

**ADICIÓN DE FIBRAS METÁLICAS EN EL CONCRETO LANZADO PARA  
CONTROL DE ESFUERZOS A TENSIÓN EN TÚNELES Y EXCAVACIONES  
SUBTERRÁNEAS.**

**LILY MELISSA VALLEJO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2013**

**ADICIÓN DE FIBRAS METÁLICAS EN EL CONCRETO LANZADO PARA  
CONTROL DE ESFUERZOS A TENSIÓN EN TÚNELES Y EXCAVACIONES  
SUBTERRÁNEAS.**

**LILY MELISSA VALLEJO GÓMEZ**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa**

**Para optar al título de:**

**Ingeniero Civil**

**Director:**

**LUIS ALBERTO CAPACHO**

**Ingeniero Civil, M. Sc.**

**CO-DIRECTOR**

**CRHISTIAN COLLAZOS SANDOVAL**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2013**

A Dios por ser mi guía, compañía y permitirme cumplir esta meta con gran éxito.

A mi mamá por ser mi apoyo incondicional y una mujer ejemplar. Gracias mamita por enseñarme que luchando se pueden alcanzar todas las metas.

A mis abuelitos Ángel y María del Carmen, mis segundos padres, son dos personas a las que les debo la educación, rectitud y disciplina que hoy hacen parte de mi formación.

A mis tíos porque de alguna forma me hicieron sentir su apoyo. Los quiero mucho.

A Andrés Peña, Madeleidy Rodríguez, Néstor Gutiérrez "el negro" y Adriana Gómez, por estar allí en las buenas y en las malas, en las duras y en las maduras, con quienes Reí y lloré, compartí momentos de felicidad, de goce y alegría, por escuchar todas mis choco aventuras. Los llevo en mi corazón

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director el Ing. Civil Luis Alberto Capacho por su colaboración.

Especialmente al co-director el Ing. Civil Crhistian Collazos Sandoval, por sus aportes, tiempo y disposición, fue el guía necesario para el feliz término de este proyecto.

Oscar Ramírez, por brindarme su apoyo y conocimiento. Fue una gran ayuda para el desarrollo de este documento.

ISAGEN S.A, Especialmente al Ing. Hedmer Berrio Naranjo por su importante colaboración en el acceso a la información del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
OBJETIVOS .....	18
1. ANTECEDENTES HISTORICOS.....	19
2. USO DEL CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRA EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS.....	20
2.1 METODO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.....	21
2.1.1 Método convencional de perforación y voladura para excavación.....	21
2.1.2 New Auschwitz Tunneling Method NATM. ....	27
2.2 SOPORTE.....	28
3. CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRA DE ACERO.....	31
3.1 MATERIALES CONSTITUTIVOS.....	32
3.1.1 Cemento.....	32
3.1.2 Agua.....	33
3.1.3 Agregados.....	33
3.1.4 Aditivos.....	34
3.1.5 Fibras metálicas.....	35
3.2 PROPIEDAS MECÁNICAS DEL MATERIAL .....	39
3.3 DISEÑO DE MEZCLAS .....	40
3.4 DURABILIDAD.....	46
3.5 MÉTODOS DE APLICACIÓN DEL CONCRETO LANZADO.....	47
3.5.1 Concreto Lanzado Vía Húmeda.....	47
3.5.2 Concreto lanzado vía seca.....	50
4. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	53
4.1 ABSORCIÓN DE ENERGÍA.....	53
4.2 GRANULOMETRÍA Y CANTIDAD DE FIBRA.....	58

4.3 DENSIDAD Y ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	60
5. APLICACIÓN DEL CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRA METÁLICA.....	62
5.1 SUPERFICIE DE CONTACTO. ....	62
5.2 PROCEDIMIENTO DE LANZADO. ....	62
5.3 MATERIAL DE REBOTE. ....	65
6. APLICACIÓN DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON MALLA ELECTROSOLDADA.....	66
6.1 PROCEDIMIENTO DE LANZADO. ....	67
6.2 MATERIAL DE REBOTE. ....	67
7. ANALISIS DE RENDIMIENTOS Y CICLOS DE EXCAVACIÓN.....	68
8. CONCLUSIONES.....	73
9. RECOMENDACIONES.....	75
10. BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un túnel.....	21
Figura 2. Esquema de perforación.....	23
Figura 3. Perforación con jumbo. ....	23
Figura 4. Clasificación de explosivos.....	24
Figura 5. Instalación de explosivos.....	25
Figura 6. Explosivos utilizados en Colombia.....	25
Figura 7. Retiro de rezaga, desabombe de bóveda y hastiales.....	27
Figura 8. Diferencia entre uso de fibras y malla electrosoldada. ....	30
Figura 9. Instalación de arcos y proyección de concreto.....	30
Figura 10. Fibra metálica.....	37
Figura 11. Comparación de curvas de carga – deformación. ....	38
Figura 12. Ejemplo de curva granulométrica.....	42
Figura 13. Equipo para lanzado de concreto vía húmeda. ....	49
Figura 14. Brazo mecánico del equipo de lanzado de concreto vía húmeda.....	49
Figura 15. Lanzado de concreto vía húmeda. ....	50
Figura 16. Equipo para lanzado de concreto vía seca. ....	52
Figura 17. Elaboración de paneles de concreto lanzado.....	54
Figura 18. Esquema del equipo de ensayo.....	55
Figura 19. Grafica Absorción de energía. Carga Vs deformación. ....	56
Figura 20. Grafica Absorción de energía. Energía Vs deformación.....	56
Figura 21. Panel de concreto después del ensayo de absorción de energía. ....	57
Figura 22. Muestra de concreto antes y después de ser lavada. ....	59

Figura 23. Extracción de fibra metálica. ....	59
Figura 24. Cubos para el ensayo de resistencia. ....	61
Figura 25. Angulo de aplicación del concreto lanzado. ....	63
Figura 26. Modelo de boquilla y su distribución de agujeros. ....	64
Figura 27. Aplicación vía húmeda. ....	66
Figura 28. Manejo de la boquilla. ....	67
Figura 29. Sección túnel de acceso ....	68
Figura 30. Duración de actividades ciclo de excavación ....	69
Figura 30. Duración de actividades ciclo de excavación ....	70
Figura 31. Representación gráfica de rendimientos ....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de fibra metálica .....	36
Tabla 2. Límites de gradación para agregados combinados. ....	42
Tabla 3. Diseño de mezcla para concreto lanzado reforzado con fibra metálica. ...	45
Tabla 4. Requisitos de absorción de energía. ....	56
Tabla 5. Resultados ciclos de excavación .....	71

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – FICHA TECNICA DEL ADITIVO PLASTIMENT AD 30.....	79
ANEXO B – FICHA TECNICA DEL ADITIVO VISCOCRETE 2100.....	80
ANEXO C – FICHA TECNICA DEL ADITIVO EUCOSHOT 962.....	81
ANEXO D – FICHA TECNICA DRAMIX 65/35.....	83
ANEXO E – ANÁLISIS ESTADISTICO DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN Y ENERGÍA .....	85
ANEXO F – CICLOS DE EXCAVACIÓN TÚNEL DE ACCESO .....	86
ANEXO G – CICLOS DE EXCAVACIÓN TÚNEL DE ACCESO.....	88
ANEXO F – CONCRETO LANZADO VÍA HÚMEDA.....	89

## RESUMEN

### TITULO:

ADICIÓN DE FIBRA METÁLICA AL CONCRETO LANZADO PARA EL CONTROL DE ESFUERZOS A TENSIÓN EN TÚNELES Y EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS.

### AUTOR:

VALLEJO GÓMEZ, Lily Melissa\*\*

### PALABRAS CLAVES:

FIBRA METÁLICA, ABSORCIÓN DE ENERGÍA, EXCAVACIÓN, RESISTENCIA, DUCTILIDAD, TENACIDAD.

### DESCRIPCIÓN:

En el mundo, las excavaciones subterráneas y en particular la construcción de túneles han venido evolucionando constantemente convirtiendo el concreto lanzado como un elemento fundamental para la ejecución de este tipo de obras.

El presente documento muestra como la adición de fibra metálica al concreto lanzado mejora notablemente las propiedades mecánicas de este material aumentando la tenacidad, la ductilidad, la resistencia a la tensión, resistencia a la flexión, la resistencia al impacto y la disminución de la propagación de grietas, dando como resultado una estructura más resistente, durable y estable.

Para este trabajo fue necesario hacer un análisis de la capacidad de absorción de energía del concreto lanzado reforzado con fibra metálica mediante el ensayo de tenacidad. Este ensayo permite determinar el comportamiento del concreto mediante un análisis de carga – deformación para observar la capacidad que tiene la estructura de deformarse más allá de su límite elástico ocasionado por los desplazamientos del macizo rocoso.

Las principales características del concreto lanzado reforzado con fibra metálica son la buena adherencia, durabilidad, alta resistencia a la compresión a edades muy tempranas y de alto rendimiento en su aplicación.

Por último, como parte de esta investigación, se realizó un análisis de tiempo y la comparación entre concreto lanzado reforzado con fibras metálicas y concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada empleado como material de soporte para excavación de túneles, obteniendo como resultado un mayor avance de excavación, un mejor rendimiento y una disminución significativa de tiempo en el ciclo de excavación con concreto reforzado con fibra metálica (CRF). Estos resultados se ven reflejados en los costos operativos y la relación costo beneficio en la construcción de un túnel.

---

\*Trabajo de Investigación.

\*\*Faculta de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director Luis Capacho, Co-Director: Crhistian Collazos.

## ABSTRACT

**TITLE:**

ADDING OF STEEL FIBERS TO SHOTCRETE FOR CONTROL OF TENSION STRESSES IN TUNNELS AND UNDERGROUND EXCAVATIONS

**AUTHOR:**

VALLEJO GÓMEZ, Lily Melissa\*\*

**KEY WORDS:**

STEEL FIBERS, ENERGY ABSORPTION, EXCAVATION, STRENGTH, DUCTILITY, TENACITY.

**DESCRIPTION:**

In the world, the underground excavations and specially the tunnel construction has been continuously evolving and making the shotcrete like a fundamental element for execution of this type of works.

This document shows how the adding of steel fiber to shotcrete improve significantly the mechanical properties of this material increasing the tenacity, ductility, tension strength, flexion strength, impact resistance and reduction of crack propagation, obtaining a stronger, stable and more durable structure.

For this work was necessary to made an analysis of capacity of energy absorption of shotcrete reinforced with steel fiber using the tenacity test which allows determinate the shotcrete performance using load-deformation analysis to define the capacity of structure to support deformations over its elastic limit caused by displacements in rock mass.

The principal characteristics of shotcrete reinforced with steel fibers are the good adherence, durability, high initial compression strength at early age and high performance during application.

Finally like part of this research, was developed a time analysis and comparison between shotcrete reinforced with steel fibers and shotcrete reinforced with wire mesh using this material like support in tunnel excavation, obtaining like result a greater length of excavation, better performance and significant reduction of time in cycle of excavation using shotcrete reinforced with steel fiber (FRC). These results are reflected in a significant reduction of operative costs and cost-benefit ratio in tunnel construction.

---

\*Project.

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Luis Capacho ,Co-director: Christian Collazos.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo, la excavación subterránea es una de las áreas más complejas e igualmente fascinantes de la ingeniería. Para la construcción de un túnel se invierten importantes recursos en exploración y estudios geológicos, geotécnicos, hidrológicos y de actividad sísmica, necesarios para reducir las incertidumbres propias de estos trabajos y hacer viables los proyectos.

Durante los últimos 50 años, el estado del arte en la construcción de túneles ha evolucionado de manera importante, y el concreto lanzado se ha convertido en un elemento fundamental para la ejecución de este tipo de obras. El concreto lanzado se ha establecido como una tecnología confiable y segura para la estabilización de deslizamientos de tierra, estabilización de taludes en roca, minas, presas, túneles y rehabilitaciones en superficies de concretos deteriorados, utilizándose como soporte rápido y efectivo sobre grandes áreas. El material, el proceso de aplicación y equipos de proyección hacen del concreto lanzado una tecnología muy completa con una gran flexibilidad y economía sobresaliente comparado con otros procesos de instalación de concreto y/o métodos de construcción.

La adición de fibras metálicas al concreto lanzado como refuerzo es uno de los avances más recientes y útiles que ha tenido el concreto lanzado, permitiendo reemplazar la malla electrosoldada como elemento de refuerzo. Estas fibras mejoran las propiedades mecánicas del concreto lanzado, permitiendo que el material adquiera un mejor comportamiento ante los esfuerzos y deformaciones que se generan en el terreno ocasionadas por la alteración de las condiciones del macizo rocoso donde se adelanta la excavación subterránea. Este material compuesto ofrece excelentes propiedades mecánicas, mejor adherencia, ductilidad y tenacidad. De esta manera el concreto lanzado reforzado con fibra metálica nos garantiza estructuras más resistentes y más estables.

Este documento presenta un estudio de los materiales constitutivos y diseños de mezclas de concreto con y sin fibra metálica, métodos de aplicación utilizando lanzado por vía seca y lanzado por vía húmeda, ensayos de laboratorio con el fin de observar las propiedades físico-mecánicas y comportamiento del material, igualmente se presenta un análisis de rendimientos y ciclos de excavación donde se determina la eficiencia y las ventajas de la utilización como soporte del concreto lanzado reforzado con fibra frente al concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada.

Se aclara que la información contenida en este trabajo de grado no tiene fines comerciales y es utilizada exclusivamente con fines académicos. Igualmente, la totalidad de los análisis de los rendimientos y ensayos de laboratorio contenidos en este documento, son a título propio del Autor y no comprometen a ISAGEN ni al Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVOS GENERALES**

- Analizar el comportamiento del concreto lanzado con adición de fibras metálicas y su efectividad en el control de los esfuerzos a tensión generados durante el proceso de construcción de túneles y obras subterráneas, excavadas con el método convencional de perforación y voladura.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Evaluar la capacidad de absorción de energía del concreto lanzado con adición de fibra metálica por medio del ensayo de tenacidad.
- Comparar la capacidad de absorción de energía entre fibras metálicas y la malla electrosoldada.
- Comparar los rendimientos entre el concreto lanzado, con fibra o con malla electrosoldada durante el proceso de aplicación en la excavación de túneles mediante el sistema convencional de perforación y voladura.
- Evaluación de las dosificaciones de fibra óptimas y diseños de mezclas de concreto lanzado.
- Analizar el comportamiento del concreto lanzado con fibra y su efectividad para el control de esfuerzos en túneles y obras subterráneas excavadas con el método convencional de perforación y voladura.

## 1. ANTECEDENTES HISTORICOS

En 1907 el doctor Estadounidense Carl E. Akeley, invento el recubrimiento de concreto y mortero lanzado a alta velocidad, patentando su equipo conocido como "Cement – Gun". Este sistema se fundamentaba en introducir (cemento y agregados) mezcla en seco por una tubería de impulsión, agregando agua en la boquilla. EL producto de cemento y arena de este dispositivo se le dio el nombre de gunita.

En la década de 1930 se introdujo el término de "Shotcrete" por la American Railway Engineering Association para describir el proceso de gunita proyectada. En 1951, el American Concrete Institute (ACI) definió oficialmente como termino el concreto lanzado para describir el proceso de "concreto o mortero lanzado neumáticamente sobre una superficie a alta velocidad" especialmente para la mezcla en seco. En la actualidad se aplica también al proceso de mezcla húmeda. Un hecho muy importante se marcó en los años 70, cuando el uso de concreto lanzado en obras subterráneas aparecen las fibras metálicas como refuerzo, implementado por US Army Corps of Engineers. Otro evento significativo se dio en el año de 1980, cuando por primera vez se aplica el concreto lanzado por vía húmeda y en año 1983 se plantea la adición de fibras metálicas al concreto como refuerzo sustitutivo de la malla electrosoldada. Adicional a esto, la mejora para la calidad del concreto lanzado como material de revestimiento fue evolucionando con la utilización de plastificantes y aditivos que permiten obtener concretos de alta resistencia a la compresión.

De igual manera, en los años 80, se obtuvieron los primeros robots gunitadores, con capacidad de alcanzar mayores rendimientos y disminuyendo la cantidad de desperdicio a la hora de realizar el lanzado, también, con la implementación de estos nuevos equipos se logró una mejor calidad del concreto y a su vez unas condiciones más seguras e higiénicas para los operarios.

## 2. USO DEL CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRA EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

El concreto lanzado o Shotcrete es un elemento fundamental para el sostenimiento y revestimiento de túneles viales, férreos, hidráulicos y en las distintas obras subterráneas en centrales hidroeléctricas y estaciones de metro.

Cuando se inicia la excavación de un túnel, se genera una alteración en la condición de esfuerzos existentes en el macizo rocoso, creándose una concentración de esfuerzos en la superficie excavada que puede crear condiciones potencialmente inestables, como altas deformaciones y desprendimientos de roca.

Las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno juegan un papel muy importante a la hora de elegir el método de excavación que se desea implementar. Existiendo distintos métodos para excavación de túneles en roca y túneles en suelos blandos.

Considerando el tema de estudio de la presente tesis, el autor solo considerará métodos de excavación de túneles en roca. A continuación se describen dos de los sistemas de excavación de túneles en roca más utilizados, en cada uno de ellos, se hará referencia a los trabajos específicos que se realizan para el avance de excavación en el túnel:

- Método convencional de perforación y voladura.
- Nuevo método Austriaco New Auschwitz Tunneling Method NATM.

