

- Remoción de hierro con almidón de maíz.
- Anclaje como sistema de refuerzo o contención para taludes en roca.
- Balance de cuadrillas y flujo de trabajo como herramienta para mejoramiento de procesos constructivos.
- Influencia de la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, al noroccidente de Bogotá.
- Mezclas asfálticas tibias. Énfasis en tecnología de espumado y uso de RAP.
- **ENTREVISTA**  
Los grandes retos de la locomotora del transporte.

## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

**VOCALES** MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ  
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
EDUARDO SILVA SÁNCHEZ  
JAIRO URIBE ESCAMILLA  
OSWALDO CASTILLO NAVETTY  
(representante de los profesores)  
JAVIER FELIPE CANO SUÁREZ  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**COMITÉ EDITORIAL** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
CLAUDIA RÍOS REYES  
PAULA XIMENA RÍOS REYES  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
RICARDO SALAZAR FERRO  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

**EDICIÓN** **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**  
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA  
**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
ELKIN RIVERA GÓMEZ

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 N.º 205-59  
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

# Contenido

## 5 / EDITORIAL

### Una paradoja increíble

*Jairo Alberto Romero Rojas*

## 7-10

### Remoción de hierro con almidón de maíz

*Jairo Alberto Romero Rojas - Ana Milena Gómez Sánchez*

La coagulación química del agua se basa en el empleo de sales de hierro y aluminio, como el cloruro férrico y el alumbre, para proveer la remoción de los contaminantes del agua cruda. El uso de coagulantes naturales ofrece una manera sencilla y probablemente menos costosa de realizar el mismo propósito. En este artículo se describe la aplicación del almidón de maíz para remoción de hierro en el agua. La coagulación con almidón de maíz permitió obtener 99 % de remoción de hierro.

## 11-18

### Anclaje como sistema de refuerzo o contención para taludes en roca

*José Vicente Amórtegui - Jenny Alexandra Tolosa Contreras*

En este artículo se habla del uso de anclajes en roca como un sistema de refuerzo o contención de taludes.

Para el análisis de anclajes activos en roca, los métodos de cálculo son esencialmente formulaciones empíricas basadas en experiencias; también se considera empíricamente un porcentaje de la resistencia a compresión simple de la roca intacta para obtener la capacidad portante última del anclaje activo.

## 19-30

### Balance de cuadrillas y flujo de trabajo como herramienta para mejoramiento de procesos constructivos

*Javier Mauricio Contreras Socarrás - Adriana Gómez Cabrera - Jesús Orlando Castaño*

En este artículo se presenta un estudio del caso de un proyecto de edificación, cuyo sistema constructivo es el tradicional de pórticos en concreto reforzado combinado con muros pantalla, cimentado en pilotes. Los resultados obtenidos fueron una recopilación de seis meses continuos de trabajo, los cuales arrojaron una serie de propuestas y recomendaciones para el mejoramiento de la productividad.

# Contenido

## **31-42**

### **Influencia de la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, al noroccidente de Bogotá**

*Jobana Paola Rozo - José Vicente Amórtegui*

El proceso de meteorización de las rocas genera cambios en sus características y propiedades, representados en una disminución de la resistencia del material. Las rocas de la formación Guaduas se encuentran constituidas por lodolitas de color gris oscuro con algunos mantos de carbón, las cuales toman gradualmente el aspecto de arcillolitas abigarradas con intercalaciones de arenisca de espesor muy variable. Estos materiales son por naturaleza propensos a degradarse o deteriorarse en cuanto a su estructura, por procesos de meteorización física o química, presentando un comportamiento inestable que puede ocasionar suficiente pérdida de resistencia y conducir a su posterior falla.

## **43-55**

### **Mezclas asfálticas tibias. Énfasis en tecnologías de espumado y uso de RAP**

*Sandra X. Campagnoli M.*

En este artículo se exponen los principales aspectos asociados con las tecnologías de mezclas asfálticas tibias (WMA, por su sigla en inglés), se muestran sus ventajas y limitaciones, así como la forma más común de clasificación, describiéndolas de manera general, pero haciendo especial énfasis en aquellas tecnologías en que se trabaja con la inyección de agua para el espumado del asfalto –previando el desarrollo de estudios sobre esta técnica– en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería, dada la disponibilidad de una planta piloto para fabricar asfalto espumado.

## **57 / ENTREVISTA**

### **Los grandes retos de la locomotora del transporte**

## **63 / ALCANCE Y POLÍTICAS**

# Editorial

## Una paradoja increíble

**JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS**

Director de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*.

jairo.romero@escuelaing.edu.co

La paradoja de hoy en Colombia es que tenemos amigos y enemigos de la paz, es decir, buenos y malos ciudadanos.

La paz se logra renunciando completamente a la comisión de delitos, renunciando a la posesión y uso de las armas para imponer ideas y conseguir beneficios económicos y políticos, renunciando a la conformación de organizaciones delictivas, renunciando a la planeación y ejecución de actos terroristas.

Algunos piensan que calificando peyorativamente de enemigos de la paz a quienes no creemos en un diálogo con líderes terroristas que se mantienen asesinando a nuestros soldados y civiles, amenazando, extorsionando, secuestrando y violando todo precepto ético y moral, se puede alcanzar la paz; nada más alejado de la realidad. Se olvida que, como decía Marco Tulio Cicerón, “El buen ciudadano es aquel que no puede tolerar en su patria un poder que pretende hacerse superior a las leyes” y que “Para ser libres hay que ser esclavos de la ley”.

Por desgracia, los terroristas hablan más de la cuenta, mienten todo el tiempo, odian mucho, y no han querido aprender que para vivir en armonía, y para tener legitimidad política, sencillamente se necesita cumplir con la ley y con el deber de ser ciudadano de bien.

Los verdaderos enemigos de la paz son quienes a lo largo de los años han cometido y siguen cometiendo delitos, así como aquellos que no sólo les permiten delinquir con total impunidad, sino que, para colmo de males, también les dan un premio político por su proceder, porque como decía Aristóteles, “El único Estado estable es aquel en que todos los ciudadanos son iguales ante la ley”.

Duele no haber vivido en una Colombia tranquila, sin conflictos internos, al igual que duele no haber podido dejarles a nuestros hijos y nietos un país en paz, pero duele más ver que los hampones terminan siempre ganando.

*Innovación, ciencia y tecnología a tu alcance*



## Pregrado

- Ingeniería Civil\*\*\* SNIES:1980
- Ingeniería Eléctrica\*\* SNIES: 1982
- Ingeniería de Sistemas\*\* SNIES:1981
- Ingeniería Industrial\*\* SNIES:2563
- Ingeniería Electrónica\*\* SNIES: 2866
- Economía\*\* SNIES: 3602
- Administración de Empresas SNIES: 53966  
con énfasis en Negocios y Finanzas Internacionales
- Matemáticas\*\* SNIES: 17443
- Ingeniería Mecánica SNIES: 54358
- Ingeniería Biomédica SNIES: 91049  
Escuela Colombiana de Ingeniería - Universidad del Rosario

Título: Profesional

Duración: Economía, Administración de Empresas, Matemáticas e Ingeniería Biomédica, 9 semestres; los demás programas 10 semestres.

\*\* Acreditación Nacional de Alta Calidad

\* Acreditación Internacional de Alta Calidad RIACES 28 de julio de 2011

## Especializaciones

- Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos SNIES: 8501
- Diseño, Construcción y Conservación de Vías SNIES: 8503
- Economía para Ingenieros SNIES: 11696
- Estructuras SNIES: 2973
- Gerencia de Producción Industrial SNIES: 52800
- Gestión Integrada QHSE SNIES: 19205
- Ingeniería de Fundaciones SNIES: 52304
- Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente SNIES: 4656
- Saneamiento Ambiental SNIES: 4826

Título: Especialista

## Educación Continuada

Programas de formación, capacitación y actualización enfocados al desarrollo profesional y personal en las áreas de ingeniería, gerencia, calidad, sostenibilidad, medio ambiente, administración, logística, finanzas, estadística, TIC e infraestructura, entre otras, así como servicios de capacitación para las empresas privadas y públicas a escala global.

## Pregunta por nuestras BECAS

### Maestrías

- Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos  
SNIES: 101339
- Gestión de Información SNIES: 91269
- Ingeniería Civil SNIES: 53118
- Ingeniería Electrónica SNIES: 101379
- Ingeniería Industrial SNIES: 101895

Título: Magíster



/escuelacolingenieria



/Escuelacolingenieria



/escuelaing



/escuelacoling



@Escuelaing

Personería Jurídica 086 de enero 19 de 1973  
Institución sujeta a inspección y vigilancia por el Ministerio de Educación Nacional



# Remoción de hierro con almidón de maíz

## Iron removal with corn starch

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>1</sup> - ANA MILENA GÓMEZ SÁNCHEZ<sup>2</sup>

1. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jairo.romero@escuelaing.edu.co - milenagomez8911@hotmail.com

Recibido: 15/04/2013 Aceptado: 30/04/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La coagulación química del agua se basa en el empleo de sales de hierro y aluminio, como el cloruro férrico y el alumbre, para proveer la remoción de los contaminantes del agua cruda. El uso de coagulantes naturales ofrece una manera sencilla y probablemente menos costosa de realizar el mismo propósito. En este artículo se describe la aplicación del almidón de maíz para remoción de hierro en el agua. La coagulación con almidón de maíz permitió obtener 99 % de remoción de hierro<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** coagulación, coagulantes naturales, remoción de hierro, almidón de maíz.

### Abstract

The chemical coagulation of water is based on the use of iron salts, aluminium and ferric chloride as an alum to remove contaminants from unfiltered water. The use of natural coagulants offers a simple way and probably less costly one of achieving the same result. This article describes the application of corn starch for the removal of iron in water. Coagulation with corn starch allows 99% of iron removal<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** coagulation, natural coagulants, iron removal, corn starch.

## INTRODUCCIÓN

La remoción de hierro en plantas de agua potable puede hacerse mediante coagulación, floculación, sedimentación y filtración. La escogencia del coagulante debe hacerse mediante estudio de tratamiento con ensayos de jarras en laboratorio o en planta piloto. En aguas con alto contenido de hierro, es factible su remoción mediante coagulación con cloruro férrico<sup>(2)</sup>.

Los coagulantes usados para la clarificación del agua son de tipo inorgánico, lo cual acarrea desventajas tanto ambientales como económicas, ya que los lodos generados en la etapa de sedimentación están constituidos por sustancias inorgánicas que pueden alterar los procesos naturales presentes en las fuentes de aguas a las cuales se vierten.

Desde el punto de vista económico, los coagulantes inorgánicos son más costosos, pues en su proceso de fabricación se consumen energía y materia, lo que se traduce en costos de producción, además de que se generan residuos que contaminan el medio ambiente.

Los coagulantes naturales, como el almidón de maíz, constituyen una alternativa atractiva de tratamiento por su bajo costo y porque no tienen ninguna repercusión en la salud del ser humano<sup>(3)</sup>. Sin embargo, estos coagulantes no se usan a escala mayor o en plantas potabilizadoras para poblaciones grandes, sino que se aplican en acueductos pequeños o se emplean como elementos de investigación de universidades.

## ALMIDÓN DE MAÍZ

El almidón, comparado con otros carbohidratos, es un producto relativamente heterogéneo. Es un carbohidrato altamente polimerizado, cuyo monómero está representado por la glucosa. El principal problema de la química del almidón ha sido la determinación de la naturaleza y del número de uniones entre las unidades constituidas por los monómeros, así como de su distribución en la estructura del almidón. Se conoce que el almidón está constituido por dos componentes principales que representan propiedades bastante diferentes: la amilosa y la amilopectina<sup>(4)</sup>. En realidad, cada una de estas fracciones tiene subfracciones con propiedades específicas, haciendo difícil la definición exacta de los dos componentes. Varios investigadores desarrollaron métodos para lograr el fraccionamiento del almidón y

presentaron definiciones para la amilosa y la amilopectina fundamentadas en sus propios métodos<sup>(4,5)</sup>.

El simple tratamiento del almidón con agua caliente permite la extracción de una sustancia soluble, la amilosa, y una insoluble, la amilopectina<sup>(4)</sup>. Gatin-Gruzenwska consiguió separar las dos fracciones al tratar el almidón de papa con solución alcalina diluida, seguida por neutralización y sedimentación. En este caso, la amilosa sería la parte soluble y la amilopectina el residuo sedimentado<sup>(5)</sup>. Además de la amilosa y de la amilopectina, forman parte de la composición del almidón muchos otros productos, en porcentajes significativamente menores. Cuando se realiza la hidrólisis del almidón, se pueden encontrar pequeñas cantidades de residuos diferentes de los carbohidratos. Estos residuos son iones inorgánicos, ácidos grasos, lípidos y materiales nitrogenados, posiblemente originados en proteínas.

## MUESTREO

Las muestras de agua cruda se tomaron del manantial de la finca La Margarita, ubicada a 1 km de La Vega (Cundinamarca), y transportadas al laboratorio en garrafas de cinco galones cada una (figura 1). Las muestras se almacenaron y analizaron de acuerdo con los métodos estándar<sup>(6)</sup>.



Figura 1. Manantial y toma de muestra.

## RESULTADOS

### Agua cruda

En el cuadro 1 se muestran los resultados del ensayo físico-químico realizado al agua cruda y se compara su calidad con la norma colombiana para agua potable<sup>(7)</sup>.



**Cuadro 1**  
Caracterización del agua cruda

Parámetro	Unidad	Valores máximos aceptables Resolución 2115	Valor medido	Cumple/No cumple
Acidez	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	-	28	NA
Alcalinidad	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	200	15	Cumple
Calcio	mg/L-Ca	60	22	Cumple
Color aparente	UPC	15	270	No cumple
Color verdadero	UPC	-	40	-
Conductividad	μS/cm	1000	66,3	Cumple
Dureza total	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	300	46	Cumple
Hierro total	mg/L-Fe	0,3	8,03	No cumple
Magnesio	mg/L-Mg	36	24	Cumple
Nitrógeno amoniacal	mg/L-N	-	0,3	NA
pH	Unidades	6,5 - 9,0	5,7	No cumple
Turbiedad	UNT	2	209	No cumple

El agua cruda se caracteriza por su gran contenido de hierro, 8,03 mg/L- Fe, color de 270 UPtCo, turbiedad de 209 UNT, pH de 5,7, parámetros que no satisfacen la norma colombiana para agua potable (cuadro 1). Además, el agua cruda es un agua de turbiedad alta (>100 UNT) y baja alcalinidad (<50 mg/L), lo que incide en su condición de agua difícil de coagular<sup>(8)</sup>.

### Ensayos de jarras

Para los ensayos de jarras se utilizaron jarras de 1 L, soluciones de cloruro férrico y cal en concentraciones de 10 g/L y de almidón de maíz con una concentración de 20 g/L. La mezcla rápida se hizo a 270 r.p.m., gradiente de velocidad de 746 s<sup>-1</sup>, durante un minuto; y la mezcla lenta a 60 r.p.m., gradiente de velocidad de 78 s<sup>-1</sup>, durante quince minutos. El agua coagulada se dejó sedimentar durante quince minutos y se filtró por columna de arena.

Se realizaron catorce series de ensayos de jarras<sup>(1)</sup>, con almidón de maíz, con almidón de maíz y cal, con almidón de maíz y soda cáustica y con cloruro férrico y cal. Los mejores resultados se obtuvieron con almidón de maíz y con cloruro férrico y cal (cuadro 2).

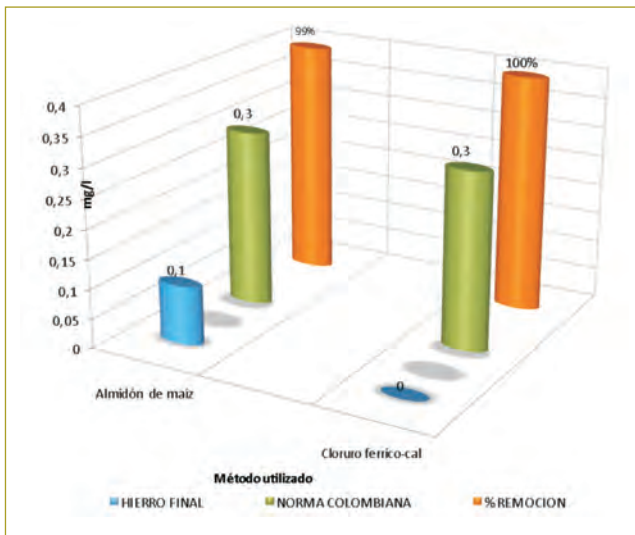
El almidón de maíz en dosis de 200 mg/L y el cloruro férrico combinado con cal en dosis de 8,3 y 8 mg/L, respectivamente, permiten obtener color en el agua tratada que cumple la norma de agua potable, con una eficiencia de remoción del 98 % (cuadro 2).

**Cuadro 2**  
Resultados finales de los ensayos de jarras

Calidad del agua cruda			
Turbiedad		209 UNT	
Color		270 UPtCo	
Alcalinidad		15 mg/L	
pH		4,8	
Conductancia		66 μS/cm	
Hierro total		8,03 mg/L	
Condición de cada jarra		1	2
Compuesto, mg/L	Almidón de maíz	200	-
	Cloruro férrico	-	8,3
	Cal	-	8
Calidad del agua filtrada	Turbiedad, UNT	1,4	0,8
	Color, UPtCo	5	5
	Alcalinidad, mg/L	6	8
	pH	5,7	7,8
	Conductancia, μS/cm	56	96
	Hierro total mg/L	0,1	0

De la misma manera se observa que ambos tratamientos permiten obtener turbiedades inferiores a la norma para agua potable de 2 UNT, aunque el tratamiento con cloruro férrico y cal permite una mayor eficiencia.

Los resultados obtenidos de conductividad cumplen igualmente con la norma para agua potable de 1000 μS/cm, con un mejor resultado con el almidón de maíz.



