/cm$)	0,01	166
Nitritos (mg/L)	0,01	0,11
Nitratos (mg/L)	0,01	55
Cloruros (mg/L)	1	27
Fluoruros (mg/L)	0,01	0,14
Sulfatos (mg/L)	0,1	47
Hierro (mg/L)	0,01	0,96
Manganeso (mg/L)	0,01	0,10

Continuación tabla XIII.

Sólidos disueltos totales (mg/L)	0,01	86
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	0,01	84
Sólidos totales (mg/L)	0,01	170
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	1	118
Calcio (mg/L)	0,01	22
Magnesio (mg/L)	0,01	15
Bicarbonatos (mg/L)	1	90
PH saturación	-----	8
Conclusión Índice de Carrier	-----	Corrosión Leve

Fuente: elaboración propia con base a información proporcionada por INDE.

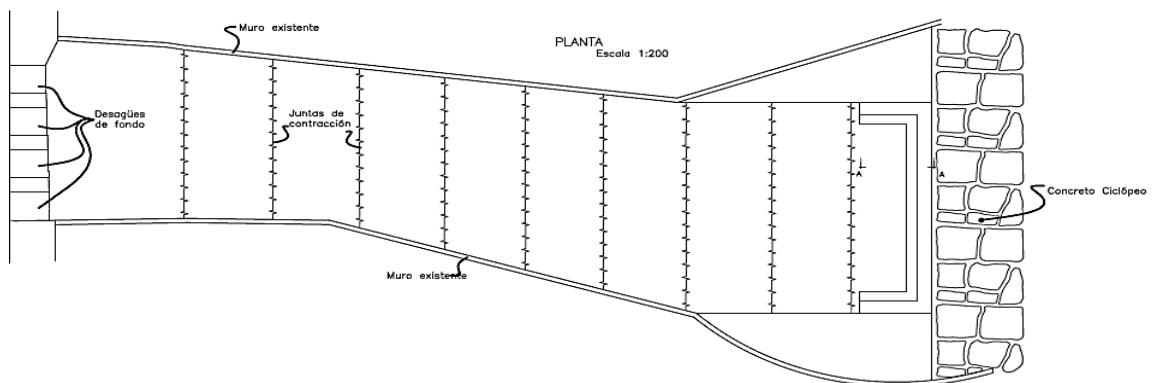
6. ESTUDIO TOPOGRÁFICO

A continuación, se muestran la síntesis de los resultados del estudio topográfico realizado por la División de Ingeniería Civil del INDE realizado en el canal de desfogue de la hidroeléctrica. Las condiciones que se especifican en los planos son la base para plantear una propuesta para modificar la geometría del canal y con ello solucionar los problemas estructurales. En el capítulo 8, se discute las condiciones actuales del canal de desfogue y se propone una nueva geometría para el canal.

6.1. Levantamiento en planta

La longitud del canal de desfogue es de, aproximadamente, 46,00 m. Inicia en la salida de las descargas de fondo ($14^{\circ}43'20,65''$ N, $91^{\circ}31'23,86''$ O) y finaliza en un muro de anclaje al final de la nueva solera del canal de desfogue ($14^{\circ}43'19,77''$ N, $91^{\circ}31'23,37''$ O).

Figura 30. Planta del canal de desfogue

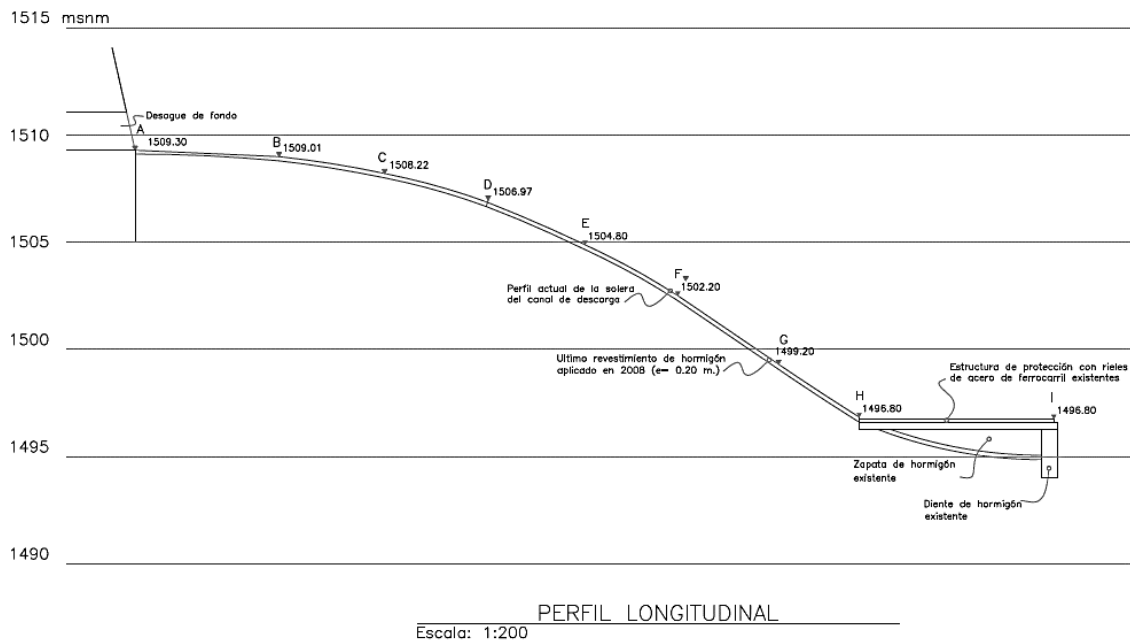


Fuente: Propuesta para modificación del perfil y reforzamiento del canal de Desfogue de la hidroeléctrica Santa María, División de Ingeniería Civil, INDE, abril 2015.

6.2. Perfil longitudinal

El canal de desfogue actual inicia en la cota 1 509,30 msnm al pie de las compuertas de fondo y finaliza en la cota 1 496,80 msnm. Se prolonga por medio de una plataforma compuesta de rieles de acero con una longitud de 9,00 m, la cual fue colocada para suavizar la caída en el tramo final.

Figura 31. Perfil longitudinal del canal de desfogue



Fuente: Propuesta para modificación del perfil y reforzamiento del canal de Desfogue de la hidroeléctrica Santa María, División de Ingeniería Civil, INDE, abril 2015.

7. ESTUDIO DE SUELOS Y ANÁLISIS DEL CONCRETO

La empresa Suelos y Cimentaciones realizó el análisis de la problemática por desgaste del concreto en el canal de descargas de la hidroeléctrica Santa María. Realizaron ocho extracciones de núcleos del concreto existente en el piso del canal. Con ello, determinaron la densidad y resistencia a compresión. La longitud de dichos núcleos fue de 0,40 m aproximadamente.

También se realizaron pruebas de resistencia no destructiva *in situ* con martillo esclerométrico en puntos aleatorios dentro del piso del canal. Adicionalmente, se analizó una muestra de sedimento en la parte interior del canal y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XIV. **Resultado del análisis de laboratorio sobre sedimentos**

Muestra / Característica	Sedimento de estrato 1	Material de derrumbe en área de muro	Material de Talud
Material	Limo arcilloso con poca arena	Arena Gravosa Uniforme	Arena pómez limosa uniforme
Color	Café con gris	Gris	Café claro
Profundidad	25,00 m aprox.	0,50 m	0,30 m
Clasificación unificada	MH	SP	SM-SP
Densidad húmeda	1 035 kg/m ³	1 613 kg/m ³	1 707 kg/m ³
Humedad	14,01%	13,61%	9,70%

Continuación tabla XIV.

Gravedad específica	1,942	2,603	2,598
Relación de Vacíos	1,138	0,832	0,669
Humedad de saturación	53,20%	45,40%	40,10%
Limite líquido	51	NLL	NLL
Cohesión	1,0 ton/m ²	0,0 ton/m ²	0,0 ton /m ²
Ángulo de fricción	18°	38°	30°
Profundidad de agua	25,61	0,52	0,3
LL	51	---	---
IP	10	---	---
% T200	82,68	4,20	5,71
Clasificación	A-7 (MH))	A-1 (SP)	A-1-a (SM-SP)
H%	14,01	16,61	9,7
P.U.	0,999	1,593	1,712

Fuente: elaboración propia, con base en el Informe Final, "Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María", INDE, 2013.

A partir de los ensayos aplicados a los núcleos de concreto y por las pruebas con el martillo esclerómetro, se encontraron resultados de resistencia del concreto de 6 000 psi en varios puntos.

Las características del refuerzo de la losa consta de un diámetro de acero de refuerzo de 1 pulgada, espaciada a 20 centímetros en dos sentidos, se estima que es refuerzo por temperatura, el desgaste que deja expuesto el acero de refuerzo es de aproximadamente 25 cm de espesor dispuesto en forma de canales como resultado de los procesos de erosión.

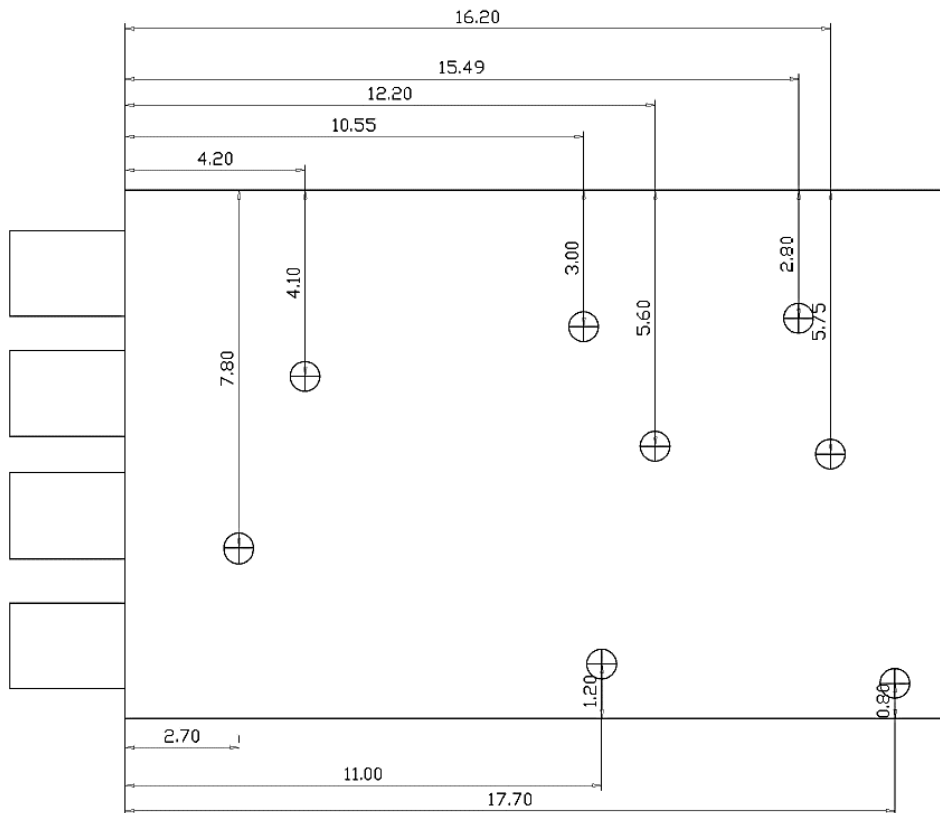
Tabla XV. **Resultado de las pruebas de resistencia de concreto no destructivo (martillo Schmidt)**

VERTEDERO	RESISTENCIA ESTIMADA PSI
Piso compuerta 2	6 300
Piso compuerta 3	6 300
Piso compuerta 5	7 000

Fuente: elaboración propia. Con base en el Informe Final, "Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María", INDE, 2013.

A continuación se presenta un croquis de los puntos de extracción de núcleos que fueron seleccionados para determinar las condiciones de la losa de piso del vertedero. Y posteriormente se presentan los resultados de la resistencia del concreto basados en una prueba de carga puntual, aplicada de forma compresiva.

Figura 32. Puntos de extracción de núcleos en la losa del piso del vertedero, hidroeléctrica Santa María



Fuente: elaboración propia, con base en el Informe Final, “Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María”, INDE, 2013.

Tabla XVI. **Resultados de resistencia a compresión del concreto de la losa de piso del vertedero**

MUESTRA No.	UBICACIÓN DE MUESTRA	FECHA EXTRACCIÓN	FECHA PRUEBA	ϕ (cm)	L (cm)	w (kg)	γ (kg/m ³)	P (Lb)	σ (Lb/plg ²)
1	Compuerta 2	20/10/2013	21/10/2013	5	14	0,56	2 037,18	1 798,0	6 496,0
2	Compuerta 3			5	21	0,94	2 279,70	1 798,0	6 496,0
3	Compuerta 4			5	20	0,60	1 527,88	1 686,0	6 091,3
4	Compuerta 5			5	15	0,57	1 935,32	1 686,0	6 091,3
5	Compuerta 5			5	18	0,73	2 065,47	1 348,0	4 870,2
6	Compuerta 4			5	15	0,59	2 003,23	1 348,0	4 870,2
7	Compuerta 3			5	27	1,12	2 112,63	899,20	3 248,7
8	Compuerta 2			5	10	0,43	2 189,97	1 461,0	5 278,4

Donde:

	Diámetro de la muestra
ϕ	Longitud de la muestra
L	Peso de la muestra
w	Densidad de la muestra
γ	Carga de ensayo
P	Resistencia a compresión
σ	

Nota: Las muestras fueron tomadas el día 20/10/2013 y ensayado el día 21/10/2013.

Fuente: elaboración propia. Con base en el Informe Final, "Definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María", INDE, 2013.

8. SÍNTESIS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS Y PROPUESTAS TÉCNICAS

8.1. Solución para los vertederos

La presa de la Central Hidroeléctrica Santa María es de Concreto Gravedad. Cuenta con 6 vanos en forma de bóveda con aproximadamente 200 m³/seg de capacidad de desfogue, en su parte superior. Los últimos eventos meteorológicos han superado esta capacidad y han dañado algunos de los componentes de la central, tal es el caso del canal auxiliar. Para minimizar la posibilidad de que esto suceda nuevamente, se debe incrementar la capacidad de desfogue de la presa. Para ello, es necesario construir otro canal de desfogue en la margen izquierda.

Este canal podría tener una sección aproximada de 12 metros cuadrados, construido de concreto reforzado o con alguno de los productos actuales de acero galvanizado. De esta manera, el volumen de desfogue se incrementará en 15% del volumen actual. Si este canal de desfogue adicional se construye, se debe construir una estructura en forma de canal para evitar la erosión en la parte alta del estribo izquierdo, donde se encuentra la caverna que fue reforzada debido a los daños provocados por la tormenta Stan.

Adicionalmente, para minimizar el caudal sobre los vertederos, se debe habilitar la compuerta de fondo número 4 de la presa, la cual se encuentra fuera de operación.