**Figura 1. Estructura de un túnel**



Fuente:(Universidad de la laguna, Procedimientos de construcción)

## **2.1 METODO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES**

**2.1.1 Método convencional de perforación y voladura para excavación.** Este método ha sido empleado durante muchos años para la excavación de túneles en roca, aquí se implementan explosivos, que deben manipularse adecuadamente, su cantidad, manejo y calidad son de gran importancia tanto para el éxito de la voladura como para la seguridad del personal.

La maquinaria de perforación para el proceso de excavación puede realizarse por dos procesos: el primero, usando martillos manuales de aire comprimido que funcionan a percusión, no son de uso muy frecuente debido a su bajo rendimiento y aumento en su mano de obra, es recomendable su uso para excavación de túneles pequeños, y el segundo es el uso de jumbos, esta máquina de perforación consta de una máquina móvil dotada de dos o tres brazos articulados y en cada brazo se instala un martillo de accionamiento hidráulico que funciona a rotopercusión. Este sistema puede alcanzar potencias más elevadas y los

rendimientos son mayores comparados con un sistema neumático como lo son los martillos manuales.

Las actividades que componen el ciclo de trabajo para la excavación mediante el método de perforación y voladura son las siguientes:

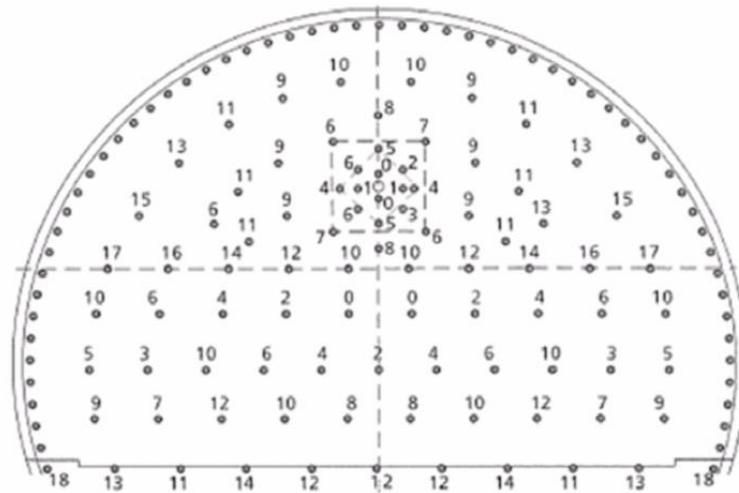
- Replanteo y perforación.
- Cargue de barrenos con explosivos.
- Voladura y ventilación.
- Retiro de rezaga, saneo del frente.
- Soporte (arcos, pernos y concreto lanzado). Ver numeral. 2.2.

➤ **Replanteo y perforación.**

El esquema de perforación es la disposición en el frente del túnel de los barrenos que se van a perforar. El diseño de la perforación, considera la longitud que se pretende avanzar dependiendo de las condiciones del terreno, la separación entre los barrenos.

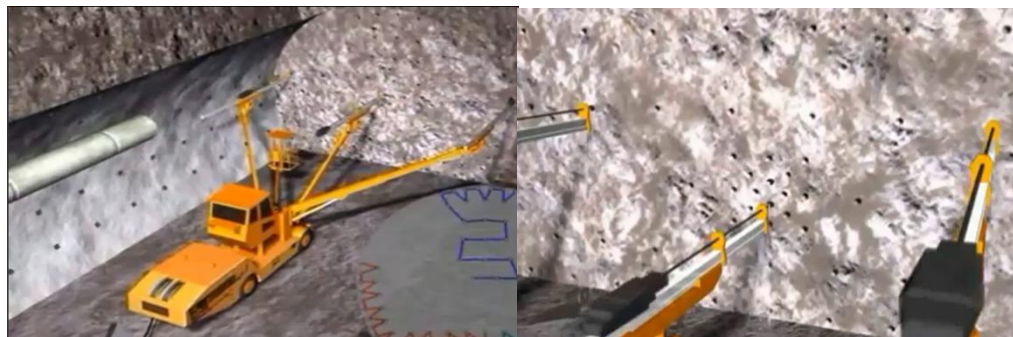
El diseño de perforación también se realiza de acuerdo al área de sección requerida por el túnel y el tipo de roca, complementándose con la experiencia y una recopilación de normas empíricas plasmadas en los diferentes manuales sobre explosivos. Estas perforaciones tienen como objetivo volar una cantidad máxima de roca, tratando de que sea con una cantidad mínima de explosivos.

**Figura 2. Esquema de perforación**



Fuente:(ABDUL, F., & ACOSTA, N., 2009)

**Figura 3. Perforación con jumbo.**



Fuente:(Proceso y técnicas para la construcción de túneles)

➤ **Cargue de barrenos con explosivos.**

El diseño de una voladura se complementa con el cargue de los barrenos con explosivos. Para el diseño del cargue se tiene en cuenta el tipo de explosivo que se va a emplear antes de iniciar la carga de los barrenos. Es de gran relevancia conocer las características del explosivo que se va a implementar en la voladura; las más significativas se relacionan con la estabilidad química, la sensibilidad, velocidad de detonación, potencia explosiva, densidad y gravedad específica,

resistencia al agua, inflamabilidad y emanaciones o humos. El conocimiento de estas propiedades antes de hacer uso del explosivo, permite elegir el más adecuado y además lograr un buen diseño de voladura. A continuación se muestra una breve clasificación de los tipos de explosivos que se utilizan para ejecución de la voladura:

La cantidad de carga que se debe utilizar por metro cubico a volar, depende de la dureza de la roca y de la dimensión del frente de voladura. La cantidad aumenta con la dureza de la roca y a su vez disminuye cuando la sección del túnel es más grande. Para el control de la voladura en túneles por lo general se calcula el factor de carga de diseño en  $\text{Kg/m}^3$  y después de realizar la voladura se verifica el factor de carga real ejecutado, con la cantidad de explosivos utilizados.

Para la instalación del explosivo se debe dejar una distancia libre de 1/3 de la longitud del taladro esto con el objetivo de taponear el mismo con arcilla, tierra húmeda y en algunos casos papel bien confinado, y así evitar la expulsión del explosivo debido a la fuerza de impacto entre roca y explosivo.

**Figura 4. Clasificación de explosivos**



Fuente:(ABDUL, F., & ACOSTA, N., 2009)

**Figura 5. Instalación de explosivos**



Fuente: (Proceso y técnicas para la construcción de túneles)

**Figura 6. Explosivos utilizados en Colombia**



a) Indugel Plus AP



b) Cordón detonante



c) Booster – Mecha de seguridad



e) Detonadores – estopines Nonel



d) Unidad de bombeo de emulsión

Fuente: (INDUMIL, Catálogo de productos)

➤ **Voladura y ventilación.**

**Voladura**

Los detonadores pueden ser de impacto o eléctricos. Para excavaciones en túneles comúnmente son utilizados los detonadores no eléctricos o tipo NONEL, estos proporcionan más seguridad a la hora de hacer la voladura. Los detonadores pueden ser de tipo instantáneo, de microretardo (tiempo entre 25 a 30 mseg) o retardo (tiempo de 0,5 seg).

**Ventilación**

El sistema de ventilación se utiliza con el fin de mantener la calidad del aire al interior del túnel. Este sistema de ventilación cuenta con la instalación de tuberías flexibles con diámetros que abarcan desde los 800 a 2000 mm, dependiendo del diámetro del túnel. Esta tubería se conecta a unos ventiladores, que normalmente están ubicados a la entrada del túnel. Estos ventiladores cumplen dos funciones, la primera, suministrar aire limpio al interior del túnel y la segunda, evacuar los gases tóxicos producidos por la voladura.

➤ **Retiro de rezaga, saneo del frente, bóveda y hastiales.**

La rezaga consiste en el retiro del material producto de la voladura, es recomendable que el retiro de la rezaga se haga de manera rápida para dar inicio a la instalación de soporte del túnel. El desabombe consiste en retirar los pedazos de roca fragmentada que quedan después del proceso de voladura.

**Figura 7. Retiro de rezaga, desabombe de bóveda y hastiales**



Fuente:(Proceso y técnicas para la construcción de túneles)

**2.1.2 New Auschwitz Tunneling Method NATM.**El Nuevo Método Austriaco (NATM), fue implementado en el año de 1950 para la construcción de grandes túneles en Europa y hoy en día es básico para la excavación de túneles en roca. Este método pretende realizar la excavación de modo que el deterioro en la roca y las deformaciones inducidas por la misma no sean tan altos y permita la limitación del movimiento del terreno.

Los principios básicos del método son los siguientes:

- La roca excavada debe ser capaz de resistir las cargas que se producen durante el proceso de excavación.
- No introducir daños apreciables a la roca con el sistema de voladura, con el fin que no se abran más las diaclasas y no se formen grandes aureolas de compresión.
- El soporte del túnel debe ser flexible y debe servir de protección al macizo rocoso, con el fin de evitar la expansión, agrietamiento y meteorización en la roca. En este punto, el concreto lanzado con fibra se convierte en el principal elemento de soporte del método, junto con los pernos y los arcos en acero.

- Monitoreo constante del comportamiento de la roca y el soporte. Se debe llevar un control de deformaciones en el macizo rocoso, debido a que los desplazamientos pueden llegar a ser muy grandes y no presentar un equilibrio entre el soporte y el terreno tras la deformación.

El procedimiento de excavación se realiza igual al método convencional de perforación y voladura.

## **2.2 SOPORTE.**

Los trabajos en obras subterráneas y principalmente la excavación de las mismas, es una actividad que hoy día, se considera una de las más riesgosas que realiza el hombre. Los factores de riesgos que comúnmente encontramos allí son: el uso de explosivos, la presencia de gases tóxicos, la presencia de aguas subterráneas y la maquinaria y equipos utilizados allí, representan un constante riesgo para el personal que labora en este tipo de obras.

La instalación del soporte en un túnel, permite controlar las deformaciones en el terreno, además evita los desprendimientos y caídas de rocas que puedan provocar lesiones al personal o dañar equipos e instalaciones que se encuentren en el sitio.

### **Arcos**

Sistema de soporte implementado en suelos blandos o en zonas de altos esfuerzos In-situ; debido a que estos tipos de terrenos son altamente deformables. Los arcos proporcionan cierto rango de tolerancia de deformación del terreno, obedeciendo la filosofía del diseño del túnel de excavación.

## **Pernos**

La instalación de pernos contribuye al refuerzo del macizo rocoso, aumentando la resistencia de la roca y ayudarlo a auto sostenerse y a evitar desprendimientos de bloques y lajas.

## **Concreto lanzado**

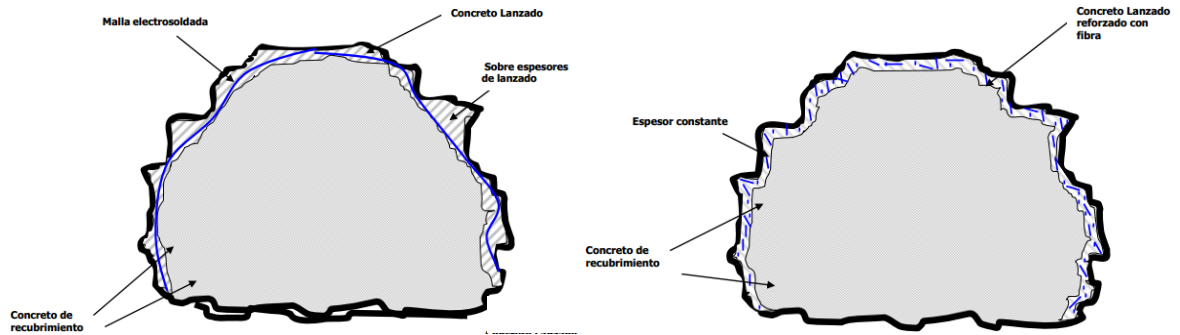
El concreto lanzado tiene un sistema de colocación inmediata, su resistencia varía de acuerdo a la dosificación igual que un concreto convencional. La rigidez de este material como soporte depende del espesor de capa del concreto, con capacidad de soportar cargas previstas, esfuerzos de tracción y resistencia a la flexión.

El concreto lanzado puede ser reforzado con fibras que permiten mejorar sus propiedades, calidad y el comportamiento ante los esfuerzos y deformaciones que se generan en un terreno durante la construcción de una obra subterránea. Existe una gran variedad de fibras, que se clasifican por el tipo de material, estas pueden ser fibras metálicas, de vidrio, sintéticas y naturales. Considerando el tema de estudio de la presente tesis, solo se considerará la utilización de fibras metálicas como refuerzo del concreto lanzado.

Además de las fibras metálicas, la malla electrosoldada puede utilizarse como refuerzo del concreto lanzado, este tipo de refuerzo es menos utilizado, debido a que constituye una parte de la ruta crítica del ciclo de excavación. La adición de fibras metálicas al concreto lanzado elimina los tiempos de instalación de la malla, justificando ampliamente la diferencia en costo por metro cuadrado del material colocado.

El concreto lanzado reforzado con fibra de acero permite seguir estrictamente el perfil de la excavación, mientras que la malla debe ser recubierta en su totalidad, logrando así un consumo más elevado de concreto y tiempo de instalación.

**Figura 8. Diferencia entre uso de fibras y malla electrosoldada.**



Fuente: (SIKA. Concreto reforzado con fibra)

El soporte del túnel puede ser de cualquiera de los materiales nombrados anteriormente, pudiendo emplearse solos, dependiendo del medio en que sean solicitados o bien sea la combinación de dos o más de ellos.

**Figura 9. Instalación de arcos y proyección de concreto**



Fuente:(Proceso y técnicas para la construcción de túneles)

### **3. CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRA DE ACERO**

El concreto lanzado reforzado con fibra de acero contiene fibras discontinuas y separadas, con una distribución homogénea de esta fibra metálica en toda la mezcla, este concreto es neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie que golpea y compacta el material de modo que se puede soportar por sí mismo sin desprendimiento, aun sobre una cara vertical o de techo. Es un material que incorpora fibras hasta del 2 por ciento en volumen de la mezcla total. El concreto lanzado es un material frágil con resistencia limitada a la tensión y a la flexión pero con excelente resistencia a la compresión. La inclusión de fibras metálicas en el concreto lanzado tiene como propósito mejorar las propiedades mecánicas de este material, logrando así, un incremento en su ductilidad, tenacidad, aumento de la resistencia al impacto, alta resistencia a la tensión y flexión, reducción de la fisuración por retracción temprana y mayor resistencia al fuego.

El concreto lanzado reforzado con fibras metálicas (CRF), es un material que proporciona buena adherencia, baja permeabilidad, durabilidad, rápido desarrollo de resistencias y alto rendimiento.

La utilización de estas fibras metálicas como refuerzo en el concreto, no solamente cambian las propiedades mecánicas del material, también mejoran el comportamiento ante los esfuerzos y las deformaciones que se generan en el terreno durante la construcción de una obra. Esto corresponde a que el material con la inclusión de estas fibras metálicas, aumenta su ductilidad, lo cual permite que la estructura soporte deformaciones más allá de su límite elástico causadas por desplazamientos del terreno y soportando carga significativa después de su fisuración. Grandes deformaciones son necesarias para causar la completa separación de la fibra de acero y el concreto.

La aplicación de concreto lanzado comúnmente se ha llevado a cabo en la estabilización de deslizamientos de tierra, estabilización de taludes en roca, minas, presas, túneles y rehabilitaciones en superficies de concretos deteriorados. La adición de estas fibras metálicas al concreto, además de mejorar sus propiedades mecánicas, es un material que ayuda a reforzar el terreno circundante garantizando una estabilidad a corto y largo plazo, como también una adecuada funcionalidad durante su vida útil.

### **3.1 MATERIALES CONSTITUTIVOS.**

El concreto lanzado está compuesto por tres materiales, agregados, cemento y agua. Para mejorar sus propiedades mecánicas y aplicación puede convertirse en un sistema de cinco componentes con el suministro de aditivos y fibras metálicas.

**3.1.1 Cemento.** Según las especificaciones para concreto lanzado ACI 506.2-95, el Portland tipo I, es el cemento que debe contener el concreto lanzado. El cemento portland tipo I es utilizado como aglomerante en la preparación del concreto y mezclado con agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adhesivas que solidifica las partículas de los agregados y posteriormente un fraguado hidráulico que endurece la mezcla progresivamente durante varias semanas hasta adquirir su resistencia característica. El cemento para la mezcla de concreto lanzado debe iniciar el proceso de fraguado lo más rápido posible y alcanzar tempranamente el desarrollo de alta resistencia.

El cemento portland se obtiene a partir de la pulverización del Clinker portland, el Clinker es el producto de calcinar piedra caliza y arcilla. Químicamente es una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio.

Al combinarse el cemento con aditivos o acelerantes de fraguado y no presenten una buena reacción, no es apto para la producción de concreto lanzado para la estabilización del terreno.

**3.1.2 Agua.** El agua de mezclado para concreto lanzado debe ser limpia y potable, debe estar libre de elementos o sustancias que causen algún retardo o aceleren el proceso de hidratación. Estas sustancias pueden ser: sulfatos, cloruros, sales, azúcares, aceites y grasas.

El agua lluvia, de río, lagos o subterránea es normalmente adecuada para la producción de concreto lanzado. El agua Marina no debe ser utilizada por su alto contenido de cloruros.

Dependiendo del método de aplicación, el agua se añade a la mezcla durante su producción, también se debe tener en cuenta su presencia como humedad en los agregados pétreos.

**3.1.3 Agregados.** Aproximadamente el 75 % del volumen de concreto está conformado por los agregados (arena y grava). Los agregados cumplen con diferentes funciones tales como darle homogeneidad de la mezcla, influencia en las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, flexión y resistencia a la tensión), durabilidad del concreto, manejabilidad de la mezcla y contribuye a la determinación de la cantidad de agua necesaria para la mezcla (humedad de los agregados).