**Figura 2.** Tratamientos para remover contaminantes del agua cruda y métodos empleados.

El tratamiento con almidón de maíz requiere estabilización del agua filtrada para satisfacer la norma colombiana de agua potable, pH entre 6,5 y 9,0 (cuadro 2).

Ambos tratamientos (con almidón de maíz y con cloruro férrico y cal) permiten cumplir con el valor máximo aceptable establecido para hierro de 0,3 mg/L. El tratamiento con almidón de maíz fue efectivo para remover hierro en un 99 % y el tratamiento con cloruro férrico y cal permitió un 100 % de eficiencia (cuadro 2).

## CONCLUSIONES

- El agua del manantial analizado posee un contenido muy alto de hierro, 8,03 mg/L, color de 270 UPtCo y turbiedad de 209 UTN; bajo pH, 4,8 - 5,7, y alcalinidad de 15 mg/L - CaCO<sub>3</sub>, valores no aceptados por la norma colombiana de agua potable.
- La coagulación con almidón de maíz en dosis de 200 mg/L permite reducir color a 5 UPtCo, turbiedad a 1,4 UTN y hierro a 0,1 mg/L, con una conductivi-

dad de 56  $\mu$ S/cm, valores que satisfacen la norma colombiana para agua potable.

- El agua tratada mediante coagulación y filtración, con almidón de maíz, requiere estabilización para ajustar el pH a los requisitos de la norma, 6,5 a 9,0.
- El tratamiento con 200 mg/L de almidón de maíz permitió obtener, en el agua de ensayo, una eficiencia en reducción de hierro y turbiedad del 99 % y del 98 % en color, con un incremento del 15 % en conductividad.
- El tratamiento con 8,3 mg/L de cloruro férrico y 8 mg/L de cal permite obtener, en el agua de ensayo, una eficiencia en remoción de hierro del 100 %, del 99,6 % con turbiedad y del 98 % en color, con incremento en conductividad del 45 %.
- Es recomendable confirmar los estudios de coagulación con almidón de maíz y con otros coagulantes naturales, con el fin de evaluar apropiadamente su eficiencia, costos y aplicabilidad en el tratamiento de aguas.

## REFERENCIAS

1. Gómez, S.A.M. (2012, agosto). Remoción de hierro con almidón de maíz. Trabajo dirigido. Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería, Centro de Estudios Ambientales.
2. Cárdenas, R.L.K. & Castañeda, J.A.C. (2011, diciembre). Remoción de hierro en aguas con alta concentración. Trabajo dirigido. Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería, Centro de Estudios Ambientales.
3. Badu, R. & Chaudhuri, M. (2005). Home Water Treatment by Direct Filtration with Natural Coagulants. *Journal of Water and Health*, 03.1.
4. Vargas, M., Camareno, I. & Romero, E. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, vol. 19-4.
5. Unesco (2003). *Water for People, Water for Life*. United Nations Educational, Scientific and Cultural.
6. APHA. AWWA. WEF (2005). *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, 21<sup>th</sup> ed.
7. Ministerio de la Protección Social y de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115. Bogotá.
8. Romero Rojas, J.A. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

# Anclaje como sistema de refuerzo o contención para taludes en roca

## Anchoring as a reinforcement or containment system for rocky slopes

JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI<sup>1</sup> - JENNY ALEXANDRA TOLOZA CONTRERAS<sup>2</sup>

1. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Estudiante de maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jamorteg@gmail.com - jenny.toloz@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 17/04/2013 Aceptado: 02/05/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

En este artículo se habla del uso de anclajes en roca como un sistema de refuerzo o contención de taludes.

Para el análisis de anclajes activos en roca, los métodos de cálculo son esencialmente formulaciones empíricas basadas en experiencias; también se considera empíricamente un porcentaje de la resistencia a compresión simple de la roca intacta para obtener la capacidad portante última del anclaje activo.

Al tener en cuenta la capacidad portante última del anclaje activo con formulaciones empíricas, la incertidumbre es grande. Por ello se plantea la conveniencia de desarrollar un análisis de estas formulaciones empíricas realizando la prueba de falla en el anclaje, que permita posteriormente considerar la longitud de bulbo necesaria para el diseño. Como complemento a la prueba de falla se desarrollaron ensayos de laboratorio, con el fin de determinar los parámetros de resistencia y definir las clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso, según Bieniawski: Rock Mass Rating (RMR) y el Índice de Resistencia Geológica (GSI, por su sigla en inglés).

**Palabras claves:** anclajes en roca, refuerzo o contención, clasificaciones geomecánicas<sup>(1)</sup>.

### Abstract

This article presents the use of rock anchors as a reinforcement and/or containment system of slopes. To analyse active rock anchors, calculations methods are essentially empirical formulas based on experiments and a percentage of compression resistance.

When considering the latest carrying capacity of the active anchor with empirical formulae, the uncertainty is significant. As a result, one must consider developing an analysis of these empirical formulae whilst carrying out a failure test on the anchor, which allows us subsequently to consider the pressure bulb length required for the design. To complement the failure test, laboratory trials would be carried out to determine the resistance parameters and define the geomechanic classifications of the rock mass, according to Bieniawski (Rock Mass Rating, RMR) and GSI (Geological Strength Index).

**Keywords:** rock anchor, reinforcement or containment, geomechanic classifications.

## INTRODUCCIÓN

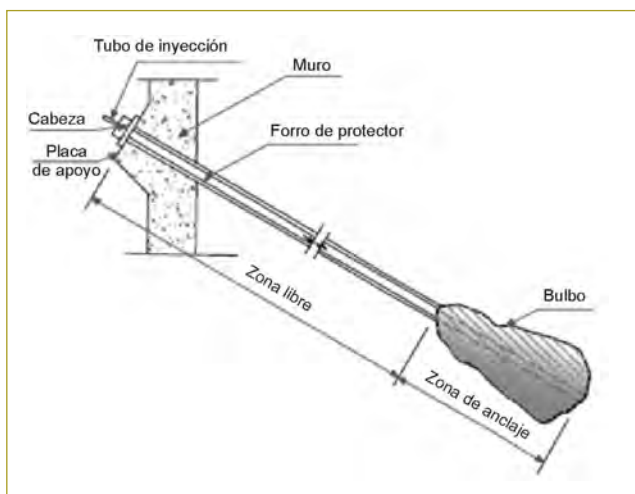
En la actualidad, los anclajes como elementos de estabilización y soporte para talud en roca se utilizan cada vez más en obras de ingeniería. Por lo tanto, se hace necesario comprender su funcionamiento, modos de ruptura del anclaje y criterios de falla de la roca.

Los anclajes buscan estabilizar masas de roca inestables, produciendo tensiones y deformaciones adicionales a la roca, mejorando la estabilidad; con esto se pretende que en conjunto el método de instalación, tipo de anclaje, la geología y condiciones hidráulicas del sitio cumplan un papel fundamental en el diseño del soporte.

Mediante la prueba de falla en el anclaje se pretende revisar las formulaciones empíricas empleadas en el diseño y así definir la longitud de bulbo que hay que usar. Se desarrollan ajustes en parámetros de resistencia del macizo y clasificación del macizo rocoso según Bieniawski: Rock Mass Rating (RMR) y el Índice de Resistencia Geológica (GSI, por su sigla en inglés).

## ANCLAJE PARA TALUD EN ROCA

Los anclajes en ingeniería civil constituyen en la actualidad una técnica para garantizar la estabilidad de masas rocosas y de casi cualquier tipo de suelo. El anclaje es un elemento capaz de transmitir esfuerzos desde la superficie del terreno hasta una zona interior de éste, que se convierte en una solución a problemas geotécnicos de estabilidad y deformación (figura 1).



**Figura 1.** Croquis de un anclaje.

Fuente: *Manual de anclajes en ingeniería civil* (2004). Roberto Ucar Navarro.

## PRUEBA DE FALLA EN EL ANCLAJE

En los últimos años se han llevado a cabo estudios tanto experimentales como teóricos sobre anclajes. Actualmente, el criterio de diseño está basado en la teoría de la elasticidad o criterios que involucran la selección de parámetros mediante ajustes empíricos. Por lo tanto, para el diseño de anclajes se hace necesario un conocimiento completo de las propiedades mecánicas de las rocas, geología, condiciones hidráulicas del sitio y presiones hidrostáticas en la masa rocosa.

## CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA DE FALLA

### Localización de la prueba de falla

El sitio en estudio se encuentra localizado en la abscisa K83+000 en el sitio conocido como La Leonera, de la vía que conduce de Sogamoso (Boyacá) a la población de Aguazul (Casanare). El estado de la vía sobre la cual se encuentra el anclaje para realizar la prueba se muestra más adelante (fotografía 1).

El área contemplada está conformada por laderas con morfología de pendientes, de inclinadas a escarpadas ( $15^\circ$  a  $>45^\circ$ ); los terrenos se han mantenido protegidos por una vegetación principalmente de pasto y de tipo rastrojo, y sometidos a actividades de la ganadería (fotografía 2).

En el plano geológico, el área está conformada por un macizo rocoso de constitución predominantemente lutita (fotografía 3), cuyas capas rocosas se presentan en estratificación desde laminar hasta delgada; estos materiales, por su constitución litológica-estructural (arcillosa, en capas muy delgadas), son muy propensos a la generación de fenómenos de remoción en masa, los cuales han originado, desde hace algunos años, procesos de inestabilidad, los cuales continúan en la actualidad.

### Ensayos de laboratorio

- Ensayo de carga puntual.** El ensayo de carga puntual ASTM D5731 se emplea para estimar la resistencia uniaxial de la roca. Este ensayo puede llegar a remplazar el ensayo de compresión simple.



**Fotografía 1.** Estado de la vía.



**Fotografía 2.** Localización del sitio de la prueba de falla.



**Fotografía 3.** Roca lutita.

### Resultados

A continuación se presentan los resultados de las diez muestras de pedazos irregulares ensayadas para obtener el esfuerzo de carga puntual y el esfuerzo de compresión simple.

**Cuadro 1**  
Resultados del ensayo de carga puntual

Muestra	D (cm)	W <sub>1</sub> (cm)	W <sub>2</sub> (cm)	W (cm)	L (cm)	t s	P kg	D/W	A (cm <sup>2</sup> )	De <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	De cm	Is kg/cm <sup>2</sup>	F	Is <sub>(50)</sub> kg/cm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> MPa	Valor
1	6,23	6,48	6,70	6,59	3,31	50,22	1100	0,95	41,06	52,27	7,23	21,04	0,42	8,81			Bajo*
2	6,02	6,07	6,47	6,27	3,02	41,43	1187	0,96	37,75	48,06	6,93	24,70	0,41	10,15	243,64	2,44	
3	6,01	6,61	5,93	6,27	2,92	54,49	1156	0,96	37,68	47,98	6,93	24,09	0,41	9,90	237,58	2,38	
4	5,98	6,37	6,03	6,20	3,01	47,34	1105	0,96	37,08	47,21	6,87	23,41	0,41	9,58	229,98	2,30	
5	6,03	6,11	6,34	6,23	3,06	51,23	1135	0,97	37,54	47,79	6,91	23,75	0,41	9,75	233,97	2,34	
6	5,78	6,59	6,16	6,38	3,34	38,03	1195	0,91	36,85	46,92	6,85	25,47	0,41	10,41			Alto*
7	5,89	6,23	6,01	6,12	3,01	48,11	1048	0,96	36,05	45,90	6,77	22,83	0,41	9,29			Bajo*
8	6,09	6,35	6,12	6,24	3,11	47,89	1096	0,98	37,97	48,35	6,95	22,67	0,41	9,33	223,93	2,24	
9	6,13	6,23	6,05	6,14	3,08	50,22	1178	1,00	37,64	47,92	6,92	24,58	0,41	10,10	242,33	2,42	
10	6,06	6,34	6,03	6,19	3,04	49,46	1249	0,98	37,48	47,72	6,91	26,17	0,41	10,74			Alto*
<b>Esfuerzo de compresión simple (σ<sub>c</sub>)</b>															<b>235,24</b>	<b>2,35</b>	

(\*) Los resultados finales de Is<sub>(50)</sub> se calculan eliminando los dos valores más altos y los dos valores más bajos de una muestra de diez o más ensayos válidos y calculando el promedio.

### Clasificación del macizo rocoso según RMR y GSI

Seguidamente se presenta la clasificación RMR de Bieniawski (1989), valoración y descripción del macizo (cuadro 2).

**Cuadro 2**  
Clasificación del macizo según RMR<sub>89</sub>

Parámetro		Rango de valores y valoraciones							Valoración					
$\sigma_{ci}$ (MPa)	> 250	15	100 - 250	12	50 - 100	7	25 - 50	4	< 25	< 5	1	0	1	1
RQD %	90 - 100	20	75 - 90	17	50 - 75	13	25 - 50	8	< 25		3	2	8	
Espaciamiento (m)	> 2	20	0,6 - 2	15	0,2 - 0,6	10	0,06 - 0,2	8	< 0,06		5	3	5	
Condición de juntas	Persistencia	< 1 m	6	1 - 3 m	4	3 - 10 mm	2	10 - 20 m	1	> 20 mm	0	4A	1	
	Apertura	Cerrada	6	< 0,1 mm	5	0,1 - 1,0 mm	4	1 - 5 mm	1	> 5 mm	0	4B	4	
	Rugosidad	Muy rugosa	6	Rugosa	5	Lig. rugosa	3	Lisa	1	Espejo de falla	0	4C	1	
	Relleno	Limpia	6	Duro < 5 mm	4	Dura > 5 mm	2	Suave < 5 mm	1	Suave > 5 mm	0	4D	1	
	Alteración	Sana	6	Lig. alterada	5	Mod. alterada	3	Muy alterada	2	Descompuesta	0	4E	5	
Agua subterránea	Seco	15	Húmedo	10	Mojado	7	Goteo	4	Flujo	0	5	10		
<b>Valor RMR (suma de valoración 1 a 5) =</b>												<b>36</b>		
<b>Clase de macizo rocoso</b>														
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0							<b>IV</b>		
Descripción	I MUY BUENO	II BUENO	III REGULAR	IV MALO	V MUY MALO							<b>MALO</b>		

La valoración del macizo presenta un RMR de 36, por lo tanto podemos definir el macizo rocoso con una clasificación de IV MALO.

Con el cuadro 3 se llega a la clasificación del macizo rocoso según Geological Strength Index (GSI), identificando las condiciones en las cuales se encuentra.

También es posible determinar la valoración del GSI empleando las correlaciones existentes con el método de clasificación de Bieniawski (1989), presentado en la ecuación 1.

$$GSI = RMR_{89} - 5 \text{ Para } RMR > 23$$

**Ecuación 1.** Correlación GSI para RMR > 23.

$$GSI = 36 - 5 = 31$$

De acuerdo con la clasificación de GSI, se puede considerar el macizo con una condición en la superficie regular y una estructura alterada, con bloques angulares formados por familias de discontinuidades de intersección, persistencia de planos de estratificación. Por lo tanto, al apreciar la valoración de GSI = 31 empleando la correlación con el RMR de Bieniawski (1989) y la valoración GSI = 34 definida con el cuadro de Hoek & Brown, se observa que la brecha entre estos dos valores no es muy grande y cualquiera de los dos se podría emplear para definir parámetros de resistencia del macizo.

**Cuadro 3**  
Clasificación del macizo rocoso según GSI



Fuente: Extraída de Hoek & Brown et al., 2002.

Parámetros de resistencia del macizo rocoso

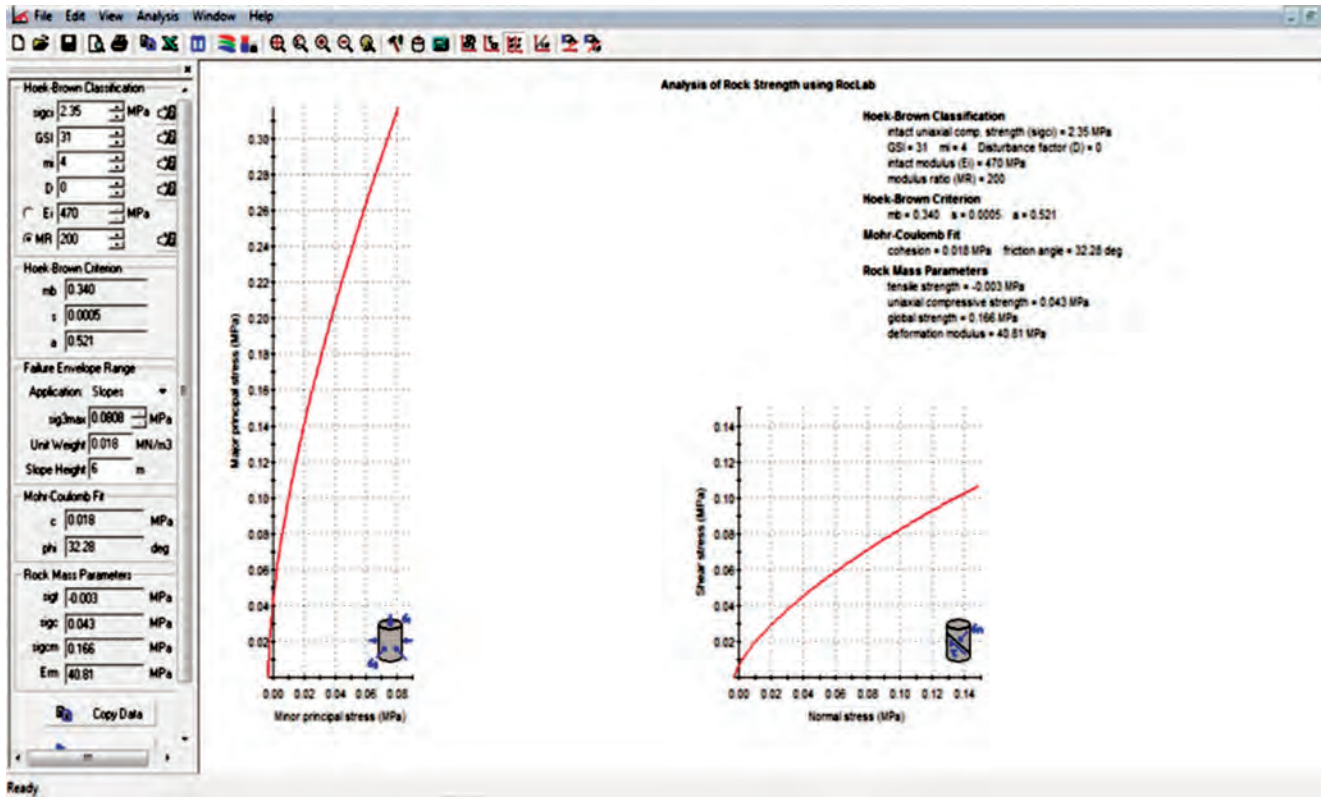


Figura 2. Resultados y gráficos del RockLab.

b) **Ensayo de corte directo.** El ensayo de corte directo ASTM D5607 determina el ángulo de fricción residual ( $\phi_r$ ) de las discontinuidades en la roca. En su preparación, el testigo se debe ensayar con la discontinuidad paralela a la aplicación de la carga cortante.

