



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

APOYO A LAS ACTIVIDADES DEL ESTUDIO DE DISEÑO DEL CONCRETO Y VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EN EL TRATAMIENTO Y RESTITUCIÓN DE LA OQUEDAD PRESENTE EN EL MACIZO ROCOSO ENTRE CASA MÁQUINAS Y ALMENARA 1 DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO.

Autor(es)

Camilo Otálvaro Quintero

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



APOYO A LAS ACTIVIDADES DEL ESTUDIO DE DISEÑO DEL CONCRETO Y VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EN EL TRATAMIENTO Y RESTITUCIÓN DE LA OQUEDAD PRESENTE EN EL MACIZO ROCOSO ENTRE CASA MÁQUINAS Y ALMENARA 1 DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO.

Camilo Otálvaro Quintero

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil.

Asesores

Edwin Fabián García Aristizábal, Ing. Civil, PhD – Universidad de Antioquia
Walter Orlando Pérez Barrientos, Jefe de laboratorio – Consorcio CCC
Ituango
Andrés Arturo Lopera Jaramillo, Ing. de calidad - Consorcio CCC Ituango

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Edwin Fabian García Aristizábal, Walter Orlando Pérez Barrientos y Andrés Arturo Lopera Jaramillo quienes me brindaron con los brazos abiertos todo su conocimiento y guía a través de cada una de las etapas de este trabajo para alcanzar los resultados esperados.

También quiero agradecer a la Universidad de Antioquia por brindarme la oportunidad de formarme como ingeniero civil, y por todos los conocimientos y experiencias adquiridas allí en esos años de vida académica, igualmente al consorcio CCC Ituango por darme la oportunidad de realizar con ellos mi práctica académica e iniciar mi vida laboral.

Por último, quiero agradecer a mi familia y amigos, por siempre estar siempre a mi lado apoyándome. En especial, quiero hacer mención de mi madre, por el amor recibido, la dedicación y paciencia; además por ser mi mayor inspiración, soporte y guía.

A todos, muchas gracias.

1. Resumen

El proyecto hidroeléctrico Ituango presentó una contingencia en el mes de abril del 2018 por el taponamiento del sistema de desviación de aguas a causa de una serie de deslizamientos, lo que obligó a desviar las aguas del río Cauca por el complejo de cavernas de casa máquinas durante 271 días evitando así que el nivel del embalse alcanzara la cota de la presa, la cual estaba en construcción a la fecha.

Una vez se culminó la construcción de la presa y posibilitando el paso de las aguas por el vertedero, se dio el cierre de las compuertas que habilitaban el paso del río Cauca hacia el complejo de cavernas. Al momento que se logró ingresar para realizar la exploración y estudio del estado del complejo subterráneo se evidenció una oquedad estimada en 30.000 m³ en la zona del machón que dividía la Almenara 1 y Casa Máquinas Norte; esta condición fue producto del impacto directo del agua del río contra el macizo. Por lo tanto, el diseñador del proyecto modeló la restitución de dicho machón con un concreto de características mecánicas específicas relacionadas con resistencia a compresión y módulo elástico, encargando al contratista de elaborar un estudio lo suficientemente amplio con diversos cementantes y adiciones que suplieran los requerimientos técnicos, la cual culminó con la definición de la mezcla DL 927 la cual cuenta con 235 kg/m³ de contenido de cementante, una relación agua/cemento (A/C) de 0.72, capacidad de mitigación de la reacción álcali-sílice (RAS) por la adición de Metacaolín Fortacret CCR al 15% del cementante; además, con un balance técnico-económico destacado.

Mientras que la validación del cumplimiento de las especificaciones técnicas de los concretos utilizados en la restitución es satisfactoria; todos los concretos presentaron un cumplimiento del 100% a excepción del concreto lanzado, donde uno de los parámetros de conformidad presentó valores inferiores a los especificados en solo unas de las muestras tomadas, sin embargo, se tomaron medidas en base de las especificaciones técnicas con el fin de garantizar el total cumplimiento de todos los concretos utilizados en la oquedad.

Palabras clave: concreto de restitución, concreto masivo, oquedad, especificaciones técnicas.

2. Introducción

La contingencia presentada en el proyecto hidroeléctrico Ituango en el año 2018 a causa del taponamiento del sistema auxiliar de desviación de aguas, derivó en un embalse no programado y a la fecha la presa no tenía la altura suficiente para desviar el río por la zona del vertedero, por lo que se tomó la decisión de desviar las aguas del río Cauca por el complejo de cavernas de casa máquinas, el cual no se encontraba totalmente culminado. Es decir, al momento de ingresar el agua hacia una estructura inconclusa y finalmente no diseñada para evacuar agua

en estas condiciones, el grado de afectación en las estructuras del complejo fue de grandes dimensiones.

Una vez se logró levantar la presa a la cota necesaria para evacuar el agua del río por el vertedero, se procedió a la exploración y estudio del estado de casa máquinas, accediendo por galerías auxiliares con el fin de diagnosticar preliminarmente las afectaciones ocurridas durante el paso del agua por las diferentes estructuras que la componen. Dentro de la exploración se identificó la pérdida parcial del machón que dividía la casa de máquinas norte y la almenara 1 en la zona de las unidades 1 y 2. Esta oquedad fue producto del golpe directo del agua del río luego de transitar por los pozos de presión y conducciones inferiores, recibiendo toda la energía del impacto, lo que provocó una erosión estimada en 30.000 m³ la cual se está restituyendo mediante un concreto masivo con condiciones especiales de resistencia y temperatura.

Se determinan las razones de la elección del diseño del concreto masivo mediante la comparación de los resultados técnico-económicos del abanico de dosificaciones propuestas para garantizar obtener una mezcla conforme a los lineamientos exigidos en el diseño. Igualmente, se realizó la validación de todos los concretos despachados de planta hacia el tratamiento y restitución de la oquedad mediante ensayos de campo como lo son el asentamiento (*ASTM C143*) y la temperatura (*ASTM C1064*), además de ensayos de laboratorio como la resistencia a la compresión (*ASTM C39/C39M*), módulo de elasticidad (*ASTM C469/C469M-14*) y tenacidad (*EFNARC/NTC 5721*). El alcance del proyecto abarca el diseño de concreto, validación de características y demás controles que ayuden en la verificación del cumplimiento de los requerimientos establecidos en los planos de construcción.

Referente a la metodología empleada, es importante resaltar que fue ejecutada en dos etapas; la primera fue el análisis de un amplio abanico de dosificaciones propuestas a con diferentes cementantes y relaciones agua-cemento con el fin de evaluarlas mediante investigaciones debidamente sustentadas; además, de ensayos realizados en el laboratorio del proyecto, permitiendo de esta forma ir descartando aquellos diseños que no cumplían a cabalidad los parámetros requeridos y los que menos se acercaban, para que finalmente se lograra identificar la mezcla que mejor evidenciara un balance técnico-económico dentro de todo el conjunto de diseños propuestos. En cuanto a la segunda etapa correspondiente a la verificación del cumplimiento de las especificaciones técnicas de los concretos utilizados en la restitución de la oquedad, se realizó la recopilación de datos referentes a los resultados de ensayos de laboratorio en bases de datos correspondientes al tratamiento del macizo rocoso que se realizó previo al inicio del seguimiento, además de una constante recolección de información sobre los resultados de ensayos en campo y de laboratorio de los diferentes tipos de concretos utilizados para la restitución; esto con el fin de alimentar una base de datos para cada tipo de concreto y posteriormente consolidarlos mediante tablas y/o gráficas y realizar su respectivo análisis en comparativa con los parámetros técnicos correspondientes.

Todo eso con el fin de desarrollar un diseño de mezcla de un concreto que se asemeje mayormente a las características de resistencia a la compresión y módulo elástico previamente identificadas sobre el macizo rocoso a restituir.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Apoyar a las actividades del proceso de análisis y verificación en lo que confiere al diseño y especificaciones técnicas de los diferentes concretos a emplear en el tratamiento y restitución de la oquedad presente entre Casa de Máquinas y Almenara 1 del proyecto hidroeléctrico Ituango.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis de los diseños sugeridos para el concreto masivo de restitución, así como determinar las razones de elección de uno de estos.
- Analizar el tratamiento realizado al macizo rocoso previo a la colocación del concreto masivo.
- Verificación de resistencia a la compresión de cilindros y núcleos, tenacidad y contenido de fibra, y demás ensayos que competan en los diferentes concretos usados en la restitución.
- Analizar el comportamiento a través del tiempo de los diferentes parámetros evaluados como factores de conformidad y rechazo para concretos convencionales de la restitución.

4. Marco Teórico

4.1. Conceptos básicos

- **Oquedad:** Espacio que en un cuerpo sólido queda vacío, natural o artificialmente. (Real academia española, 2019).

En la *Ilustración 1* se aprecia la oquedad/el vacío presente entre Casa de Máquinas y Almenara 1 vista en perfil donde se puede apreciar el túnel de aspiración (en rojo) y el concreto a utilizar en la restitución (en verde).