El agregado fino y grueso para el uso en concreto debe cumplir con las especificaciones dadas en la norma ASTM C 33. Esta especificación se considera la adecuada para garantizar la gradación y la calidad en los materiales. La información que mínimamente se debe conocer de estos materiales son sus densidades reales, coeficientes de absorción y análisis granulométricos.

La manejabilidad del concreto, permite la facilidad de que la mezcla pueda ser manejada, transportada y colocada sin perder su homogeneidad, sin provocar una tendencia a la segregación o exudación. La gradación del agregado fino, la gradación del agregado grueso, forma y textura superficial de los agregados, son factores muy importantes que influyen en la manejabilidad de la mezcla.

Cuando la arena y el agregado grueso presentan una mala gradación, en este caso con defectos o excesos de partículas de un tamaño dado, se presentan espacios vacíos que deben ser llenados con agua y cemento con el fin de lograr una mezcla manejable y evitar que quede porosa. Los agregados con partículas angulosas, aplanadas, largas y ásperas exigen una cantidad mayor de arena en la mezcla para lograr una buena manejabilidad, lo recomendable es utilizar partículas redondeadas y lisas.

**3.1.4 Aditivos.** Los aditivos para el concreto lanzado se utilizan para mejorar propiedades que no pueden ser controladas solamente por los demás componentes agregado, agua y cemento. Principalmente cumplen con la función de mejorar el fraguado del concreto y la manejabilidad, el tiempo de manejabilidad del concreto fresco. La cantidad de aditivo que se proporciona al concreto lanzado se da como el porcentaje del peso o volumen del cemento, estos se adicionan en un rango aproximado de 0.5% a 6%.

Los aditivos utilizados se añaden al concreto durante su producción en la planta después de la medición inicial del agua. La adición de un acelerante puede lograr que el concreto desarrolle altas resistencias mecánicas muy tempranas y que su fraguado finalice en pocos minutos. Para acelerar el fraguado, el aditivo debe añadirse antes de ser lanzado.

En la preparación de mezclas de concreto lanzado los aditivos más utilizados son los acelerantes, aditivos para el control de fluidez y retardantes de fraguado. Estos

dos últimos se dosifican durante la producción de la mezcla en la planta. (Ver Anexo A, B y C)

➤ **Acelerantes**

celeran el fraguado y la ganancia de resistencias iniciales en el concreto. Un factor muy importante en el control de tiempo del fraguado es la dosificación del acelerante, por tanto se deben utilizar unidades dosificadoras que garanticen la baja variabilidad de la dosis de acuerdo al flujo de concreto.

Un tipo de acelerante muy utilizado para la mezcla de concreto lanzado es el acelerante libre de álcalis, proporciona concretos de alta calidad, durables y mejora el ambiente de trabajo por el bajo contenido de Ph, garantizando la seguridad de las personas.

➤ **Agentes de control de fluidez:** Controlan el contenido de agua especificado por la relación a/c y simultáneamente garantizan la consistencia requerida en el concreto fresco, dándole manejabilidad a la mezcla con tiempo controlado.

➤ **Retardantes de fraguado:** Retardan el proceso de hidratación de la mezcla de concreto lanzado, permitiendo un tiempo de manejabilidad. El tiempo puede ser ajustado con el contenido de este aditivo.

**3.1.5 Fibras metálicas.** La utilización de fibras metálicas como refuerzo en el concreto lanzado ha mejorado las propiedades mecánicas de este material, aumentando la ductilidad, tenacidad, resistencia al impacto, resistencia a la flexión y reduciendo la propagación de grietas en el concreto. Las fibras metálicas han sido usadas en todo el mundo como refuerzo en el concreto lanzado para todas las aplicaciones túneles, taludes, reparaciones etc).





La tenacidad es la capacidad de absorción de energía de un material. Esta propiedad se describe como la capacidad que tiene un material de soportar cargas antes de colapsar. La inclusión de estas fibras aumenta la tenacidad del concreto, logrando que la estructura, aun así, después del agrietamiento pueda seguir soportando carga sin colapsar y continuar funcionando.

Las fibras de acero para reforzar concreto deben cumplir con unas especificaciones técnicas, a continuación presentaré tres características muy importantes que deben tenerse en cuenta al hacer uso de estas fibras:

- Geometría de la fibra.
- Deformaciones.
- Propiedades físicas
  
- **Geometría de la fibra.**

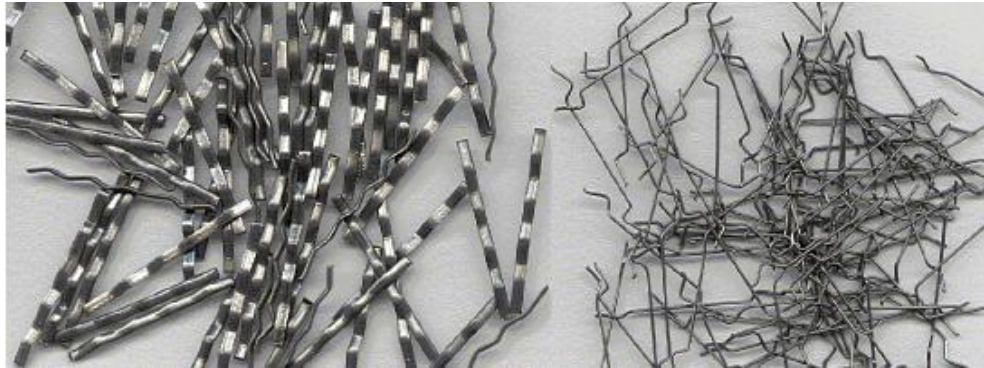
Las fibras metálicas son secciones discretas que tienen una relación de aspecto, que se define como la relación entre su longitud y el diámetro ( $l/d$ ). Mientras más alta sea la relación de aspecto, aumenta la facilidad de adherencia de estas fibras al concreto, lo cual no permitiría el desprendimiento de las fibras al alcanzar su esfuerzo último.

**Tabla 1. Tipos de fibra metálica**

<b>Tipo: Ondulada</b>	<b>Tipo: Con estribos en los extremos</b>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Forma</p>  <p>← longitud →</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Secciones</p>  </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Forma</p>  <p>← longitud →</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Secciones</p>  </div> </div>
<p>Longitud: 25 a 63 mm.                      Sección: Diámetro o equivalente de 0.5 a 1.0mm.                      Resistencia a la tensión 140,000 psi mínimo</p>	<p>Longitud: 25 a 63 mm.                      Sección: Diámetro o equivalente de 0.5 a 1.0mm.                      Resistencia a la tensión 140,000 psi mínimo</p>

Fuente:(Lloyd International)

**Figura 10. Fibra metálica**



Fuente:(Lloyd International)

➤ **Deformaciones.**

Al aplicarse una carga externa a la estructura, las fibras se tensionan convirtiendo dicha acción en un esfuerzo interno creciente evitando gran deformación en la fibra. Al momento de la falla del material, el esfuerzo interno es muy alto pero su deformación es muy baja. De acuerdo a lo anterior se puede explicar el porqué, el concreto reforzado con fibra de acero (CRF) después de haber fallado, puede seguir soportando carga y deformándose plásticamente.

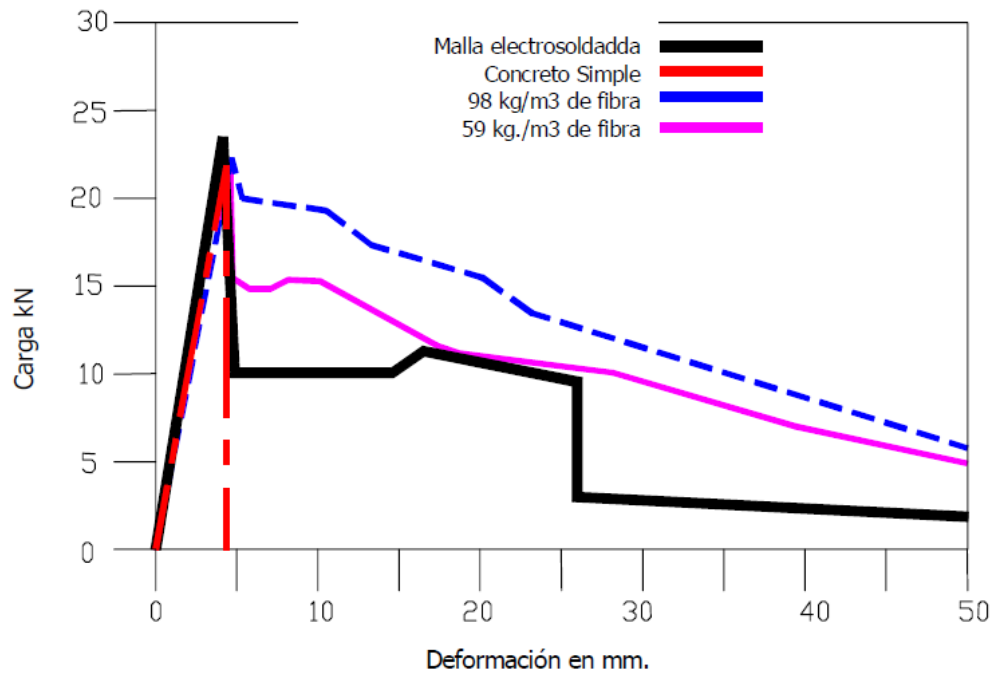
En la tabla 1. Se muestran los tipos de fibra de acero, su forma se debe a que permiten deformaciones a lo largo de ella o en la puntas en forma de gancho puedan anclarse firmemente al concreto, evitando que sean desplazadas o removidas.

➤ **Propiedades físicas.**

Las fibras de acero suministradas al concreto, deben ser fabricadas con la suficiente resistencia a la tensión, con el fin de garantizar que la falla final sea por desprendimiento y no por rotura de la fibra.

La resistencia a la tensión de las fibras de acero es de 140,000 psi hasta 170,000 psi. La norma ASTM A-820 recomienda una resistencia mínima a la tensión de 50,000 psi.

**Figura 11. Comparación de curvas de carga – deformación.**



Fuente:(Lloyd International)

La cantidad de fibra está en función de la cantidad de energía absorbida requerida por la estructura, de manera que se comporte como un material capaz de soportar cargas antes de colapsar. La cantidad de fibra metálica varía entre 20 y 50 kg/m<sup>3</sup>. En el momento de realizar la mezcla de las fibras con el concreto, se exige un tiempo de mezclado adicional entre 3 a 5 minutos para que haya dispersión de las fibras y evitar que se acumulen solo en ciertas partes, además garantizar una distribución de fibras homogénea en toda la mezcla.

La oxidación en el refuerzo del concreto provoca la pérdida de propiedades para las cuales ha sido diseñado, al utilizar fibras metálicas no se corre con este riesgo debido a que estas son discontinuas, caso contrario a lo que sería utilizar en vez

de fibra, malla como refuerzo ya que esta puede quedar ligeramente expuesta a la superficie, produciendo un ataque de corrosión en todo el armado. Químicamente son compatibles bajo los ambientes alcalinos de la pasta de cemento.

### **3.2 PROPIEDAS MECÁNICAS DEL MATERIAL**

A continuación se definen las propiedades típicas de este material:

➤ **Resistencia a la flexión y a la compresión.**

La resistencia a la flexión se determina a los 28 días a partir de muestras tomadas como se indica en la norma ASTM C78. Estos valores de resistencia oscilan en un rango de 4.1 a 10.3 Mpa, sin embargo, un incremento en el valor de la resistencia depende de las especificaciones dadas para un proyecto siempre que esto sea factible tecnológica y prácticamente. Con respecto a la resistencia por compresión, se aplican las mismas consideraciones nombradas anteriormente para la resistencia a la flexión. La misma norma indica los valores de resistencia a la compresión del concreto lanzado reforzado con fibra están en el rango de 29 a 52 Mpa. Ver numeral 4.3.

➤ **Resistencia al impacto.**

La resistencia al impacto del concreto reforzado con fibra metálica, hace referencia al número de golpes requeridos para fisurar y separar las fibras a los 28 días en las muestras tomadas.

El ensayo para cargas de impacto en concreto lanzado reforzado con fibras metálicas descrito en el código ACI 544.2R, se observa mediante una prueba de impacto por caída de peso, donde se utiliza un martillo de compactación que pesa 10 libras (4,5 kg) y se deja caer a una altura de 18 in (457 mm) sobre una bola de

acero de 2 ½ in (63,5 mm) de diámetro, que hace contacto con el espécimen, probetas de concreto de 6 in (152 mm) de diámetro y 2 ½ in (63,35) de espesor. Las muestras deben ser probadas a los 7, 28 y si se desea a los 90 días de edad. El número de golpes necesarios para romper y separar las fibras en las muestras a los 28 días se encuentra en el rango 100 a 500, dependiendo de la cantidad y el tipo de fibra.

➤ **Tenacidad.**

Es la cantidad de energía necesaria para provocar la falla del concreto reforzado con fibra metálica y la capacidad que tiene para seguir absorbiendo energía aun así después de la fisuración en un elemento, es decir, podrá seguir resistiendo carga y deformándose sin colapsar, comportándose como un material dúctil.

El método de ensayo para determinar la capacidad de absorción de energía del concreto reforzado con fibra se encuentra descrito en la norma ASTM C1018 ó la NTC 5721. Ver numeral 4.1.

### **3.3 DISEÑO DE MEZCLAS**

Para efectuar el diseño de una mezcla de concreto tanto convencional como lanzado, se utilizan distintos métodos que permiten obtener la dosificación de los distintos materiales que componen la mezcla con el fin de obtener un concreto que cumpla con la resistencia, manejabilidad y demás características necesarias para un uso específico.

Para obtener el diseño definitivo de una mezcla de concreto, se deben llevar a cabo un número importante de pruebas con distintas dosificaciones, relación A/C, tipos de cemento, tamaños del agregado, verificar la fuente de materiales, porcentaje de aditivos e incluso contemplar la temperatura ambiente del sitio de

las obras, tiempos de mezclado, distancia desde la planta de producción y demás variables que intervienen en el proceso.

El mejor diseño de mezcla será aquella que tenga buena manejabilidad, durabilidad, resistencia mecánica y la menor relación costo/beneficio. Los siguientes son los controles que se deben realizar a los materiales empleados en el diseño de mezcla.

➤ **Agregados (Ensayo de granulometría).**

Se especifican unos límites de granulometría para el conjunto de agregados gruesos y finos, estos materiales combinados deberán ser bien gradados y estar completamente dentro de los límites establecidos. No debe aceptarse un conjunto de agregados que no cumplan con estos límites establecidos ya que pueden presentar tamaños mayores o un alto contenido de finos que supera el especificado para su gradación. Ver numeral 4.2.

La combinación de agregados debe cumplir con una de las gradaciones que se muestran en la tabla 2. Si se utiliza agregado fino para el concreto lanzado, debe cumplir con la gradación No. 1, el uso de arenas gruesas aumenta la cantidad de rebote (desperdicio). Generalmente los concretos con alto contenido de fino son utilizados para acabados. Si la gradación es como la No. 3, los agregados gruesos y finos deben pesarse por separado para evitar para evitar una gradación pobre debido a la segregación. Las partículas de gran tamaño deben ser eliminadas, ya que son propensos a causar obstrucción en la manguera o la boquilla. El tamaño máximo de los agregados para concreto lanzado depende del espesor de capa y acabado que se necesite.

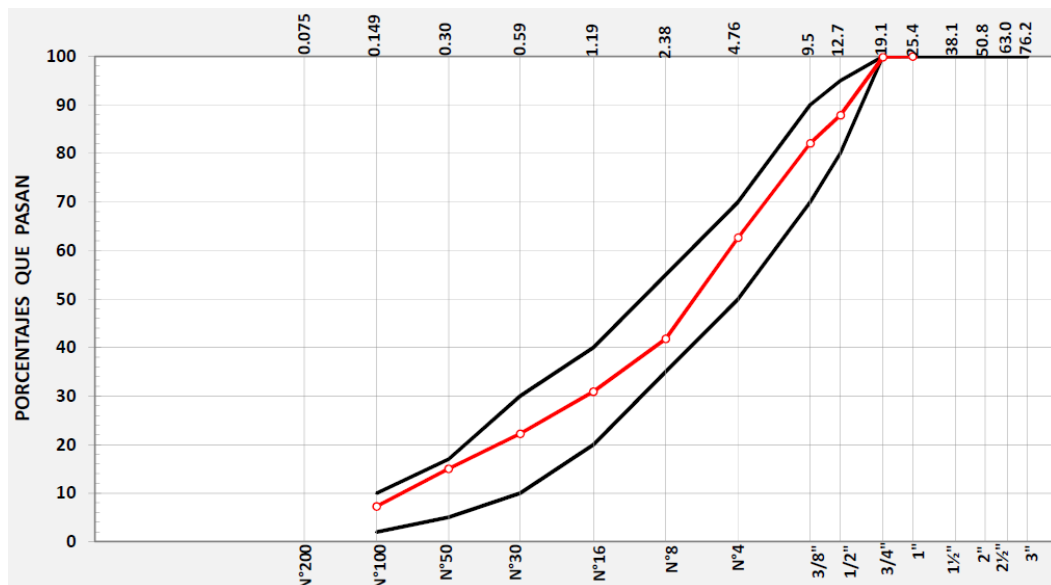
Los agregados que no cumplan con las gradaciones que se muestran en la Tabla 2, pueden ser utilizados si la prueba previa a la construcción demuestra que dan resultados satisfactorios.