Con la habilitación de esta compuerta de fondo, el caudal que pase por los vertederos será menor, y además se contribuirá al desalojo de piedra y sedimentos que se acumulan en las proximidades de las compuertas. De esta manera se evitan daños en las compuertas y en su sistema de apertura y cierre.

8.2. Solución para el canal de desfogue

El nuevo diseño del canal de desfogue pretende disminuir la energía del agua desfogada mediante un cambio en la geometría del mismo, es decir, una reducción en la pendiente de caída y una prolongación de la losa.

8.2.1. Diseño del nuevo canal de desfogue

A continuación, se detallan las modificaciones estructurales para el nuevo canal de desfogue. Una información más clara y detalla de la nueva propuesta de canal de desfogue puede consultar en los planos correspondientes en Anexos.

La figura 30 muestra la geometría vista en planta del canal de desfogue. Se fundirán diez losas con un armado de hierro corrugado de No. 6 (3/4") y estarán dispuestas con juntas de contracción. La losa se extenderá a través de una longitud aproximada de 50,00 m desde el rostro de los desagües de fondo hasta un muro de concreto ciclópeo.

Como se observa en la figura 2 del capítulo 2.2.3, el canal de desfogue está lateralmente confinado con roca natural, En su margen derecha el talud se extiende con una altura considerable a lo largo del cauce del río. Por el contrario, en la margen izquierda, el talud posee una altura apenas por encima del nivel de la losa del canal de desfogue. Por ello, esta porción de roca está

provista de un recubrimiento de concreto para evitar que posibles corrientes de agua puedan generar erosión y/o daños estructurales al pie de la presa. Además, se observa que la margen izquierda se va abriendo conforme se avanza aguas abajo; Por ello, posee un encausamiento por medio de un muro de concreto, el que a su vez formará dos depósitos laterales para detritos y rocas al pie del canal de desfogue.

El canal de desfogue actual presenta una pendiente suavizada en las primera tres lozas (ver figura 31) con un incremento promedio de 16,13% desarrollado en 16,53 m. En los siguientes 18,12 m la pendiente aumenta drásticamente a una pendiente media de 57,42%, con lo que, evidentemente, se le inyecta una energía extra al efluente del embalse y este ha causado erosiones significativas.

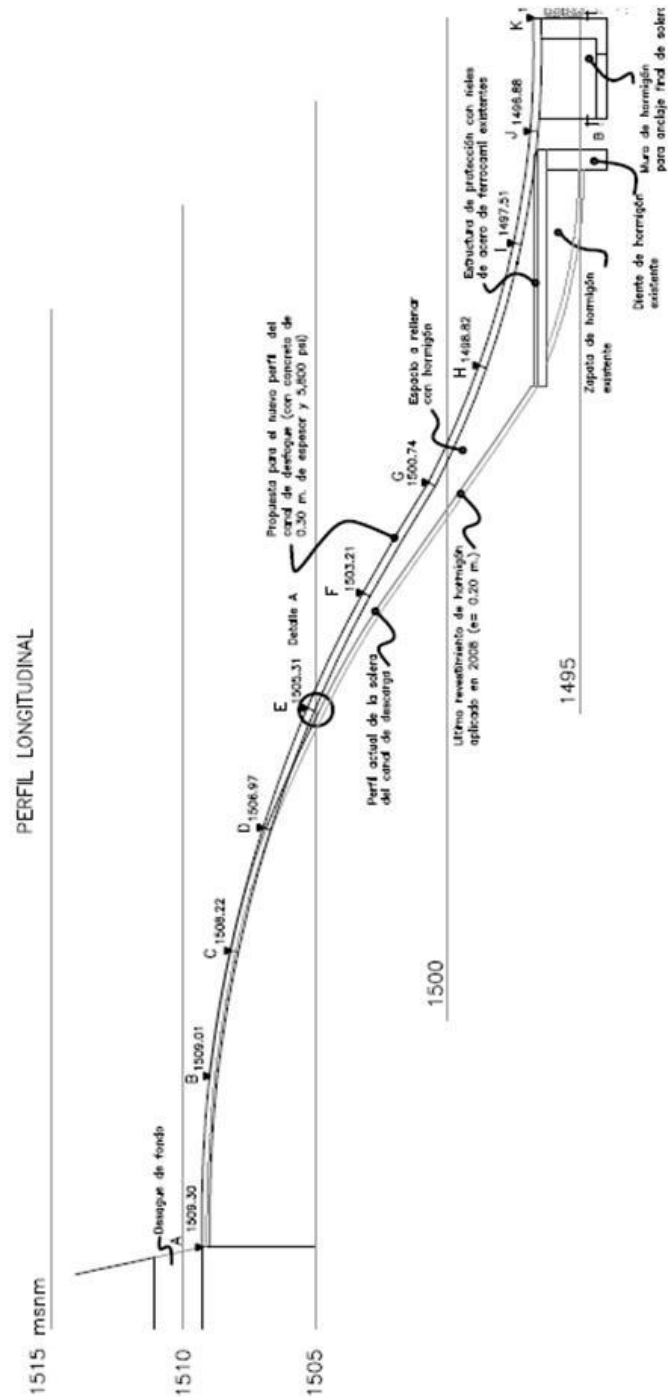
Para contrarrestar los efectos de adición de energía al caudal debido a las grandes pendientes, la propuesta del nuevo diseño del perfil del canal de desfogue contempla una curva suavizada en toda la longitud del canal como se muestra en la figura 33. La pendiente modificada presenta un cambio medio en la pendiente de 10,52 % en los primeros 26,75 m y una disminución media de 13,60% en los metros restantes.

El canal iniciará al filo de los desagües de fondo en la cota 1 509,30 msnm y concluirá en la cota 1 496,80 msnm, con una longitud total aproximada de 50,00 m, extendiéndose 5,23 m de la obra de derivación actual.

El volumen generado entre la losa actual y la nueva losa propuesta para el canal, será relleno con hormigón, de tal manera que sirva como soporte y base de anclaje para la nueva losa. La losa de concreto armado estará dispuesta de un concreto de alta resistencia a la abrasión, con resistencia de 5 800 psi y con un espesor de 0,30 m.

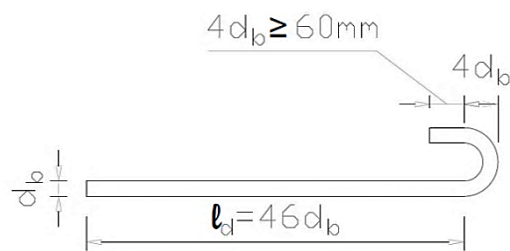
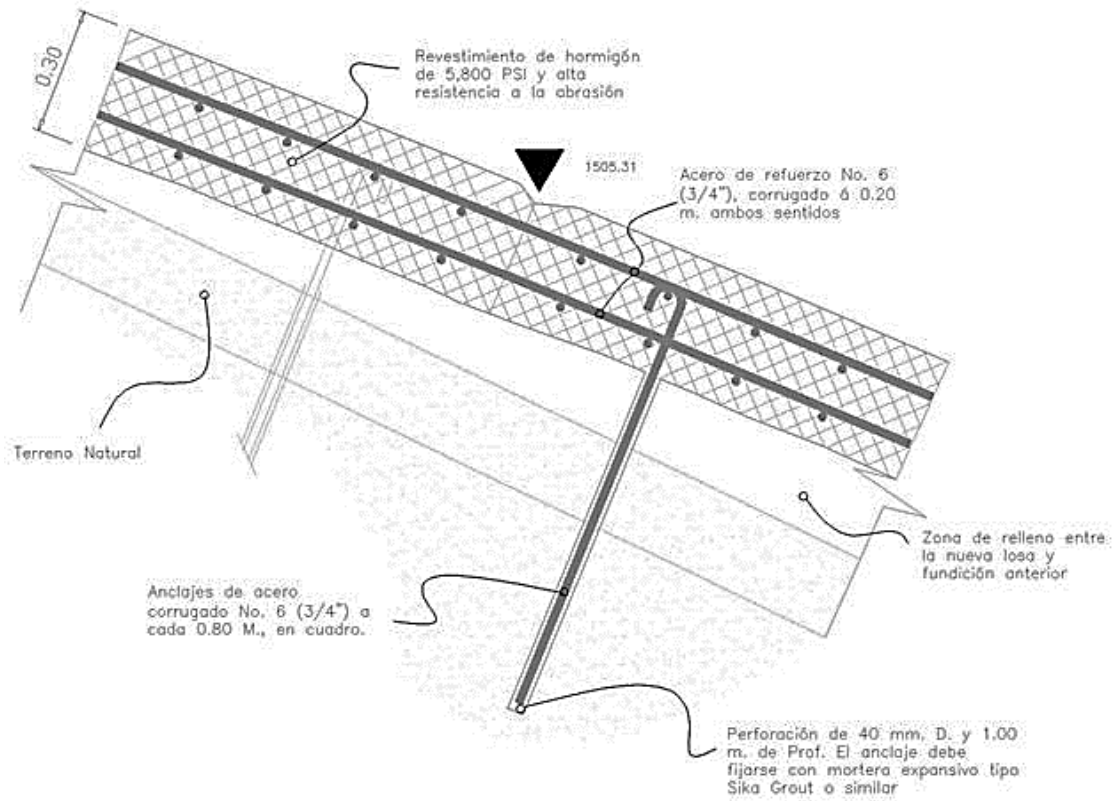
El refuerzo será de acero No. 6 (3/4") corrugado, colocado a una separación de 0,20 m. Además, estará anclado a la losa existente y al relleno de hormigón con bastones de un metro de longitud de acero No. 6 (3/4") a cada 0,80 m en cuadro. (Ver figura 34).

Figura 33. Perfil longitudinal de la nueva propuesta para el canal de desfogue



Fuente: Hidroeléctrica Santa María, Propuesta para modificación del perfil y reforzamiento del canal de Desfogue, División de Ingeniería Civil, INDE, abril 2015.

Figura 34. Detalle de armado y anclaje



Dimensiones del bastón

Fuente: Hidroeléctrica Santa María, Propuesta para modificación del perfil y reforzamiento del canal de Desfogue, División de Ingeniería Civil, INDE, abril 2015.

8.2.2. Cuantificación de materiales para la reconstrucción del nuevo canal de desfogue

A continuación se presenta un diseño de mezcla de concreto de resistencia a compresión de 5 800 psi, con lo cual se obtendrá una proporcionalidad de mezclas, por si en caso tuviese que fundirse alguna losa de forma manual o bien, posteriormente se necesite alguna reparación. También se ejemplifica la forma de cuantificar el acero de refuerzo que será provisto en las losas; las cuantificaciones totales resumidas de los materiales serán presentados en tablas.

Tabla XVII. **Características de los materiales**

Losa de concreto	
Área de losa	535,57 m ²
Espesor de losa	0,30 m
Recubrimiento	0,08 m
Tipo de concreto	5 800,00 PSI
NOTA: Concreto de alta resistencia a la abrasión.	
Características de los agregados	
P.U. Agua	1 000 kg/m ³
P.U. Cemento	3 150 kg/m ³
P.U. Arena	2 600 kg/m ³
Módulo de finura de la arena	2,8
P.U. Piedrín	2 700 kg/m ³
P.U. seco piedrín	1 600 kg/m ³

Continuación tabla XVII

Acero longitudinal de Refuerzo	
Diámetro de barra	3/4 pulg
Área de acero	2,84 cm ²
Longitud de barra	6,00 m
Espaciamiento	0,20 m
Traslape	0,90 m
Bastones de anclaje	
Diámetro de barra	3/4 pulg
Área de acero	2,84 cm ²
Longitud de barra	6,00 m
Longitud de anclaje	1,00 m
Longitud de gancho	0,15 m
Longitud total de bastón	1,015 m
Espaciamiento de anclajes	0,90 m

Fuente: elaboración propia.

8.2.2.1. Diseño de mezcla de concreto

La losa que se fundirá se ha diseñado con una resistencia a compresión de 5 800 psi (406 kg/cm², 40,60 MPa). Sin embargo, las proporciones de los materiales pueden diferir, de acuerdo con los distintos procedimientos de preparación de la mezcla. Por ello, como factor de seguridad se determina un nuevo valor de resistencia promedio a la compresión requerida debido a que no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra que garantice que, ante cualquier variación en la mezcla, se obtendrán como mínimo los 406 kg/cm² de diseño. La nueva resistencia compresión se puede determinar con la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra**

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 20$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$20 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Fuente: ACI 318S-08.

Entonces, la resistencia requerida se calcula como:

$$f'_{c_{req}} = 1.10 (40.60) + 5 = 49.66 \text{ MPa} \approx 7,000 \text{ psi}$$

Debido al tamaño y a las consideraciones técnicas de las losas que se fundirán, es necesario utilizar una mezcla de concreto homogénea que posea consistencia plástica. Es decir, que no sea muy seca, de tal manera que no se atasque en la rejilla de armado, ni tampoco sea excesivamente fluida y provoque una sedimentación del agregado grueso. Se propone que el asentamiento sea de 3" (75 mm).

"Las Normas de Diseño Estructural recomiendan que el tamaño máximo nominal del agregado grueso sea el mayor que sea, económicamente disponible, siempre que sea compatible con las dimensiones y características de la estructura".¹⁹

¹⁹ HUANCA, Samuel. *Diseño de mezclas de concreto*. p. 7.

El ACI 318 S-08 indica que el tamaño máximo nominal del agregado grueso no debe ser superior a:

- 1/5 de la menor separación entre los lados del encofrado, ni a
- 1/3 de la altura de la losa, ni a
- 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre las barras o alambres individuales de refuerzo.

"Estas limitaciones se pueden omitir si a juicio del ingeniero, la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el concreto se puede colocar sin la formación de hormigueros o vacíos"²⁰

Se considera que, cuando se incrementa el tamaño máximo del agregado, se reducen los requerimientos del agua de mezcla, la resistencia del concreto, entonces, se incrementa. En general, este principio es válido con agregados hasta 40 mm (1½"). En tamaños mayores, solo es aplicable a concretos con bajo contenido de cemento.²¹

Por lo anterior, se considera un tamaño del agregado de 20 mm (¾"), que cumpla con los demás requerimientos aplicables.

Para realizar una primera estimación del agua en litros por metro cúbico de mezcla de concreto, se utiliza la tabla de "Requerimientos aproximados de agua de mezclado y de contenido de aire para diferentes valores de asentamiento y tamaños máximos de agregados" (ver anexos). De ella se

²⁰ ACI 318-08. *Requisitos de Reglamento para concreto estructural y comentario*. p. 44.

²¹ HUANCA, Samuel. *Diseño de mezclas de concreto*. p. 7.

obtiene que, para un asentamiento de 75 mm (3") y un agregado de 20 mm (3/4") se requieren 200 lt/m³ (200 kg/m³) de agua con 2% de contenido de aire.