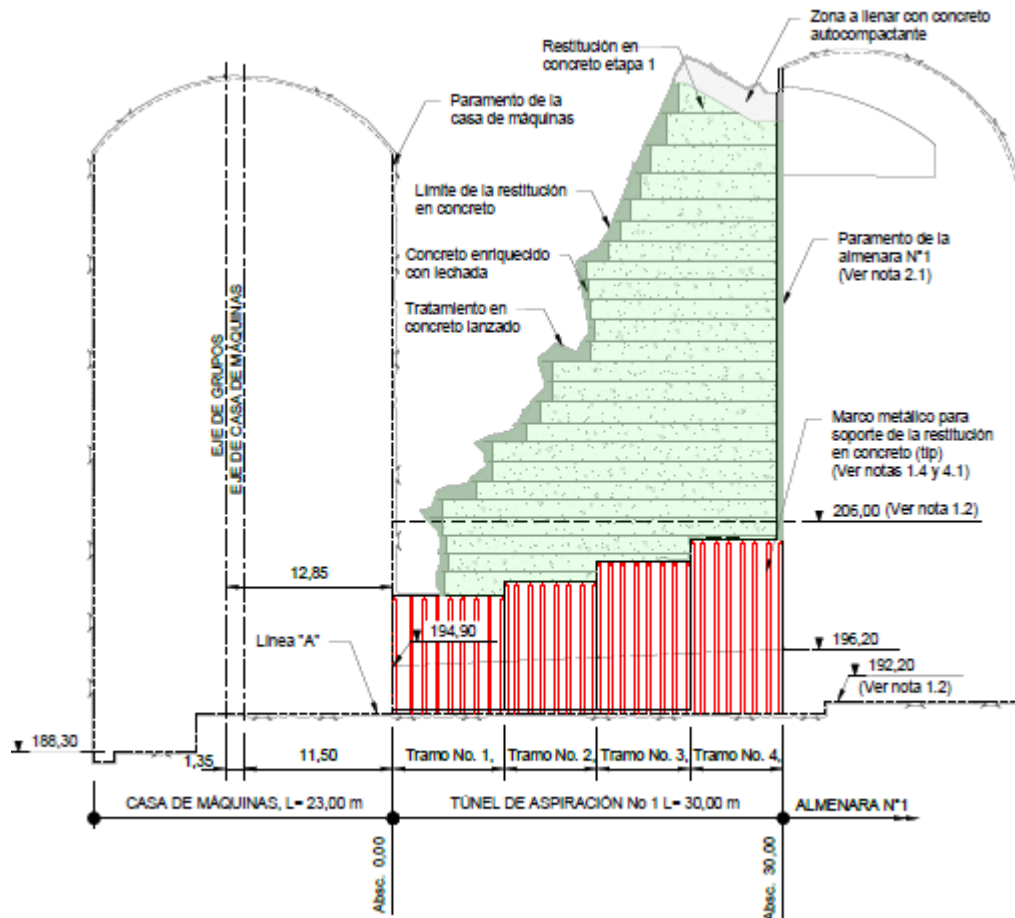


Ilustración 1. Vista lateral de la oquedad presente en el machón que divide casa de máquinas y almenara 1. Tomada de los planos del diseñador.

- El **concreto masivo** es definido por el comité 207 de la ACI como: Cualquier gran volumen de concreto en la obra, con dimensiones suficientemente grandes que requieran medidas para enfrentar la generación de calor y para controlar los cambios de volumen, a fin de minimizar el agrietamiento. (PCA, 2011).

En la *ilustración 2*, se puede apreciar la magnitud de oquedad presente en el complejo de cavernas vista desde Almenara 1 con parte del concreto masivo de restitución (parte derecha) ya vaciado.



Ilustración 2. Vista desde almenara 1 de la oquedad y el concreto dental vaciado. Fuente propia.

- Los **materiales cementantes suplementarios (MCS)**, son materiales que, cuando se usan en conjunto con el cemento Pórtland o el cemento mezclado, contribuyen a las propiedades del hormigón a través de la actividad hidráulica o puzolánica o ambas. Un material hidráulico reacciona químicamente con el agua para formar compuestos cementantes. Una puzolana es un material silíceo o aluminio-silíceo que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio para formar hidrato de silicato de calcio y otros compuestos cementantes. Las cenizas volantes, el cemento de escoria, el humo de sílice y las puzolanas naturales como el esquisto calcinado, el metacaolín u otras arcillas calcinadas, se clasifican generalmente como MCS. (PCA, 2011)
- Los **aditivos químicos** son esos ingredientes del concreto diferentes al cemento hidráulico, materiales cementantes suplementarios (MCS), agua, agregados y refuerzo de fibras que se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante la mezcla. Hay una variedad de aditivos químicos disponibles para su uso en mezclas de concreto para modificar sus propiedades en estado fresco y endurecido. (PCA, 2011)
- La **reacción álcali-sílice (RSA)** es una reacción química entre los hidróxidos alcalinos en la solución porosa del hormigón y en ciertas formas de minerales de sílice reactivos que se dan en algunos agregados. El producto de la reacción, un gel de sílice alcalino, es higroscópico, y absorberá agua y se presentará un cambio de volumen si el hormigón

está en un ambiente húmedo. La expansión del gel puede, bajo ciertas circunstancias, conducir a la expansión y el agrietamiento del hormigón. (FHWA, 2011)

- **Estabilidad de macizos rocosos con concreto:** Fundamentalmente, el soporte de las laderas de roca sólo puede ser en forma de muros de contención. Aunque a menudo se utiliza hormigón proyectado con/sin malla de alambre o fibras, el efecto estructural de las fibras se utiliza a menudo, el efecto estructural del concreto lanzado es fundamentalmente casi nulo. Sin embargo, el concreto lanzado previene el deterioro de la roca, la pérdida de masa rocosa debido a los movimientos de pequeños bloques, y la erosión interna debida a los agentes atmosféricos y la filtración a largo plazo, por lo que su efecto puede ser importante. (Aydan, Ömer, 2018).

En la *Ilustración 3*, se muestra el Robojet; el cual es el equipo utilizado para proyectar concreto a las superficies donde el macizo rocoso necesita tratamiento de estabilidad.



Ilustración 3. Estabilización de un macizo de rocoso en Almenara 1 con concreto lanzado. Fuente propia.

4.2. Normatividad de validación de concretos

- **Resistencia a la compresión ($f'c$):** Los cilindros de concreto utilizados para medir la resistencia para la aceptación contractual deben ser muestreados (ASTM C172/C172M), fabricados, curados estándar (ASTM C31/C31M) y ensayados (ASTM C39/C39M) en condiciones altamente controladas. Por lo general, las resistencias de estos cilindros son la principal prueba de la calidad del hormigón utilizado en la estructura. El asesor

especifica la resistencia deseada, la frecuencia de las pruebas y la tolerancia permitida en la resistencia a la compresión (ACI 301). (American concrete institute, 2011).

En la *Ilustración 4*, se muestra la prensa hidráulica; la cual fue utilizada para el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros y núcleos para los concretos utilizados en la restitución.



Ilustración 4. Ensayo de resistencia a la compresión. Fuente propia.

- **Módulo de elasticidad (E):** Relación entre el esfuerzo normal y la deformación correspondiente al esfuerzo de tracción o compresión por debajo del límite proporcional del material; también denominado módulo elástico, módulo de Young y módulo de elasticidad de Young; denotado por el símbolo E. (PCA, 2011)
- **Tenacidad:** La prueba de la placa está diseñada para determinar la energía absorbida de la curva de carga/deformación como medida de resistencia. La prueba está diseñada para modelar de forma más realista la flexión biaxial que puede ocurrir en algunas aplicaciones, particularmente en el soporte de rocas. También se puede considerar que la carga del punto central puede replicar el anclaje de un perno de roca. Esta prueba ha demostrado ser de considerable beneficio. (Benoit de Rivaz, 2015).
- **Control de temperatura de concreto instalado (termocupla - sensor termopar):** Un termopar es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos alambres de metales diferentes que están unidos entre sí (normalmente mediante soldadura) en el

extremo de detección. Los diferentes tipos de termopares (por ejemplo, K, T, N, J, etc) están hechos de diferentes combinaciones de metales. Por ejemplo, un termopar tipo K tiene un conductor positivo de níquel-cromo y un conductor negativo de níquel-aluminio. (OMEGA)

5. Metodología:

5.1. Análisis de los diseños sugeridos para el concreto de restitución

- **Características del diseño de concreto.**

Inicialmente, se deben conocer las características y/o propiedades que debe tener un concreto en base a la función que vaya a desempeñar, método de colocación, temperatura de colocación, lugar de colocación, entre otras; para garantizar de esta manera que el diseño que se realizó si sea el adecuado. Por lo que antes de efectuar cualquier análisis se identificaron las características y propiedades del concreto a utilizar en la restitución de la oquedad y con base en estas se evaluaron los diseños propuestos.

- **Agrupación de diseños por características en común.**

Se realizó un análisis muy general de las características de cada diseño tales como, el tipo de material cementante, la gradación, relación A/C entre otras; con el fin de poder determinar cuáles de estas son influyentes a la hora de validar el desempeño del concreto, y así definir bajo qué características se realizó la agrupación.

- **Características y propiedades de los materiales.**

Se identifican las características de los distintos tipos de materiales cementantes que se utilizaron en los diseños propuestos para las mezclas de concreto, con el fin de dar un panorama más detallado de sus propiedades.

- **Filtro de diseños por evaluación técnico-económica.**

Se indicaron inicialmente los criterios de evaluación de las mezclas como lo son las características de diseños especificadas, la calidad de los materiales a utilizar, el costo de estos, su desempeño frente a un problema tanto en el estado plástico como endurecido del concreto, entre otros; para así dar inicio al descarte de agrupaciones de diseños previamente realizadas, en base a los parámetros técnico-económicos de cada agrupación, y de esta manera garantizar que queden únicamente los diseños más adecuados para las condiciones presentadas.

- **Chequeo y selección del diseño final.**

Una vez seleccionados los últimos diseños se realizó un último chequeo con base a los parámetros de diseño ya establecidos y los factores económicos para determinar la elección de la dosificación del concreto más adecuada haciendo su respectivo análisis.

5.2. Verificación del cumplimiento de especificaciones técnicas empleados en la restitución.

- **Recopilación de información previa al inicio del seguimiento.**

Se realizó una búsqueda de información en bases de datos existentes de lo que confiere a los tratamientos con concreto lanzado realizados en el macizo rocoso de la oquedad previo al inicio del seguimiento que permitió complementar la información referente a la restitución.

- **Recolección de datos mediante ensayos de laboratorio.**

Igualmente se recolectó la información provista por los ensayos de laboratorio que le competían a cada tipo de concreto usado en la restitución, con el fin de verificar su cumplimiento o rechazo en base a las especificaciones técnicas de cada uno de ellos, siendo clave para esto haber tener presente la programación de ensayos de todos los elementos según la edad especificada.

- **Alimentación de la base de datos y respectivo análisis de información.**

Toda la información recolectada en campo y laboratorio se almacenó en una base de datos la cual se alimentó durante todo el tiempo que duraron las actividades de restitución de la oquedad, y conforme a la culminación de dichas actividades se generaron gráficos y/o tablas con el fin de apreciar de una manera compacta la información recogida y para realizar de forma más fácil y clara su respectivo análisis.

