

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO BOLÍVAR  
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**



**OPTIMIZACIÓN DE LOS CRITERIOS UTILIZADOS PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA CORTINA DE INYECCIÓN EN LA  
PRESA DE ENROCAMIENTO IZQUIERDA CON PANTALLA  
DE CONCRETO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO  
“MANUEL PIAR” (TOCOMA), ESTADO BOLÍVAR.**

**TRABAJO FINAL DE GRADO  
PRESENTADO POR LA  
BACHILLER MARIA  
GABRIELA CHACIN  
PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO GEÓLOGO**

**CIUDAD BOLÍVAR, MAYO DE 2010**

## **DEDICATORIA**

A mi abuela Carmen Ceferina Garnier,(†) el mayor ejemplo de constancia, trabajo y esfuerzo de mi familia, donde estés, sé que estás orgullosa de mí.

A mi mamá y mis tíos Antonio Nakoul y Ritzi Garnier de Nakoul por su apoyo incondicional en mi formación profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A toda mi familia; a mi mamá, mis tíos, hermano, primos por todo el apoyo que me han dado, a la señora Mercedes Afanador, Familia López Suárez y señora. Carmen Gómez por toda la colaboración en el transcurso de estos años llenos en su mayoría de logros.

A mi tutor académico profesor Alexis Miró por su colaboración en el desarrollo de mi carrera en la mención de suelos y en la culminación de esta a través del presente trabajo.

A mi tutor industrial Hugo Casale por su disposición en atenderme y guiarme en la ejecución de mi trabajo de grado.

A todo el equipo de trabajo del Departamento de Obras Geotécnicas de la empresa Electrificación del Caroní (EDELCA), técnicos, geólogos ingenieros y asesores, especialmente al señor Alain Fablet por explicarme y brindarme información relacionada al tema que me fue asignado para estudio.

A todos mis amigos y compañeros de clase, cada uno fue pieza fundamental para lograr cada una de mis metas propuestas.

María Gabriela Chacín

## **RESUMEN**

El Proyecto Hidroeléctrico Manuel Carlos Piar, está ubicado aproximadamente a 18 Km aguas abajo de la Central Hidroeléctrica “Raúl Leoni”, estado Bolívar. La investigación realizada se encuentra en la presa de enrocado con pantalla de concreto izquierda del proyecto. El objetivo principal es optimizar la metodología de inyección de cortina, aplicada en el plinto de la pantalla de concreto de la presa izquierda. Como objetivos propuestos fue necesaria una revisión geológica, por medio de los registros de perforaciones exploratorias, las cuales arrojan los datos de R.Q.D (Índice de Calidad de Roca), el análisis de la metodología tradicional de inyección reflejada en las especificaciones técnicas del proyecto y los criterios ajustados, los cuales son utilizados en la actualidad. Además, por medio de los consumos de lechada registrados, se elaboró una gráfica de la cortina ejecutada y una teórica, permitiendo la facilidad de comparación de ambos métodos para determinar un beneficio económico manteniendo la calidad de la obra.

# CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
CONTENIDO .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABLAS .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	3
SITUACIÓN A INVESTIGAR .....	3
1.1 Planteamiento del problema .....	3
1.2 Justificación .....	6
1.3 Objetivos de la investigación .....	6
1.3.1 Objetivo general .....	6
1.3.2 Objetivos específicos .....	6
1.4 Alcance .....	7
1.5 Limitaciones .....	7
CAPÍTULO II .....	8
GENERALIDADES .....	8
2.1 Reseña histórica de la empresa .....	8
2.1.1 La empresa .....	11
2.1.2 Departamento de Obras Geotécnicas .....	15
2.2 Descripción general del Proyecto Manuel Piar .....	17
2.2.1 Potencial hidroeléctrico .....	20
2.2.2 Ubicación geográfica del área .....	21
2.2.3 Acceso al área .....	21
2.2.4 Características físicas y naturales .....	22

CAPÍTULO III .....	28
MARCO TEÓRICO .....	28
3.1 Antecedentes de la Investigación .....	28
3.2 Bases teóricas .....	29
3.2.1 Presas de embalse .....	29
3.2.2 Diseño de una presa .....	33
3.2.3 Estudios geológico-geotécnicos preliminares.....	34
3.2.4 Geología del subsuelo.....	35
3.2.5 Índice de Calidad de Roca RQD (Rock Quality Desing) .....	36
3.2.6 Nomenclatura de las rocas en función al nivel de meteorización .....	37
3.2.7 Permeabilidad .....	38
3.2.8 Pruebas de permeabilidad .....	40
3.2.9 Tratamientos de fundaciones .....	42
3.2.10 Métodos de inyección .....	44
3.2.11 Método GIN (Grouting Intensity Number).....	46
3.2.12 Desarrollo del Método GIN .....	47
3.2.13 Diámetro y profundidad de los barrenos.....	48
3.2.14. Energía específica utilizada .....	49
3.2.15 Selección del valor GIN .....	50
3.2.16 Ventajas de mantener un GIN constante .....	50
3.2.17 Envolverte de limitación para diferentes intensidades de inyección ....	51
3.2.18 Aplicación a la inyección de pantallas .....	54
3.2.19 Criterio de cierre de cortina utilizando el Método GIN .....	55
3.1.20 Materiales que se inyectan.....	56
3.2.21 Equipo usado en la inyección.....	58
CAPÍTULO IV .....	60
METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	60
4.1 Flujograma de la metodología .....	60
4.2 Nivel y diseño de investigación.....	60

4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	61
4.4 Materiales y equipos .....	62
4.4.1 Equipos de protección personal:.....	62
4.4.2 Maquinaria.....	62
4.5 Procesamiento de Datos .....	63
4.5.1 Gráfica de consumos de las cortinas de inyección .....	64
4.6 Análisis e interpretación de los resultados.....	67
4.7 Informe final .....	67
CAPÍTULO V .....	68
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	68
5.1 Calidad del macizo rocoso en el área de la Presa Izquierda.....	68
5.2 Evaluación de las especificaciones técnicas y criterios ajustados establecidos para la construcción de la cortina de inyección.....	69
5.2.1 Consumos de lechada.....	69
5.2.2 Cantidad de obra.....	71
5.3 Efecto económico de ambos procedimientos de inyección .....	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
Conclusiones.....	75
Recomendaciones.....	76
REFERENCIAS.....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la Presa Izquierda del Proyecto Tocomá (EDELCA).	4
Figura 1.2 Método de Espaciamientos Decrecientes (Rodríguez y Luzardo 2006).	5 5
Figura 2.1. Central hidroeléctrica Simón Bolívar (Internet-pág. EDELCA).	10 10
Figura 2.2. Central hidroeléctrica Antonio José de Sucre II(Internet-pág. EDELCA).	10
Figura 2.3. Central hidroeléctrica Francisco de Miranda (Internet-pág. EDELCA).	11 11
Figura 2.4. Sección típica del Aliviadero (EDELCA).	18
Figura 2.5. Sección típica de casa de máquinas (EDELCA).	19
Figura 2.6 Proyectos del Bajo Caroní (Rodríguez y Luzardo,2006).	21
Figura 2.7. Ubicación de la cuenca del río Caroní (Internet-pág. EDELCA).	22
Figura 2.8 Ubicación de la Zona de la Falla El Pao (EDELCA).	23
Figura 2.9 Edades Sn/Nd del protolito Complejo de Imatata (Texeira y otros ,en González 2002).	25 25
Figura 2.10 Vista Aérea del Proyecto Hidroeléctrico Tocomá. (EDELCA).	27 27
Figura 3.1 Sección transversal de la presa de enrocado.	32
Figura 3.2 Métodos de inyección (Camberfort Henri, 1.968).	46
Figura 3.4 Curva GIN con relaciones típicas de volumen y presión (Lombardi y Deere,1.993)	52 52
Figura 3.5 Envoltantes propuestas de limitantes de inyección (Lombardi y Deere, 1.993).	52 52
Figura 3.6. Comportamiento de todos los barrenos dependiendo de su consumo de lechada y presión de inyección.(Lombardi y Deree, 1.993)	55 55
Figura 4.1 Flujograma de la metodología.	60



## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 3.1 Calidad de la roca de acuerdo al valor de RQD	37
Tabla 3.2 Clasificación de los suelos según su coeficiente de permeabilidad (Terzaghi y Peck, 1.967 en Rodríguez y Luzardo 2006)	40
Tabla 4.1 Tramos Presa Izquierda.	64
Tabla 5.1 Cantidades de obra.	71
Tabla 5.2 Cantidad de obra metodología actual EDELCA.	73
Tabla 5.3 Cantidad de obra metodología según Especificaciones Técnicas.	74

## INTRODUCCIÓN

El Proyecto Hidroeléctrico Tocoma llamado Manuel Carlos Piar, es el último desarrollo hidroeléctrico contemplado en la cuenca del Bajo Caroní. Considera la instalación de 2,160 MW para producir una energía promedio anual de 12,100 GW, que contribuirá conjuntamente con las centrales: Guri (Simón Bolívar), Macagua (Antonio José de Sucre) y Caruachi (Francisco de Miranda), a un considerable ahorro de petróleo equivalente a 68.000 Barriles de petróleo diarios, al igual que ayudara a promover el desarrollo y compensar la demanda eléctrica del país.

La presa izquierda forma parte del proyecto se divide en cuatro tramos de construcción. Está conformada por una pantalla de concreto y fundada sobre roca, esto debido a la necesidad de utilizar los materiales provenientes de las excavaciones requeridas para las estructuras principales y el canal de descarga y por la dificultad de disponer de material arcilloso en cantidades suficientes, en la margen izquierda.

La cortina de inyección está ubicada en el plinto (base de la pantalla de concreto de la presa) y su función es sellar las grietas presentes en la roca de fundación. Esta sigue una metodología de inyección modificada con respecto a los criterios establecidos en las especificaciones técnicas del proyecto que a través de este trabajo de grado se busca comparar, para determinar si es rentable económicamente tales modificaciones.

La optimización de esta metodología es de gran importancia ya que al tener un ahorro de tiempo y recursos económicos, agiliza la culminación del proyecto, aspecto de gran importancia en la actualidad, ya que el país se encuentra en una crisis energética motivado a fenómenos naturales.

El desarrollo de esta investigación se estructura en cinco (5) capítulos.

Capítulo I. Planteamiento del problema: En esta parte se exponen los argumentos que sustentan el planteamiento del problema central de este estudio se definen los objetivos que guiaron el desarrollo del trabajo; la justificación, en la que se explica la pertinencia del mismo, los alcances y limitaciones.

Capítulo II. Marco Teórico: se resumen una serie de elementos conceptuales relacionados con el tema de la presente investigación que sirven de base al desarrollo de la misma.

Capítulo III. Metodología de trabajo: se explica la forma en que se desarrollará el estudio para poder dar respuesta al problema planteado, haciendo referencia al tipo y diseño de la investigación, procesamiento y análisis de los mismos.

Capítulo IV. Análisis de los resultados: se discuten los mismos, analizando la información a fin de elaborar comparaciones de las metodologías de inyección.

Conclusiones y Recomendaciones: se presenta de manera sucinta los aspectos derivados del análisis de resultados en relación a las características determinadas para llevar a cabo la evaluación de la metodología de inyección de cortina en el Proyecto Tocomá y en base a esto se formulan las recomendaciones.

# CAPÍTULO I

## SITUACIÓN A INVESTIGAR

### 1.1 Planteamiento del problema

El Proyecto Hidroeléctrico Manuel Carlos Piar en Tocoma está ubicado al suroeste de Venezuela en el Estado Bolívar a unos 18 Km aguas abajo de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar en Gurí y a unos 73 Km de Ciudad Guayana, cerca de la desembocadura del río Claro en el río Caroní. En Tocoma, las rocas de Imataca cubren el 75% del área y el resto lo componen aluviones recientes, mayoritariamente son gnéises cuarzo feldespáticos, anfibolíticos y graníticos grises y rosados, granito porfídico rosado con intercalaciones ocasionales de anfibolitas piroxénicas, cuarcita ferruginosa y diques de dolerita.

La estructura geológica predominante es la falla del Pao que ocupa una franja de 7km de ancho en dirección N70°O que atraviesa el río Caroní, dicha falla es transcurrente lateral izquierda y su actividad ceso por lo menos hace más de 200 millones de años. Esta zona presenta evidencias de cizallamientos antiguos paralelas al rumbo de la falla, sobre milonitas frescas y brechas con diferentes grados de meteorización y masas intactas de rocas del complejo de Imataca. Las fracturas de las rocas mayoritariamente siguen rumbos paralelos a la falla El Pao, es decir, N70°-80°O verticales o fuertemente inclinados tanto al Norte como al sur.

Las rocas de fundación del proyecto son duras, de buena a excelente calidad, con R.Q.D.  $\geq 75\%$ , por lo que la finalidad de la cortina de inyección es la impermeabilización y relleno de diaclasas en el eje longitudinal de la presa, en función de mantener la permeabilidad del sustrato dentro de los parámetros requeridos.

Entre los componentes de la obra, se estudiaron en este trabajo de investigación las inyecciones realizadas a la presa de enrocamiento izquierda las cuales debían ser efectuadas de acuerdo con las Especificaciones Técnicas Proyecto Tocomá, donde se preveían la utilización de los mismos criterios usados en el Proyecto Caruachi, sin embargo una vez registrada la geología existente, se hicieron ciertos ajustes a las especificaciones técnicas. (Figura.1.1).

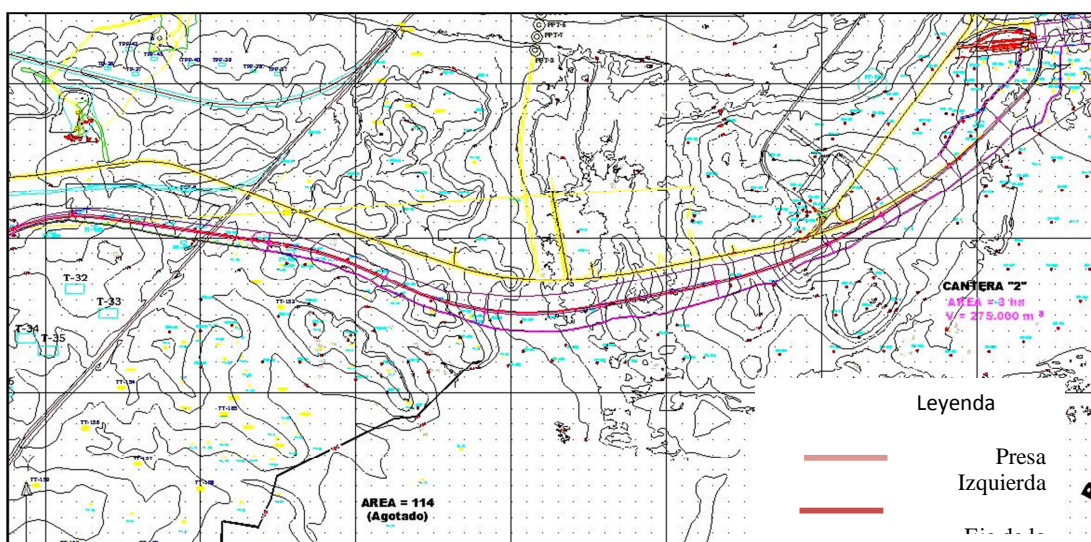


Figura 1.1 Ubicación de la Presa Izquierda del Proyecto Tocomá (EDELCA).

En las especificaciones técnicas se establece que la cortina de inyección en un punto determinado será del 50% al 75% de la carga de agua del embalse futuro teniendo las perforaciones de 35 m de longitud medidos desde la superficie hasta el tope de la roca, siguiendo el método de perforaciones con espaciamiento decreciente, inyección de lechada en perforaciones primarias, secundarias y terciarias intermedias cuando la permeabilidad del sustrato sea inferior a  $1,0 \times 10^{-5}$  cm/seg; perforaciones primarias, secundarias terciarias y cuaternarias cuando las permeabilidades estén entre  $1,0 \times 10^{-3}$  y  $1,0 \times 10^{-4}$  cm/seg y cuando las permeabilidades sean mayores a  $1,0 \times 10^{-3}$  cm/seg, inyectar perforaciones desde las primarias hasta quinarias en los

barrenos primarios siguiendo un criterio de cierre de consumo de lechada de inyección igual o menor a 20 Kg/m. (Figura 1.2).