Ángulo de fricción interna pico ( $\phi_p$ ): 28°

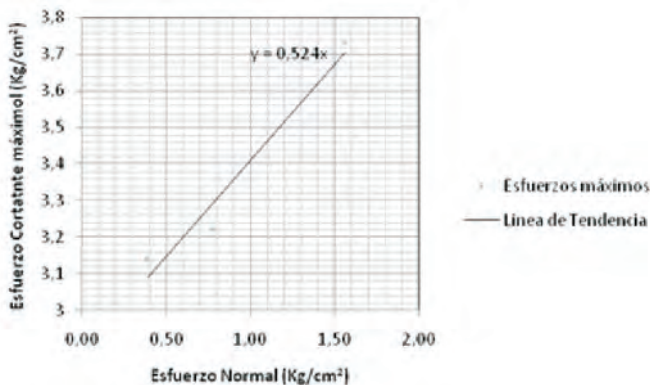


Gráfico 1. Esfuerzo cortante máximo vs. esfuerzo normal.

**Resultados.** Se hizo el ensayo de corte directo sobre una discontinuidad en una muestra de lutita a diferentes estados de carga; se tomaron 1, 2 y 4 kg (gráficos 1 y 2).

Cohesión residual: 0,065 kg/cm<sup>2</sup> y ángulo de fricción residual ( $\phi_r$ ): 25°

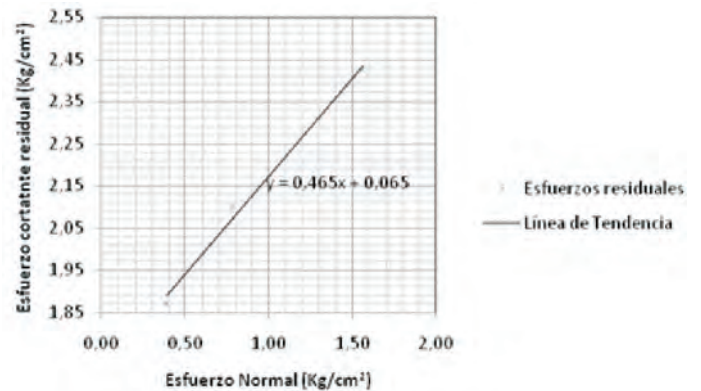


Gráfico 2. Esfuerzo cortante residual vs. esfuerzo normal.



**Fotografía 4.** Anclaje en tres torones para la prueba de falla.



**Fotografía 5.** Gato hidráulico para la prueba de falla.



**Fotografía 6.** Tensionamiento de la prueba de falla.

### Prueba de falla en el anclaje

La prueba de falla en el anclaje sobre un talud rocoso se desarrolla con el fin de revisar las formulaciones empíricas más empleadas en el diseño y obtener la capacidad última del anclaje activo (fotografías 4, 5 y 6).

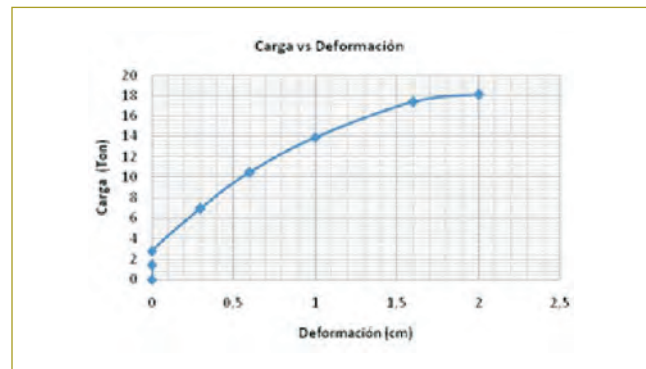
### Resultados

**Cuadro 4**  
Datos de la prueba de falla

Características	Dimensiones	Unidades
Gato	50	ton
Diámetro de torón	1/2	pulgadas
N.º de torones anclaje	3,00	
Longitud libre	2,00	m
Longitud bulbo	4,00	m
Longitud total	6,00	m

**Cuadro 5**  
Resultados prueba de falla

Presión (Psi)	Lecturas de deformación (cm)	Deformación (cm)	Carga aplicada (ton)
0	0	0	0
290	46	0	1,4
580	46	0	2,8
1450	46,3	0,3	7,0
2175	46,6	0,6	10,5
2900	47	1	14,0
3625	47,6	1,6	17,4
3770	48	2	18,1



**Gráfico 3.** Carga vs. deformación de la prueba de falla en el anclaje.

### Cálculo de la longitud de bulbo

El esfuerzo vertical se define actuando sobre el bulbo, teniendo en cuenta una cobertura de 6 m.

$$\sigma_v = \gamma * H, \sigma_v = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 6 \text{ m} = 108 \text{ KN/m}^2$$

Una vez determinado el esfuerzo efectivo vertical se ingresa al gráfico 4, Esfuerzo normal vs. esfuerzo cortante, definido con los parámetros de resistencia hallados anteriormente (figura 2).

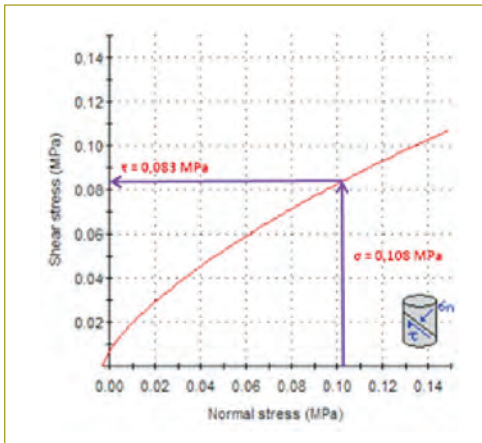
Por lo tanto, el esfuerzo cortante permitido será de 0,083 MPa.

$$E = \frac{\sigma_{ci}}{\epsilon}$$

**Ecuación 2.** Módulo de elasticidad

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \epsilon = \frac{2,35 \text{ MPa}}{40,81 \text{ MPa}} = 0,057$$





**Gráfico 4.** Esfuerzo cortante, resistencia teórica del bulbo.

Teniendo un diámetro del hueco donde se produce la inyección del anclaje de 10 cm, se determina el diámetro del bulbo por medio de la  $db = 1 + \varepsilon * dh$ .

$$d_b = (1 + \varepsilon) * d_h$$

**Ecuación 3.** Diámetro del bulbo teórico.

Donde:

$d_b$  = diámetro del bulbo.

$\varepsilon$  = deformación producida por la inyección del bulbo.

$d_h$  = diámetro del bulbo donde se produce la inyección del anclaje.

$$d_b = (1 + 0,057) * 10 \text{ cm} = 10,57 \text{ cm}$$

Una vez definidos el diámetro del bulbo y la resistencia al corte, se calcula por medio de la ecuación 4 la resistencia del bulbo teórica para el análisis.

$$\tau_a = \frac{F}{\pi * d_b * L_b}$$

**Ecuación 4.** Resistencia al corte del bulbo teórica.

Donde:

$\tau_a$  = resistencia al corte para el diseño de anclajes.

$F$  = fuerza de la tensión de diseño teórica.

$d_b$  = diámetro del bulbo.

$L_b$  = longitud del bulbo.

Despejando de la ecuación 4 la fuerza de la tensión de diseño teórica, se tiene:

$$F = \tau_a * \pi * d_b * L_b$$

$$F = 83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * \pi * 0,1057 \text{ m} * 4 \text{ m} = 110,24 \text{ KN}$$

Por lo tanto, la fuerza del bulbo teórica para el análisis es de 11 ton aproximadamente y la fuerza del bulbo de prueba definida mediante la prueba de falla es de 18 ton. Se asume una fuerza de diseño de 45 ton para el anclaje de prueba en tres torones, para definir la longitud de bulbo teórica y la longitud de bulbo de prueba. Teniendo 4 m de longitud de bulbo en el anclaje ensayado y 18,1 ton de fuerza para lograr la falla, la ecuación 5 permite calcular la fuerza por unidad de longitud para el bulbo.

$$F = f/L_b$$

**Ecuación 5.** Fuerza distribuida del bulbo de prueba o teórico.

Donde:

$F$  = fuerza distribuida del bulbo de prueba o teórica.

$f$  = fuerza de falla de prueba o teórica.

$L_b$  = longitud del bulbo.

Mediante la ecuación 5 se calcula la fuerza distribuida del bulbo de prueba y teórica:

$$F_{\text{prueba}} = \frac{18,1 \text{ ton}}{4 \text{ m}} = 4,53 \text{ ton/m}$$

$$F_{\text{teórica}} = \frac{11,24 \text{ ton}}{4 \text{ m}} = 2,81 \text{ ton/m}$$

A continuación se calcula la longitud del bulbo de prueba y teórica mediante la ecuación 6:

$$L_{\text{bulbo}} = Q/F$$

**Ecuación 6.** Longitud del bulbo de prueba.

Donde:

$L_{\text{bulbo}}$  = longitud del bulbo de prueba o teórica.

$Q$  = fuerza de diseño.

$F$  = fuerza distribuida del bulbo de prueba o teórica.

$$L_{\text{bulbo prueba}} = \frac{45 \text{ ton}}{4,53 \text{ ton/m}} = 9,93 \text{ m} \approx 10 \text{ m}$$

$$L_{\text{bulbo teórica}} = \frac{45 \text{ ton}}{2,81 \text{ ton/m}} = 16 \text{ m}$$

De la revisión de formulaciones empíricas empleadas en el diseño de anclajes, se determina que la longitud de bulbo teórica es de 16 m y la de prueba es de 10 m. La diferencia de 6 m entre la propuesta teórica y la de prueba es significativa. La prueba de falla en el anclaje permite definir la longitud de bulbo necesaria en función del tipo de material y resistencia del macizo, y así disminuir costos en materiales y optimizar rendimientos en obra.

## REFERENCIAS

1. Sánchez Jabale, Leonardo (2012). *Algunas experiencias de sistemas de anclajes en suelos en Colombia*. Trabajo de grado.
2. Ucar Navarro, Roberto (2004). *Manual de anclajes en ingeniería civil*. Madrid: U.D. Proyectos.
3. Hanna, T.H. (1990). *Foundation in tension ground anchors*, 2nd ed. Kluwer.
4. Hoek, E. & Brown, T. (1980). *Underground excavations in rock*. England: Institution of Mining and Metallurgy, 527 pp.
5. ASTM D 5607-95. Ensayo de corte directo.
6. ISRM Suggested Method for In Situ Determination of Direct Shear Strength.
7. ASTM D 5731-95. Ensayo de carga puntual.
8. ISRM Suggested Method for Determining Point Load Strength.
9. Das, Braja M. (1999). *Principios de ingeniería de cimentaciones internacional*. Thomson Editores.
10. Instituto Nacional de Vías (1988). *Manual de estabilidad de taludes*.
11. Suárez, Jaime (2009). *Deslizamiento*. Técnicas de remediación, vol. 2. Ediciones Universidad Industrial de Santander.
12. Navarrete, A. (2002). *Evaluación geológica y petrográfica del cuerpo ígneo aflorante en el cerro Tragarepas, al norte de la población de Pacho, Cundinamarca*. Trabajo de grado.
13. Campbell, C. (1962). Section through the Cordillera Oriental of Colombia between Bogotá and Villavicencio. *Soc. Petr. Geol. and Geoph. Ann.*
14. Cox, K. et al. (1979). *The interpretation of igneous rocks*. London: Allen and Unwin.

# Balance de cuadrillas y flujo de trabajo como herramienta para mejoramiento de procesos constructivos

## Balancing construction crews and workflow as a tool to improve construction processes

JAVIER MAURICIO CONTRERAS SOCARRÁS<sup>1</sup> - ADRIANA GÓMEZ CABRERA<sup>2</sup> - JESÚS ORLANDO CASTAÑO<sup>3</sup>

1. Ingeniero civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

2. Ingeniera civil de la Pontificia Universidad Javeriana y M.Sc. en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes.

3. Ingeniero civil de la Universidad del Quindío y M.Sc. en Ingeniería del Hormigón de la Universidad Politécnica de Valencia.

contreras.javier@javeriana.edu.co - adrianagomez@javeriana.edu.co - jesus.castano@javeriana.edu.co

Recibido: 20/04/2013 Aceptado: 15/05/2013

Disponibile en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La construcción constituye un factor determinante dentro de la economía del país, y en la medida en que se logre aumentar la productividad de los procesos involucrados, mayor será la competitividad de las empresas desarrolladoras de proyectos civiles. La productividad ha sido objeto de estudio por parte de la industria de la construcción, con el fin de generar valor en los procesos constructivos, y una de las medidas adoptadas para su determinación es la identificación y medición de actividades realizadas en campo. Tradicionalmente, la obtención de esta información se realiza por medio de herramientas de muestreo, con observaciones directas del trabajo de los operarios y del flujo de recursos. En este trabajo se aplica la metodología *Time-Lapse*, a partir de un módulo programable y autónomo para captar información, para identificar causas de pérdidas y minimizarlas a través de las herramientas de balance de cuadrillas y flujo de trabajo.

En este artículo se presenta un estudio del caso de un proyecto de edificación, cuyo sistema constructivo es el tradicional de pórticos en concreto reforzado combinado con muros pantalla, cimentado en pilotes. Los resultados obtenidos fueron una recopilación de seis meses continuos de trabajo, los cuales arrojaron una serie de propuestas y recomendaciones para el mejoramiento de la productividad.

**Palabras claves:** cartas de balance, construcción sin pérdidas, flujo de trabajo, *Time-Lapse*.

### Abstract

Construction is a decisive factor in a country's economy, and to the extent that it is able to increase the productivity of the processes involved, the greater the competitiveness of civil projects. Productivity has been examined by the construction industry in order to generate value to the construction processes, and one of the measures taken to determine it is the identification and measurement of field-based activities. Traditionally, obtaining this information is done through sampling tools, with direct observation of the work of operators and of resources flow. In this study, a time-lapse methodology is applied from a programmable and autonomous module to capture information, to identify causes of loss and to minimise them by balancing construction crews and the use of workflow tools.

**Keywords:** letter of balance, lean construction, workflow, Time-Lapse.

## INTRODUCCIÓN

La construcción es un sector tradicionalista, generalmente lento para adoptar innovaciones, por lo que demostrar la exitosa aplicación de herramientas que conduzcan al mejoramiento de los procesos con base en tecnologías de información puede llegar a ser una estrategia efectiva para mejorar los indicadores de productividad y calidad en el sector (Alarcón et al., 2008).

En Colombia se evidencian inconsistencias y errores que inducen a la pérdida de recursos e insumos, donde a través de estudios e investigaciones hechos por el Consejo Privado de Competitividad y Camacol se pudo establecer en obras analizadas un alto porcentaje de trabajo que no agrega valor al proceso constructivo, teniendo un porcentaje de trabajo no contributivo en obra del 40 %, mientras países como Chile presentan 21 %, Estados Unidos 15 % y el promedio internacional es de 32 % (Camacol-Consejo Privado de Competitividad, 2008). Esta situación promueve la realización de estudios que contribuyan a mejorar los sistemas de construcción, identificando las causas de las pérdidas cuantitativas y cualitativas, así como reduciendo las actividades de flujo que no agregan valor en el proceso constructivo (Vargas et al., 2008).

Lauri Koskela, académico finlandés, presentó en 1992 un estudio llamado “Application of the new production philosophy to construction”, en el cual analiza los enfoques del impacto en la industria de la construcción; en éste se identificaron los fundamentos de concebir la productividad y sus operaciones como procesos (Botero, 2006). La filosofía *Lean Construction* permite identificar y disminuir pérdidas, promoviendo el aumento de la productividad en construcción a través de reducir o eliminar las actividades que no agregan valor (pérdidas), incrementar el valor del producto con base en los requerimientos de los clientes, reducir la variabilidad, disminuir el tiempo de ciclo, disminuir el número de pasos y partes, aumentar la flexibilidad de la producción, incrementar la transparencia del proceso, enfocar el control en el proceso completo, mejorar continuamente en el proceso y balancear el mejoramiento de los flujos y las conversiones (Koskela, 1992).

Para aplicar la filosofía *Lean Construction* es de vital importancia captar información de procesos constructivos que permitan realizar análisis de información, facilitando la toma de decisiones en proyectos de construcción. La técnica *Time-Lapse* permite reproducir

en un tiempo menor lo sucedido en la obra, captando detalles de las operaciones de obra, como desempeño de equipos, impacto del clima, causas de accidentes, conformación de cuadrillas de trabajo, evaluación de productividad, pérdidas de materiales, trabajo no contributivo, entre otros (Botero, 2006).