6. Resultados y análisis

















6.1. Análisis de los diseños sugeridos para el concreto de restitución.

Inicialmente se identificaron los parámetros de diseño del concreto que se utilizó para la restitución de la oquedad, donde se definió tener una resistencia a la compresión de $f'c = 14 \text{ MPa}$ y un módulo de elasticidad de $E = 10 \text{ GPa}$ a los 90 días, parámetros técnicos los cuales son validables por medio de ensayos de laboratorio. Por otra parte, al tratarse de un concreto

masivo, adicionalmente se tuvo en cuenta otras propiedades con el objetivo de mitigar el riesgo de fisuración, por lo que se buscaron alternativas para disminuir el calor de hidratación, la reacción álcali-sílice y el asentamiento plástico; de igual forma, se tuvo en cuenta un factor muy importante en toda obra civil, que es el balance técnico - financiero.

Para garantizar dichas propiedades en el concreto se desarrolló un abanico amplio de mezclas en laboratorio, en las que se evaluaron diferentes materiales cementicios donde se consideraron cementos adicionados desde fabrica (Cemento de uso general - UG) y cemento Tipo III con diferentes adiciones (metacaolín y ceniza volante tipo F), buscando diversos beneficios como la baja generación de calor de hidratación, mitigación de RAS y desarrollo de resistencias a edades tempranas; entre otras, como se muestra en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Impacto de los materiales cementantes suplementarios (MCS) usados en los diseños en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. *

<i>Propiedad</i>	<i>Cemento UG</i>	<i>Metacaolín</i>	<i>Ceniza volante</i>
<i>Desarrollo de resistencia a edades tempranas</i>	<i>BASE</i>		
<i>Desarrollo de resistencia a edades avanzadas</i>	<i>BASE</i>		
<i>Tiempo de fraguado</i>	<i>BASE</i>		
<i>Calor de hidratación</i>	<i>BASE</i>		
<i>Reactividad alcalí-silice</i>	<i>BASE</i>		
<i>Exudación y segregación</i>	<i>BASE</i>		
<i>Trabajabilidad</i>	<i>BASE</i>		
<i>Demanda de agua</i>	<i>BASE</i>		

*Las flechas verdes significan aumento, las rojas disminución y las amarillas sin variación. Adaptada de Thomas y Wilson (2002), y complementada con Restrepo, Restrepo y Tobón (2006) y Romero y Fernández (2014).

Para las mezclas con adiciones se usaron dos variaciones para cada tipo de MCS, en el metacaolín por ejemplo se usó el denominado metacaolín 10 y metacaolín CCR los cuales poseían básicamente las mismas características; la única diferencia entre ambas radica en la finura del material, debido a que el tiempo de molienda del primero es mayor. En cuanto a las

cenizas volantes, se utilizó material de las centrales termoeléctricas Termopaipa y Termotasajero.

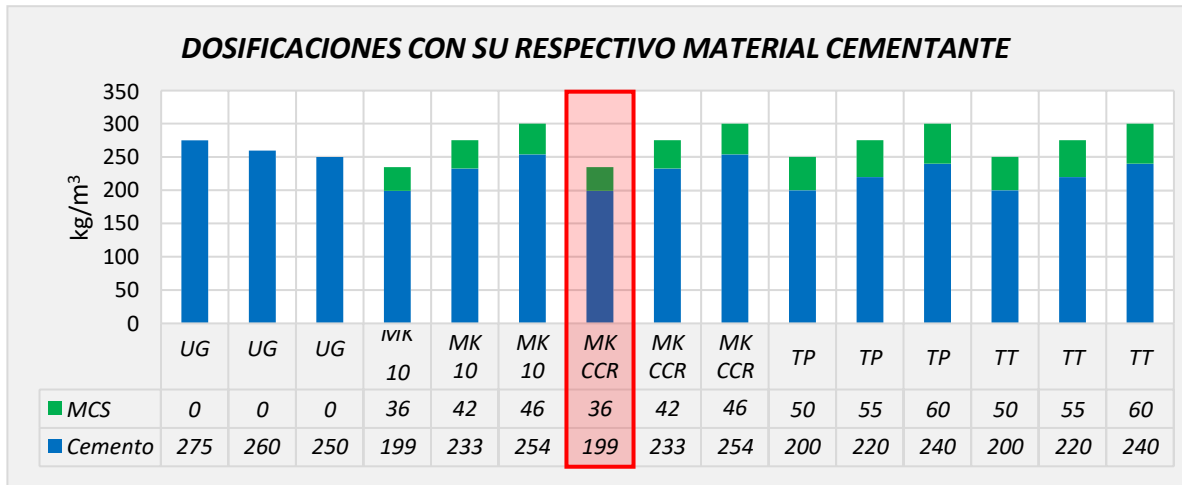
Una vez definidos todos los parámetros del concreto y los materiales cementantes, se inició la actividad de la agrupación de dosificaciones por características en común, donde se hizo un barrido por cada una de las mezclas. Allí se logró identificar que solo el tipo de material cementante y la relación A/C eran determinantes en el desempeño del concreto, mientras que las demás características no afectaban significativamente tal desempeño si su participación en la dosificación variaba. Por lo tanto, se decidió discriminar los diseños por material cementante a utilizar, adicionalmente, la relación A/C se definió como un subgrupo para realizar el análisis entre dichos cementantes.

Entre las mezclas propuestas (ver *Gráfica 1*) se identificó un grupo donde el cemento de uso general (UG) era el único material cementante, y a pesar de cumplir con la mayoría de las características de diseño solicitadas, para estas mezclas se requirió una mayor cantidad de cemento UG por m³ de concreto en comparación de los diseños con adiciones. Adicionalmente, esta condición del cementante derivaba en el aumento de la generación de calor y resistencias altas a edades avanzadas, y este último directamente influía en el aumento del valor del módulo elástico del concreto lo cual no era prudente ya que se alejaría de forma significativa del valor que posee el macizo rocoso, haciéndolo propenso a un punto de concentración de presiones hidrodinámicas al momento que el proyecto inicie operaciones; lo que podría generar afectaciones de durabilidad en la estructura, es esto que se tomó la decisión de descartar todas las mezclas pertenecientes a este grupo.

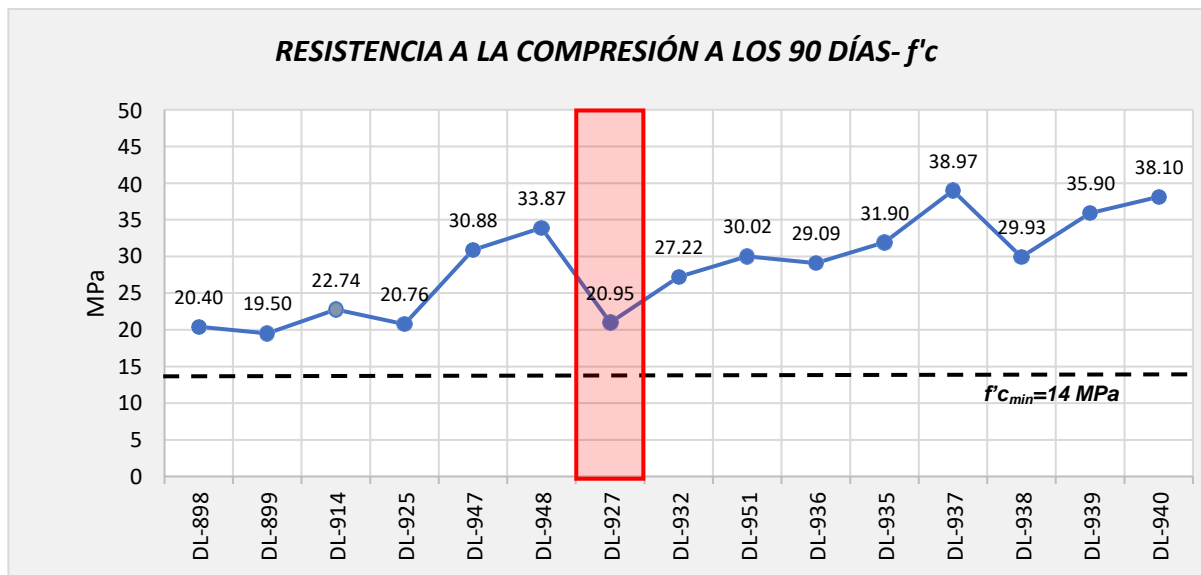
En cuanto a los diseños propuestos con adiciones cementantes suplementarias, según varias investigaciones de algunos autores (7) y (8) estas han mostrado tener buen desempeño en las propiedades físico-mecánicas al usarse como adición sustitutiva en los diseños de mezclas de concreto. Esto se logró corroborar en el proyecto al usar ambas adiciones como suplemento parcial del cemento en las diferentes propuestas para mezclas de concreto; cómo se puede observar en las *Gráficas 2 y 3*, tanto los valores de resistencia como modulo elástico obtenidos con diferentes dosificaciones para ambas adiciones donde cumplen con los valores mínimos de diseño establecidos. Sin embargo; hay que tener en cuenta una importante diferencia entre estos dos materiales la cual radica en su disponibilidad; ya que las cenizas volantes son un desecho generado por la combustión de carbón; un subproducto de las termoeléctricas, y estas no operan en temporada de lluvias por lo que no se podría contar con un stock constante durante la realización de la restitución de la oquedad; mientras que para el metacaolín se realiza un proceso industrial que no depende de ningún factor externo que impida tener disponibilidad del material.

