

**PRÁCTICA EMPRESARIAL COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA  
DE OBRAS CIVILES PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO  
SOGAMOSO QUE ADELANTA LA EMPRESA ISAGEN S.A. E.S.P. ENFOCADO  
EN REALIZAR UN INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE  
INYECCIONES DE LA PRESA**

**DIEGO ARMANDO QUIROZ DUEÑES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

**PRÁCTICA EMPRESARIAL COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA  
DE OBRAS CIVILES PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO  
SOGAMOSO QUE ADELANTA LA EMPRESA ISAGEN S.A. E.S.P. ENFOCADO  
EN REALIZAR UN INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE  
INYECCIONES DE LA PRESA**

**DIEGO ARMANDO QUIROZ DUEÑES**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Directora**

**HEBENLY CELIS LEGUIZAMO**

**Ingeniera Civil, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

## **DEDICATORIA**

Este documento está dedicado de manera especial a mi madre, por darme la vida y el apoyo para sacar adelante todos mis proyectos; a toda mi familia y amigos, quienes con sus consejos y compañía me ayudaron a alcanzar este logro y a formarme como persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

A toda mi familia, en especial a mi madre, a quien pertenece este logro que hoy alcanzo, y los demás que vendrán.

Al ingeniero Rubén Ospina y a todo el equipo de profesionales de ISAGEN, por guiarme y corregirme durante la práctica profesional siempre con disposición y excelencia.

A todo el equipo de profesores y profesionales de la UIS, que diariamente forman los mejores profesionales del país.

Finalmente agradezco a Dios todopoderoso, quien me da un paraíso nuevo cada amanecer, la vida, y el amor para disfrutarla.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. LA EMPRESA Y EL PROYECTO	14
2. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA PRÁCTICA PROFESIONA	16
2.1. ANÁLISIS DE INFORMES DIARIOS RECIBIDOS POR LA INTERVENTORÍA	17
2.2. SEGUIMIENTO DEL AVANCE DE LAS OBRAS PRINCIPALES	18
2.3. REVISIÓN Y ORGANIZACIÓN DE PLANOS	20
2.4. GESTIÓN DE LA CORRESPONDENCIA PRIORITARIA DEL PROYECTO	22
2.5. ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE INYECCIONES DE LA PRESA	22
3. INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE INYECCIONES DE LA PRESA	25
3.1. PLANEACIÓN	25
3.2. DISEÑO	27
3.3. CONSTRUCCIÓN	28
3.4. RESULTADOS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS	43
4. CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFIA	51
ANEXOS	52

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. ....	15
Figura 2. Análisis de informes diarios de interventoría. ....	18
Figura 3. Recorrido por las Obras Civiles Principales. ....	19
Figura 4. Proyección de finalización de las Obras Civiles Principales. ....	20
Figura 5. Construcción Túnel de Descarga de Fondo. ....	21
Figura 6. Seguimiento gráfico Túnel de Descarga de Fondo. ....	21
Figura 7. Revisión y actualización de planos. ....	22
Figura 8. Actualización de la Hoja de Vida de los planos. ....	22
Figura 9. Zonificación del macizo. ....	27
Figura 10. Equipo de Inyección – Proyecto Sogamoso ....	30
Figura 11. Atlas Copco Diamec 262. Equipo de Perforación – Proyecto Sogamoso .....	31
Figura 12. Acopio de Cemento y bomba de distribución del material .....	32
Figura 13. Sección típica estribo derecho. ....	34
Figura 14. Secuencia de inyecciones de la Cortina Triple. ....	35
Figura 15. Orden de perforación Proyecto Sogamoso .....	35
Figura 16. Plataforma de trabajo desmontable Proyecto Sogamoso. ....	36
Figura 17. Procedimiento de inyección. ....	41
Figura 18. Nivelación de la balanza para lectura de densidad. ....	43
Figura 19. Ensayo de Cohesión. ....	43
Figura 20. Panorámica Obras Principales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso .....	44
Figura 21. Animación 3D Cortina Profunda de Inyecciones Proyecto Sogamoso .	45

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación Geomecánica de Bieniawski .....	28
Tabla 2. Valores de RMR obtenidos en las diferentes zonas del macizo .....	28
Tabla 3. Gradación de la arena.....	33
Tabla 4. Variación de la presión durante pruebas con agua .....	38
Tabla 5. Clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad (Olalla y Sopeña).....	39
Tabla 6. Composición de los diferentes tipos de Mezclas de Inyección .....	40
Tabla 7. Balance final de perforación e inyección ataguía. ....	46
Tabla 8. Balance final de perforación e inyección Cortina de Inyecciones Margen Izquierda.....	47
Tabla 9. Balance final de perforación e inyección Cortina de Inyecciones Margen Izquierda desde EL.270 y vertedero. ....	47
Tabla 10. Balance final de perforación e inyección Cortina de Inyecciones Margen Derecha.....	48

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Distribución general de la Cortina de Inyecciones del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.....	52
ANEXO B. Metodología de Engrosamiento Sucesivo de la Mezcla .....	52
ANEXO C. Diagrama de Flujo Engrosamiento sucesivo de la Mezcla. ....	53
ANEXO D. Disposición de la cortina de inyecciones en la zona de la ataguía. ....	54

## RESUMEN

**TÍTULO:** PRÁCTICA EMPRESARIAL COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA DE OBRAS CIVILES PRINCIPALES DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOGAMOSO QUE ADELANTA LA EMPRESA ISAGEN S.A. E.S.P. ENFOCADO EN REALIZAR UN INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE INYECCIONES DE LA PRESA\*.

**AUTOR:** DIEGO ARMANDO QUIROZ DUEÑES\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Fundación, Perforación, Lechada, Cortina de Inyecciones, impermeabilidad.

Una central hidroeléctrica es una obra civil de gran impacto social, económico y ambiental, es por lo mismo que garantizar la integridad y el óptimo funcionamiento de la estructura es uno de los aspectos más importantes del proyecto. Sin embargo, considerar factores de seguridad significativos durante la fase de diseño no puede ser el único parámetro a tener en cuenta, así pues, es necesario proponer procedimientos constructivos, y parámetros de medición de calidad que sean consecuentes con la magnitud e influencia de un proyecto de estas características.

Asumiendo la fundación de la presa como aspecto vital en la vida de la central, en el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso la fundación de la presa consiste en la incrustación de la cara de concreto en las estribaciones de la montaña, y es complementada con una cortina de inyecciones; la misma es concebida para generar una pantalla impermeable que selle los posibles agrietamientos de la roca; así pues, teniendo en cuenta la trascendencia del asunto, la práctica empresarial en el área de obras civiles principales del Proyecto Sogamoso se enfocó en realizar un instructivo técnico de dicha Cortina de Inyecciones, generando tal documento como aporte a la empresa.

El presente artículo describe de manera detallada las labores realizadas durante la práctica profesional, y los procesos llevados a cabo para la construcción de la Cortina de Inyecciones de la Presa, sus criterios de diseño, y una síntesis de las actividades realizadas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Hebenly Celis Leguizamo.

## ABSTRACT

**TÍTULO:** BUSINESS PRACTICE AS ENGINEERING ASSISTANT IN THE MAIN CIVIL WORKS AREA OF SOGAMOSO HYDROELECTRIC PROJECT LED BY ISAGEN S.A. E.S.P. FOCUSED ON MAKING A TECHNICAL MANUAL OF THE DAM'S GROUT CURTAIN\*

**AUTHOR:** DIEGO ARMANDO QUIROZ DUEÑES\*\*

**KEYWORDS:** Foundation, Drilling, Grout, Grout Curtain, Impermeability.

A hydroelectric plant is a civil work that influences the economy, the environment, and the society; that is why to ensure the integrity and the proper operation of the structure is one of the most important aspects of the project. However, taking significant safety factors during the design phase can't be the only parameter to be considered. It's vital to propose constructive procedures, and quality metrics that are consistent with the size and influence of this kind of projects.

Assuming the foundation of the dam as a vital aspect in the life of the plant, in the Sogamoso Hydroelectric Project the dam foundation consists of embedding the concrete face in the foothills of the mountains, and it is complemented by a grout curtain ; the grout curtain is designed to create a waterproof screen to seal possible cracking rock; So, bearing in mind the importance of the matter, business practice in the main civil works area of Sogamoso project was focused on creating a technical instructive about that grout curtain, granting such a document as a contribution to the company.

This article describes in detail the work done during the practice, and the processes carried out for the construction of the grout curtain of the dam, its design criteria and a summary of the activities undertaken.