**Tabla 2. Límites de gradación para agregados combinados.**

Tamaño del tamiz, Casilla de malla estándar, EE. UU.	Porcentaje en peso que pasa por los tamices individuales		
	Gradación No. 1	Gradación No. 2	Gradación No. 3
3/4 in. (19mm)	---	---	100
1/2 in. (12mm)	---	100	80-95
3/8 in. (10mm)	100	90-100	70-90
No. 4 (4.75 mm)	95-100	70-85	50-70
No. 8 (2.4 mm)	80-100	50-70	35-55
No. 16 (1.2 mm)	50-85	35-55	20-40
No. 30 (600 $\mu$ m)	25-60	20-35	10-30
No. 50 (300 $\mu$ m)	10-30	8-20	5-17
No. 100 (150 $\mu$ m)	2-10	2-10	2-10

Fuente:(ACI, 1990)

**Figura 12. Ejemplo de curva granulométrica.**



Fuente:(Información ISAGEN. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

➤ **Cemento.**

La empresa que hace el suministro del cemento debe certificar la calidad del producto tanto en la parte química como la física.

El control de este material se hace por medio de varios ensayos que se deben realizar antes de utilizar el producto:

- 1. Ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico utilizando el tamiz de 45 $\mu$ m (No325). NTC 294:** Se realiza con el fin de comprobar que sea el porcentaje de impureza contenida en el cemento, corresponda al especificado por el proveedor.
- 2. Ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. NTC 33:** Determina la superficie específica del cemento, que corresponde a la finura del cemento portland como la cantidad de material que se acumula en una área determinada, expresada en centímetro cuadrados por gramo [cm<sup>2</sup>/g].
- 3. Ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de vicat. NTC 118:** Establece los tiempos de fraguado del cemento. Conocer este dato es de gran importancia, puesto que se pueden ocurrir inconvenientes en obra que retrasen el inicio del vaciado del concreto, que a su vez podría exceder el tiempo de fraguado provocando el daño de la mezcla.
- 4. Ensayo para determinar la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado. NTC 220:** Con este ensayo se verifican las resistencias del cemento al día primero (1), al día tercero (3), al día séptimo (7) y al día veintiocho (28).

➤ **Aditivos.**

Para la mezcla de concreto se utilizan dos clases de aditivos, uno para darle manejabilidad y otro para acelerar el fraguado del concreto.

La cantidad de aditivo presente en la mezcla que busca la manejabilidad adecuada, se suministra de acuerdo a una serie de ensayos que se efectúan cambiando el porcentaje de aditivo con respecto al peso del cemento, pero conservando las demás proporciones de la mezcla garantizando la resistencia de diseño especificada de la misma.

El acelerante de fraguado aprobado para el diseño de la mezcla debe garantizar altas resistencias a corto tiempo y tiempos máximos de fraguado inicial de la mezcla. Estos tiempos se encuentran ligados a unas especificaciones técnicas correspondientes al tipo de obra donde se desea implementar estos concretos.

Existe en el mercado una gran variedad de aditivos, cada tipo y presentación, en sus especificaciones, estipula los límites de cantidad que se deben suministrar para un metro cubico de concreto. Son estos los límites que se usan para realizar los ensayos de la mezcla.(Ver Anexos A, B y C)

➤ **Cantidad de fibra metálica y ensayo de tenacidad.**

El ensayo de tenacidad deberá proporcionar la cantidad suficiente de fibra metálica por metro cubico ( $m^3$ ) de concreto capaz de alcanzar energía absorbida requerida por la estructura. (Ver Anexo D)

La prueba de absorción de energía se realiza de acuerdo con la norma "EnergyAbsorptionClass-Plate Test" de la EFNARC. Ver numeral 4.1.

➤ **Pruebas de resistencia a la compresión.**

Se realizan pruebas de resistencia a la compresión con el fin de verificar que el diseño de mezcla propuesto cumple con la resistencia especificada. Ver numeral 4.3.

A continuación se muestra el diseño de mezcla para concreto lanzado utilizado las obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

**Tabla 3. Diseño de mezcla para concreto lanzado reforzado con fibra metálica.**

<b>RESISTENCIA DE DISEÑO</b>	<b>26 [MPa]</b>
<b>RELACIÓN A/C</b>	<b>0,44</b>
<b>TAM. MÁX. AGREGADO</b>	<b>3/4"</b>
<b>CANTIDAD DE FIBRA</b>	<b>45 [kg]</b>

<b>MATERIAL</b>	<b>% Agregado Seco S.S.S</b>	<b>Gravedad Especifica</b>	<b>Peso S.S.S [kg/m3]</b>	<b>Volumen [Lt]</b>
<i>Cemento Tipo III</i>		3,120	510	163,5
<i>Arena Aluvial</i>	55,0	2,624	887	329,0
<i>Grava 3/8"</i>	22,5	2,634	363	133,8
<i>Grava 3/4"</i>	22,5	2,642	363	133,0
<i>Agua</i>		1,00	222	219,3
<i>Plastiment AD -30</i>	0,15	1,29	0,77	0,59
<i>Viscocrete 2100</i>	0,19	1,08	0,97	0,90
<i>% Aire</i>	2,00			20,0
	<b>100,0</b>		<b>2346,74</b>	<b>1000</b>

<i>Eucoshot 962 [%]</i>	1,23
<i>DMT [kg/m3]</i>	2346,74

Fuente:(Información ISAGEN S.A. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

Después de llevar a cabo varias mezclas de prueba se seleccionó la mezcla mostrada en la Tabla 3 para la utilización de concreto lanzado con fibra y sin fibra

en las obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso. Dicho concreto está diseñado con una resistencia a la compresión de 26 MPa, los agregados pétreos son provenientes de las terrazas aluviales del Río Sogamoso. El cemento utilizado es Portland tipo III producido en la planta Rio Claro de Cementos Argos, a pesar que se recomienda la utilización de cemento tipo I, se seleccionó cemento tipo III debido a que este reacciona muy bien con el aditivo acelerante Eucoshot 962 de TOXEMENT. Los aditivos plastificantes utilizados en la mezcla son Plastiment AD-30 y Viscocrete 2100 del fabricante SIKA.

En general, se obtuvieron resultados satisfactorios en todos los ensayos que se llevaron a cabo al concreto lanzado utilizado en los distintos frentes de obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso e igualmente no se presentaron problemas en el comportamiento del soporte en el sitio. Debido a la confidencialidad de la información por parte del dueño del Proyecto, no se presentan resultados de ensayos de resistencia a la compresión del concreto lanzado en este trabajo de grado.

### **3.4 DURABILIDAD**

Un concreto durable debe estar en la capacidad de conservar sus condiciones originales de calidad, forma y nivel de servicio, manteniendo la calidad en el tiempo de vida útil. Debe ser resistente a ataques químicos, abrasión o cualquier otro proceso que pueda causar deterioro en el material.

La durabilidad del concreto depende básicamente de 4 parámetros, la correcta aplicación del concreto lanzado, alta impermeabilidad del material, baja relación de agua/cemento y que sea bien curado.

El alto contenido de agua en la mezcla afecta considerablemente las propiedades del concreto duro y como consecuencia de esto, podríamos obtener un material de poca durabilidad.

Los límites de la cantidad de agua depende especialmente del contenido de humedad presente en los agregados que se van a utilizar en la mezcla de concreto. Debido a que el concreto requiere de un rápido fraguado después de ser lanzado, este se controla con la presencia de un acelerante, que a su vez disminuye de agua en la mezcla.

### **3.5 MÉTODOS DE APLICACIÓN DEL CONCRETO LANZADO.**

En la actualidad, existen dos procesos diferentes para aplicar el concreto lanzado, cada uno de estos métodos cuenta con su propia línea de equipos, procedimiento de colocación y aplicación:

- Concreto lanzado por vía húmeda.
- Concreto lanzado por vía seca.

Cualquiera que sea el método a implementar, la mezcla de concreto que es preparada para ser lanzada se proyecta a alta presión, pasando a alta velocidad, logrando que la fuerza con la que sale la mezcla de la boquilla sea la necesaria para densificar y compactar el concreto sobre una superficie.

**3.5.1 Concreto Lanzado Vía Húmeda.** Lanzar concreto por vía húmeda, es el método que frecuentemente es utilizado en toda la industria de la construcción, sobresaliendo principalmente en procesos de construcción de obras subterráneas, minería y reparación de concretos.

El concreto utilizado para la vía húmeda debe ser premezclado y manejable. La mezcla compuesta por cemento, agua, agregados, fibra y aditivos debe ser controlada por una planta productora de concreto, de tal forma que durante su proceso de fabricación se pueda conocer la cantidad de agua añadida a la mezcla, garantizando así la calidad y durabilidad del concreto. En el lanzado por vía húmeda el concreto se mezcla con aire y acelerantes, este último se añade en la

boquilla con el fin de agilizar el fraguado y la resistencia inicial del concreto. Además de destacar el control de cantidad de agua, se debe tener un especial cuidado a la hora de mezclar las fibras metálicas con los demás materiales, estas fibras no se deben añadir demasiado rápido, deben ser adicionadas por grupos o “bachadas” separadas y llevadas en una banda transportadora durante la adición de los demás materiales antes de que se acumulen unas sobre otras evitando la formación de bolas de fibra.

**3.5.1.1 Usos.** Este método de lanzado es el más apropiado para trabajar con grandes volúmenes de concreto, garantiza altos rendimientos y menor costo en su colocación, proporciona un ambiente de trabajo relativamente libre de polvo durante su proyección y aumenta la durabilidad del concreto debido al control de la cantidad de agua que se le suministra a la mezcla, alcanzando características mecánicas muy altas en el concreto ya endurecido.

**3.5.1.2 Ventajas.** Las ventajas de utilizar e método e vía húmeda son las siguientes:

- Control de dosificación principalmente en la relación agua/cemento.
- Alto rendimiento en la aplicación.
- Disminución de la contaminación, libre de polvo que se genera por esta actividad.
- Menores costos de colocación y desgaste del equipo utilizado para el lanzado.
- Proporciona menor cantidad de rebote (desperdicio).

**3.5.1.3 Equipos.** Para el lanzado de concreto por la vía húmeda, se manejan métodos manuales y mecánicos, la selección del equipo de lanzado depende del volumen de concreto que se va a colocar, condiciones de acceso y el diámetro del túnel o galería si se trabaja en excavaciones subterráneas.

Para la aplicación de concreto lanzado en túneles de gran diámetro, normalmente se utilizan equipos robotizados, los cuales constan principalmente de una bomba dúplex para concreto, un brazo de lanzado que funciona automáticamente por medio de un control remoto y una unidad dosificadora del acelerante que permite controlar el porcentaje de aditivo de acuerdo con el flujo de concreto.

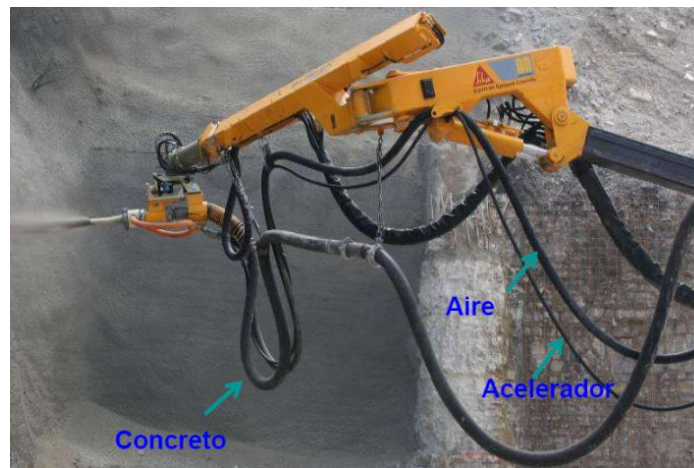
Este equipo es utilizado debido a la exigencia con la que se debe hacer el lanzado, manteniendo un flujo constante y continuo con el fin de garantizar una aplicación homogénea de la mezcla.

**Figura 13. Equipo para lanzado de concreto vía húmeda.**



Fuente: (HOFLER, J., &SCHLUMPF, J., 2004)

**Figura 14. Brazo mecánico del equipo de lanzado de concreto vía húmeda.**



Fuente: (HERMIDA, G., 2010)

**Figura 15. Lanzado de concreto vía húmeda.**



Fuente: (Registro fotográfico propio, Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

**3.5.2 Concreto lanzado vía seca.** El concreto lanzado por vía seca, no es comúnmente utilizado en la industria de la construcción pero frente al método de vía húmeda presenta una serie de ventajas en algunas aplicaciones muy concretas como la estabilización de taludes en suelo y roca. Es un método poco recomendado en cuanto a la seguridad del personal en obra por los altos niveles de contaminación debido al polvo que se genera durante el lanzamiento, por lo que normalmente es utilizado en estabilizaciones de taludes a cielo abierto.

La mezcla que se lanza por vía seca está compuesta por cemento, agregados y algún aditivo que no sea necesario combinar con agua, es una mezcla completamente seca o que puede estar humedecida por el contenido de agua en los agregados y se impulsa a través de una manguera usando aire comprimido hacia la boquilla donde se adiciona el agua y acelerante de fraguado. Igual que en el lanzamiento por vía húmeda el agua y el aditivo llegan por mangueras separadas. El concreto por vía seca debe ser instalado por una persona calificada, con buen entrenamiento y que tenga experiencia en este tipo de lanzamiento, ya que de su buena instalación dependen de ello. Cuando el concreto no se aplica

correctamente y las condiciones operativas del equipo no son las adecuadas puede ocasionarse altos niveles de material de rebote (desperdicio).

**3.5.2.1 Usos.** Debido a la capacidad que tienen los equipos para este tipo de lanzado, son utilizados para trabajos de pequeños volúmenes de concreto, es el método adecuado para implementar cuando se requieran bajos rendimientos y puede alcanzar altas resistencias en edades tempranas para actividades muy concretas, tales como sellados contra la penetración de agua y estabilización de taludes en suelo y roca. Es un método muy acogido en las actividades mineras porque no se requiere de alta mecanización, favoreciendo el uso en las labores de secciones reducidas.

**3.5.2.2. Ventajas.** Las ventajas de utilizar e método e vía húmeda son las siguientes:

- Es un método muy flexible, puede adaptarse a cualquier opción de trabajo.
- Obtención de resistencias altas a muy temprana edad en sellos de impermeabilización y estabilización de terrenos.
- Bajo desperdicio de material.
- Reparaciones de concreto en zonas de acceso limitado (sótanos y edificios). Los equipos para este método son de dimensiones relativamente pequeñas comparadas con los equipos de lanzado de vía húmeda y resulta siendo una mejor opción para desarrollar este tipo de actividades.

**3.5.2.3. Equipos.** Para el lanzado de concreto por la vía seca, se manejan métodos manuales y mecánicos. Como es un sistema recomendado para bajos volúmenes de concreto la opción de lanzado manual es mucho más importante que en el caso de la vía húmeda. Para este tipo de aplicación, el suministro se hace con máquinas de tipo rotor, aquí el material pasa a través de una tolva y es impulsado por el aire comprimido transportando la mezcla por mangueras a alta

velocidad. La unidad dosificadora del acelerante garantiza la baja variabilidad de la dosis de aditivo de acuerdo con el flujo de concreto.

**Figura 16. Equipo para lanzado de concreto vía seca.**



Fuente: (HOFLER, J., &SCHLUMPF, J., 2004)

## **4. ENSAYOS DE LABORATORIO.**

Los ensayos de laboratorio, se realizan con el fin de determinar las propiedades físico-mecánicas del material y comportamiento bajo la acción de cargas externas. Las muestras de concreto para los ensayos deben obtenerse del material de cada mezcla y cada día de trabajo o cada 50 m<sup>3</sup> instalados, esto de acuerdo a las especificaciones para concreto lanzado ACI 506.2-95. Los siguientes, son los ensayos y pruebas características que son realizados en el concreto lanzado reforzado con fibra metálica:

### **4.1 ABSORCIÓN DE ENERGÍA.**

Este ensayo tiene como característica determinar el comportamiento de un panel de concreto lanzado reforzado con fibra metálica, mediante un análisis de carga-deformación y así encontrar la capacidad de absorción de energía y deformación del material antes de producir la falla.

Para el ensayo, se obtienen tres (3) paneles en el sitio de trabajo lanzando concreto sobre un molde rígido de dimensiones 60x60 cm, con una superficie lisa en su base para facilitar el desmoldado del espécimen, el espesor del panel o la "artesa" debe ser de 10 cm. Los moldes deben ubicarse verticalmente, lanzado el concreto con el mismo equipo, el mismo operador, técnica y distancia de proyección utilizada en el lanzado en campo.

El desencofre debe hacerse después de 24 horas y un curado mínimo de 28 días. Cumplida esta edad debe realizarse el ensayo a las tres muestras obtenidas en campo. Como resultado tendremos el promedio de la energía obtenida en las tres placas.