A pesar de que los diseños con adición de cenizas volantes cumplieron con los valores mínimos requeridos por las características de diseño del concreto (ver *Gráficas 2 y 3*), estos se

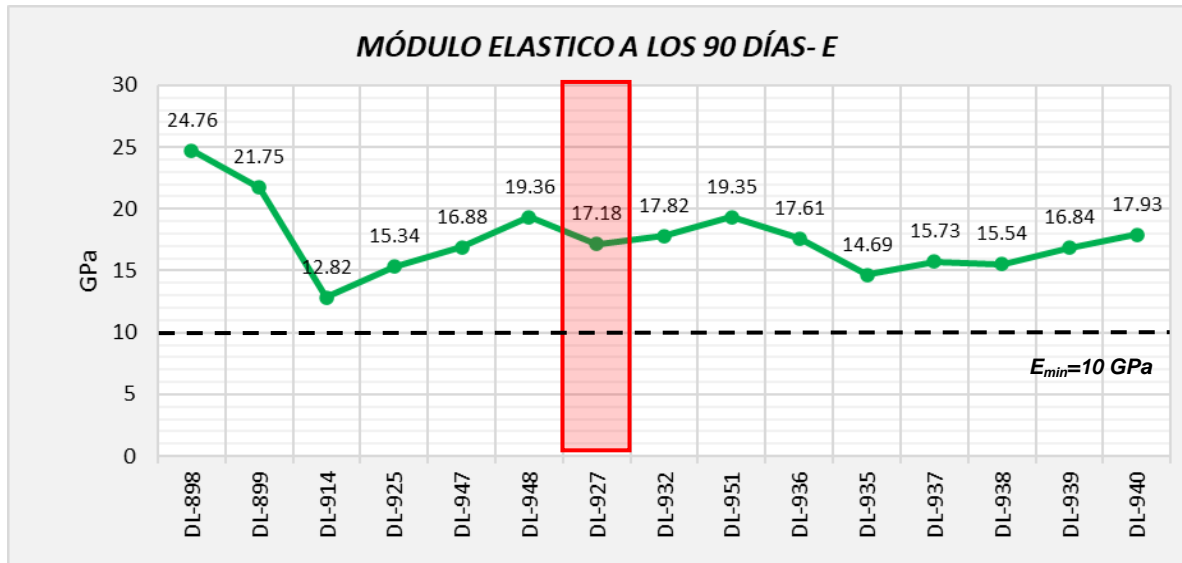
descartaron ya que habiendo realizado un balance técnico-económico se llegó a la conclusión de que no eran los más viables debido a la insuficiencia de stock en el mercado; por lo tanto, se decidió proseguir el análisis únicamente con los diseños adicionados con metacaolín.



Gráfica 1. Dosificación del material cementante de algunos diseños propuestos para la restitución. (Donde UG es cemento de uso general, MK es metacaolín, TP es ceniza volante de Termopaipa y TT es ceniza volante de Termotasajero).



Gráfica 2. Resistencia a la compresión a los 90 días de algunos diseños propuestos para la restitución.



Gráfica 3. Módulo de elasticidad a los 90 días de algunos diseños de concreto propuestos para la restitución.

Ya preseleccionados los diseños con metacaolín, fue necesario identificar cuál de las dosificaciones propuestas era la que mejor se ajustaba a las características técnicas del proyecto, y fue en este punto donde la pequeña diferencia previamente mencionada entre los dos tipos de metacaolín utilizados tomó relevancia, ya que el Metacaolín 10 al ser un material más fino debido a un proceso más extenso en su molienda, se traduce en un producto más costoso, además, como resultado de este proceso se obtiene mayor área superficial si lo comparamos con un material con menos tiempo de molienda, lo que genera una mayor demanda de agua; en estos casos, para mitigar una posible alteración en la relación A/C y las propiedades del concreto, se aumentan las cuantías aditivos plastificantes a la mezcla, lo que se deriva en incremento de costos. Es por lo anterior que se decidió continuar con la selección del diseño únicamente con las dosificaciones que incluían adición de metacaolín CCR; de estos diseños propuestos el que presentó un mejor balance técnico-económico fue el **DL-927** (sombreado en las Gráficas 1, 2 y 3 por los recuadros rojos) principalmente por el cumplimiento de los requerimientos técnicos que se exigen (resistencia a la compresión y módulo de elasticidad). Adicionalmente, este es el diseño que menor cantidad de material cementante y mayor relación A/C posee respecto a los demás; lo que permite una mejor trabajabilidad sin tener que usar una gran cantidad de aditivo plastificante ni retardante. Además, fue una de las mezclas con mejor desempeño en las pruebas de calor de hidratación, lo cual es relevante en cuanto a concretos masivos se refiere.

Sin embargo, posterior a la elección del diseño **DL-927** con adición de metacaolín CCR, se planteó como alternativa una dosificación idéntica con variación en el tipo de metacaolín a emplear, migrando del CCR al 10; esta propuesta radicó en temas logísticos desde la planta de concretos, la cual disponía normalmente esta última adición para atender los demás concretos

de la obra, por lo tanto, contar con otro tipo de adición de forma paralela, no era viable para el montaje industrial con el que se contaba.

6.2. Verificación del cumplimiento de especificaciones técnicas de los concretos empleados en la restitución.

Se reconocieron todos los tipos de concretos a utilizar en el tratamiento rocoso y restitución de la oquedad, con el fin de identificar inicialmente las especificaciones técnicas [11] que rigen la conformidad o no conformidad de cada uno de ellos y posteriormente recolectar los datos correspondientes a sus ensayos en campo y de laboratorio, para al final realizar una comparativa entre estos con el fin de hacer una validación de cumplimiento. Cabe aclarar que las especificaciones técnicas pueden variar con el tiempo dependiendo de los requerimientos que se necesiten. Los concretos que se utilizaron son los siguientes.

Concreto lanzado (tratamiento del macizo rocoso)

Utilizado al igual que los pernos, anclas y tensores como tratamiento de estabilidad del macizo rocoso, el diseño utilizado es el **DL 610** (Contenido de cemento de 450 kg/m^3 y relación A/C de 0,48) y puede contener fibra metálica (DL 610-1), sintética (DL 610-2) o no contener ninguna clase de fibra (DL 610); todo depende de los requerimientos que el diseñador defina para cada zona a tratar.

Es importante anotar que el concreto lanzado posee tres parámetros de verificación de calidad: resistencia a la compresión de núcleos, tenacidad y contenido de fibra. En caso de que en una muestra al menos uno de estos parámetros no cumpla con el valor mínimo exigido por las especificaciones técnicas, se debe relanzar en la zona donde se presenta esa falencia y tomar nuevos elementos de muestra para realizar los ensayos correspondientes.

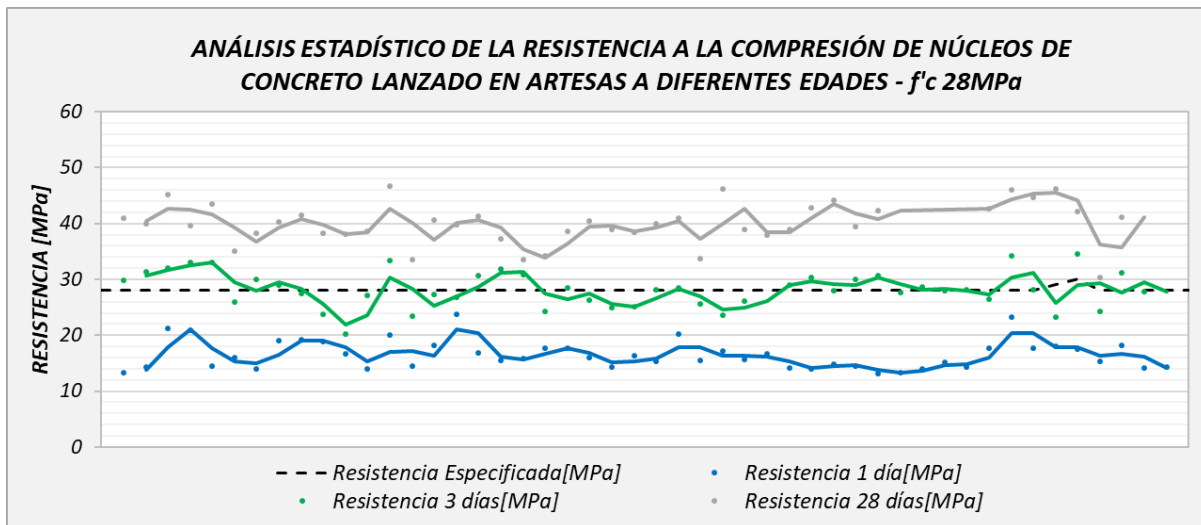
Inicialmente se identificaron las especificaciones técnicas correspondientes al ensayo de **compresión simple** donde se utilizan núcleos de artesa de 2" \emptyset . Tales especificaciones son las siguientes:

“Los núcleos, que se ensayarán a las 24 horas, a los 3 días y a los 28 días, deberán tener resistencias iguales o superiores a 10 MPa, 18 MPa y 28 MPa respectivamente.” (EPM,2011)

“Para que el concreto lanzado sea aceptable, la resistencia promedio de cualquier ensayo estará por encima del 85% de la resistencia especificada, y la resistencia de cualquier núcleo estará por encima del 75% de la resistencia especificada.” (EPM,2011)

Posteriormente se buscó en la base de datos de los ensayos de resistencia a la compresión de núcleos de artesa a diferentes edades (1, 3 y 28 días) que correspondieran al tratamiento del

macizo rocoso en la zona de interés, y se consolidó toda la información encontrada en la *Gráfica 4*, que se puede ver a continuación.



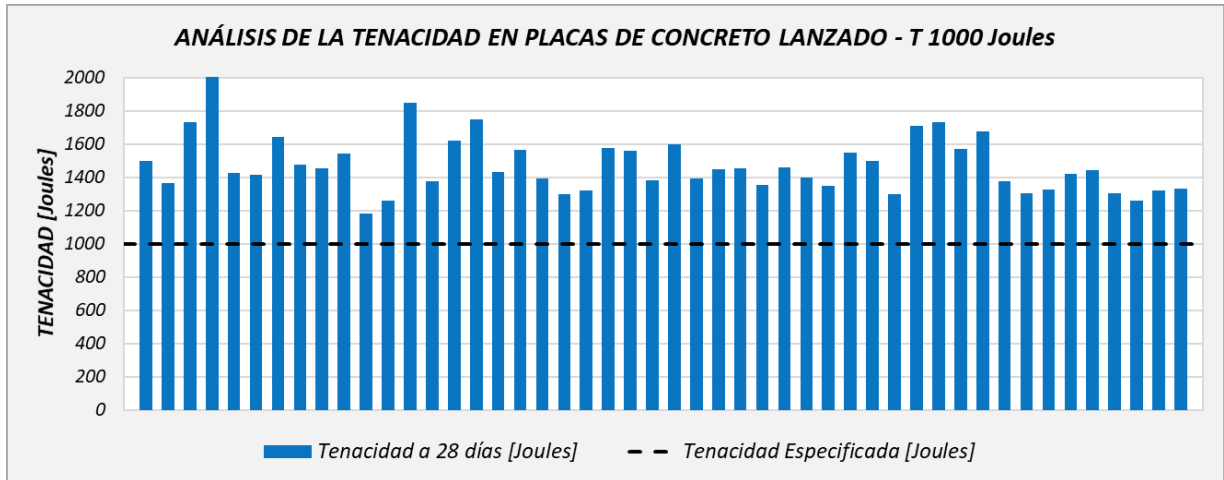
Gráfica 4. Consolidado del resultado de ensayos a compresión de núcleos de artesa de concreto lanzado a diferentes edades.

