



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE LAS INYECCIONES DE
CONSOLIDACIÓN PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DEL PRETAPÓN 2 DEL TÚNEL DE
DESVIACIÓN DERECHO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO

Autor(es)

Jennifer Nayibert Valderrama Castaño

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



Inspección y control de calidad de las inyecciones de consolidación primarias y secundarias del Pretapón 2 del Túnel de Desviación Derecho del Proyecto Hidroeléctrico Ituango

Jennifer Nayibert Valderrama Castaño

Informe de práctica o monografía o investigación o tesis o trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniera Civil.

Asesores (a) o Director(a) o Co- Directores(a).

José Luis Gómez Díaz, Ing. Catastral y Geodesta, M.Sc.
David Augusto Orduy Sánchez, Ing. Civil

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2020.

1. Resumen

El Pretapón 2 (PT2) es la primera etapa para lograr la estabilidad y cierre definitivo del Túnel de Desviación Derecho (TDD), el cual se convirtió en una prioridad para el Proyecto Hidroituango, dado que aún se presenta flujo de agua desde el embalse a través del túnel, representando un riesgo para la seguridad de las comunidades que se encuentran aguas abajo de la presa. Es por esto que EPM inició labores prioritarias para avanzar en esta obra, y el objetivo principal de este proyecto fue realizar un seguimiento y control de calidad de las actividades relacionadas con la cortina de inyecciones de consolidación primarias y secundarias para la consolidación del sedimento que ocupa la mayor parte de la sección transversal del TDD, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas y planos de construcción de EPM e Integral, lo cual dio como resultado el registro trazable de calidad del avance de las actividades, garantizando los estándares de calidad de EPM.

2. Introducción

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango sufrió a finales de abril del 2018 una contingencia que tuvo como consecuencia el taponamiento de la Galería Auxiliar de Desviación (GAD) y un deslizamiento sobre la clave de los portales aguas arriba de los túneles de desvío, lo cual generó que el material del deslizamiento fuera arrastrado al interior de los túneles. Luego, ese mismo año se presentó el destaponamiento no controlado del Túnel de Desviación Derecho (TDD) que arrastró gran cantidad de material natural que había cedido de la ladera de la montaña y ocasionó un nuevo cierre.

La construcción del denominado Pretapón 2 (PT2), a partir de inyecciones y refuerzo con micropilotes de tuberías de acero, siguiendo los diseños constructivos detallados y los controles de calidad, es la primera etapa para lograr la estabilización y cierre definitivo del TDD y enfrentar esta secuela de la contingencia. El PT2 está diseñado con el propósito de lograr la reducción del caudal de infiltración a un rango de 0,5 a 1 m³/s y es clave para el ingreso seguro del personal y maquinaria del Consorcio CCC Ituango, encargado de la ejecución del tapón definitivo, quién ingresará al TDD a través de la galería G3 y dará manejo al agua infiltrada mediante bombeo.

Desde el área de calidad del consorcio CCC Ituango se realizó el apoyo al seguimiento y control de los procesos constructivos correspondientes a la cortina de inyecciones de consolidación primaria y secundaria del PT2, siguiendo las Especificaciones Técnicas EPM e Integral, logrando un mejoramiento en el proceso de seguimiento y control de las actividades y un consolidado del avance de estas, trazable y organizado. Todo esto se logró mediante actividades de seguimiento e inspecciones periódicas al frente de trabajo, la creación de tablas de seguimiento y el avance de actividades, el chequeo de los parámetros de control y análisis de la información suministrada en las liberaciones de las actividades por medio de herramientas ofimáticas, informes, y un modelo 3D. Así mismo, se identificó

irregularidades en las actividades que incumplían las especificaciones técnicas y se procedió a la emisión y el seguimiento de no conformidades.

En este sentido, el control de calidad aplicado en la ejecución de las inyecciones de consolidación primarias y secundarias del PT2, como en todas las obras del sector de la construcción, debe estar asociado al diseño, los materiales, el sistemas y la ejecución de las obras. El control de calidad permite conocer y corregir los desvíos en los procesos constructivos, disminuyendo la posibilidad de rehacer trabajos por niveles bajos de calidad en el producto final. En este caso, el control de calidad se aplica en la ejecución de las inyecciones de consolidación primarias y secundarias del PT2, con el fin de que cumplan con el objetivo para las que fueron diseñadas: obtener una permeabilidad del sedimento consolidado de 1×10^{-4} m/s o menor, una resistencia a la compresión promedio de 15 MPa o superior y una adherencia de 0,15 MPa entre las paredes del túnel y las paredes del tapón.

Algunas de las dificultades presentadas para el desarrollo del proyecto fue la modificación continua de la metodología de trabajo y planos de construcción, dado que estos continuamente eran actualizados según las condiciones que se iban presentando y requerían de un replanteo técnico. Adicional a lo anterior, debido al contexto de pandemia por el Covid-19, hubo retrasos en el desarrollo de las actividades del PT2, así como complicaciones en trámites administrativos dentro de la obra, dando como consecuencia la suspensión temporal del contrato de prácticas académicas.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Apoyar el seguimiento y control de las actividades relacionadas con las inyecciones de consolidación primarias y secundarias diseñadas para la conformación del Pretapón 2 del Túnel de Desviación Derecho del Proyecto Hidroeléctrico Ituango, según las especificaciones técnicas de EPM e integral.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar el seguimiento de los procesos constructivos de acuerdo con los planos de construcción y especificaciones técnicas de EPM e integral.
- Analizar las liberaciones de actividades junto con los datos de campo registrados en estas para el seguimiento del correcto uso de los registros y los parámetros de control de calidad de las inyecciones de consolidación.
- Reportar las irregularidades o no conformidades en las actividades ejecutadas de acuerdo con las especificaciones técnicas de EPM e Integral para el seguimiento y apoyo del cierre de las no conformidades, verificando que se hayan realizado las acciones correctivas necesarias.

4. Marco Teórico

El Pretapón 2 es el sistema de pre-taponamiento controlado del túnel de Desviación Derecho (TDD) que estará conformado por 58 micropilotes de acero, instalados desde el Túnel de Descarga Intermedia (TDI), un sistema de inyecciones de consolidación, un filtro granular y un sistema de esferas de nylon, como se observa en la Figura 1 (Integral, 2019). Los micropilotes son elementos que tienen como funciones soportar la carga hidráulica que hay en el interior del TDD, retener las esferas de nylon y servir como medio para inyección de lechada y resina en el macizo y sedimento rocoso, siendo el último un depósito de sedimentos constituido por fragmentos y bloques de rocas con gradación que varía desde materiales muy finos como arenas hasta bloques de dimensiones métricas y su distribución a lo largo del TDD es completamente heterogénea (SBC, 2020).