**Figura 17. Elaboración de paneles de concreto lanzado.**

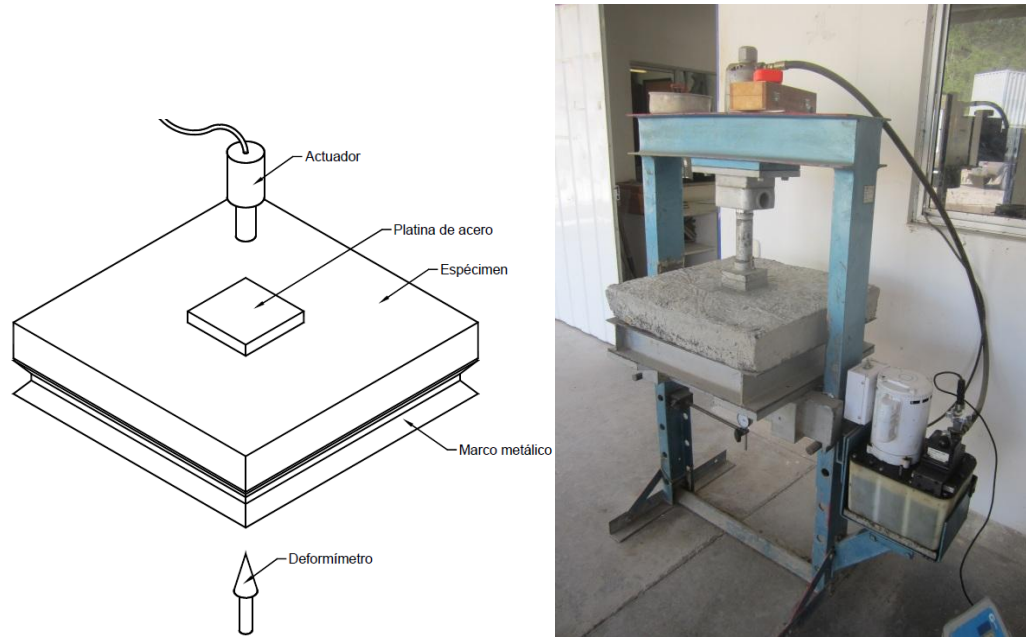


Fuente: (HERMIDA, G., 2010)

El ensayo consiste en aplicar una carga en el centro geométrico de la placa, apoyada sobre un marco en sus cuatro bordes. Sobre la cara superior de la placa, en el mismo centro geométrico se localiza un cubo metálico de 10x10 cm como superficie de contacto. La aplicación de la carga se realiza en el sentido contrario al lanzado, es decir sobre la cara lisa. Esto con el fin de simular el empuje del terreno y la capacidad del material para resistirlo.

En el mismo centro geométrico de la cara inferior se instala el sensor de deformación (deformímetro), aplicando una velocidad de deformación de 1.5 mm por minuto.

**Figura 18. Esquema del equipo de ensayo.**



Fuente: (NTC. 2009, & Registro fotográfico propio. Laboratorio de materiales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

El ensayo debe realizarse hasta alcanzar una deflexión de 25 mm en el punto central del panel. A partir de esto se obtiene una curva de carga – deformación, tomando como valor de energía el área bajo la curva. Tomando como referencia la curva de carga – deformación, se dibuja un nuevo gráfico con los valores de energía y deformación. Durante el ensayo es importante observar el valor de la carga de inicio de agrietamiento y la carga máxima.

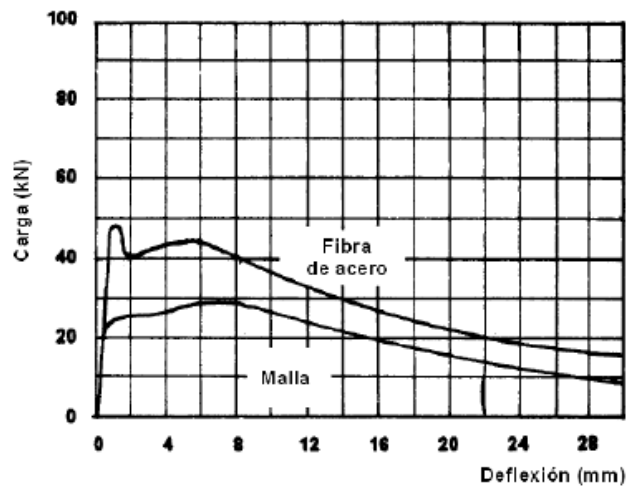
La tenacidad se expresa como la cantidad de energía absorbida por el elemento para una determinada deflexión. Su clasificación está dada por la norma EFNARC. La clasificación de tenacidad para un concreto lanzado reforzado con fibra metálica es especificada por el diseñador.

**Tabla 4. Requisitos de absorción de energía.**

Clasificación de tenacidad	Absorción de energía en julios para una deflexión de hasta 25 mm
a	500
b	700
c	1000

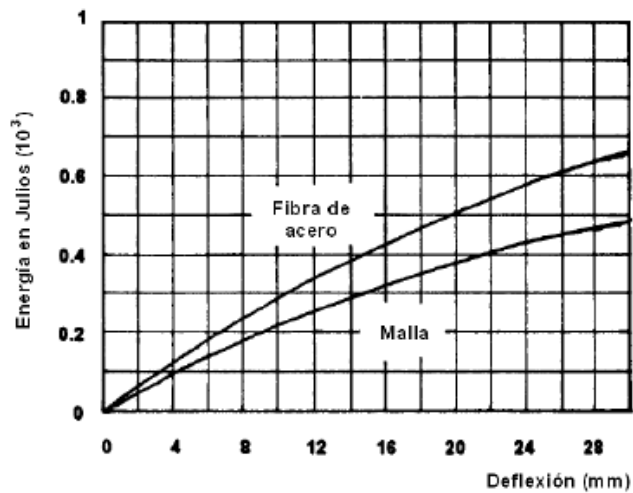
Fuente:(EFNARC, 1993)

**Figura 19. Grafica Absorción de energía. Carga Vs deformación.**



Fuente:(EFNARC, 1993)

**Figura 20. Grafica Absorción de energía. Energía Vs deformación.**



Fuente:(EFNARC, 1993)

Si observamos la figura 19 y 20, podemos concluir que la cantidad de carga soportada y energía ganada es mayor cuando utilizamos fibra metálica como refuerzo del concreto lanzado.

**Figura 21. Panel de concreto después del ensayo de absorción de energía.**



Fuente: (Registro fotográfico propio, Laboratorio de materiales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

En el caso particular del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, se tiene establecido según las especificaciones técnicas una clasificación de tenacidad tipo C (1000 Julios), en el AnexoE se muestra un resumen de los resultados de los ensayos de absorción de energía efectuados al concreto lanzado con fibra utilizado en los distintos frentes de excavaciones subterráneas del proyecto en un período de seis meses. Como se observa en dicho anexo, se obtuvieron resultados satisfactorios alcanzando un valor promedio de absorción de energía de 1169,4 Julios, superando ampliamente lo establecido en las especificaciones técnicas del proyecto.

## 4.2 GRANULOMETRÍA Y CANTIDAD DE FIBRA.

Es necesario conocer la cantidad de fibra metálica del concreto lanzado que se ha puesto en sitio, esto con el fin de comprobar si el contenido de fibra existente en la mezcla es el correspondiente a la cantidad establecida en el diseño final a partir de los ensayos previos de tenacidad.

La prueba consiste en extraer tres muestras del concreto que va ser lanzado, estas deben pesar entre 1-2 kg. La especificación europea para hormigón proyectado de la EFNARC dice que la muestra de concreto se lava en un equipo filtrante donde se eliminan los demás materiales dejando solamente la fibra metálica. Adoptando otra medida, podemos lavar el concreto, eliminando el contenido de cemento y el material restante se seca por medio de un horno o una parrilla. Después de secar completamente la muestra, se utiliza un imán para extraer las fibras metálicas de los agregados. Esto con el fin de aprovechar la muestra de agregados y realizar una prueba de granulometría para garantizar que su gradación este dentro de los límites establecidos (Ver figura 12).

Luego de extraer la fibra metálica, se pesa y se procede a obtener el contenido de fibra de la siguiente manera:

Tomando el peso inicial de la muestra de concreto, de la fibra y la densidad máxima teórica del concreto lanzado calculamos el contenido de fibra metálica, utilizando la siguiente formula:

$$\text{Cantidad de fibra} = [\text{DMT} \times \text{Pf}] / \text{PoC}$$

Donde DMT= Densidad Máxima Teórica del concreto lanzado [kg/m<sup>3</sup>].

Pf= Peso de la fibra [kg].

PoC= Peso inicial de la muestra de concreto [kg].

El promedio de la cantidad de fibra de las tres muestras debe ser igual o superior al valor correspondiente del diseño de la mezcla. La cantidad fibra de cada muestra nunca debe ser menor al 75% del valor establecido en el diseño.

**Figura 22. Muestra de concreto antes y después de ser lavada.**



Fuente: (Registro fotográfico propio, Laboratorio de materiales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

**Figura 23. Extracción de fibra metálica.**



Fuente: (Registro fotográfico propio, Laboratorio de materiales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

### 4.3 DENSIDAD Y ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Los paneles para este ensayo se obtienen de la misma forma como en el ensayo de absorción de energía, implementando el mismo molde y los mismos controles. De cada panel se extraen 10 cubos de dimensiones 6x6x6 cm, realizando el ensayo de resistencia sobre cada uno. El valor de la resistencia será el promedio de las resistencias de cada cubo, este resultado deber ser como mínimo el valor de la resistencia nominal para la cual fue diseñado. Esta prueba se realiza para las edades de 3, 7 y 28 días. Ningún valor de resistencia de cada muestra debe ser menor al 75% de la resistencia requerida.

Para la densidad del concreto (Peso Específico Bulk), se pesa la muestra en agua (cubo) y se determina utilizando la siguiente formula:

$$D= P/V$$

Donde D = Densidad del concreto [kg/m<sup>3</sup>].

P = Peso seco del cubo [kg].

V = Volumen desalojado por el cubo [kg].

El valor del peso específico debe cumplir como mínimo con el 95 % del DMT (Densidad Máxima Teórica). Este parámetro indica si hubo una buena aplicación del concreto lanzado.

**Figura 24. Cubos para el ensayo de resistencia.**



Fuente: (Registro fotográfico propio, Laboratorio de materiales Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

## **5. APLICACIÓN DEL CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRA METÁLICA.**

El concreto lanzado es un método de construcción rápido, flexible y económico, pero la calidad de este material como soporte de excavación en obras subterráneas también depende de su buena aplicación. El lanzado para concreto reforzado con fibra debe realizarse de manera mecánica por el método de vía húmeda.

### **5.1 SUPERFICIE DE CONTACTO.**

El sustrato es un factor clave en la aplicación del concreto. La superficie de contacto debe estar en perfectas condiciones para realizar el lanzado y así lograr una buena compactación y adherencia del concreto a la superficie.

Cuando el concreto va a ser lanzado sobre superficies recién excavadas (roca descubierta) o previamente revestidas en concreto lanzado, deberá eliminarse de esta superficie el material suelto o polvo que impidan la adherencia del concreto. La limpieza se deberá hacer con chorros de aire y agua evitando aflojar, agrietar o fragmentar la superficie, el agua también se utiliza para humedecer la superficie de contacto, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del sustrato. También, para evitar las acumulaciones de agua en el terreno provenientes del mismo se instalan drenajes para su evacuación.

### **5.2 PROCEDIMIENTO DE LANZADO.**

Los concretos lanzados deben ser aplicados por capas, operando repetitivamente sobre un área o en una operación posterior. Existe una orientación para obtener varias direcciones de lanzado. Direccionando el lanzado de forma horizontal, podemos obtener lentamente el espesor en capas delgadas o aplicando de abajo

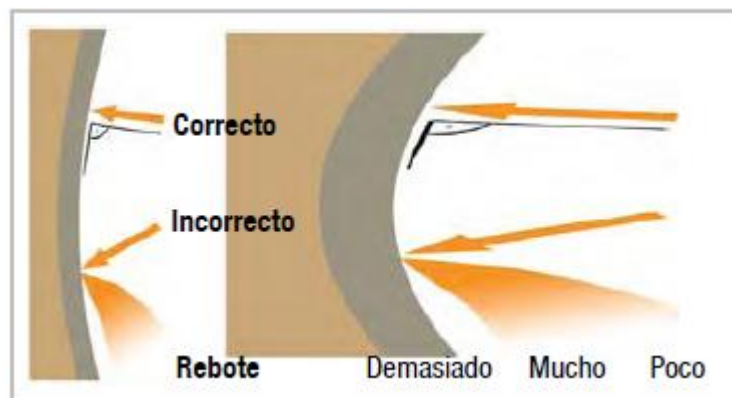
hacia arriba en dirección inclinada para un espesor completo de capa. Se recomienda este último dado a que disminuye el material de rebote. Material que debe ser retirado antes de aplicar la siguiente capa.

La aplicación por ejemplo, en la bóveda de un túnel debe realizarse por capas delgadas para lograr que el peso del material y la fuerza de adherencia del concreto se anulen y de esta manera también se garantiza menor cantidad de rebote.

Para garantizar la máxima adherencia, compactación y disminución de la cantidad de material de rebote, el lanzado se debe realizar de manera que la boquilla forme un ángulo recto con respecto a la superficie de contacto.

La distancia y velocidad de aplicación debe ser óptima para alcanzar adherencia y compactación del concreto. Se recomienda una distancia entre 1.2 y 1.5 m entre la boquilla de lanzado y la superficie de contacto, fuera de este rango podemos aumentar la cantidad de material de rebote y generación de polvo causando una deficiencia en la aplicación del concreto lanzado.

**Figura 25. Angulo de aplicación del concreto lanzado.**



Fuente: (HOFLER, J., &SCHLUMPF, J., 2004)

La boquilla hace parte del equipo de lanzado y es por donde finalmente pasa el concreto. Esta, de acuerdo al proceso de aplicación vía húmeda o seca debe configurarse de tal manera que se puedan mezclar e introducir dentro de la manguera principal en el caso de la vía húmeda el acelerante y aire, y en el caso de vía seca el agua y el acelerante. Es un elemento que sufre un gran deterioro, por ejemplo en la construcción de túneles, el manejo de grandes volúmenes hace que ella boquilla sufra un mayor desgaste.

La boquilla normalmente de un equipo de lanzado es de metal. Teniendo en cuenta el desgaste que sufre, el cambio de boquilla constante generaría un alto costo dentro del proceso de aplicación, por eso en el mercado también encontramos boquillas plásticas reflejando un menor costo y buen manejo a la hora de hacer la aplicación.

**Figura 26. Modelo de boquilla y su distribución de agujeros.**



Fuente: (HOFLEER, J., &SCHLUMPF, J., 2004)

De la anterior configuración también depende la distribución homogénea de la mezcla sobre el sustrato.

### **5.3 MATERIAL DE REBOTE.**

En la aplicación de concreto lanzado, el control para disminuir la cantidad de material de rebote o desperdicio es un tema de gran importancia a la hora de efectuar su instalación. Uno de los aspectos más importantes e influyentes en la cantidad de material de rebote es la habilidad y experiencia que tiene el operador para realizar esta operación de lanzado. Igualmente se debe tener en cuenta otros aspectos como son el método de aplicación, si es por vía seca o húmeda, la condición de adherencia entre el sustrato y la mezcla, la orientación del lanzado, distancia de lanzado, la presión de aire en el equipo de lanzado y los espesores de capa. El porcentaje de material de rebote estimado para concreto lanzado se estima más o menos entre el 5 y 15 % del volumen total.

La reutilización de este material es viable y puede ser entre el 10 y 20% de la cantidad total de rebote como máximo, siempre que sea correctamente tratada ya que puede verse afectada por algunos agentes contaminantes presentes en el sitio de trabajo. Generalmente en los túneles excavados en Colombia, este material no es reutilizado.

## 6. APLICACIÓN DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON MALLA ELECTROSOLDADA.

El concreto lanzado es un método de construcción rápido, flexible y económico, pero la calidad de este material como soporte de excavación también depende de su buena aplicación. El lanzado para concreto reforzado con malla electrosoldada debe realizarse de manera manual por el método de vía seco o mecánico por el método de vía húmeda.

El procedimiento para preparar la superficie es igual al proceso que se realiza en la aplicación de concreto lanzado reforzado con fibra. Ver numeral 5.1.

**Figura 27. Aplicación vía húmeda.**



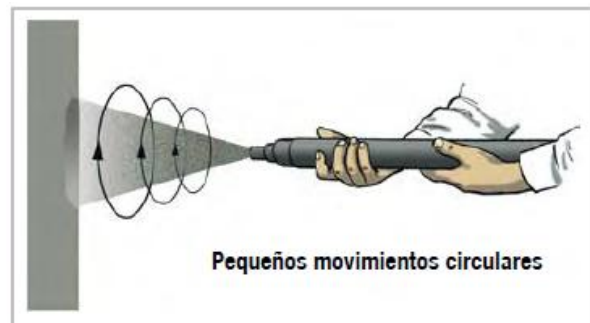
Fuente: (HERMIDA, G., 2010)

## 6.1 PROCEDIMIENTO DE LANZADO.

El concreto lanzado aplicado de manera manual requiere en gran medida de la habilidad y experiencia del operador de la boquilla, de manera que se garanticen los niveles de calidad y productividad del concreto.

El manejo y movimiento de la boquilla debe realizarse con movimientos circulares uniformes sobre la superficie de contacto. Para este procedimiento de aplicación se manejan los mismos aspectos y requerimientos establecidos en la aplicación de concreto lanzado reforzado con fibra. Ver numeral 5.2.

**Figura 28. Manejo de la boquilla.**



Fuente: (HOFLE, J., &SCHLUMPF, J., 2004)

## 6.2 MATERIAL DE REBOTE.

Las condiciones para el control y manejo del material de rebote son iguales a los establecidos en el numeral 5.3. La diferencia radica en el método de aplicación, la vía seca refleja altos porcentajes de material de rebote estimado entre el 20 y 30 % del volumen total.