---

\* Work Degree

\*\* Physics Mechanical Engineering Faculty, Civil Engineering School. Directora: Hebenly Celis Leguizamo.

## INTRODUCCIÓN

Todo proyecto de construcción de una presa, presta especial atención al diseño y la calidad constructiva de su fundación, ya que la misma compromete directamente la seguridad del proyecto y los sectores aledaños; Al respecto, en el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, la cara de concreto de la presa se incrusta entre 40 y 50 metros en las estribaciones de la roca, formando una pantalla cortaflujos; este diseño se complementa con una Cortina de Inyecciones, concebida para sellar los posibles agrietamientos de la roca.

En el presente artículo se presenta una síntesis del documento Instructivo Técnico de la Cortina de Inyecciones de la Presa, el cual ha sido realizado como aporte a ISAGEN S.A. E.S.P., así mismo se describen las labores realizadas por el practicante, orientadas al seguimiento detallado de avance de las obras principales del proyecto y de la proyección de la finalización de las mismas en base a rendimientos reales. La realización de la práctica profesional en el área de Obras Civiles Principales del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, se convierte en una oportunidad de aportar talento humano no solo al crecimiento y desarrollo de la región, sino también a la calidad de la construcción de las obras civiles del proyecto.

## 1. LA EMPRESA Y EL PROYECTO

ISAGEN S.A. E.S.P. es una empresa colombiana de servicios públicos mixta, enfocada en la generación y comercialización de energía, actualmente se posiciona como la tercera generadora del país con una capacidad instalada de 2212 megavatios, de los cuales 1912 MW se distribuyen en sus cinco centrales hidroeléctricas: San Carlos, Jaguas, Miel, Amoyá y Calderas, y 300 MW en la central térmica Termocentro.

Su estrategia de crecimiento la lleva a la construcción de la central hidroeléctrica Sogamoso, con la cual espera aumentar su capacidad instalada a 3032 MW para satisfacer las necesidades de sus clientes, y que entrará en operación en el año 2014.

ISAGEN S.A. E.S.P. construye proyectos de generación, produce y comercializa energía inteligente que contribuya a la mitigación del cambio climático, utilizando estrategias de integración con sus grupos de interés, coherentes con el desarrollo humano sostenible.

El Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso está localizado en el departamento de Santander, específicamente en el cañón donde el río Sogamoso cruza la serranía de la Paz, y pretende aprovechar las aguas del río Sogamoso por medio de la construcción de una presa de tipo gravas con cara de concreto que tendrá 190 metros de altura, 345 metros de ancho en su parte más alta y creará un embalse con un volumen útil de 4.800 millones de metros cúbicos, que ocuparán 7000 hectáreas, y que generará una potencia máxima de 820 MW.

En la Figura 1 se observa una vista panorámica aguas abajo de la presa una vez iniciado el llenado del embalse, por lo cual el caudal ecológico de 80 m<sup>3</sup>/s está siendo garantizado por el túnel de descarga de fondo.

Figura 1. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.



Fuente: Registro Fotográfico ISAGEN.

## **2. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA PRÁCTICA PROFESIONAL**

La práctica profesional en el área de Obras Civiles Principales del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso se realizó con un énfasis proyectista, orientada a la gestión de la información, alimentada con visitas periódicas a la obra y con el apoyo de la interventoría del Proyecto, Consorcio INTEGRAL-VQ Ingeniería, y del tutor por parte de ISAGEN.

En un primer momento se realizó la inducción a la empresa y al cargo por parte de los profesionales de ISAGEN, seguidamente se realizaron visitas a todos los frentes de obra de la central con el objetivo de tener una visión sintética del proyecto desde el punto de vista del propietario de la construcción.

La toma de buenas decisiones por parte de un propietario implica contar con información clara, verdadera, y en el momento oportuno, es por lo mismo que la gestión de la información se convierte en un factor clave para la determinación de nuevas directrices en cuanto a la asignación de recursos.

Un caso especial durante esta práctica fue la decisión del inicio de llenado del embalse, el hito más importante del proyecto, para lo cual se llevó a cabo un estricto seguimiento a las actividades mínimas críticas requeridas para realizar la maniobra.

Durante la práctica profesional, entre otras, se realizaron las siguientes actividades:

- Análisis de informes diarios recibidos por la interventoría.
- Seguimiento del avance de las Obras Principales.
- Revisión y organización de planos.
- Gestión de la correspondencia prioritaria del proyecto.

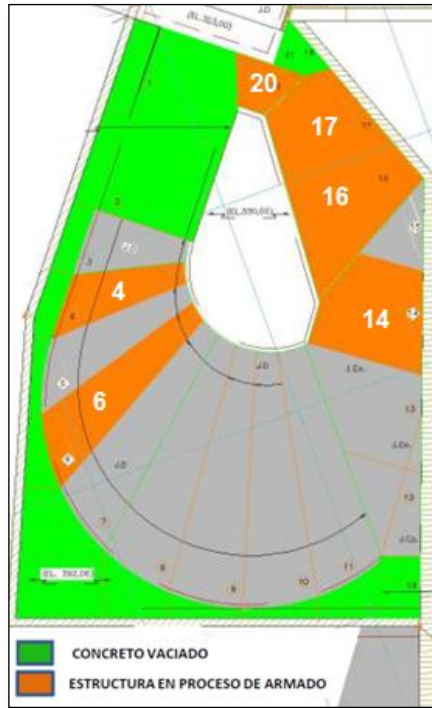
- Elaboración de informes semanales y mensuales para la dirección de ISAGEN.
- Asistencia a reuniones de carácter técnico del proyecto y gestión de la información tratada.
- Actualización de los programas de finalización de los frentes críticos para el inicio del llenado del embalse.
- Elaboración del documento Instructivo Técnico de la Cortina de Inyecciones de la Presa.

## 2.1. ANÁLISIS DE INFORMES DIARIOS RECIBIDOS POR LA INTERVENTORÍA.

Diariamente la interventoría remite vía correo electrónico a ISAGEN un informe de las actividades realizadas en todos los frentes de obra, los cuales contienen a su vez información de cantidades acumuladas, faltantes y temas pendientes por definir, entre otros. Estos informes fueron analizados y complementados con una visita semanal a la zona de obras para evaluar los rendimientos reales, el cumplimiento de las especificaciones, las cantidades ejecutadas, y la calidad de los trabajos.

En la Figura 2 se observa el diagrama de avance del Machón Cónico del Vertedero generado por la interventoría.

**Figura 2.** Análisis de informes diarios de interventoría.



Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

Seguidamente se enviaba un informe vía e-mail a los profesionales encargados de ISAGEN, con las observaciones y comentarios respectivos.

Así mismo, constantemente la asesoría emite notas de campo con su posición y recomendación en cuanto a temas puntuales de métodos constructivos y/o nuevos diseños, las mismas eran leídas, interpretadas, y gestionadas con los profesionales encargados para darle trámite al oficio, ya que el criterio del diseñador siempre se tomaba con especial atención.

## 2.2. SEGUIMIENTO DEL AVANCE DE LAS OBRAS PRINCIPALES

Como mínimo una vez a la semana se realizaba un recorrido por todas las Obras Principales del Proyecto, las mismas incluyen entre otros: Captación, Túneles de Carga, Descarga de Fondo y Vertedero.

En la Figura 3 se puede observar un recorrido realizado a la Estructura de Captación, en el cual se registraba el rendimiento alcanzado, y el personal asignado por el contratista, entre otros aspectos.

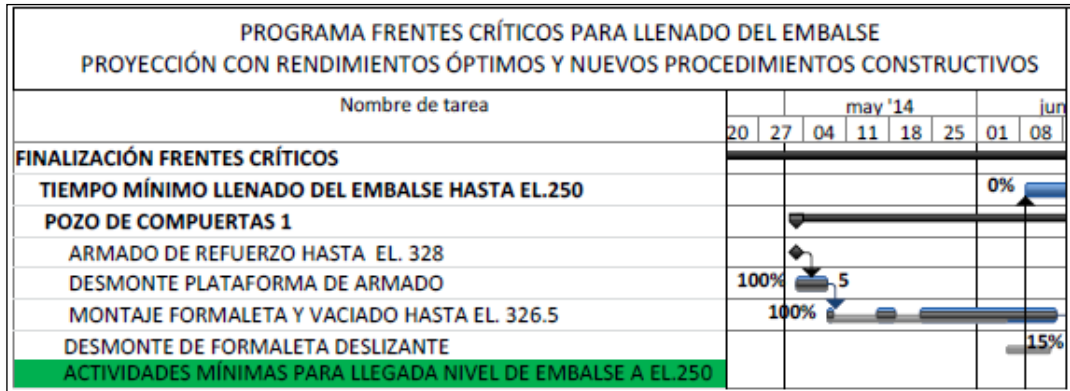
Figura 3. Recorrido por las Obras Civiles Principales.