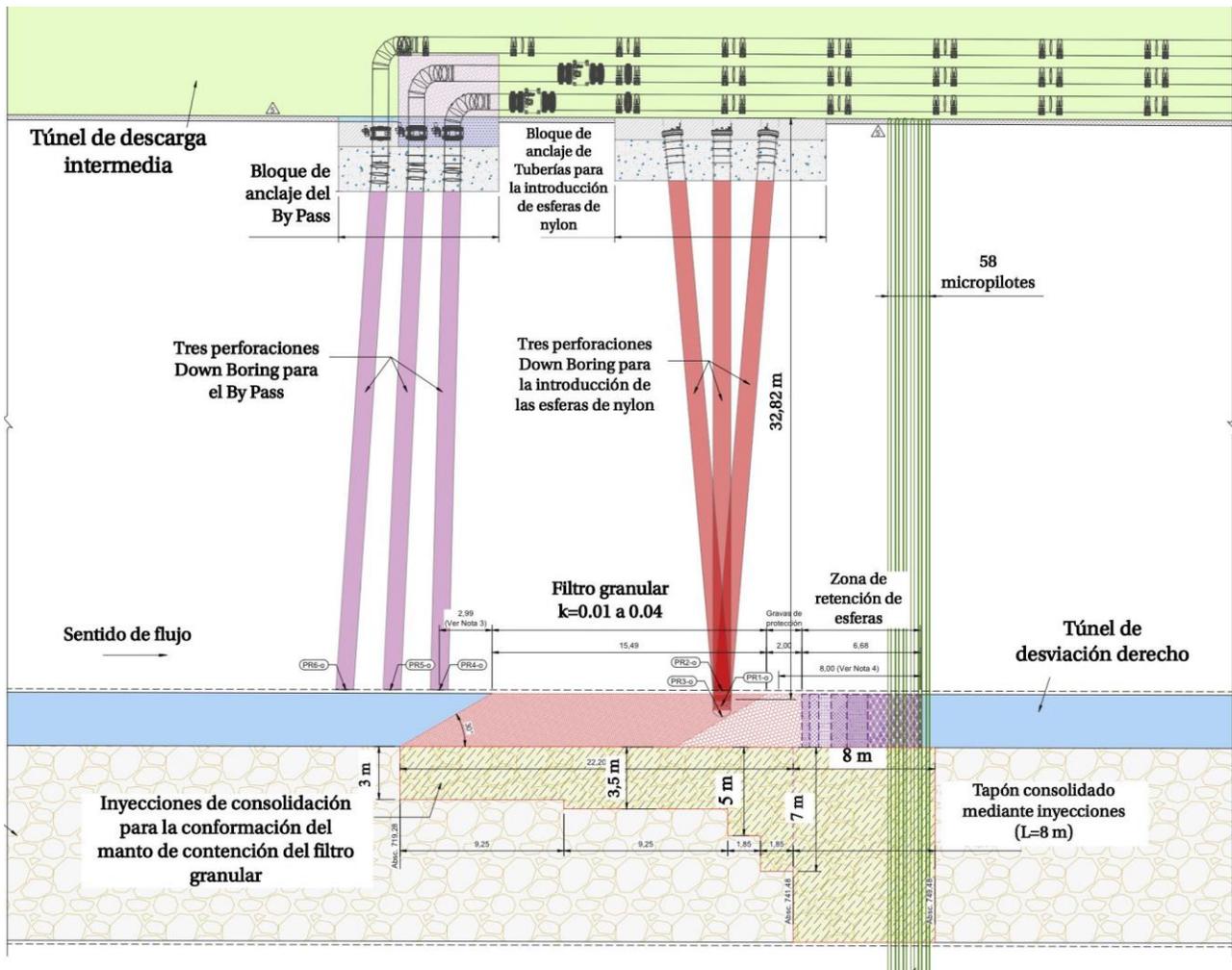


Figura 1. Pretapón 2 - Perfil longitudinal por el eje del Túnel de Desviación Derecho. Tomada del Plano para construcción N° DC-PHI-031-TPN-PT-S-110 R5 de Integral.

Según lo establecido por SBC (2020), las inyecciones de consolidación, son inyecciones de un producto o mezcla cementicia a presión para mejorar las propiedades mecánicas y reducir la permeabilidad de un área aferente de suelo, roca o sedimento. En este caso se realizaran diferentes etapas de inyección:

- Inyecciones primarias, diseñadas de forma ascendentes cada 50 cm con mortero antideslave MasterFlow 1205 UWEX para la consolidación del sedimento rocoso del tapón de 8m de longitud. La perforación de éstas se realiza con una perforadora diamantina que tiene como herramienta de perforación una corona o zapata.
- Inyecciones secundarias, son de tipo repetitivo selectivo (IRS) de lechada y/o resina para la consolidación del macizo rocoso que comprende la periferia de la sección real del túnel de 4m de espesor de las paredes del TDD y el sedimento rocoso donde estarán ubicados los 8 m del tapón. Para estas se utiliza tubo manguito de 2", que consta de un tubo liso de PVC con perforaciones cada 50 cm cubiertas con aros de cauchos llamados manguitos que cumplen la función de válvulas anti retorno, y obturador doble o elemento de sello. Para la instalación del tubo manguito se realiza una inyección de vaina o relleno del espacio anular, es decir, del espacio entre el tubo manguito y las paredes del barreno.
- Inyecciones terciarias diseñadas para la consolidación del manto de protección de 22m de longitud y espesor variable (entre 7 m y 3 m). Están diseñadas con el mismo método de las inyecciones primarias.

Entre los materiales a inyectar está la lechada, una mezcla de agua y cemento, y el mortero, una mezcla de agua, cemento y arena. A ambos se les puede incorporar aditivos (superplastificante, bentonita, aceleradores de fraguado u otros) dosificados según las características de viscosidad y densidad requeridas (EPM, 2011). Debido a que el sedimento a consolidar está bajo el nivel freático se usa para la lechada el aditivo líquido anti deslave MasterMatrix UW 450 que reduce la pérdida del material por deslavado impidiendo la penetración del agua exterior en la mezcla en estado plástico. En caso de ser requerida, se emplea la resina bi-componente, en base silicato de poliurea, MasterRoc MP 368, diseñada para la consolidación rápida de terrenos tanto en condiciones secas como bajo el agua (Master Builders Solutions, 2017).

Las actividades en el PT2 se inspeccionan desde el área de calidad la cual está encargada del Sistema Integrado de Gestión de Obra (SIGO). Este sistema verifica y garantiza que las diferentes áreas implicadas en la actividad constructiva del proyecto cumplan conjuntamente con los objetivos establecidos en las especificaciones técnicas. Estas se entienden como los documentos donde se plantean las normas y requisitos generales aplicables a los procesos de construcción. Los equipos, instrumentos, mano de obra, materiales, parámetros constructivos, los sistemas de cuantificación, pago, las pruebas y ensayos de materiales a usar hacen parte de este; el objetivo y los métodos de verificación. Aunque sean definidas como las "reglas de oro" en la construcción, no siempre su contenido es aplicable a todo su expresión y valor técnico y conceptual, estas pueden ser

modificadas para que se adapten de manera racional a la labor proyectada tanto en la calidad de materiales, proceso constructivo, forma de medición y hasta la forma de pago (CORASCO, 2008).

Para el caso del PT2, La eficacia de las inyecciones de consolidación se valida con ensayos de resistencia a la compresión y corte directo en núcleos del sedimento conglomerado extraídos por medio de sondeos de verificación y ensayos de permeabilidad Lefranc (Integral, 2019), con el fin de observar la capacidad que tiene el suelo para que un fluido atraviese sin alterar su estructura interna.

El sistema SIGO es el encargado de la emisión, seguimiento y cierre de las No Conformidades (NC), cuyo propósito es hacer evidente el incumplimiento de los requisitos de calidad en las actividades de los frentes de trabajo, realizando la supervisión de las acciones correctivas y preventivas para la eliminación de las causas de estas evitando que se presenten en etapas sucesivas de los procesos constructivos (Universidad de Palermo, 2002). Es importante resaltar que el diligenciamiento de este documento se puede generar por el desacato de las Especificaciones Técnicas.

Las inyecciones de consolidación hacen parte de los métodos de mejora de suelos. Por esto, se realizó una búsqueda sobre este tema, al no encontrar investigaciones sobre proyectos similares al PT2. Algo común en los documentos consultados es el énfasis en la necesidad de un buen estudio del medio en el que se va realizar la inyección para reconocer sus características.

Por ejemplo, en el estudio de Alfonso Rodríguez y Ramiro Gutiérrez (2019), llamado “Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas”, se precisa que para escoger de manera correcta el diseño del método de inyección a emplear, el proceso de inyección y tipo de mezcla para tener un adecuado tratamiento, son indispensables los estudios geológicos y geotécnicos, que serían para el PT2, los sondeos de verificación y ensayos de permeabilidad previos, con los que se definió la metodología de inyección inicial por parte de SBC y los sondeos de verificación intermedios y las respectivas pruebas de permeabilidad, con los que se evalúa la efectividad de los tratamientos ejecutados hasta dicha etapa y se proponen ajustes al método con base en los mismos. Así mismo, el uso de ensayos de campo y laboratorio para verificar la calidad del material a inyectar antes y durante los tratamientos.

El trabajo “Inyecciones de Consolidación en Túneles Utilizando Lechadas de Cemento Estables”, de David Pazos Bernal (2020), muestra información técnica referente a inyecciones de consolidación en la construcción de obras subterráneas, el cual lo divide en tres fases: caracterización de lechada de cemento, modelo geomecánico de las rocas inyectables y tratamiento con inyecciones de consolidación. La segunda fase de este trabajo, habla sobre la caracterización geológica y la clasificación de las rocas junto con los métodos de clasificación. En los sondeos exploratorios realizados en el PT2, se usa el método de recuperación de núcleos RQD, que es definido en el trabajo como la designación de calidad de la roca según la longitud recuperada en los recobros del sondeo, sin embargo, teniendo en cuenta que el medio estudiado se encuentra alterado, el mismo

solo sirve a manera de referencia, haciendo uso particular de los conceptos de porcentaje de vacíos y porosidad del RQD.

Al igual que para las inyecciones secundarias del PT2, el uso de tubos manguitos fue seleccionado como el más adecuado para la cortina de inyecciones de impermeabilización en la investigación “Soluciones combinadas de impermeabilización y refuerzo estructural por inyección de impregnación mediante microcemento en túneles de metro” de Ruiz (2004), la cual surge por las infiltraciones de agua que se presentan en los túneles y estaciones del metro de Barcelona, a causa del aumento del nivel freático. Esta presenta soluciones a tratamientos de impermeabilización que aportan a la vez un refuerzo de la estructura mediante la mejora del suelo y concluye que la función de válvula anti retorno de los tubos manguitos, hace de estos los más adecuados al tener la posibilidad de inyectar las veces que se requiera un mismo lugar.

5. Metodología:

El trabajo de práctica empresarial se desarrolló en el Proyecto Hidroeléctrico Ituango, situado sobre el río Cauca, entre los municipios de Toledo y Briceño, Antioquia, específicamente en el Área de Calidad del proyecto y el TDI, donde se realizaron las actividades necesarias para cumplir cada uno de los objetivos propuestos como se presenta en la figura 2, y se detalla a continuación.