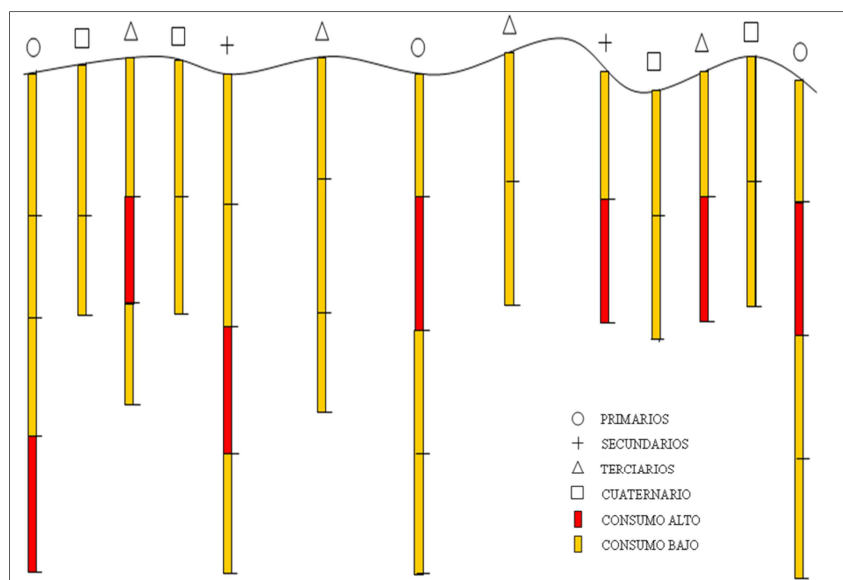


Figura 1.2 Método de Espaciamientos Decrecientes (Rodríguez y Luzardo 2006).

Entre las modificaciones que se realizaron se planteó la ejecución de perforaciones de orden superior al primario cuando la permeabilidad sea superior a  $1,0 \times 10^{-4}$  cm/seg y utilizar un criterio de cierre de consumo de lechada igual o menor a 40 Kg/ mL.

El presente trabajo tiene como propósito evaluar el efecto de estos ajustes a las especificaciones técnicas para determinar el impacto en las labores de construcción de la pantalla de inyección.

## **1.2 Justificación**

Durante la ejecución de los proyectos de la Dirección de Extensión y Generación de la empresa Electrificación del Caroní C.A (EDELCA) siempre está en la búsqueda de mejorar los procesos constructivos utilizados, con el fin de optimizar los recursos, tiempo y costo en la construcción de sus centrales hidroeléctricas.

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Realizar la propuesta para optimizar los criterios utilizados para la construcción de la cortina de inyección en la Presa de Enrocamiento Izquierda con Pantalla de Concreto del Proyecto Hidroeléctrico “Manuel Piar” (TOCOMA).

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar información referente a la geología, ensayos RQD y permeabilidad realizados en la fundación de la presa izquierda del proyecto Hidroeléctrico Manuel Piar.
2. Revisar las especificaciones y criterios establecidos en el tratamiento de inyecciones de cortina en la presa izquierda.
3. Analizar los datos de consumo en la cortina de inyección de presa izquierda ejecutada con los criterios ajustados.

4. Extrapolar los valores de inyección, con los criterios de las especificaciones técnicas.

5. Evaluar los resultados de ambos métodos y definir una optimización en los procedimientos de inyección.

#### **1.4 Alcance**

Extrapolar los posibles resultados con la aplicación de la metodología usada anteriormente, para compararlos con los obtenidos con la nueva metodología, con el fin de evaluar la correlación de ambos.

#### **1.5 Limitaciones**

El presente trabajo requirió extrapolar los resultados de una metodología constructiva a partir de los resultados de otro procedimiento. Lo cual de no definirse adecuadamente las premisas, pudieran generar errores en los nuevos resultados.



## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES**

#### **2.1 Reseña histórica de la empresa**

Entre las primeras tareas realizadas por la Corporación Venezolana de Fomento (CVF), creada el 29 de Mayo de 1946, figuró el análisis sobre la posibilidad de aprovechar el potencial hidroeléctrico del río Caroní. En 1947, la CVF firma un contrato con la empresa norteamericana BURNS & ROE, e inicia los estudios necesarios para el diseño de un Plan Nacional de Electrificación. Luego de minuciosos estudios topográficos y geológicos se determina el sitio donde debe ubicarse la primera central hidroeléctrica para el aprovechamiento del potencial del río Caroní y es para el año de 1956 cuando se inicia la construcción de la Represa Antonio José de Sucre 1 como soporte del desarrollo de la industria del hierro y el acero, a través de la naciente Siderúrgica Nacional. Ya para el año de 1960 la represa comenzó a funcionar a pleno con una capacidad instalada de 360 Megavatios.

En el año de 1960 comenzaron los estudios de factibilidad para la construcción de la Central Hidroeléctrica de Simón Bolívar.

El 29 de Diciembre de 1960, mediante decreto presidencial, se creó la Corporación Venezolana de Guayana (CVG.), bajo figura del instituto autónomo, adscrito a la Presidencia de la República, la CVG fue creada con perspectivas siderúrgicas y aprovechamiento del potencial hidroeléctrico del Caroní, nació como instituto autónomo con personalidad jurídica propia y patrimonio distinto e independiente del Fisco Nacional. En éste mismo año el equipo profesional encargado de los trabajos de los proyectos del río Caroní, pasó a formar parte de la

CVG, conformado en dos direcciones: Operaciones de Centrales Hidroeléctricas y Construcciones de Centrales Hidroeléctricas.

El 23 de Julio de 1963 se constituyó formalmente la empresa CVG ELECTRIFICACIÓN DEL CARONÍ, C.A. (CVG EDELCA), de acuerdo con el artículo 31 del Estatuto Orgánico de la Corporación Venezolana de Guayana. Para el mismo año se le asignó la buena pro al Consorcio Guri, formado por las empresas Kaiser Engineering and Constructors Inc., Macco International, Tecon International Inc., Merrit Chapman and Scott Overseas Corp., Construcciones Christian Nielsen y Técnica Constructora.

En 1965 se efectuó el primer vaciado de concreto de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar y para el año de 1969 comenzó a operar la primera Línea de Transmisión a 400.000 voltios Gurí - El Tigre - Santa Teresa, con una longitud de 570 kilómetros, incorporándose Venezuela al grupo de países con Sistemas de Extra Alta Tensión. En 1976 entró en operación comercial la segunda Línea de Transmisión a 400.000 voltios Gurí - Santa Teresa.

El 8 de Noviembre de 1986 el Presidente de la República, Doctor Jaime Lusinchi, inauguró la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, con una capacidad instalada de 10.000.000 de kilovatios. Representa la culminación de un esfuerzo de 23 años de notable acción creadora, convirtiéndose esta Central, por algunos años, en la de mayor capacidad instalada en el mundo, figura 2.1.



Figura 2.1. Central hidroeléctrica Simón Bolívar  
(Internet-pág. EDELCA).

En 1988 comienzan los vaciados de concreto del Proyecto Antonio José de Sucre II, que fue concebido bajo condiciones especiales por estar ubicado en Perímetro urbano de Ciudad Guayana. En enero de 1997 se inaugura la Central Hidroeléctrica de Antonio José de Sucre, denominada “Complejo Hidroeléctrico 23 de Enero”, en homenaje a la fecha insignia del sistema democrático venezolano. Esta obra representa un aporte de 2.540 megavatios a la producción nacional de electricidad, figura 2.2.



Figura 2.2. Central hidroeléctrica Antonio José de Sucre II(Internet-pág. EDELCA).

El último gran logro de la empresa CVG EDELCA fue la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Caruachi, figura 2.3. Esta represa fue inaugurada el 31 de Marzo del año 2.006 con la puesta en marcha de la unidad número 12. Este desarrollo consiste en la construcción de las presas de enrocamiento, y de una Central Hidroeléctrica con una capacidad instalada de 2.160 Megavatios y está situado a 25 kilómetros aguas arriba de Macagua.



Figura 2.3. Central hidroeléctrica Francisco de Miranda (Internet-pág. EDELCA).

En enero se iniciaron las obras preliminares del proyecto hidroeléctrico Carlos Manuel Piar (TOCOMA) en donde actualmente se ejecutan trabajos de excavación, voladuras, movimiento de tierra y vaciados preliminares de fundaciones de aliviadero de la represa que representa una de las últimas construcciones para el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico del río Caroní.

### **2.1.1 La empresa**

CVG Electrificación del Caroní, C.A (CVG EDELCA) bajo la tutela de la Corporación Venezolana de Guayana, adscrita al Ministerio de Industrias Básicas y

Minería, es la empresa de generación hidroeléctrica más importante que posee Venezuela.

Forma parte del conglomerado industrial de la CVG ubicado en la región Guayana, conformado por las empresas básicas del aluminio, hierro, acero, carbón, bauxita y actividades afines.

CVG EDELCA opera las Centrales Hidroeléctricas Simón Bolívar (GURI) con una capacidad instalada de 10.000 Megavatios, considerada la segunda en importancia en el mundo, la Central Hidroeléctrica Antonio José de Sucre (MACAGUA) con una capacidad instalada de 3.140 Megavatios, La Central Hidroeléctrica Francisco de Miranda (CARUACHI) con una capacidad instalada final de 2.280 megavatios en el año 2.006 y actualmente en construcción el Proyecto Hidroeléctrico Carlos Manuel Piar (TOCOMA).

Su ubicación en las caudalosas aguas del río Caroní, al Sur oriente del país, le permite producir electricidad en armonía con el ambiente, a un costo razonable y con un significativo ahorro de petróleo.

CVG EDELCA posee una extensa red de líneas de transmisión que superan los 5.700 Km. Cuyo sistema a 800 mil voltios es el quinto sistema instalado en el mundo con líneas de Ultra Alta Tensión en operación.

Durante los últimos años, CVG EDELCA ha aportado más del 70% de la producción nacional de electricidad a través de sus grandes Centrales Hidroeléctricas Macagua y Guri. CVG EDELCA ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo económico y social de Venezuela.

#### 2.1.1.1 Fines

a) Generar beneficio económico para los accionistas, incrementando el valor de la empresa.

b) Lograr la satisfacción de los clientes mediante un servicio de excelente calidad, basado en la gestión sustentable de los recursos, para apoyar el desarrollo del país.

#### 2.1.1.2 Misión

Producir, transportar y comercializar energía eléctrica a precios competitivos, en forma confiable y en condiciones de sustentabilidad, eficiencia y rentabilidad.

#### 2.1.1.3 Valores

- Humanismo: entendiendo por tal una gestión con sentido de justicia, pluralista y participativa, orientada al desarrollo integral de sus trabajadores, a la integración del factor ambiental en sus actividades y al compromiso social con las comunidades vinculadas a ellas.

- Participación: consiste en la promoción de una cultura que valora y motiva la generación compartida de ideas, opiniones y sugerencias, dirigidas al mejoramiento continuo de la organización. Cultura que incorpora los aportes de las comunidades e instituciones nacionales e internacionales relacionadas, estimulando la creatividad de todos los miembros de la empresa.

- Respeto: constituye el trato justo y considerado entre los trabajadores, hacia el ambiente, instituciones y organismos, clientes y proveedores, ciñéndose a la normativa de toda índole que incide sobre su actividad.

- Honestidad: refleja el comportamiento ético de sus autoridades, cuerpo gerencial y trabajadores, tanto dentro como fuera de la organización, con sentido de justicia y honradez, y la gestión transparente de todos los procesos administrativos con estricto apego a las normas.

- Compromiso: se manifiesta por la identificación y lealtad del trabajador con la empresa, la mística en el trabajo y el sentido de responsabilidad; en una institución que prioriza el trato justo y se ocupa del desarrollo integral del trabajador y su calidad de vida.

- Competitividad: el conjunto de conductas de todos los niveles de la organización que permiten disputar o contender con los demás agentes del mercado en la prestación del servicio eléctrico, con alta calidad y al menor costo posible.

- Excelencia: búsqueda de la calidad superior y perfección, a través de un mejoramiento continuo de su gente y de sus procesos internos, en el logro de las metas propuestas y en el servicio que suministra, a nivel de organizaciones de clase mundial.

#### 2.1.1.4 Visión

Empresa de servicio eléctrico de clase mundial, líder en desarrollo sustentable, pilar del progreso del país.

## **2.1.2 Departamento de Obras Geotécnicas**

### 2.1.2.1 Objetivos

- Supervisar y coordinar todas las actividades que se generan de los contratos a cargo de la División de Supervisión de Obras Civiles, cuyas características principales están asociadas a las actividades Geotécnicas, movimiento de tierra, excavación y preparación de fundaciones, inyecciones, vialidad, etc.
- Dirigir sus actividades hacia el fortalecimiento y afianzamiento del desarrollo de EDELCA dentro del marco que indica la misión de producir, transportar y comercializar energía eléctrica, a precios competitivos, en una forma confiable y en condiciones de eficiencia y rentabilidad.
- Dar cumplimiento a la visión de la empresa, siendo líderes en la prestación del servicio eléctrico, comprometidos con la conservación del medio ambiente, con un mercado diversificado a escala nacional e internacional; dotados de tecnologías de vanguardia y conformados por un recurso humano competente; orientados a la obtención de adecuados índices de calidad, rentabilidad y eficiencia, que satisfagan los requerimientos de nuestros clientes, empleados, accionistas, comunidades, proveedores y del desarrollo integral del país.

### 2.1.2.2 Funciones

- Analizar los resultados de los ensayos de laboratorio de suelos, rocas y demás materiales y componentes geológico.



- Desarrollar actividades orientadas al control de la calidad de las obras Geotécnicas y los estudios que sean requeridos.
- Asegurar que las obras Geotécnicas se efectúen de acuerdo con los parámetros establecidos en los documentos de contrato.
- Elaborar Informes sobre el avance de las Obras de tierra y roca en los diferentes sitios de aprovechamiento para la construcción de Centrales Hidroeléctricas.
- Realizar investigaciones sobre el comportamiento de los materiales utilizados en las obras Geotécnicas de los diferentes proyectos.
- Establecer los lineamientos de ejecución de las obras y demás trabajos de carácter geotécnico, necesarios para la construcción de las estructuras permanentes de las plantas hidroeléctricas de EDELCA.
- Supervisar las obras y trabajos geotécnicos con base en criterios de ingeniería de suelos, geología y demás especialidades asociadas, con el fin de cumplir las especificaciones de calidad, seguridad, tiempo y costo establecidas por EDELCA.
- Mantener contacto permanente con los contratistas y con las unidades de la Dirección de Expansión de Generación para la solución de problemas técnicos relacionados con las obras Geotécnicas, que pudieran surgir en el curso de las obras.
- Efectuar reuniones con consultares y contratista a objeto de discutir las mejores opciones para los procesos de ejecución de actividades u obras Geotécnicas para las estructuras permanentes.

- Coordinar, supervisar y dirigir los servicios de inspección contratada para las obras Geotécnicas en construcción.
- Establecer las acciones necesarias para solucionar problemas técnicos surgidos en la realización de obras geotécnicas.
- Supervisar la calidad y uso de explosivos para las excavaciones en roca y asegurar el aprovechamiento racional de los materiales de suelo y roca utilizados en las obras geotécnicas.
- Coordinar reuniones con las demás Unidades de la Dirección de Expansión de Generación a fin de informar acerca del avance de los estudios y trabajos geotécnico.
- Prestar asesoramiento técnico a las demás unidades de la empresa y a las empresas filiales de la C.V.G., en lo relativo a requerimientos de información o recursos relacionados con las obras Geotécnicas.

## **2.2 Descripción general del Proyecto Manuel Piar**

El Proyecto Manuel Piar (Tocoma) es el último de los desarrollos hidroeléctricos que constituyen el aprovechamiento hidroeléctrico del Bajo Caroní, conjuntamente con las centrales Simón Bolívar (Gurí), Antonio José de Sucre (Macagua), y Francisco de Miranda (Caruachi), las cuales ya se encuentran en operación comercial.

Como parte del desarrollo hidroeléctrico del río Caroní, los estudios conducidos por C.V.G. EDELCA, han permitido establecer el sitio óptimo de presa para el

Proyecto Manuel Carlos Piar, el cual se encuentra ubicado aguas abajo del embalse Simón Bolívar y antes de la desembocadura del río Claro en el río Caroní. Este proyecto permitirá aprovechar el resto de la energía aún sin explotar del Bajo Caroní, utilizando de manera óptima la capacidad de regulación que ofrece el embalse Simón Bolívar.

Las obras para controlar el embalse incluirán la construcción de un Aliviadero con nueve compuertas radiales, como se muestra en la figura 2.4 y las Presas de cierre correspondiente. Tendrá una capacidad de descarga similar a la de Guri de 28.750 m<sup>3</sup>/seg. Con una longitud de 175,86 metros, capacidad máxima 28.750 m<sup>3</sup> y 9 compuertas radiales cuyas dimensiones son de 15,24 metros de ancho por 21,66 metros de altura.