En este artículo se presenta un estudio de caso, consistente en dos torres de 17 pisos de altura, cimentadas sobre pilotes en la ciudad de Bogotá (Colombia), construidos en sistema estructural de pórticos en concreto reforzado resistentes a momento y losa de lámina colaborante, con una duración estimada de 18 meses. En este estudio, por medio de la aplicación de las herramientas flujo de trabajo y cartas de balance, se caracterizan los procesos constructivos y se hace un análisis que permite la identificación y reducción de pérdidas en la construcción de edificaciones con estructura en concreto, generando recomendaciones que ayuden al incremento de la productividad y la reducción o eliminación de tiempos no contributivos en obra.

## METODOLOGÍA

### Descripción del sistema para captar información

La recolección de información que se va a analizar se hace mediante un montaje de cámaras fotográficas y de video, para las cuales se desarrollaron *hardware* y *software* que permitieran el control remoto de éstas y el envío de la información a la red para su posterior proceso a través del esquema que se presenta más adelante (Gómez et al., 2012).

El sistema completo consta de tres subsistemas: manejo de la energía, control de toma de imágenes y almacenamiento y consulta de la información, los cuales tienen acceso desde internet y dan soporte a una página HTML para el manejo de la configuración del sistema completo. Una ventaja de este sistema es la independencia en casos de corte de energía eléctrica, pues el módulo para captar fotografías, compuesto por dos puntos y tres cámaras (imagen 1), se alimenta con paneles fotovoltaicos y envía por vía wifi a un PC en tiempo real o cuando se restablezca el fluido eléctrico.

Además del montaje descrito anteriormente, se destaca la utilización de una cámara web conectada a un computador industrial para el almacenamiento de información (fotografía 2). En este computador se



**Imagen 1.** Esquema del sistema para captar imágenes.

utilizó el *software Logitech webcam*, a través del programa Team Viewer, con el fin de tener el control remoto de la cámara web y hacer videos para análisis posteriores del proceso constructivo (imagen 2).

Con este montaje se desarrollaron videos del proceso constructivo en tiempo real, con el fin de contribuir con la información obtenida inicialmente para identificar algunos aspectos adicionales.

#### Eficiencia de la utilización de la herramienta *Time-Lapse*

Para el análisis de las actividades y del proceso constructivo en general, se empleó una serie de imágenes digitales captadas a través del montaje de cámaras expuesto anteriormente, las cuales se procesaron mediante la utilización de la herramienta *Time-Lapse*,



**Fotografía 2.** Cámara web.

que permite obtener un registro detallado, ya que los videos se pueden observar en repetidas ocasiones. Dentro del lapso de la recopilación de información y el



**Fotografía 1.** Unidades de captura.



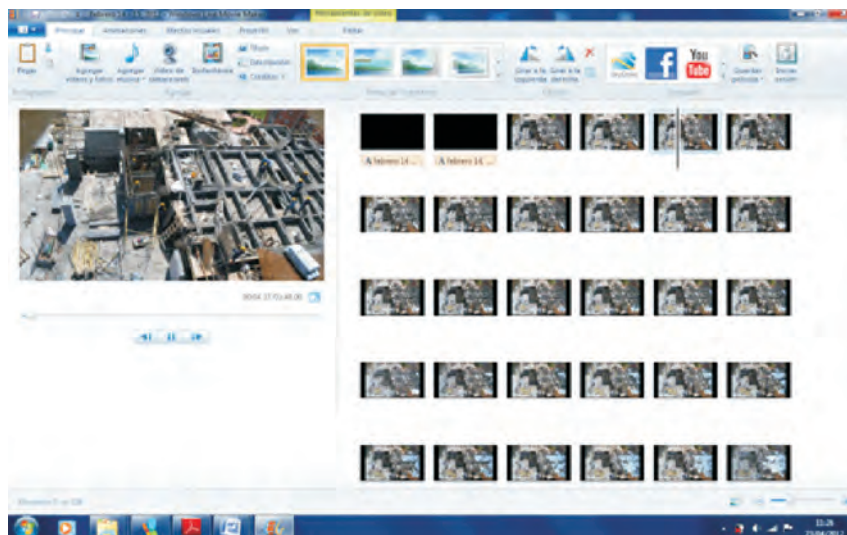


**Imagen 2.** Utilización del *Logitech webcam software*.

procesamiento de ésta, se pudo evidenciar una serie de ventajas, en las cuales se destacan la obtención clara y concisa de información, extracción de información con mayor detalle, facilidad del muestreo, identificación del manejo de recursos en las actividades, disminución del error sistemático en comparación con otros métodos y, por último, el ingreso remoto desde cualquier lugar con acceso a internet.

### Caracterización del proceso constructivo

La recopilación de la información a través del montaje instalado se realizó durante la etapa del proceso constructivo de la estructura en concreto. Se hizo un seguimiento del avance del proyecto en tiempo real, desde cualquier lugar con acceso a internet, en busca de identificar la composición de cuadrillas, realizar un diagnóstico de pérdidas de los recursos en una activi-

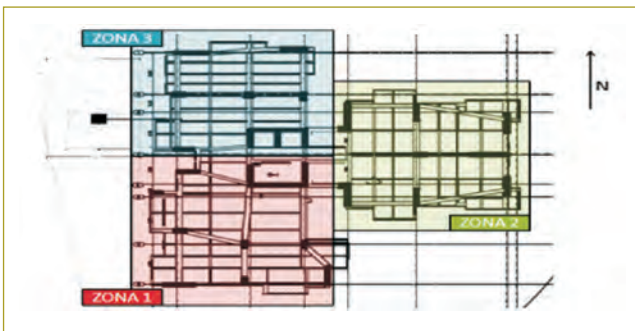


**Imagen 3.** Utilización del programa Windows Live Movie Maker.

dad específica y evaluar la eficiencia de la herramienta *Time-Lapse*.

Una vez obtenida la información, y tras un lapso de seis meses, se realizó la conversión de imágenes a videos *Time-Lapse* mediante la utilización del programa Windows Live Movie Maker (imagen 3), el cual permitió reproducir en un tiempo menor lo sucedido en la obra en un periodo captado a lo largo de la investigación.

Para la ejecución del proceso constructivo, el área de obra se dividió en tres zonas (figura 1), las cuales se tomaron en cuenta para identificar y caracterizar la secuencia de actividades y la distribución de recursos. Esta distribución se hizo con el fin de mejorar los rendimientos, aumentar los tiempos productivos y disminuir las pérdidas (tiempo no contributivo).



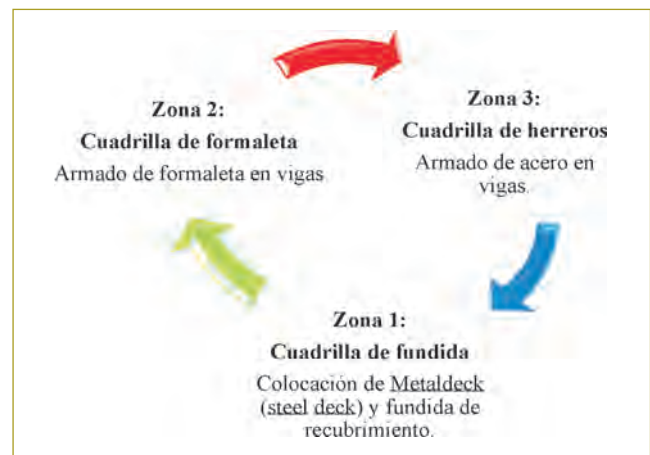
**Figura 1.** Distribución de zonas de trabajo.

Por medio de la utilización de la herramienta *Time-Lapse* se pudo identificar la composición de cuadrillas, organizadas en estas tres zonas, teniendo en cuenta la secuencia de actividades que se van a desarrollar dentro del proceso constructivo en obra, como se muestra en los siguientes ciclos (figuras 2 y 3).



**Figura 2.** Primer ciclo de trabajo.

En la figura 2 se muestra el primer ciclo de trabajo, donde se distribuyen los recursos por cuadrillas en las tres zonas. En la zona 1 trabaja la cuadrilla de fundida con el vaciado de vigas, en la zona 2 la cuadrilla de herreros con armado de acero en vigas y en la zona 3 la cuadrilla de formaleta con armado de cama. Esta distribución de las cuadrillas en zonas se planteó para disminuir las pérdidas de los recursos, reduciendo el tiempo ocioso y distribuyendo el trabajo por zonas, de tal forma que no queden espacios libres en la ejecución de las actividades programadas.



**Figura 3.** Segundo ciclo de trabajo.

En la figura 3 se muestra el segundo ciclo de trabajo, donde se distribuyen los recursos por cuadrillas en las tres zonas. En la zona 1, después del vaciado de vigas, entra a trabajar la cuadrilla de fundida con la colocación de metaldeck; en la zona 2, luego del armado de acero en vigas, entra a trabajar la cuadrilla de formaleta para el armado de formaleta en vigas, y por último en la zona 3, después del armado de cama, entra a trabajar la cuadrilla de herreros para el armado de acero en vigas. Esta repartición de las cuadrillas en zonas se planteó para disminuir las pérdidas de los recursos, reduciendo tiempos de espera para buscar la ejecución de trabajos en su máxima expresión dentro de las tres zonas. Lo anterior con el fin de evitar tiempos libres en la realización de las actividades programadas.

Para terminar, en los ciclos mostrados análogamente se pudo identificar la distribución de las cuadrillas por zonas; de esta forma se utilizan todos los recursos al máximo, con el único fin de aumentar los tiempos productivos.

Flujo de trabajo

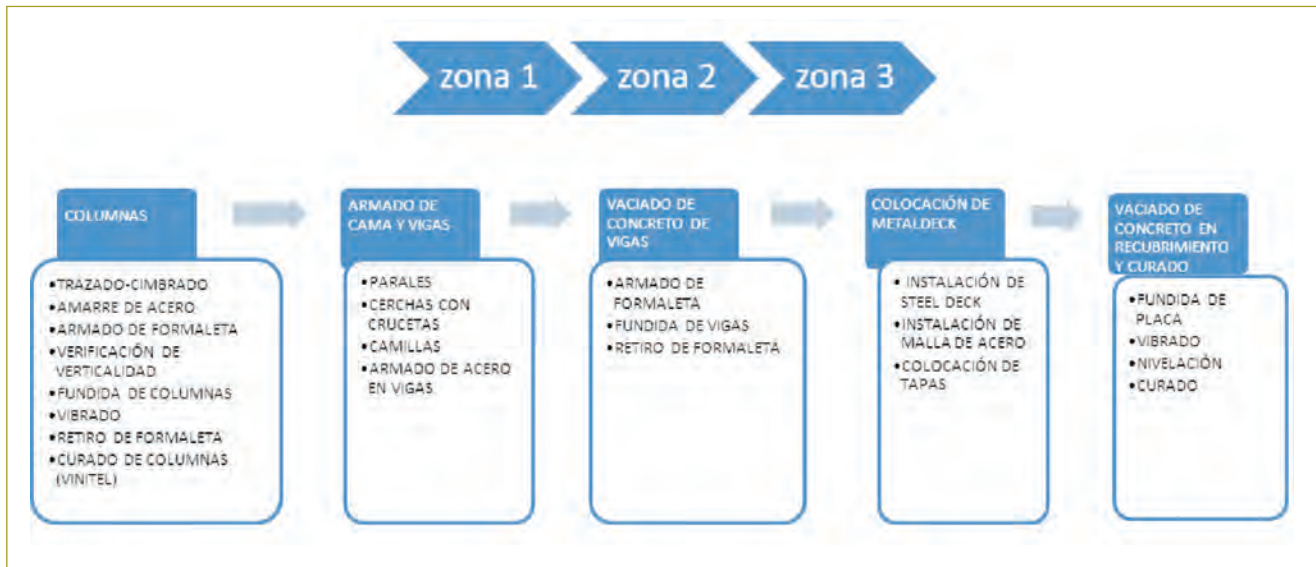


Figura 4. Diagrama de flujo de trabajo.

En la figura 4 se puede ver el flujo de trabajo analizado e identificado mediante la utilización de la herramienta *Time-Lapse*. En éste se caracteriza una secuencia de actividades observadas durante el proceso de construcción, donde se deben tener en cuenta dentro del flujo los tiempos de espera, transporte de material y logística.

Identificación de pérdidas en obra

Con la información recopilada, la administración de la obra tiene la oportunidad de tomar medidas conducentes a mejorar las condiciones de trabajo y optimizar la productividad de los recursos humanos (Botero, 2006). Así mismo, con esta información se pueden generar recomendaciones que contribuyan a mejorar rendimientos, seguridad y planificación de los proyectos de obras civiles.

Una vez analizado el proceso constructivo en mención, se identificaron las principales causas generadoras de pérdidas (tiempo no contributivo), como se muestra más adelante (figura 5).

Algunas de las imágenes que permitieron identificar estas causas generadoras de pérdidas se presentan posteriormente (fotografías 3, 4 y 5).

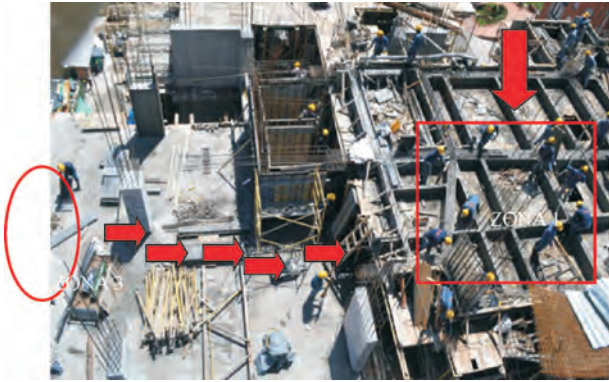
En la fotografía 3 se ilustra la inadecuada reubicación del material; en este caso, la formaleta para armado de



Figura 5. Principales causas generadoras de pérdidas.

vigas se dejó en la zona 3 y la actividad que hay que desarrollar está en la zona 1, lo cual ocasiona un desplazamiento largo e innecesario entre punto y punto, que no agrega valor a la actividad ejecutada.





**Fotografía 3.** Inadecuada reubicación del material.



**Fotografía 4.** Inadecuada disposición del material de obra, que interrumpe la circulación.



**Fotografía 5.** Baja actitud de trabajo.

Adicionalmente, se pudieron identificar problemas de seguridad industrial, como por ejemplo:

- **Deficiente utilización de las herramientas de obra.** Se pudo evidenciar la falta de utilización de la línea de vida (fotografía 6) por parte de algunos

trabajadores; pese a que todos contaban con su equipo, no lo utilizaron adecuadamente, infringiendo la normativa en altura.



**Fotografía 6.** Falta de utilización de la línea de vida.

- **Mal estado del material o herramienta de trabajo.** Por el mal estado de algunas camillas, el personal de obra pudo haber sufrido accidentes, generando un daño físico o incluso causar una muerte (fotografía 7).



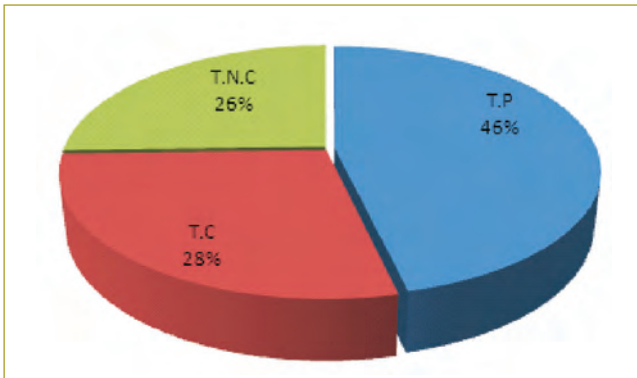
**Fotografía 7.** Mal estado de las camillas.

- **Falta de supervisión o control.** Por parte del personal encargado del contratista, se pudo evidenciar la falta de inspección en la utilización de las herramientas de seguridad industrial por parte del personal que laboraba en obra.