5.1 Seguimiento de los procesos constructivos: Para el cumplimiento de este primer objetivo se realizó el estudio de las Especificaciones Técnicas de EPM, de las especificaciones técnicas particulares del PT2 y los planos de construcción de Integral y la metodología aplicable a las actividades del PT2 de Soletanche Bachy Cimas (SBC), empresa encargada del diseño y ejecución de las inyecciones de consolidación. En estas se encuentran definidos los métodos de inyección, instrumentos, maquinaria, localización, rumbo y dimensión de las perforaciones; dosificación de la mezcla, presión, caudal y volumen de cierre de acuerdo con la etapa de inyección. Definidos los parámetros de control, se inspeccionó la ejecución de los procesos en el frente de trabajo, siguiendo los lineamientos especificados.

Así mismo, se realizó el registro fotográfico del avance de los procesos en campo y se anotó cualquier novedad de las actividades que se estaban realizando en una bitácora para luego reunir, almacenar y revisar las liberaciones de las actividades que se ejecutaron con los valores de campo, de acuerdo a la información entregada en el área de concretos encargada del frente o el área de calidad de SBC. Las liberaciones revisadas correspondieron a las actividades de posicionamiento topográfico de la máquina perforadora, perforación del barreno e inyección de la mezcla según el método establecido para el proyecto. Posteriormente se organizaron los datos tomados en campo, y se llevó un registro del avance de las actividades por medio de un esquema ilustrativo y un modelado 3D en AutoCAD 2020 para visualizar dicho avance, el cual se basó tanto en los datos teóricos como en los reales; los datos que se usaron fueron: coordenadas, azimut, inclinación, diámetro de perforación, profundidad de bóveda, de solera y

total. Finalmente, se realizaron los informes ejecutivos semanales e informes diarios de avance, donde se reflejó el seguimiento efectuado a la obra.

Adicional a todo lo anterior, diariamente se realizó una revisión de las comunicaciones enviadas al BPMS por la interventoría, el consorcio CCCI y SBC para tener conocimiento de las decisiones, procedimientos adicionales y actualizaciones que se realizaron a la metodología y planos de construcción.

5.2 Análisis de las liberaciones de actividades y los datos entregados en estas: una vez las liberaciones de las actividades fueron firmadas y aprobadas por todas las partes: Interventoría, el consorcio CCCI y SBC; se hizo la recolección de los registros para luego proceder a la clasificación de estos como conformes o no conformes, y realizar los informes ejecutivos mensuales. La clasificación depende del diligenciamiento que se les dio en obra a los formatos. Así mismo, se realizó la comparación de los valores teóricos con los valores reales (de campo), entregados en las libraciones, con ayuda de la herramienta Excel 2019.

El resultado de la clasificación de los registros y la comparaciones de los datos reales y teóricos, sirvió como sustento de las buenas prácticas en los procesos constructivos y el cumplimiento de los parámetros de control especificados por la asesoría, o en caso contrario, como evidencia para la emisión de no conformidades al área encargada del frente de trabajo, y de esta manera se aplicaron las correcciones necesarias en la ejecución de dichas actividades.

5.3 Reporte de irregularidades en las actividades ejecutadas: A partir de las no conformidades (NC) se hicieron los reportes de las irregularidades encontradas al Sistema Integrado de Gestión de Obra (SIGO). En el formato de las no conformidades se diligenció la descripción de la irregularidad y la parte de las especificaciones técnicas o plano de construcción que estaba por fuera de los parámetros establecidos en estos, y el procedimiento de cómo se identificó la irregularidad, y el área responsable o encargada de dar respuesta en el SIGO. Esta respuesta debe contener las causas, correcciones inmediatas y/o un plan de acción que garantice que no se presentará nuevamente la irregularidad. Una vez se envió al área responsable la no conformidad, se realizó un seguimiento a esta y se recolectaron y almacenaron las evidencias necesarias para posteriormente dar como corregido el error encontrado y establecer como concluida la NC.

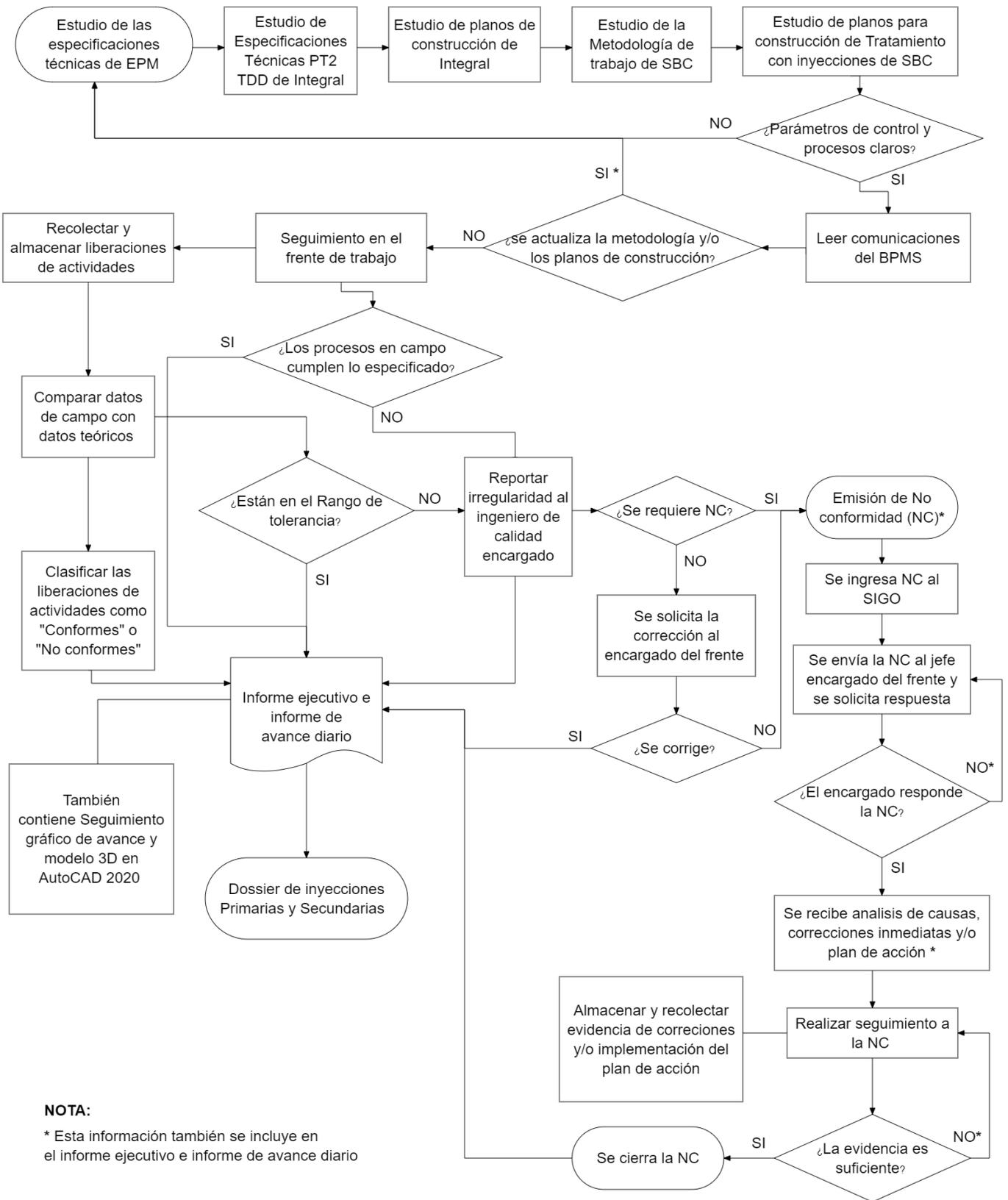


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología.

6. Resultados y análisis

Dando cumplimiento a los objetivos propuestos en el proyecto de práctica empresarial los resultados obtenidos se presentan a continuación:

6.1 Seguimiento de los procesos constructivos

Esta etapa consistió en el seguimiento a la primera y segunda etapa de inyecciones, para lo cual era requerido estar al tanto de los detalles de los procesos constructivos y los procedimientos de verificación de la eficacia de estos, que se empleó a medida que se avanzó en lo planificado en las especificaciones técnicas y metodologías de SBC.

Inyecciones primarias

Finalizada la primera etapa de inyección, se realizaron los sondeos exploratorios S5, S6, S7, S8 y S9 para verificar la efectividad del mortero MasterFlow. Los sondeos revelaron que la mayor parte del mortero ha resurgido, es decir, ha subido por el espacio anular y se ha depositado en el nivel superior del sedimento formando una capa de 0,5 m a 0,9 m. Dado que el mortero se encontró disperso a lo largo de la perforación, EPM solicitó modificar el método de inyección, de manera que se garantice la consolidación del sedimento de forma ascendente cada 0,5 m.

Así mismo, el resurgimiento del mortero quedó registrado en las liberaciones de inyecciones ascendentes como observaciones de la interventoría. Igualmente, en estas observaciones se dejó registro de barrenos con barras en las que la presión había ascendido a más de 20 bar y otros con barras en los que se tuvo un caudal igual a $0,0 \text{ m}^3/\text{h}$; comportamientos que dieron como resultado un consumo de mortero menor al volumen teórico.