Con base en la información obtenida en obra y analizando las actividades programadas vs ejecutadas, mediante el uso de la herramienta Microsoft Project, se actualizaba la proyección de la finalización de las obras civiles; esto se realizaba calculando el porcentaje de avance de cada actividad concebida en el proceso constructivo propuesto por el contratista teniendo en cuenta los recursos asignados para su ejecución y sus fechas reales alcanzadas; éste análisis se actualizaba cada semana para todos los frentes críticos del proyecto.

Un esquema de la actualización del programa de Finalización de los Frentes Críticos para el llenado del embalse se puede observar en la Figura 4, el mismo cuenta con los porcentajes de avance de cada actividad.

Figura 4. Proyección de finalización de las Obras Civiles Principales.



En la misma Figura 4 se puede observar la comparación de la línea base proyectada (barra gris) en un principio, y el desfase o adelanto con el avance real (barra azul). De esta manera la dirección de ISAGEN contó con un panorama real y claro de las actividades críticas en su momento, y que fueron vitales para el inicio del llenado del embalse.

De cada visita se obtenía el respectivo registro fotográfico para ISAGEN, el mismo era utilizado para obtener rendimientos reales, conocer de primera mano el estado actual del proyecto, y gestionar estratégicamente el enfoque primordial de la construcción, de acuerdo a los intereses de la empresa.

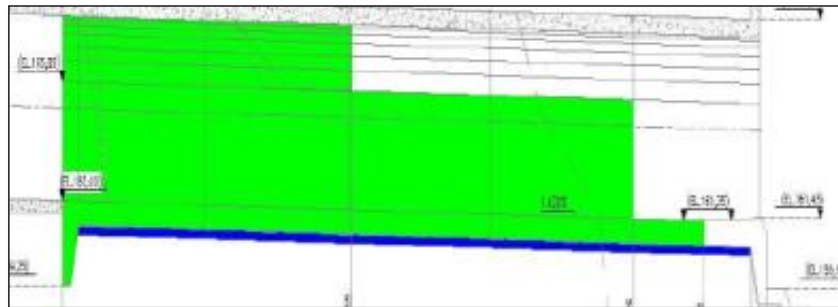
La información era proporcionada a la dirección de ISAGEN con un registro fotográfico, como observado en la Figura 5, y con un análisis gráfico detallado, un ejemplo de ello se ilustra en la Figura 6.

Figura 5. Construcción Túnel de Descarga de Fondo.



Fuente: Registro fotográfico ISAGEN.

Figura 6. Seguimiento gráfico Túnel de Descarga de Fondo.



Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

### 2.3. REVISIÓN Y ORGANIZACIÓN DE PLANOS

Durante la construcción de la central constantemente la asesoría INGETEC Ingeniería y Diseño S.A. remite la actualización de planos de construcción (Figura 7) de los diferentes frentes del proyecto; una vez recibidos los planos, se realizaba la interpretación de elementos como: frente de trabajo, materiales para construcción, ítems de pago, y número de revisión.

Figura 7. Revisión y actualización de planos.



Seguidamente se realizaba el análisis interno de dichos planos, y se elaboraba su respectiva hoja de vida, ésta explicaba los cambios que habían sufrido en cada revisión, un ejemplo de la presentación de las hojas de vida se muestra en la Figura 8; de ésta manera ISAGEN y la interventoría contaron con una descripción detallada de las nuevas y definitivas directrices dadas para la construcción de la central.

Figura 8. Actualización de la Hoja de Vida de los planos.

PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOGAMOSO 						
PLANO No.: E3-LT6.1-ELE-002 (Hoja 1 de 4) REVISIÓN VIGENTE: R6						
HOJA DE VIDA DE PLANOS DE CONSTRUCCIÓN						
TÍTULO DEL PLANO	POZO DE CABLES POZO DE COMPUERTAS DISPOSICIÓN DE BANCOS DE DUCTOS					PLANO TIPO:
						ELE_MEC X
LOTE DE TRABAJO No.:	(6.1)	NOMBRE LOTE: PÓRTICO DE CABLES				
REVISIÓN 1				% de Modificación:		
RESPONSABLE	FIRMA	ÁREA	FECHA ENVÍO	MOTIVO DE REVISIÓN		
				SOLICITUD ISAGEN	SOLICITUD OTROS	POR VERIFICACIÓN INTERNA
		Eléctrico	08-Apr-13			X
DESCRIPCIÓN MODIFICACIONES:	MODIFICACIÓN ELECTROMECÁNICA: Ajuste canalizaciones baja tensión y adición de canalizaciones media tensión, eliminación tanques SCI y bases para postes					

Finalmente, la última revisión de los planos era organizada por frentes de trabajo en la planoteca de ISAGEN, y dos copias de los mismos eran remitidas a la interventoría para el respectivo trámite con el contratista.

#### 2.4. GESTIÓN DE LA CORRESPONDENCIA PRIORITARIA DEL PROYECTO.

Continuamente eran recibidas cartas enviadas por el contratista y/o la interventoría referentes a los temas contractuales del proyecto. Al respecto se realizaba una lectura crítica de las mismas con el objetivo de orientar la respuesta de acuerdo a los intereses de ISAGEN.

La correspondencia era remitida a los profesionales a cargo del frente correspondiente, almacenada y referenciada para su posterior consulta y trámite.

#### 2.5. ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE INYECCIONES DE LA PRESA.

El objetivo de construir una cortina de inyecciones, es garantizar la estanqueidad del futuro embalse, esto se logra mediante la perforación de una o más líneas de huecos, cada hueco a una profundidad y dirección determinada, y la inyección de mezcla en tales huecos para generar un plano homogéneo de permeabilidad baja.

La construcción de una cortina de inyecciones pretende proteger la fundación de potenciales efectos dañinos producidos por flujos de agua inducidos por un alto gradiente hidráulico, tales como la infiltración a través de la fundación de la presa o tubificación.

Paralelo a las funciones básicas realizadas durante la práctica, como aporte a la empresa se elaboró el documento Instructivo Técnico de la Cortina de Inyecciones de la Presa. Para la elaboración de éste documento en primera instancia se realizó una lectura y análisis de las especificaciones técnicas dadas por ISAGEN al contratista para su construcción.

Los conceptos de diseño de la cortina de inyecciones, y de los parámetros determinantes durante la inyección fueron tomados y analizados de los memoriales de diseño de la presa proporcionados por INGETEC S.A. y hacen parte del documento.

A continuación se presenta el Instructivo Técnico realizado.

### **3. INSTRUCTIVO TÉCNICO DE LA CORTINA DE INYECCIONES DE LA PRESA**

La construcción de una Cortina de Inyecciones requiere un orden de actividades a realizar, así pues, en el presente documento se propone una secuencia lógica para obtener un desempeño óptimo y una estructura de calidad. Dicha organización consiste en:

-Planeación: Se realizan estudios para conocer la geología del terreno y la caracterización geomecánica del macizo.

-Diseño: Se definen los parámetros que rigen la construcción de la Cortina, tales como: Número de Huecos, localización, espaciamiento, dirección, inclinación, profundidad de los huecos, orden de perforación e inyección, presiones en cada etapa de inyección, características técnicas de las mezclas, tiempo de espera entre etapas de inyección, profundidades de inyección, presiones de pruebas de agua a presión, etc.

-Construcción: En esta etapa del proceso se realiza el montaje y preparación de equipos, topografía inicial, perforación, pruebas de agua a presión, y la inyección final del hueco. Así mismo durante la construcción es necesario llevar un control de calidad de la lechada, para lo cual se realizan diferentes ensayos de laboratorio.

-Resultados: Es necesario tener un registro de los datos de consumo de lechada por hueco, esto con el fin de analizar los puntos que en su momento fuera necesario reinyectar.

### 3.1. PLANEACIÓN

En la etapa de planeación del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso se obtuvo la caracterización geológica y geotécnica del macizo, la cual es presentada a continuación.