Para concretos la relación a/c basa en la resistencia del concreto de la tabla XIX, dado un $f'_{c_r} = 496,60 \text{ kg/cm}^2$, ya que el valor no se encuentra exactamente en la tabla XIX, se dispone de la máxima relación agua/cemento permisible para concretos sometidos a condiciones especiales de exposición (ver tabla en anexos), definiendo la relación como $a/c = 0,40$ y se obtiene el contenido de cemento.

Tabla XIX. **Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto**

Resistencia a la compresión a los 28 días ($f'_{c_r} = \text{kg/cm}^2$)	Relación agua/cemento de diseño en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
450	0,38	---
400	0,43	---
350	0,48	0,40
300	0,55	0,46
250	0,62	0,53
200	0,70	0,61
150	0,80	0,71

Fuente: HUANCA, Samuel. Diseño de mezclas de concreto. p. 10.

$$\text{Contenido de cemento} = 200/0,40 = 500 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen de cemento} = (500 \text{ kg}/3150 \text{ kg/m}^3) = 0,159 \text{ m}^3$$

Para un grado adecuado de trabajabilidad, el volumen de agregado grueso por unidad de volumen del concreto depende solamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino. Cuanto más fina es la arena y mayor el tamaño de las partículas del agregado grueso, mayor es el volumen de

agregado grueso que puede utilizarse para producir una mezcla de concreto de trabajabilidad satisfactoria.

Para la estimación de los contenidos de agregados se utiliza la tabla XX que determina el porcentaje de agregado fino sobre el agregado total de la mezcla, para concretos de alta resistencia.

“La determinación de este porcentaje es función del tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de fineza del agregado fino. En este caso, el módulo de finura del agregado fino es de 2,8 y un tamaño máximo nominal de agregado grueso de 20 mm, de lo que se obtiene un porcentaje de agregado fino de = 46 %”.²²

El volumen de los agregados está dado por:

$$Vol_{total} - Vol_{agua+aire+cemento} = 1 - (0,20 + 0,159 + 0,02) = 0,621 m^3$$

$$Vol_{agregado\ fino} = 0,621 m^3 * 0,46 m^3 = 0,286 m^3$$

$$Contenido\ de\ agregado\ fino = 0,286 m^3 * 2\ 600\ kg/m^3 = 743,60kg$$

$$Vol_{agregado\ grueso} = 0,621 m^3 * 0,54 m^3 = 0,335 m^3$$

$$Contenido\ de\ agregado\ grueso = 0,335 m^3 * 2\ 700\ kg/m^3 = 904,50\ kg$$

²² MORATAYA, Carlos. *Concreto de alta resistencia experimentación en Guatemala*. p. 23.

Tabla XX. **Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto**

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO		Volumen de agregado grueso, seco y compactado (*) por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de fineza del agregado fino.			
		MODULO DE FINEZA DEL AGREGADO FINO			
mm.	Pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
10	3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
20	3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
25	1	0.71	0.69	0.57	0.65
40	1 1/2	0.76	0.74	0.72	0.70
50	2	0.78	0.76	0.74	0.72
70	3	0.81	0.79	0.77	0.75
150	6	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: HUANCA, Samuel. Diseño de mezclas de concreto. p.13.

Para una mejor aproximación de la cuantificación de los materiales es posible realizar un ajuste basado en la humedad de los materiales. Para los fines de esta tesis no se realizará, ya que habría que contemplar factores como humedad del área de almacenamiento, humedad del ambiente en el momento de preparación de la mezcla, exposición al sol de los materiales, entre otros.

Proporcionalidad de mezclas

A continuación se presentan las proporcionalidades en peso y volumen del diseño de mezcla para un concreto de 5 800 psi, con la cual se toma en cuenta características de fluidez, trabajabilidad y resistencia,

Tabla XXI. **Proporciones materiales para un metro cúbico de mezcla de concreto**

Ingrediente	Agua	Cemento	Arena	Piedrín
Peso (kg)	200	500	743,60	904,50
Volumen (m ³)	0,20	0,159	0,286	0,335

Fuente: elaboración propia.

- Proporción en peso para un metro cúbico de concreto (200 kg de agua): **1:1.49:1.81**
- Proporción en volumen (con 0,20 m³ de agua): **1:1.80:2.11**

8.2.2.2. Cálculo de la cantidad de concreto y volumen de agregados

En la figura 30 se observa la vista en planta del nuevo diseño de la losa de concreto para el nuevo canal de desfogue, las losas individuales de canal son de geometrías muy variadas. A continuación, se presenta una tabla resumen de las características geométricas de las mismas; las losas se enumeran desde las compuertas de fondo hacia el pie del canal.

Tabla XXII. **Características geométricas de losas que conforman el canal de desfogue**

Losa	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Área (m ²)	88,56	52,85	49,76	50,99	52,68	53,81	59,51	66,05	61,36
Perímetro (m)	37,77	31,31	30,66	31,31	32,53	33,67	35,63	36,98	36,43

Fuente: elaboración propia.

El área total de la losa se puede calcular como:

$$A_{total} = 88,56 + 52,85 + 49,76 + 50,99 + 52,68 + 53,81 + 59,51 + 66,05 + 61,36$$

$$A_{total} = 535,57 \text{ m}^2$$

El diseño estructural contempla un espesor de losa de 0,30 cm, multiplicado por el área total de la losa 535,57 m² se obtiene un volumen de concreto requerido de 160,671 m³. Los materiales se calculan utilizando el diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 200 lt y 1 : 1,49 : 1,81 (Cemento 500,00 kg, Arena 743,60 kg y Piedrín 904,50 kg).

$$Agua = 200lt * 160,671 m^3 = 32\ 134,20\ lts$$

$$Cemento = 500\ kg * 160,671\ m^3 = 80\ 335,00\ kg * \frac{1saco}{42,5kg} = 1\ 890\ sacos$$

$$Arena = 743,60\ kg * 160,671\ m^3 = 119\ 474,96\ kg * \frac{1m^3}{2\ 600kg} = 45,95\ m^3$$

$$Piedrín = 904,50\ kg * 160,671\ m^3 = 145\ 332,34\ kg * \frac{1m^3}{2\ 700\ kg} = 53,82\ m^3$$

8.2.2.3. Cálculo del acero de refuerzo

El cálculo del refuerzo longitudinal y los bastones requeridos varían según la geometría de cada losa individual. A continuación, se hará el cálculo de la losa No. 9 y se presentará una tabla resumen con las cantidades de acero requerido para todo el canal de desfogue. Como se muestra en la figura 35 la losa No. 9 es geoméricamente regular. El armado propuesto es de acero longitudinal con barras No. 6 (diámetro 3/4") colocado cada 0.20 m y los anclajes son de barras No 6 espaciados cada 0.90 m. Las barras para ambos armados poseen una longitud de 6 metros, con un área transversal de 2,84 cm² y textura corrugada para mayor adherencia al concreto. La losa posee un espesor de 0,30 cm y un recubrimiento mínimo de 0,07 m.

El ACI 318S-08 indica que para concreto construido en sitio (no preesforzado) y colocado contra el suelo y expuesto a él permanentemente, deberá proveerse un recubrimiento mínimo de 75 mm, siempre que no sea inferior al requerido por ambientes corrosivos o vulnerables al contacto con fuego. Por esta razón, se optó por brindarle una mejor protección al acero de refuerzo, colocando un recubrimiento de 8 cm.

Se utilizará un sistema de referencia para indicar el sentido en que van colocadas las barras (ver figura 35). Las barras colocadas en el sentido “X” poseen una longitud de $L_{AS_X} = L_X - 2 * recubrimiento = 4,46 - 2 * 0,08 = 4,30 m$, por el contrario las barras colocadas en el sentido “Y” son de una longitud de $AS_Y = L_Y - 2 * recubrimiento = 13,75m - 2 * 0,08m = 13,59 m$.

La cantidad de armados necesarios se calcula dividiendo la longitud real de armado dentro del espaciamiento de las barras, más las barras de borde de cada lado.

$$\#armados_X = \frac{L_{real_Y}}{S} = \frac{13,59}{0,20} = 67,95 \approx 67$$

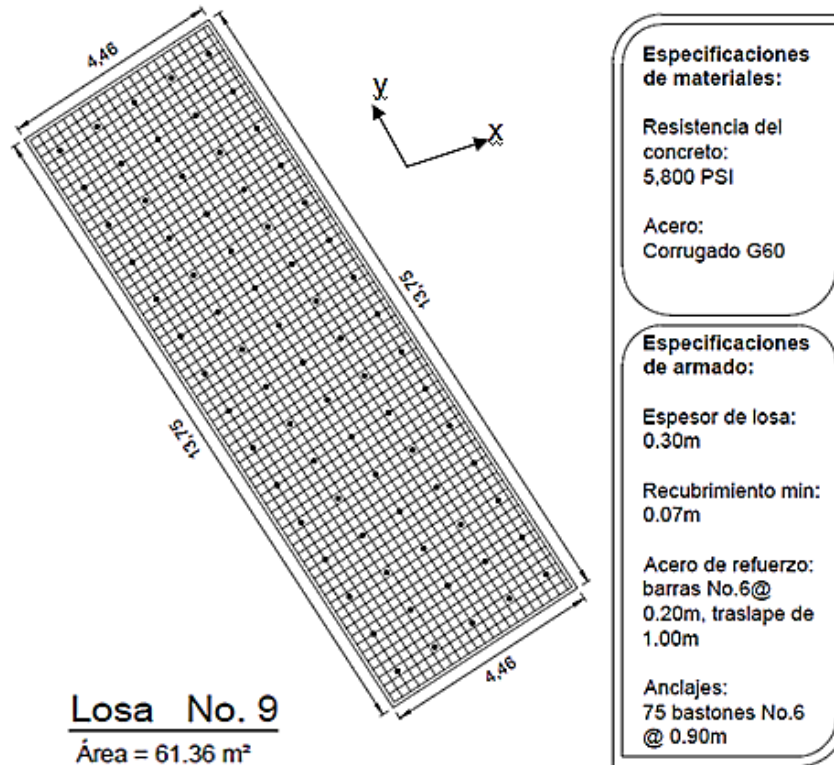
$$\#armados_Y = \frac{L_{real_X}}{S} = \frac{4,30}{0,20} = 21,50 \approx 21$$

Se aproximan al entero inferior dado que la distancia restante (decimales) no cumple con la especificación estructural y, además, la siguiente barra tendría que ser una de borde que serán contempladas a continuación

$$\#armados_{X_{TOTAL}} = 67 + 2 = 69$$

$$\#armados_{Y_{TOTAL}} = 21 + 2 = 23$$

Figura 35. Armado de losa No. 9



Fuente: elaboración propia, con base en planos proporcionados por la división de Ingeniería Civil del INDE.

La cantidad de acero por sentido se determina multiplicando la longitud de acero de cada armado por el número total de armados. Es necesario contemplar los traslapes longitudinales de las barras en el caso de necesitar unirlos. El traslape de las barras será igual a la longitud de desarrollo de la misma contemplado por los parámetros establecidos en el ACI 318 S-08. En este caso, la longitud de traslapes será de $46\phi_{barra} = 46 * 3/4 * 2,54 = 87,63 \text{ cm} \approx 0,90 \text{ m}$.

$$Acero_x = 4,30 * 69 = 296,70 \text{ m}$$

$$Acero_y = 13,59 * 23 = 312,57 \text{ m}$$

Determinación de traslapes

$$\frac{\#barras}{armado} \text{ en } X = \frac{4,30m}{6,00m} = 0,72 \text{ barras, no se requiere de traslapes}$$

$$\frac{\#barras}{armado} \text{ en } Y = \frac{13,59m}{6,00m} = 2,26 \text{ barras se requiere de 2 traslapes por armado}$$

$$\text{Acero por traslapes} = \frac{2 * 0,9 m}{6,00m} = 0,33 \text{ barras por armado}$$

$$\text{Acero por traslapes} = 2 * 0,90 * 23 = 41,40 m$$

El total de acero requerido para el armado de una cama de la losa No, 9 está dado por

$$\text{Acero total}_{\text{por cama}} = 296,70 + 312,57 + 41,40 = 650,67 m$$

$$\#barras \text{ totales}_{\text{por cama}} = 650,67/6,00 = 108,445 \text{ barras}$$

Para el armado de las dos camas se necesitarán 1 301,34 m de acero lo que equivale a 216,89 barras, y en quintales son aproximadamente 64,17 qq.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los materiales necesarios para la fundición de la nueva losa del canal de desfogue.

Tabla XXIII. Resumen de materiales para la reparación del canal de desfogue

CUANTIFICACION DE MATERIALES PARA LA REPARACIÓN DEL CANAL DE DESFOGUE DE LA HIDROELÉCTRICA SANTA MARÍA										
LOSA DE CONCRETO										
Área de losa:	535,56 m ²	Espesor de losa:	0,30 m	recubrimiento:	0,08 m					
Tipo de Concreto:	5 800.00 PSI	NOTA: Concreto de alta resistencia a la abrasión.								
Acero longitudinal de Refuerzo										
No. de Barra:	No.6 (3/4")	Ø _{barra} :	1,91 cm	Área:	0,44 pulg ²	2,84 cm ²	Longitud:	6,00 m		
Espaciamiento:	0,20 m	Traslape:	0,90 m							
BASTONES DE ANCLAJE										
No. de Barra:	No.6 (3/4")	Ø _{barra} :	1,91 cm	Área:	0,44 pulg ²	2,84 cm ²	Longitud de anclaje:	1,00 m		
Espaciamiento de anclajes:	0,90 m	Longitud de dobles:	0,15 m		Longitud:	6,00 m				
CONCRETO										
Volumen de concreto	160,67 m ³									
Proporción de concreto	1 : 1,49 : 1,81 y 200 lts de agua por metro cúbico de mezcla									
Volumen total de agua	32 134,00 lts									
Volumen total de cemento	1 890,00 sacos									
Volumen total de agregado fino	45,95 m ³									
Volumen total de agregado grueso	53,82 m ³									
CALCULO DE ACERO DE REFUERZO										
Losa	Área	Acero por cama	Barras por cama	Traslapes por cama	Acero por traslape por cama	Acero total por cama	Barras por cama	Acero total en losa	Barras totales	Cantidad en Quintales
1	88,56	883,18	147,20	97	87,30	970,48	161,75	1940,96	323,49	95,71
2	52,85	522,31	87,05	25	22,50	544,81	90,80	1089,61	181,60	53,73
3	49,76	497,46	82,91	25	22,50	519,96	86,66	1039,92	173,32	51,28
4	50,99	505,58	84,26	24	21,60	527,18	87,86	1054,36	175,73	51,99
5	52,68	522,60	87,10	23	20,70	543,30	90,55	1086,60	181,10	53,58
6	53,81	533,54	88,92	39	35,10	568,64	94,77	1137,27	189,55	56,08
7	59,51	591,69	98,62	46	41,40	633,09	105,52	1266,18	211,03	62,44
8	66,05	660,15	110,03	50	45,00	705,15	117,53	1410,30	235,05	69,54
9	61,36	609,27	101,55	46	41,40	650,67	108,45	1301,34	216,89	64,17
TOTAL	535,56	5 325,77	887,63	375	337,50	5 663,27	943,88	11 326,55	1 887,76	558,51

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resumen de acero para anclaje de la nueva losa del canal de desfogue**

CALCULO DE ACERO DE ANCLAJE				
Losa	Número de Anclajes	Acero para anclajes	Cantidad de Varillas	Cantidad en Quintales
1	115	132,57	22,10	9,02
2	72	83,00	13,83	5,65
3	69	79,54	13,26	5,41
4	60	69,17	11,53	4,71
5	65	74,93	12,49	5,10
6	70	80,70	13,45	5,49
7	74	85,31	14,22	5,80
8	75	86,46	14,41	5,88
9	75	86,46	14,41	5,88
TOTAL	675	778,14	129,69	52,93

Fuente: elaboración propia.