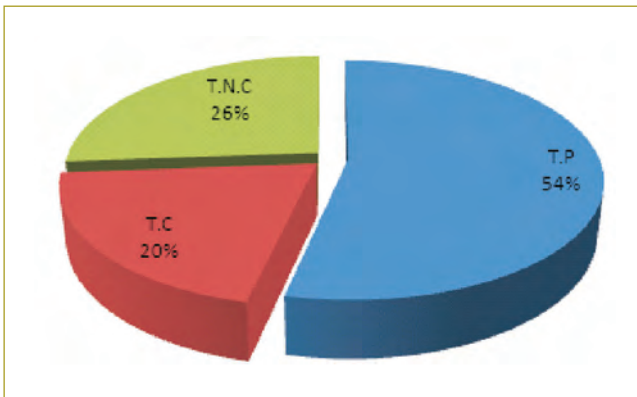
#### Identificación de actividades contributivas, no contributivas y productivas

Luego de observar las pruebas del muestreo de trabajo en la investigación, se pudieron identificar los porcen-

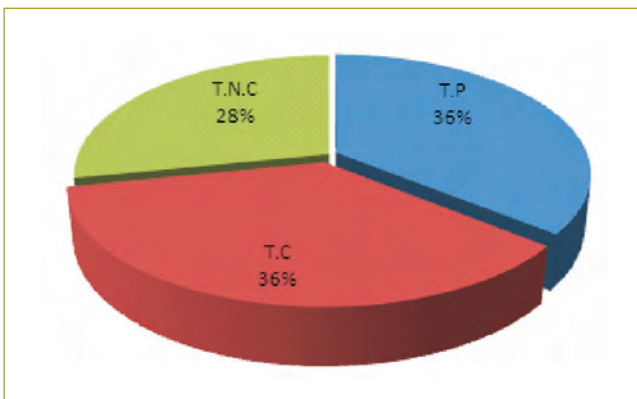
tajes de la distribución general de los tiempos de trabajo del personal involucrado en obra. Este trabajo se desarrolló de manera independiente para cada uno de los procesos constructivos involucrados en el flujo de trabajo. Dicho análisis permitió establecer lo siguiente para cada una de las cuadrillas:



**Gráfico 1.** Distribución de trabajo para la cuadrilla de formaleta.

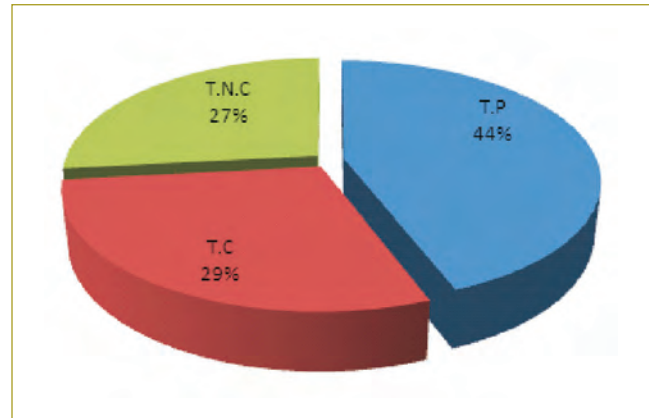


**Gráfico 2.** Distribución de trabajo para la cuadrilla de herreros.



**Gráfico 3.** Distribución de trabajo para la cuadrilla de concreto.

La distribución general de los tiempos de trabajo para las tres cuadrillas mencionadas análogamente, después de la investigación efectuada, arrojó estos resultados (gráfico 4):



**Gráfico 4.** Distribución general del trabajo en obra.

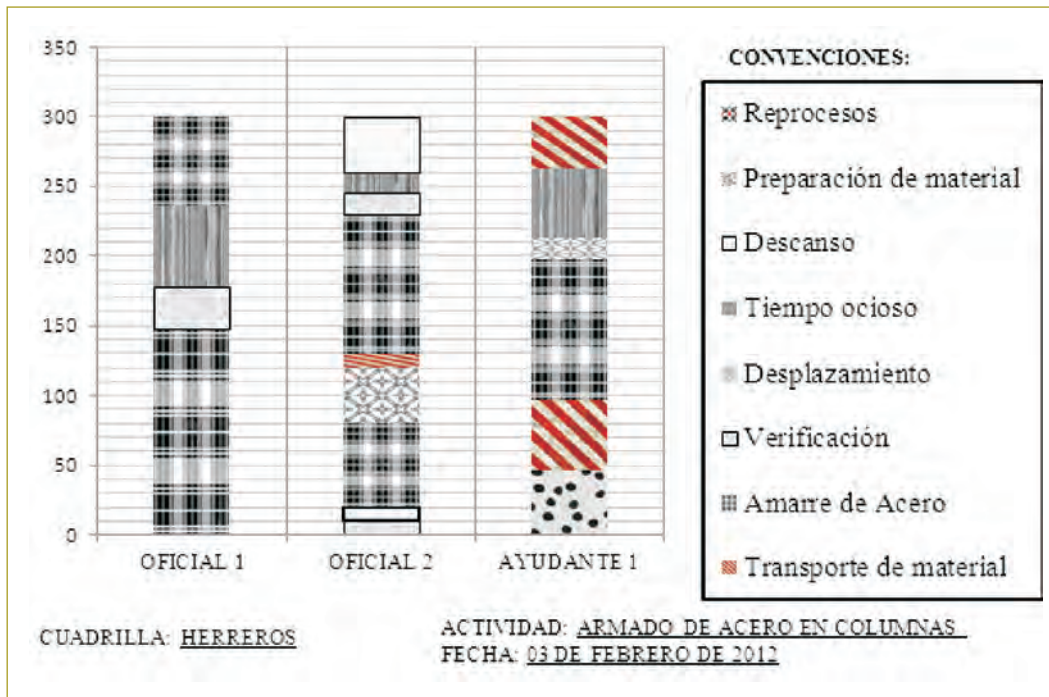
Como conclusión del estudio realizado, se pudo evidenciar que el 27 % del tiempo de trabajo está dedicado a las actividades que no agregan ningún tipo de valor (improductivas).

#### Balance de cuadrillas

Luego de identificar la ejecución de las actividades en las cuadrillas de trabajo, se pasó a hacer un análisis por medio de los gráficos de cartas de balance, en los cuales se tiene en cuenta la actividad específica realizada por parte de cada uno de los integrantes de la cuadrilla, dentro de un tiempo determinado.

Por lo tanto, la información obtenida se graficó, y mediante unas convenciones se muestran las diferentes actividades. Lo anterior se explica a través de unas categorías y causas, en las cuales se refleja el tiempo no contributivo (los trabajos que no agregan valor); por otro lado, se trazan los que contribuyen a la actividad, y finalmente, los que forman parte de la productividad o agregan valor.

El balance de cuadrillas tuvo como objetivo identificar los lapsos de no contributivos, para así buscar un incremento en la productividad. Dicho aumento se logra mediante la reducción o eliminación de trabajos improductivos; de igual forma, con tal información se pudieron hacer unas posibles modificaciones de cua-



**Gráfico 5.** Carta de balance de cuadrillas para la actividad de armado de acero en columnas.

drillas, las cuales pueden ayudar a mejorar los trabajos en los frentes dentro de las zonas. Para el balance de cuadrillas se hizo el análisis de videos de obra de duración de 300 segundos (cinco minutos) y para cada uno de los recursos se identificó la actividad que estaba realizando en el momento.

Se presenta como ejemplo el ejercicio efectuado para la actividad “Armado de acero en columnas” y para la actividad “Instalación de lámina colaborante”.

En el gráfico anterior se ilustra el comportamiento que normalmente tiene una cuadrilla de herreros para la actividad de armado de acero en columnas (gráfico 5). Aquí se puede visualizar por parte de los oficiales el trabajo productivo en la actividad, al igual que el trabajo contributivo con la verificación de la actividad y el

transporte de material; así mismo, se reflejan las pérdidas mediante desplazamientos innecesarios y descanso.

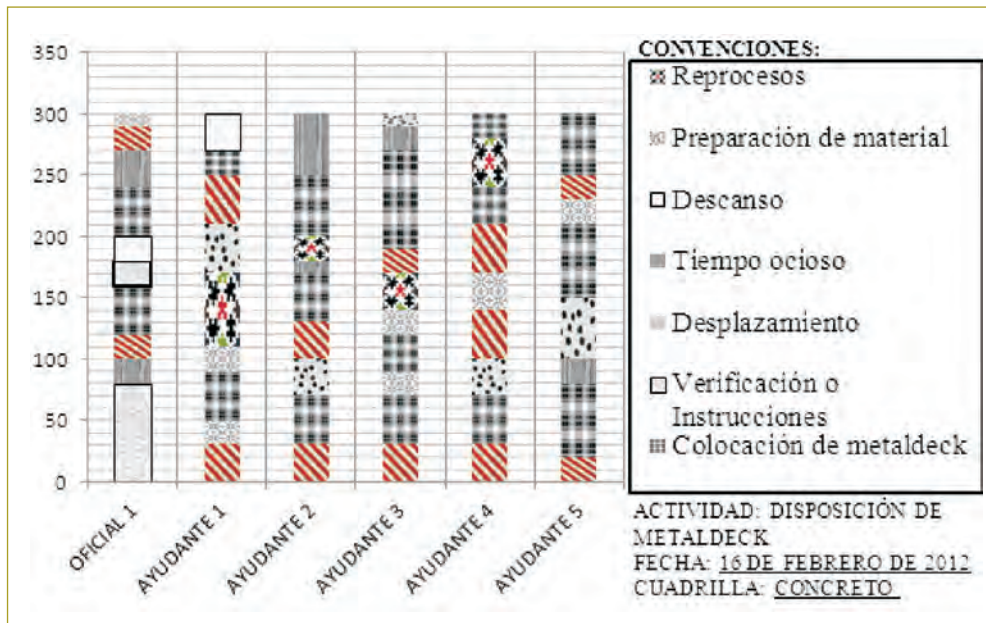
Más adelante se pueden observar detalladamente los tiempos de trabajo de la actividad de armado de acero en columnas (cuadro 1).

En la carta de balance de cuadrillas mostrada es posible observar las pérdidas de trabajo por parte del oficial, por los desplazamientos y transporte de material, labor que normalmente le corresponde a un ayudante. Por otra parte, se puede visualizar que el ayudante dentro de esta actividad entra a trabajar en el tiempo productivo y da muestras de colaboración en la cuadrilla asignada.

En el gráfico siguiente se puede observar el comportamiento de la cuadrilla de concreto durante el desarrollo de la actividad de disposición de lámina colaborante (gráfico 6).

**Cuadro 1**  
Tiempos de trabajo de la actividad de armado de acero en columnas (en segundos)

Recursos	Transporte de material	Amarre de Acero	Verificación	Desplazamiento	Tiempo ocioso	Descanso	Preparación de material	Reprocesos
OFICIAL 1	0	212	30	0	58	0	0	0
OFICIAL 2	10	160	25	40	15	50	0	0
AYUDANTE 1	87	100	0	16	50	0	47	0



**Gráfico 6.** Cartas de balance de cuadrillas en la actividad de disposición de lámina colaborante.

En la carta de balance de cuadrillas se aprecia el comportamiento de la actividad en la colocación de lámina colaborante, donde se pueden observar los tiempos ociosos y los desplazamientos del personal en obra. Por lo tanto, como posible iniciativa de mejoramiento se propone reducir los tiempos ociosos, generando una adecuada distribución del personal. De igual forma, se pueden evitar los desplazamientos extensos, buscando un lugar estratégico y apropiado para el descargue de material en planta.

A continuación se observan los tiempos de trabajo de la actividad de disposición de lámina colaborante (cuadro 2).

**Propuestas de mejoramiento dentro del proceso de construcción**

**Replanteo de conformación de cuadrillas**

Teniendo en cuenta las observaciones hechas durante el muestreo de trabajo y las cartas de balance de cuadrillas, obtenidas tras haber visto numerosas veces los videos de cinco minutos, las imágenes y la conversión de videos *Time-Lapse* conseguidos a lo largo de la investigación, se pudo realizar un apropiado replanteo de la conformación de cuadrillas. Por consiguiente, a continuación se expone el replanteo de la propuesta de mejoramiento, en cuanto a la conformación de cuadrillas dentro de las actividades realizadas a lo largo del proceso constructivo (cuadro 2 y gráfico 7).

**Cuadro 2**  
Tiempos de trabajo de la actividad de disposición de lámina colaborante (en segundos)

Convenciones	Recursos	Transporte de material	Colocación de lámina	Verificación o instrucciones	Desplazamiento	Tiempo ocioso	Descanso	Preparación de material	Reprocesos
OFICIAL 1		40	80	100	10	50	20	0	0
AYUDANTE 1		70	60	0	40	0	30	40	60
AYUDANTE 2		60	130	0	0	60	0	30	20
AYUDANTE 3		50	150	0	40	20	0	10	30
AYUDANTE 4		110	90	0	30	0	0	30	40
AYUDANTE 5		40	170	0	20	20	0	50	0

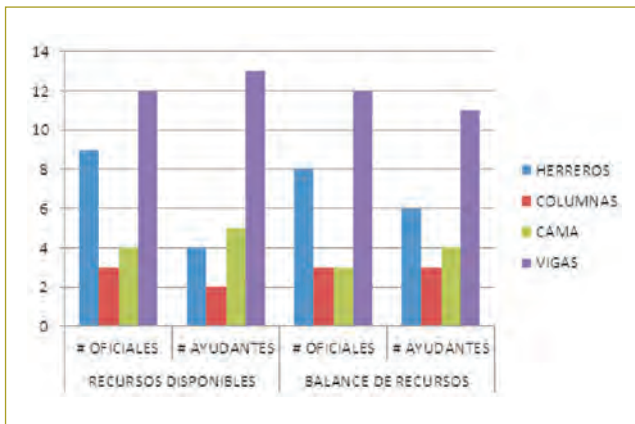


Gráfico 7. Replanteo de la conformación de cuadrillas.

**Cuadro 3**  
Replanteo de la conformación de cuadrillas

Actividad (1)	Recursos disponibles		Balance de recursos	
	# Oficiales	# Ayudantes	# Oficiales	# Ayudantes
Herreros	9	4	8	6
Columnas	3	2	3	3
Cama	4	5	3	4
Vigas	12	13	12	11

### *Aumento en la distribución de zonas de trabajo*

En razón de que durante el proceso constructivo el área de trabajo en la obra estaba dividida en tres zonas, como posible propuesta de mejoramiento, se recomienda dividir las zonas en seis partes iguales (figura 6); lo anterior con el fin de manejar una mejor distribución de zonas de trabajo, aumentando el rendimiento y la fuerza de trabajo por parte de los recursos, buscando ejecutar las actividades mucho más rápido, para así disminuir el tiempo de ejecución de cada planta tipo.

## RECOMENDACIONES

- Una adecuada utilización de las zonas puede incrementar los tiempos de trabajo que agregan valor a la actividad final. Lo dicho se logra generando ciclos de trabajo continuos, mediante la subdivisión de las zonas ya planteadas dentro del proyecto de investigación.
- Así mismo, no sólo para este proyecto de construcción, sino para todos los proyectos de construcción que se van a desarrollar en Colombia, se recomienda seguir los principios fundamentales de *Lean Construc-*



Figura 6. Nueva distribución de zonas de trabajo.

*tion* (construcción sin pérdidas), con el fin de reducir las actividades que no agregan valor, mediante la implementación de herramientas o técnicas que favorecen el incremento de la transparencia, control y mejoramiento del proceso constructivo en un proyecto.

- Aparte del montaje desarrollado en obra, es de vital importancia para este tipo de investigaciones hacer las visitas periódicas a obra, ya que por medio de éstas se pueden entender mejor los procesos constructivos, ratificando aspectos observados en las imágenes o videos.
- Por último, para eliminar o reducir algunos tiempos de trabajo que no agregan valor a la actividad, el personal de obra puede realizar más de una actividad, teniendo de esta manera la capacidad de laborar multifuncionalmente. Con lo anterior se busca que el personal en obra esté capacitado para trabajar en varias actividades.

## CONCLUSIONES

- La identificación de pérdidas durante el proceso constructivo de la torre 1 generó lecciones aprendidas que hay que implementar en la construcción de la torre 2, permitiendo distribuir los recursos en las cuadrillas eficientemente y generando propuestas de mejoramiento para reducir o eliminar las principales causas generadoras de tiempo no contributivo.
- La distribución general del trabajo en obra para las tres cuadrillas identificadas arrojó los siguientes resultados: un trabajo productivo del 44 %, un trabajo

contributivo del 29 % y un trabajo no contributivo del 27 %. En comparación con un estudio realizado por empresas brasileñas y colombianas, sobre la aplicación *Lean Construction* en el periodo 2003-2005 a nivel general de Colombia y a nivel local de Bogotá se pudo evidenciar la similitud de los resultados con un 45 % de trabajo productivo, 27 % de trabajo contributivo y 26 % de trabajo no contributivo.

- Por medio de la evaluación de la eficiencia de la instrumentación en obra se pudo visualizar una serie de ventajas, en las cuales se destacan la obtención de información clara y concisa, extracción de información con mayor detalle, facilidad del muestreo, identificación del manejo de recursos en las actividades, disminución del error sistemático en comparación con otros métodos y, por último, el ingreso remoto desde cualquier lugar con acceso a internet.
- Mediante la utilización de los videos *Time-Lapse* y por medio de la caracterización de los procesos constructivos, se identificaron las principales causas de problemas en obra, entre las que se destacan la mala distribución del personal, la deficiente actitud de trabajo, los desplazamientos innecesarios, los tiempos de ocio y descanso y, finalmente, las deficiencias en la seguridad industrial.
- Por último, se concluye que por medio del registro de información de videos e imágenes digitales es posible hacer un seguimiento y control del adecuado manejo de las herramientas que proporcionan la seguridad industrial del personal que se encuentra en la obra.

## REFERENCIAS

- Alarcón, L.F., Fuster, S., Mora, M., & Sossdorf, D. (2008). Utilización de imágenes y videos digitales para el mejoramiento de la productividad y prevención de riesgos en operaciones de construcción. Bogotá: Encuentro Latinoamericano de Economía y Gerencia de la Construcción.
- Botero, L.F. (2006). *Construcción sin pérdidas: análisis de procesos y filosofía Lean Construction*, 2.ª ed. Bogotá: Legis.
- Camacol - Consejo Privado de Competitividad (2008). *Competitividad de la actividad constructora de edificaciones: diagnósticos y recomendaciones de política*.
- Gómez, A., Echeverry, J.D., Giraldo, X., Otálora, C., & Cano, M.L. (2012). Mejoramiento de procesos constructivos a partir de un módulo programable para captura de imágenes y simulación digital | Gómez | Revista Ingeniería de Construcción [WWW Document]. URL <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/431>.
- Koskela, L. (1992). Application of the new production philosophy to construction. *CIFE Technical Report, # 72*. Stanford University: Department of Civil Engineering.
- Vargas, H., Prieto, J., Mesa, H., Páez, H., & Blanco, D. (2008). Flujo de trabajo en procesos de construcción: *Time-Lapse* como herramienta de análisis. Bogotá: Encuentro Latinoamericano de Economía y Gerencia de la Construcción.

# Influencia de la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, al noroccidente de Bogotá\*

## The influence of rock deterioration on parameters of resistance of the rocks forming the Guaduas formation, to the north west of Bogota

JOHANA PAOLA ROZO<sup>1</sup> - JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI<sup>2</sup>

1. Ingeniera civil. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

johanarozo.p@gmail.com - jamorteg@gmail.com

Recibido: 03/05/2013 Aceptado: 30/05/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

El proceso de meteorización de las rocas genera cambios en sus características y propiedades, representados en una disminución de la resistencia del material. Las rocas de la formación Guaduas se encuentran constituidas por lodolitas de color gris oscuro con algunos mantos de carbón, las cuales toman gradualmente el aspecto de arcillolitas abigarradas con intercalaciones de arenisca de espesor muy variable. Estos materiales son por naturaleza propensos a degradarse o deteriorarse en cuanto a su estructura, por procesos de meteorización física o química, presentando un comportamiento inestable que puede ocasionar suficiente pérdida de resistencia y conducir a su posterior falla.