Los elevados niveles de material de rebote nos pueden indicar dos aspectos:

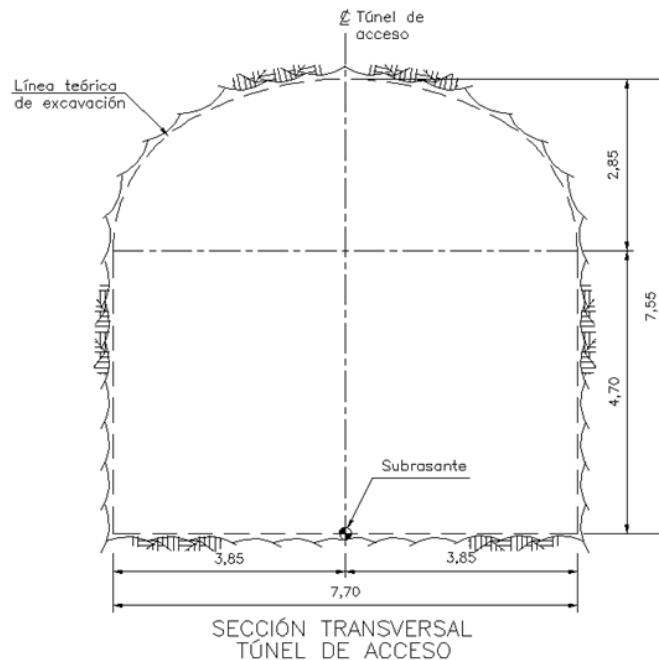
- Aplicación incorrecta de la mezcla sobre la superficie de contacto.
- La presión de aire que manejada durante el lanzamiento no fue la indicada.

## 7. ANALISIS DE RENDIMIENTOS Y CICLOS DE EXCAVACIÓN

Debido al alto costo relacionado con la construcción de túneles, es necesario evaluar los tiempos de ejecución y avance en los ciclos de excavación, lo cual tiene la finalidad de optimizar los recursos, aumentar el rendimiento y obtener la mejor relación costo/beneficio.

Como ejemplo académico, se analizó la excavación del túnel de acceso a la caverna de máquinas de la central subterránea del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso de propiedad de ISAGEN, ubicado en el Municipio de Betulia en el Departamento de Santander sobre el Río Sogamoso. El túnel tiene una longitud de 340 m con unas dimensiones de 7,7 m de ancho, 7,55 m de alto y un área de  $53,64 \text{ m}^2$ , la sección es tipo baúl con paredes rectas. En este túnel, como diseño de soporte para la excavación se utilizó malla electrosoldada tipo Q-2 y fibra metálica como refuerzo del concreto lanzado.

**Figura 29. Sección túnel de acceso**

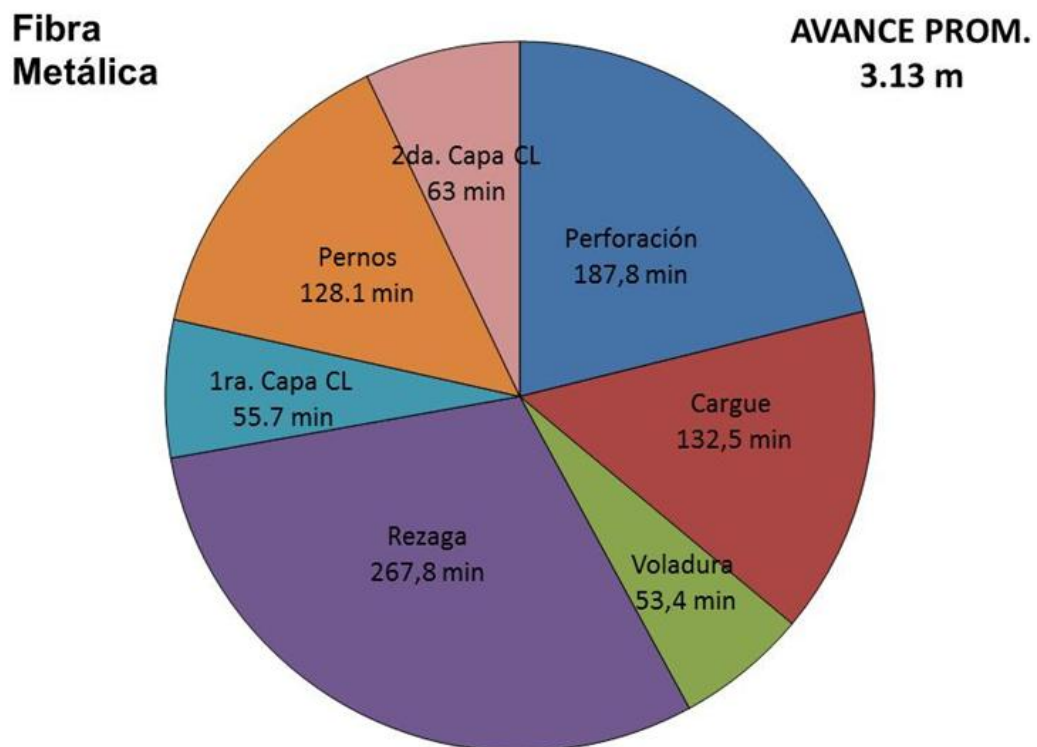


Fuente:(Información ISAGEN S.A, Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

Para realizar la excavación del túnel se utilizó el método de perforación y voladura, como se indicó en el Capítulo 2 las actividades que componen un ciclo de excavación son: replanteo y perforación, cargue de barrenos con explosivos, voladura y ventilación, rezaga, desabombe e instalación del soporte.

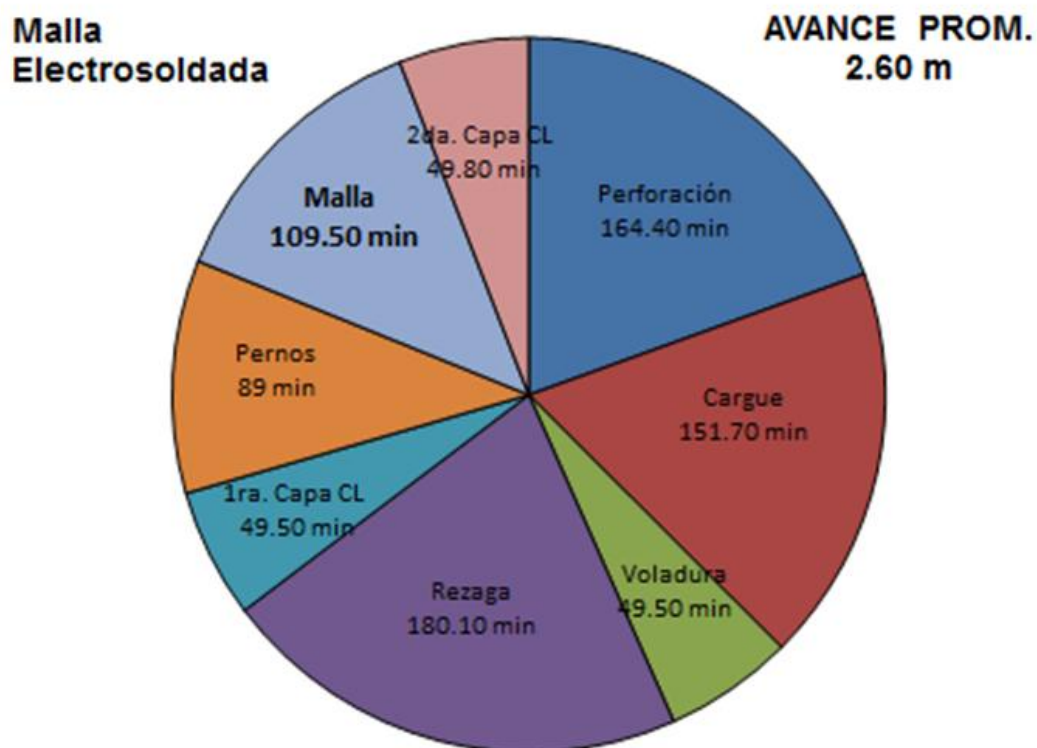
Para el análisis de los ciclos de excavación se consideró la duración de cada una de las actividades que componen cada ciclo de excavación efectuado en el túnel de acceso, diferenciando los ciclos en los que se empleó malla electrosoldada como refuerzo del concreto lanzado y los ciclos en los que se utilizó fibras metálicas (Ver anexo F y G). A continuación en las Figuras 30 y 31, se muestra la duración promedio de cada actividad del ciclo de excavación:

**Figura 30. Duración de actividades ciclo de excavación**



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Duración de actividades ciclo de excavación



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las Figuras 30 y 31, se puede observar que en los ciclos de excavación donde se utilizó concreto lanzado con fibra, se obtuvo un ahorro en tiempo de 109,5 minutos con respecto al concreto reforzado con malla electrosoldada. Sin embargo, como se muestra en la Tabla 5, este ahorro de tiempo no se ve reflejado en la duración total del ciclo promedio siendo similar en los ciclos donde se empleó concreto reforzado con fibra metálica como en los ciclos donde se utilizó malla metálica, debido a la diferencia en el avance promedio.

En los ciclos donde se empleó malla electrosoldada como refuerzo del concreto, se obtuvo un avance promedio de 2,6 m y un rendimiento de 2,98 m/día, frente a los 3,13 m de avance y 4,12 m/día obtenidos en los ciclos que se utilizó concreto

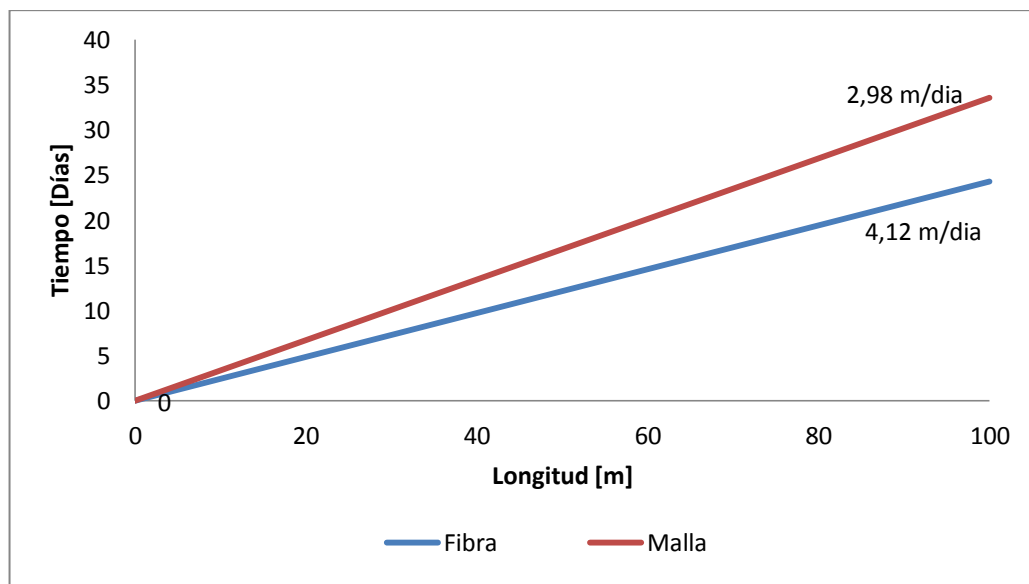
lanzado con adición de fibras metálicas. El menor avance obtenido en los ciclos donde se empleó concreto reforzado con malla electrosoldada, obedece a las características geotécnicas y al tipo de roca encontradas en el sector del túnel de acceso comprendido entre las abscisas K0+046,30 a K0+103,00, el cual presentó una menor calidad.

**Tabla 5. Resultados ciclos de excavación**

Refuerzo	Tiempo total [Días]	Avance total [m]	Rendimiento [m/día]	Duración ciclo Promedio [hr]
Malla	19	56,70	2,98	14,35
Fibra	38	156,50	4,12	14,81

Fuente: Elaboración propia

**Figura 31. Representación gráfica de rendimientos**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31 se muestra una representación gráfica de los rendimientos obtenidos en el túnel de acceso a la central subterránea del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso en un tramo de túnel de 100 metros de longitud. En la Figura, se puede concluir que utilizando concreto lanzado reforzado con fibras

metálicas se obtiene un ahorro en tiempo de aproximadamente un 27,6% con respecto a la excavación donde se utilizó concreto reforzado con malla electrosoldada, lo cual se traduce en una importante disminución de costos de operación en procesos de excavación de obras subterráneas.

Para el análisis de los ciclos de excavación no se tuvieron en cuenta las inactividades que se presentaron en el túnel, ocasionadas principalmente por daños en la maquinaria para el avance de excavación, la falta de material explosivo, cortes de energía, tiempo de llegada del concreto, concentración de gases tóxicos, inundaciones y demás inconvenientes propios del proceso de excavación.

## 8. CONCLUSIONES

- El concreto lanzado con adición de fibras metálicas es uno de los elementos de soporte fundamentales en los procesos constructivos de excavaciones subterráneas tanto en Colombia como en el mundo. Como soporte en un túnel permite controlar de manera efectiva los esfuerzos a tensión que se generan durante el proceso de excavación, incluso en terrenos de baja calidad donde se presentan grandes deformaciones y elevadas presiones de agua. Es un método flexible y económico, su proyección a altas velocidades hace que el material se compacte y se adhiera muy bien a la superficie de contacto sosteniendo su propio peso.
- El concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada presenta una capacidad de absorción de energía inferior al concreto lanzado con fibra metálica. La adición de fibra metálica al concreto lanzado mejoranotablemente las propiedades mecánicas, proporcionando al material un comportamiento más dúctil, tenaz, y de mejor calidad, dando como resultado una estructura más resistente, durable y garantizando una estabilidad y funcionalidad adecuada durante la vida útil de la estructura.
- Utilizar concreto lanzado reforzado con fibra metálica como soporte representa ventajas en el tiempo de duración del ciclo, igualmente permite alcanzar un mayor rendimiento y por lo tanto un mayor avance de excavación frente a la utilización de malla como refuerzo del concreto lanzado. Esto se debe a que se requiere de un tiempo adicional, así como recursos de maquinaria y personal adicionales para llevar a cabo la instalación de la malla electrosoldada, mientras que las fibras metálicas se adicionan al concreto durante su preparación en la planta de mezclas.

- El concreto lanzado reforzado con fibra metálica permite seguir estrictamente el perfil de la excavación disminuyendo el consumo de concreto. Si se tiene malla electrosoldada como refuerzo, se pueden presentar sobre espesores en sitios donde la sección del túnel se encuentre sobre excavada, aumentando de manera importante el consumo de concreto lanzado.
  
- El tiempo de proyección del concreto es el mismo si se utiliza fibra metálica o malla electrosoldada como refuerzo del concreto. De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de rendimientos y duración en los ciclos de excavación del túnel de acceso a la central subterránea del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, la utilización de concreto lanzado reforzado con fibra metálica como soporte de excavación, permitió aumentar el rendimiento de la excavación y por lo tanto lograr un mayor avance y disminución de tiempo de construcción. Finalmente, estos resultados se reflejan en los costos de operación para la construcción de un túnel y en la mejor relación costo/beneficio para el Contratista y el proyecto.

## 9. RECOMENDACIONES

- Para obtener rendimientos óptimos del concreto lanzado reforzado con fibra, se debe encontrar el mejor diseño de mezcla, espesor de capa, tipo y cantidad de acelerante.
- El material de rebote refleja directamente un factor económico muy importante dentro de la ejecución de un proceso de excavación. Para lograr una disminución en la cantidad de este material de rebote, debe realizarse un buen procedimiento de lanzado con todos los controles y aspectos establecidos. Los altos niveles de material rebotado representa un adicional de concreto, tiempo de producción, transporte y aplicación.
- Se recomienda aplicar concreto lanzado por vía húmeda, con el fin de obtener mayores rendimientos durante su aplicación, más control en la calidad del concreto y menor generación de polvo.
- Se recomienda llevar a cabo un seguimiento detallado de la totalidad de la actividad, que permita tener una trazabilidad del material, iniciando con el control de la preparación en la planta de mezclas, verificación en la aplicación en campo y análisis de resultados de ensayos de laboratorio. Esta trazabilidad, permite detectar posibles problemas en la calidad y resistencia del concreto para poder llevar a cabo las respectivas mejoras que sean necesarias a los procedimientos.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

ABDUL, F., & ACOSTA, N. (Diciembre de 2009). Construcción de túneles en roca dura mediante el método de perforación y voladura. Tesis Universidad del Oriente. Barcelona, España.

ACI.(1989). Measurement of properties of fiber reinforced concrete.American Concrete Institute. EEUU.

ACI. (1990). Guide to Shotcrete. American Concrete Institute. EEUU.

ACI. (1998). Committee Report on Fiber Reinforced Shotcrete. American ConcreteInstitute. EEUU.

ASTM. 1997). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete. American Society for Testing and Materials.EE.UU.

ASTM. (1999). Standard Specification for Portland cement. American Society for Testing and Materials.EE.UU.

ASTM. (1999). Standard Specification for concrete aggregates. American Society for Testing and Materials.EE.UU.

ASTM. (2002). Standard test method for flexural strength of concrete. American Society for Testing and Materials.EE.UU.

ASTM. (2004). Standard Specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete. American Society for Testing and Materials.EE.UU.

BEKAERT. Ficha técnica del producto. Recuperado en Enero de 2013 de <http://pdfdownload.com/pdf/ficha-tnica-del-producto-7963322.html>

CORNEJO, L. (Diciembre de 2005). Nuevas tendencias en los revestimientos de túneles (Primera Edición). Madrid, España.

EFNARC.(1993). Especificación europea para hormigón proyectado.European Federation of National Associations Representing prodecers and applicators of specialist building products for Concrete.EuropeanUnion.

FLORES, E. (Noviembre de 2009). Concreto lanzado shotcrete. Tesis Universidad Alas Peruanas. Barranco, Perú. Recuperado en Octubre de 2012 de <http://es.scribd.com/doc/33679933/SHOTCRETE>

HERMIDA, G. (Septiembre de 2010). Revestimiento de túneles en concreto lanzado con fibras. Reunión del concreto, Asocreto. Cartagena, Colombia.