La determinación del número de anclajes y cantidad de acero para los mismos se realiza de la misma manera que el acero longitudinal. Para la losa No. 9 los anclajes a colocar se determinan a partir de:

$$\#_{anclajes_x} = \frac{4,46 - 2 * 0,08}{0,90} = 4,77 \approx 5$$

$$\#_{anclajes_y} = \frac{13,75 - 2 * 0,08}{0,90} = 15,01 \approx 15$$

$$\#_{anclajes_{totales}} = 5 * 15 = 75$$

Entonces, el total de anclajes son $5 * 15 = 75$ anclajes en toda la losa. Los bastones poseen una longitud de anclaje igual a la longitud de desarrollo de la

barra más el doble del gancho lo que equivale a $1,00 m + 8\phi_{barra} = 1,00 + 0,15 = 1,15 m$ es decir 1,00 m. La cantidad de acero total para los bastones $1,1528 * 75 = 86,46 m$, trasladado a barras de acero 14,41. El cálculo del acero de anclaje se detalla en la tabla XXIV

8.2.3. Cuantificación de materiales para obras complementarias.

La cuantificación de los materiales se realizará con las disposiciones constructivas establecidas en la planta y perfil que se muestran en las figuras 37 y 33 respectivamente, asumiendo el detalle de anclaje que se muestra en la figura 34. Como estructuras complementarias se incluye el relleno de concreto bajo la nueva losa del canal de desfogue y el muro de anclaje, para verificar la ubicación de estas estructuras puede referirse al isométrico que se muestra en la figura 36.

8.2.3.1. Relleno de concreto bajo nuevo canal de desfogue

EL relleno de concreto que estará bajo el nuevo canal de desfogue posee un volumen de $218,921 m^3$ y será de una resistencia de 4 000 psi. Se deberá colocar cinco camas de acero No. 4 (1/2") colocada a 0,20 m; además se anclará a la estructura del canal existente con bastones No. 6 colocadas a 1,00 m, y una profundidad de anclaje de 0,60 m. (Ver planos en anexos). La perforación para los anclajes será de 0,04 m de diámetro y una profundidad de 0,60 m, deberá fijarse con mortero expansivo.

Tabla XXV. **Acero para el relleno de concreto bajo nuevo canal de desfogue**

Cama	Cantidad de acero (m)	Cantidad de Varillas	Cantidad en Quintales
Cama 1	2 048,17	341,36	100,99
Cama 2	1 702,94	283,82	83,97
Cama 3	1 373,17	228,86	67,71
Cama 4	1 033,42	172,24	50,96
Cama 5	824,99	137,50	40,68
Total	6 982,69	1 163,78	344,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Acero para anclajes del relleno de concreto bajo nuevo canal de desfogue**

No.	Longitud	Cantidad	Cantidad de acero (m)	Cantidad de varillas	Cantidad en Quintales
1	1,352	14	18,93	3,15	0,93
2	1,653	13	21,49	3,58	1,06
3	2,138	13	27,79	4,63	1,37
4	2,294	13	29,82	4,97	1,47
5	1,442	12	17,30	2,88	0,85
6	0,914	14	12,80	2,13	0,63
7	1,876	14	26,26	4,38	1,30
8	1,09	14	15,26	2,54	0,75
9	2,092	13	27,20	4,53	1,34
10	2,428	13	31,56	5,26	1,56
11	1,614	14	22,60	3,77	1,11
12	1,88	13	24,44	4,07	1,21
13	1,04	12	12,48	2,08	0,62
14	1,242	12	14,90	2,48	0,73
15	0,775	12	9,30	1,55	0,46
16	1,343	12	16,12	2,69	0,79
17	0,918	12	11,02	1,84	0,54
18	1,143	12	13,72	2,29	0,68
Totales		232	352,99	58,83	17,41

Fuente: elaboración propia.

8.2.3.2. Muro de concreto para anclaje final de la solera del canal de desfogue

El muro contempla una sección transversal tipo L dispuesto en el contorno de la última losa de la solera del canal de desfogue, área transversal de 2,22 m² y una longitud de 21,75 m. La parte interna del muro deberá rellenarse con concreto ciclópeo. En la parte superior del relleno, como base para la nueva solera del canal, se fundirá una capa de concreto armado de 0,40 m de espesor con resistencia de 3 000 psi. Se colocarán dos camas de barras No. 6 (3/4") a cada 0,20 en ambos sentidos.

El muro contempla un refuerzo vertical de 3 parrillas No. 6 (3/4") a 0,20 m, estribos y eslabones No. 3 (3/8") a cada 0,20 m. A continuación, se presenta el resumen de los materiales necesarios para la construcción de dicho muro (Ver planos de detalles en anexos).

Tabla XXVII. Volúmenes de concreto para muro de anclaje

Elemento	Volumen de concreto
Concreto de base de solera	27,03 m ³
Concreto para muro de anclaje	48,86 m ³
Concreto ciclópeo	118,56 m ³

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Acero de refuerzo para la base de la solera del canal

No de armados	Cantidad de acero (m)	Cantidad de varillas	Cantidad en Quintales
178	1 217,45	202,91	60,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Acero de refuerzo de muro para anclaje**

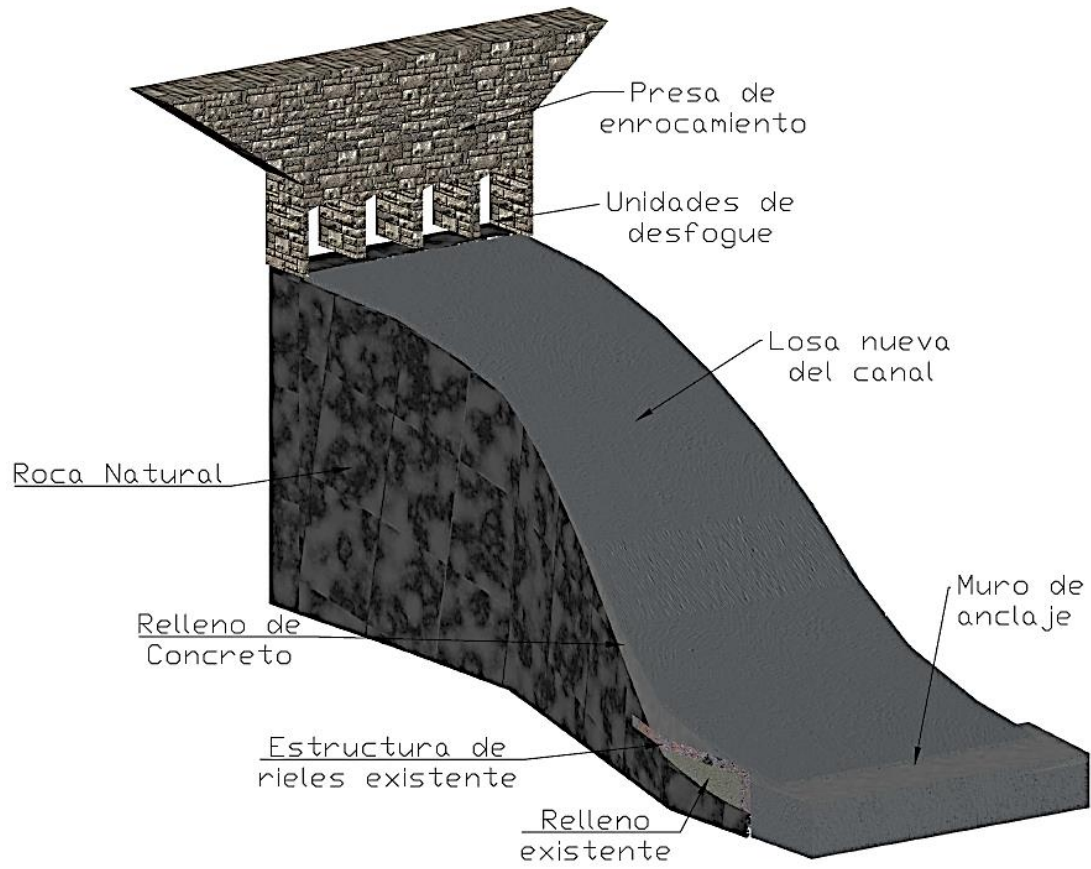
Elemento	Cantidad	Longitud (m)	Cantidad de acero (m)	Cantidad de varillas	Cantidad en Quintales
Acero No. 6 (3/4")					
Parrilla vertical (longitudinal externa)	63	3,53	222,39	37,07	10,97
Parrilla vertical (longitudinal media)	63	2,54	161,32	26,89	7,95
Parrilla vertical (longitudinal interna)	63	2,69	169,28	28,21	8,35
Parrilla vertical (lateral externa)	38	variada	98,84	16,47	4,87
Parrilla vertical (lateral media)	38	variada	62,02	10,34	3,06
Parrilla vertical (lateral interna)	38	variada	66,81	11,13	3,29
Totales			780,65	130,11	38,49
Acero No. 3 (3/8")					
Estribos	11	41,34	454,74	75,79	5,70
Eslabones	12	19,95	239,40	39,90	3,00
Totales			694,14	115,69	8,70

Fuente: elaboración propia.

8.3. Propuesta del nuevo canal de desfogue para la hidroeléctrica Santa María

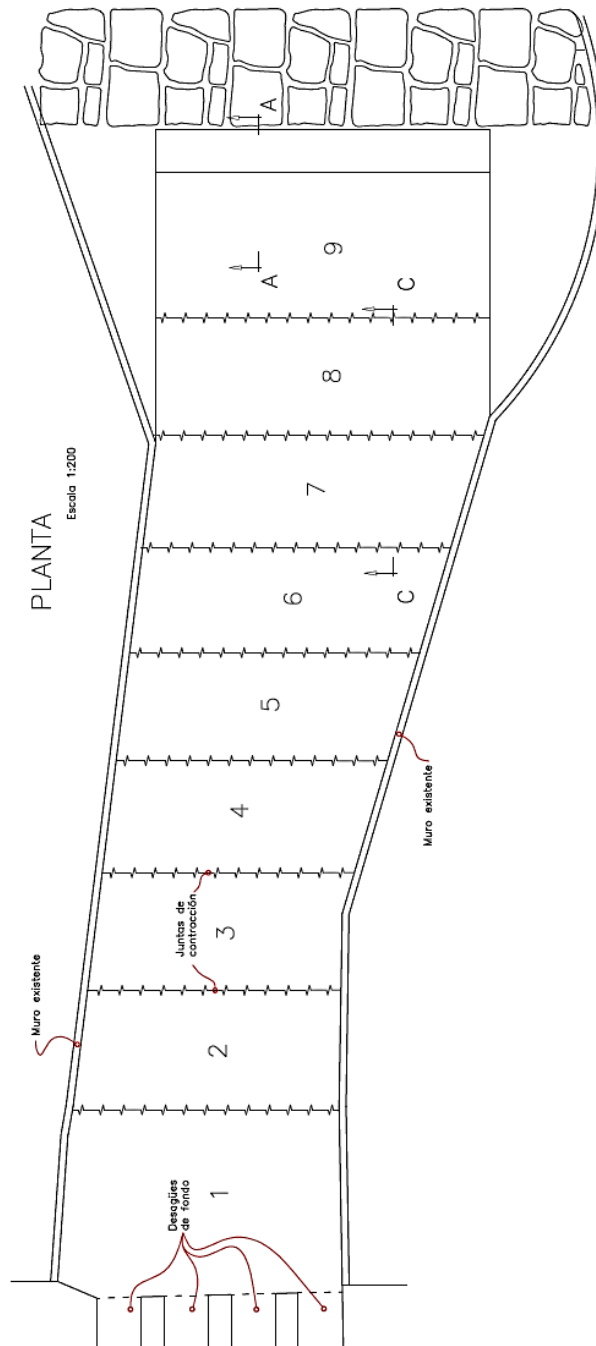
A continuación, se presenta una serie de gráficos con las características principales de la estructura propuesta para reparar el canal de desfogue. Es importante resaltar que la pendiente del canal se ha suavizado y se ha dispuesto un amortiguamiento al caudal con la concavidad que de la losa. Los planos constructivos pueden verificarse en los Anexos.