Haciendo una comparativa entre la *Gráfica 4* y las especificaciones técnicas anteriormente mencionadas, se pudo observar que el concreto lanzado utilizado como tratamiento en el sitio está acorde a lo requerido, ya que la resistencia a los 28 días (*línea gris*) es superior a la resistencia especificada.

En cuanto a los ensayos de **tenacidad (absorción de energía)** y **contenido de fibra**, estos solo se realizan a concretos que contengan fibra, ya sea metálica o sintética; y cuyas especificaciones técnicas señalan lo siguiente:

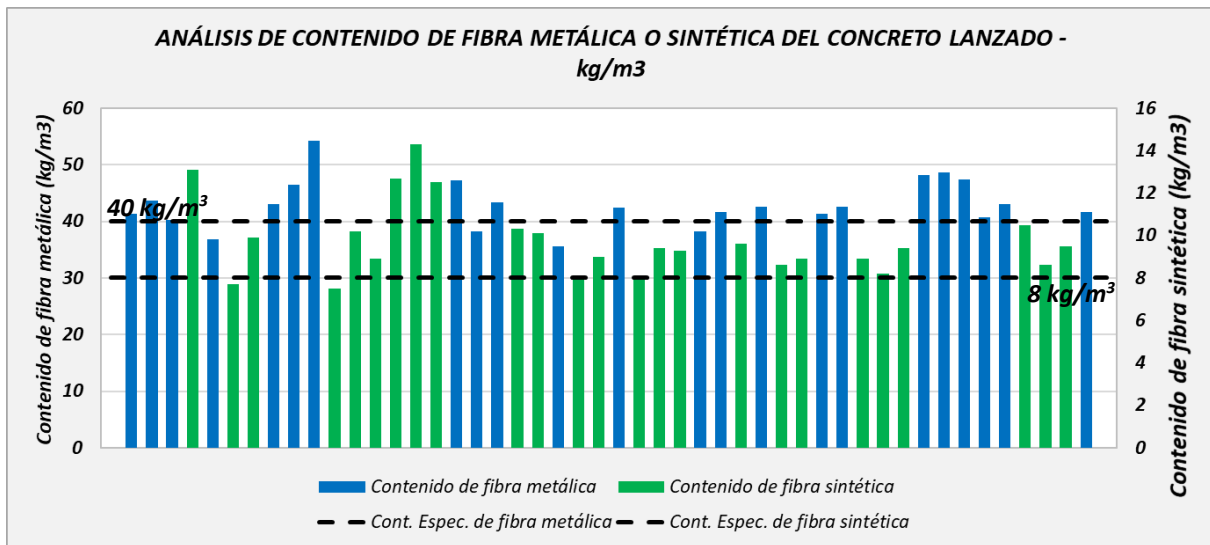
“Las mezclas de prueba, para el caso de concreto lanzado preparado por el método húmedo reforzado con fibra de acero, deberán proporcionar la cantidad suficiente de fibras de acero por metro cubico (m^3) de concreto de tal forma que la energía absorbida sea como mínimo 1000 Julios, determinados en tres ensayos de prueba de acuerdo con la norma “Energy Absortion Class-Plate Test” de la EFNARC. De cualquier forma, en ningún caso se aceptarán cantidades de fibras inferiores a $30 \text{ kgf}/m^3$ de concreto lanzado colocado.” (EPM,2011)

Posteriormente se aprobó el uso de fibra sintética para el concreto lanzado, pero con una cantidad por metros cubico diferente ($8 \text{ kg}/m^3$) a la de fibra metálica, pero el mismo valor de energía mínima absorbida (1000 Joules) requerida. El consolidado de tenacidad y contenido de figura se puede ver en la *Gráfica 5* y *Gráfica 6*, respectivamente.



Gráfica 5. Consolidado del resultado de los ensayos de tenacidad en placas a 28 días.

Como se puede observar en la *Gráfica 5*, todos los concretos despachados de planta (*barras*) a los que se les tomó muestras de placas están acordes a lo requerido ya que todas sobrepasan la línea de energía mínima especificada (*línea punteada*).



Gráfica 6. Consolidado del resultado del contenido de fibra de los concretos lanzados

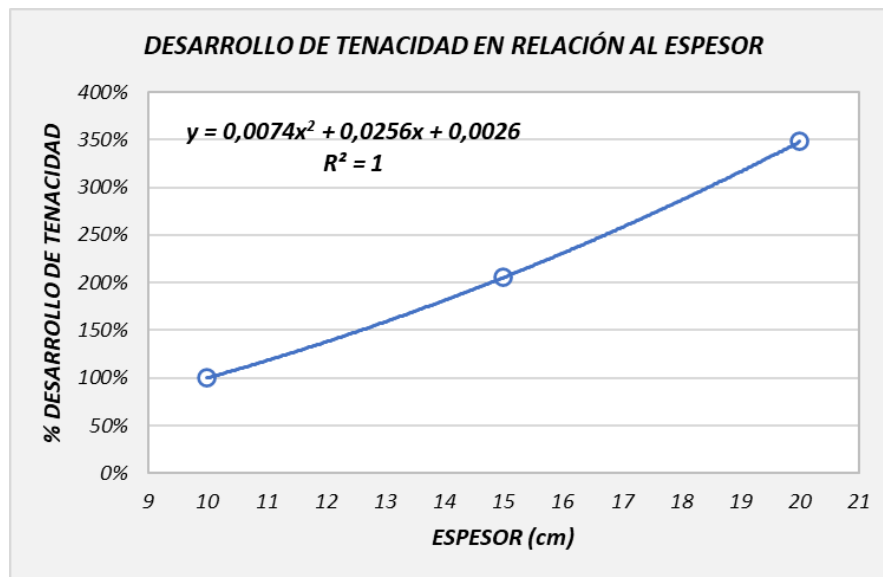
En el caso del contenido de fibra hay algunos muestreos que no cumplieron con la cantidad necesaria de fibra para estar conforme con las especificaciones técnicas del proyecto y esto se puede observar en la *Gráfica 6* donde algunas barras no sobrepasan el límite mínimo requerido según su tipo de fibra.

Debido a esto se le informó al área encargada la falencia presentada en el ensayo para que esta llevara a cabo las actividades de relanzado en el área inconforme; ya que una nueva capa de concreto lanzado generaría un sobre espesor en tal estructura, la cual garantizaría una

mayor resistencia o estabilidad en esta. Lo anteriormente enunciado se puede afirmar debido a los diferentes ensayos de laboratorio realizados por el consorcio CCC donde su muestra la relación entre la energía absorbida y el espesor del concreto. Véase *Tabla 2* y *Gráfica 7*.

Tabla 2. Valores de tenacidad y porcentaje de desarrollo para diferentes espesores de concreto lanzado.

Absorción de energía (Joules)	1424	2926	4956
Porcentaje de desarrollo (%)	100%	205%	348%
Espesor placa (cm)	10	15	20



Gráfica 7. Desarrollo de la tenacidad del concreto lanzado en comparación con su espesor

Como se puede evidenciar en la *Tabla 2* y *Gráfica 7* el espesor del concreto lanzado está directamente relacionado con la energía absorbida, donde se aprecia que un aumento en el espesor genera un incremento exponencial de la tenacidad. Es por lo anterior que se puede inferir que el tratamiento con concreto lanzado realizado al macizo rocoso de la oquedad, cumple con total conformidad según lo plasmado en las especificaciones técnicas de EPM.

Concretos convencionales

Para restituir la oquedad se emplearon varios tipos de concreto convencionales, como lo es del concreto dental (DL-608), concreto de restitución (DL-1012), concreto de restitución enriquecido (DL-1012-ENR) y concreto autonivelante; cada uno con una función diferente. Sin embargo, hasta la fecha de realización del trabajo no se alcanzó a realizar ningún trabajo con el concreto autonivelante por lo que únicamente se evaluarán los tres primeros. Para los concretos convencionales se tienen los siguientes parámetros técnicos para los ensayos de resistencia a la compresión:

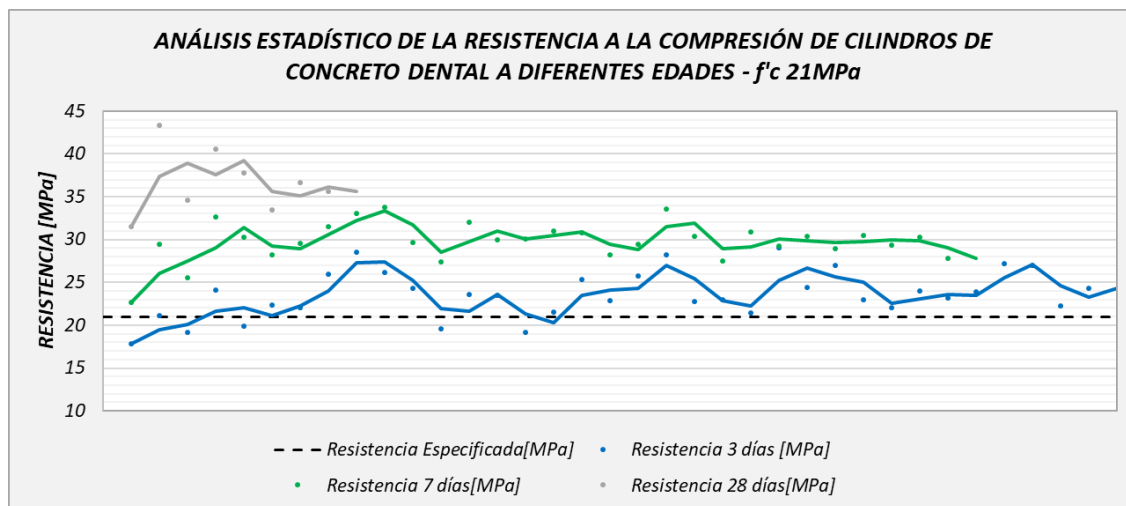
“Los ensayos para estas evaluaciones se realizarán en doce cilindros estándar de ensayo, de acuerdo con los requisitos de la norma ASTM C-31; dichos ensayos se harán para cada mezcla que se someta a aprobación, indicando además las proporciones de agregados, aditivos, cemento y agua. Los cilindros se ensayarán a los 3, 7 y a los 28 días. Si EPM lo considera necesario, algunas mezclas serán ensayadas a los 90 días de edad.” (EPM,2011)

Actualmente la cantidad de cilindros tomada varía según el diseño a evaluar, y este está directamente relacionado con las edades a las cuales se pretende ensayar, ya que algunos solo requieren evaluación hasta los 28 días (6 cilindros) mientras que otros hasta una edad más avanzada y/o para tener testigos de ese diseño (8 a 10 cilindros) para evaluarlos posteriormente cuando se requiera.