Por la abundancia de este tipo de materiales en el territorio colombiano, en esta investigación se estudia la influencia que tiene la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, analizando un talud rocoso de esta formación ubicado en el costado norte del Parque Mirador de los Nevados, hacia el sector noroccidental de Bogotá, en los cerros de Suba, donde actualmente se están presentando procesos de inestabilidad. Se realizan correlaciones entre la resistencia y las pruebas índice de los materiales; se evalúa la estabilidad del talud, considerando el grado de meteorización de la roca, donde se evidencian amplias reducciones del factor de seguridad a medida que la roca pasa de un estado intacto a totalmente meteorizado. Se proponen las obras de mitigación de los procesos de inestabilidad que se están presentando actualmente en el talud, producto de los acelerados procesos de degradación de la roca, al encontrarse expuesta a la intemperie.

**Palabras claves:** roca, formación Guaduas, meteorización, resistencia, talud, estabilidad y degradación.

### Abstract

The process of rock weathering generates changes in its characteristics and properties, manifested in a reduced resistance of the material. The Guaduas rock formation is formed by dark grey mudrock with numerous layers of coal, which gradually take on the appearance of mixed claystone with sandstone of varying thickness interwoven into it. These materials are naturally susceptible to degradation or deterioration at a structural level, due to physical and/or chemical weathering processes; exhibiting an unstable behavior which may cause loss of strength enough to lead to subsequent failure.

Due to the abundance of such material on the Colombian territory, this research examines the influence of the deterioration of the rock in the strength parameters of the Guaduas rock formation by analyzing a rocky slope located to the North of the Parque Mirador de los Nevados, in the north west of Bogota, in the hills of Suba (which are presently exhibiting some instability). Correlations are made between the resistance and index testing of the materials. The rocky slope is evaluated according to the degree of weathering of the rock, which shows large reductions in safety as the rock changes from intact to fully weathered. Works are proposed to mitigate the instability processes that are currently happening in the slopes, due to the rapid degradation processes of the rock as a result of being exposed to the weather.

**Keywords:** rock, Guaduas Formation, weathering, resistance, slope, stability and degradation.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de meteorización conducen a la alteración de las propiedades, ya sea desde el punto de vista físico o químico, modificando el comportamiento tipo roca hasta convertirlo en uno tipo suelo, producto de factores como el clima, la topografía y la actividad biológica. Estos procesos afectan las rocas, modificando su resistencia, dificultando el diseño y la construcción de las obras de ingeniería del país.

El alcance del estudio involucra el análisis del comportamiento de las rocas de la formación Guaduas en relación con su resistencia, en varios estados de meteorización, correlacionándolo con resultados de pruebas índice y con la estabilidad de un talud localizado en el costado norte del Parque Mirador de los Nevados; además, se incluye la propuesta de las obras de mitigación al problema de inestabilidad presentado en dicho talud, donde actualmente se registra desprendimiento de materiales desde la corona.

## ANTECEDENTES

Existen dos tipos de meteorización. El primero consiste en la destrucción de la roca *in situ* mediante la alteración física conocida como “desintegración o meteorización física”, y el segundo involucra la alteración química denominada “descomposición o meteorización química”. Se han efectuado algunas investigaciones relacionadas con los efectos de la meteorización en las propiedades geotécnicas de la roca, entre las que se destacan las hechas por investigadores del Reino Unido, como Spears & Taylor (1972) y Chandler (1972); de Turquía, como Tungal y Zarif (2000), Tugrul y Gürpınar (1997); de Hong Kong, como Irfan (1999), y de Colombia, como Mario Camilo Torres (2010).

Spears & Taylor (1972) realizaron un estudio sobre la influencia de la meteorización física y química en la resistencia al corte en una gran cantidad de muestras de rocas lodosas, que arrojó como resultado la reducción de los parámetros de resistencia y la variación en la forma de la envolvente de Mohr, de acuerdo con el grado de meteorización. Chandler (1972) realizó el estudio

sobre una arcilla altamente sobreconsolidada del Reino Unido, la cual fue sujeta a procesos de meteorización natural; como resultado de su investigación se presentó una relación esquemática entre el contenido de agua y la resistencia al corte en cuanto a la envolvente de falla, donde la reducción progresiva de la resistencia se debe a la meteorización en una profundidad dada, representando el efecto de meteorización inducido por la erosión continua.

Tungal & Zarif (2000) hicieron una investigación sobre calizas meteorizadas de Turquía, en la que se identificó una relación lineal positiva entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la carga puntual, velocidad de ondas  $P$ , peso unitario, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión indirecta, y una relación lineal negativa desarrollada entre la resistencia a la compresión simple y la porosidad.

Tugrul & Gürpınar (1997) investigaron la clasificación de los estados de meteorización y las propiedades ingenieriles de basaltos de la región Niksar, al este de Turquía, donde se obtuvo una relación exponencial entre la resistencia a la compresión simple y la densidad, y una disminución de ambas propiedades con el aumento en el grado de meteorización. La permeabilidad de los materiales rocosos aumenta tanto como la porosidad se incrementa con el grado de meteorización.

Irfan (1999) efectuó un estudio en rocas volcánicas meteorizadas en Hong Kong. El estudio determinó que no es posible la comparación directa de una prueba índice en un grado particular de meteorización para la misma roca volcánica en diferentes formaciones.

Torres (2010) realizó una investigación sobre las rocas lodosas de los Andes colombianos por medio de técnicas de laboratorio para simular acciones del medio ambiente sobre muestras rocosas y monitorear cambios en propiedades físicas y mecánicas, evaluando los efectos reales que dichas acciones pueden tener en la competencia del material. Como resultado, se determinaron los principales mecanismos de falla de rocas lodosas, que se desarrollan inicialmente en la escala microscópica, exhibiendo tanto degradación física como química, y se comprobó la reducción progresiva en resistencia y rigidez.

El presente estudio se hace sobre un talud rocoso ubicado en el costado norte del Parque Mirador de los Nevados, el cual es el resultado de un proyecto de recuperación morfológica y ambiental de una antigua

\* Tomado del trabajo de grado para obtener el título de maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, dirigido por el ingeniero José Vicente Amórtegui.



cantera ubicada en el sector. En la actualidad hay desprendimiento de materiales de la parte alta del talud, debido a que éste queda expuesto directamente a la acción de procesos de meteorización, que se ven favorecidos por los cambios climáticos que se puedan presentar (intensas jornadas de sol o repentinas lluvias). Además de la exposición directa del talud a estos procesos, la naturaleza propia de las rocas sedimentarias por las que está constituido el talud hace que éstas sean más propensas a los procesos de meteorización (fotografía 1).



**Fotografía 1.** Talud norte del Parque Mirador de los Nevados.

### CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Se llevó a cabo la caracterización del macizo rocoso mediante el levantamiento de los datos estructurales existentes, el cual incluyó la posición y dirección de los estratos, la determinación de diaclasas y la toma de un número representativo de datos relacionados con dirección y buzamiento, rugosidad, espaciamiento, continuidad, alteración de las paredes, relleno, infiltración y apertura de discontinuidades, entre otros. Posteriormente, se hizo el muestreo de bloques rocosos del talud, para determinar la resistencia del material por medio de ensayos de compresión simple e índice de carga puntual, que arrojaron como resultado que la roca presenta bajos valores de resistencia. De las muestras rocosas ensayadas se obtuvieron valores de resistencia a la compresión simple inferiores a 6 Mpa y bajos índices de resistencia a la carga puntual, con I50 menores de 1 Mpa.

Se realizó el levantamiento estructural de 51 datos de discontinuidades y éstos se representaron en el programa Dips 5.0, que permitió generar el diagrama de

densidad de polos en proyección equirreal, identificándose la presencia de cuatro familias de discontinuidades en el macizo rocoso (cuadro 1).

**Cuadro 1**  
Familias identificadas en el macizo rocoso

Familia N.º	Azimut de buzamiento ( $\alpha$ )	Buzamiento ( $\delta$ )
1	49	86
2	349	68
3	309	80
4	136	42

Se hizo la clasificación del macizo rocoso por tres metodologías: RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski, Q de Barton y GSI (Geological Strength Index), según lo propuesto por Marinos & Hoek, donde se obtuvo como resultado que el macizo rocoso es de mala calidad.

De acuerdo con la clasificación RMR, se obtuvo un puntaje de 26, que corresponde a un macizo de mala calidad (clase IV); los valores aproximados para la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso, según su calidad, son de 130 Kpa y 18°, respectivamente. Según la clasificación Q de Barton, se obtuvo un puntaje de 1,65, que corresponde a un macizo de mala calidad. Por otra parte, teniendo en cuenta el grado y las características de fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques, alteración de las discontinuidades, y acorde con lo observado en campo en cuanto a litología y datos estructurales del macizo, se considera de acuerdo con el macizo de clase E, según la clasificación GSI, el cual corresponde a limolita débil o lutita arcillosa con capas de arenisca.

### INFLUENCIA DE LA DEGRADABILIDAD DE LAS ROCAS EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA

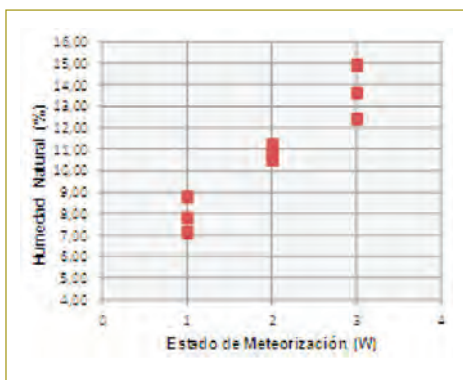
Para el presente estudio se combinó la clasificación propuesta por Deere & Patton (1971) y Annon (1981), con el fin de reflejar los niveles de meteorización del material rocoso expuesto en el talud norte del Parque Mirador de los Nevados y analizar el impacto en el comportamiento geotécnico en la transición de niveles de degradación de la roca. Los términos empleados para

diferenciar los horizontes son roca en estado intacto (W1), roca en estado parcialmente meteorizado (W2) y roca en estado completamente meteorizado (W3).

Para evaluar la afectación de las pruebas índice y de resistencia con el grado de meteorización de la roca, se realizaron ensayos de laboratorio para los tres estados de meteorización definidos anteriormente. A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

### Humedad natural

Se presentan humedades entre 7,13 y 14,90 %, correspondiendo los valores más bajos a la roca en estado intacto (W1). En términos generales, la humedad muestra una tendencia a aumentar con el incremento en el grado de meteorización de las rocas (figura 1). Se identifica un aumento del 73 % entre el estado intacto (W1) y totalmente meteorizado (W3).



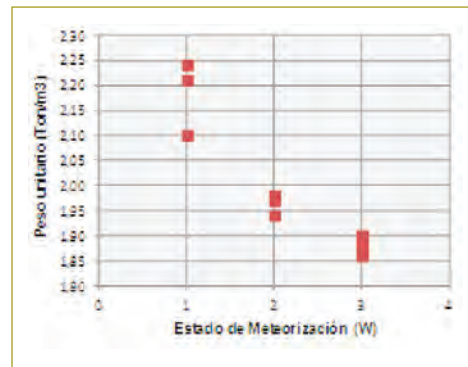
**Figura 1.** Comparación entre la humedad y el grado de meteorización.

### Peso unitario

El peso unitario se reduce a medida que aumenta el grado de meteorización (figura 2). Sin embargo, los valores de peso unitario no presentan una alta variación entre estados de meteorización, donde se registra una reducción del 14 % entre el estado intacto (W1) y totalmente meteorizado (W3).

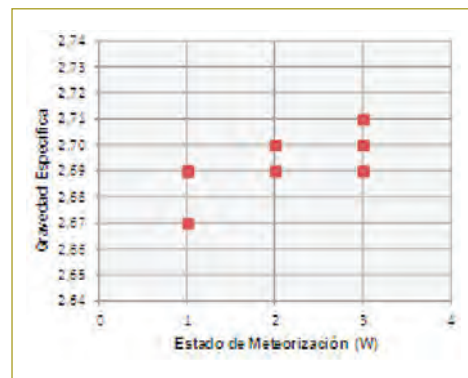
### Gravedad específica

Los rangos de Gs variaron entre 2,67 y 2,71, con un valor promedio de 2,69. No se aprecian altas variaciones



**Figura 2.** Comparación entre el peso unitario y el grado de meteorización.

en los valores de gravedad específica a medida que se incrementa el grado de meteorización (figura 3). En general, no hay una tendencia clara en cuanto al comportamiento de la gravedad específica con el grado de meteorización.



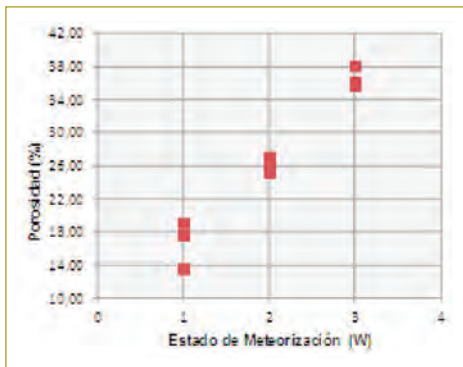
**Figura 3.** Comparación entre la gravedad específica y el grado de meteorización.

### Porosidad

Se identifica un alto aumento de la porosidad a medida que se incrementa el grado de meteorización (figura 4), pasando del 16,7 % para las rocas en estado intacto (W1) a un 36,6 % para rocas en estado totalmente meteorizado (W3).

### Límites de Atterberg e índice de plasticidad

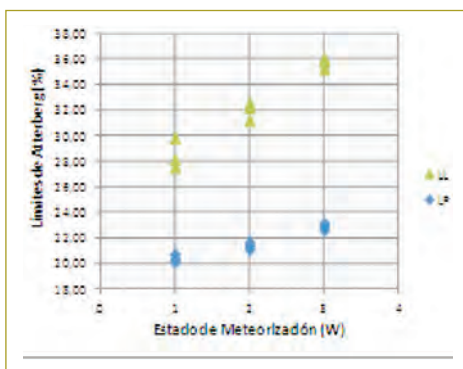
Los límites de Atterberg y el índice de plasticidad se incrementan a medida que aumenta el grado de meteorización de la roca (figura 5 e índice de liquidez).



**Figura 4.** Comparación entre la porosidad y el grado de meteorización.

El índice de liquidez correlaciona la humedad del material con el límite plástico y su índice de plasticidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, el índice de liquidez se incrementa a medida que aumenta el grado de meteorización de los materiales (figura 7), incrementándose en un 84 % y pasando del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3). El índice de liquidez negativo señala que el material se encuentra en una condición sólida, preconsolidada.

Más adelante se aprecia un incremento del 25,3 y del 58 % en el límite líquido y en el índice de plasticidad, en ese orden, pasando del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3).

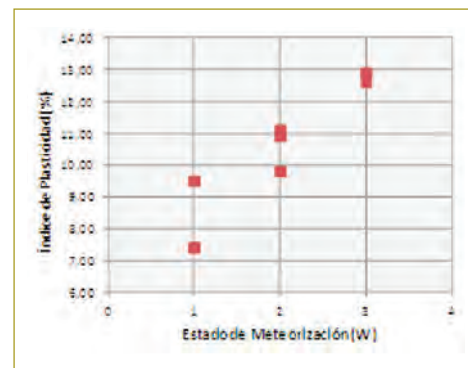


**Figura 5.** Comparación entre los límites de Atterberg y el grado de meteorización.

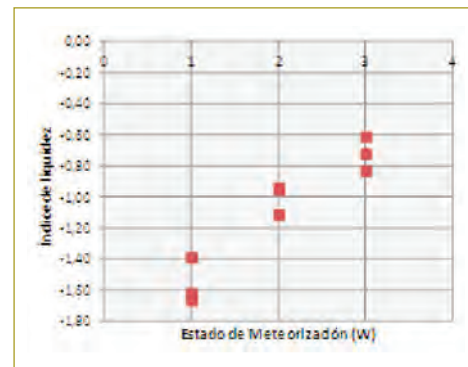
### Índice de liquidez

El índice de liquidez correlaciona la humedad del material con el límite plástico y su índice de plasticidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, el índice de liquidez se incrementa a medida que aumenta el grado

de meteorización de los materiales (figura 7), incrementándose en un 84 %, pasando del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3). El índice de liquidez negativo señala que el material se encuentra en una condición sólida, preconsolidada.



**Figura 6.** Comparación entre el índice de plasticidad y el grado de meteorización.



**Figura 7.** Comparación entre el índice de liquidez y el grado de meteorización.

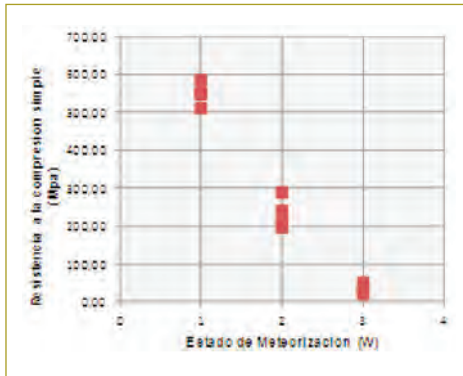
### Resistencia a la compresión simple

Se presentan resistencias a la compresión simple entre 20,60 y 586,4 ton/m<sup>2</sup> (0,20-5,75 Mpa). Se presenta una notable reducción de la resistencia a la compresión simple a medida que aumenta el grado de meteorización (figura 8), disminuyendo en un 94 % y pasando del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3).