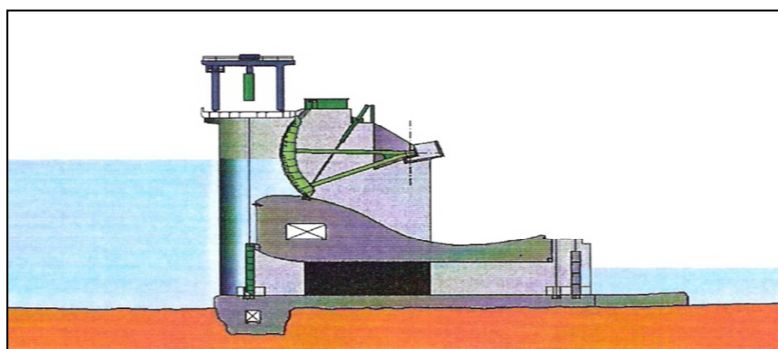


Figura 2.4. Sección típica del Aliviadero (EDELCA).

La casa de máquinas y la nave de montaje, como se muestra en la figura 2.5, serán del tipo integrado con la estructura de toma. La casa de máquinas estará constituida por 5 monolitos, los cuales albergarán 10 turbinas hidráulicas tipo Kaplan de capacidad nominal de 216 MW, 10 generadores de corriente alterna, tipo Paraguas, con un voltaje nominal de 13,8 KW, un número de tres (3) fases, una frecuencia de 60 Hz y un factor de potencia de 0,93; con sus correspondientes naves de servicio y una

nave de montaje de 60 metros de longitud, a continuación se muestra la sección típica de casa de máquinas.

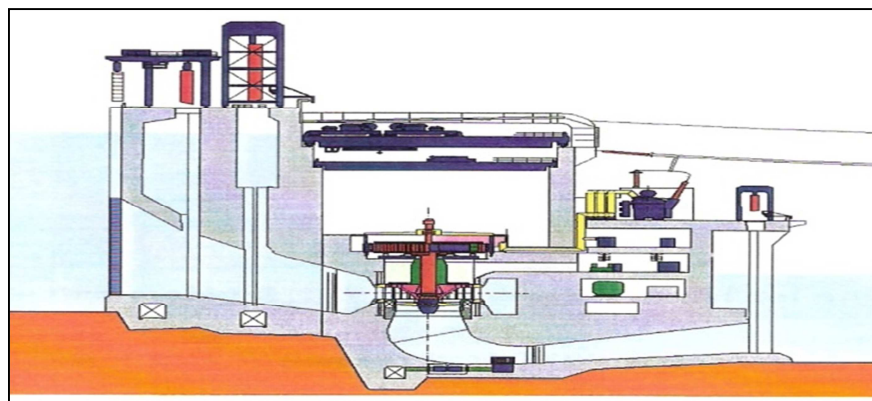


Figura 2.5. Sección típica de casa de máquinas (EDELCA).

La ubicación y alineación de las estructuras civiles obedecerá a la optimización de las condiciones geológicas, topográficas, hidráulicas, y energéticas del Proyecto. Una vez que se hayan ejecutado todas las obras se constituirá el embalse, cuya cota normal será de aproximadamente 127.00 m. s. n. m., inundando un área de 85 Km<sup>2</sup>.

Las estructuras de concreto estarán conectadas con el estribo derecho mediante una Presa de Tierra y Enrocamiento con núcleo de material impermeable la cual tendrá una longitud de 1.900 m. y con el estribo izquierdo, mediante una Presa de Enrocamiento con Pantalla de Concreto, con una longitud de 3.800 m.

Las diferentes fases de desvío del río, así como la geometría de las estructuras hidráulicas temporales y permanentes están siendo ensayadas en modelos hidráulicos a gran escala construidos en el Laboratorio de Hidráulica de C. V. G. EDELCA, ubicado en la central Antonio José de Sucre. El área del laboratorio disponible para la construcción de modelos cubre unos 20.000 m<sup>2</sup>. En el modelo hidráulico

tridimensional del Proyecto Manuel Carlos Piar, a escala 1:80, se están llevando a cabo estudios para optimizar el diseño adoptado para el Proyecto.

Los estudios tanto para la primera y la segunda etapa de desvío se realizaron para caudales de 4.000 a 14.000 m<sup>3</sup>/s. Los niveles de agua, aguas abajo del sitio de la presa, serán impuestos por el remanso aguas arriba del embalse Francisco de Miranda.

### **2.2.1 Potencial hidroeléctrico**

La energía promedio anual que aportará el conjunto de Centrales del Bajo Caroní, al Sistema Eléctrico Nacional asciende a 88.500 GWh/año. En la actualidad, el conjunto Simón Bolívar/Antonio José de Sucre, entrega una Energía Promedio de 63.440 GWh/año, la cual a partir de este año, se incrementará en aproximadamente 13.000 GWh/año con la puesta en marcha de la central Francisco de Miranda. La construcción de la presa Manuel Carlos Piar completa el desarrollo del potencial energético del Bajo Caroní con una Energía Promedio Anual de 12.060 GWh/año, siendo una de las mayores bondades de este Proyecto la poca fluctuación de los niveles aguas arriba y aguas abajo por lo que la mayor cantidad de energía generada será firme.

Las características energéticas del Proyecto Manuel Carlos Piar están predeterminadas por la descarga regulada de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar. El Proyecto consta de diez (10) unidades generadoras, las cuales tendrán una potencia de aproximadamente 216 MW cada una, para un total de 2.160 MW de capacidad instalada.

## 2.2.2 Ubicación geográfica del área

El Proyecto Manuel Piar se ubicará al Noreste del estado Bolívar a unos 15 km. Aguas abajo de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, entre la población de Río Claro y la Serranía de Terecay. En las siguientes ilustraciones se muestra la ubicación relativa de los distintos sitios de presa ubicados en la cuenca del Caroní, así como la escalera de elevaciones correspondientes a los embalses de cada uno de los proyectos del Bajo Caroní el nivel fluctuante del río Orinoco. Como se muestra en la figura 2.6

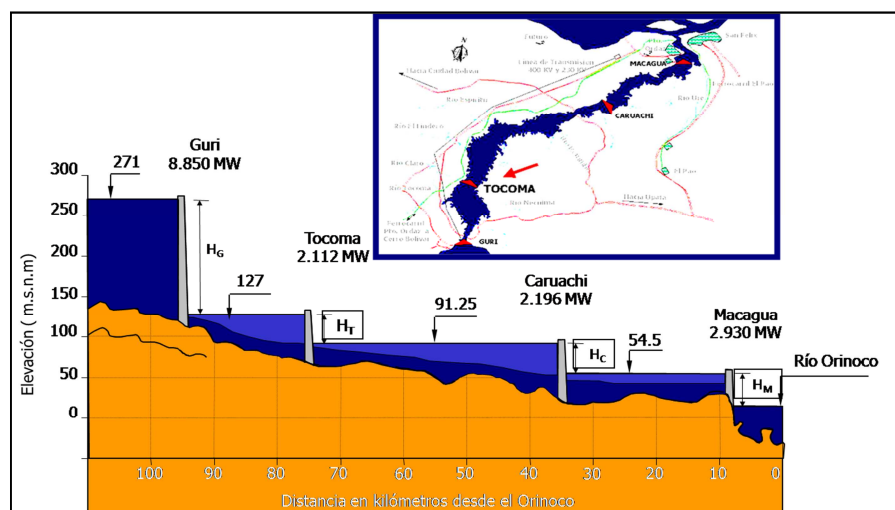


Figura 2.6 Proyectos del Bajo Caroní (Rodríguez y Luzardo,2006).

## 2.2.3 Acceso al área

El acceso terrestre al sitio del Complejo hidroeléctrico Manuel Piar se realizará desde la carretera Nacional de acceso a Raúl Leoni, aproximadamente 6 km. antes de la alcabala de entrada a la Central hidroeléctrica Raúl Leoni. El acceso tendrá 6,7 km. Hasta el sitio de la obra, como se muestra en la figura 2.7.

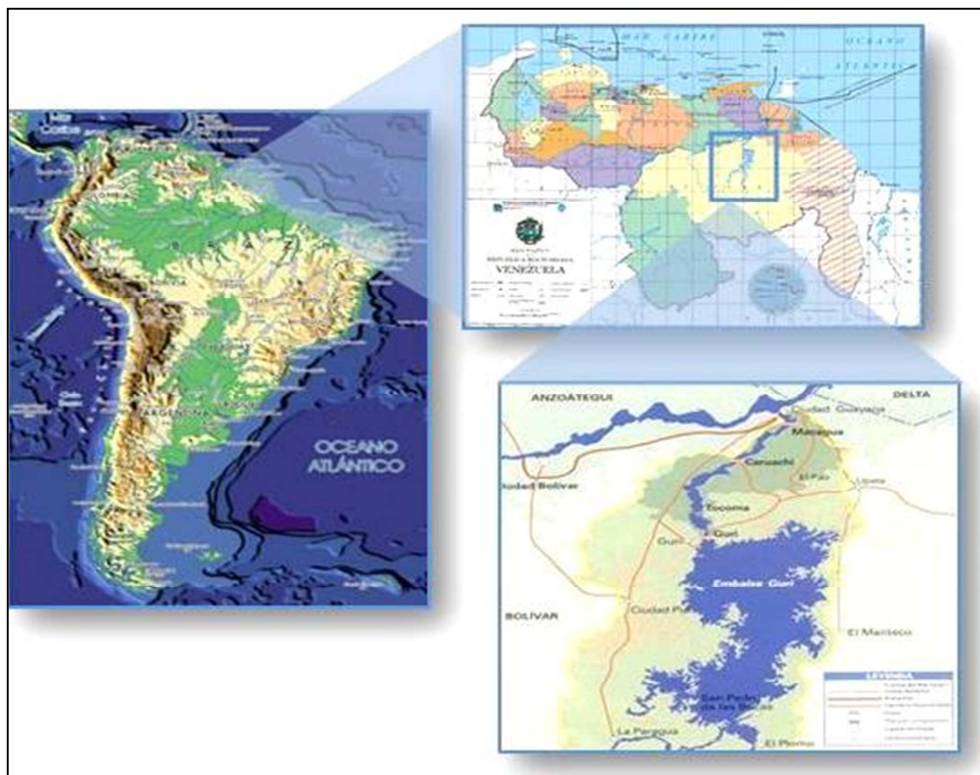


Figura 2.7. Ubicación de la cuenca del río Caroní (Internet-pág. EDELCA).

#### 2.2.4 Características físicas y naturales

2.2.4.1 Descripción del sitio: en el sitio de Tocoma, el río Caroní se amplía a unos 2000 m. y fluye sobre los gneises graníticos característicos del Complejo Imataca del Precámbrico Inferior del Escudo de Guyana. Sus masas rocosas están cortadas por un sistema de fallas que divide el área en grandes bloques con dimensiones variables entre 500 y 1.000 m.



2.2.4.2 Estructura geológica: su estructura geológica principal es la falla de El Pao, (figura 2.8) ubicada entre el Cañón de Necuima y la prolongación del río Claro hacia la Cordillera de Terecay. La extensión de esta falla es de aproximadamente 200 Km., con un ancho de unos siete kilómetros aguas arriba del sitio.

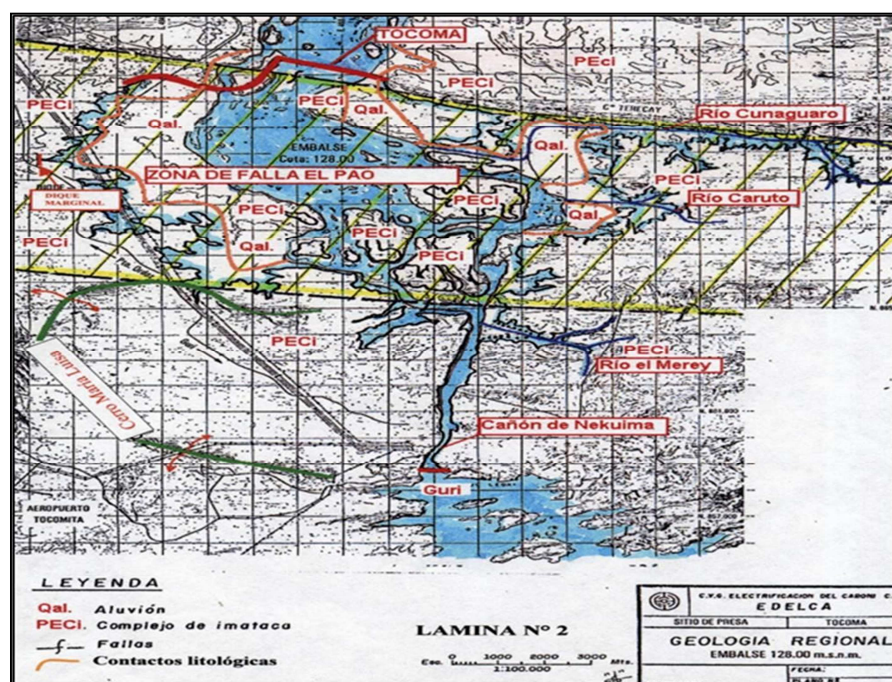


Figura 2.8 Ubicación de la Zona de la Falla El Pao (EDELCA).

2.2.4.3 Perfiles: el estribo derecho del Proyecto Tocoma está formado por la Serranía Terecay, constituida por gneises graníticos, recubiertos por rocas descompuestas.

El estribo izquierdo del Proyecto Tocoma está ubicado sobre un relieve de lomas relativamente planas, con afloramientos rocosos, cubiertas por suelos residuales y rocas descompuestas de poco espesor. El perfil estratigráfico en esta área está constituido por gnéisses meteorizados a frescos duros, fracturados y descompuestos, fajas de rocas milonitizadas, brechas recristalizadas y otros tipos de rocas pertenecientes al Complejo de Imataca.



2.2.4.4 Sismicidad: la sismicidad en el área ha sido registrada desde 1974. Para efectos de diseño se ha adoptado un sismo con intensidad máxima de 5,0 en la escala de Richter, una aceleración de 0,16 g (horizontal) y 0,10 g (vertical). De acuerdo con los criterios establecidos en el diseño, Guri y Tocoma pueden quedar afectados por la sismicidad inducida por el embalse de Guri, efecto que fue considerado en la determinación de los niveles de aceleración, mientras que Caruachi y Macagua son afectados por la sismicidad natural de la región oriental venezolana. La mayor actividad registrada hasta la presente fecha se ubica a unos 50 Km. Al sur del sitio de tocoma, en el embalse de Guri, donde hasta la fecha han sido registrados cuatro eventos con magnitudes entre 4,0 y 4,3 grados en la escala de Richter.

2.2.4.5 Hidrología: la cuenca del río Caroní está situada en el Estado Bolívar, al sureste de Venezuela aproximadamente entre  $3^{\circ} 40'$  y  $8^{\circ} 40'$ , de latitud Norte y entre  $60^{\circ} 50'$  y  $64^{\circ} 10'$ , de longitud Oeste. Esta cuenca hidrográfica cubre aproximadamente 95.000 Km. (10,5% del territorio venezolano), de las cuales, 47.000 Km<sup>2</sup> corresponde al Alto Caroní, desde su nacimiento en la frontera con Brasil hasta la confluencia con el río Paragua; 33.000 Km<sup>2</sup> forman la cuenca del río Paragua y los 15.000 Km<sup>2</sup> restantes corresponden al Bajo Caroní, desde su unión hasta su desembocadura en el río Orinoco. La cuenca del río Caroní posee el mayor potencial hidroeléctrico de Venezuela y una de las mayores del mundo. Se estima este potencial en 26.000 MW en toda la cuenca, de los cuales, aproximadamente 17.000 MW corresponde al Bajo Caroní.

El río Caroní aporta caudales anuales promedio de 4.824 m<sup>3</sup>/seg., habiéndose registrado una creciente máxima de 17.576 m<sup>3</sup>/seg. Y un gasto mínimo de 188 m<sup>3</sup>/seg.

2.2.4.6 Basamento de la cuenca: el basamento de la cuenca está compuesto principalmente por rocas precámbricas del Escudo de Guayana, cuyas edades radiométricas oscilan entre 3.500 y 900 millones de años. Tres de las cuatro unidades litoestratigráficas del Escudo de Guayana son cruzadas por los ríos Caroní y Paragua; El Complejo de Imataca (facies de granulita-anfibolita) en la cuenca baja; la provincia de Pastora (rocas verdes) en la parte norte de la cuenca media y la provincia de Roraima (cuarcitas y conglomerados) en las cuencas media y alta.(Figura 2.9)



Figura 2.9 Edades Sn/Nd del protolito Complejo de Imataca (Teixeira y otros ,en González 2002).

2.2.4.7 Fisiografía: los paisajes fisiográficos de la cuenca son muy variados e incluyen planicies aluviales, penillanuras, altiplanicies bajas a 50 m.s.n.m. y altiplanicies disectadas a 2.800 m.s.n.m. en los llamados "tepuyes". El clima de la cuenca es tropical y está determinado por la posición y actividad de la convergencia intertropical y los vientos alisios del norte; sin embargo el escalonamiento altitudinal produce una neta diferenciación térmica, que abarca desde la zona baja con temperaturas medias anuales superiores a los 24°C, hasta las cumbres de los "tepuyes", donde las temperaturas medias anuales oscilan alrededor de los 10°C. (C.V.G EDELCA, Área de generación 2010).