Cabe resaltar que el único diseño que presentar un seguimiento de ensayos de campo y de laboratorio es el concreto de restitución *DL 1012*, debido a que este es el que ocupa más espacio en la oquedad a tratar por lo que se le debe hacer un seguimiento más detallado y controlado, los demás diseños solo cuentan con ensayos de laboratorio que para este caso solo aplica el de resistencia a la compresión en cilindros.

Concreto dental

Este tipo de concreto se utilizó para dos fines en dos localizaciones diferentes, el primero de ellos como concreto de regularización de la culata sur de la oquedad y el segundo como soporte del costado sur del aspirador N°1 para una futura demolición de este. El diseño utilizado es el ***DL 608*** (Contenido de cemento de 320 kg/m³ y relación A/C de 0,55) que tiene una resistencia a la compresión de 21 MPa y el consolidado de las resistencias obtenidas a diferentes edades se pueden ver en la *Gráfica 8* que se presenta a continuación.

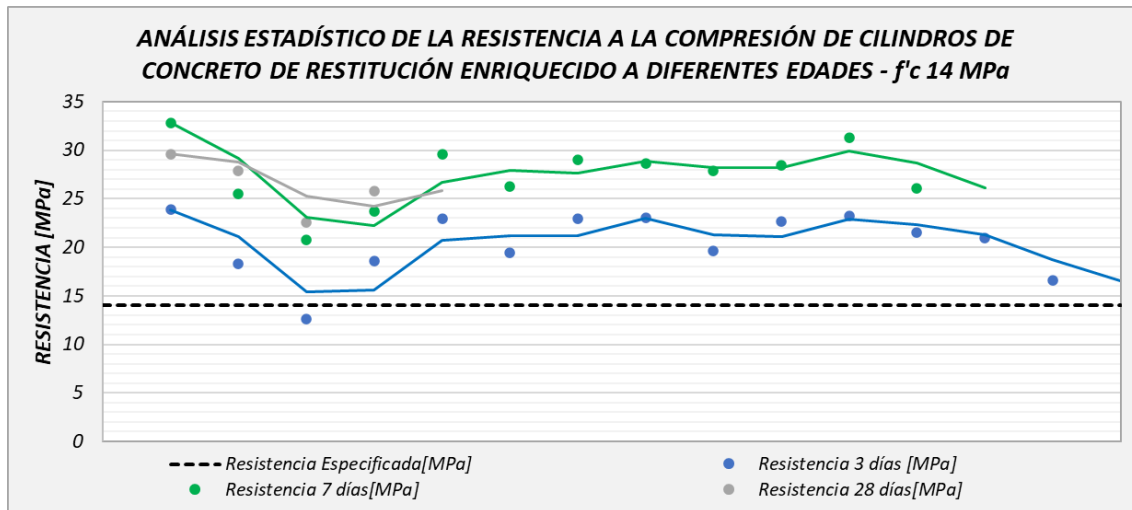


Gráfica 8. Consolidado del resultado de ensayos a compresión de cilindros de concreto dental a diferentes edades.

Como se puede observar en la *Gráfica 8*, todas las muestras ensayadas cumplieron con la resistencia mínima exigida a los 28 días. Inclusive se puede observar el cumplimiento de la resistencia final de la totalidad de los ensayos a los 7 días y la mayoría a los 3 días.

Concreto de restitución enriquecido

Este tipo de concreto es utilizado en la interfaz entre el concreto de restitución y el macizo rocoso. El diseño utilizado es el **DL 1012-ENR** (Contenido de cemento de 257 kg/m^3 y relación A/C de 0,70) que posee una resistencia a la compresión de 14 MPa. El consolidado de la resistencia a la compresión para este concreto se muestra continuación en la *Gráfica 9*.



Gráfica 9. Consolidado del resultado de ensayos a compresión de cilindros de concreto enriquecido a diferentes edades.

En la *Gráfica 9* se puede apreciar que el cumplimiento de la resistencia del concreto enriquecido es total; incluso a edades tempranas, donde ya a los 3 días cumplía con la resistencia especificada en la mayoría de los ensayos realizados y a los 28 días poseía un desarrollo de resistencia promedio de 189%.

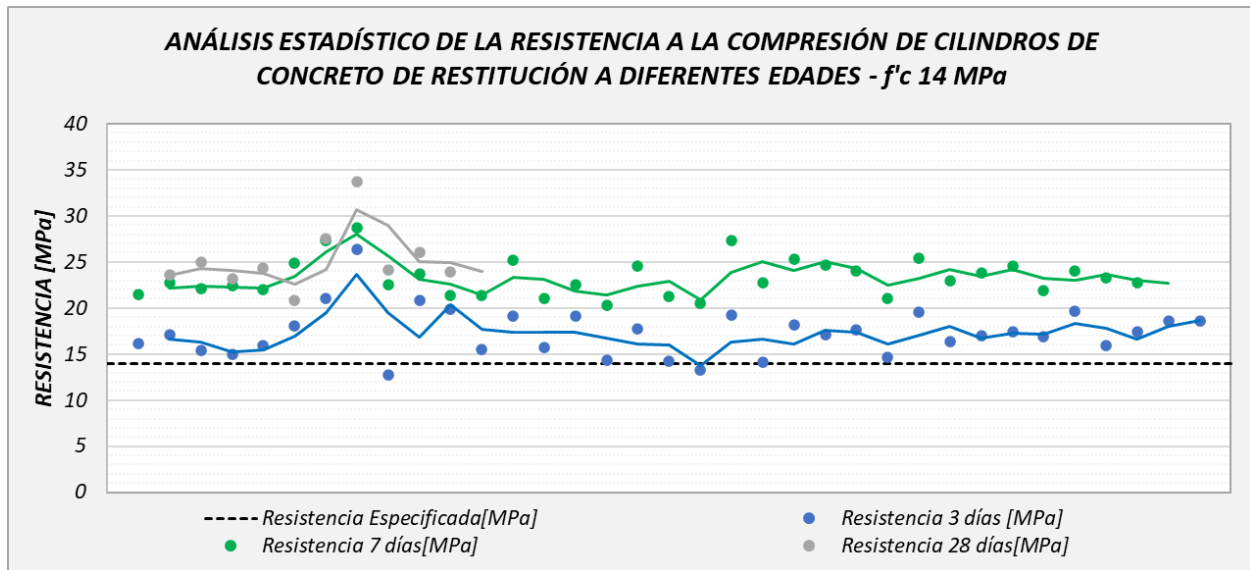
Concreto de restitución

Este tipo de concreto fue utilizado como su nombre lo indica para la restitución de la oquedad, por lo que es el que mayor volumen ocupa en esta y es por esto que se le realizó un seguimiento en laboratorio y en campo. El diseño utilizado es el **DL 1012** (Contenido de cemento de 235 kg/m^3 y relación A/C de 0,72) que posee una resistencia a la compresión de 14 MPa, y el cual es una variante del diseño cuyo análisis se realizó previamente (**DL-927**) pero se ejecutó el cambio del material cementante suplementario, donde se migro del *Metacaolín CCR* al *Metacaolín Fortacrete 10* por cuestiones logísticas de la planta de concreto.

- **Seguimiento de parámetros en laboratorio**

En cuanto a los ensayos de laboratorio para el concreto de restitución se cuenta con la resistencia a la compresión y módulo elástico por medio de cilindros.

A continuación, se muestra el consolidado referente a los resultados del ensayo de **resistencia a la compresión** de cilindros a diferentes edades, véase *Gráfica 10*.

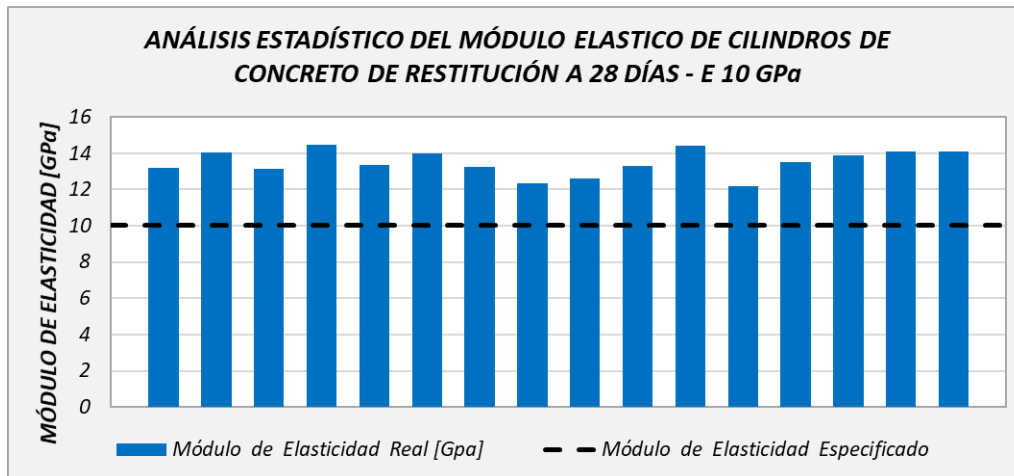


Gráfica 10. Consolidado del resultado de ensayos a compresión de cilindros de concreto de restitución a diferentes edades.

Haciendo un análisis en base a la *Gráfica 10* se puede observar que la mayoría de las muestras ensayadas de este diseño a los 3 días (*línea azul*) está cumpliendo con la resistencia final especificada, al igual que el total cumplimiento de los ensayos a edades posteriores y donde se logró alcanzar un desarrollo de resistencia de 180% a los 28 días.

Igualmente cabe resaltar el poco incremento de la resistencia del concreto de los 7 a los 28 días ya que ambas líneas de tendencia están una muy cerca de la otra, incluso lo suficiente para entrelazarse como se muestra en la *Gráfica 10*.