Según SBC, Las razones por las que las inyecciones de mortero presentaron este comportamiento son las siguientes:

- La granulometría del sedimento es muy aleatoria, y no necesariamente hay caminos preferenciales para la penetración de los materiales.
- Los bloques de gran tamaño crean zonas de sombra, que hay que minimizar con tramos de inyección reducidos.
- El sedimento no es un terreno estable, y los tramos considerados para las inyecciones pueden llenarse de sedimento, obstruyendo el paso de la lechada

En general se pueden presentar tres escenarios a la hora de realizar una inyección: el primero, es cuando el caudal es muy bajo o cero y la presión asciende rápidamente, lo que significa que hay un rechazo por presión y el medio no recibe la mezcla, como sucedió en las inyecciones de mortero; el segundo escenario es cuando la presión es baja y los caudales son altos por lo que la presión no sube, situación en la

que es muy probable que la mezcla esté viajando a lugares no deseados; y por último, el escenario ideal donde la presión va aumentando gradualmente y el caudal se mantiene aproximadamente. A continuación, se muestra en la tabla 2 el porcentaje de mortero consumido por ejes respecto al valor teórico. De los 718696 L de mortero planificado teóricamente se consumió el 73.4%, es decir, 528004 L y solo el 33.3% de los 33 barrenos cumplió o superó el valor teórico (ver Anexo 1) .

Tabla 2. Volúmenes inyectados en ejes primarios

Eje	volumen teórico (L)	volumen inyectado (L)	Porcentaje inyectado
P0'	81131,0	42450,0	52,3
P0	87594,0	76571,0	87,4
P1	85899,0	50790,0	59,1
P2	196960,0	193573,0	98,3
P3	73116,0	59340,0	81,2
P4	116880,0	52960,0	45,3
P5	77389,0	52320,0	67,6
Total	718969,0	528004,0	73,4

En las especificaciones técnicas está determinado que el porcentaje de vacíos del sedimento depositado en el TDD es del 40%, y que el 55% de estos deben ser llenados en el tapón de 8 m con la primera cortina de inyecciones de mortero anti-deslave. Sin embargo, según los sondeos de verificación de estas inyecciones se encontró que el sedimento antes de las inyecciones, tenía un promedio de vacíos del 31,5% y se logró llenar aproximadamente el 19% de estos, un valor menor a lo esperado, demostrando que el método empleado no es adecuado para una penetración significativa del producto.

Debido a que el proceso estaba siendo ineficiente en cuanto a la aglomeración del sedimento, la interventoría exigió modificar el diseño y procedimiento para minimizar la pérdida del producto por el espacio anular, y su arrastre por la corriente en la parte libre del túnel y lograr una mayor penetración. En este sentido, SBC propuso el diseño de detalle para las inyecciones de mortero para barrenos terciarios, actualmente aprobado por la interventoría y el cual incorpora una metodología para reducir la resurgencia del material que consiste en una obturación al nivel superior del sedimento con un saco obturador de caucho posicionado por medio de un tubo de revestimiento (Figura 3). Además, se incluye un tramo inicial de prueba con 4 barrenos terciarios y dos sondeos, uno previo a la inyección y otro de verificación, con el propósito de realizar los ajustes necesarios a la metodología a partir de la comparación de lo encontrado en ambos sondeos.

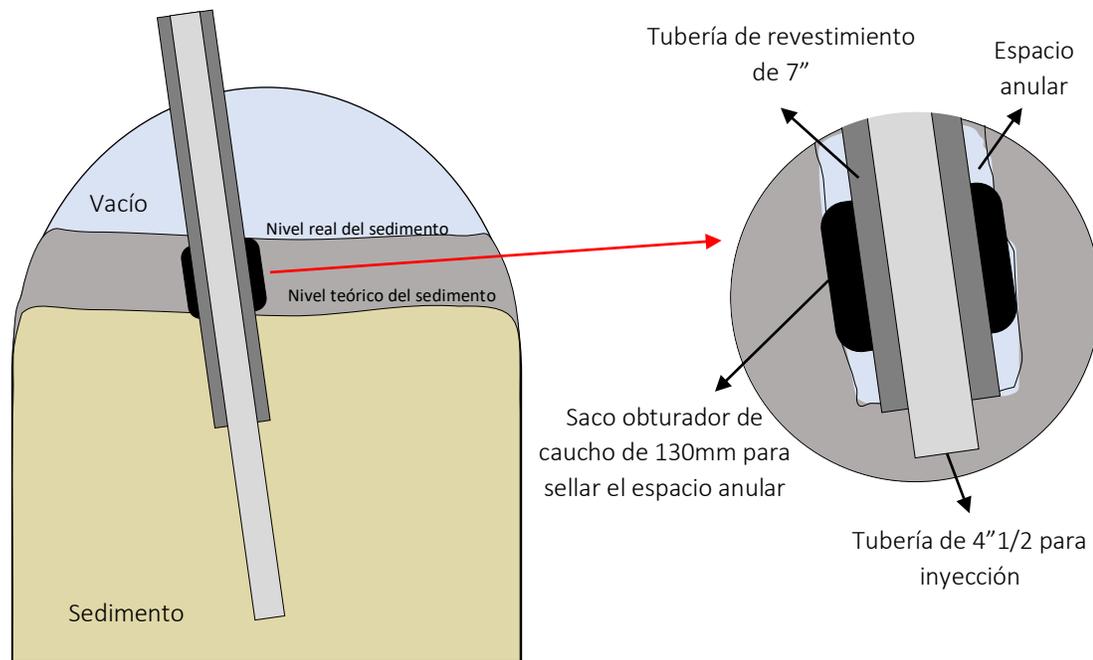


Figura 3. Sellado de espacio anular para disminuir el resurgimiento del mortero.
Fuente: Elaboración propia.

En los ensayos Lefranc realizados en el sondeo S15, no se logró sostener la cabeza de presión, es decir, el nivel del agua se mantuvo en el nivel freático¹. Los geólogos del área de calidad concluyeron que es probable que no se haya sostenido la cabeza por emplear un caudal máximo de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es utilizado para medir permeabilidades del orden del 10^{-5} m/s o menores, lo que significa que el sedimento en la zona donde se realizó la prueba tiene una permeabilidad mayor o igual a 10^{-4} m/s .

Inyecciones Secundarias

Al analizar las etapas de inyecciones propuestas por SBC, sus métodos y las mezclas de inyección, se encuentra que esta propone inicialmente sellar las rocas con grandes huecos para luego penetrar en los materiales más pequeños y porosos. Según Muzas (2003), las rocas con grandes huecos se tratan con inyecciones a gravedad, mientras que para suelos, la técnica generalmente utilizada es la que usa tubos manguito, como en el caso de las inyecciones secundarias.

Para las inyecciones secundarias se examinaron las características y comportamiento del sedimento realizando una prueba de inyectabilidad con lechada en el sondeo S7 y ensayos de permeabilidad Lefranc en el sondeo S7 y S8, esto como mejora a la metodología inicialmente planteada. Estos ensayos son adicionales a lo establecido en las especificaciones en esta etapa de inyección. Las especificaciones técnicas de EPM definen

¹ A la fecha de terminación de las prácticas académicas no se había realizado el tramo de prueba en su totalidad. Solo se pudo hacer el seguimiento al sondeo previo S15.

que, una vez el sedimento esté consolidado, es decir, una vez se concluyan las cortinas de inyección, se deben realizar mínimo 10 Lefranc los cuales deberán demostrar que se cumplió uno de los tres objetivos de las inyecciones de consolidación, la cual es una permeabilidad del bloque consolidado menor o igual a $1,0 \times 10^{-4}$ m/s, tanto en el tapón de 8,0 m como en el manto de protección.

De las cinco pruebas de permeabilidad realizadas en el sondeo S7, tres arrojaron valores del orden de 10^{-5} m/s y en las restantes no se estabilizó la cabeza de presión. Los resultados se pueden observar en la tabla 4. En cuanto a la prueba de inyectabilidad realizada en este sondeo, los parámetros de cierre de inyección eran 1000 l/m o una presión máxima de 10 bares. Sin embargo, antes de iniciar la prueba se dio la indicación de subir la presión hasta 20 o 30 bares, debido a la alta viscosidad de la lechada que no permitía que esta saliera con suficiente presión a través de los orificios de la flauta. Los resultados de la prueba se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de prueba de inyectabilidad en sondeos S7.

Tramo N°	Prof. Desde (m)	Prof. Hasta (m)	Longitud del tramo (m)	Vol. Teórico (l)	Vol. Inyectado (l)	Presión (Bar)	Vol. Inyectado respecto al teórico
10	34,3	35,7	1,4	1400,0	1400,0	4,6	100,0%
9	35,7	37,3	1,6	1600,0	63,0	30,8	3,9%
8	37,3	39,3	2,0	2000,0	145,0	24,9	7,3%
7	39,3	40,9	1,6	1600,0	39,0	27,4	2,4%
6	40,9	43,1	2,2	22000,0	127,0	25,2	0,6%
5	43,1	44,6	1,6	1550,0	37,0	24,2	2,4%
4	44,6	46,6	2,0	1950,0	56,0	25,1	2,9%
3	46,6	48,2	1,6	1600,0	75,0	29,5	4,7%
2	48,2	50,3	2,1	2100,0	442,0	20,0	21,0%
1	50,3	51,0	0,8	750,0	85,0	30,0	11,3%

Todos los tramos de la prueba de inyectabilidad fueron terminados por presión, excepto el tramo número 10 (de 34,25 m a 35,65 m). En este último, se tuvo cierre por volumen máximo, lo cual era de esperarse, por estar ubicado en la parte superior del sedimento lo que hace que haya altas posibilidades de que la mezcla subiera al vacío y fuera arrastrada por la corriente de agua.