2.2.4.8 Vegetación: la vegetación de la cuenca es muy variada como corresponde a la multitud de paisajes fisiográficos y a la variedad de tipos de sustratos que incluye desde rocas desnudas hasta suelos arcillosos profundos, pasando por una gama de suelos arenosos, franco-arenosos y limosos. No obstante, la formación vegetal predominante está constituida por grandes bosques que cubren aproximadamente el 60% de la superficie total de la cuenca. (C.V.G EDELCA, Área de generación 2010).

El Caroní es un río de los llamados de aguas negras por su color oscuro, parecido al del té fuerte, debido básicamente a su alto contenido de sustancias húmicas. Sus aguas son pobres en electrolitos ácidos, con un pH generalmente alrededor de 6 y muy bajo contenido de sedimentos en suspensión. Los pocos sedimentos que arrastra, los empuja por el fondo.



Figura 2.10 Vista Aérea del Proyecto Hidroeléctrico Tocoma.  
(EDELCA).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Antecedentes de la Investigación**

1. Rodríguez y Luzardo (2006), para optar al Título de Ingeniero Civil. Titulado “ Estudio para la determinación del proceso Constructivo de la Cortina de Inyección de la Presa Izquierda de la Central Hidroeléctrica Manuel Carlos Piar”.

Se evaluó la permeabilidad del macizo rocoso en el plano de inyecciones, mediante el análisis del estudio geológico realizado con anterioridad por la empresa C.V.G EDELCA, en las zonas aguas arriba de la Presa del proyecto Hidroeléctrico “Manuel Carlos Piar” (Tocoma). Se analizó e interpretó el procedimiento constructivo de la cortina de inyección basado en el método de espaciamientos decrecientes, que realiza tradicionalmente la empresa, valorando su diseño y calidad, a fin de introducir reajustes que produzcan al mismo rendimiento técnico un beneficio enfocado en la disminución de sus costos de perforación, inyección y mano de obra. Los resultados obtenidos Se propuso usar como criterio la ejecución de perforaciones de orden superior al primario cuando la permeabilidad sea superior a  $1,0 \times 10^{-4}$  cm/seg y la realización de una prueba de presión que determine la permeabilidad natural del sustrato en cada perforación primaria con la finalidad de decidir la inyección de barrenos de orden superior al primario, aspecto que no es considerado por el Procedimiento Constructivo tradicional de C.V.G EDELCA.

2. El Departamento de Obras Geotecnicas es el encargado de supervisar y coordinar todas las actividades de carácter geotécnico que se generan en los contratos a cargo de la División de Supervisión de Obras Civiles, dentro de estas actividades

tenemos: movimiento de tierra, excavación y rellenos de roca, preparación de fundaciones, inyecciones, vialidad, etc.

Entre sus funciones destaca desarrollar actividades orientadas al control de la calidad de los trabajos en el ámbito de la geotecnia así como y los estudios que sean requeridos. En Julio de 1997, en vista de mejorar los procesos de construcción de cortina de inyección en el Proyecto Caruachi, se realizan una serie de revisiones al procedimiento de inyección utilizado hasta ese momento y los resultados de este trabajo se recogen en el informe denominado: “Informe relativo de los tratamientos de Inyecciones de Consolidación y Cortina en el dentellón de la Presa de Enrocamiento Derecha con Pantalla de Concreto.

A la luz de los resultados de este informe y tomando en cuenta las condiciones geomorfológicas de la fundación de la presa izquierda de Tocomá, se decide realizar nuevos ajustes en los procedimientos constructivos de la cortina de inyección. Los cuales fueron implementados durante la construcción de la misma.

## **3.2 Bases teóricas**

### **3.2.1 Presas de embalse**

Una presa es una estructura hidráulica que se construye con la finalidad de crear un embalse para regular los escurrimientos de un río o bien, con el propósito de desviar sus aguas fuera de su cauce natural. Usualmente, las presas se construyen a través de los valles por donde corren los ríos y el área por ellas ocupada recibe el nombre de sitio de presa.

Las presas pueden clasificarse de acuerdo con varios criterios, a saber: el tipo de material predominante utilizado en su construcción, su finalidad principal y su

altura. Se hará, en este caso, la clasificación de acuerdo con el primero de los criterios señalados, pues es el más importante de los tres y el de empleo más común.

Existen tres clases de presas que derivan su nombre del tipo de material predominante en su sección: presas de concreto, presas de enrocado y presas de tierra; estas dos últimas se agrupan a veces bajo la denominación de presas de materiales sueltos. Las presas de concreto pueden, a su vez, subdividirse en: las de tipo convencional y las compactadas con rodillo (más conocidas por su denominación anglosajona RCC "Roller Compacted Concrete") que empezaron a utilizarse a gran escala en la década de los 80.

Por su altura, las presas pueden catalogarse como bajas, medianas y altas. Presas bajas son aquellas cuya altura sobre la fundación no supera los 30 metros, las medianas son las que están comprendidas entre 30 y 100 metros y las altas las que superan los 100 metros. El ICOLD, considera que una presa es grande si tiene más de 30 metros de altura. Esta clasificación es algo arbitraria y tiene solamente una finalidad estadística.

A continuación se da una breve descripción de cada uno de los tres tipos: concreto, tierra y enrocado.

3.2.1.1 Presas de concreto: Como se expuso anteriormente, en la actualidad, las presas de concreto se dividen en dos grupos:

- Presas convencionales: hechas con concreto vibrado cuya composición, colocación y consolidación son las tradicionales.

- Presas compactadas con rodillo, hechas con un concreto que corresponde a un nuevo material, ya que su composición difiere sensiblemente de los concretos convencionales y resulta en un concreto de consistencia seca y asiento nulo. La técnica es distinta pues la colocación y consolidación difieren de los métodos empleados tradicionalmente, recurriendo a medios diferentes, semejantes a los empleados en grandes movimientos de tierra.

Con el enorme desarrollo en la construcción de carreteras y autopistas y con el incremento observado en la construcción de grandes presas de materiales sueltos, a partir de la mitad de este siglo, las presas compactadas con rodillo han experimentado un notable auge.

Con los concretos tradicionales (vibrados) existen varios tipos de presas construidas como son las:

- Gravedad (planta recta o curva), se definen como presas de gravedad aquellas presas sólidas construidas de concreto o mampostería y en las cuales las cargas actuantes son soportadas, principalmente por el peso que poseen, es decir, la estabilidad de la estructura se consigue únicamente por el peso.

- Arco (arco-gravedad o bóvedas), son presas construidas de concreto que muestran en planta o en perfil un alineamiento curvo, cóncavo hacia aguas arriba visto desde aguas abajo. En ellas la mayor parte de la fuerza actuante son transmitidas mediante el efecto arco a las paredes del sitio de presa (estribos), siendo el resto de ellas soportadas, en formas similar a las de gravedad

- Contrafuertes o gravedad aligerada, aunque actualmente se encuentran prácticamente en desuso, conviene, conocer que son aquellas presas que resisten las



fuerzas actuantes mediante dos elementos estructurales: un tablero inclinado soportado por contrafuertes que, a su vez, transmiten dichas fuerzas a la fundación

Con los concretos compactados, hasta ahora sólo se han construido presas de gravedad o arco-gravedad, pero no hay que descartar, en un futuro más o menos próximo, su utilización en las presas tipo abovedado.

3.2.1.2 Presas de enrocado: Están constituidas básicamente por fragmentos de roca. El elemento impermeabilizante está conformado, generalmente, por una membrana apoyada sobre el talud aguas arriba, la cual puede estar construida de diferentes materiales, o también, por una pantalla vertical ubicada en el centro de la presa; existe también la variante con un núcleo impermeable. Las fuerzas actuantes son soportadas por gravedad. Estas presas se construyen con ejes rectos, aunque algunas veces se introducen curvaturas a fin de adaptarse mejor a la topografía del sitio. (Figura 3.1).

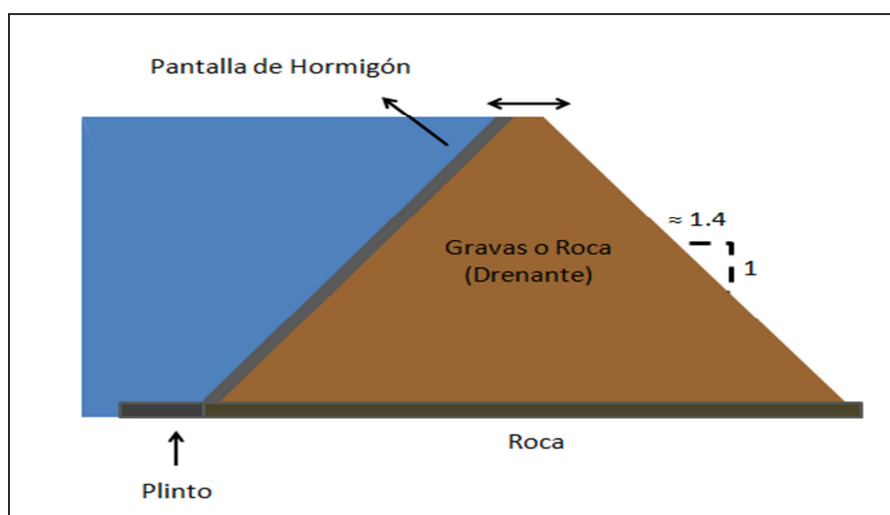


Figura 3.1 Sección transversal de la presa de enrocado.

3.2.1.3 Presas de tierra: Son aquellas en cuya sección predominan los siguientes materiales: arcillas, limas, arenas y gravas, colocados y compactados mediante equipos convencionales de movimiento de tierra o bien como rellenos hidráulicos. Las presas de tierra se adaptan bien a cualquier tipo de alineamiento. Dentro de este tipo de presa se han incluido aquellas en cuya sección predominan zonas de enrocado compactado, pero cuyo elemento impermeabilizante está conformado por un núcleo construido a base de suelos impermeables. Esta clasificación obedece a la similitud que desde el punto de vista de diseño y comportamiento tienen estas presas con las presas de tierra que poseen espaldones de gravas.

3.2.1.4 Presas mixtas: Existen presas de tipo mixto, es decir, que en toda su longitud tienen, por ejemplo, un tramo de tierra y otro de concreto por gravedad. En estos casos, cada tramo se diseña de acuerdo con el tipo correspondiente, prestando especial cuidado a las superficies de contacto. Un ejemplo es el de la presa de Gurí en Venezuela.

### **3.2.2 Diseño de una presa**

Una presa debe ser impermeable; las filtraciones a través o por debajo de ella deben ser controladas al máximo para evitar la salida del agua y el deterioro de la propia estructura. Debe estar construida de forma que resista las fuerzas que se ejercen sobre ella. Estas fuerzas que los ingenieros deben tener en cuenta son: la gravedad (que empuja a la presa hacia abajo), la presión hidrostática (la fuerza que ejerce el agua contenida), la presión hidrostática en la base (que produce una fuerza vertical hacia arriba que reduce el peso de la presa), la fuerza que ejercería el agua si se helase, y las tensiones de la tierra, incluyendo los efectos de los sismos.

Cuando se valora el mejor emplazamiento para construir una presa, el riesgo de terremotos forma parte del análisis geológico. Además, los geólogos deben determinar qué tipo de terreno está expuesto a filtraciones y cuál puede soportar el peso de la presa y el agua que contendrá detrás de ella.

### **3.2.3 Estudios geológico-geotécnicos preliminares**

El proceso de planificación y selección del tipo de presa más adecuado para un sitio determinado, requiere el análisis de varios factores, para cuya consideración es indispensable que previamente se disponga de una información básica suficiente y acorde con los problemas detectados.

La información geotécnica deberá estar constituida por: geología del sitio de presa y de las estructuras conexas, geología del vaso de almacenamiento y estudio de los materiales de construcción disponibles

El estudio geológico-geotécnico del sitio de presa y de las estructuras conexas permitirá determinar las características y condiciones de la fundación. Esta tarea será más o menos compleja, de acuerdo con la naturaleza del medio que constituye la fundación; por ejemplo, en masas rocosas heterogéneas atravesadas por fallas, fracturas y diaclasas, o bien por capas de suelos heterogéneos, el nivel de información requerido en cuanto a las propiedades físicas y resistentes, será más detallado que en suelos homogéneos o en rocas sanas.

Esta serie de consideraciones señalan los muchos y diversos factores que deben tomarse en cuenta al momento de evaluar una fundación en relación con el posible tipo de presa que se pueda construir en un determinado lugar. De aquí la importancia trascendental de disponer de un buen estudio geológico-geotécnico. La colaboración de geólogos e ingenieros geotécnicos competentes es indispensable a fin de unir

conocimientos que permitan determinar no solamente el comportamiento de la fundación, sino también resolver los problemas que pudieran presentarse.

### **3.2.4 Geología del subsuelo**

A medida que se efectúan los estudios geológicos de superficie del sitio de presa, se deben desarrollar también los correspondientes a los del subsuelo.

El estudio geológico del subsuelo debe programarse de acuerdo con datos geológicos y topográficos preliminares. Con ellos el ingeniero proyectista conjuntamente con el geólogo pueden seleccionar los ejes tentativos de cada estructura para su investigación geológica definitiva.

El método generalmente empleado para el conocimiento de las características del subsuelo, consiste en ejecutar una serie de perforaciones sobre y en los alrededores del eje de la presa, único medio de llegar a las profundidades que permitan seleccionar la zona donde se apoyarán las estructuras.

3.2.4.1 Perforaciones exploratorias: La localización de los planos débiles en la roca y la determinación de sus características es una tarea difícil, en primer lugar porque no hay una evidencia superficial de ellas y en segundo lugar, porque cuando se perfora una roca los testigos recuperados corresponden generalmente a la roca sana, ya que los materiales débiles no pueden ser recuperados.

Las perforaciones exploratorias son aquellas realizadas con equipo de rotación con el propósito de obtener muestras perturbadas y/o no perturbadas que sean testigos de las características de fracturamiento y calidad del lugar de estudio.

El equipo comúnmente utilizado para el estudio del subsuelo de las presas, es la sonda de diamantes, que es una barrera rotatoria con un tubo protector con una cabeza de diamante encargada de cortar el sustrato en forma cilíndrica, descendiendo en el hidráulicamente o con un tornillo de avance.

Los distintos tamaños de barrenas se identifican como NX, ZX, AX y EX, que proporcionan testigos de 21/8, 15/8, 11/8 y 7/8 pulgadas respectivamente.

### 3.2.5 Índice de Calidad de Roca RQD (Rock Quality Designation)

El índice RQD (Rock Quality Designation) desarrollado por Deree entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.

El procedimiento consiste en la sumatoria de los trozos de testigos iguales o mayores a 10 cm,

dividido entre la longitud del tramo perforado multiplicado por cien (100), como se muestra en la ecuación 3.1.

$$RQD (\%) = \frac{(\sum \text{trozos} > 10\text{cm})}{L} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

L. Longitud del intervalo perforado.

Los testigos rotos durante la perforación, deben ser incluidos en el conteo de los trozos mayores de 10 cm. Las zonas débiles o blandas, deben ser descartadas en el conteo aún cuando tengan longitudes mayores a 10cm. Las discontinuidades paralelas al eje del los testigos no serán tomadas en cuenta. En la tabla 3.1 se muestra la calidad de la roca de acuerdo al valor de RQD.

Tabla 3.1 Calidad de la roca de acuerdo al valor de RQD

% RQD	DIACLAS AS POR METRO	CALIDAD DE LA ROCA
90-100	< 3	Excelente (sana)
75-90	3-6	Buena
50-75	6-10	Poco a medianamente fracturada
25 -50	10-20	Fracturada o medianamente fracturada
0-25	> 20	Muy fracturada o altamente fracturada

### 3.2.6 Nomenclatura de las rocas en función al nivel de meteorización

3.2.6.1 Roca fresca (RF): Roca que conserva sus características originarias y no muestra alteraciones químicas en sus minerales, y es afectada a veces por discontinuidades estructurales como fallas y diaclasas.

3.2.6.2 Roca Meteorizada (RM): Aquellas Rocas sustancialmente duras y parcialmente alteradas por la meteorización, sus pesos unitarios son menores que los de roca fresca al igual que su resistencia a la compresión, la cual varía entre amplios rangos según su grado de alteración. Los planos de las discontinuidades suelen ser abiertos y oxidados

3.2.6.3 Roca meteorizada dura (RMd): Se refiere a una masa de roca que ha experimentado cambios en sus componentes mineralógicos. Se adicionan los calificativos de leve o moderadamente meteorizados, para indicar el grado de afección de los materiales.