#### 3.1.1. Geología

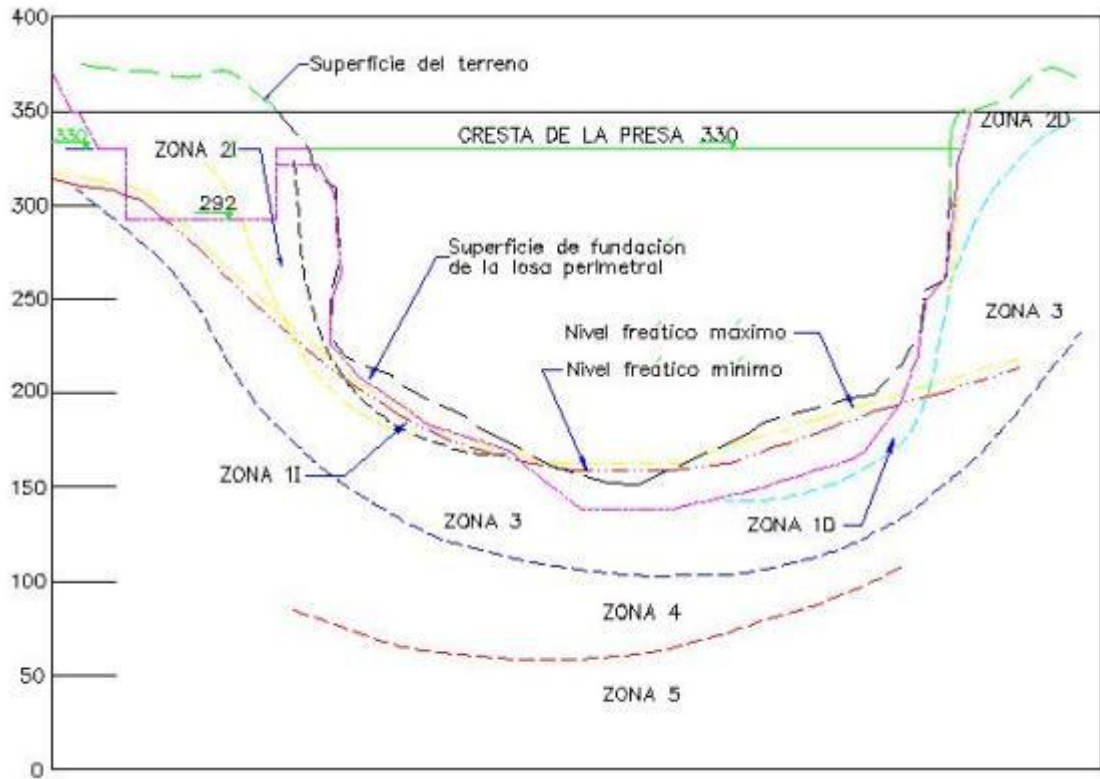
El sitio de la presa está constituido por areniscas con intercalaciones de arcillolita pertenecientes a la formación La Paz, cuyo espesor total es de 490 m. Esta formación se ha dividido en tres miembros: Miembro Superior (Tels), Miembro Medio (Telm), y Miembro Inferior (Teli); diferenciando en la parte media del cañón un paquete grueso de estratos de arenisca con escasos niveles de arcillolita en relación con los paquetes de arenisca de la parte superior e inferior, donde las intercalaciones de arcillolita son mucho más frecuentes.

Ésa formación tiene orientación general Norte-Sur y presenta altitudes de 150 a 600 msnm. El río Sogamoso la atraviesa en sentido Este-Oeste, conformando un cañón en forma de "V" asimétrica profunda, estrecha en la parte inferior y amplia en la parte superior, con pendientes fuertes, controladas por diaclasas verticales. En el área se encuentran depósitos cuaternarios los cuales cubren parcialmente las rocas de la formación La Paz.

#### 3.1.2. Caracterización geotécnica del macizo

Con el fin de establecer las características del macizo rocoso, específicamente en el sector de la presa se analizaron los resultados obtenidos en las exploraciones del subsuelo y en los ensayos geotécnicos, se zonificó el macizo rocoso de la fundación de la losa perimetral y se obtuvieron los parámetros de resistencia de las diferentes zonas. En la Figura 9 se presenta la zonificación general del macizo.

Figura 9. Zonificación del macizo.



Fuente: Memorando de diseño geotécnico. INGETEC S.A. – Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

En la Tabla 2 se presentan los valores del parámetro RMR (Rock Mass Rating) obtenidos con base en los criterios establecidos por Bieniawski en 1993 (Tabla 1). En la variación del parámetro correspondiente al agua subterránea se tuvo en cuenta la presencia del nivel del embalse, principalmente en las Zonas 1 y 2.

El RMR se obtiene estimando cinco parámetros: Resistencia a compresión simple de la roca, el RQD (Rock Quality Designation), la separación entre las diaclasas, su estado, la presencia de agua freática.

Tabla 1. Clasificación Geomecánica de Bieniawski

<b>INDICE RMR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
0-20	Muy Pobre
21-40	Pobre
41-60	Regular
61-80	Bueno
81-100	Muy bueno

Fuente: Memorando de diseño geotécnico. INGETEC S.A. – Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

Tabla 2. Valores de RMR obtenidos en las diferentes zonas del macizo

<b>ZONA</b>	<b>INDICE RMR</b>
1 D	16
1 I	14
2 D	34
2 I	30
3	46
4	53
5	59

Fuente: Memorando de diseño geotécnico. INGETEC S.A. – Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

### 3.2. DISEÑO

La definición de las características técnicas de la cortina de inyecciones debe incluir los siguientes parámetros: Número de huecos, localización, espaciamiento, dirección, inclinación, profundidad de los huecos, orden de perforación e inyección, presiones en cada etapa de inyección, características técnicas de las

mezclas, tiempo de espera entre etapas de inyección, profundidades de inyección, presiones de pruebas de agua a presión.

Como aspectos generales a tomar en cuenta para el diseño de mezclas de inyección se tienen:

-La mezcla debe tener una retracción mínima al fraguado, esto debido a que toda retracción se traduce luego en la formación de caminos preferenciales de circulación de agua, lo cual aumenta la probabilidad de disolución de la lechada misma en un futuro.

-La penetración de la mezcla en las fisuras está limitada por el diámetro de los granos de cemento en relación a la abertura de las fisuras. Agregando agua a la mezcla no mejora la penetración, de hecho, sólo el agua penetra las fisuras finas, no el cemento.

-La presión máxima puede tomarse como un valor de diseño de los equipos de inyección. La presión de inyección se considera mayor a la presión hidráulica, pero sin llegar a afectar la roca para que al llenar el embalse las fisuras no se abran de nuevo por hidrogateo. De esta manera, se determina un valor de 1,3 veces la presión hidráulica, que es equivalente a 36 bares aproximadamente en el punto más crítico.

-Las inyecciones primarias se encargan de llenar la mayor cantidad de vacíos y discontinuidades, dejando a las inyecciones secundarias o terciarias la tarea de “rematar” aquellos vacíos que no alcanzaron a ser llenados por las inyecciones primarias, o cuyos bulbos no se alcanzaron a traslapar, en razón a la complejidad y aleatoriedad de las discontinuidades.

Basado en las condiciones geológicas encontradas en el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso se determinó que por la profundidad de las perforaciones y su ubicación, la zona más crítica eran las perforaciones de la ataguía. En esta zona las perforaciones tienen una longitud de 120 m y van desde la cota 170 hasta la 50

msnm. Para este punto más crítico se determinó que la presión hidráulica ejercida para condiciones normales de funcionamiento de la central generadora sería de 27 bares (270 mca).

### 3.3. CONSTRUCCIÓN

La construcción de la cortina inicia con la instalación de equipos, y la topografía inicial, seguidamente se realiza la perforación, pruebas de agua a presión, y la inyección final del hueco. Así mismo durante la construcción es necesario llevar un control de calidad de la lechada, para lo cual se realizan diferentes ensayos de laboratorio.

#### 3.3.1. Equipos

El equipo para inyecciones, debe incluir como mínimo: Una bomba para operación y otra auxiliar, un mezclador coloidal, un agitador mecánico (Figura 10), empaques dobles o sencillos, normalmente llamados obturadores, equipo de perforación (Figura 11), equipo de control de desviación, Equipo de automatización para las inyecciones.

Figura 10. Equipo de Inyección – Proyecto Sogamoso



Así mismo en el equipo de inyección cuenta con accesorios como: válvulas, medidores del flujo de agua, medidores de flujo de lechada, mangueras de presión, tuberías, manguitos, tapones, conexiones, y reguladores de presión, esto con el objetivo de evitar las sobre-presiones durante la inyección.

Figura 11. Atlas Copco Diamec 262. Equipo de Perforación – Proyecto Sogamoso.



### 3.3.2. Materiales

**Cemento:** El cemento para las inyecciones a usar es tipo Portland I. Se debe usar cemento empacado en bolsas para la preparación de las mezclas para inyecciones, preferiblemente de 50 kg. Es necesario garantizar el almacenamiento de una cantidad de cemento, al menos 50 sacos, cerca del sitio, de tal modo que no se interrumpa el proceso por falta de suministro del material (Figura 12).