Figura 36. Isométrico de la propuesta del canal de desfogue



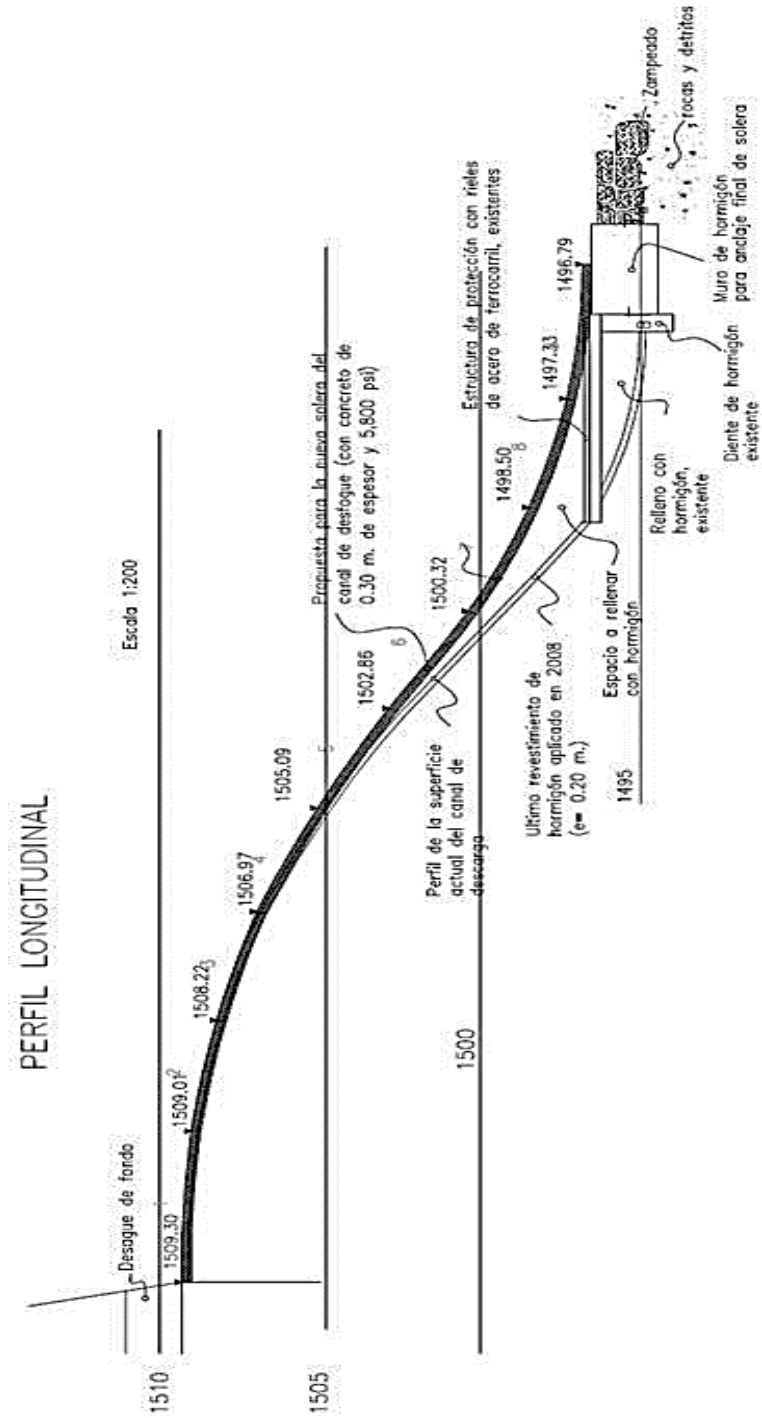
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 37. **Planta de la propuesta del canal de desfogue**



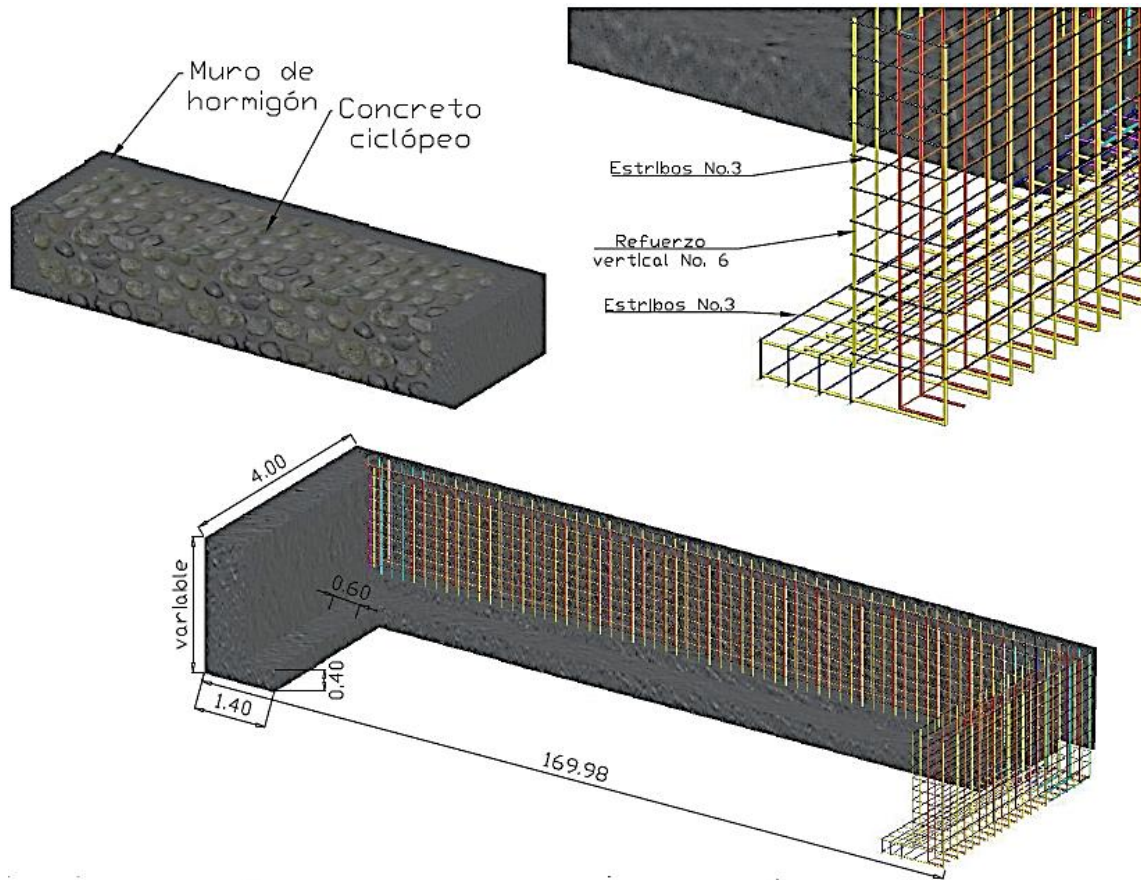
Fuente: Planos del Proyecto "Propuesta para Modificación del Perfil y Reforzamiento del Canal de Desfogue", División de Ingeniería, INDE, 2016.

Figura 38. Perfil de la propuesta del canal de desfogue



Fuente: Planos del Proyecto "Propuesta para Modificación del Perfil y Reforzamiento del Canal de Desfogue", División de Ingeniería, INDE, 2016.

Figura 39. Armado de muro de anclaje



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

CONCLUSIONES

1. Las estructuras que conforman la presa han sufrido diferentes daños provocados por la erosión y socavación derivados de fenómenos hidrológicos. Entre los principales están la tormenta tropical Agatha (2010) que registró los caudales máximos en décadas, y otros como la tormenta tropical Stan (2005) y la depresión tropical 12E (2011). Ante estos fenómenos, la hidroeléctrica Santa María ha sido profundamente afectada. El INDE posee registros de modificaciones estructurales en la presa y el canal de desfogue. Actualmente, la única modificación que se conserva es la prolongación del canal de desfogue, como medida de protección del pie de la presa, ya que ha sido la única que no ha sido afectada de manera significativa por fenómenos naturales.
2. El régimen hidrológico de la cuenca es muy variable y propenso a ser afectado por fenómenos naturales. Además, la composición química del agua del río Samalá posee características corrosivas y algunos elementos que son nocivos para las estructuras de concreto, como los sulfatos y los cloruros.
3. Los factores geológicos de mayor importancia son el arrastre de los materiales con alta capacidad erosiva, el aporte de sedimentos finos y abrasivos, y arenas volcánicas altas en contenido de sílice.
4. Estructuralmente la principal limitación en los vertederos es su limitada capacidad para derivar grandes caudales y proveer un régimen laminar al caudal derivado hacia el canal de desfogue. Sin embargo,

estructuralmente se encuentra deteriorado por procesos erosivos y su diseño geométrico actual presenta una pendiente muy pronunciada. Este conjunto de factores comprometen la seguridad del pie de la presa.

5. Las grietas de la roca deberán tratarse con un material epóxico especial. Este debe poseer alta fluidez para su inyección y características de resistencia para que no se vea comprometido por los agentes químicos del caudal derivado. Además, debe evidencia alta resistencia mecánica, adherencia en superficies humeas, baja viscosidad, y permitir un rango de contracción regida por los desplazamientos a los que se somete la presa.

6. El diseño de mezcla para la losa principal posee una resistencia de 5 800 PSI con características de alta resistencia a la abrasión, con una proporción volumétrica de 1:1.80:2.11 y 200 lts de agua por metro cúbico de mezcla, tomando en cuenta la trabajabilidad y resistencia de la mezcla. La nueva losa necesitará aproximadamente 160,67 m³ de concreto reforzado.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una auditoría profunda del estado estructural y el desempeño de la central hidroeléctrica para evitar imprevistos que puedan afectar el correcto funcionamiento de la misma.
2. Diseñar una estructura antes de la admisión al canal auxiliar (compuerta No. 1) para captar las rocas de gran tamaño, antes de entrar en el vaso del embalse.
3. Es necesario realizar una obra de protección en la margen derecha del río, a la altura de la compuerta No. 1 para evitar que el cauce del río socave el talud y pueda causar daños al canal auxiliar.
4. En los mantenimientos anuales, el presupuesto debería incluir recursos para contratar maquinaria pesada y, de ser posible, explosivos para fracturar las rocas cuyas dimensiones sean mayores a las compuertas de fondo.
5. Habilitar la compuerta de fondo No 4, lo cual ayudaría a que los sedimentos y roca ocupen toda el área del vertedero y evitar que únicamente una sección del mismo se deteriore.
6. Las fundiciones las deben realizar por una empresa de suministro de concreto premezclado, la cual debe garantizar el suministro continuo del concreto así como la calidad contratada y deberá realizar los ensayos de laboratorio requeridos.

7. Realizar un estudio de la parte aguas debajo de la presa para construir un cuenco amortiguador para evitar la socavación de la parte final del canal de desfogue.
8. Implementar sistemas de monitoreo de presas, para control de juntas, fracturas, inclinación, infiltración etc.
9. Realizar un estudio profundo que evalúe las características que se requieren para implementar un vertedero que aumente la capacidad hidráulica de la presa actual, para evitar que caudales máximos puedan ocasionar daños.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALFONSO CHEN, Luis Carlos. *Repotenciación en línea de transmisión Esperanza, Huehuetenango a 138 KV*. 2009. 209 p.
2. ARTHUR H, Nilson. *Diseño de estructuras de concreto*. 12 va. ed. Colombia: McGraw Hill, 2001. 713 p.
3. BARILLAS CRUZ, Manolo., et al. *Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del Río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu, Guatemala. Retalhuleu, Guatemala: GEOS*. 2003. 52 p.
4. BREA, José Daniel. *Procesos de erosión, sedimentación en cauces y cuencas*. 2010. 144 p.
5. CAHUEX COTÍ, Alfredo Antonio. *Evaluación de caudales de crecida en la cuenca del río samalá: modelos lluvia-escorrentía, con fines de evaluación de amenazas de origen hidrometeorológico*. 2005. 78 p.
6. CALDERÓN MOLINA, José. *Breve historia económica de Guatemala del siglo XX*. 2011. 1-12 p.
7. CAÑABATE SANTOS, Manuel. *Reparación de los parámetros de aguas arriba de las presas de Graus-Torán y Tavesacán*. 2009. 6 p.

8. CHUC YAXÓN, Leandor Felipe. *Propuesta para el mejoramiento de las protecciones de los generadores de la hidroeléctrica Santa María de Jesús, implementando relevadores digitales multifunción*. 2005. 125 p.
9. Comisión Regional de Interconexión Eléctrica, CRIE. *Reglamento del mercado eléctrico regional*. 2005. 361 p.
10. Comité ACI 201 de la Durabilidad del Hormigón [en línea] <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_201_2R_01.pdf> *Guía para la Durabilidad del Hormigón* [Consulta: 06 de octubre de 2015].
11. ESTRADA HURTARTE, Estuardo Adolfo. *Manual de cuantificación de materiales para urbanizaciones y edificaciones*. 1990. 120 p.
12. GUZMÁN SÁNCHEZ, Gabriela. *Evaluación de la precipitación obtenida a partir de productos satelitales para la cuenca del río Samalá, diagnóstico de las estaciones hidrométricas, hidrometeoro lógicas y meteorológicas, de la cuenca de alta del río Samalá, y servicios prestados, Guatemala, C.A. (2014)*.
13. HUANCA, Samuel. *Diseño de mezclas de concreto*. 2006. 200 p.
14. Instituto Nacional de Electricidad, INDE. *Evaluación de la seguridad y concepto de reparación, proyecto hidroeléctrico Santa María*. 2006. 25 p.
15. _____ . *Santa María Hidroeléctrica*. 2012. 13 p.

16. _____ . Plan de preparación ante emergencias PPE, presa Santa María. 2012. 52 p
17. _____ . Estudio y diseño para reparación del vertedero de la Hidroeléctrica Santa María. 2013. 43 p.
18. _____ . Proyecto final, definición de alcances de los trabajos que posibiliten efectuar las reparaciones por desgaste en los vertederos, en cavernas, lecho de río y otras estructuras de la Hidroeléctrica Santa María. 2013. 150 p.
19. _____ . Publicación Revista Electricidad: Inauguración Subestación Sayaxché. 2014. 31 p.
20. _____ . Publicación Revista Electricidad: El recuento de los daños. 2014. 13 p.
21. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, MARN. *Diagnóstico ambiental para la planta de generación Santa María de Jesús, Zunil, Quetzaltenango, Guatemala*. 2013. 287 p.
22. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía, Departamento de Energías Renovables. *Recursos Geotérmicos de Guatemala*. 2015. 74 p.
23. MORATAYA CÓRDOVA, Carlos Eduardo. *Concreto de alta resistencia, experimentación en Guatemala*. 2005. 111 p.