3.2.6.4 Roca Meteorizada blanda (RMB): Se refiere a una masa de roca intermedia de dureza relativa, cuyos minerales no están meteorizados o alterados totalmente.

3.2.6.5 Roca descompuesta (RD): Consiste en la formación de mantos residuales y rocas descompuestas blandas, de espesores variables, de 1 a 24 metros de carácter areno-limosa-arcillosa de consistencia blanda y porosa; de peso unitario usualmente más bajo que el del suelo residual derivado de ella.

### **3.2.7 Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

1. la porosidad del material;
2. la densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura;
3. la presión a que está sometido el fluido.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

La permeabilidad se puede determinar directamente mediante la Ley de Darcy mediante la siguiente fórmula:

$$Q = K * I * A \quad (3.2)$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de agua drenada a través de la muestra por unidad de tiempo, (cm<sup>3</sup>/h)

$K$  = Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad. Se expresa generalmente en(cm/h).

$I$  = gradiente piezométrico disponible; (m/m)

$A$  = Sección transversal por donde se filtra el agua en la muestra (cm<sup>2</sup>).

En geología la determinación de la permeabilidad del suelo tiene una importante incidencia en los estudios hidráulicos portante del sustrato (por ejemplo previo a la construcción de edificios u obras civiles), para estudios de erosión y para mineralogía, entre otras aplicaciones.



La permeabilidad del suelo suele aumentar por la existencia de fallas, grietas, juntas u otros defectos estructurales. Algunos ejemplos de roca permeable son la caliza y la arenisca, mientras que la arcilla o el basalto son prácticamente impermeables.

En la tabla 3.2 se muestra diferentes grados de permeabilidad en función al valor que presenten.

Tabla 3.2 Clasificación de los suelos según su coeficiente de permeabilidad (Terzhaghi y Peck, 1.967 en Rodríguez y Luzardo 2006)

GRADO DE PERMEABILIDAD	VALOR DE K (cm/seg)
Elevada	$> 10^{-1}$
Media	$10^{-1} - 10^{-3}$
Baja	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy Baja	$10^{-5} - 10^{-7}$
Prácticamente Impermeable	$< 10^{-7}$

### 3.2.8 Pruebas de permeabilidad

Estas pruebas constituyen también una parte esencial del estudio y se ejecutan simultáneamente con las perforaciones. Estas se realizan tanto en los sedimentos aluviales como en las formaciones rocosas que constituyen el sitio de presa.

Para los sedimentos aluviales y cualquier otro tipo de suelos, se emplea el método de ensayo por gravedad, cuyos cálculos permiten determinar el volumen de agua que puede esperarse en el área de excavación. Con el resultado de estas pruebas, puede elaborarse un programa para procurar un descenso determinado de la masa de agua, o bien, proyectar obras de intercepción del flujo de agua por medio de pantallas

impermeables que permitan garantizar la ejecución de las excavaciones propuestas con relativa comodidad.

Para las formaciones rocosas las pruebas de permeabilidad se efectúan por presión y con los valores calculados, se puede estimar si es necesario un tratamiento de la fundación, consistente en inyecciones de impermeabilización y/o consolidación.

3.2.8.1 Ensayos Lugeon: Consisten en anotar los caudales absorbidos a presiones crecientes y decrecientes, manteniendo cada caudal durante 10 minutos. El resultado viene expresado por la medida de agua absorbida en litros por minuto, por metro lineal, para una presión de inyección de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , siendo cada tramo de sondeo ensayado de 5m de longitud. Actualmente todas estas condiciones se conocen con el nombre de unidad Lugeon. Con cantidades inferiores a la unidad Lugeon podemos considerar que la inyección resulta innecesaria: El criterio Lugeon es adecuado para ser aplicado en presas de más de 30 m de altura. Por debajo de esta altura, se puede establecer como límite de permeabilidad el inferior a tres unidades Lugeon.

Raramente dan los mismos resultados las medidas hechas a presiones crecientes y decrecientes. Cuando la prueba no se lleva a una presión de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , no se puede aplicar el criterio Lugeon más que admitiendo por ejemplo,  $0,1/\text{min}/\text{m}$  con  $1 \text{ Kg/cm}^2$  si se ha podido alcanzar ésta presión, o haciendo una extrapolación lineal de  $10 \text{ Kg/cm}^2$  en el diagrama que se obtenga.

Según Camberfort, Henri (1968), estos ensayos se realizan siempre antes de la inyección de una zona. Ante el gran número de medias así reunidas, se ha tratado de relacionar el número de unidades Lugeon en una zona con su absorción de cemento. Si se pudiese establecer a ciencia cierta esa relación, se simplificaría bastante el reconocimiento, ya que el ensayo de agua indicaría a la vez el estado de fisuración de la roca y la cantidad de lechada necesaria para el mejoramiento del sustrato con

inyecciones. Todas las tentativas realizadas en este sentido no han conducido más que a leyes muy aproximadas.

### **3.2.9 Tratamientos de fundaciones**

Estos tratamientos son llevados a cabo una vez concluidas las operaciones de excavaciones, las áreas afectadas por las excavaciones requieren un tratamiento de superficie conjuntamente con el tratamiento interno de la roca de fundación, mediante inyecciones de cemento u otros medio impermeabilizantes.

Con respecto al tratamiento de la roca de fundación, este depende de las pruebas de permeabilidad hechas durante los estudios del subsuelo, cuyos valores nos indicarán la conveniencia o no de inyectar cemento como solución para la impermeabilización, conjuntamente con un mejoramiento de consolidación de la roca.

Cuando el tratamiento es necesario, entonces el estudio geológico detallado es de mucha importancia, pues ayudara a planificar como debemos efectuar las perforaciones para la inyección de cemento, ya que esta está supeditada a la orientación de las diaclasas y a la posición de las capas de las rocas estratificadas.

La línea de perforaciones para las inyecciones debe seguir el eje del fondo del dentellón. Cuando las capas de rocas tienen poca inclinación son preferibles las perforaciones verticales. En esta forma se tendrá un ángulo conveniente para hacer más efectiva la penetración de la lechada de cemento. Cuando la estratificación es muy inclinada, incluso vertical, se combinan las perforaciones verticales inclinadas convenientemente.

Cuando las capas de roca tienen demasiado fracturamiento, especialmente en la superficie donde se apoyará la estructura, se efectúa adicionalmente un tratamiento hacia aguas arriba de la pantalla de impermeabilización.

3.2.9.1 Inyecciones: Las inyecciones son procedimientos que se aplican al subsuelo, mediante los cuáles se introduce en los poros o fisuras del medio a tratar un producto líquido (mortero o lechada), que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo.

El objetivo principal de este tratamiento es el de impermeabilizar o fortificar los macizos porosos, rocas fisuradas o fundaciones defectuosas, incrementando de este modo las propiedades mecánicas de los mismos.

#### 3.2.9.2 Tipos de Inyecciones

- Inyección de consolidación: Este tipo de inyección tienen como propósito principal, rellenar fisuras y diaclasas abiertas a los niveles de fundación. Para esto se le practica a las rocas de cemento, perforaciones que son generalmente pocas profundas, oscilan entre 5 y 6 metros.

Estas perforaciones se ubican formando una malla, es decir, están en una disposición por aéreas. Generalmente esta disposición respeta las figuras geométricas como cuadrados, triángulos etc. En el Proyecto Tocomá se utiliza la figura del triángulo, se conoce como perforaciones en tresbolillo.

- Las Cortinas de Inyección: Se realizarán mediante el proceso de perforación e inyecciones profundas a alta presión, según una o varias líneas paralelas. Generalmente son utilizadas para crear "pantallas" para la

impermeabilización profunda de la roca, especialmente en presas de enrocado con pantalla de concreto y en estructuras de concreto.

3.2.9.3 Lechada de Inyección: Esta deberá ser una mezcla homogénea de cemento, agua (podrá requerir bentonita, microsílíce y/o arena, previa aprobación de EDELCA) y/o aditivos donde así se requiera y se especifique en los planos, cuyas proporciones se determinaran en base a los ensayos efectuados, que será inyectada por métodos mecánicos en las perforaciones de inyección, consolidación y juntas.

3.2.9.4 Relación agua-cemento: Es la proporción entre los pesos de agua y cemento en una mezcla de inyección, que asegure una buena trabajabilidad y resistencia requerida. Las diferentes muestras de lechadas serán propuestas por el contratista de acuerdo a los diferentes requerimientos de uso y EDELCA la aprobara de acuerdo a su comportamiento en las pruebas de laboratorio y campo. Las mismas podrán ser modificadas en el transcurso de lo trabajos, de acuerdo a las condiciones encontradas en el sitio.

### **3.2.10 Métodos de inyección**

Según las Especificaciones Técnicas de CVG EDELCA establecen los siguientes métodos:

a) Inyección en una sola etapa: Este consistirá en ejecutar, lavar e inyectar la perforación en toda su profundidad, en una sola etapa.

b) Inyección en etapas sucesivas: Método 1, este es comúnmente conocido con el nombre de inyección con obturadores consistirá en ejecutar y lavar la perforación en toda su profundidad inyectándola después en las siguientes etapas sucesivas:

1. Aislamiento del tramo inferior de la perforación por medio de obturadores.
2. Inyección de lechada en dicho tramo.
3. Remoción de los obturadores y de los tubos de inyección, después que la lechada haya fraguado inicialmente.

En cada etapa sucesiva se deberá repetir el mismo procedimiento, con los empaques colocados a una elevación superior, y reduciendo la presión de agua.

Método 2: Según este método tanto la perforación como la inyección, deberán ser ejecutadas en etapas sucesivas, de acuerdo a lo siguiente: (Figura 3.2).

1. Ejecución de la perforación de inyección hasta una profundidad predeterminada, o hasta una profundidad menor que la predeterminada, donde haya un aumento o una disminución considerable de agua en la perforación.
2. Lavado de la etapa perforada, según se requiera, e inmediatamente inyección de lechada en dicha etapa.
3. Lavado para remover la lechada, o reperforación, en caso que la lechada haya fraguado en la perforación. En cada etapa sucesiva deberá repetirse el mismo procedimiento.

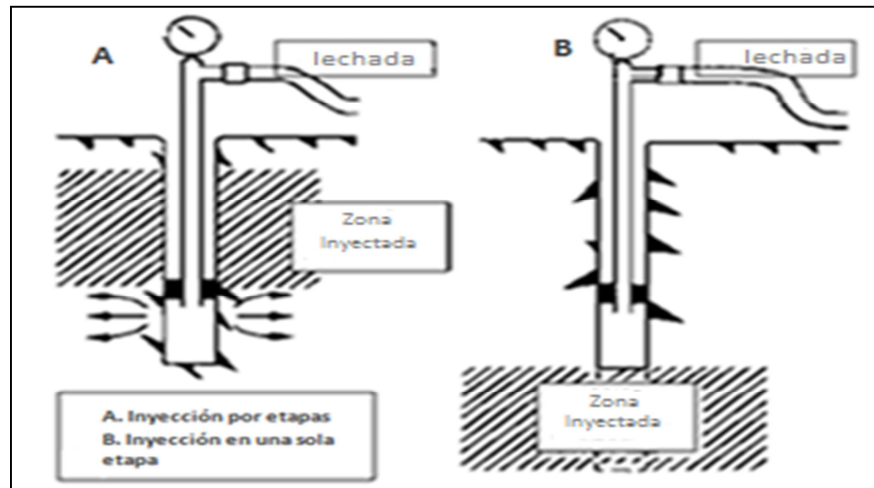


Figura 3.2 Métodos de inyección (Camberfort Henri, 1.968).

### 3.2.11 Método GIN (Grouting Intensity Number)

El método de inyección GIN se caracteriza por el uso de una única lechada simple y estable durante todo el proceso de inyección a la que se le puede adicionar un aditivo superplastificante para incrementar la penetrabilidad; un rango fijo de bombeo de lechada de bajo a medio, el cual contra el tiempo produce un incremento gradual de presión a medida que la mezcla penetra más lejos en las fracturas de la roca. El método sugiere un monitoreo de presión, flujo, volumen de inyectado y penetrabilidad contra el tiempo mediante el uso de gráficas. La determinación de la inyección será cuando la línea que indica presión contra volumen total (por metro lineal inyectado) intercepte a una de las curvas de limitación de volumen, de limitación de presión o el límite de intensidad de inyección, dados en la curva hiperbólica GIN seleccionada (una curva de presión por volumen constante, una medida de la energía utilizada

### **3.2.12 Desarrollo del Método GIN**

3.2.12.1 Inyección de fisuras abiertas y amplias: Las observaciones prácticas y los estudios realizados por Lombardi y Deree (1993) indican que el ancho de las fisuras abiertas en un macizo rocoso facilita el proceso de inyección y que el tránsito de la mezcla puede ser considerable (algunas decenas de metros); por lo que hay razones tanto prácticas como económicas para reducir el tránsito de mezcla y el volumen inyectado.

Antes de seleccionar el criterio de limitación, se debe considerar que grietas muy finas también pueden existir en la progresión que se este inyectando. Estas son más difíciles de inyectar y probablemente no sean bien inyectadas hasta una etapa posterior, cuando las fisuras más anchas han sido colmatadas.

Sin embargo, durante la primera etapa de inyección, es deseable alcanzar a rellenar algunas de las grietas más finas. De éste modo, la mezcla de inyección no debe espesarse, pero debe quedar una mezcla de una densidad estable ó moderadamente estable con el aditivo superplastificante.

La alternativa de limitar la presión, no resulta muy atractiva, ya que también puede oponerse al inyectado de fisuras muy finas. La alternativa restante de colocar un volumen limitado, aparenta ser la mejor opción.



3.2.12.2 Inyección de fisuras finas: Después que las fisuras anchas han sido inyectadas, o las fisuras amplias no estaban presentes originalmente en la zona, es la inyección de las fisuras finas la que alcanza la prioridad. Tal inyección puede ser mejorada usando una mezcla aguada con baja cohesión o inyectando a baja presión. Es conveniente aumentar la presión y mantener la calidad de una mezcla de inyección espesa con superplastificante. La hidrofracturas de juntas de roca y planos estratigráficos son rara vez un problema (excepto los primeros 5-10 m). Consecuentemente una alta presión es aceptable, de 30 a 40 Bares, esto es de 30 a 40 MPa (425 a 570 Lb/m<sup>2</sup>) computados en el intervalo de inyección previendo que la toma de mezcla será pequeña.

Considerando estos factores, un límite superior de inyección se sugiere cuando las tomas son pequeñas, en el rango de 30 a 50 bares (3 – 5 MPa), dependiendo de la geología, la futura presión del agua, etc., en el diseño de la intensidad de inyección.

Los primeros dos elementos del principio GIN están de éste modo empezando a surgir con una limitación de volumen donde la mezcla penetre fácilmente a presiones bajas y una limitación de presión en donde la mezcla penetre solamente con dificultad. Esto permite enfocarse en los rangos intermedios, sin embargo, antes de utilizar éstos rangos intermedios, podría resultar favorable revisar otras consideraciones de inyección como separación y diámetro de los barrenos.

### **3.2.13 Diámetro y profundidad de los barrenos**

Cuando las perforaciones se hacen de pequeño diámetro, se podrá obtener más agujeros y por lo tanto con un espaciamiento menor. Como la finalidad del inyectado en roca es inyectar grietas, huecos y fisuras de desconocida magnitud, es pertinente suponer que mientras menor sea el espaciamiento de los pozos en la línea de pantalla, mayor será la probabilidad que se haga eficazmente ese relleno; por esto es preferible

el diámetro de perforación que permita hacerla lo más económicamente posible, siempre que deje introducir la lechada sin taparse. La cantidad de lechada que se puede inyectar, depende más de la estructura de la roca que cruza, que el diámetro de perforación. Siendo iguales todas las otras condiciones, la mejor pantalla se obtendrá con el mayor número de perforaciones o con el menor espaciamiento de ellas, independientemente de su diámetro.

Un límite que puede señalarse como mínimo para el diámetro de la perforación de una pantalla, varía mucho con las características de la cimentación y con la carga hidrostática a la que va a quedar sujeta. En una cimentación de roca compacta con grietas, la profundidad de la pantalla puede variar entre 30 y 40 % de la carga hidrostática sobre la boca del pozo; en una cimentación de pobre calidad, la profundidad tendrá que ser mayor, pudiendo llegar hasta el 70% de la carga hidrostática.

Durante el avance del inyectado, las condiciones locales señalan las profundidades y presiones necesarias para que la lechada penetre las juntas poco abiertas de los planos profundos, sin provocar movimiento o dislocaciones de las zonas superiores.