Figura 12. Acopio de Cemento y bomba de distribución del material



Agua: El agua debe ser limpia, fresca y exenta de impurezas, tales como cloruros, aceites, ácido, álcalis, sales, sedimentos, materia orgánica y otras sustancias perjudiciales. La calidad del agua empleada para fabricación y curado del concreto debe ser chequeada periódicamente cumpliendo con los requisitos de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10(Vigente).

Arena: Puede usarse arena natural, arena elaborada, o una combinación de ambas. La arena debe consistir en partículas duras, fuertes, durables y limpias, y debe estar bien lavada (Libre de partículas de limo o arcilla), tamizada, y clasificada, de tal forma que cumpla con los últimos requisitos de la norma ASTM-C-33.

La arena que se utilice en las mezclas de concreto, debe cumplir con las limitaciones de granulometría ilustradas en la Tabla 3:

Tabla 3. Gradación de la arena.

Tamiz estándar (U.S)	Porcentaje por peso que pasa
No. 16	100
No. 50	20 - 60
No. 200	0 - 3

Fuente: Especificaciones Técnicas Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Capítulo 10. Inyecciones a Presión y Perforaciones de Drenaje.

Además de cumplir con estos límites de gradación, toda la arena que se utilice en el trabajo debe tener un módulo de finura entre 1,5 y 2,0. La arena debe manejarse y apilarse de tal forma que evite su segregación y contaminación, garantizando que no varíe apreciablemente su contenido de humedad.

Aditivo superplastificante: Se usa aditivo superplastificante para incrementar la penetrabilidad de las lechadas de inyección, así mismo éste actúa como retardante de fraguado. La cantidad de aditivo superplastificante debe ser expresada como un porcentaje del peso del cemento.

Este valor corresponde al porcentaje de aditivo necesario para que la cohesión relativa de la lechada esté comprendida entre 0,08 mm y 0,15 mm. Para el PHS se seleccionó el aditivo Eucon 537 de Toxement, así mismo se estableció que la concentración del aditivo debería ser como máximo del 1,5% en peso de cemento.

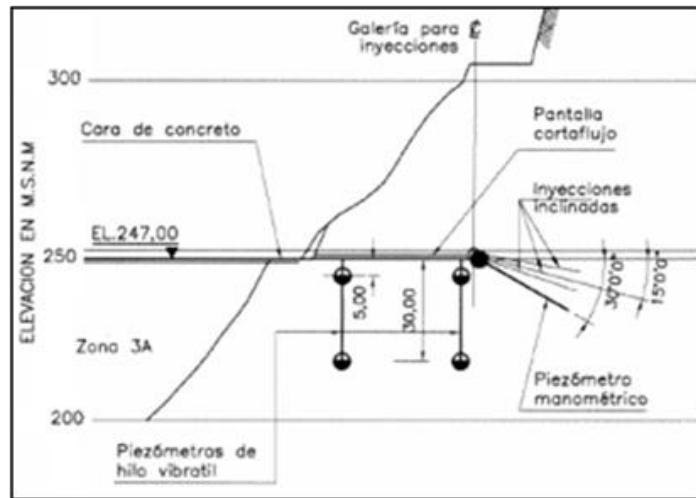
Bentonita: Para el PHS se ha propuesto el uso de bentonita con una calidad del tipo "Bentonita de Wyoming", o similar, cuando requiera incrementar la viscosidad de la mezcla base de inyección.

### 3.3.3. Topografía Inicial

Se materializan los puntos donde se requieran perforaciones para realizar las inyecciones de cortina. La información para la ubicación de los puntos, se toma de

la última revisión de los planos para construcción, como ilustrado en las Figura 13. Así mismo, la topografía debe realizar un chequeo de la posición, pendiente y rumbo antes de iniciar la perforación.

Figura 13. Sección típica estribo derecho.



Fuente: Planos de Construcción Proyecto Sogamoso. ISAGEN.

#### 3.3.4. Perforación

En general, la cortina de impermeabilización se conforma de huecos primarios, secundarios, y terciarios, esta denominación de los huecos se deriva de la secuencia de inyección (Figuras 14 y 15). La siguiente figura ilustra una distribución típica de huecos de perforación para el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

Figura 14. Secuencia de inyecciones de la Cortina Triple.



Fuente: Planos de Construcción Proyecto Sogamoso.

Figura 15. Orden de perforación Proyecto Sogamoso

DESCRIPCIÓN	DENOMINACIÓN	
	Filas laterales	Fila central
● Perforaciones primarias (separación 10m.)	1	4
○ Perforaciones secundarias (separación 5m.)	2	5
⊙ Perforaciones terciarias (separación 2,5m.)	3	6

Fuente: Planos de Construcción Proyecto Sogamoso.

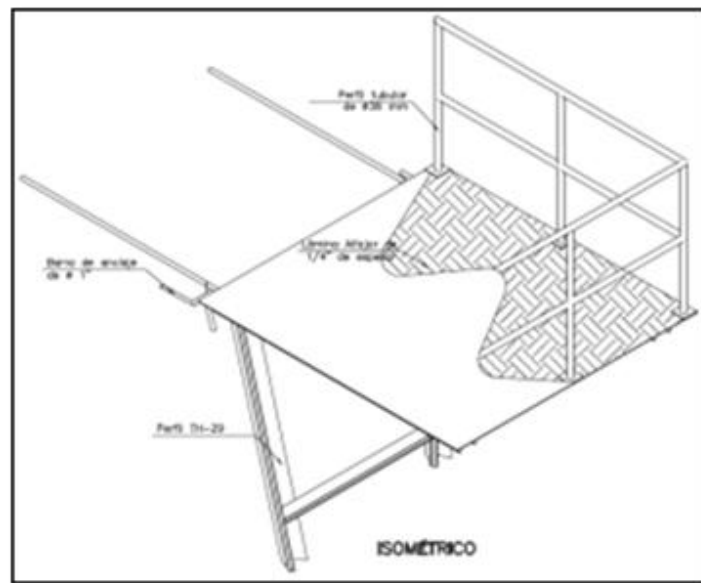
Los primeros huecos a ejecutar son los primarios. Solo después que dos huecos primarios hayan finalizado, se podrá ejecutar el hueco secundario ubicado entre ellos. Los huecos terciarios, que están ubicados entre un primario y un secundario.

Las perforaciones son ejecutadas con maquinaria eléctrica Atlas Copco modelo Diamec 262 o similar, apta para perforar hasta una longitud máxima de 130 metros con cualquier inclinación.

En esta etapa del proceso es importante considerar el apoyo de la máquina de perforación, teniendo en cuenta lo estrecho y lo inclinado de las galerías, para lo cual en el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso en la perforación de la cortina profunda, la perforadora Diamec tuvo que ser fijada en una plataforma de trabajo

desmontable. Esta plataforma fue enganchada a unas varillas de anclaje de 1" previamente inyectadas por una longitud en roca de 1.5 m. La lechada de inyección de las varillas de anclaje, es la comúnmente usada para inyección de pernos de anclaje con una relación A/C 0.45:1. La Figura 16 ilustra la plataforma de trabajo desmontable.

Figura 16. Plataforma de trabajo desmontable Proyecto Sogamoso.



Fuente: Documento "Procedimiento Constructivo Cortina de Inyecciones". Grupo ICT II. ISAGEN.

Para huecos mayores a 40 metros es necesario controlar la desviación del hueco, para lo cual en el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso se usó equipo de tipo Reflex Maxibor II.

En el caso de pérdida de agua durante la perforación, se debe garantizar el sellado de la fractura o vacío responsable de tal pérdida mediante inyección de lechada. El obturador debe ser posicionado un metro arriba de la cota donde se

presentó la pérdida. Al terminar la inyección el obturador será removido para evitar su bloqueo en el hueco. Después de generalmente 12 horas, y en acuerdo con la interventoría, el tramo inyectado será re perforado, y la perforación seguirá normalmente de acuerdo con lo descrito en el procedimiento.

En caso de encontrar zona muy inestable, se adopta el método de inyección por tramo. Se perfora el tramo de la longitud designada, se lava con agua a presión, se prueba con agua a presión si es requerido y se procede con la inyección. Después de un tiempo se re perforará y se perforará el tramo siguiente adoptando la misma metodología anteriormente descrita, hasta llegar a la profundidad final del hueco.