HOFER, J., &SCHLUMPF, J. (Septiembre de 2004). Concreto Proyectado en Construcción de Túneles (Segunda Edición).

I.C.P.C. Manual de dosificación de mezclas de concreto. Instituto Colombiano de Productores de Concreto. Colombia.

INDUMIL. (2009). Catálogo de productos. Colombia

INTERVENTORIA, Consorcio Integral VQ. Información de Reportes Diarios del proceso de Excavación del túnel de acceso a la casa de máquinas de la Central Subterránea del Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso.

ISAGEN S.A. E.S.P. Energía productiva. Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso, autorizó el uso de la información para llevar acabo el desarrollo de algunos temas plasmados en este documento.

LLOYD INTERNATIONAL. Fibra de acero para reforzar concreto especificaciones. Recuperado en Septiembre de 2012, de <http://lloyd-international.com/Fibras+Acero+para+Reforzar+Concreto.pdf>

LOPEZ, C., (1998). Ingeo túneles. *Ingeniería de túneles* (Libro I). Madrid, España.

LOPEZ, C., (2011). Manual de túneles y obras subterráneas (Tomo I). Madrid, España.

NTC. (1997). Ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. Norma Técnica Colombiana. Colombia.

NTC. (2004). Ensayo para determinar la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado. Norma Técnica Colombiana. Colombia.

NTC. (2004). Ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de vicat. Norma Técnica Colombiana. Colombia.

NTC. (2005). Ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico utilizando el tamiz de 45 $\mu$ m (No325). Norma Técnica Colombiana. Colombia.

NTC. (2009). Método de ensayo para la determinación de la capacidad de absorción de energía (tenacidad) de concreto reforzado con fibra. Norma Técnica Colombiana. Colombia.

Proceso y técnicas para la construcción de túneles. 31 de octubre de 2011 en <http://alex-lobos.blogspot.com/2011/10/metodo-tradicional-de-excavacion-de.html>

SIKA. (2012). Manual de productos. Colombia

SIKA. Concreto reforzado con fibra. Recuperado en Octubre de 2012 de [http://col.sika.com/es/system/search.html?\\_charset\\_=UTF8&q=concreto+reforzado+con+fibras&btn\\_Search.x=0&btn\\_Search.y=0](http://col.sika.com/es/system/search.html?_charset_=UTF8&q=concreto+reforzado+con+fibras&btn_Search.x=0&btn_Search.y=0)

SUBCOMITÉ DE FIBRAS DEL COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE CONCRETOS, MORTEROS, AGREGADOS Y GROUTS DEL INCONTEC. (Enero/Febrero de 2010). Evaluación de la absorción de energía (Tenacidad) de concreto reforzado con fibra.

TOXEMENT. (2010). Manual de productos. Colombia.

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA. Procedimientos de construcción. Recuperado en Septiembre de 2012, de <http://egonza.webs.ull.es/profesor/itop/tunelsuelo.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO A – FICHA TECNICA DELADITIVO PLASTIMENT AD 30

HOJA TECNICA  
Versión: 01/2012  
Plastiment AD 30

**Plastiment® AD 30**  
Retardador plastificante - Reductor de agua

**DESCRIPCION** Plastiment AD 30 es un aditivo líquido, color café oscuro, de gran poder retardante sobre el tiempo de fraguado del concreto y reductor de agua.

**USOS**

- Plastiment AD 30 extiende el tiempo de trabajabilidad y retarda el tiempo de fraguado de la mezcla de una forma considerable, facilitando el transporte, colocación, vibrado y acabado del concreto.
- Permite reducir hasta un 15% el agua de amasado, sin variar el asentamiento normal, obteniéndose un incremento considerable de las resistencias mecánicas a todas las edades.
- Se puede aprovechar el incremento de resistencias logrado con la reducción de agua, para disminuir el contenido de cemento y así optimizar y hacer más económico el diseño de la mezcla.
- Plastiment AD 30 se recomienda especialmente para la elaboración, transporte y bombeo de concreto en climas muy cálidos y uso de cemento Tipo III con muy cortos tiempos de fraguado. Es indicado cuando se requiera largo tiempo de transporte y evitar la formación de juntas frías, cuando se colocan grandes volúmenes de concreto.

**VENTAJAS**

Por sus características Plastiment AD 30 permite:


**En el concreto fresco:**

- Extender el tiempo de manejabilidad de la mezcla permitiendo su transporte a grandes distancias en climas severos.
- Disminuir los riesgos de formación de juntas frías o de construcción.
- Prolongar controladamente el tiempo de fraguado del concreto de acuerdo a la dosis empleada, tipo de cemento y clima.
- Incrementar la manejabilidad de la mezcla a bajas relaciones A/C facilitando su colocación y bombeabilidad.
- Reducir el agua de amasado de la mezcla.
- Dispersar el cemento uniformemente en toda la masa con lo cual se obtiene mayores resistencias.
- Reducir la segregación y aumentar la cohesividad de la mezcla.
- Elaborar mezclas para concreto tremie y concretos bombeados en climas cálidos.
- Para la producción de concreto que va a ser colocado con formaleta deslizable en climas cálidos.

**En el concreto endurecido:**

- Incrementar considerablemente las resistencias mecánicas principalmente a edades finales
- Aumentar la compactación y disminuir la permeabilidad.
- Mejorar el acabado del concreto a la vista
- Disminuir la contracción y la fluencia

**Construcción**



51

Fuente: Manual de productos (Sika, 2012)

## ANEXO B – FICHA TECNICA DELADITIVO VISCOCRETE 2100

<b>Construcción</b>	HOJA TECNICA Versión: 01/2012 Sika ViscoCrete 2100	
	<b>Sika®ViscoCrete®2100</b> Aditivo reductor de agua de ultra alto poder	
	<b>DESCRIPCION</b>	Sika ViscoCrete 2100 es un aditivo líquido, reductor de agua de ultra alto rango y súper plastificante basado en polycarboxilatos.
	<b>USOS</b>	Sika ViscoCrete 2100 puede ser usado tanto para concretos premezclados como prefabricación, al agregar el aditivo en las plantas brinda una excelente plasticidad y mantiene la manejabilidad por periodos hasta de 90 minutos. Los tiempos de fraguado controlados hacen del Sika ViscoCrete 2100 ideal para aplicaciones horizontales y verticales.
<b>VENTAJAS</b>	<p><b>Reducción de agua:</b> Sika ViscoCrete 2100 puede ser dosificado en pequeñas cantidades para obtener una reducción de agua de 10% al 15% y se logran reducciones de agua por encima del 45% para dosis altas.</p> <p>Sika ViscoCrete 2100 es adecuado para todos los niveles de reducción de agua.</p> <p><b>Alta Plasticidad:</b> La acción súper plastificante del Sika ViscoCrete 2100 brinda un alto asentamiento, se obtienen concretos fluidos que mantienen una excelente manejabilidad y pueden ser colocado con un mínimo de vibración incluso con una relaciones a/c de hasta 0.25.</p> <p>El concreto plastificado con Sika ViscoCrete 2100 es altamente fluido y mantiene completamente la cohesión de la matriz de cemento eliminando la excesiva exudación y segregación.</p> <p><b>Manejabilidad con fraguados controlados:</b> Sika ViscoCrete 2100 ha sido formulado para proveer tiempos de manejabilidad extendidos de una forma controlada y predecible sin afectar los tiempos de fraguados.</p> <p>La combinación de la reducción de agua y la acción plastificante del Sika ViscoCrete 2100 brinda los siguientes beneficios al concreto endurecido.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Altas resistencias finales, permitiendo diseños estructurales flexibles y económicos.</li><li>- Reducción de la relación a/c, produciendo concretos más densos y durables al reducir la permeabilidad.</li><li>- El alto efecto plastificante reduce los defectos en la superficie en los elementos de concreto y mejora la apariencia estética.</li></ul> <p>Sika ViscoCrete 2100 ha sido formulado para brindar buenos tiempos de manejabilidad y máxima reducción de agua a bajas dosis.</p>	
<b>MODO DE EMPLEO</b>	<p><b>Dosis:</b> las dosis pueden variar dependiendo de los materiales usados, las condiciones ambientales y los requerimientos específicos del proyecto. Sika recomienda dosis de 0.15 % a 0.40 % del material cementante para aplicaciones de concreto convencional. Cuando se requieran altos asentamientos o concretos auto compactantes (CAC) se pueden usar dosis de 0.40% a 0.80% del material cementante.</p> <p>Dosis por fuera del rango recomendado pueden ser usadas donde materiales especiales como la microsilica sean especificados. Condiciones ambientales</p>	

Fuente: Manual de productos (Sika, 2012)

## ANEXO C – FICHA TECNICA DELADITIVO EUCOSHOT 962



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co  
www.toxement.com.co

### EUCOSHOT 962

Acelerante líquido para concretos y morteros proyectados

TX40T293

#### DESCRIPCION

EUCOSHOT 962 es un aditivo líquido, de baja viscosidad, de naturaleza alcalina que acelera el proceso de fraguado y las resistencias de concretos o morteros proyectados por vía húmeda o seca.

EUCOSHOT 962 no contiene cloruros.

#### INFORMACION TECNICA

Apariencia : Líquido  
Color : Amarillento  
Densidad : 1.5 kg/l +/- 0.05 kg/l  
Solubilidad : 100%

#### USOS

EUCOSHOT 962 se usa como acelerante para concreto lanzado en:

- Soporte de roca en proyectos de minería.
- Sostenibilidad y protección de túneles.
- Estabilización de taludes.
- Construcción de canales.
- Elaboración de recubrimientos definitivos de concreto lanzado a diferentes espesores.
- Reparación de concreto deteriorado.
- Sellado de filtraciones.

#### VENTAJAS

- Avance rápido de obra.
- Permite formación de revestimientos gruesos de concreto lanzado aplicado en capas sucesivas.
- Mejora adherencia del concreto a la roca, permitiendo aplicaciones sobrecabeza.
- Menor reducción de resistencias cuando se compara con otros acelerantes de fraguado.

#### DOSIFICACION

EUCOSHOT 962 se dosifica del 2% al 4% del peso del cemento, haciendo pruebas para encontrar la dosis ideal del aditivo.

EUCOSHOT 962 (%)	FRAGUADO INICIAL (minutos)	FRAGUADO FINAL (minutos)
2%	10	15
3%	5	10
4%	3	7

Pruebas hechas en laboratorio con un cemento específico y en condiciones controladas de laboratorio según norma ASTM C-191-01.

#### MODO DE EMPLEO

EUCOSHOT 962 se dosifica empleando un sistema neumático o mecánico en la boquilla del equipo lanzador de concreto. Cuando se requiera concreto lanzado vía seca, se emplea en dilución con el agua de la mezcla.

En los dos casos se recomienda hacer pruebas con los agregados y cemento de la obra para establecer la dosis adecuada para los requerimientos técnicos específicos.

#### APLICACION

La superficie sobre la que se va a aplicar el concreto debe estar libre de material suelto y preferiblemente húmeda. Se debe utilizar cemento fresco para mejores características de fraguado de la mezcla.

Cuando se requieren resistencias altas se debe utilizar una menor relación agua : cemento, así obtendrá fraguado más rápido, resistencias iniciales altas, mayor durabilidad, menor consumo de acelerante y capas más gruesas en la aplicación.

#### Limpieza

La limpieza del equipo y la herramienta se debe hacer con abundante agua e inmediatamente después del uso para evitar así taponamientos en el sistema.

#### PRECAUCIONES

- El efecto acelerante del aditivo depende del tipo y frescura del cemento, la cuantía, los materiales, la temperatura del sustrato y del concreto.
- La colocación adecuada del concreto depende del espesor de las capas, el método de proyección y la cantidad de agua.



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: [atencioncliente@toxement.com.co](mailto:atencioncliente@toxement.com.co)  
[www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)

- El EUCOSHOT 962 es un producto alcalino, evite el contacto directo con la piel y los ojos, usando elementos de seguridad adecuados como gafas, botas, guantes, overol. Consulte la Hoja de Seguridad del producto.

#### ALMACENAMIENTO

EUCOSHOT 962 debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado, bajo techo, en lugar fresco y seco.

Vida útil de almacenamiento: 6 meses a granel y 1 año en tambor.

#### PRESENTACION

Tambor x 250 kg  
Granel

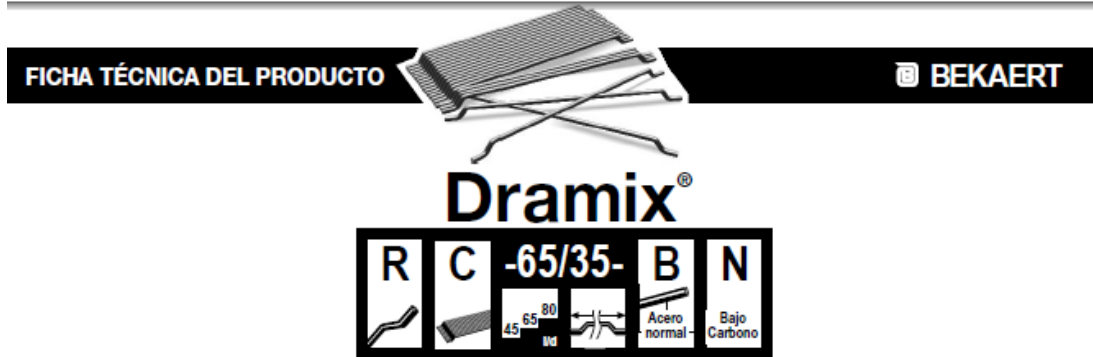
Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co) para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Junio 22 de 2010

# ANEXO D – FICHA TÉCNICA DRAMIX 65/35



**Descripción:** Las fibras Dramix® son filamentos de acero, deformados y cortados en determinadas longitudes, para el refuerzo del hormigón, mortero u otros materiales compuestos. El Dramix® RC-65/35-BN es una fibra de alambre estirado en frío, con extremos conformados y encolado en peines.

**Aplicaciones:**  
- gunitado u hormigón proyectado  
- recrecidos

**Geometría:**  
Longitud (l) 35 mm  
Diámetro (d) 0,55 mm  
Comportamiento Clase: 65  
Aspecto o esbeltez (= l/d): 64  
14 500 fibras/kg

**Certificados de aprobación:**

Conforme a **ASTM A820**

Sistema de calidad en fabricas belgas y americanas (ISO 9001) y fabricas brasilenas y americanas (ISO 9002)

Producto	Producto
Bélgica	Rusia
<b>ATG 1857</b>	<b>TC-07-0116-98</b>
Turquia	Polonia
<b>TS 10513</b>	<b>Z-2117/95</b>
Alemania	Rumania
<b>Z-71.4-3</b>	<b>015-07/012-1997</b>

**Resistencia a tracción:**  
- del alambre: mínimo 1100 N/mm<sup>2</sup>  
- bajo carbono conforme a: - DIN 17 140-D9  
- EN 10016-2 - C9D

**Galvanizado:** Ninguno

**Datos técnicos:**  
Para gunitado, ... solicitar documentación específica.

**1 Resistencia equivalente a flexión**

-  $f_{fctm,eq,300} \cdot f_{fctk,eq,300}$  = resistencia equivalente a flexión, promedio y característica, a una deformación de 1,5 mm, de acuerdo con la NBN B 15-238, 239, JSCE-SF4 y CUR35.  
-  $f_{fctm,eq,150} \cdot f_{fctk,eq,150}$  = resistencia equivalente a flexión, promedio y característica, a una deformación de 3 mm, de acuerdo con la NBN 15-238, 239, JSCE-SF4 y CUR35.

**Dramix® RC-65/35-BN**

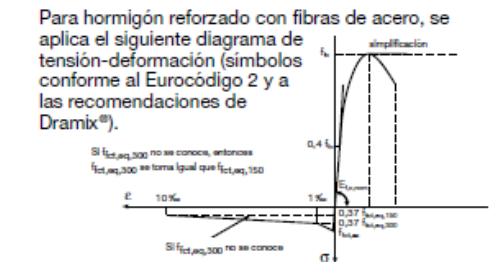
$f_{ctm,II}$ (1)	3,7 (C20/25) (2)	4,3 (C25/30)	4,8 (C30/37)	5,3 (C35/45)	5,8 (C40/50)					
Distribución	$f_{ctm,eq,300}$	$f_{ctm,eq,150}$	$f_{ctm,eq,300}$	$f_{ctm,eq,150}$	$f_{ctm,eq,300}$	$f_{ctm,eq,150}$	$f_{ctm,eq,300}$	$f_{ctm,eq,150}$	$f_{ctm,eq,300}$	$f_{ctm,eq,150}$
20	2,3	1,9	2,6	2,2	2,8	2,4	2,9	2,6	3,1	2,7
25	2,6	2,2	2,9	2,5	3,0	2,7	3,2	2,9	3,4	3,0
30	2,8	2,5	3,1	2,7	3,2	3,0	3,5	3,2	3,6	3,3
35	3,1	2,8	3,4	3,0	3,5	3,2	3,8	3,4	3,9	3,5
40	3,3	3,1	3,6	3,3	3,8	3,4	4,0	3,6	4,2	3,7
45	3,5	3,2	3,8	3,4	4,0	3,5	4,2	3,7	4,4	3,8
50	3,7	3,3	4,0	3,5	4,2	3,6	4,4	3,8	4,6	3,9

(1)  $f_{ctm,II}$  = Resistencia promedio a flexotracción del hormigón en masa (N/mm<sup>2</sup>).  
(2) Clase de hormigón correspondiente a  $f_{ctm,II}$  de acuerdo con la ENV 1992-1-1. El valor entre claves [0,5] se sustituye por el valor 0,6 en la fórmula (3.1).  
 $f_{fctk,eq,300} = 0,7 \times f_{fctm,eq,300}$   
 $f_{fctk,eq,150} = 0,7 \times f_{fctm,eq,150}$  } De acuerdo con las recomendaciones Dramix®, salvo que hubiera más datos específicos disponibles.