#### **3.2.14. Energía específica utilizada**

Para inyectar una zona más interesante se tiene que usar más energía, en un intervalo de inyección dado. La energía es aproximadamente proporcional al producto de la presión final de la inyección ( $p$ ) y el volumen de mezcla de inyectado ( $V$ ). Este número  $p \times V$  es llamado GIN o Grouting Intensity Number. El volumen puede ser sugerido a la longitud del intervalo como Lts/m (o intercambiado por el peso del cemento inyectado en Kg/m, puesto que para mezclas moderadamente densas los valores numéricos son similares (cerca de 5 a 10%) la presión ha sido usada

tradicionalmente en unidades Bar, resultando en  $p \times V$  o unidades GIN (Bar  $\times$  Lt/m), sin embargo se pueden utilizar otras unidades con su correspondiente conversión. (Lombardi y Deere, 1993)

### **3.2.15 Selección del valor GIN**

El diseñador de la presa y sus equipos geotécnicos y de inyección deben seleccionar un valor GIN para el proyecto de inyección de cortina. Los autores Lombardi y Deree recomiendan el valor moderado GIN de 1500 Bar  $\times$  Lt/m como un inicio. Se debe considerar también las condiciones geológicas, el valor futuro de pérdidas de agua, presiones máximas después de llenado, son puntos a ser considerados. Los límites de presión superiores y los límites de volúmenes superiores pueden también ser modificados por los ingenieros de diseño y control de campo para casos especiales. Probablemente el mejor apoyo es realizar una o dos pruebas de selección de mezcla antes de seleccionar la envolvente de inyección.

El límite de presión superior puede ser menor en el tapete o consolidación, que el seleccionado para el fondo del valle, debido a la diferencia de profundidad del embalse. Una meta que vale la pena considerar es una presión limitante de por los menos dos veces la presión del embalse pero puede ser difícil realizar esto sin inducir indeseables hidrofracturas.

### **3.2.16 Ventajas de mantener un GIN constante**

El método GIN requiere una vez escogido el nivel de intensidad de inyección (por ejemplo, una alta intensidad GIN de 2000 Bar  $\times$  Lt/m) el valor debe ser usado tanto para las fisuras fácilmente inyectables, con grandes volúmenes de absorción a baja presión, como para las fisuras con bajas tomas pero con una considerable alta presión. De éste modo, un valor constante de GIN es mantenido.

Al cuidar que el valor GIN sea constante durante el proceso de inyección en todos los intervalos, se obtiene una constante de la mezcla que casi permite automáticamente limitar el volumen en fisuras anchas y abiertas pero permitiendo incrementar presiones en zonas de estrechez y fisuras de baja inyectabilidad.

Combinaciones con alta presión y alto consumo son eliminados, evitando combinaciones que puedan también generar sobre-presiones y fuerzas hidrostáticas no deseadas que podrían figurar más la roca aumentando por consiguiente la cantidad de lechada necesaria para lograr la impermeabilización. Así mismo, combinaciones de baja presión con tomas bajas, también son eliminadas, ya que pudiesen inyectarse inadecuadamente las fisuras finas.

Un valor constante de GIN cuando es trazado en una grafica de presión-volumen, produce una curva hiperbólica que limita a la vez los valores de presión, volumen y energía de inyección.

### **3.2.17 Envoltente de limitación para diferentes intensidades de inyección**

En la figura 3.4, la gráfica  $p \times V$  marca el camino de tres tipos de fisuras. Una fisura abierta de ancha abertura es representada por la curva 1, la cual muestra incrementos de volumen de muestra inyectada solo con ligeros incrementos de presión. La curva 2 representa un promedio de las fisuras, donde la presión se incrementa gradualmente así como el volumen de mezcla inyectada se incrementa; solamente en la trayectoria  $a'$  la presión incrementa mas rápidamente, así como la resistencia a la penetración de la mezcla. La curva 3 representa una fisura estrecha, donde la presión de inyección incrementa rápidamente con solamente una pequeña cantidad de consumo de lechada. Similarmente, la curva 4 representa una fisura extremadamente estrecha, con una cantidad de toma de mezcla y una alta presión de inyección.

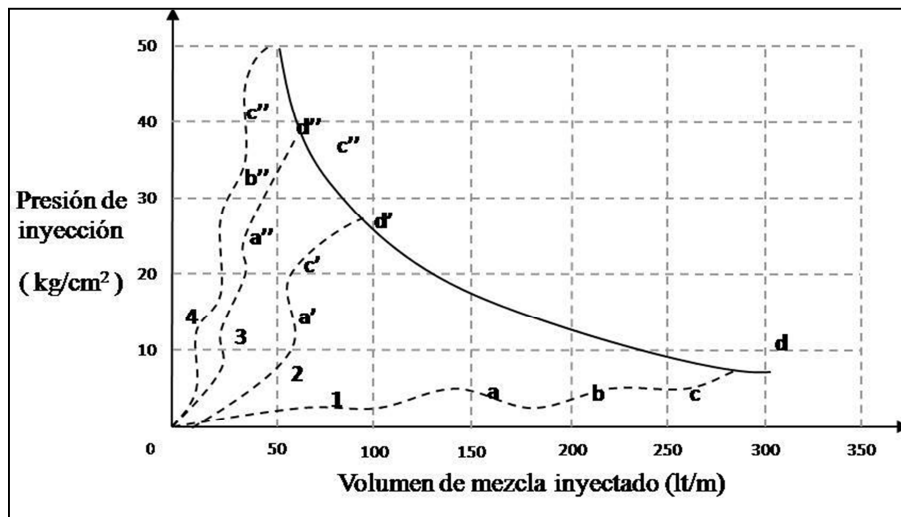


Figura 3.4 Curva GIN con relaciones típicas de volumen y presión (Lombardi y Deere, 1.993)

La figura 3.5 ilustra cinco curvas envolventes del límite para diferentes intensidades de inyectado. El valor GIN, la limitante de presión y la limitante de volumen está en efecto definiendo la envolvente de limitación para inyectar

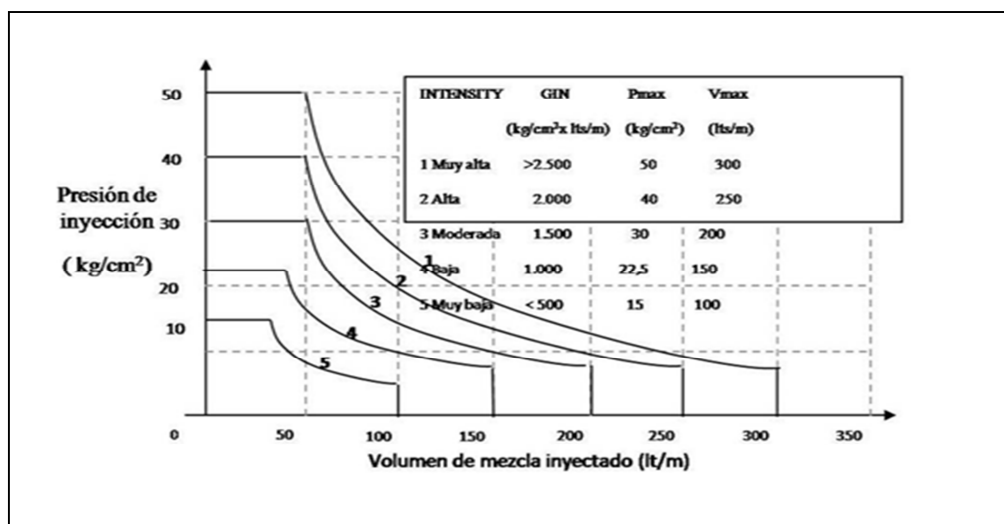


Figura 3.5 Envoltentes propuestas de limitantes de inyección (Lombardi y Deere, 1.993).

En la definición propuesta, hay relación entre una y otra, para esto no es necesario que sea la envolvente más grande, representa la mezcla con muy alta intensidad de inyección con un valor GIN de 2500 Bar  $\times$  Lt/m y una limitante de presión y volumen muy grande de 50 Bar y 300 Lt/min. La menor de las envolventes representa una muy baja intensidad, con un valor GIN de 500 Bar  $\times$  Lt/m, una presión de 15 Bar y una limitante de volumen de 200 Lt/min.

Para áreas geológicas críticas (cercano a la superficie y en los escalones del talud), la curva más baja debe aplicarse.

El proceso de inyección puede parar en diferentes puntos dependiendo el valor seleccionado para la envolvente de inyección.

Para la curva 1 (Figura 3.4), la inyección debe ser terminada en el punto *a* para una baja intensidad de inyección debido a la limitación de volumen de 150 Lt/min. Con una presión resultante de 3 Bar. Sin embargo, si el diseño fue especificado con una envolvente moderada de intensidad, la inyección debe continuar hasta el punto *b*, con 200 Lt/min como límite de volumen, y la presión final nuevamente cercano a 3 Bar. Si la intensidad de inyección seleccionada fue muy alta, la inyección debe continuar hasta el punto *c*, con un límite de volumen de 250 Lt/min, la presión final debe ser alrededor de 6 Bar. Finalmente, si se seleccionó la intensidad de inyección muy alta, la inyección debe continuar hasta el punto *d*, el camino no debe ser terminado por el volumen límite, sino antes de la intersección de la curva GIN 2500. En ese punto el volumen total inyectado debe ser de 285 Lt/min y la presión final de inyección debe ser de 9 Bar. De este modo, se debe tener un rango de volumen inyectado de 150 a 285 Lt/min y un rango final de presión de inyección de 3 a 9 Bar dependiendo de la curva GIN específica.

Para la curva 2 (Figura 3.4), el volumen inyectado en el punto  $a'$  debe ser de alrededor de 60 Lt/min, y la presión final de inyección debe ser de 3 Bar, siguiendo la inyección hasta el punto  $d'$  representando una intensidad muy alta ( $p \times V = 2500$ ), la mezcla tomada incrementó a tan solo 90 Lt/min, que se corresponde con la presión de 28 Bar (menor que el límite de 50 Bar). Similarmente, para la curva 3, la inyección debe estar situada en cualquier punto entre  $a''$  y  $d''$  dependiendo del criterio GIN seleccionado y las limitaciones de presión.

La porción x-y representa un ejemplo de fractura generada por la inyección (hicrofractura), donde la junta es forzada a abrirse con disminución de presión y un incremento en rango de absorción. Se debe seguir inyectando en rangos bajos hasta llegar a la curva GIN seleccionada, pero si la presión se incrementa debe ser probablemente por otra hidrofractura ocasionada por la misma presión o una ligeramente mayor. Es cuestionable si la inyección debe ser continuada en tales circunstancias. Muchas veces, sin embargo, se han terminado sin mayor problema, en cualquiera de los casos, la curva de limitación es alcanzada tarde o temprano, y la inyección es finalizada.

### **3.2.18 Aplicación a la inyección de pantallas**

El método de espaciamentos decrecientes aplicado en una línea sencilla de barrenos para la pantalla, esta aprobado como un método eficiente con sanos razonamientos teóricos, como lo son, la evaluación de la separación y el diámetro de los barrenos.

Los barrenos primarios pueden ser inyectados parcial o totalmente y tapan solamente fisuras anchas de la roca. La siguiente serie de barrenos secundarios tapan sólo las fisuras anchas que no fueron llenadas en la primera serie y así consecutivamente con las demás etapas. El promedio de volumen absorbido estará

decreciendo de serie en serie, por lo que obviamente, el promedio final de la presión de inyección se incrementará también en serie. Esto ocurre cuando el procedimiento GIN es seguido (Figura3.6).

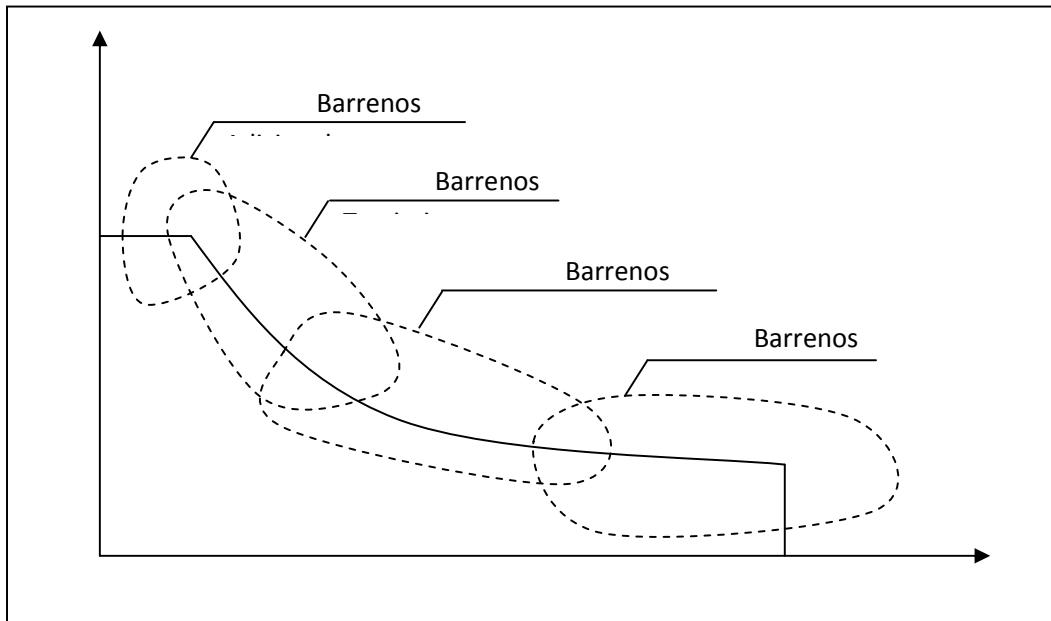


Figura 3.6. Comportamiento de todos los barrenos dependiendo de su consumo de lechada y presión de inyección.(Lombardi y Deree, 1.993)

### 3.2.19 Criterio de cierre de cortina utilizando el Método GIN

Si los caminos de inyección para los barrenos de la última serie (por ejemplo, la serie terciaria) no llega a la línea de limitación superior de la presión para el GIN seleccionado ( y de preferencia en la mitad izquierda de esta línea), barrenos adicionales deben ser inyectados en cualquiera de estos barrenos, no se incluyen en el criterio.

De este modo, todas las partes de la cortina (aunque no todos los barrenos primarios, secundarios y terciarios) estarán siendo inyectados en el límite máximo de



presión de mezcla, con razonable baja absorción de la misma (menos de 25 Kg/m ó 0.18 sacos/ft, por ejemplo).

Si la selección del espaciamiento de barrenos no fue la óptima y ya se realizó, el método propuesto de inyección es por lo menos hasta cierto punto, un procedimiento autorizable. Esto es como un resultado de las técnicas de espaciamiento repartido, la curva GIN, y los requerimientos para la última serie de barrenos para alcanzar el límite de presión con mínima unidad de toma.

En conclusión es creíble que si uno sigue los conceptos ó reglas presentadas, se logra una distribución bastante óptima de volumen total de mezcla que a lo largo de la cortina puede ser alcanzada. El procedimiento permite automáticamente tener en cuenta las irregularidades actuales de las condiciones geológicas en el macizo rocoso. Haciendo esto, la relación beneficio-costo de la inyección de la cortina puede ser maximizado

### **3.1.20 Materiales que se inyectan**

Las mezclas utilizadas en inyecciones pueden ser clasificadas en tres categorías principales:

3.2.20.1 Líquidas : Están constituidas por productos químicos como silicato de sosa, más o menos diluido, mezclado con un reactivo; resinas sintéticas o también productos hidrocarbonatados puros.

3.2.20.2 Suspensión inestable: Son simples suspensiones en el agua, de cemento o piedra molida. No son homogéneas más que en el caso que se las agite, pero al cesar la agitación comienza la sedimentación.

3.2.20.3 Suspensiones estables: Son obtenidas, por ejemplo, diluyendo arcilla en el agua, con una combinación cualquiera de arcilla-cemento y arena, o también con la combinación de agua-cemento-aditivo superplastificante. La estabilidad se obtiene tanteando la dosificación, agitación o tratamiento a emplear.

La estabilidad de estas mezclas es relativa. Se considera satisfactoria si no presenta ninguna sedimentación en el transcurso de la inyección; es decir, durante varias horas.

No es suficiente saber preparar una mezcla para inyectar correctamente, es preciso además, saber elegir ésta en función del terreno, del resultado que se pretende alcanzar y de costo de los trabajos.

La inyección debe realizarse con mezclas que no produzcan sedimentación ya que de lo contrario la resistencia se repartiría de manera desigual, creando zonas débiles en el material de inyección que luego no serán capaces de resistir las condiciones a las que serán expuestas. La mezcla tampoco puede tener una contextura que permita la formación de bóvedas al llegar a los pequeños intersticios; ésta condición impide el empleo de suspensiones cuya dosificación sea muy grande, por ejemplo, cemento/agua = 2/1, que no produce decantación pero que se bloquean en los pequeños huecos.

Solamente son utilizadas con éxito las suspensiones de arcilla, como consecuencia de la finura de su grano y de su propiedad coloidal que asegura la estabilidad del mortero de inyección, aunque también retarde el fraguado y disminuya su consistencia mecánica.