### 3.3.5. Pruebas con agua a presión

Antes de empezar la prueba de agua, o la inyección, el hueco debe limpiarse cuidadosamente con agua y aire a presión nunca mayor a 1.0 Mpa, el objetivo es remover los sedimentos, rebabas de taladro, lodo y cualquier otra sustancia extraña que pudiese estar en el interior del hueco.

El lavado debe continuar por un tiempo entre 3 a 5 minutos mínimo o hasta que el agua retorne completamente limpia. La sección del hueco a medir su permeabilidad debe ser aislada por un obturador simple o doble según el caso.

Seguidamente debe medirse el nivel freático del hueco, y de los huecos adyacentes en lo posible. En general, el procedimiento de la prueba de agua es el siguiente:

- Se deben insertar y expandir empaques sencillos o dobles en el hueco.
- Se bobea agua limpia en el hueco, entre uno y otro empaque, o entre un empaque y el fondo del hueco a través de las válvulas que se requieran para regular la presión del agua inyectada y el flujo.

Las pruebas se deberán ejecutar a varias presiones, midiendo el caudal correspondiente a cada cambio de presión. Para cada cambio de presión, el bombeo de agua deberá continuarse hasta cuando el flujo de agua inyectada pueda mantenerse constante durante el tiempo que se especifica en el la tabla 5. Solo después que la presión se haya estabilizado iniciará el registro de los parámetros. Los parámetros a medir son: presión, caudal y tiempo, los mismos son registrados a través del Jean Lutz VOPI 2 o similar.

En la Tabla 4 se observan las variaciones de presión usadas para medir el flujo de agua:

Tabla 4. Variación de la presión durante pruebas con agua

Presión (P)	Tiempo transcurrido (minutos)
$P_1 = P/4$	5
$P_2 = P/2$	5
$P_3 = P$	5
$P_2 = P/2$	5
$P_1 = P/4$	5

Fuente: Especificaciones Técnicas Proyecto Sogamoso. Capítulo 10. Inyecciones a Presión y Perforaciones de Drenaje.

En general, el valor de presión máxima usado es de 10 bares para profundidades mayores a 15 metros, y de 5 bares para los 15 m más superficiales. Para el Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso se consideró una permeabilidad final de 4 Lugeon ( $5 \times 10^{-5}$  cm/s), determinada con base en los ensayos con agua a presión al finalizar cada área de inyección. La Tabla 5 ilustra la clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad.

Tabla 5. Clasificación de macizos rocosos en función de la permeabilidad (Olalla y Sopeña).

Clasificación de macizos rocosos en función de permeabilidad	
Tipo de macizo	Unidades Lugeon
Muy impermeable	0 - 1
Prácticamente impermeable	1 - 3
Permeable	> 3
	1,5 - 6
Muy Permeable	> 3
	> 6
Olalla y Sopeña 1991	

Fuente: Memorando de diseño geotécnico INGETEC S.A. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

### 3.3.6. La Inyección

La lechada de inyección deberá ser una mezcla homogénea de cemento, agua (arena y/o bentonita) y/o aditivos. La tabla 6 muestra la composición de los diferentes tipos de lechada de inyección usados en la Cortina de impermeabilización del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

La mezcla de inyección de cortina se realiza utilizando el método de engrosamiento sucesivo. Este método consiste en la disminución del porcentaje de aditivo superplastificante y la adición de bentonita, cuya función es de aumentar la viscosidad y como consecuencia disminuir la penetrabilidad. Una ilustración del procedimiento se muestra en el Anexo B.

Tabla 6. Composición de los diferentes tipos de Mezclas de Inyección

LECHADAS DE CONSOLIDACIÓN CON EL SISTEMA DE ENGROSAMIENTO SUCESIVO PHS												
Tipo Mezcla	Relación A/C	Aditivo		Aditivo		Viscosidad [seg]	Cohesión Calc [g]	Cohesión Relat.(mm)	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Decantación [%]	f'c [Mpa]	
		Eucon 537	%	Bentonita	%						7 Dias	28 Dias
								Rango.				
A	0,70	Eucon 537	1,50	Bentonita	0,0	29	< 5	0,08-0,15	1,650	1,0	9	13
A	0,70	Eucon 537	1,50	Bentonita	0,0	30	< 5	0,08-0,15	1,650	1,0	9	13
B	0,70	Eucon 537	1,00	Bentonita	0,2	32	< 5	0,08-0,15	1,660	3,0	9	13
B	0,70	Eucon 537	1,00	Bentonita	0,2	31	< 5	0,08-0,15	1,655	2,0	9	13
C	0,70	Eucon 537	0,20	Bentonita	0,4	34		0,08-0,15	1,620	2,0	9	13
C	0,70	Eucon 537	0,20	Bentonita	0,4	34		0,08-0,15	1,655	1,0	9	13
D	0,70	Eucon 537	0,00	Bentonita	0,6	41		0,08-0,15	1,625	1,5	9	13
D	0,70	Eucon 537	0,00	Bentonita	0,6	43		0,08-0,15	1,630	3,0	9	13
E	0,70	Eucon 537	0,00	Bentonita	0,8	42		0,08-0,15	1,630	1,0	9	13
E	0,70	Eucon 537	0,00	Bentonita	0,8	45		0,08-0,15	1,640	3,0	9	13
F	0,70	Eucon 537	0,00	Bentonita	1,0	52		0,08-0,15	1,640	2,0	9	13
F	0,70	Eucon 537	0,00	Bentonita	1,0	49		0,08-0,15	1,640	2,0	9	13

Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

En general, el proceso de inyección de lechada consiste en:

- Durante toda la inyección se usa una sola mezcla base, con una relación agua – cemento entre 0.6 a 0.8:1.0, con una adición de un superplastificante. Para las inyecciones de cortina del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso se usa el aditivo Eucon 537 con un porcentaje del 1.5 % de la mezcla con el objetivo de aumentar la penetrabilidad.
- Si es necesario se incrementa la viscosidad de la mezcla mediante dos formas, la primera es adicionándole pequeños porcentajes de bentonita, y la segunda es disminuir gradualmente la cantidad de superplastificante, la decisión de la metodología será tomada con base en los resultados de laboratorio.

- Durante el bombeo de lechada las fluctuaciones de presión deben ser mínimas, esto con el objetivo de que la lechada penetre paulatinamente las discontinuidades de la roca.
- Continuamente, y en tiempo real, se toma registro de caudal, volumen inyectado, penetrabilidad y presión, generando con estos, gráficas para el análisis inmediato del procedimiento de inyección.
- El proceso de inyección de cada etapa finaliza cuando se cumplan los parámetros de Presión Máxima, Volumen máximo, y alcanzando un ritmo bajo de bombeo, cumpliendo así toda la trayectoria de la etapa de inyección.

Un diagrama de flujo ilustrativo del procedimiento se muestra en el Anexo C.

El proceso paulatino de incremento de la viscosidad de la mezcla evita el flujo innecesario de la lechada a distancias considerables más allá de la fundación de la presa que no requieren tratamiento, puesto que basta impermeabilizar el área delimitada a la profundidad de la cortina de inyección. La figura 17 ilustra el obturador, su bomba manual, y la manguera de inyección.

Figura 17. Procedimiento de inyección.



Es importante que la roca se encuentre saturada antes de empezar la inyección, esto debido a que la roca seca puede absorber el agua de la mezcla y reducir rápidamente la penetración por la fricción que se genera entre los granos de cemento ante la falta de lubricación.

#### Las presiones

El gradiente hidráulico original en la zona a ser tratada es muy alto a poca profundidad de la inyección, y se reduce rápidamente con la profundidad, por lo tanto una pantalla de impermeabilización con una intensidad uniforme de inyecciones no tiene sentido, así pues, el mayor cuidado y la mayor intensidad en las inyecciones tiene que ser prioritariamente en la parte más superficial que en cualquier otro punto a mayor profundidad.

Así mismo se establecen límites de presión aceptables que eviten fracturamiento hidráulico, y también levantamiento de roca y subpresiones que afecten la estructura de fundación.

Una abertura excesiva por presión se traduce en un gasto inútil de lechada y en mayor tiempo de ejecución de la impermeabilización. El tratamiento profundo con inyecciones empieza entonces con las dos filas de consolidación o barrera y termina con la fila central o de cortina profunda.

#### 3.3.7. Laboratorio

Los ensayos previos al inicio de las inyecciones se ejecutarán con el propósito de seleccionar en su orden, una mezcla estable, durable y de viscosidad Marsh adecuada. Los ensayos previos a realizar son básicamente: viscosidad de Marsh, exudación, cohesión relativa (Figura 19), tiempos de fraguado inicial y final, y compatibilidad cemento-aditivo.