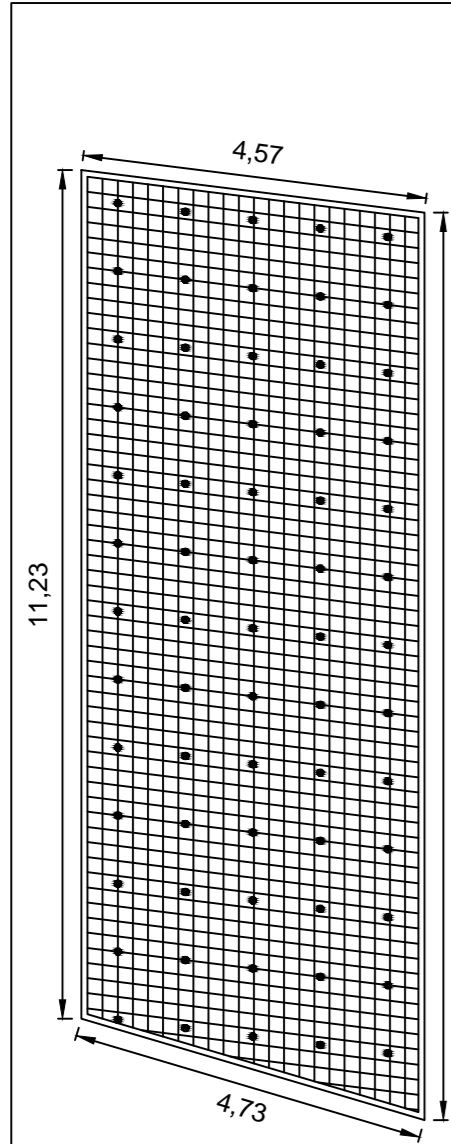
24. Municipalidad de Quetzaltenango. [en línea]
<<http://www.muniquetzaltenango.com/newsite/historia/>> [Consulta:
6 de octubre de 2015]

25. Turixelaumg.blogspot.com. Jeffrey Gómez. 15 de octubre de 2015.
<<http://turixelaumg.blogspot.com/2015/10/historia.html>>

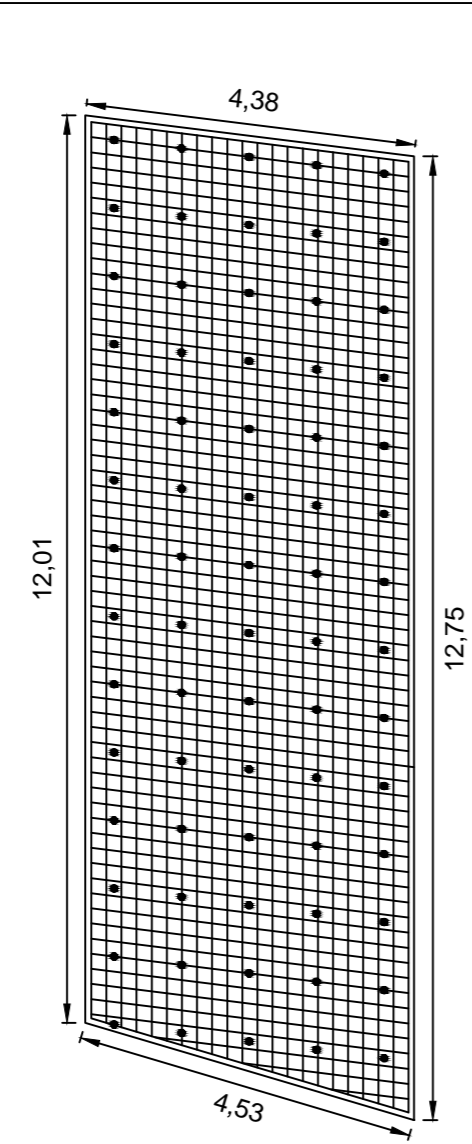
APÉNDICE

Apéndice 1 **Plano para el armado de losa del nuevo canal de desfogue.**

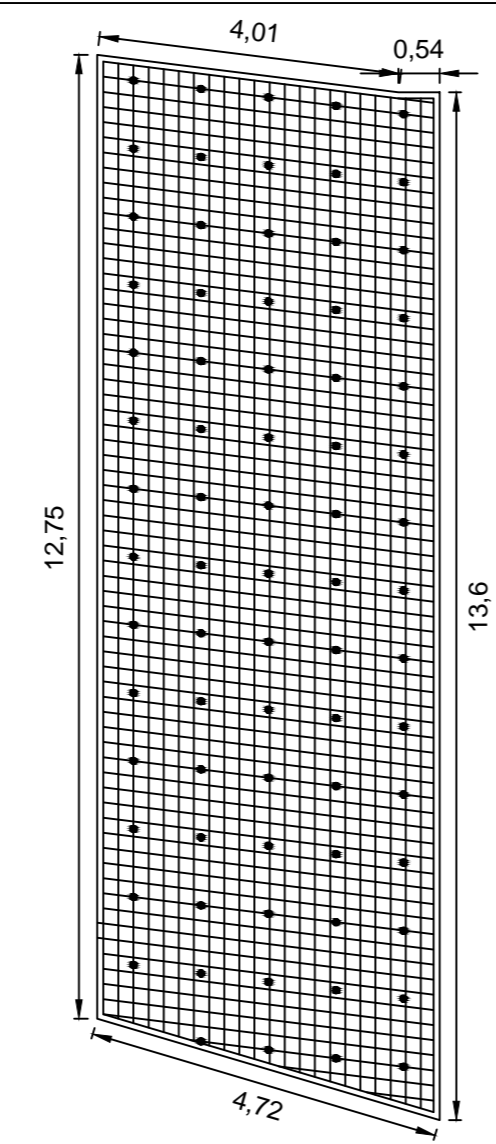
Fuente: elaboración propia.