Para el módulo elástico no se tienen especificaciones técnicas como tal ya que se trata de un caso muy puntal, sin embargo; si se requiere que este cumpla con un valor mínimo exigido de 10 GPa y que este no diste mucho de tal valor. A continuación, en la *Gráfica 11* se presenta el consolidado de los ensayos de módulo elástico a los 28 días.



Gráfica 11. Consolidado del resultado de ensayos de módulo elástico del concreto de restitución a los 28 días.

Haciendo una interpretación de la *Gráfica 11* esta muestra al igual que para la resistencia a la compresión un total cumplimiento de los valores determinados para el módulo elástico del concreto, y también es muy importante destacar que aunque dichos valores están por encima del valor especificado la diferencia no es significativa, siendo este un punto crítico ya que lo que se espera es que el concreto de restitución no tenga un módulo elástico muy alejado al del macizo rocoso para evitar acumulación de presiones hidrostáticas en algún punto del hastial una vez el complejo de casa máquinas-almenara 1 entre en operación.

Sin embargo, los requerimientos iniciales indican que los parámetros a evaluar son a 90 días tanto para resistencia a la compresión como módulo elástico; pero no fue posible conseguir información a esa edad ya que a la fecha de entrega del presente informe no se han realizado sus respectivos ensayos por lo que se decidió realizar una proyección a 90 días en base a los promedios por edades de los ensayos ya ejecutados. Los valores referentes al ensayo de **resistencia a la compresión** se pueden ver en la *Tabla 3*.

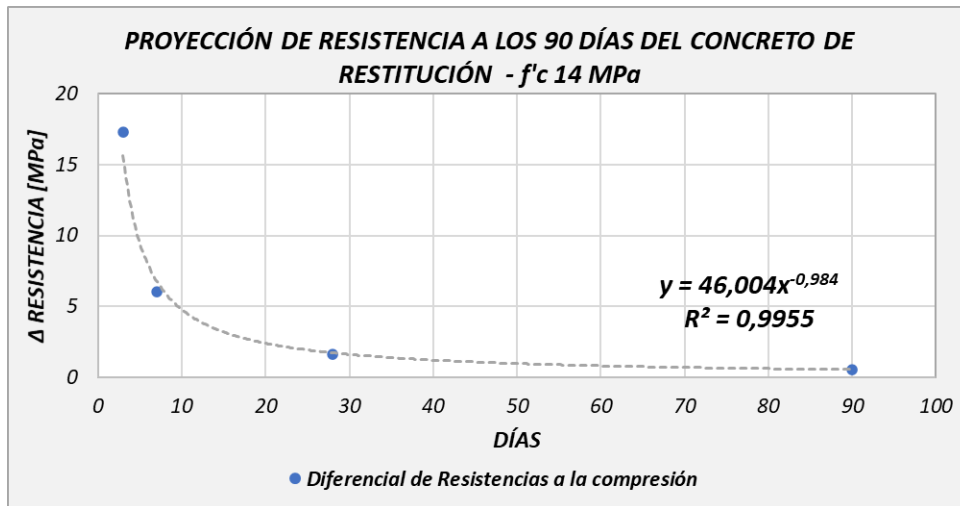
Tabla 3. Promedio y diferenciales de resistencias a diferentes edades del concreto de restitución.

Edad	0 días	3 días	7 días	28 días
Resistencia (MPa)	0,0	17,3	23,3	25,2
Diferencial de resistencia (MPa)	0,0	17,3	6,0	1,9

Inicialmente se planeó realizar la proyección con los valores de resistencia mostrados en la *Tabla 3*, sin embargo, ninguna línea de tendencia de las funciones presentes tenía un ajuste lo suficientemente cercano a lo que se presentaba realmente por lo que se descartó esta idea y

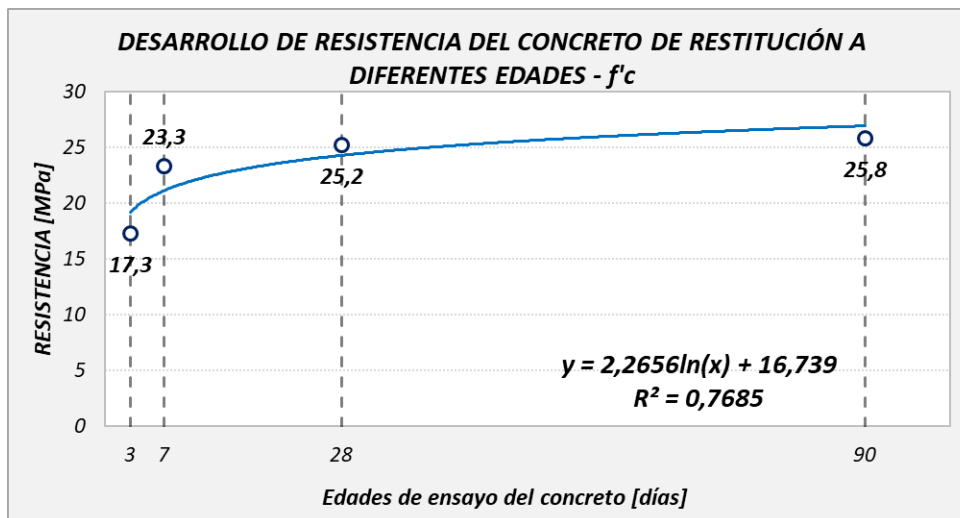
se decidió trabajar con diferenciales de resistencia entre las edades ya que este escenario presentaba un mejor ajuste entre los datos.

Cabe destacar que una vez se proyectó a 90 días la resistencia y se dio con un valor a esa edad se incluyó en la gráfica y se realizó una iteración entre las ecuaciones arrojadas de tal proyección hasta encontrar una ecuación que no presentara cambios en el diferencial entre 28 y 90 días. De lo anterior resultó la *Gráfica 12* que se muestra a continuación.



Gráfica 12. Proyección de resistencia del concreto de restitución a 90 días.

Utilizando la ecuación mostrada en la *Gráfica 12* se llegó a un valor de resistencia a los 90 días de **25,8 MPa**, el cual claramente cumple con la resistencia mínima requerida por especificación. A continuación, en la *Gráfica 13* se muestra el comportamiento de la resistencia en el tiempo para este diseño.



Gráfica 13. Desarrollo de resistencias del diseño DL 1012 a diferentes edades

Apreciando la *Gráfica 13* se puede concluir como la resistencia a edades avanzadas (28-90 días) no varía mucho entre sí; esto se esperaba debido a la adición de metacaolín que posee el diseño. Esta afirmación se hace en base al previo conocimiento del comportamiento de ciertas características de los materiales cementantes suplementarios utilizados en los diseños propuestos, los cuales se encuentran plasmados en la *Tabla 1*.

Para el **módulo de elasticidad** se planteó utilizar la ecuación que relaciona la resistencia a la compresión con el módulo de elasticidad que está plasmada en la referencia C.8.5.1 de la NSR-10 con el fin de usar el primero como método para determinar este último; véase la ecuación a continuación.

$$(MPa) = 4700\sqrt{f'_c} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Sin embargo; al realizarse una comparativa de los valores teóricos (*ecuación*) con los valores reales (*ensayo de laboratorio*) a 28 días se pudo observar una diferencia negativa promedio de 9,2 GPa lo que es un valor demasiado significativo. Por lo que se planteó una ecuación con las mismas variables de la *Ecuación 1*; pero con una constante diferente, la cual se sacará en base a los datos reales de resistencia a la compresión y modulo elástico obtenidos por medio de los ensayos de laboratorio. Una vez realizado el procesamiento de datos se llegó a la siguiente ecuación.

$$(MPa) = 2800\sqrt{f'_c} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Como se puede observar la constante de la ecuación nueva (*Ecuación 2*) se redujo a comparación con la anterior (*Ecuación 1*) en un orden del 60 % aproximadamente, lo que da una idea del contraste entre los valores reales y teóricos obtenidos.

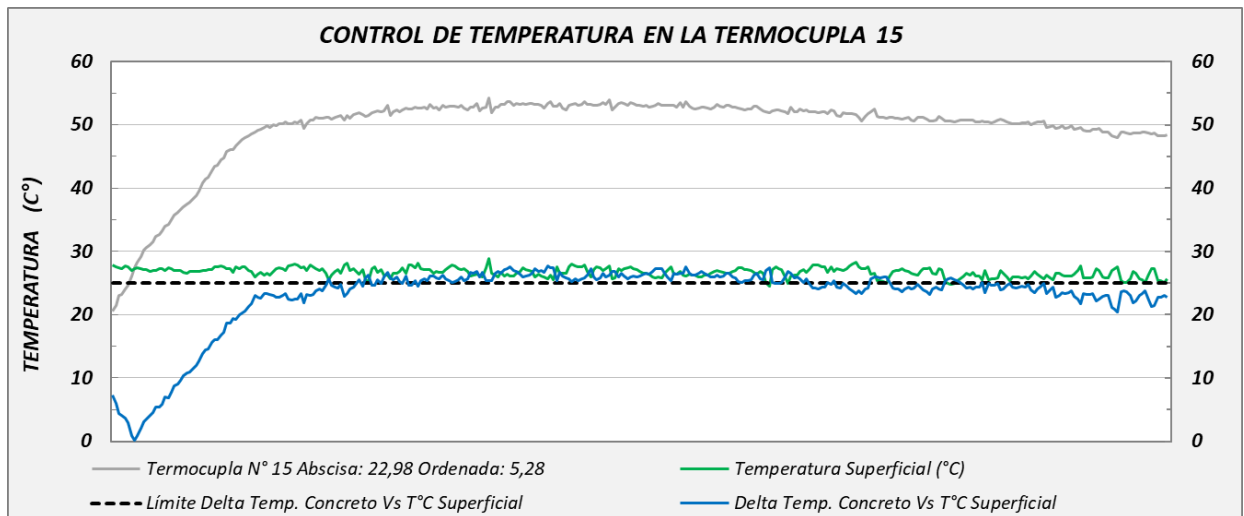
Al usarse la *Ecuación 2* para obtener el módulo elástico para el diseño DL 1012 se obtiene un valor promedio de **14.2 GPa** usando los valores de resistencia proyectada a 90 días; no obstante, se debe considerar que la ecuación determinada (*Ecuación 2*) se puede considerar útil únicamente para este diseño ya que solo se evaluaron muestras con dicha dosificación. El ajuste de los datos es del 94% haciendo una comparativa entre los valores reales y los teóricos, por lo que tal ecuación se podría considerar bastante acertada en cuanto al desarrollo de modulo elástico para el diseño DL 1012.