En las pruebas de permeabilidad del S7 hubo dos profundidades, 49,0 m y 44,2 m, en las cuales no se sostuvo la cabeza de presión, por lo que se esperaba que en la prueba de inyectabilidad la toma de lechada en estos puntos fuera alta. Sin embargo, el consumo de lechada fue bajo, por lo se puede presumir que esta irregularidad se debe a las

características de la lechada P1 inyectada, o a las condiciones del barreno evaluado que había sido perforado con anterioridad. El ensayo de permeabilidad fue hecho en un medio alterado, lo cual limita la confiabilidad de los resultados de este, y el uso de sus datos para la toma de decisiones. Igualmente se aprecia que en la prueba de inyectabilidad se evaluaron tramos con longitudes entre 0,75 m y 2,2 m en los que las probabilidades de derrumbamiento o sedimentación son altas por el flujo de agua que arrastra el material fino y de granulometría pequeña al barreno perforado, y al final el tramo ensayado puede ser menor al supuesto inicialmente.

Tabla 4. Resultados de pruebas Lefranc realizadas en los sondeos S7 y S8.

Sondeo	Profundidad (m)	Longitud del tramo (m)	Permeabilidad (m/s)
S7	51,3	0,7	4,437E-05
	49,0	0,7	No estabilizó
	47,0	0,7	7,192E-05
	46,9	0,7	6,091E-05
	44,2	0,7	No estabilizó
S8	49,3	1,6	2,950E-05
	47,5	3,6	2,650E-05
	47,5	0,3*	1,350E-04

*Valor calculado con una longitud de tramo diferente a la considerada originalmente.

En cuanto al sondeo S8, se realizó ensayos Lefranc en dos puntos del barreno, en los cuales ambos dieron valores del orden de 10^{-5} (Tabla 4 y figura 4). El primer punto correspondió a la profundidad 49.25 m y se evaluó un tramo de 1.6 m de longitud conformado mayoritariamente por un bloque de roca, lo que no lo hace la mejor zona para evaluar la permeabilidad de un material tan heterogéneo, considerando que el propósito principal de las pruebas Lefranc es determinar el cambio de condición del material después de la inyección de mortero. El segundo punto se hizo a los 47.50 m de profundidad y se evaluó un tramo de 3.6 m de longitud la cual corresponde a la longitud de la cámara para el cálculo del coeficiente de forma, por tanto, el tramo incluye tanto zonas con alta relación de vacíos, tanto la roca que conforma el nivel inferior de la solera natural, lo que hace que el tramo presente grandes variaciones de permeabilidad respecto al punto evaluado y por tanto distorsiona la percepción de dicho parámetro en la zona. Lo correcto es evaluar la permeabilidad de un punto que represente una zona con características medianamente similares y en una longitud menor. Los geólogos del área, para comprobar lo anterior, recalcularon la permeabilidad en el segundo punto con un tramo más corto, de 0.3 m, con el fin de demostrar que considerando tramos de menor longitud con granulometría y condiciones de vacíos similares, se obtienen valores diferentes a los calculados por SBC, arrojando una permeabilidad del orden de 10^{-4} .

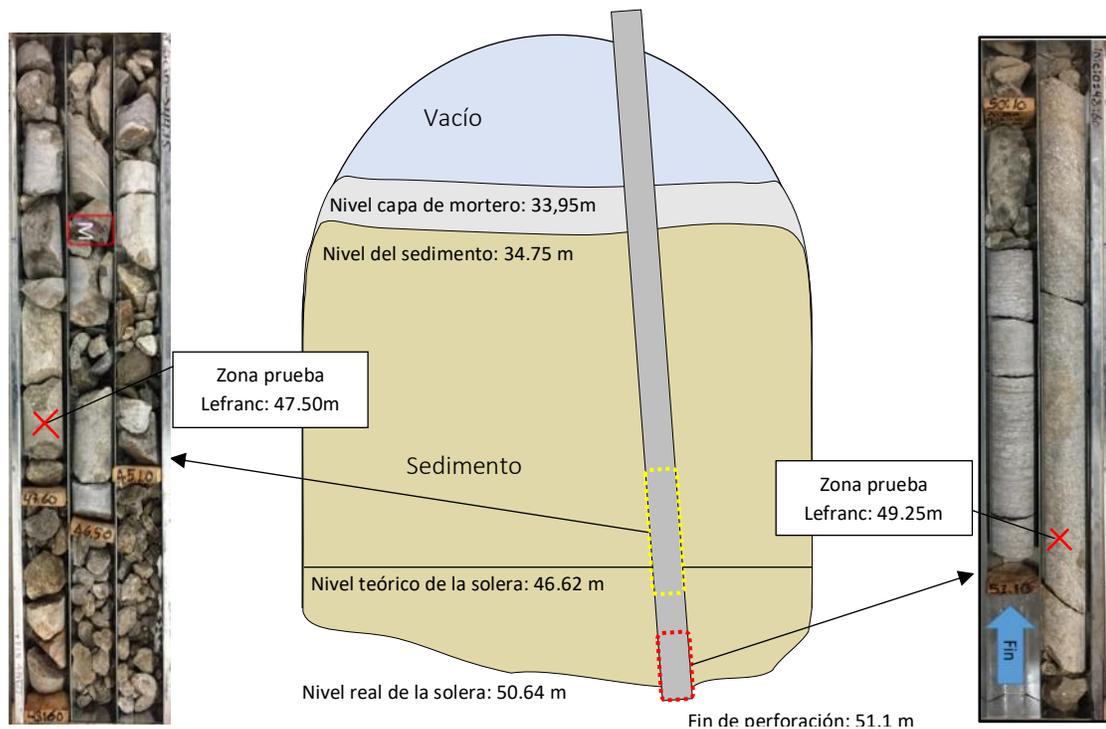


Figura 4. Niveles de pruebas Lefranc. Fuente: Elaboración propia.

Es importante añadir que antes de las inyecciones de mortero se realizaron los sondeos exploratorios S1, S2, S3 y S4 en los que no se logró mantener cabeza constante del nivel del agua en las pruebas Lefranc, lo que indica que el sedimento originalmente era de una permeabilidad alta. Teniendo en cuenta lo anterior y los resultados de las pruebas Lefranc ejecutadas en los sondeos S7 y S8 y el porcentaje de mortero recuperado de los recobros, se puede interpretar que las inyecciones ejecutadas lograron consolidar el sedimento a un grado donde se obtuvo la permeabilidad requerida en las especificaciones técnicas ($1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ o menor).

Partiendo de lo anterior, la figura 5 define el tipo de material a utilizar según la permeabilidad del suelo. Si se observa, para permeabilidades de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ o mayores se deben usar desde gel duro de silicato de sodio hasta lechadas de cemento. Lo cual coincide con el uso de lechadas de cemento para la consolidación del sedimento depositado.

Igualmente, si se tiene en cuenta que la resina es el último material en aplicarse, y los resultados de la permeabilidad del orden de 10^{-5} m/s después de la primera etapa de inyección. La probabilidad de que se llegue a una permeabilidad del orden de 10^{-6} m/s es alta. Por lo anterior, se puede observar que para de este orden, se recomienda el uso de resinas orgánicas, tales como las resinas de silicato, que son usadas en minas de carbón y tratar fracturas grandes en rocas (Sika, 2017). Sin embargo para las inyecciones secundarias se tiene planeado usar resina bi-componente MasterRoc MP 368, la cual también tiene

propiedades que se adaptan a las necesidades que se tienen en el sedimento, pues entre sus campos de aplicación esta la consolidación de rocas fracturadas en estructuras subterráneas y consolidación de terrenos arenosos, rocas fracturas, entre otros. Además, es apropiado para aplicaciones submarinas (Basf ,2017).