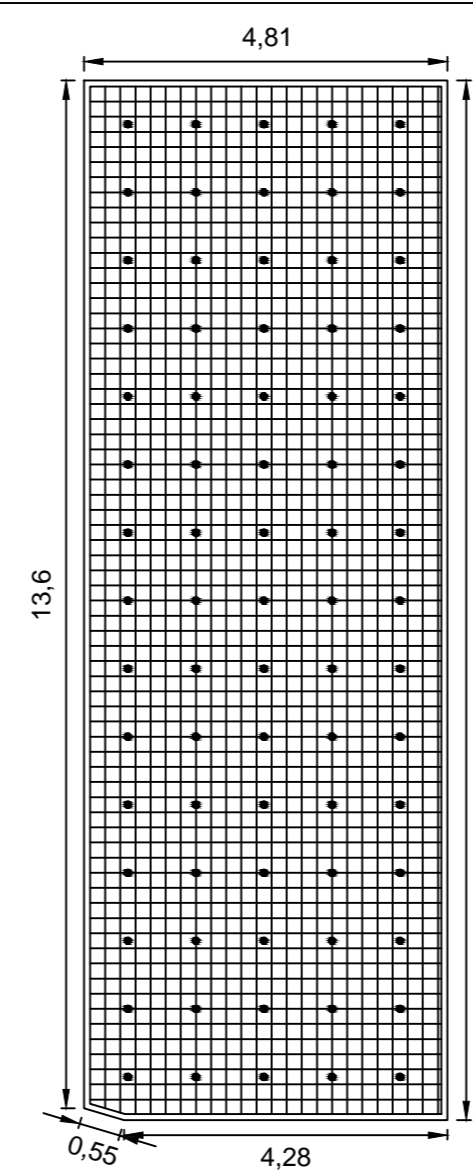
Losa No. 5
Área = 52.68 m²



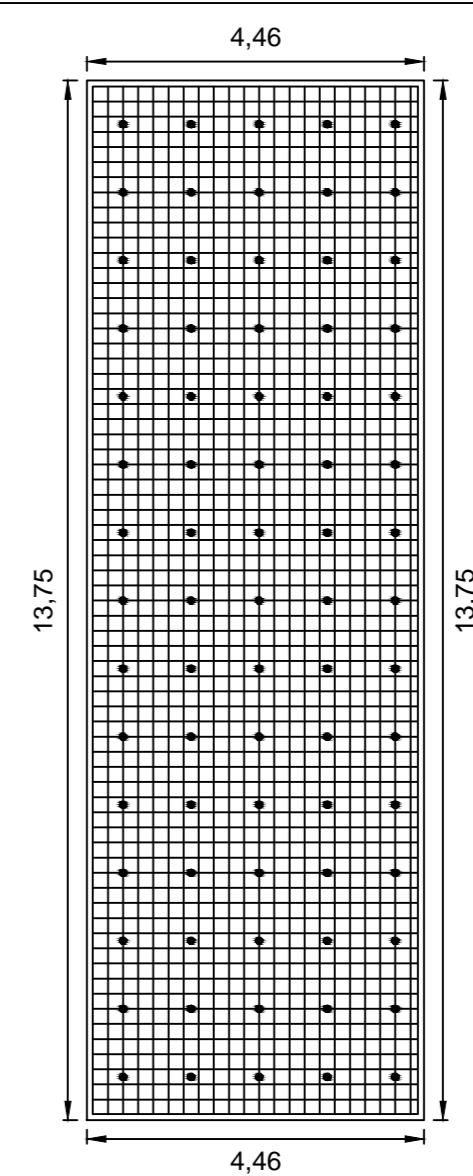
Losa No. 6
Área = 53.67 m²



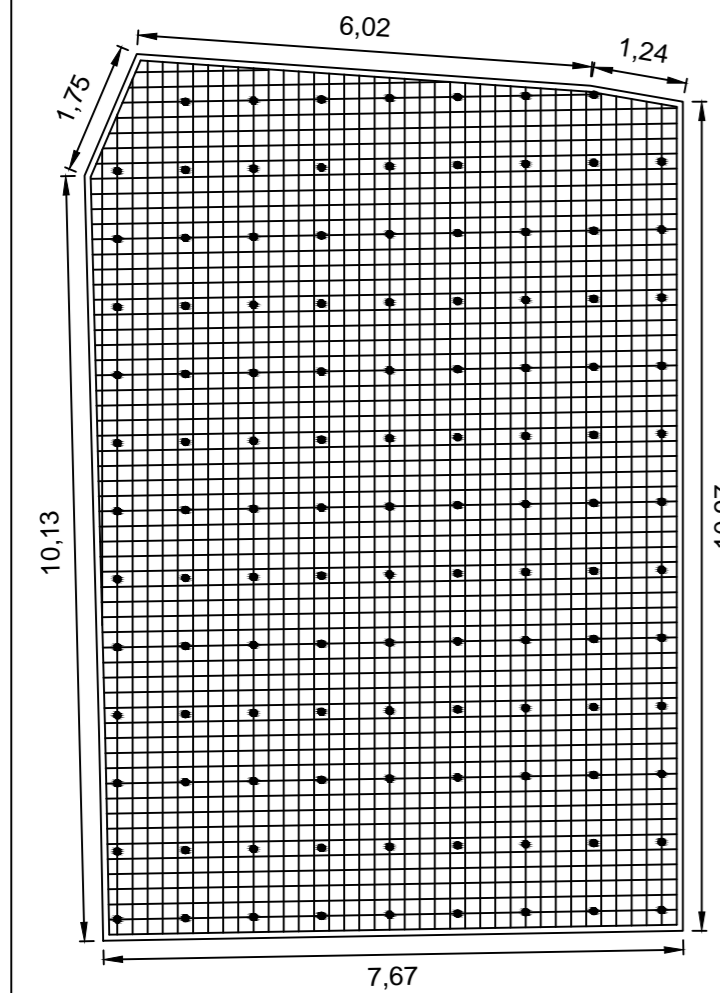
Losa No. 7
Área = 59.51 m²



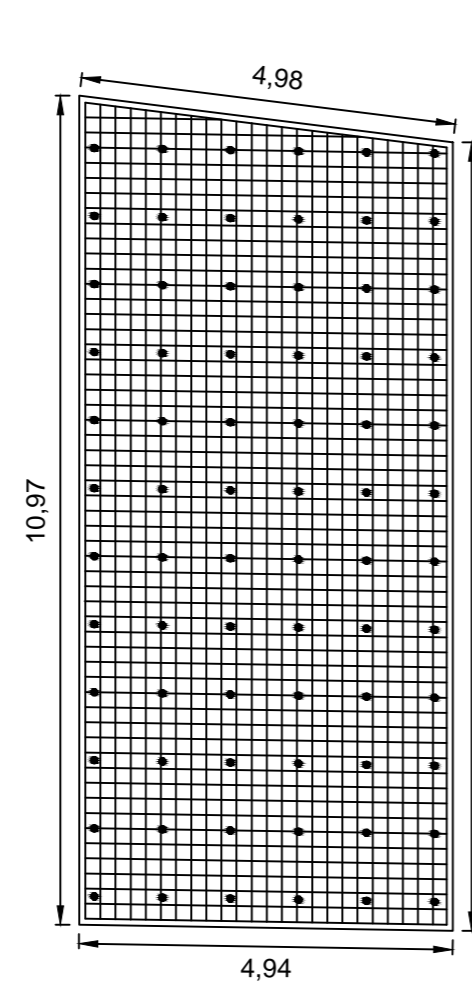
Losa No. 8
Área = 66.05 m²



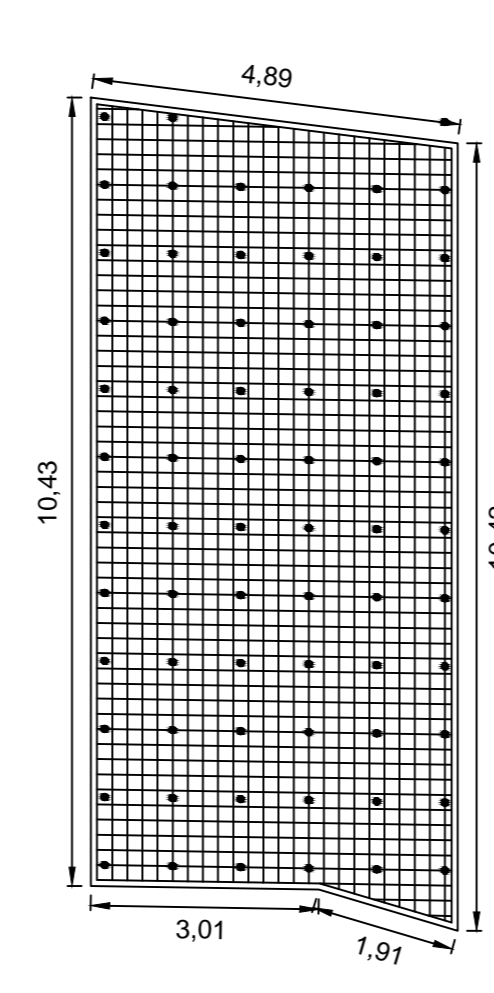
Losa No. 9
Área = 61.36 m²



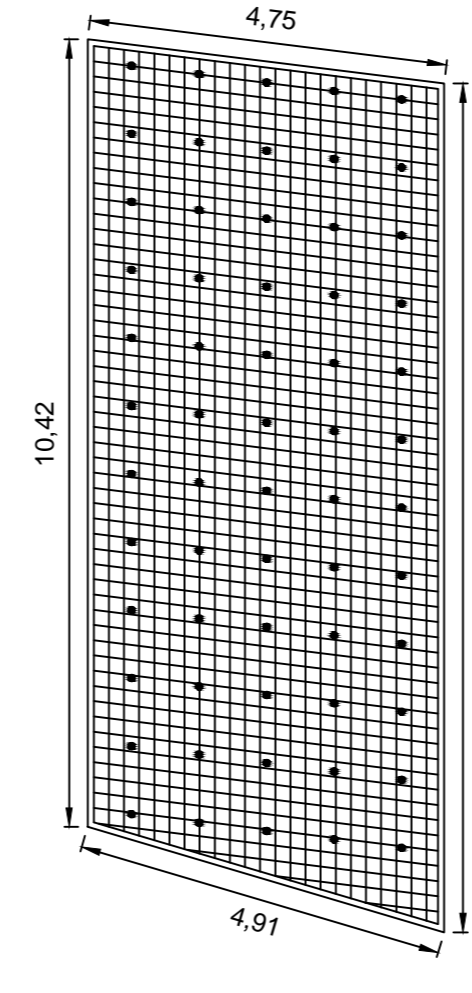
Losa No. 1
Área = 88.56 m²



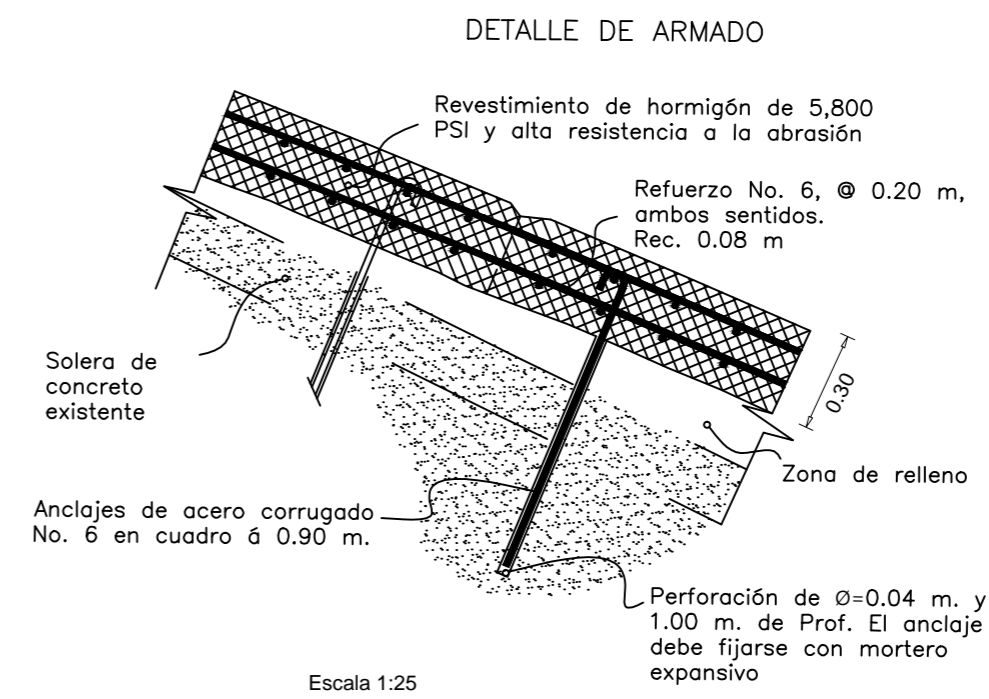
Losa No. 2
Área = 52.85 m²



Losa No. 3
Área = 49.75 m²



Losa No. 4
Área = 50.99 m²



Especificaciones de materiales:
Resistencia del concreto: 5,800 PSI
Acero: Corrugado G60

Especificaciones de armado:
Espesor de losa: 0.30 m
Recubrimiento: 0.08 m
Acero de refuerzo: barras No.6 @ 0.20 m, traslape de 1.00 m
Anclajes: bastones No.6 @ 0.90 m

Numero de anclajes en el canal de desfogue

Losa	No. de anclajes
1	115
2	72
3	69
4	60
5	65
6	70
7	74
8	75
9	75
TOTAL	675

PROPUESTA PARA LA REPARACIÓN DEL CANAL DE DESFOGUE DE LA HIDROELECTRICA SANTA MARÍA

Plano: Armado de losa del nuevo canal de desfogue
Aprobó: Ing. Abdel Vásquez Domínguez
Elaboró: Alan Vásquez Dardón
Fecha: octubre de 2016
Escala: 1:100

1
1

ANEXOS

Anexo 1 **Requerimientos aproximados de agua de mezclado y de contenido de aire para diferentes valores de asentamiento y tamaños máximos de agregados**

ASENTAMIENTO O SLUMP (mm)		Agua en lt/m^3 de concreto para los tamaños máximos de agregados gruesos y consistencia indicados.							
		10mm (3/8")	12.5mm (1/2")	20mm (3/4")	25mm (1")	40mm (1½")	50mm (2")	70mm (3")	150mm (6")
CONCRETOS SIN AIRE INCORPORADO									
30 a 50	(1" a 2")	205	200	185	180	160	155	145	125
80 a 100	(3" a 4")	225	215	200	195	175	170	160	140
150 a 180	(6" a 7")	240	230	210	205	185	180	170	—
Cantidad aproximada de aire atrapado (%).		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
CONCRETOS CON AIRE INCORPORADO									
30 a 50	(1" a 2")	180	175	165	160	145	140	135	120
80 a 100	(3" a 4")	200	190	180	175	160	155	150	135
150 a 180	(6" a 7")	215	205	190	185	170	165	160	—
Contenido total de aire incorporado (%), en función del grado de exposición.	Exposición suave	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5*	1.0*
	Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5*	3.0*
	Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5*	4.0*

Los valores del asentamiento para concreto con agregado más grande que 40mm (1½") se basan en las pruebas de Slump hechas después de retirar las partículas mayores de 40mm (1½") por tamizado húmedo.

Estos contenidos de agua de mezclado son valores máximos para agregado grueso angular y ien formado, y cuya granulometría está dentro de las especificaciones aceptadas (ASTM C 33 o ITINTEC 400.037).

* Para concreto que contiene agregado grande será tamizado húmedo por una malla de 40mm (1½") antes de evaluar el contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en material más pequeño que 40mm (1½") debe ser el tabulado en la columna de 40mm (1½"). Sin embargo, los cálculos iniciales de las proporciones deben basarse en el contenido de aire como un porcentaje de la mezcla completa.

** Estos valores se basan en el criterio de que se necesita un 9% del contenido de aire en la fase de mortero del concreto.

Fuente: HUANCA, Samuel. Diseño de mezclas de concreto. p.8.

Anexo 2 **Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto**

RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (f'cr) (kg/cm2)*	RELACION AGUA/CEMENTO DE DISEÑO EN PESO	
	CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO	CONCRETO CON AIRE INCORPORADO
450	0.38	---
400	0.43	---
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

* Los valores corresponden a resistencias promedio estimadas para concretos que no contengan más del porcentaje de aire mostrado en la tabla 5.1. Para una relación agua/cemento constante, la resistencia del concreto se reduce conforme aumenta el contenido de aire.

Fuente: HUANCA, Samuel. Diseño de mezclas de concreto. p.10.

Anexo 3 **Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto**

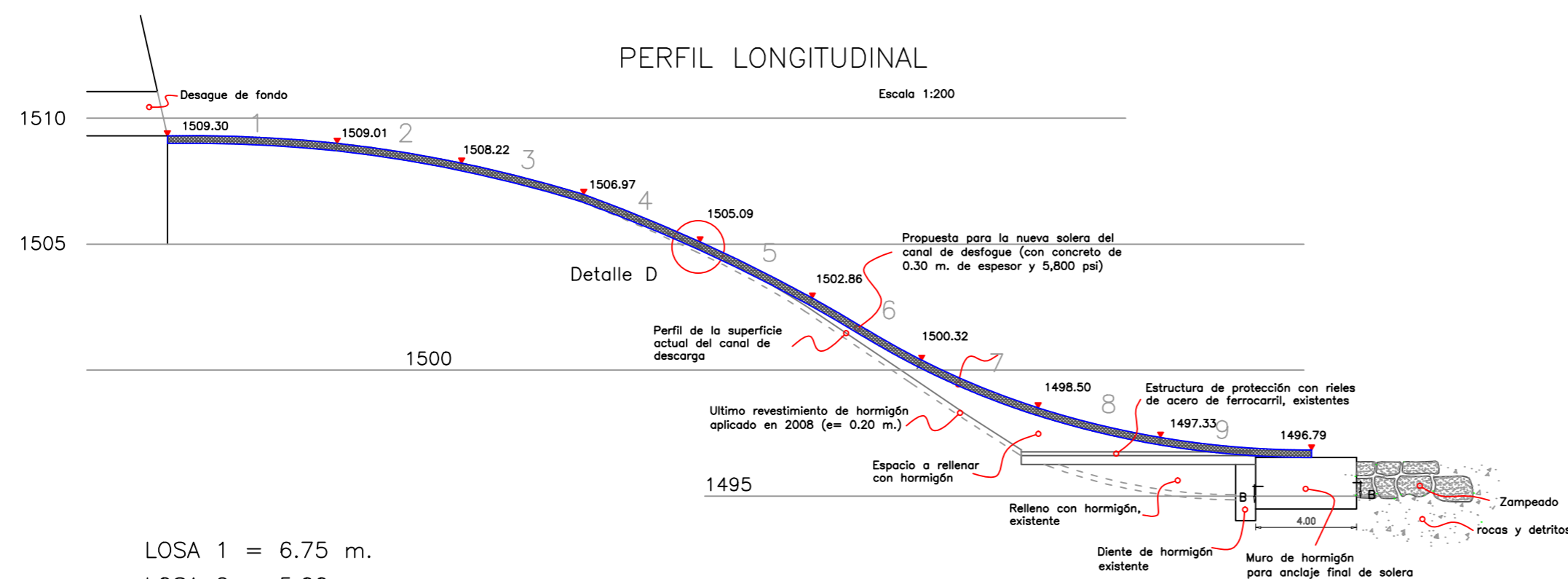
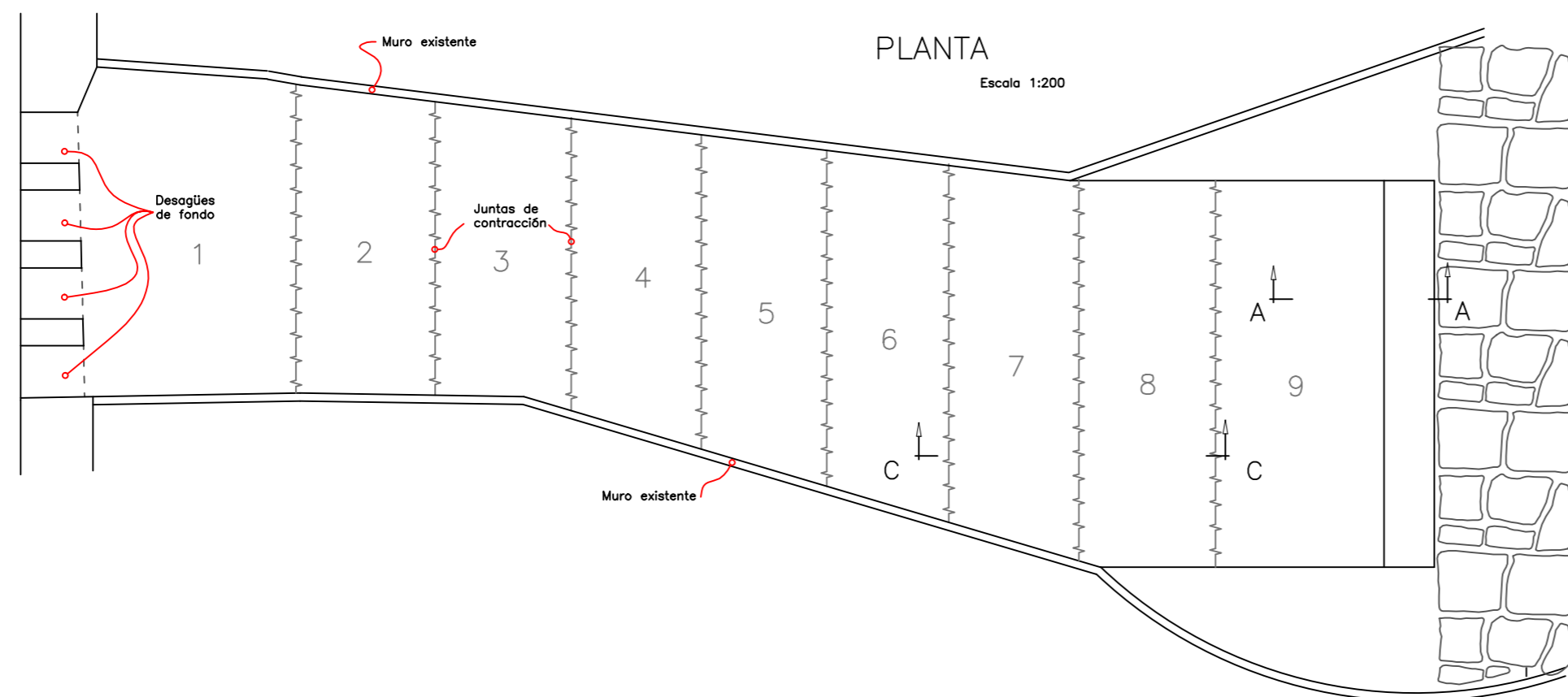
CONDICIONES DE EXPOSICION	RELACIÓN AGUA/CEMENTO MÁXIMA.
Concreto de baja permeabilidad:	
a) Expuesto a agua dulce.	0.50
b) Expuesto a agua de mar o aguas salobres.	0.45
c) Expuesto a la acción de aguas cloacales. (*)	0.45
Concreto expuesto a procesos de congelación y deshielo en condición húmeda:	
a) Sardineles, cunetas, secciones delgadas.	0.45
b) Otros elementos.	0.50
Protección contra la corrosión de concreto expuesto a la acción de agua de mar, aguas salobres, neblina o rocío de esta agua.	0.40
Si el recubrimiento mínimo se incrementa en 15 mm.	0.45

(*) La resistencia f'c no deberá ser menor de 245 kg/cm2 por razones de durabilidad.