Cabe también destacar que a 90 días el valor de módulo elástico proyectado no es muy superior a los 10 GPa que se tenía como valor especificado, lo que significa que no se presentaría una diferencia significativa entre las presiones que ejercería el agua sobre el macizo rocoso y el concreto de restitución.

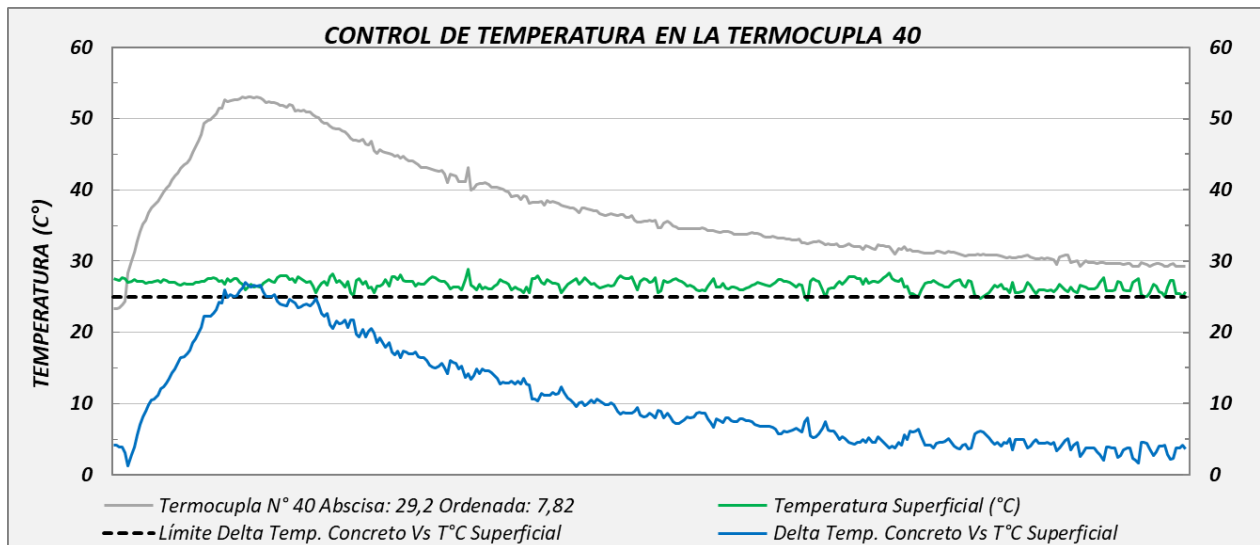
- **Seguimiento de parámetros en campo**

Para el control en campo solo se tuvo en cuenta al **control de temperatura de concreto instalado**, este se realizó por medio de varias termocuplas las cuales están monitoreando constantemente con el fin de identificar las diferencias de temperatura entre el interior del concreto masivo y la zona superficial, teniendo un límite de cumplimiento de 25 °C.

Algunos registros gráficos de la toma de temperatura se pueden apreciar en las *Gráficas 14 y 15* que se presentan a continuación:



Gráfica 14. Consolidado de toma de temperaturas de la termocupla 15 instalada dentro del concreto de restitución.



Gráfica 15. Consolidado de toma de temperaturas de la termocupla 40 instalada dentro del concreto de restitución.

En las gráficas anteriores observamos las lecturas de solo dos termocupas, ambas posicionadas en lugares diferentes. Lo anterior se puede apreciar por el desarrollo de la temperatura en el tiempo, ya que en la *Gráfica 14* se puede ver que una vez sube la temperatura registrada por la termocupla (*Color gris*) esta se mantiene muy estable en el tiempo lo que significa que no ha logrado disipar el calor y se asume que está más en el interior del concreto masivo. Mientras que la *Gráfica 15* muestra un descenso en la temperatura después de los primeros días donde ésta alcanza su punto más alto, que se traduce en mayor disipación de calor y por lo tanto se podría concluir que está ubicada en un lugar más cercano a la superficie del concreto en comparación con la termocupla anterior.

También se puede apreciar como en ambas gráficas en ciertos momentos la línea del diferencial de temperaturas (*Línea azul*) sobrepasa el límite permitido de 25°C pero no por mucho; lo que se podría inferir que no se trataba de un estado crítico; sin embargo, si es un estado de alerta por un posible incremento en tal diferencial.

La importancia de registrar continuamente en sitio la temperatura del concreto radica en determinar en qué instante la diferencia entre la temperatura interna con la superficial es crítica (*significativamente superior al límite de cumplimiento*), para identificar en que momento se debe realizar un cambio en el proceso de fabricación (*salir de planta con una temperatura inferior*) o colocación (*disminuir el espesor de las camadas*) para permitir la disipación de calor en el concreto ya vaciado con el fin de evitar diferencias de temperatura considerables y que esto genere agrietamientos en el concreto.

7. Conclusiones

La importancia de un diseño de una mezcla de concreto es sin duda alguna un gran reto, dado el gran número de variables que intervienen en su diseño, tales como materiales a utilizar, mano de obra, función que desempeñará, método de colocación, temperatura de colocación, lugar de colocación, entre otras. Por lo que es muy importante conocer de manera adecuada cada una de las partes que involucran la elección de un diseño, con el fin de garantizar una buena dosificación; que sea funcional, que cumpla con los criterios de resistencia y que sea económico, en otras palabras; encontrar un balance entre lo técnico y lo económico. Es por este principio se plantearon diferentes diseños (dosificaciones) con el fin de tener un abanico de opciones y poder elegir la que mejor se acoplara a los requerimientos solicitados por asesoría sin presentar sobre diseños y por ende sobrecostos.

Los materiales cementantes suplementarios y los aditivos químicos son muy útiles en el diseño de concreto, ya que por medio de estos se logran características del concreto que por sí sola una dosificación tradicional no logra, como lo es resistencia a edades tempranas o avanzadas, control del calor de hidratación, retardar el fraguado, entre otras. Pero para esto es de suma

importancia conocer las características del concreto que se pretende diseñar, así como las propiedades que cada uno de estas adiciones le aportan al concreto para obtener una dosificación más adecuada en cuanto a los criterios requeridos.

Los ensayos de laboratorio son de suma importancia cuando se emplea concreto en una obra, ya que esta es la única manera de validar el cumplimiento de sus parámetros de diseño. Y esto se vuelve aún más esencial cuando se trata de grandes volúmenes ya que se debe hacer un constante seguimiento con el fin de garantizar que se presente uniformidad entre los valores de resistencia, tenacidad o el ensayo que corresponda de las muestras testeadas.

Se presentó un cumplimiento total para todos los concretos ensayados que se utilizaron en la oquedad a pesar de las falencias que se registró en unas muestras de contenido de fibra en el concreto lanzado, pues estos casos de informaron al área encargada para que realizara un relanzado en la zona inconforme; todo con el fin de cumplir con todos los criterios de conformidad del concreto plasmados en las especificaciones técnicas de EPM.

Cuando se tienen concretos masivos es fundamental monitorear la temperatura en el tiempo después de ya instalado, todo con el fin de identificar si se presentan diferenciales de temperaturas muy elevados entre el interior y la superficie del concreto para tomar las medidas necesarias para evitar que ese escenario siga ocurriendo, ya que en caso de presentarse tal situación se pueden producir agrietamientos en el concreto, lo que debilitaría la estructura y muy posiblemente dejarla disfuncional.

8. Referencias Bibliográficas

[1] Real Academia Española. (diciembre, 2019). *Diccionario de la lengua española*.
<https://dle.rae.es/oquedad>

[2] Portland Cement Association, (2011), *Design and control of concrete mixtures*.
Recuperado de <https://faculty.uml.edu/ehajduk/Teaching/14.310/documents/EB001.15.pdf>

[3] Aydan, Ömer. (2018). *Rock Reinforcement and Rock Support*. CRC Press. Recuperado de
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRRRS0002/rock-reinforcement-rock/rock-reinforcement-rock>

[4] Benoit de Rivaz,(2015), "Fibre Reinforced Spray Concrete: Minimum Performance Requirement to Meet Safety Needs". Recuperado de
<https://core.ac.uk/download/pdf/185671405.pdf>

- [5] American Concrete Institute, (abril, 2011), ACI 214R-11. Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Recuperado de http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20214R-11%20Guide%20to%20Evaluation%20of%20Strength%20Test%20Results%20of%20Concrete_MyCivil.ir.pdf
- [6] American Concrete Institute, (abril, 2007), ACI 214R-11. Self-Consolidating Concrete. Recuperado de <https://vdocuments.mx/aci-237r-07-self-consolidating-concrete-1.html>
- [7] Restrepo, J. C., Restrepo, O. J., & Tobón, J. I. (13 de Mayo de 2006). EFECTOS DE LA ADICIÓN DE METACAOLÍN EN EL CEMENTO PÓRTLAND. Recuperado en Octubre de 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v73n150/a12v73n150.pdf>
- [8] Romero, A. F., & Hernández, J. C. (3 de Octubre de 2014). DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN POR EL MÉTODO A.C.I. Y EFECTOS DE LA ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. Recuperado en Octubre de 2020, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/915/Diseno%20de%20mezclas%20de%20hormigon%20por%20el%20metodo%20a.c.i..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] Estrada, D. P. (15 de Diciembre de 2016). INFLUENCIA DEL METACAOLÍN EN LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL CEMENTO PORTLAND: HIDRATACIÓN Y RETRACCIÓN QUÍMICA. Recuperado en Octubre de 2020, de <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18012017-142504/publico/DelverPlinioEstradaCaceresCorr16.pdf>
- [10] FHWA. (Diciembre de 2011). Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook. Recuperado en Octubre de 2020, de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif12022.pdf>
- [11] EPM. (2011). Especificaciones técnicas de construcción proyecto hidroeléctrico Ituango, Capítulo 11. Obras de concreto, Medellín.
- [12] Riveros Jerez, C. A. (2018). ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Medellín. Recuperado el 10 de enero de 2021
- [13] NSR-10. (2010). TÍTULO C - CONCRETO ESTRUCTURAL. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D.C.
- [14] OMEGA Engineering Inc. (2021). OMEGA. Recuperado el 3 de enero de 2021, de Termopar: Tipos y Aplicaciones: <https://es.omega.com/prodinfo/cable-termopar.html>