Durante la construcción es necesario realizar un control de la calidad de la lechada, esto se lleva a cabo con los ensayos de: exudación, densidad líquida (Figura 18), Cono de Marsh, y resistencia a la compresión simple.

Figura 18. Nivelación de la balanza para lectura de densidad.



Figura 19. Ensayo de Cohesión



### 3.4. RESULTADOS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

A continuación se presenta un análisis de los resultados encontrados para cada sector de la cortina de inyecciones, haciendo énfasis en los metros perforados, cantidades inyectadas, y promedios de las características de la lechada inyectada. La Figura 20 muestra una panorámica de las Obras Principales del Proyecto, y su zonificación.

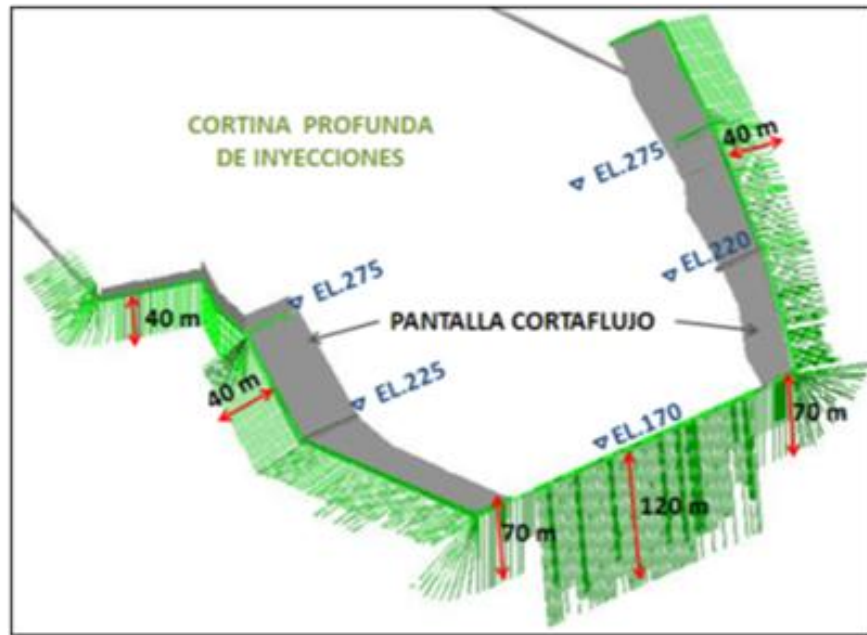
Figura 20. Panorámica Obras Principales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso



Fuente: Registro Fotográfico ISAGEN.

La Figura 21 muestra la distribución de los trabajos realizados en la Cortina Profunda de Inyecciones del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. El mismo es complementado con el Anexo A.

Figura 21. Animación 3D Cortina Profunda de Inyecciones Proyecto Sogamoso



#### 3.4.1. Zona de Ataguía

La cortina de inyecciones en esta zona consiste en tres filas: dos laterales de 60 m y una central de 120 m de longitud. En la elevación 170 msnm hacia los estribos tanto izquierdo como derecho de la cortina profunda se extiende una sola fila con una longitud de 70 m. Ésa cortina cuenta con una inclinación hacia aguas arriba de 5° con la vertical (Ver Anexo D). La Tabla 7 muestra el balance de perforación e inyección en este sector de la Cortina.

Tabla 7. Balance final de perforación e inyección ataguía.

	PERFORACIÓN	INYECCIÓN			
	EJECUTADO	TOTAL INYECTADO	LECHADA	TOTAL CEMENTO	TOMA POR METRO
	m	l	l/m	kg	s.c./m
<b>CORTINA TRIPLE DE INYECCIONES ATAGUÍA</b>					
PRIMARIAS	4.890,00	980.833	201	953.590	3,9
SECUNDARIAS	4.595,00	447.361	97	434.490	1,9
TERCIARIAS	5.250,00	115.707	22	112.356	0,4
CUATERNARIAS	1.610,00	26.064	16	25.331	0,3
QUINARIAS	580,00	7.264	13	7.053	0,2
EXPLORATORIAS	766,00	37.790	49	36.695	1,0
<b>SUBTOTAL ATAGUIA</b>	<b>17.691,00</b>	<b>1.615.019</b>	<b>91</b>	<b>1.569.516</b>	<b>1,8</b>

Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

#### 3.4.2. Cortina de Inyecciones en los Estribos Derecho e Izquierdo

En estas zonas la cortina profunda está compuesta por una sola fila hasta la elevación 225 msnm para el estribo izquierdo y 220 msnm para el estribo derecho, con una longitud de 40m y 15° de inclinación con la horizontal. Desde las elevaciones mencionadas hasta las elevaciones 275 msnm para el estribo izquierdo y 322 msnm para el derecho la cortina se compone por dos filas, una superior de 30m y una inferior de 40m de longitud. La Tabla 8 muestra el balance de perforación e inyección en este sector de la Cortina.

Tabla 8. Balance final de perforación e inyección Cortina de Inyecciones Margen Izquierda.

	PERFORACIÓN		INYECCIÓN		
	EJECUTADO	TOTAL INYECTADO	LECHADA	TOTAL CEMENTO	TOMA POR METRO
	m	l	l/m	kg	s.c./m
<b>CORTINA PROFUNDA IZQUIERDA GALERIA 170 CPI 170</b>					
PRIMARIAS	530,00	48.121	91	46.725	<b>1,8</b>
SECUNDARIAS	497,00	20.784	42	20.181	<b>0,8</b>
TERCIARIAS	615,00	14.101	23	13.692	<b>0,4</b>
CUATERNARIAS	260,00	5.567	21	5.406	<b>0,4</b>
QUINARIAS	180,00	1.349	7	1.310	<b>0,1</b>
<b>Subtotal</b>	<b>2.082,00</b>	<b>89.922</b>	<b>43</b>	<b>87.314</b>	<b>0,8</b>
<b>CORTINA INYECCIONES IZQUIERDA GALERÍA INCLINADA DE INYECCIONES CPI 170-275</b>					
PRIMARIAS	1.295,00	263.009	203	255.972	<b>4,0</b>
SECUNDARIAS	1.230,00	154.626	126	150.324	<b>2,4</b>
TERCIARIAS	1.795,00	155.185	86	150.746	<b>1,7</b>
CUATERNARIAS	1.410,00	116.600	83	113.281	<b>1,6</b>
QUINARIAS	1.280,00	30.316	24	29.445	<b>0,5</b>
SENARIAS	760,00	15.437	20	15.011	<b>0,4</b>
SEPTARIAS	280,00	4.192	15	4.104	<b>0,3</b>
EXPLORATORIAS	32,25	784	24	761	<b>0,5</b>
<b>Subtotal</b>	<b>8.082,25</b>	<b>740.149</b>	<b>92</b>	<b>719.645</b>	<b>1,8</b>
<b>SUBTOTAL IZQUIERDA</b>	<b>10.164,25</b>	<b>830.071</b>	<b>82</b>	<b>806.959</b>	<b>1,6</b>

Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

Tabla 9. Balance final de perforación e inyección Cortina de Inyecciones Margen Izquierda desde EL.270 y vertedero.

	PERFORACIÓN		INYECCIÓN		
	EJECUTADO	TOTAL INYECTADO	LECHADA	TOTAL CEMENTO	TOMA POR METRO
	m	l	l/m	kg	s.c./m
<b>CORTINA PROFUNDA GALERÍA 270 IZQUIERDA Y VERTEDERO</b>					
PRIMARIAS	920,00	91.167	99	88.773	<b>1,9</b>
SECUNDARIAS	880,00	66.784	76	65.007	<b>1,5</b>
TERCIARIAS	1.230,00	41.735	34	40.538	<b>0,7</b>
CUATERNARIAS	610,00	25.439	42	24.723	<b>0,8</b>
QUINARIAS	260,00	5.208	20	5.059	<b>0,4</b>
SENARIAS	120,00	7.047	59	6.847	<b>1,1</b>
<b>SUBTOTAL 270 Y VERT</b>	<b>4.020,00</b>	<b>237.380</b>	<b>59</b>	<b>230.947</b>	<b>1,1</b>

Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

Tabla 10. Balance final de perforación e inyección Cortina de Inyecciones Margen Derecha.