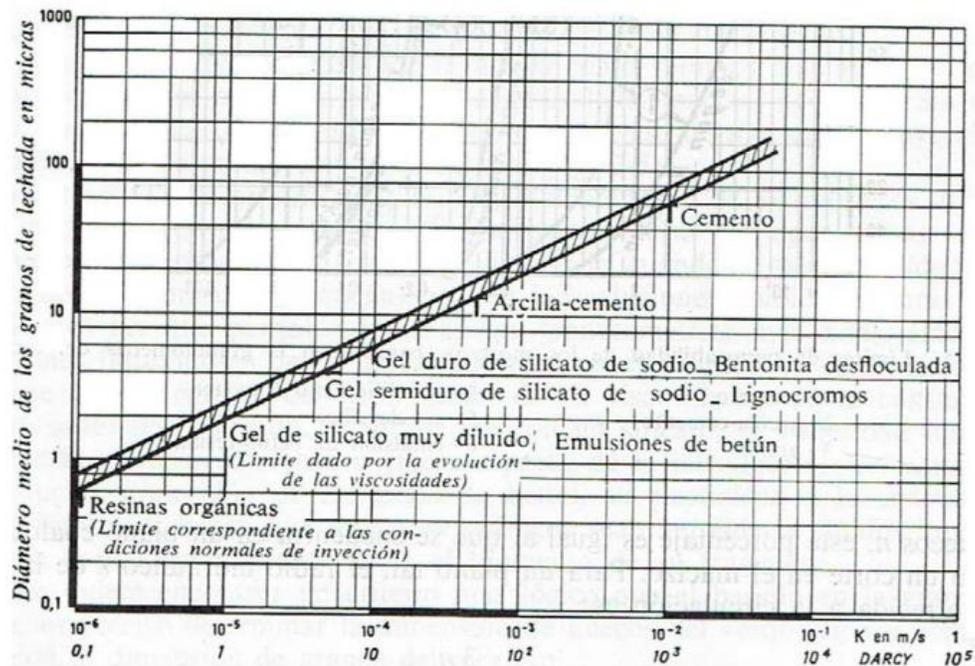


Figura 5. Límites de penetrabilidad de los morteros basados en la permeabilidad del medio (Cambefort, 1968).

Fuente: *Control del contenido de cemento de inyecciones en suelo* (p.7) de Aronés Barbarán, Nóvaro, 2017.

De acuerdo a lo expresado por los geólogos del área de calidad, el material depositado en el TDD se acerca a un conglomerado mal seleccionado y permeabilidades del orden de 10^{-5} m/s corresponden a areniscas de grano medio, normalmente usadas para la realización de pantallas impermeables.

SBC también presentó un procedimiento de diseño del detalle de inyecciones de lechada y resina, que al igual que para las inyecciones de mortero, incluye un tramo inicial compuesto por 6 barrenos de los abanicos P2 y P3, ubicados sobre el hastial derecho del TDD y cercanos a los sondeos de verificación posteriores a la ejecución de las inyecciones primarias; y 3 sondeos exploratorios: uno previo a la inyección de lechada (S12), uno de verificación una vez inyectada la lechada (S13) y uno de verificación una vez inyectada la resina (S14).

Las profundidades para las pruebas Lefranc en el sondeo S12 fueron seleccionadas por SBC y expuestas en el procedimiento de ensayos Lefranc de cabeza constante. A continuación,

en la tabla 5 se muestran los resultados de la permeabilidad calculada en cada uno de los puntos determinados.

Tabla 5. Resultados de pruebas Lefranc realizadas en los sondeos S7 y S8.

Sondeo	Profundidad (m)	Longitud del tramo (m)	Permeabilidad (m/s)
S12	39,5	1,0	1,96E-05
	42,0	1,0	2,93 E-05
	46,5	1,0	4,03E-05
	49,0	1,0	1,21E-05

Inicialmente, las inyecciones secundarias fueron diseñadas con un diámetro HQ (96mm) o de 4"1/2 con tubos manguitos de 2" con manguitos cada 50 cm. Pero debido a los atascamientos y obstrucciones de los tubos a la hora de inyectar la lechada de vaina en algunos barrenos, estos se tuvieron que perforar nuevamente con un diámetro de 6" y se instalaron tubos manguitos con sacos obturadores para sellar la interfaz entre el macizo rocoso-vacío y vacío-sedimento (Figura 6). El sellado de las interfaces hace parte de los cambios propuestos en el procedimiento de diseño de detalle de inyecciones de lechada y resina, el cual determina que estos sellos podrían ser realizados con saco obturador y/o lechada.

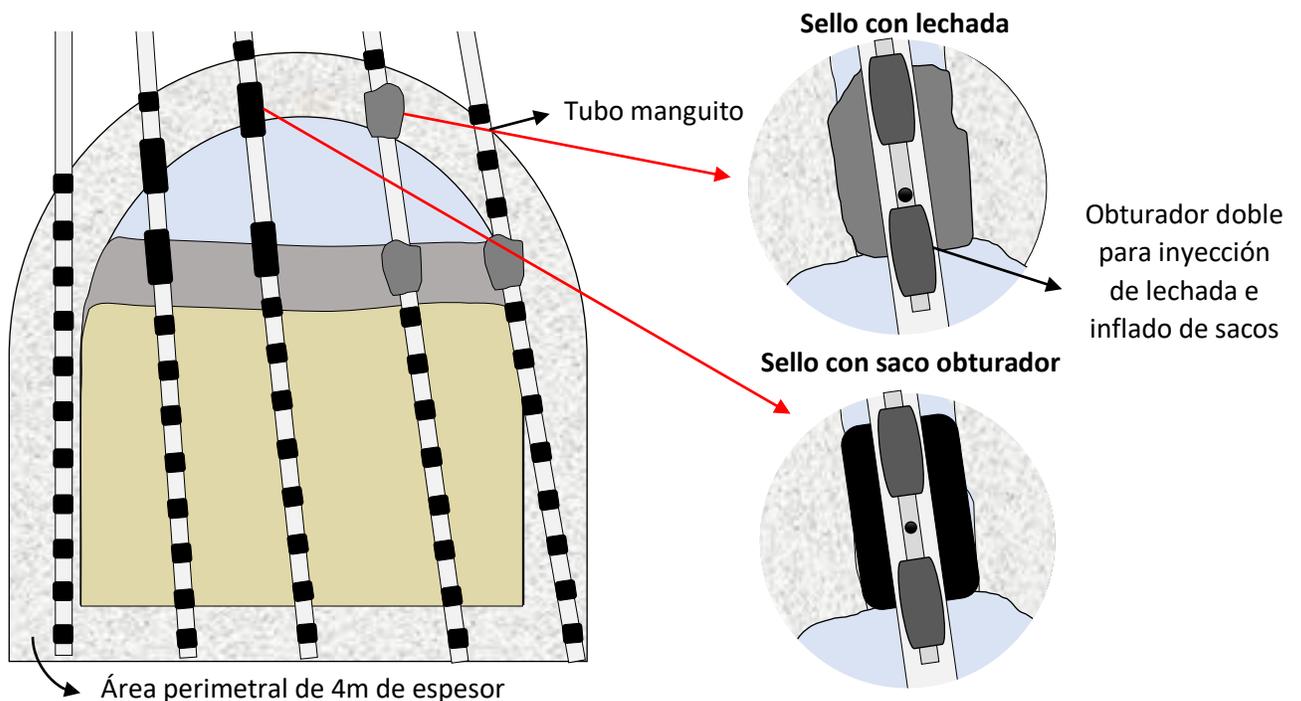


Figura 6. Zonas de las interfaces y sellado.

Fuente: Elaboración propia.

El bloqueo de los tubos se dio por el fraguado de la mezcla que cae al fondo del tubo manguito cuando se desinfla el obturador doble una vez se termina la inyección de vaina en cada tramo, la cual debe ser lavada con agua cada determinado tiempo, dependiendo de una muestra que es analizada constantemente para verificar el nivel de endurecimiento de la lechada. La obstrucción de los tubos manguito impide que se cumpla el propósito de estos, actuando como válvulas anti retorno y permitiendo realizar la inyección tantas veces como se quiera en un tramo sin necesidad de perforar nuevamente.

En este sentido, una de las mejoras implementadas en el seguimiento de las actividades y control de calidad, fue el formato de informe de avance diario de control de calidad, esquemas de seguimiento y el modelo 3d en AutoCAD (Ver figura 7), el cual facilitaba la interpretación de los cambios que se presentaban en las inyecciones, dada la capacidad de visualizarlo en 3D, acompañado de los cálculos de seguimiento realizados. El informe consta de tres secciones: avances, novedades y seguimiento gráfico. El objetivo de este fue comunicar el grado del progreso de las actividades e informar las incidencias encontradas en las inspecciones diarias al frente.