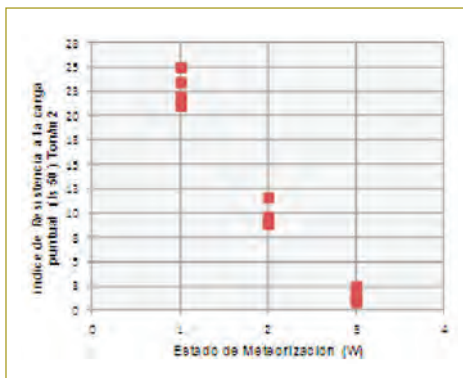
### Resistencia a la carga puntual

Se presentan índice de resistencia a la carga puntual hasta de 25 ton/m<sup>2</sup>. En general, los valores de resistencia a

la carga puntual decrecen con el grado de meteorización, con reducciones hasta del 93 % entre el estado intacto (W1) y el totalmente meteorizado (W3).



**Figura 8.** Comparación entre la resistencia a la compresión simple y el grado de meteorización.



**Figura 9.** Comparación entre la resistencia a la carga puntual y el grado de meteorización.

### Resistencia al corte

La resistencia al corte disminuye con el aumento en el grado de meteorización, se redujo en un 90 % la resistencia del estado intacto (W1) al totalmente meteorizado (W3).

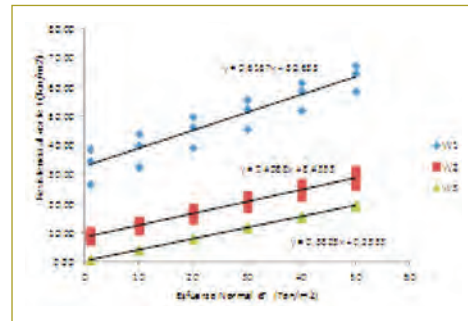
La cohesión se redujo drásticamente con el incremento en el grado de meteorización, pasando de 38 ton/m<sup>2</sup> a 0,5 ton/m<sup>2</sup> en el estado W1 al W3.

El ángulo de fricción se redujo de 32° a 20°.

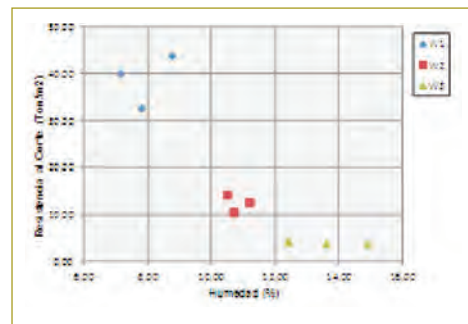
### Comparación de la resistencia con la humedad natural y el grado de meteorización de la roca

La resistencia de las rocas disminuye con un incremento en el contenido de humedad natural y en el grado de me-

eteorización (figura 11). Las muestras en estado intacto presentan una mayor variación de la resistencia que las muestras en estado parcial y totalmente meteorizado, para un bajo incremento de la humedad.



**Figura 10.** Comparación entre la resistencia al corte y el grado de meteorización.



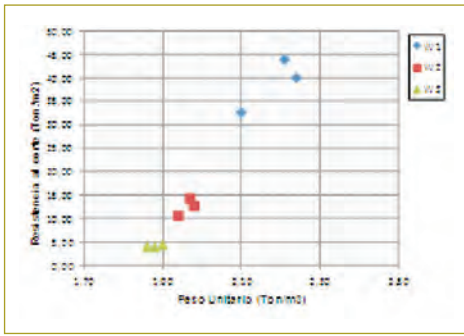
**Figura 11.** Comparación entre la resistencia al corte y la humedad.

### Comparación de la resistencia con la gravedad específica y el grado de meteorización de la roca

No se presenta una tendencia clara entre la resistencia y la gravedad específica, ya que no se aprecian grandes incrementos de este parámetro entre niveles de meteorización. El valor promedio Gs es de 2,70.

### Comparación de la resistencia con el peso unitario y el grado de meteorización de la roca

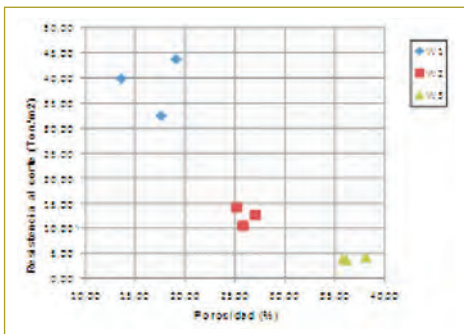
Se presenta una relación lineal entre el peso unitario y la resistencia del material rocoso. La resistencia de la roca se incrementa a medida que se aumenta el peso unitario y disminuye el grado de meteorización (figura 12). Las rocas en el estado totalmente meteorizado (W3) presentan pesos unitarios más bajos que las rocas en estado intacto (W1).



**Figura 12.** Comparación entre la resistencia al corte y el peso unitario.

### Comparación de la resistencia con la porosidad y el grado de meteorización de la roca

Se presenta una contundente disminución de la resistencia de la roca con el incremento de la porosidad y del grado de meteorización (figura 13), pasando de valores de porosidad del 16,7 al 36,6 %, para el estado intacto a totalmente meteorizado.



**Figura 13.** Comparación entre la resistencia al corte y la porosidad.

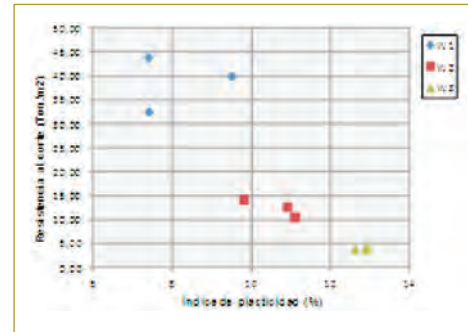
### Comparación de la resistencia con los índices de plasticidad y el grado de meteorización de la roca

Se presenta un incremento de la resistencia con la reducción del índice de plasticidad y el estado de meteorización de las rocas (figura 14), pasando de índices de plasticidad promedio de 8,10 a 12,8 %, del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3).

### Ensayo de azul de metileno

Se realizaron ensayos para cada estado de la roca: intacto, parcialmente meteorizado y totalmente meteorizado, donde se aprecian bajos valores de azul de metileno,

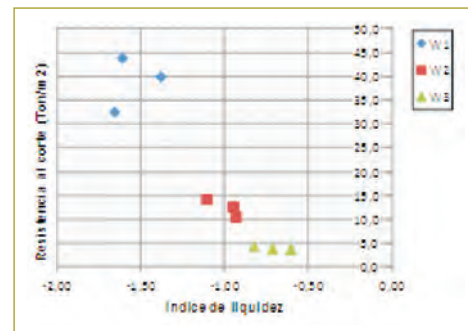
los cuales oscilaron entre 1 mg/g y 1,6 mg/g, lo que indica que las muestras contienen limitadas cantidades de arcilla, siendo coherente con los resultados de los índices de plasticidad obtenidos, los cuales variaron entre 8,10 y 12,80 %, representando baja plasticidad en los materiales analizados.



**Figura 14.** Comparación entre la resistencia al corte y el índice de plasticidad.

### Comparación de la resistencia con el índice de liquidez y el grado de meteorización de la roca

El índice de liquidez es la relación expresada en porcentajes de contenido de muestra natural de un material menos su límite plástico a su índice de plasticidad. Se obtuvieron índices de liquidez negativos, los cuales representan que el material se encuentra en estado sólido; a medida que el índice de liquidez aumenta, así como el grado de meteorización de la roca, se reduce la resistencia (figura 15).



**Figura 15.** Comparación entre la resistencia al corte y el índice de liquidez.

Se encontró una correlación entre la resistencia y el índice de liquidez, con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,90:

$$\tau = 0,8716e^{-2,436IL}$$

Esta correlación se podrá emplear para taludes de la formación Guaduas en condiciones similares.

### ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

En el talud norte del Parque Mirador de los Nevados se presentan procesos de inestabilidad, reflejados en el desprendimiento de materiales, producto de un acelerado proceso de meteorización, el cual se ve favorecido por la localización del talud, quedando expuesto directamente a la acción de cambios climáticos, la falta de cobertura vegetal, el aporte de aguas de las viviendas localizadas aguas arriba, la pendiente del talud y el tipo de materiales por el que está constituido, el cual es propenso a la degradación.

En razón de que se están presentando procesos de inestabilidad, se realizaron los correspondientes análisis de estabilidad para seis secciones a lo largo del talud, considerando las cuatro familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso y tomando como referencia los ángulos de fricción obtenidos en el ensayo de corte directo, los cuales variaron entre  $20^\circ$  y  $31^\circ$  para el estado intacto y completamente meteorizado, respectivamente.

Se hizo el correspondiente análisis cinemático de roturas en roca, para los tres tipos de falla existentes: planar, en cuña y por volteo (figuras 16 a 18). No se identifica posibilidad cinemática por falla planar; en el caso de falla en cuña, por la intersección de las familias de discontinuidades se genera la formación de cinco cuñas, pero no se registra su posibilidad cinemática. Por el contrario, se identificó que se produce la posibilidad cinemática de falla por volteo, debido a que se presentan bloques de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud, en el que el bloque de roca rota alrededor de un punto cerca de su base. La familia que origina la falla al volteo es la número dos, la cual es la familia que presenta el mayor buzamiento ( $77^\circ$ ); las secciones donde se identificó este tipo de falla son las que se llamaron taludes 1, 4 y 8.

En el caso de falla al volteo, se establece únicamente la posibilidad cinemática de falla; en el caso de falla por cuña, también se determina el factor de seguridad. Por tal razón, se realizó el cálculo del factor de seguridad en cuña siguiendo la metodología de Hoek & Bray (1981). De acuerdo con la figura 17, todos los taludes considerados en el análisis se encuentran incluidos en

la cuña generada por las familias de discontinuidades números 3 y 4; por dicho motivo, sólo se involucran estas dos familias para los análisis realizados.

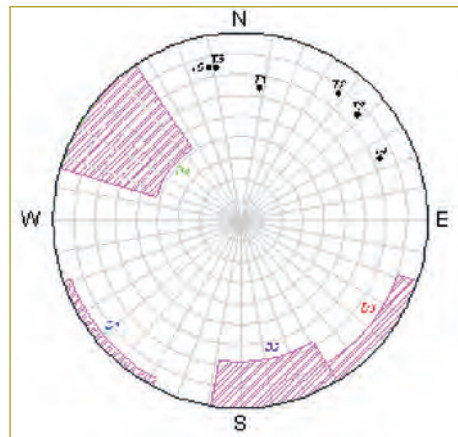


Figura 16. Análisis cinemático falla planar.

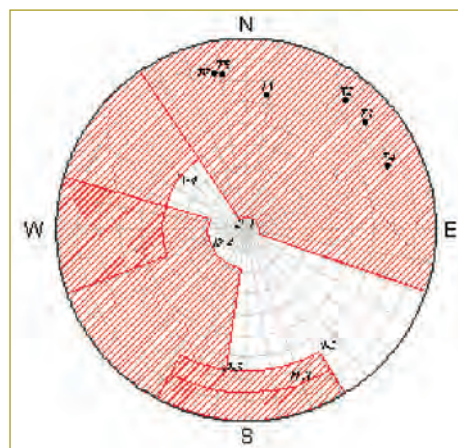


Figura 17. Análisis cinemático falla en cuña.

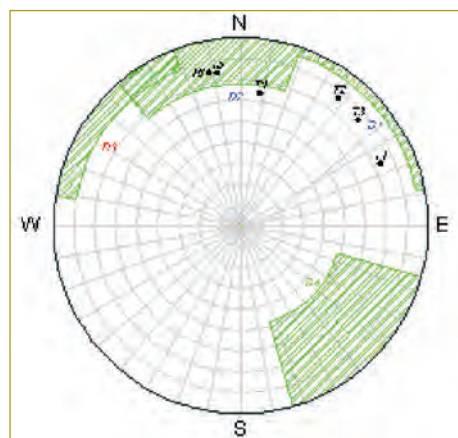


Figura 18. Análisis cinemático falla por volteo.

Se calcularon los factores de seguridad para las seis secciones definidas a lo largo del talud, las cuales presentaban buzamientos entre 64° y 77°, siendo la sección dos la de mayor buzamiento (77°). En la modelación se representaron los tres estados de meteorización de la roca evaluados a lo largo del estudio: intacto (W1), parcialmente meteorizado (W2) y completamente meteorizado (W3), con ángulos de fricción de 31°, 22° y 20°, en ese orden, considerando que entre las discontinuidades no se presenta cohesión. Los pesos unitarios empleados en los análisis fueron de 2,18, 1,96 y 1,88 ton/m<sup>3</sup>, para los estados W1, W2 y W3, respectivamente; se modeló el talud para dos condiciones: seca o saturada. Los factores de seguridad obtenidos en todos los casos siempre fueron mayores que 1, lo que indica que no se presenta falla por cuña (cuadro 2).

**Cuadro 2**  
Factores de seguridad falla en cuña

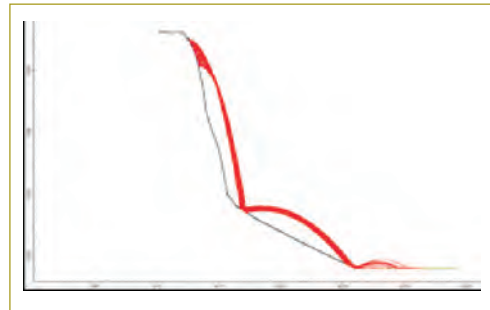
Talud	Condición estática, $\phi = 31^\circ$		Condición estática, $\phi = 22^\circ$		Condición estática, $\phi = 20^\circ$	
	FS sin agua	FS con agua	FS sin agua	FS con agua	FS sin agua	FS con agua
1	11,57	5,67	7,78	3,37	7,01	2,87
2	11,57	4,54	7,78	2,02	7,01	1,60
3	11,57	4,07	7,78	2,17	7,01	1,74
4	11,57	5,04	7,78	2,90	7,01	2,42
5	11,57	7,31	7,78	4,59	7,01	4,01
6	11,57	7,50	7,78	4,73	7,01	4,15

### ANÁLISIS DE CAÍDA DE ROCAS

Dado que se presentan caídas de bloques de la parte alta del talud norte del Parque Mirador de los Nevados, antes de proponer cualquier obra de estabilidad, se realizó el análisis de caídas de roca, permitiendo obtener una probable trayectoria de la roca desde su desprendimiento hasta su ubicación final, aplicando principios y fórmulas de caída libre y la teoría de colisiones o choques.

La modelación de caída de rocas se realizó con el programa Rocfall 4.0 de la firma Rocscience, el cual requiere como datos de entrada la topografía del talud, los materiales por los que está constituido, la velocidad de caída de los bloques y el peso de éstos.

En total, se modelaron tres secciones a lo largo del talud. Inicialmente se realizó una primera modelación, asignándole al talud dos tipos de material: el primero denominado talud rocoso y el segundo, Roca meteorizada. En la modelación se consideraron varias velocidades desde 0 m/s hasta 3,5 m/s y diferentes pesos de bloques (hasta de 20 kg). Como resultado de esta modelación, cuando se asignó al talud el material talud rocoso, se obtuvieron recorridos de la roca desde la pata del talud en distancias de hasta 8,7 m, a una baja velocidad (0,1 m/s), y distancias hasta de 12,5 m para una velocidad de caída de la roca de 3 m/s. Estas distancias disminuyeron cuando se asignó al talud el material roca meteorizada, donde para velocidades bajas la distancia de recorrido de la roca desde la pata del talud, es de máximo 0,5 m; para velocidades mayores a 2 m/s, la roca recorrió hasta 7,5 m desde la base del talud (figura 19). En todos los casos, la altura máxima a la que rebota la roca es menor de 1 m.



**Figura 19.** Análisis cinemático falla por volteo.

En razón de que el macizo rocoso del talud analizado no se encuentra en estado intacto, sin ningún tipo de alteración, no se consideró este tipo de material en el análisis de Rocfall 4.0. Por tal motivo se realizó la modelación de tres secciones a lo largo del talud, asignándole el material roca meteorizada, y considerando ángulos de fricción de 20° y 31°. En las tres secciones analizadas, para velocidades inferiores a 1 m/s, el recorrido de los bloques rocosos alcanza distancias hasta de 0,5 m desde la pata del talud, donde la altura máxima a la que rebota la roca es menor de 0,18 m; para velocidades superiores a 1 m/s (las cuales son muy improbables que se presenten), los bloques recorren distancias entre 2,5 m ( $v=1,5$  m/s) y 8 m ( $v=3,5$  m/s) desde la pata del talud. En todos los casos para el talud con un ángulo de 31°, las

rocas quedan separadas de la base del talud a menores distancias en comparación con el caso de cuando se asigna un ángulo de  $20^\circ$ , lo que conduce a considerar que el grado de meteorización de los materiales, representados en dos ángulos de fricción diferentes, influye en el análisis de caída de rocas.

## PROPUESTA DE OBRAS DE MITIGACIÓN

En el talud norte del Parque Mirador de los Nevados se presentan procesos de inestabilidad, generando desprendimiento de materiales desde la parte alta del talud, como resultado de acelerados procesos de meteorización que conducen a la falla por volteo.

Se hizo el análisis de caída de rocas, en el que se modelaron tres secciones del talud, asignándole un material de roca meteorizada para ángulos de fricción de  $20^\circ$  y  $31^\circ$ . De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, para velocidades hasta de 1 m/s, aproximadamente, cuando cae la roca queda separada máximo 0,5 m desde la pata del talud; para casos extremos, donde se alcanzaran velocidades superiores ( $v=1,5$  m/s), la roca recorre distancias hasta de 2,5 m desde la pata del talud. En todos los casos, la altura máxima a la que rebota la roca es menor de 1 m.