### 3.2.21 Equipo usado en la inyección

El equipo debe ser apropiado y debe tener la capacidad necesaria de cumplir los trabajos con la calidad que es requerida, para no provocar mayores contratiempos ni retrasos.

Este equipo consiste esencialmente en:

**Bombas:** Las bombas utilizadas para el bombeo de la lechada, deben permitir el estricto control de la presiones con un gasto variable de la lechada y con un mínimo tapado de las válvulas y tuberías de alimentación. Los tipos de bomba generalmente utilizadas son las centrifugas, las doble hélice, las de pistón y las neumáticas, siendo muy poco recomendadas las bombas de mano ya que tienen poca capacidad.

**Mezcladora:** La mezcladora requerida para la mezcla de lechada que debe inyectarse, comúnmente consiste en un tanque circular con eje vertical u horizontal en la que gira una flecha con aspas para mezclar los componentes de la lechada. Las mezcladoras de alta velocidad son superiores a las mezcladoras normales de velocidad inferior, ya que producen una lechada uniforme con mejor penetrabilidad y bombeo, los granos de cemento son separados y las partículas individuales son quebradas haciendo posible inyectar fisuras mas finas que con las mezcladoras de baja velocidad.

a) **Tanque agitador:** Se utiliza para agitar la lechada después de ser mezclada, mantenerla homogénea y así evitar que esta decante antes de ser bombeada. Este tanque debe tener la misma capacidad que la mezcladora, de manera que una mezcla de lechada pueda estarse agitando mientras que se está mezclando.

b) Medidor de flujo: El medidor de flujo mide el agua a la entrada de la mezcladora. deberá estar siempre calibrado.

c) Manómetros: Generalmente son utilizados dos manómetros, uno en la bomba para uso de su operador y el otro directamente en las conexiones de la perforación para el uso del ingeniero inspector. Estos manómetros deben ser de alta precisión y calidad ya que generalmente se inyecta a alta presión.

d) Tuberías de abastecimiento: La línea de alimentación de la lechada que parte de la bomba, está unida a la perforación por medio de varias piezas de conexión y un niple. La longitud del niple depende del tipo de material que se vaya a inyectar y de la presión que se va a usar. En roca muy descompuesta el niple debe empotrarse hasta 1,5 m dentro de la perforación para impedir fugas excesivas a través de las fracturas de la roca. Generalmente se utilizan mangueras flexibles o tubos que deberán resistir la presión máxima de inyección con un amplio margen de seguridad.

e) Válvulas: Se usan con frecuencia para controlar el flujo de lechada, controlar la presión y la rata de inyección. Generalmente son manuales y deben ser capaces de soportar las presiones máximas con cierto margen de seguridad.

f) Obturadores: Consiste en elementos de goma, colocados de forma tal que se selle el barreno de inyección. Los obturadores al estar expandidos deberán ser capaces de soportar la presión máxima del manómetro, más la presión de la columna de agua freática, sin permitir filtración de aire que desperdicie el sistema por un período de 10 min.

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGÍA DE TRABAJO

#### 4.1 Flujograma de la metodología

En la siguiente figura 4.1 se representa el flujograma de la metodología utilizada.

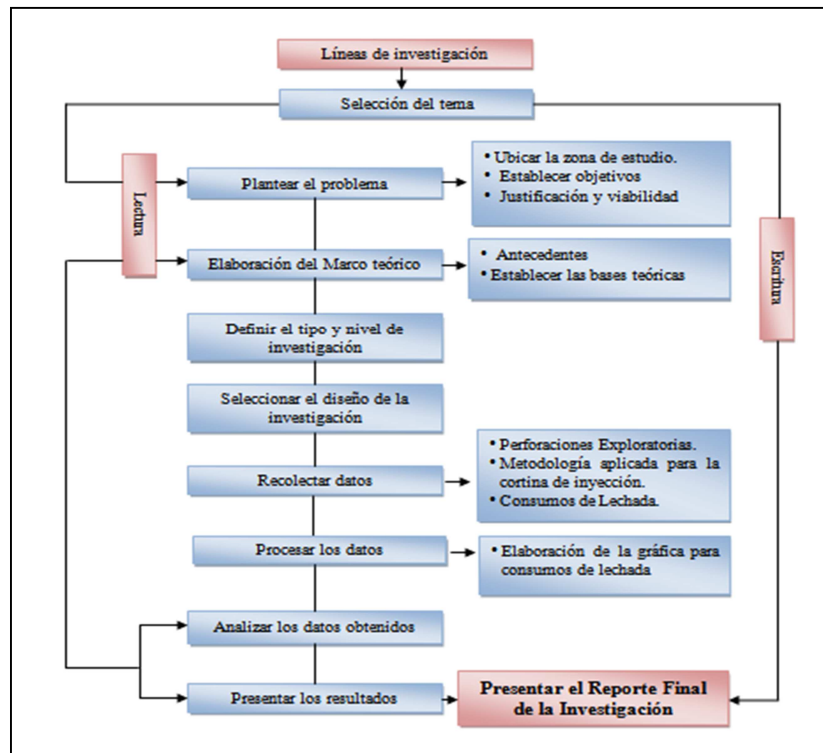


Figura 4.1 Flujograma de la metodología.

#### 4.2 Nivel y diseño de investigación

La investigación será evaluativa y comparativa debido a que se realizará un análisis de la geología del área, comportamiento de la roca, y comparación de

criterios utilizados y planteados para la optimización en el proceso inyecciones de impermeabilización.

El diseño de dicha investigación es de tipo documental y de campo, fue necesario efectuar consultas bibliográficas y adquirir los datos de campo como los consumos de la cortina de inyección. La secuencia de investigación corresponde al flujograma de la metodología (Figura 4.1).

#### **4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se recurrió al análisis de documentos como las especificaciones del contrato, de reglamentos, instructivos y manuales de procedimientos vinculados con la investigación, lectura e interpretación de planos de perforaciones tanto de exploración como de inyección de cortina de la presa izquierda. Análisis de consumos de lechada, además se recopiló material bibliográfico especializado en medios impresos y digitales.

Se observaron los equipos usados en el proceso constructivo de la cortina de inyección, tanto en campo como en laboratorio.

Se realizaron entrevistas no estructuradas, las cuales permitieron obtener información general sobre el tema de estudio, estas entrevistas no cuentan con un formato específico y se realizaron a profesionales de la ingeniería altamente calificados de EDELCA.

#### **4.4 Materiales y equipos**

##### **4.4.1 Equipos de protección personal:**

1. Casco
2. Botas

##### **4.4.2 Maquinaria**

1. Equipo de perforación: Carro perforador sobre orugas (TAMROCK)
2. Equipo de Inyección: Una unidad inyectora de 150 litros/minuto (40 g.p.m) cuando este se encuentre operando a una presión de descarga de  $7 \text{ kg/cm}^2$  (100 psi). Cada unidad inyectora deberá concluir lo siguiente:
  - a) Dos bombas con capacidad adecuada para mantener una presión de descarga razonablemente uniforme, que puedan operar a una presión máxima de descarga de  $7 \text{ kg/cm}^2$  (100 psi).
  - b) Una mezcladora mecánica de alta velocidad, adecuada para preparar lechada en forma coloidal.
  - c) Uno o más tanques sumideros agitados mecánicamente.
  - d) Un tanque, o su equivalente, para abastecimiento auxiliar del agua para las pruebas de presión, lavado sin presión y lavado a presión.
  - e) Un medidor de agua adecuadamente graduado

f) Las válvulas, tuberías, manómetros con diafragma de grasa adecuado, mangueras de presión, líneas de abastecimiento y desvío, obturados, tamices vibratorios y herramientas pequeñas, necesarias para mantener un abastecimiento continuo de lechada y un control preciso de la presión.

#### **4.5 Procesamiento de Datos**

Una vez obtenidos los datos de los perfiles litostáticos, extraídos del Volumen V-C “Exploración Geológica” del Contrato del Proyecto Tocomá, se seleccionaron 22 perforaciones a lo largo del eje de la Presa Izquierda, las cuales fueron registradas en la tabla B1 (Apéndice B) para el registro de la profundidad, permeabilidad y calidad de la roca. (Apéndice A y Anexo 1)

La información acerca de los consumos de las inyecciones de la cortina ejecutadas se obtuvo de los registros diarios de inyección. De un total de 136 perforaciones primarias realizadas hasta Noviembre del 2009 se tomaron 125 perforaciones primarias con sus correspondientes perforaciones de orden superior las cuales se clasificaron de acuerdo a su orden de ejecución (primarias, secundarias, terciarias, etc). Lo que permitió el replanteo de los datos de inyecciones de cortina basados en las especificaciones técnicas (Apéndice C).

Esta información facilitó la elaboración de una gráfica con la herramienta EXCEL donde se representa la cortina de inyección de la presa de enrocamiento con pantalla de concreto izquierda ejecutada y la cortina de inyección teórica siguiendo los aspectos reflejados en las especificaciones técnicas, representándose cada una de las perforaciones desde la base de tope de roca hasta la profundidad (Anexo 2).



#### 4.5.1 Gráfica de consumos de las cortinas de inyección

Para la elaboración de la gráfica de consumos de ambas cortinas de inyección se procedió de la siguiente manera:

1. El eje vertical corresponde a la profundidad de cada perforación y en el eje horizontal están representadas la nomenclaturas de las perforaciones de acuerdo a su orden de ejecución:

a) primarias, b) secundarias, c) terciarias, d) cuaternarias, e) quiniarias, d) senarias. La distancia horizontal para las primarias son cada 12 metros, las secundarias se realizan intermedias cada 6 metros y ejecutándose intermedias sucesivamente para el resto de las perforaciones de orden superior. Para efectos de la gráfica no se representan estas distancias.

2. Se dividió en tramos de acuerdo a lo previsto para la construcción de la presa izquierda como lo muestra la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Tramos Presa Izquierda.

TRAMO	PROGRESIV
	A
I	0+120 – 0+920
II	0+920 – 1+120
III	1+120 – 2+248
IV	2+480 – 3+700

Para la ejecución de este estudio sólo se tomarán en cuenta las perforaciones comprendidas en el tramo III de la presa izquierda ya que fueron tomadas desde la progresiva 0+120 (P 14) hasta la 1+580 (P 139).

3. Los criterios para la construcción de las graficas corresponden a los establecidos en las especificaciones técnicas reflejados para la cortina denominada Teórica, y los criterios ajustados los cuales son utilizados en la actualidad por la empresa EDELCA, para la cortina denominada EDELCA.

El Procedimiento constructivo tradicionalmente usado por EDELCA, reflejado en las especificaciones técnicas consiste en la construcción de la cortina de inyección a una profundidad de 50% al 75% de carga de agua del embalse futuro obteniéndose perforaciones según el orden de ejecución de 30 m para primarios, 20 m para secundarios, 10 m para terciarios y 5 m de para barrenos cuaternarios y quinaros.

Cuando en la primera etapa de inyección de un barreno, se tienen consumos mayores a los 20 kg/m, se profundizarán los barrenos que están a ambos lados de la misma hasta alcanzar la profundidad donde se obtuvo alto consumo, para de esta manera garantizar el sellado de las grietas a la que la perforación anterior no pudo llegar. Este procedimiento establece la ejecución de perforaciones primarias, secundarias y terciarias fijas, las cuaternarias, quinaras y superiores dependerán del consumo obtenido en las inyecciones precedentes.

El procedimiento para inyectar se aplica considerando los siguientes valores límites máximos de presión (p), volumen (v) y del producto presión por volumen (p.v), para tres tramos o rangos, según la profundidad de la inyección:

a) Para el tramo de 0 a 5 m de profundidad:

$$p = 5 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{si } v \leq 200 \text{ litros/m}$$

$$v = 400 \text{ litros/m} \quad \text{si } p \leq 2,5 \text{ kg/cm}^2$$

$p \times v = 1000 \text{ kg/cm}^2 \times \text{Litros/m}$ , en situaciones intermedias entre las dos anteriores.

b) Para el tramo de 5 a 15 m de profundidad:

$$p = 10 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{si } v \leq 150 \text{ litros/m}$$

$$v = 400 \text{ litros/m} \quad \text{si } p \leq 3,75 \text{ kg/cm}^2$$

$p \times v = 1500 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{Litros/m}$ , en situaciones intermedias entre las dos anteriores.

c) Para el tramo superior a 15 m de profundidad:

$$p = 15 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{si } v \leq 133 \text{ litros/m}$$

$$v = 400 \text{ litros/m} \quad \text{si } p \leq 5 \text{ kg/cm}^2$$

$p \times v = 2000 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{Litros/m}$ , en situaciones intermedias entre las dos anteriores.

Con la finalidad de disminuir los costos en perforación e inyección, se realizaron ciertos ajustes al procedimiento constructivo previsto en las especificaciones técnicas determinándose los criterios utilizados para ejecución de la cortina de inyección los cuales son:

a) La profundidad de los barrenos depende de un  $\Delta h$ , que corresponde a la diferencia del valor de la cota del embalse futuro (127,5 m) y el tope de roca de cada perforación.

b) El número de etapas varía dependiendo la profundidad de inyección. Cada etapa está dividida en 5 metros y las presiones serán las mismas como las señaladas en las especificaciones técnicas.

c) El criterio de cierre utilizado es de 40 Kg/m.

d) Las perforaciones primarias y secundarias son fijas, las terciarias y el resto de orden superior serán ejecutadas si superan el valor de cierre.

Con el fin de establecer un consumo teórico de lechada en las perforaciones terciarias que se ejecutarían obligatoriamente en la metodología original que nos permita comparar los costos de ambos métodos, se asumirá un consumo se asumirá un consumo máximo de 20 kg/m en cada perforación en un total de 218 perforaciones.

#### **4.6 Análisis e interpretación de los resultados**

El análisis de los resultados se realizó en un orden tal que permitió dar respuestas a los objetivos específicos planteados. Por medio de la interpretación de los resultados obtenidos se estableció la geología del área, comportamiento de la roca, y la comparación de criterios utilizados y planteados para la construcción de la cortina de inyección de la presa de enrocamiento izquierda que permitió evaluar económicamente los diferentes criterios utilizados y así lograr definir la optimización en los procedimientos de inyección.

#### **4.7 Informe final**

Se presentó el reporte final de la investigación para su respectiva evaluación.

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

Cumpliendo con los objetivos de la investigación, a continuación se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos, se comenzará con el análisis geológico correspondiente a la zona de estudio, seguido de la evaluación comparativa de los criterios establecidos en las especificaciones técnicas y los actualmente utilizados en el proceso constructivo de la cortina de inyección de la presa de enrocamiento izquierda. Se evaluará el efecto económico de ambos procedimientos para establecer una relación costo-beneficio de la obra.

#### **5.1 Calidad del macizo rocoso en el área de la Presa Izquierda**

Por medio de las perforaciones exploratorias encontradas en el Volumen V-C “Exploración Geológica”, se pudo determinar calidad del macizo rocoso, registrándose en perfiles litostáticos de donde se obtienen los valores de RQD y permeabilidad. Se seleccionaron 22 perforaciones, denominadas series PT (Perforaciones Tocomá), a lo largo del eje de la Presa Izquierda (aproximadamente 70 m del eje de la cortina de inyección) teniendo en cuenta que la variación del macizo rocoso es despreciable en cortas distancias, se asumió que tendrán el mismo comportamiento en el eje de la cortina de inyección.

Analizando los datos de las planillas de perforaciones exploratorias se tiene en resumen que la mayor parte del substrato está compuesto de rocas del Complejo de Imataca predominantemente por gneises de color rosado a gris, frescos, moderadamente fracturados y en diferentes estados de meteorización en profundidades menores de 3m (PT 415, PT 431, PT 436). También se observó Anfibolitas verdes frescas y descompuestas en menor proporción.

El tope de roca presenta una cobertura de suelos arenosos, limosos, peñones, lastras, bloques y rocas descompuestas que varían entre 0 metros (PT 416) hasta 5.4 m (PT 394). Se observan permeabilidades bajas y muy bajas en un rango  $1 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-6}$  cm/seg para valores de RQD de 70 a 100 % y en las zonas donde se presenta un mayor fracturamiento permeabilidades medias de  $1 \times 10^{-3}$  cm/seg con un RQD de 20 a 70%

Estos datos se resumieron en el apéndice B, donde refleja para cada perforación su progresiva, profundidad, permeabilidad, cobertura y valores de RQD.

## **5.2 Evaluación de las especificaciones técnicas y criterios ajustados establecidos para la construcción de la cortina de inyección**

En el Anexo 2 se muestran las cortinas de inyección, los cuales nos permitieron determinar los cambios en la metodología de inyección teniéndose las siguientes observaciones:

### **5.2.1 Consumos de lechada**

Se asume que una zona ha sido cerrada, cuando las principales diaclasas de la fundación han sido rellenadas con lechada, esto ocurre cuando las perforaciones de inyección cumplen con un criterio de cierre con respecto a los consumos de lechada, la metodología actual la cortina de inyección de la central hidroeléctrica Manuel Carlos Piar establece de un criterio de 40 kg/m (cortina de inyección EDELCA) y el valor reflejado en las especificaciones técnicas con el cual se representa la cortina teórica es de 20 kg/m.