	PERFORACIÓN	INYECCIÓN			
	EJECUTADO	TOTAL INYECTADO	LECHADA	TOTAL CEMENTO	TOMA POR METRO
	m	l	l/m	kg	s.c./m
<b>CORTINA PROFUNDA DERECHA GALERÍA 170 CPD 170</b>					
PRIMARIAS	420,00	213.370	508	207.923	9,9
SECUNDARIAS	490,00	121.587	248	118.325	4,8
TERCIARIAS	650,00	29.000	45	28.159	0,9
CUATERNARIAS	910,00	24.707	27	24.067	0,5
QUINARIAS	310,00	4.340	14	4.214	0,3
EXPLO RATO RIAS	80,00	765	10	743	0,2
<b>Subtotal</b>	<b>2.860,00</b>	<b>393.769</b>	<b>138</b>	<b>383.430</b>	<b>2,7</b>
<b>CORTINA INYECCIONES DERECHA GALERÍA INCLINADA DE INYECCIONES CPD 170-322</b>					
PRIMARIAS	1.778,00	215.516	121	209.453	2,4
SECUNDARIAS	1.262,30	100.272	79	97.379	1,5
TERCIARIAS	1.050,00	58.876	54	55.227	1,1
CUATERNARIAS	885,00	27.181	31	26.393	0,6
QUINARIAS	540,00	18.707	35	18.164	0,7
SENIARIAS	540,00	16.570	31	16.106	0,6
SEPTARIAS	230,00	1.401	6	1.360	0,1
EXPLO RATO RIAS	127,00	3.931	31	3.817	0,6
<b>Subtotal</b>	<b>6.412,30</b>	<b>440.454</b>	<b>69</b>	<b>427.900</b>	<b>1,3</b>
<b>SUBTOTAL DERECHA</b>	<b>9.272,30</b>	<b>834.223</b>	<b>90</b>	<b>811.330</b>	<b>1,8</b>

Fuente: INTEGRAL VQ-INGENIERÍA. Interventoría Proyecto Sogamoso.

#### 4. CONCLUSIONES

- La perspectiva de la construcción de un proyecto con una visión sintética conlleva a la optimización de los recursos del constructor, ya que teniendo proyecciones claras y actualizadas de las actividades a realizar, él puede distribuir mejor su personal y tomar las medidas respectivas enfocado en la ruta crítica del proyecto.
- Durante la práctica se pudieron desarrollar todos los objetivos propuestos de manera satisfactoria, siempre en un ambiente de aprendizaje garantizado por ISAGEN.
- La actualización constante de la programación esperada, y las actividades efectivamente realizadas, son punto clave para tomar una buena decisión, en este caso particular el inicio del llenado del embalse contó con una proyección no solo de las obras civiles, sino del régimen de lluvias esperado, esto con el fin de garantizar la seguridad de los sectores aledaños y de las obras pendientes en los niveles superiores de la central.
- Para el diseño y la construcción de una cortina de impermeabilización es realmente importante contar con estudios geológicos y geotécnicos precisos, ya que los mismos proveen la información necesaria para optimizar parámetros como longitud de los huecos, volumen máximo de inyección, y la ubicación y dirección de las perforaciones.
- Con las pruebas de agua a presión realizadas antes y después de inyectar una zona de la cortina, se puede observar que efectivamente se obtiene una reducción en la permeabilidad del macizo, en caso de no lograr aún un valor de Lugeon aceptable, es necesario perforar e inyectar huecos de mayor orden.
- La Cortina de Inyecciones se convierte en parte importante de la fundación de la presa, y por lo mismo las inyecciones realizadas en la parte más superior de cada

inyección deben ser tratadas con especial atención, debido a que el gradiente hidráulico inevitablemente será muy grande en ésta zona.

- El método de engrosamiento sucesivo de la lechada de inyección es verdaderamente útil cuando se pretende evitar flujos de volúmenes muy grandes de mezcla a zonas innecesarias que no hacen parte de la pantalla impermeable,; así mismo el diseño de la mezcla siempre debe estar encaminado a sellar la mayor cantidad de fisuras posibles, variando el contenido de sus aditivos.

- El orden de la inyección siempre debe estar coordinado con las perforaciones realizadas, al respecto se deben perforar huecos con la separación suficiente para que al inyectar alguno, el flujo de lechada no se escape por la comunicación de éstos debido a la fracturación interna de la roca.

## BIBLIOGRAFÍA

CHAVES, C., VARGAS, A. Criterios utilizados para el diseño de la cortina de impermeabilización del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 2005.

GUADALUPE, Rolando. Análisis del uso del Método GIN (Groting Intensity Number) en el Proyecto Hidroeléctrico Mazar. Quito, Marzo de 2011.

INGETEC I&D S.A - Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Memorando de diseño geotécnico. Presa. Revisión 2. Santafé de Bogotá, Diciembre de 1996.

INGETEC I&D S.A - Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Memorando de diseño geotécnico. Túneles de desviación y galería de acceso. Rev. 0. Santafé de Bogotá, Colombia. Septiembre de 1996.

ISAGEN. Licitación pública No. 5/415. Pliego de condiciones – Parte II – Copia Conformada. Especificaciones técnicas. Capítulo 10. Inyecciones a presión y perforaciones de drenaje. Medellín: ISAGEN, 2009

ISAGEN. Licitación pública No. 5/415. Pliego de Condiciones – Parte II – Copia conformada. Especificaciones técnicas. Capítulo 13. Concreto convencional. Medellín: ISAGEN, 2009.

ISAGEN. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Presa, vertedero y obras subterráneas. Procedimiento técnico para la inyección de cortina. Revisión 0. Medellín: ISAGEN, 2011.

PEDRAZA, Didier. Instructivo Técnico sobre Inyecciones de Consolidación implementadas durante la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Bucaramanga, 2013.



**ENGROSAMIENTO SUCESIVO DE LA MEZCLA MODIFICADO**

Si  $P < 20\% P_{m\acute{a}x}$  o penetrabilidad constante, pasar de mezcla A a B o penetrabilidad disminuyendo, continuar con mezcla A hasta el límite de penetrabilidad.

Si  $P < 20\% P_{m\acute{a}x}$  ó penetrabilidad constante, pasar de mezcla B a C o penetrabilidad disminuyendo, continuar con Mezcla B hasta el límite de penetrabilidad.

Si  $P < P_{m\acute{a}x}$  ó penetrabilidad constante, pasar de mezcla C a D o penetrabilidad disminuyendo, continuar con Mezcla C hasta el límite de penetrabilidad.

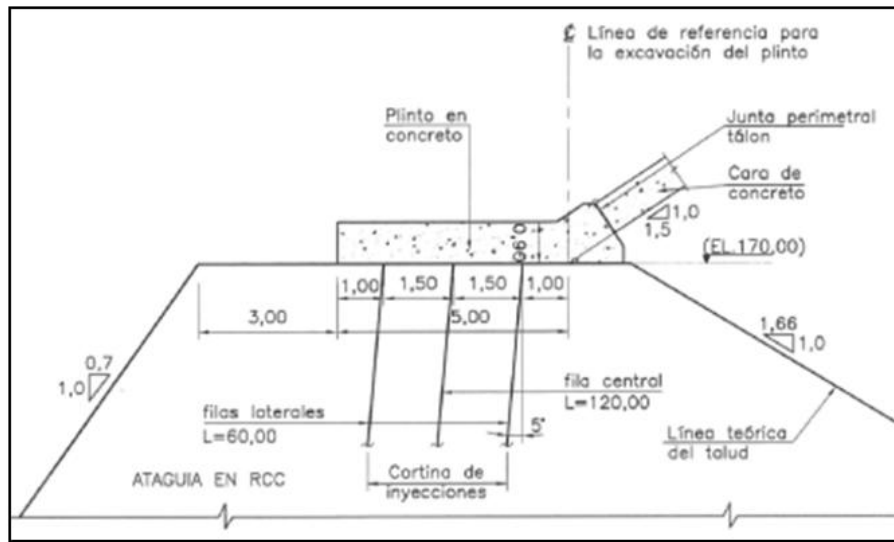
Si  $P < P_{m\acute{a}x}$  ó penetrabilidad constante, pasar de mezcla D a E o penetrabilidad disminuyendo, continuar con Mezcla D hasta el límite de penetrabilidad.

Si  $P < P_{m\acute{a}x}$  ó penetrabilidad constante, pasar de mezcla E a F o penetrabilidad disminuyendo, continuar con Mezcla E hasta el límite de penetrabilidad.

Si  $P < P_{m\acute{a}x}$  ó penetrabilidad constante, llegar hasta el límite de penetrabilidad o penetrabilidad disminuyendo, continuar hasta el rechazo o penetrabilidad disminuyendo, continuar hasta el rechazo o penetrabilidad disminuyendo.

ANEXO C. Diagrama de Flujo Engrosamiento sucesivo de la Mezcla.





Plano de referencia E3—LT2.1-GEO-060.