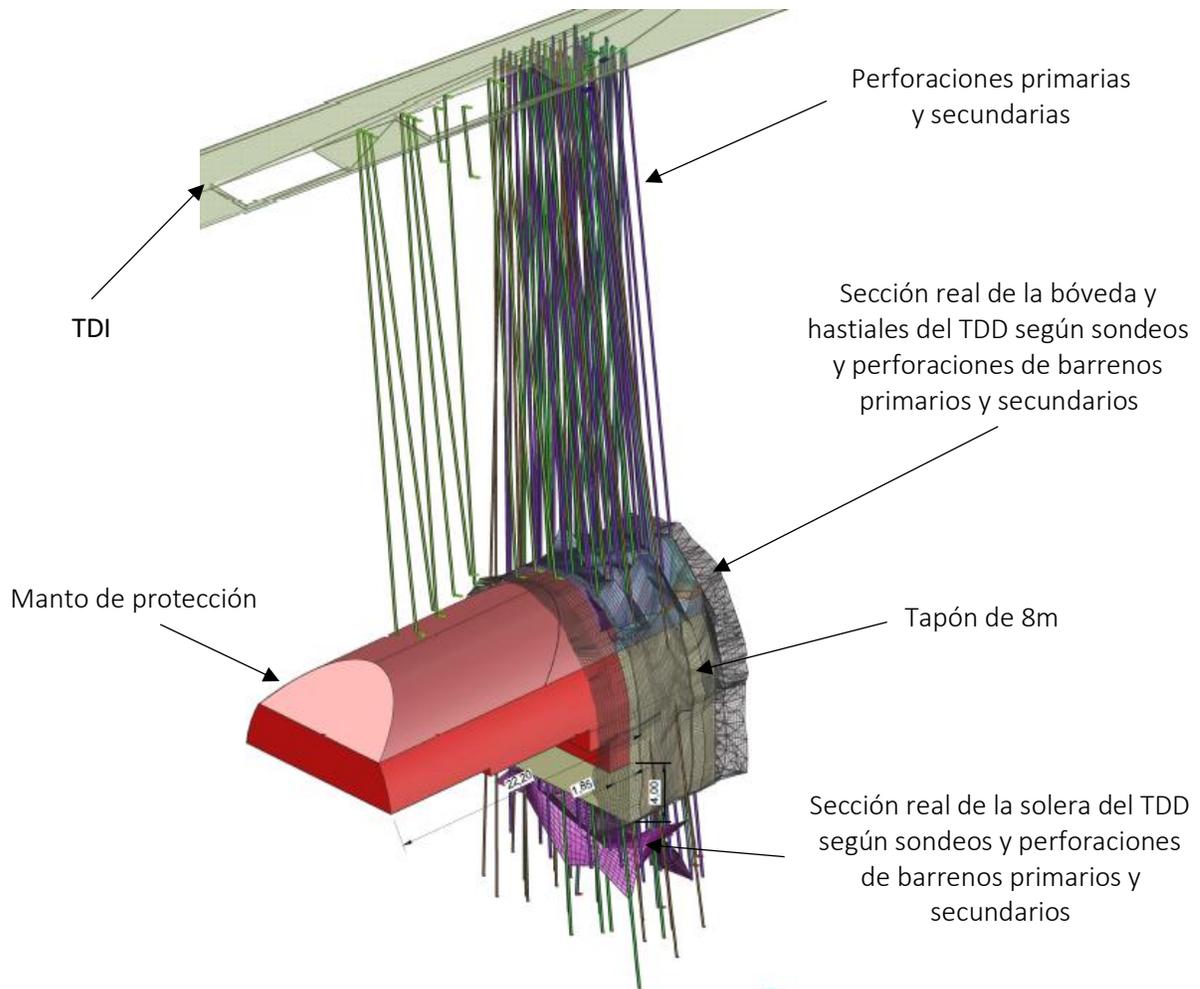


Figura 7. Modelo 3D realizado en AutoCAD.

Fuente: Elaboración propia.

El seguimiento se empleó de manera esquemático por facilidad de entendimiento y permitir organizar la información más relevante. Al igual que el informe, tuvo como propósito mostrar el progreso de las actividades pero de una manera más ilustrativa, atractiva y fácil de entender para las personas que no tienen un acercamiento constante al tema.

El modelo 3D realizado en AutoCAD, es una herramienta que logró ver de una manera más precisa y didáctica el avance del frente, a una escala proporcional a la real. Al poder navegar y observar los elementos de manera tridimensional facilitó la detección y corrección de errores. Por ejemplo, con este se pudo observar la trayectoria de los barrenos de las inyecciones; graficar a partir de los datos de las liberaciones de perforación, el nivel real de la solera, el sedimento y la solera del TD. Igualmente, se modeló la trayectoria de los micropilotes que se instalaron y observó la desviación de su punto de llegada respecto al punto teórico de los planos de construcción.

En un principio el informe era un formato usado solo para los avances del PT2, pero debido a su eficacia en cuanto a la ilustración de los avances al coordinador del área de calidad, este fue oficializado en el sistema SIGO para su implementación en todos los frentes de la obra a los que se les hace acompañamiento.

6.2 Análisis de las liberaciones de actividades y los datos entregados en estas

Se examinó y clasificó cada una de las liberaciones recolectadas de actividades relacionadas con las inyecciones de consolidación, para la ejecución del informe ejecutivo. Entre lo que se revisó para la clasificación está el buen diligenciamiento de estas, es decir, que tuviera cada uno de los parámetros exigidos en el formato; el uso del formato apropiado según la actividad que se iba registrar y las firmas de todas las partes involucradas (Interventoría, el área de Concretos y SBC). En total se hicieron 3 informes ejecutivos y se revisaron 439 registros de los cuales el 86,6% de los registros fueron conformes, como se muestra en la siguiente tabla.

El mayor porcentaje de formatos no conformes fueron: Los registros de control de perforación e inyección usados para las inyecciones ascendentes con un 56% y el de los registros de perforación con un 21%. Las principales causas fueron la ausencia del nivel de la bóveda, del sedimento y/o de la solera en las perforaciones. Al igual que la omisión de la profundidad de la instalación de los sacos obturadores y la presión de inyección de las barras de las inyecciones ascendentes. Las principales causas fueron la ausencia del nivel de la bóveda, del sedimento y/o de la solera en las perforaciones. Al igual que la omisión de la profundidad de la instalación de los sacos obturadores y la presión de inyección de las barras de las inyecciones ascendentes.

Las liberaciones son la evidencia de las actividades realizadas en el frente por lo que el buen diligenciamiento de estas permite verificar el cumplimiento de lo solicitado y

establecido en los planos de construcción y especificaciones; llevar un orden y tener la información necesaria para un seguimiento completo de los procesos. Además, permite tener un registro de las cantidades de obra ejecutadas para su pago.

Tabla 6. Clasificación de las liberaciones de las actividades para los informes ejecutivos.

Identificación del registro	N° de registros totales	N° de registros conformes	N° de registros No conformes
Control de perforación e inyección	54	24	30
Control stock central de lechada	94	94	0
Control y conteo de mezclas	121	119	2
Control de inyección de lechada	51	47	4
Registro de perforación	111	88	23
Resultados de ensayos Lefranc	8	8	0
Total	439	380	59

Para las inyecciones de consolidación, las especificaciones técnicas del PT2 del TDD define elementos como los productos para la inyección y las condiciones que se deben tener en cuenta para el diseño de las inyecciones (relación de vacíos, porosidad, porcentaje de vacíos a inyectar con cada material, factor de lavado, etc.); pero componentes como el tipo de maquinaria y elementos propios del diseño de detalle de las inyecciones, las especificaciones adjudican al contratista: “El diseño de detalle de las inyecciones de consolidación de estos sedimentos es parte del alcance del contratista de inyecciones y de Micropilotes del PT2. Las diferentes fases y zonas del programa de inyección requerirán emplear diferentes combinaciones de estos materiales. Esto es parte del diseño de detalle, el cual como ya se dijo, es parte del alcance del Contratista de Inyecciones y de Micropilotes del PT2”. Siendo SBC el contratista, en los documentos que contienen el diseño de detalle de las diferentes etapas de inyecciones han concretados valores para los parámetros de inyección presión, volumen y caudal que se registran en las liberaciones y son tomadas como los datos teóricos para la comparación y análisis de las liberaciones de actividades realizadas en campo.

Aunque se tengan valores determinados para los parámetros de inyección no siempre será posible cumplirlos debido a la heterogeneidad del material que se encuentra depositado en el TDD. Cada barreno tiene una condición de vacíos diferente que no se puede predecir, es decir, a medida que se avanza la inyección se pueden presentar tramos que en medio de bloques de roca o en medio de rocas muy fracturadas de las que depende la cantidad de mezcla que se consume y si se sube o se mantiene la presión. Es por esto, que no se pueden considerar los datos reales de las inyecciones como conformes o no conformes por

no ser los establecidos en los procedimientos y solo se realizó el registro de las cantidades y valores de los parámetros para hacer un análisis del comportamiento que se iba presentando en cada barreno, realizar cambios y complementar los procedimientos buscando una mejora en cuanto a los resultados de las próximas etapas de inyección.

6.3 Reporte de irregularidades en las actividades ejecutadas

Durante la ejecución de las actividades de prácticas se emitieron cuatro no conformidades (NC), relacionadas con el PT2, al área de concretos encargada de las obras que se ejecutan en el TDI (Ver tabla 7). Todas estas NC requieren de acción correctiva y corrección inmediata, todas habían sido respondidas por SBC, excepto la NC 820. A la fecha el estado general de las NC es “Abierta”, es decir, no se han corregido y/o no se ha implementado el plan de acción propuesto por SBC. En el caso de la NC 808, correspondiente a la falta de trazabilidad de la tubería comprada por SBC para los micropilotes, ya fue implementada la corrección inmediata y fue puesto en marcha un plan de acción. Por lo que se está a la espera la firma de las partes (Área de concreto y SBC) para su cierre. Como corrección inmediata se hizo una nueva orden de compra de tubería y como acción correctiva, SBC implementó un procedimiento para la certificación de calidad y trazabilidad de la tubería y los acoples.