**2 Resistencia equivalente a tracción axial**

- Resistencia equivalente a tracción axial = 0,37 x resistencia equivalente a flexión.

**3 Diagrama de tensión-deformación**



Fuente:Ficha técnica del producto. BEKAERT

# Dramix®



## 4 Resistencia equivalente al cortante

El valor de cálculo del incremento de la resistencia al cortante debido a las fibras de acero es:  $\tau_{fd}$  (N/mm<sup>2</sup>) - (el coeficiente de seguridad del material está incluido). La contribución del hormigón y estribos debe añadirse a la de las fibras de acero.

### Dramix® RC-65/35-BN

$f_{ctm,t}$ (1)	3,7 (C20/25) (2)	4,3 (C25/30)	4,8 (C30/37)	5,3 (C35/45)	5,8 (C40/50)
Dosificación ▼	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$	$\tau_{fd}$
20	0,16	0,19	0,21	0,23	0,26
25	0,18	0,22	0,24	0,27	0,30
30	0,21	0,25	0,27	0,30	0,34
35	0,23	0,27	0,30	0,33	0,38
40	0,25	0,30	0,33	0,36	0,41
45	0,26	0,32	0,35	0,39	0,44
50	0,28	0,33	0,37	0,41	0,46

(1)  $f_{ctm,t}$  = Resistencia promedio a flexotracción del hormigón en masa (N/mm<sup>2</sup>).  
(2) Clase de hormigón correspondiente a  $f_{ctm,t}$  de acuerdo con la ENV 1992-1-1.  
El valor entre claves [0,5] se sustituye por el valor 0,6 en la fórmula (3.1).

Por favor consultar también las recomendaciones de Dramix®.

## 5 Valores de tenacidad

### Dramix® RC-65/35-BN

Dosificación ▼	Re1,5 (%)	Re3 (%)
20	58	50
25	64	56
30	69	62
35	75	67
40	80	72
45	84	75
50	88	77

Valores promedio a flexotracción del hormigón en masa  $f_{ctm,t} = 4,8$  N/mm<sup>2</sup>.  
Para utilizarse hasta C-40/50.

## 6 Absorción de energía - ensayo de placa

La absorción de energía (J) de una placa de gunita de hormigón C30/37, de acuerdo con SNCF:

### Dramix® RC-65/35-BN

Dosificación ▼	S25 (J)	Dosificación ▼	S25 (J)
20	800	35	1130
25	910	40	1245
30	1015		

N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwevegem - Belgium  
Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47  
Internet : <http://www.bekaert.com/building>

Reservado el derecho de modificaciones. Todos los detalles describen nuestros productos solo de forma general. Para pedidos y cálculos se deben usar únicamente las especificaciones y documentos oficiales. © N.V. Bekaert S.A. 2001.

## Recomendaciones - mezclado

### 1. General

- ✓ preferiblemente añadir las fibras en la mezcladora de la planta hormigonera
- ✓ dosificación máxima recomendada:

Tamaño de los áridos (mm)	Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )	
	vertido	bombeado
8	110	80
16	70	55
32	60	45

- ✓ es preferible una graduación continua
- ✓ mezclar hasta que todas las fibras se separen en fibras individuales. Las fibras no aumentan el tiempo de mezclado significativamente si se emplean cementos especiales o aditivos, se recomienda un ensayo preliminar



### 2. Adición de fibras

#### 2.1. En la mezcladora de la planta

- ✓ no añadir nunca las fibras como primer componente en la mezcladora
- ✓ la fibras pueden introducirse junto con la arena y los áridos o pueden añadirse al hormigón mezclado en fresco
- ✓ solo para hormigonera: se pueden echar directamente en la mezcladora sacos cerrados degradables



#### 2.2. Camión hormigonera

- ✓ poner la mezcladora a la máxima velocidad: 12-18 rpm
- ✓ ajustar el cono a un mínimo de 12 cm (preferiblemente con plastificantes o fluidificantes)
- ✓ añadir fibras con una velocidad máxima de 60 kg/min
- ✓ los sacos cerrados degradables pueden añadirse, siempre y cuando la velocidad de la hormigonera sea de min. 12 rpm
- ✓ equipo opcional: elevador montacargas
- ✓ después de añadir las fibras, continuar mezclando a alta velocidad, durante 4-5 minutos (± 70 rotaciones)



#### 2.3. Dosificación automática

- ✓ las fibras a granel pueden dosificarse en proporciones de hasta 3,5 kg/seg. con un equipo dosificador especialmente desarrollado



## Recomendaciones - almacenaje



Proteger los palets contra la lluvia



No apilar los palets uno encima de otro

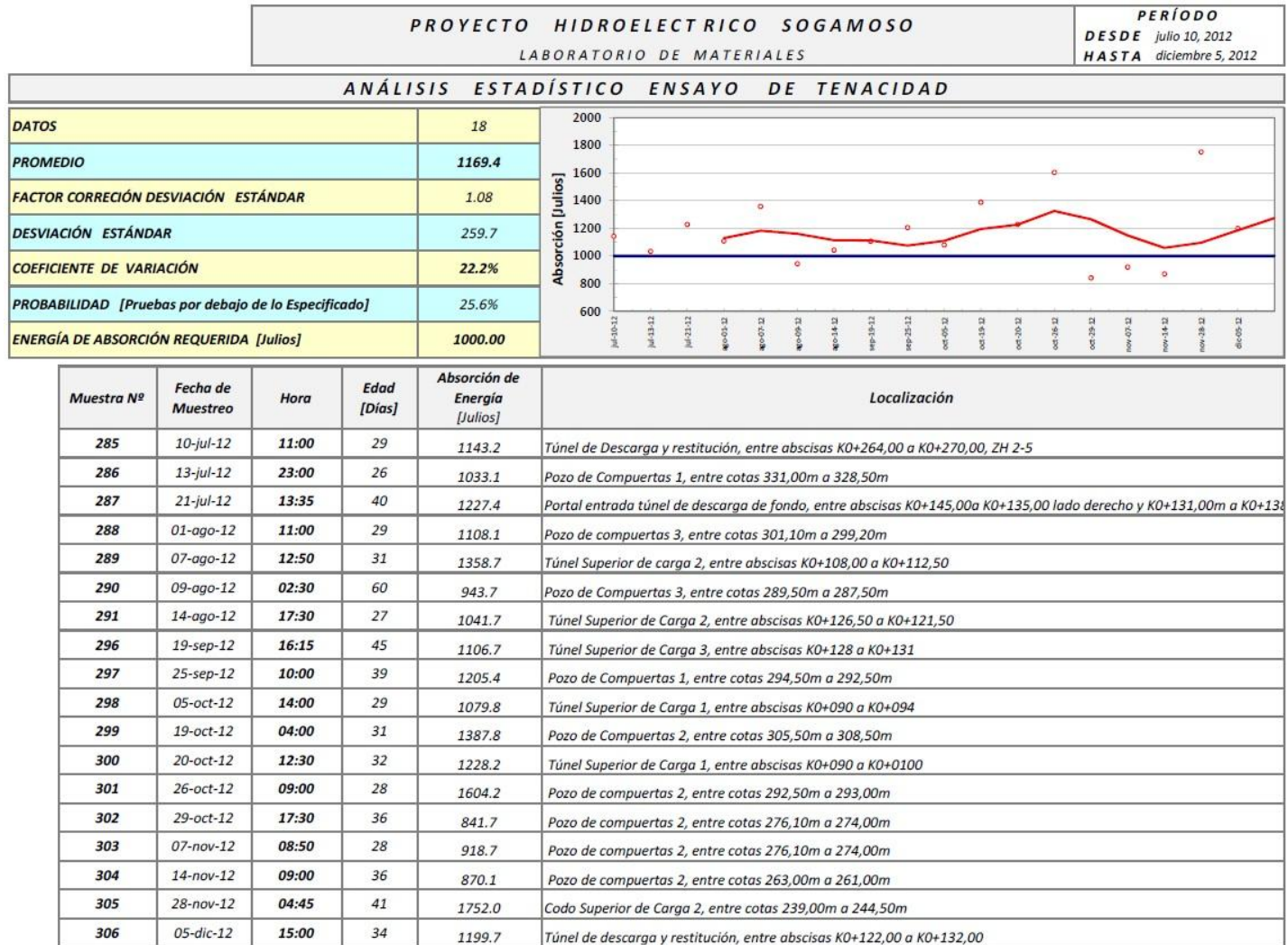


Suministrado en  
sacos degradables de 20 kgs sobre palet de 1200 kgs  
big-bags de 1100 kgs

Graphic Team Doos, KcmfK

Resp. editor: Ann Lumbrecht, Luwe - 11/2001 (e-signatures en 05/2003)

## ANEXO E – ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN Y ENERGÍA



Fuente: (Información ISAGEN, Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso)

## ANEXO F – CICLOS DE EXCAVACIÓN TÚNEL DE ACCESO

Fecha	ACTIVIDADES DE EXCAVACIÓN							SOPORTE			Tiempo Total del ciclo
	Abscisas		Avance	Peforación	Cargue de explosivo	Voladura y deshumo	Rezaga	Primera capa de Concreto Lanzado con fibra	Instalación de pernos	Segunda capa de Concreto Lanzado con fibra	
	Inicial	Final	[m]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	
16/01/10	k0+103,00	k0+106,20	3,20	130	40	70	205	30	450	135	1060
18/01/10	k0+106,20	k0+107,50	1,30	120	105	45	115	75	128	63	651
19/01/10	k0+107,50	k0+109,70	2,20	215	70	50	215	75	180	63	868
	k0+109,70	k0+111,00	1,30	173	100	85	231	55	70	63	777
20/01/10	k0+111,00	k0+113,50	2,50	164	190	65	150	50	75	63	757
21/01/10	k0+113,50	k0+115,90	2,40	120	100	40	308	55	128	25	776
21/01/10	k0+115,90	k0+119,40	3,50	210	155	60	285	55	120	35	920
23/01/10	k0+119,40	k0+122,00	2,60	395	110	60	240	45	60	25	935
	k0+122,00	k0+123,00	1,00	290	105	35	335	40	128	63	996
25/01/10	k0+123,00	k0+127,80	4,80	65	90	70	260	50	128	63	726
27/01/10	k0+127,80	k0+130,50	2,70	187	210	80	143	20	128	63	831
28/01/10	k0+130,50	k0+133,90	3,40	187	255	60	165	40	128	63	898
	k0+133,90	k0+136,80	2,90	273	130	140	158	50	165	63	979
29/01/10	k0+136,80	k0+140,60	3,80	205	120	45	413	50	180	60	1073
30/01/10	k0+140,60	k0+144,00	3,40	163	90	45	315	120	128	63	924
	k0+144,00	k0+146,80	2,80	260	130	40	400	130	128	63	1151
01/02/10	k0+146,80	k0+149,25	2,45	205	170	40	290	120	90	63	978
02/02/10	k0+149,25	k0+152,00	2,75	253	120	35	263	55	128	63	917
	k0+152,00	k0+156,40	4,40	178	130	35	270	45	50	30	738
03/02/10	k0+156,40	k0+160,60	4,20	175	150	60	300	30	128	63	906
	k0+160,60	k0+163,80	3,20	75	185	35	310	45	90	85	825
04/02/10	k0+163,80	k0+167,20	3,40	185	115	35	290	60	90	90	865
05/02/10	k0+167,20	k0+170,10	2,90	235	135	55	280	30	60	65	860
	k0+170,10	k0+173,50	3,40	343	195	35	225	35	180	35	1048
06/02/10	k0+173,50	k0+177,00	3,50	240	150	35	200	40	128	105	898

Fuente: Elaboración propia

ACTIVIDADES DE EXCAVACIÓN								SOPORTE			Tiempo Total del ciclo	
Fecha	Abscisas		Avance [m]	Peforación [min]	Cargue de explosivo [min]	Voladura y deshumo [min]	Rezaga [min]	Primera capa de Concreto Lanzado con fibra	Instalación de pernos	Segunda capa de Concreto Lanzado con fibra		
	Inicial	Final						[min]	[min]	[min]		
07/02/10	k0+177,00	k0+180,50	3,50	180	130	35	358	60	95	63	921	
08/02/10	k0+180,50	k0+183,30	2,80	225	130	30	300	30	128	35	878	
09/02/10	k0+183,30	k0+186,30	3,00	195	125	35	300	45	128	63	891	
10/02/10	k0+186,30	k0+190,10	3,80	225	130	30	283	30	128	30	856	
	k0+190,10	k0+193,00	2,90	245	120	45	280	30	128	45	893	
11/02/10	k0+193,00	k0+196,50	3,50	225	215	40	300	45	128	35	988	
	k0+196,50	k0+199,50	3,00	220	150	60	253	35	115	63	896	
12/02/10	k0+199,50	k0+202,50	3,00	133	85	50	360	60	128	47	863	
13/02/10	k0+202,50	k0+206,00	3,50	180	110	60	470	40	210	50	1120	
14/02/10	k0+206,00	k0+209,00	3,00	160	90	60	210	60	128	30	738	
	k0+209,00	k0+212,80	3,80	140	90	45	275	120	60	50	780	
15/02/10	k0+212,80	k0+216,00	3,20	90	80	70	208	80	128	50	706	
	k0+216,00	k0+218,30	2,30	160	100	45	223	20	128	105	781	
16/02/10	k0+218,30	k0+221,70	3,40	160	105	50	235	35	128	35	748	
17/02/10	k0+221,70	k0+224,70	3,00	180	120	55	250	30	128	60	823	
18/02/10	k0+224,70	k0+228,80	4,10	255	120	75	235	45	128	50	908	
19/02/10	k0+228,80	k0+233,50	4,70	148	170	65	305	30	105	45	868	
20/02/10	k0+233,50	k0+235,80	2,30	110	135	30	285	105	120	50	835	
21/02/10	k0+235,80	k0+239,20	3,40	195	150	30	150	90	128	45	788	
22/02/10	k0+239,20	k0+243,50	4,30	185	105	45	345	45	128	50	903	
23/02/10	k0+243,50	k0+247,00	3,50	170	105	45	390	60	128	215	1113	
24/02/10	k0+247,00	k0+250,00	3,00	215	280	60	183	80	128	135	1081	
26/02/10	k0+250,00	k0+253,00	3,00	125	140	35	255	75	128	75	833	
27/02/10	k0+253,00	k0+256,50	3,50	75	200	50	323	60	128	75	911	
28/02/10	k0+256,50	k0+259,50	3,00	150	90	170	250	75	128	75	938	
										<b>Duración ciclo Promedio Óptimo de Excavació [min]</b>		<b>888,34</b>

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO G – CICLOS DE EXCAVACIÓN TÚNEL DE ACCESO

ACTIVIDADES DE EXCAVACIÓN								SOPORTE				Tiempo Total
Fecha	Abscisas		Avance	Peforación	Cargue de explosivo	Voladura y deshumo	Rezaga	Primera capa de Concreto Lanzado	Instalación de pernos	Instalación de malla	Segunda capa de Concreto Lanzado	
	Inicial	Final	[m]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	
16/12/2009	k0+046,30	k0+048,50	2,20	110	130	33	230	34	180	80	40	837
17/12/2009	k0+048,50	k0+050,40	1,90	172	140	56	155	60	60	80	40	763
17/12/2009	k0+050,40	k0+052,20	1,80	170	150	52	170	60	60	80	30	772
18/12/2009	k0+052,20	k0+054,20	2,00	150	150	65	160	40	95	165	30	855
19/12/2009	k0+054,20	k0+056,60	2,40	225	180	45	105	40	80	90	40	805
20/12/2009	k0+056,60	k0+058,90	2,30	165	160	40	160	45	100	90	40	800
21/12/2009	k0+058,90	k0+060,90	2,00	145	175	25	220	120	75	155	60	975
22/12/2009	k0+060,90	k0+062,60	1,70	165	160	50	110	40	60	160	65	810
04/01/2010	k0+062,60	k0+066,80	4,20	240	210	65	175	30	101	40	40	901
05/01/2010	k0+066,80	k0+069,30	2,50	90	165	40	200	30	80	80	44	729
06/01/2010	k0+069,30	k0+072,10	2,80	240	210	32	190	50	120	70	50	962
07/01/2010	k0+072,10	k0+075,00	2,90	220	120	60	250	45	60	60	40	855
08/01/2010	k0+075,00	k0+078,00	3,00	240	120	70	260	36	140	90	60	1016
09/01/2010	k0+078,00	k0+081,00	3,00	205	140	70	120	50	70	110	60	825
	k0+081,00	k0+084,50	3,50	135	180	54	190	31	60	130	35	815
12/01/2010	k0+087,50	k0+089,60	2,10	175	115	50	135	45	85	130	76	811
	k0+089,60	k0+092,40	2,80	165	135	60	180	40	60	160	85	885
13/01/2010	k0+092,40	k0+096,00	3,60	120	120	42	238	53	50	160	50	833
	k0+096,00	k0+098,80	2,80	135	130	65	250	60	88	120	45	893
14/01/2010	k0+098,80	k0+100,80	2,00	169	130	80	240	75	115	135	58	1002
15/01/2010	k0+100,80	k0+103,00	2,20	180	165	35	225	55	115	110	52	937
<b>Duración ciclo Promedio Óptimo de Excavación [mi]</b>											<b>861</b>	

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO H – CONCRETO LANZADO VÍA HÚMEDA



Fuente: (SIKA. Concreto reforzado con fibra)