Fuente: Huanca, Samuel. Diseño de mezclas de concreto. p.10

Anexo 4 **Instituto Nacional de Electrificación, propuesta para modificación del perfil y reforzamiento del canal de desfogue.**

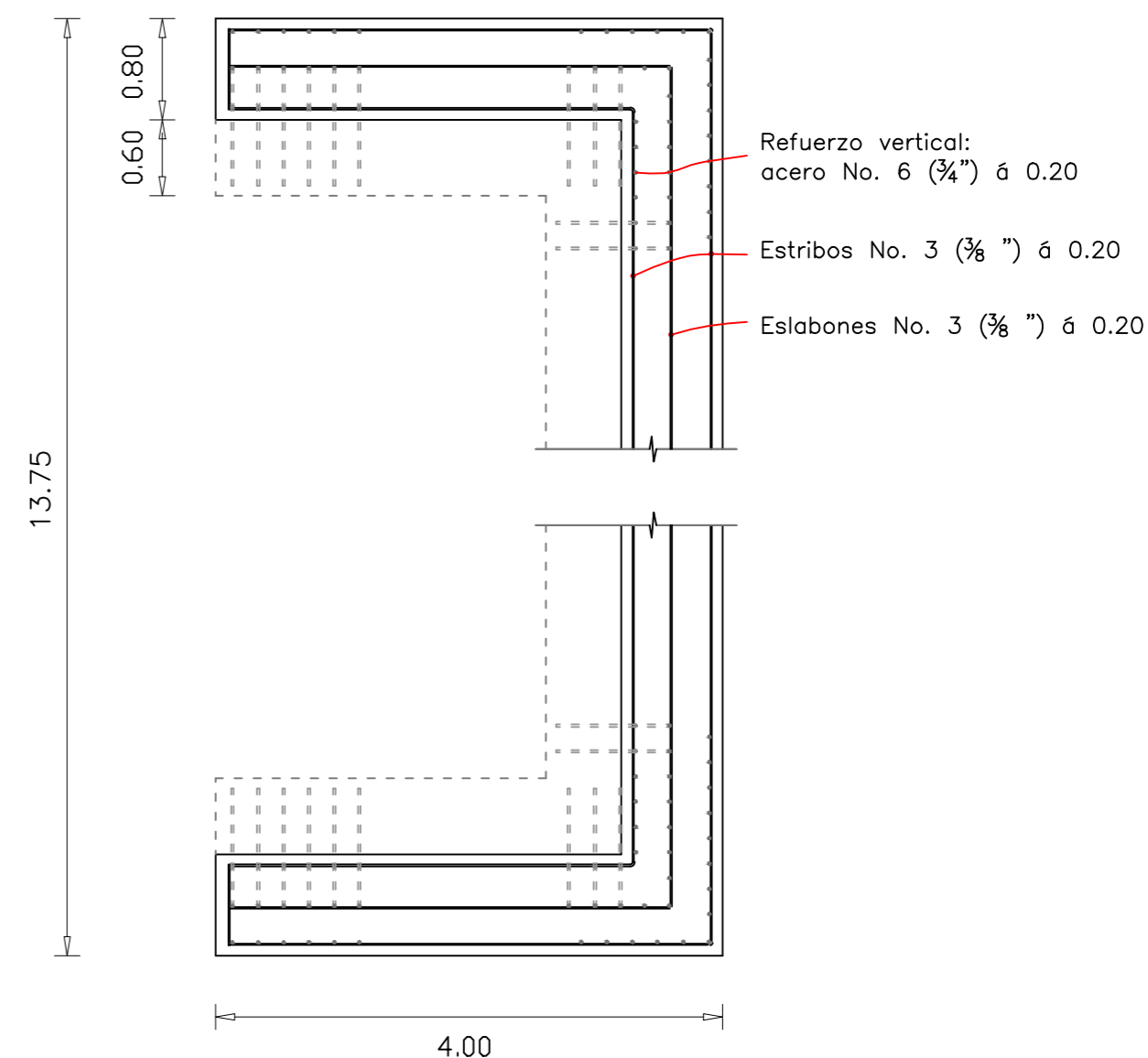
Fuente: Instituto Nacional de Electrificación INDE



- LOSA 1 = 6.75 m.
- LOSA 2 = 5.00 m.
- LOSA 3 = 5.00 m.
- LOSA 4 = 5.00 m.
- LOSA 5 = 5.00 m.
- LOSA 6 = 5.00 m.
- LOSA 7 = 5.00 m.
- LOSA 8 = 5.00 m.
- LOSA 9 = 6.00 m.

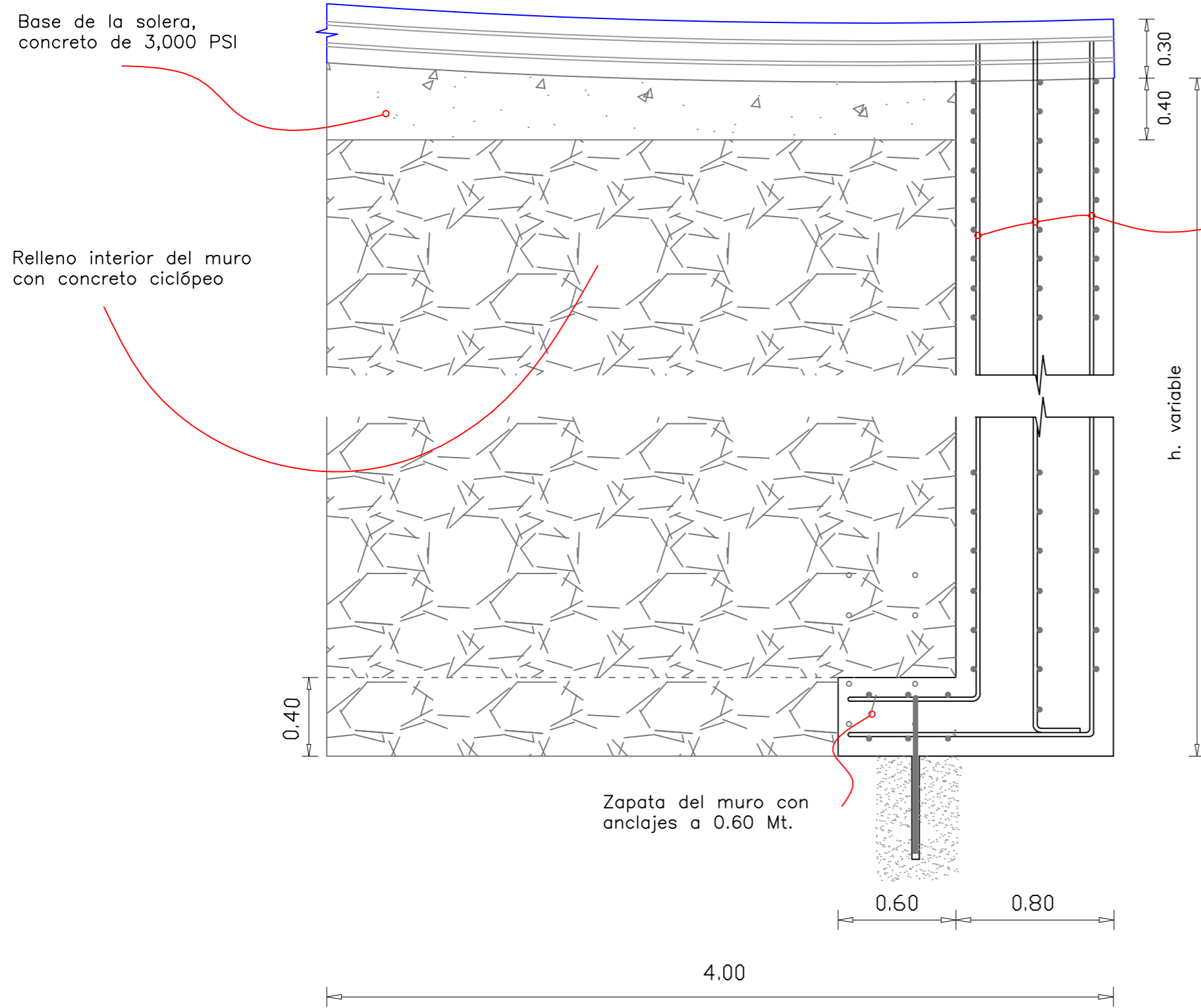
Distancias reales en la superficie de las losas:

CORTE B-B
Escala 1:50

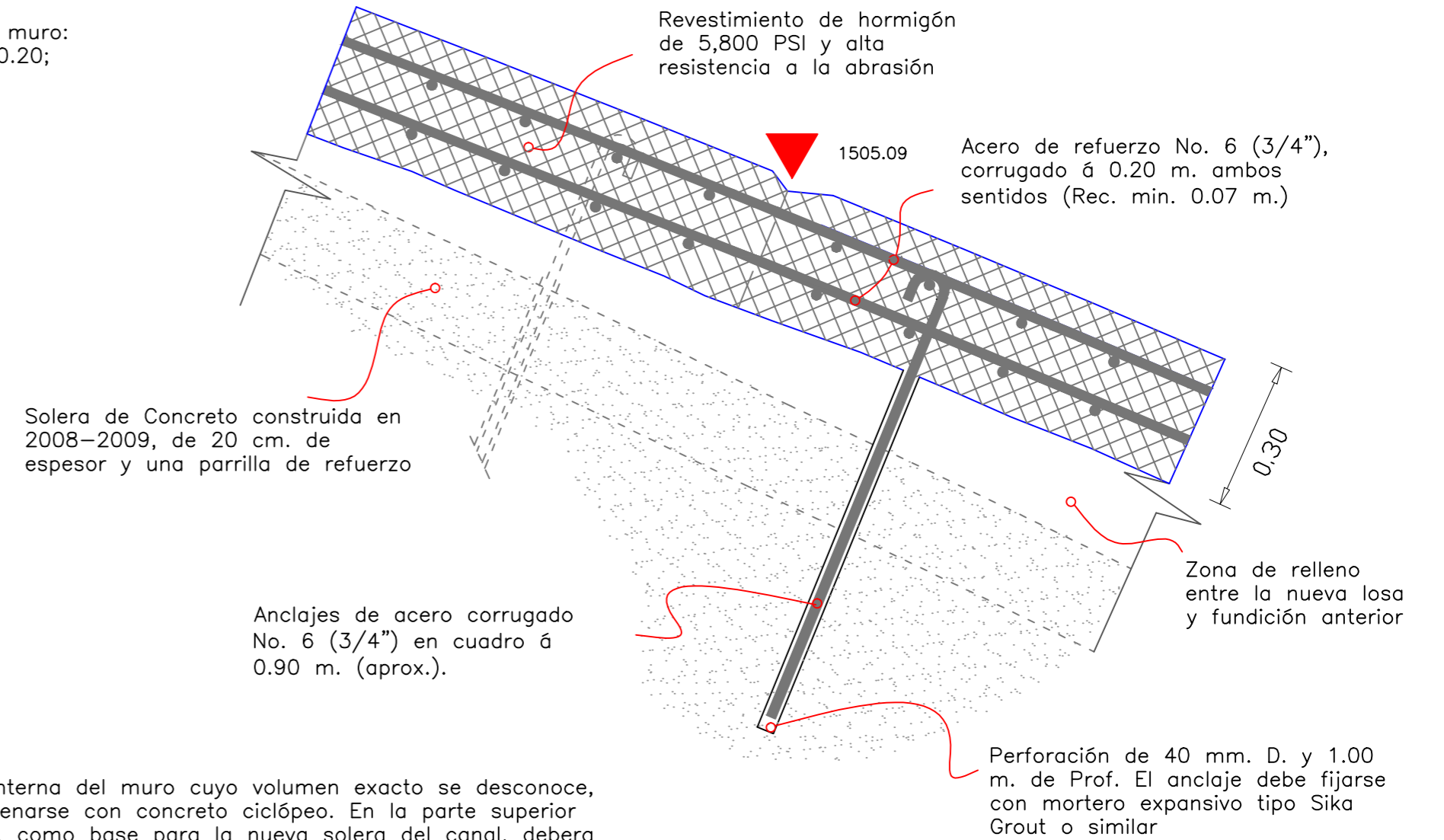


INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION				
EMPRESA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA				
E. G. E. E.				
DIVISION DE INGENIERIA				
HIDROELECTRICA SANTA MARIA				
PROPUESTA PARA MODIFICACION DEL PERFIL Y REFORZAMIENTO DEL CANAL DE DESFOGUE				
Diseño	DPJ	Dibujo	DPJ	Aprobó
Nombre	DPJ	Ing. A. V.	Indicados	
Fecha	Mayo 2016			
Fuente				

CORTE A-A
Escala 1:25



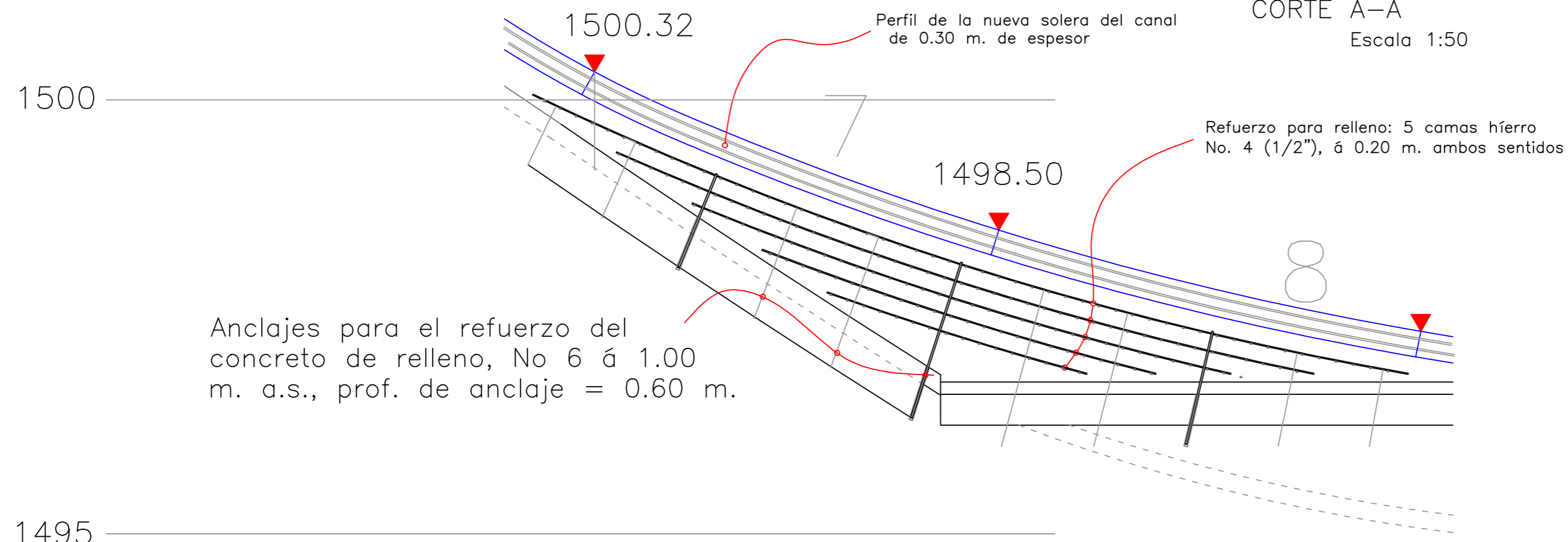
DETALLE D
Escala 1:12.5



NOTA:

La parte interna del muro cuyo volumen exacto se desconoce, deberá rellenarse con concreto ciclópeo. En la parte superior del relleno, como base para la nueva solera del canal, deberá fundirse una capa de concreto armado de 0.40 m. de espesor con resistencia de 3,000 PSI.

CORTE A-A
Escala 1:50



La perforación para los anclajes debe ser de de 40 mm. D. y 0.60 m. de Prof. El anclaje debe fijarse con mortero expansivo tipo Sika Grout o similar

INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION
EMPRESA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA
E. G. E. E.

DIVISION DE INGENIERIA

HIDROELECTRICA SANTA MARIA
PROPUESTA PARA MODIFICACION DEL PERFIL
Y REFORZAMIENTO DEL CANAL DE DESFOGUE

Nombre	Diseño	Dibujó	Aprobó	Escala
DPJ	DPJ	Ing. A. V.	Indicadas	
Fecha	Mayo 2016			
Fuente				