Tabla 7. Resumen de No Conformidades

Consecutivo	Fecha de emisión	Origen	Área que emite	Acción propuesta	Causal (Hecho)
806	17/03/2020	Inspección	SIGO	Acción Correctiva y Corrección	Inconsistencia en la información suministrada de instalación de micropilotes en el Pretapón #2
808	1/03/2020	Reclamo	SIGO	Acción Correctiva y Corrección	Incumplimiento de los parámetros de calidad de material suministrado por parte de SBC para la ejecución de la obra del Pretapón #2.
809	18/03/2020	Inspección	SIGO	Acción Correctiva y Corrección	Des calibración del equipo de medición (Cuenta litros) de cantidades de material inyectado
820	29/08/2020	Inspección	SIGO	Acción Correctiva y Corrección	Desviación del micropilote 33A fuera de la tolerancia.

La NC 806 y la NC 820 son referidas a la información suministrada de las desviaciones de la trayectoria de los micropilotes. La primera fue emitida por las inconsistencias en la información enviada en los registros de medición de la verticalidad; Los valores iniciales de los ángulos de Azimut e Inclinación, en la mayoría de los registros, no coincidían con los valores iniciales definidos en los planos de construcción, ni con los que se encontraban en los registros de liberación de la secuencia de instalación de los micropilotes, ni con los

valores de las liberaciones topográficas de la interventoría, los cuales si concordaban entre sí. Situación que generó incertidumbre en los valores reales de las desviaciones presentadas. Esta fue reportada por la interventoría en varias comunicaciones en las que solicitó tomar nuevamente los registros de los 13 micropilotes que se habían instalado en el momento. Los cuales se descartaron por tener desviaciones fuera de la tolerancia. Como plan de acción, SBC realizó un procedimiento para la perforación y alineamiento de los micropilotes PRO-COE-PT2-03, el cual, una vez se implementó en la reanudación de la perforación e instalación de los micropilotes, no dio los resultados esperados. En consecuencia, se emitió la NC 820 por las desviaciones que se encontraban por fuera de lo establecido por las especificaciones técnicas del micropilote 33A, el primero en ser perforado bajo los pasos del procedimiento.

La NC 809 fue emitida ya que una vez se inició las actividades de las inyecciones primarias, se identificó un gran desfase entre los volúmenes registrados por medio del cuentalitros y la cantidad de material preparado realmente. Como corrección inmediata, se instaló un nuevo cuentalitros calibrado y verificado en obra; para las futuras inyecciones, se verificará que no haya desfases entre las lecturas de fabricación y lo registrado. Como plan de acción SBC propuso verificar las conexiones de transmisiones de datos y la alimentación del equipo de medición; y verificar la fabricación versus lo registrado por el caudalímetro durante la inyección para hacer las correcciones necesarias de cantidades. Ya que no se tiene evidencia de que esto no se ha realizado, la NC sigue abierta.

7. Conclusiones

A pesar de que se planteó una metodología inicial, esta se modificó a medida que se conocieron más las características del sedimento que se encuentra depositado en el TDD. Además se exigieron por parte de la interventoría más procedimientos con los ajustes asociados a la ingeniería de detalle en las inyecciones. Con los diseños de detalle planteados por SBC, se espera que los principales problemas encontrados en la ejecución de las inyecciones primarias, puedan ser corregidos y lograr el aglutinamiento del sedimento con la resistencia y la adherencia exigida. Así que la ejecución de tramos iniciales de prueba, las pruebas de permeabilidad y sondeos de verificación, son pasos importantes porque permitirán estudiar el material a inyectar y evidenciar si los cambios son los adecuados.

Las inyecciones lograron consolidar el sedimento a un grado donde se obtuvo la permeabilidad requerida en las especificaciones técnicas (1×10^{-4} m/s o menor). A pesar de que la interventoría indicó que las inyecciones primarias no lograron aglutinar el sedimento por el mortero encontrado en los recobros S5, S6, S7, S8 y S9. Las pruebas Lefranc ejecutadas en el sondeo S7 y S8 arrojaron permeabilidades del orden de 10^{-4} m/s y 10^{-5} m/s. A diferencia de los sondeos previos a las inyecciones, en los que no se logró mantener cabeza constante del nivel del agua en las pruebas Lefranc. Lo anterior, indica que el sedimento originalmente era de una permeabilidad mayor a 10^{-4} m/s.

No fue posible categorizar como “conformes” o “no conformes” los parámetros reales de inyección registrados en las liberaciones debido a que las condiciones de cada barreno son particulares, por las condiciones y la aleatoriedad del material encontrado en el TDD. Un tratamiento efectivo con inyecciones se realiza cuando, se tiene un conocimiento completo de las condiciones geológicas y geotécnicas. Por esto, la aleatoriedad del material encontrado en el TDD ha sido el mayor problema identificado. Según los geólogos del área de calidad; este se acerca a un conglomerado mal seleccionado. Es decir, con un grado de variación del tamaño en las partículas alto, lo que hace que la condición de cada barreno sea particular. Sin embargo, los parámetros teóricos fueron determinados tomando el sedimento como un material con una distribución de vacíos homogénea.

Uno de los aspectos a mejorar es el seguimiento realizado a las no conformidades, dado que las mismas no presentan una rápida y correcta solución, y por tanto quedan suspendidas debido a que los planes de acción propuestos no se cumplen, lo cual no es evidenciado por no tener un adecuado seguimiento. Lo que retrasa el flujo natural de la obra. Las reacciones tempranas a través de una toma de decisiones rápidas ayudan a mitigar y corregir posibles consecuencias a futuro. Es necesarios entonces la revisión eficiente de las acciones correctivas de todos los procedimientos y de ser necesario realizar cambios en el sistema de gestión de Calidad.

Teniendo en cuenta las dificultades que se han presentado en la ejecución de las inyecciones de consolidación primarias y secundarias, se ha demostrado la importancia del seguimiento y control de calidad de los procesos. Se evidenció la necesidad de fortalecer los procesos de seguimiento principalmente en la etapa de inyección de mortero en donde se encontró que era indispensable realizar ajustes en la metodología para las siguientes etapas de inyección. Igualmente, se fortaleció el seguimiento a los métodos de verificación, como lo fueron los sondeos exploratorios y las pruebas Lefranc. Además, con el fin de tener un mejor manejo de la información y facilidad de entendimiento de los avances, fue necesario implementar nuevos elementos de seguimiento como los informes diarios de avance, los esquemas y el modelo 3D.

8. Referencias Bibliográficas

EPM. (2011). Especificaciones técnicas de construcción, Capítulo 9. Perforaciones e inyecciones. Medellín.

Integral. (2019). Especificaciones Técnicas Taponamiento Túnel de Desviación Derecho R1. Medellín.

Soletanche Bachy Cimas. (2020). Metodología de trabajo aplicable al servicio de construcción del sistema del pre taponamiento #2 para el TDD del proyecto hidroeléctrico Ituango. Bogotá.

Soletanche Bachy Cimas. (2020). Informe de diseño de detalle de sistema de inyección proyecto hidroeléctrico Ituango. Bogotá.

Integral. (2019). Perfil longitudinal por el eje del Túnel de Desviación Derecho. Plano para construcción N° DC-PHI-031-TPN-PT-S-110 R5.

Universidad de Palermo. (2002). La Calidad en la Industria de la Construcción. Estudio Diagnóstico. Recuperado de: https://www.grupoconstruya.com/actividades/docs/calidad_UP.pdf

Master Builders Solutions. (2014). Master Matrix® UW 450 Aditivo antideslave. Recuperado de: <https://assets.master-builders-solutions.com/en-central-america/basf-mastermatrix-uw450-tds-sp-mx.pdf>

Master Builders Solutions. (2017). Ficha técnica: MasterRoc MP 368. Recuperado de: https://www.master-builders-solutions.com/basf.es/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/77ce133f-6ada-4f21-80f7-c7bcf640d532/MasterRoc_MP_368.pdf?guest=true

Universidad Manuela Beltrán. (2011). Todo sobre No conformidades. Recuperado de: http://virtualnet2.umb.edu.co/virtualnet/archivos/open.php/7772/Todo_sobre_No_conformidad.pdf

J. Ruiz. A. Gil. D. Plana. C. López. J. Cornelles. (2004). Soluciones combinadas de impermeabilización y refuerzo estructural por inyección de impregnación mediante microcemento en túneles de metro. España.

Rico Rodríguez, A., & Gutiérrez Rodríguez, R. (2019). Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, 45-63.

CORASCO. (2008). Manual para la Elaboración de Especificaciones Técnicas Para Obras de Carreteras y Puentes. Nicaragua.

Sika. (2017). Consolidación, estabilización e impermeabilización de suelos y rocas en túneles y minas. Colombia.

Muzas lavad, Fernando. (2003). Inyecciones de fracturación y de compactación. Instituto técnico de la Viabilidad y del Asfalto. Madrid.

Pazos Bernal, David. (2020). Inyecciones de Consolidación en Túneles Utilizando Lechadas de Cemento estables. Universidad Santo Tomás. Bogotá .

Aronés Barbarán, Nóvaro. (2017). Control del contenido de cemento de inyecciones en suelo. Universidad Politécnica de Madrid. España.

9. Anexos

Anexo 1. Esquema de seguimiento a barrenos de inyecciones primarias

ANEXO 1. ESQUEMA DE SEGUIMIENTO A BARRENOS DE INYECCIONES PRIMARIAS