Al extrapolar los valores de la cortina de inyección EDELCA se tiene que al disminuir el criterio de cierre de 40 kg/m a 20 kg/m en la cortina de inyección

teórica, destacan estos cambios formando zonas aisladas y sobre todo en la fase I (de 0 a 5m) como en el caso de las perforaciones: P-26, S-46, P-66, T-70 B , T-76 A, P-83, S-106, P-121, S-124, S-126, P-127, P-133, T-134 B, S-137 y T-138 B. También se observan estas zonas de consumo de 20 kg/m en la fase II (de 5 a 10 m) y fase III (10-15 m) representadas en las perforaciones: P-20, S-43, P-72, S-74 y T-76 A. Estos consumos no presentarían ningún problema ya que por medio de las perforaciones de orden superior se cubriría esta zona de mayor consumo, garantizando el cierre de la misma.

Al reducir el número de etapas en la cortina teórica y el aumento de su profundidad en la fase II y III los consumos de lechada disminuyen por tramo, con respecto a la cortina EDELCA, estos se reflejan en diferentes casos como por ejemplo la perforaciones: P-21, P-32, P-69, P-72, S-72, P-76, P-78, P-81, P-83, P-86, P-103, P-109, S-109, P-110, P-111, S-118, P-119 P-121, S-122, P-123, T-121 A, P-124, P-125, P-126, P-127, S-127, P-128, P-129, P-131, T-133 A, S-133, T-134 A, S-134, T-134 B, Q-137 B', S-138 y P-139. Se observa disminución de los rangos de consumo de lechada, algunos entre los más importantes de 100 a 300 kg/m disminuyendo al rango de 20 a 100 kg/m, como los consumos de lechada entre 600 a 1000 Kg/m a un rango más bajo de 300 a 600 kg/m. Estos consumos pueden no representar un problema, debido a que usando la metodología tradicional obligatoriamente se ejecutarían las perforaciones terciarias, es decir con estas asegurarían el cierre de estas zonas.

La metodología actual permite una mejor zonificación ya que se obtiene un consumo de lechada, en un numero mayor de tramos de menor longitud, a lo largo del barreno permitiendo detectar las zonas problemas (altos consumos) eficazmente.

### 5.2.2 Cantidad de obra

En la siguiente tabla 5.1 se representa las cantidades de obra de la cortina de inyección ejecutada por EDELCA y la cortina de inyección teórica basadas en los procedimientos constructivos utilizados actualmente EDELCA y los establecidos por especificaciones técnicas.

Tabla 5.1 Cantidades de obra.

	<b>Especificaciones Técnicas</b>	<b>EDELCA</b>
Perforaciones Primarias	139	139
Perforaciones Secundarias	138	138
Perforaciones Terciarias	270	52
Perforaciones Cuaternarias	16	16
Perforaciones Quinarias	12	12
Metros totales de perforación (m)	10.078	6.053
Consumo total de lechada (Kg)	20.263,6	20.032,7

La metodología actual destaca una disminución de la cantidad de perforaciones terciarias, manteniéndose la misma cantidad de emplazamientos para las perforaciones primarias, secundarias, cuaternarias, quinarias y senarias.

Con la aplicación del  $\Delta h$ , se reducen los metros de perforación sobretodo para las perforaciones primarias y secundarias como muestra en el tramo II comprendidas



entre las progresivas 0+920 a la 1+120 (Anexo 2), de la presa izquierda de la central hidroeléctrica Manuel Carlos Piar.

El consumo total de lechada depende de los metros totales de perforación y el relleno de las perforaciones terciarias adicionales, reflejadas en la cortina de inyección teórica. Para la cortina de inyección EDELCA se obtiene una disminución de 2309,2 kg de lechada.

### **5.3 Efecto económico de ambos procedimientos de inyección**

Para el cumplimiento de este objetivo es necesaria la descripción de las partidas que definen los costos de ambos procedimientos constructivos:

a) Emplazamiento para Perforación de Inyecciones de Impermeabilización: Consiste en la movilización del equipo necesario par la perforación hasta la posición a la que se desea ejecutar la misma. El emplazamiento de perforación es realizado en igual número que las perforaciones y se cuantifica en unidades (Und). Su precio unitario corresponde a 366.002,62 Bs y 42,45\$ /Unid.

b) Perforaciones para la inyección de impermeabilización: Son aquellas perforaciones ejecutadas con equipo de rotopercusión cuyo propósito principal es la inyección de lechada. Para la estimación de costos es medida en metros lineales de perforación (m). Su precio unitario es de 39.290,58 Bs y 8,40 \$/m

c) Conexión: Movilización del equipo de inyección en el momento del cambio de una etapa a otra. Su precio corresponde 149.310,37 Bs y 0,03 \$/und.

d) Preparación y mezcla de lechada para inyecciones de impermeabilización: Consiste en la dosificación de los componentes de la lechada por peso, y su mezcla

mediante la utilización de equipo de alta velocidad. La medida en la que se cuantifica es la Ton de mezcla preparada, y su precio unitario corresponde 689.426,74 Bs y 17,62 \$/ und.

Las siguientes tablas 5.2 y 5.3 desglosan los costos de cada partida y para cada una de las alternativas constructivas de la cortina de inyección de la presa izquierda de la central hidroeléctrica Manuel Carlos Piar.

Tabla 5.2 Cantidad de obra metodología actual EDELCA.

Partidas	Unidad	Cantidad	Costo unitario		Total	
			Bs	\$	Bs	\$
Emplazamiento	Und	35	366.	4	131.394.	15.23
perforación	metros	9,00	002,62	2,45	940,58	9,55
Conexión	Und	6.	39.2	8	237.825.	50.84
Inyección	Ton	053,00	90,58	,40	880,74	5,2
	Und	1.	149.	0	150.546,	
	Und	236,00	310,37	,03	37	37,08
	Ton	20	689.		138.111.	3.529,
	Und	0,33	426,74	7,62	100,79	7697
				total	507.482.	69.65
					468,48	1,60

Tabla 5.3 Cantidad de obra metodología según Especificaciones Técnicas.

			Costo		Total	
Partidas	Unidad	Cantidad	unitario			
			Bs	\$	Bs	\$
Emplazamiento	Unidad	575	366.	4	210.451.	617,
		,00	002,62	2,45	506,50	45
perforación	metros	10.	39.2	8	395.970.	84.6
		078,00	90,58	,40	465,24	55,2
Conexión	Unidad	1.3	149.	0	200.523.	40,2
		43,00	310,37	,03	826,91	9
Inyección	Toneladas	220	689.		151.726.	38.7
		,08	426,74	7,62	727,36	7,7506
				total	958.672.	89.1
					526,01	90,69

El empleo de la nueva metodología para la ejecución de la cortina de inyección de la presa izquierda de la Central Hidroeléctrica Manuel Carlos Piar , produce un considerable ahorro a la fecha de 496.129.966,61 Bs y 19.539,09 \$, lo que se traduce en una disminución del 47% en Bolívares y 22% en Dólares, en lo que va ejecutado en la obra, siendo este un beneficio importante para la empresa. EDELCA ya que se mantiene la calidad de la obra, pudiéndose destinar estos recursos al mejoramiento de las obras civiles de la Central Hidroeléctrica o a cualquier otra actividad a favor del desarrollo del país.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Con este trabajo de investigación se busca la optimización de la metodología de construcción de la cortina de inyección a través de la comparación de criterios tradicionalmente utilizados con la nueva metodología, evaluados por medio de los datos de campo obtenidos en la realización de la cortina de inyección, con estos se tuvieron estimaciones sobre el consumo de lechada de una cortina teórica con el fin de afirmar que la metodología actual garantiza un beneficio económico, manteniendo la calidad de la obra.

1. Las metodologías planteadas son técnicamente equivalentes porque se cumple sin menor riesgo, con la ejecución de la cortina de inyección cuya función es disminuir la permeabilidad del sustrato impidiendo las filtraciones por la fundación de la estructura, siendo la metodología actual más rentable ya que genera un ahorro aproximadamente del 42% en Bolívares y 22% en Dólares en costos de ejecución con respecto a la metodología basada en las especificaciones técnicas.

2. En el caso de las zonas aisladas con consumos de 20kg/m en la fase I, no presentan problemas en el cambio del criterio de cierre a 40kg/m, ya que por el tipo de roca y su grado de permeabilidad de baja a muy baja a esa profundidad, este valor se considera aceptable, a demás con las perforaciones de orden superior y las perforaciones terciarias obligatorias, como lo indica la metodología tradicional, garantizarían el cierre de estas zonas en la fundación.

3. Con respecto al cambio de etapas, al realizarse un mayor número, cada cinco metros (5m) garantiza una mayor zonificación asegurando una mejor detección

de zonas problemáticas, además es más rentable el aumento de conexiones que el de perforaciones adicionales.

4. La reducción de los terciarios es válida, manteniendo el criterio del aumento de etapas, permitiendo el ahorro de tiempo y costos en la ejecución de la obra. También la consideración del  $\Delta H$  permite un beneficio en reducir la ejecución de metros lineales de perforación.

### **Recomendaciones**

1. Se recomienda al Departamento de Obras Geotécnicas de la empresa EDELCA seguir la metodología de inyección de cortina actual, ya que beneficia el desarrollo de la obra en factor tiempo y económico, manteniendo su calidad como tratamiento de fundación.

2. Utilizar en campo un sistema computarizado para los registros de inyección, lo cual facilitaría la toma de decisiones en campo, justo en el momento de ejecución de la inyección, tanto para la empresa de inspección como la empresa contratista en el Proyecto Tocomá.

3. Mantener un gráfico diario localizado en las oficinas del Departamento de Obras Geotécnicas tanto para la empresa de Inspección como la empresa EDELCA, a partir de los registros de inyección con el fin de la evaluación de las inyecciones realizadas y las zonas adyacentes a estas, ya que esto permite dar una idea de la calidad de la fundación en el tramo que se está inyectando, corroborando los registros de permeabilidad.

4. Realizar por parte del Departamento de Obras Geotécnicas de la empresa EDELCA, pruebas de verificación con ensayos Lugeon para verificar la permeabilidad de las zonas problema.

## REFERENCIAS

Cambefort, Henri. (1968). **INYECCIÓN DE SUELOS**, Editorial Omega, Barcelona, España.

Especificaciones Técnicas Proyecto Tocomá. **PLIEGO DE LICITACIÓN VOLUMEN IIIA. CONTRATO N° 1.1.104.003.05**. Construcción de las estructuras principales de concreto, suministro e instalación de los equipos hidromecánicos, construcción final de la presa izquierda, construcción de la variante del ferrocarril y construcción de la plataforma para la sub-estación Tocomá.

González, José (2002) **RE EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMICA REGISTRADA EN EL BAJO CARONI ENTRE 1988 Y 2002**. Universidad Simón Bolívar, Facultad de Ingeniería Geofísica. Informe de pasantía larga. Caracas, Venezuela.

Lombardi y Deere, (1993). **DISEÑO Y CONTROL DE INYECTADO UTILIZANDO EL MÉTODO “GIN”**. Consultivo Técnico. IMTA, México.

Mendoza S. Vicente, (2000). **EVOLUCIÓN GEOTECNICA Y RECURSOS MINERALES DEL ESCUDO DE GUAYANA EN VENEZUELA Y SU RELACIÓN CON EL ESCUDO. ESTADO BOLÍVAR-** Venezuela.

Rodríguez, Celeste y Luzardo Juan, (2006). **ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA CORTINA DE INYECCIÓN DE LA PRESA IZQUIERDA DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA “MANUEL CARLOS PIAR”** Universidad Católica Andrés

Bello, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Trabajo Especial de grado. Puerto Ordaz, Venezuela.

Corporación Venezolana de Guayana, Electrificación de Caroní, CVG EDELCA. **ÁREA DE GENERACIÓN** [Página Web en línea. Disponible: [http://www.edelca.com.ve/generacion/descargas/area\\_generacion.pdf](http://www.edelca.com.ve/generacion/descargas/area_generacion.pdf) [Consulta agosto 2009]

Corporación Venezolana de Guayana, Electrificación de Caroní, CVG EDELCA. **CENTRALES HIDROELÉCTRICAS** [Página Web en línea. Disponible: [http://www.edelca.com.ve/generacion/descargas/centrales\\_hidroelectricas.pdf](http://www.edelca.com.ve/generacion/descargas/centrales_hidroelectricas.pdf) [Consulta agosto 2009]

Mireles, José L. (2006). **CORTINAS DE ENROCAMIENTO**. [Página Web en línea. Disponible: <http://www.construaprende.com/tesis03/v-cortinas-de-enrocamiento/>] [Consulta agosto 2010]



## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/5

<b>Título</b>	OPTIMIZACIÓN DE LOS CRITERIOS UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CORTINA DE INYECCIÓN EN LA PRESA DE ENROCAMIENTO IZQUIERDA CON PANTALLA DE CONCRETO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO "MANUEL PIAR" (TOCOMA), ESTADO BOLÍVAR.
<b>Subtítulo</b>	

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Chacín O., María G.	<b>CVLAC</b>	<b>18.013.326</b>
	<b>e-mail</b>	<b>magha2312@gmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	<b>magha23@hotmail.com</b>
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	

Palabras o frases claves:

<b>Optimización de metodología</b>
<b>Tratamiento de fundaciones</b>
<b>Cortina de inyección</b>
<b>Presas de enrocamiento</b>
<b>Central hidroeléctrica</b>

# Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/5

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
<b>Geotecnia</b>	<b>Ingeniería Geológica</b>

## Resumen (abstract):

El Proyecto Hidroeléctrico Manuel Carlos Piar, está ubicado aproximadamente a 18 Km aguas abajo de la Central Hidroeléctrica "Raúl Leoni", estado Bolívar. La investigación realizada se encuentra en la presa de enrocado con pantalla de concreto izquierda del proyecto. El objetivo principal es optimizar la metodología de inyección de cortina, aplicada en el plinto de la pantalla de concreto de la presa izquierda. Como objetivos propuestos fue necesaria una revisión geológica, por medio de los registros de perforaciones exploratorias, las cuales arrojan los datos de R.Q.D (Índice de Calidad de Roca), el análisis de la metodología tradicional de inyección reflejada en las especificaciones técnicas del proyecto y los criterios ajustados, los cuales son utilizados en la actualidad. Además, por medio de los consumos de lechada registrados, se elaboró una gráfica de la cortina ejecutada y una teórica, permitiendo la facilidad de comparación de ambos métodos para determinar un beneficio económico manteniendo la calidad de la obra.

---

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/5

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail	
<b>Miró, Alexis B.</b>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input checked="" type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	<b>4.397.377</b>
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
<b>Gómez H., Miguel A.</b>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	<b>4.031.652</b>
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
<b>Echeverría D., Dafnis J</b>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	<b>4.506.408</b>
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	

**Año      Mes      Día**

2010	06	10
------	----	----

Lenguaje: spa

# Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/5

Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
Tesis. Optimizacion de los Criterios.doc	Application/msword

Alcance:

**Espacial :** Ciudad Bolívar (Opcional)

**Temporal:** 10 años (Opcional)

Título o Grado asociado con el trabajo:

INGENIERO GEOLOGO

Nivel Asociado con el Trabajo: PRE GRADO

Área de Estudio:

GEOTECNIA

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

---

---

---

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/5

### Derechos:

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado  
“Los Trabajos de grado son exclusiva propiedad de la  
Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros  
fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo,  
quien lo participara al Consejo Universitario”

Condiciones bajo las cuales los autores aceptan que el trabajo sea distribuido. La idea es dar la máxima distribución posible a las ideas contenidas en el trabajo, salvaguardando al mismo tiempo los derechos de propiedad intelectual de los realizadores del trabajo, y los beneficios para los autores y/o la Universidad de Oriente que pudieran derivarse de patentes comerciales o industriales.



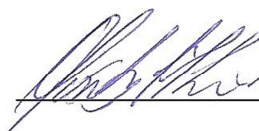
**AUTOR 1**

---

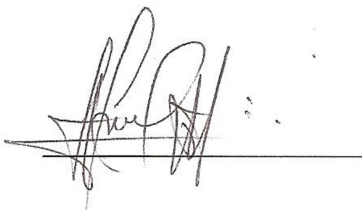
**AUTOR 2**

---

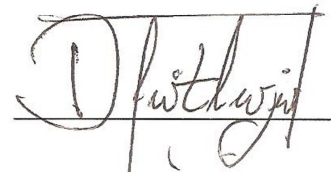
**AUTOR 3**



**TUTOR**



**JURADO 1**



**JURADO 2**

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS:**