La recomendación principal para mitigar el proceso de inestabilidad que se presenta en el talud consiste en la implementación de obras de revegetalización, entre las que se incluye la siembra de enredaderas en la corona y base del talud (285 ml), así como la siembra de árboles por toda la pata (23 un); estas obras se proponen con el objeto de generar una cobertura vegetal que proteja el talud de la exposición directa a cambios climáticos que originan procesos de meteorización. Complementariamente se proponen obras de drenaje a través de una cuneta de coronación (139 ml) para manejo de la esorrentía, ya que por la topografía y el régimen de lluvias el agua puede discurrir por la cara del talud. Como obras de protección para poder habilitar el sendero peatonal existente se propone una barrera de contención de los bloques rocosos que se están desprendiendo, mediante la construcción de gaviones en piedra colocados hacia la pata del talud (216 m<sup>3</sup>).

A continuación se hace una breve descripción de las obras propuestas:

- Siembra de enredaderas (tipo curubos *passiflora*, por ejemplo) hacia la corona y la base del talud; las enredaderas son plantas que bien ubicadas y seleccionadas, cumplen la función de dar sombra y frutos. Estas plantas también contribuirán con la mitigación del proceso de meteorización del talud, y preservarán las condiciones paisajísticas del entorno.
- Muro de gaviones en piedra, de dos niveles de altura, cimentado a 0,3 m de profundidad, ubicado por la pata del talud. La longitud total de esta obra es de 72 m. La función del muro es generar una barrera de protección, limitando la trayectoria de caída de bloques, los cuales quedarían acumulados hacia el trasdós de la obra, actuando como relleno.
- Se recomienda colocar geotextil no tejido por el trasdós de la estructura, para asegurar la retención de partículas finas. Para poder habilitar el sendero peatonal existente, será necesario remover parte del material desprendido, el cual está acumulado hacia la pata del talud.
- Barrera arbórea bordeando el muro de gavión proyectado, mediante siembra de árboles de bajo porte, de raíces poco profundas, separados cada 3 m; en total, se requieren aproximadamente 26 árboles, los cuales cubrirán los gaviones propuestos para disminuir el impacto visual de estas obras con el paisaje del parque. Complementariamente, la barrera arbórea actuará como método de protección contra los procesos de meteorización presentes en el macizo rocoso. Para la arborización, se recomiendan especies nativas tipo laurel de cera (*Myrica pubescens*) u otras especies de rápido crecimiento con una profundidad radicular moderada, tipo arbustos.
- Cuneta de coronación en concreto de 1,4 m de base y de 139 m de longitud, bordeando la corona del talud hasta descolar en una caja recolectora en concreto (1,4 m x 1,2 m x 0,9 m) con control de sólidos flotantes, la cual se ubicará antes de cruzar unas viviendas existentes en el sector; de esta caja el agua será conducida por una tubería de PVC de 6", la cual conectará aguas abajo con una estructura de drenaje existente. Se propone realizar la cuneta de forma escalonada, la cual podrá servir de sendero peatonal, ya que se ubicará en el actual camino por donde transitan los habitantes del sector.



## CONCLUSIONES

- Las rocas arcillosas se encuentran comúnmente en las obras de ingeniería de Colombia, entre las que se destacan las lutitas y arcillolitas, las cuales en la mayoría de los casos exhiben un cambio continuo en sus propiedades mecánicas. Estas rocas son muy vulnerables a los efectos ambientales por la acción climática, ya que se producen ciclos de humedecimiento y secado por la exposición a la acción atmosférica, que conducen a la degradación de los materiales y a reducciones de la resistencia.
- Para estudiar la influencia de la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas en el noroccidente de Bogotá, se analizó el talud rocoso del costado norte del Parque Mirador de los Nevados, el cual está constituido por intercalaciones de arcillolitas y areniscas. Se estudió la roca arcillolita en tres estados: intacto, parcialmente meteorizado y completamente meteorizado, obteniéndose como resultado reducciones hasta del 94 % en la resistencia de los materiales con un incremento en el grado de meteorización, alterando drásticamente sus condiciones originales.
- El parámetro de resistencia que en mayor medida se ve afectado con el grado de meteorización es la cohesión, la cual en estado intacto presenta valores promedio de 32,6 ton/m<sup>2</sup>, reduciéndose a valores promedio de 0,23 ton/m<sup>2</sup> en el estado totalmente meteorizado; el ángulo de fricción se reduce de 31° a 20° para los estados de roca intacto y totalmente meteorizado, respectivamente.
- En el talud norte del Parque Mirador de los Nevados se presenta el desprendimiento de materiales y caída de bloques, debido a la ocurrencia de procesos de meteorización física del macizo rocoso que ocasiona la falla por volteo, lo cual se refleja en un deterioro acelerado de la calidad de los materiales
- Se realizaron pruebas índice y de resistencia y se encontraron relaciones entre éstas para tres niveles de meteorización. Se obtuvieron los siguientes resultados: existe una relación inversamente proporcional entre la resistencia y los resultados de contenido de la humedad, porosidad, límites de Atterberg e índice de liquidez, donde se evidencia una reducción de la resistencia con el incremento en estos parámetros, así como con el grado de meteorización de la roca. Por otra parte, la resistencia de la roca se incrementa

con la disminución del grado de meteorización y con el aumento en parámetros como el peso unitario del material; la resistencia tiende a disminuir a medida que se incrementa la gravedad específica, pero no hay una tendencia clara de la variación de este parámetro entre niveles de meteorización.

- Se correlacionaron los resultados de humedad con los límites de Atteberg a través del índice de liquidez, el cual es un indicativo de la historia de esfuerzos al que ha estado sometido el material, para los tres estados de la roca: intacto, parcialmente meteorizado y completamente meteorizado. La correlación obtenida con un buen coeficiente de calibración (R2 de 0,90) puede usarse para taludes de la formación Guaduas en condiciones similares, donde se presenta algún grado de meteorización:

$$\tau = 0,8716e^{-2,436IL}$$

- Se hicieron análisis de estabilidad para tres estados de meteorización de los materiales del talud, donde se obtiene una amplia reducción en el factor de seguridad a medida que aumenta el grado de meteorización, disminuyendo hasta en un 65 % este valor cuando se pasa del estado intacto de la roca a totalmente meteorizado, modelando el talud en condiciones saturadas.
- Debido a la situación actual de desprendimiento de materiales y caída de bloques rocosos producto de la falla al volteo que se está registrando en el talud y por las condiciones de meteorización a la que se encuentra sometido, se representó la trayectoria de caída de bloques rocosos, modelando dos condiciones del macizo: en estado intacto y en estado meteorizado.
- Se propusieron medidas correctivas del problema de inestabilidad que actualmente presenta el talud norte del Parque Mirador de los Nevados. La principal recomendación está enfocada hacia obras de revegetalización, entre las que se incluyen siembra de enredaderas en la corona y base del talud, así como la siembra de árboles de bajo porte hacia la pata del talud. De manera complementaria se propone la construcción de una cuneta de coronación en concreto y de una barrera de contención de los bloques desprendidos, mediante la construcción de un muro en gaviones hacia la pata del talud.

- En la mayoría de los proyectos donde se involucra la roca como material de construcción o existe la presencia de taludes rocosos no se tiene en cuenta su grado de meteorización, el cual altera sus propiedades, reduciendo su resistencia y potenciando las probabilidades de que el material falle y no se comporte como una roca sino como suelo.
- Para reflejar una condición real del análisis de meteorización de las rocas y su influencia en el comportamiento de los materiales, es recomendable comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con aquellos a los que realmente se somete la roca *in situ*, evaluando la velocidad de meteorización.
- Se recomienda ejecutar estudios de meteorización para materiales de otras formaciones, como la Bogotá y el Cacho, o aquellas en las cuales predominan las lutitas.

## RECOMENDACIONES

- La formación Guaduas se encuentra en la cordillera Oriental del país y aflora en muchas localidades. Las obras de ingeniería que se van a desarrollar necesariamente tendrán que involucrarse con los materiales de esta formación, los cuales podrían presentar procesos de meteorización. Las correlaciones resultantes representan el comportamiento de esta formación. Para otras formaciones habrá que hacerse un análisis similar.
- Para control de procesos de meteorización tradicionalmente se emplean las coberturas, las cuales pueden ser vegetales, con mortero o con biomantos. Para la situación del parque se recomienda una cobertura vegetal, siguiendo la sucesión natural vegetal.

## REFERENCIAS

- DAMA & Universidad Nacional de Colombia (1997). Recuperación morfológica y ambiental de la cantera de Suba. Convenio 025/96. Bogotá.
- Farah, R. (2011, abril). Correlations between index properties and unconfined compressive strength of weathered Ocala limestone. University of North Florida.
- García, M. & Moya, J.E. (1998). *Manual de estabilidad de taludes*, 1.ª ed. Inviás. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Hoek, E. & Bray, J.W. (1974). *Rock Slope Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. Revised.
- Torres, M.C. (2010). Síntesis del estado del conocimiento sobre el comportamiento esfuerzo – deformación y degradabilidad de rocas lodosas. Bogotá: Colciencias y Universidad Nacional de Colombia.

# Mezclas asfálticas tibias. Énfasis en tecnologías de espumado y uso de RAP

## Warm mixtures of asphalt (WMA). Focus on foam technologies and uses of RAP (Recycled Asphalt Pavement)

**SANDRA X. CAMPAGNOLI M.**

Especialista en Geotecnia. Directora del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Profesora titular.

sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 04/05/2013 Aceptado: 03/06/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

En este artículo se exponen los principales aspectos asociados con las tecnologías de mezclas asfálticas tibias (WMA, por su sigla en inglés), se presentan sus ventajas y limitaciones, así como la forma más común de clasificación, describiéndolas de manera general, pero haciendo especial énfasis en aquellas tecnologías en que se trabaja con la inyección de agua para el espumado del asfalto –previando el desarrollo de estudios sobre esta técnica– en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería, dada la disponibilidad de una planta piloto para fabricar asfalto espumado.

Igualmente, se presentan aspectos relacionados con el diseño, se resumen las principales características y propiedades de desempeño, y se hacen consideraciones sobre el empleo de RAP en las WMA.

Por último, se presentan algunas conclusiones y se dan recomendaciones orientadas a la implementación de las tecnologías de WMA en Colombia.

**Palabras claves:** mezclas asfálticas tibias, asfalto espumado, RAP, sostenibilidad.

### Abstract

In this article the main aspects associated with warm asphalt mixtures technologies are detailed ; we discuss their advantages and limitations, as well as the most common ways of classifying, with general descriptions but with a particular focus on the technologies which are used to work on water injections for the asphalt foam – anticipating further studies on this technique in the laboratories of the Escuela Colombiana de Ingeniería, given the availability of a pilot plant to produce some asphalt foam.

The article also presents aspects related to the design, a summary of the main characteristics and properties of the performance and the uses of RAP and WMA are considered.

Finally, some conclusions are drawn and recommendations made about the implementation of WMA in Colombia.

**Keywords:** warm mixtures of asphalt, foam asphalt, RAP, sustainability.

## INTRODUCCIÓN

La industria del asfalto está explorando continuamente desarrollos tecnológicos que mejoren el desempeño de los materiales, incrementen la eficiencia de la construcción, conserven los recursos naturales y protejan el ambiente. Las normativas vigentes sobre emisiones de gases, en especial de gases de efecto invernadero (*Greenhouse Gases*, GHG), y sobre conservación de la energía, han hecho atractivo considerar la reducción de las temperaturas de producción y colocación de las mezclas asfálticas.

El concepto de reducir la temperatura para producir mezclas asfálticas no es nuevo. El desarrollo de las emulsiones asfálticas en la primera parte del siglo XX y de los asfaltos espumados, a mediados de este mismo siglo, es prueba de ello. En años recientes se ha dado un fuerte impulso al desarrollo de las mezclas asfálticas tibias (*Warm Mix Asphalt*, WMA), en la búsqueda de elaborar mezclas a menores temperaturas, que sean equiparables, e incluso superiores, en sus propiedades y desempeño a las tradicionales mezclas asfálticas en caliente (*Hot Mix Asphalt*, HMA).

WMA es un término genérico usado para describir una gran variedad de tecnologías que permiten a los productores de HMA reducir las temperaturas a las cuales se mezclan los materiales –agregados pétreos y asfalto– y se colocan en la vía. Las reducciones de temperatura con respecto a las HMA varían, aproximadamente, entre 17 y 55 °C, dependiendo de la tecnología usada (1).

Además de la reducción de las temperaturas de mezcla y compactación, en las tecnologías de WMA se tiene la posibilidad de incorporar, en principio, con mayor facilidad que en las HMA, otras prácticas también consideradas sostenibles, como el empleo de pavimentos asfálticos recuperados (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP) y de asfaltos modificados con caucho de neumáticos, haciéndose de esta manera mucho más atractivo su empleo.

En la última década, las tecnologías de WMA han recibido una gran atención de parte de la industria, de las agencias viales y de la academia, por lo que presentan un avance vertiginoso en países desarrollados. Una encuesta del National Center for Asphalt Technology (NCAT), de Estados Unidos, reveló que en el 2011, en dicho país, las WMA llegaron a ser del 20 al 30 % del total de las mezclas asfálticas producidas, mientras en el 2007 representaban tan sólo el 2 %. En ese mismo

país, de 3 tecnologías de WMA de que se disponía en 2005, se pasó a 23 en 2010, y de 15 estados que habían hecho tramos de prueba en 2007, se llegó a 45 en 2010. Grandes cantidades de WMA se están aplicando en los países de la Unión Europea, principalmente en Francia, Holanda, Alemania, así como en China, en donde se estima que para el 2010 se habían aplicado 3,5 millones de toneladas (2).

Para validar el desarrollo de las WMA, se han realizado numerosos estudios e investigaciones de laboratorio y de campo. En este último caso, tanto la industria privada como las agencias viales han realizado y documentado tramos de prueba, de alguna naturaleza (promoción, demostración, validación o implementación). Para mayo de 2012, la Australian Road Research Board (ARRB) había identificado más de 160 documentos relacionados con tramos de prueba en Estados Unidos, Canadá, Europa, Asia, Suráfrica y Australasia (3).

Los resultados de evaluación, efectuados tanto en campo como en laboratorio, han puesto en evidencia que el desempeño de las WMA es equiparable, e incluso mejor, en ciertas circunstancias, que el de las HMA, aun cuando se tienen algunas preocupaciones relacionadas con la susceptibilidad a la humedad y con la resistencia al ahuellamiento a edad temprana; así mismo, por tratarse de tecnologías relativamente jóvenes en su aplicación –muchas de ellas menores de diez años– todavía existen inquietudes sobre su comportamiento a largo plazo.

El rápido crecimiento que han tenido las WMA, con experiencias exitosas en la construcción de pavimentos, hace necesario realizar una mayor difusión de ellas en nuestro medio, donde prácticamente no se conocen, con el propósito de promover su desarrollo. En este artículo se recogen los principales aspectos asociados con estas tecnologías, se presentan sus ventajas y limitaciones y la forma más común de clasificación, describiéndolas de manera general, pero haciendo especial énfasis en aquellas tecnologías en las que se trabaja con la inyección de agua para el espumado del asfalto, previendo el desarrollo de estudios sobre esta técnica en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería, dada la disponibilidad de una planta piloto para fabricar asfalto espumado. Igualmente, se presentan aspectos relacionados con el diseño, se resumen las principales características y propiedades de desempeño y se hacen consideraciones sobre el empleo de RAP en las WMA. Por último, se presentan algunas conclusiones y se dan

recomendaciones, orientadas a la implementación de las tecnologías de WMA en el país.

## CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE WMA

Las mezclas asfálticas en general se clasifican de diferentes maneras, una de ellas por la temperatura empleada para su fabricación. En los extremos del espectro de temperatura se encuentran las mezclas asfálticas en frío, que se fabrican a temperatura ambiente, del orden de 10 a 30 °C, y las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por su sigla en inglés), que típicamente se producen en un rango de temperaturas que van de 140 a 180 °C, dependiendo del tipo de cemento asfáltico usado. En el intermedio de las anteriores se encuentran las mezclas tibias (WMA) y las semitibias, que se diferencian por la temperatura resultante de la mezcla en planta (si es inferior a 100 °C, la mezcla es considerada semitibia<sup>1</sup>).

Entre las mezclas tibias existe un amplio rango de temperaturas de producción, con tecnologías en las que las mezclas se elaboran 10 a 20 °C por debajo de la de las HMA y otras en las que la producción de la mezcla se realiza a temperaturas ligeramente superiores a los 100 °C.

Una manera común de clasificar las WMA es de acuerdo con la tecnología utilizada para reducir la temperatura. Aun cuando no se tiene una clasificación estandarizada, las WMA se pueden agrupar en cuatro grandes categorías, a saber:

- *Tecnologías de espumado o tecnologías con agua.* Se basan en el principio del aumento de volumen que sufre el cemento asfáltico en presencia de agua, con la consiguiente disminución en la viscosidad y en la tensión superficial, lo que hace posible su mezcla con los agregados a menores temperaturas. Se subdividen a su vez en:
  - *Sistemas de inyección de agua o espumado mecánico.* Pequeñas cantidades de agua fría (1 a 3 % de la masa de asfalto) se inyectan al asfalto caliente (140-170 °C), empleando un dispositivo especial,

para producir el espumado. Algunos ejemplos de tecnologías WMA que usan este sistema son *Double Barrel Green*, *Ultrafoam GX*, *Aquablack*, *Aquafoam*, *Accu-Shear*, *LEAB*, *Terex Foam Mix Asphalt System* y *WAM Foam*.

- *Aditivos minerales que contienen agua.* Zeolitas naturales o sintéticas liberan agua a medida que se incrementa la temperatura, causando que ésta se vaporice y genere el espumado del asfalto. Pueden añadirse directamente en el mezclador, junto con los llenantes minerales, o inmediatamente después de ellos, pero en ambos casos antes de introducir el cemento asfáltico. *Aspha-min* y *Advera* son algunos ejemplos de estas tecnologías.
- *Sistemas con adición de agregados finos húmedos.* Generalmente en este proceso se mezclan el agregado grueso caliente con el asfalto y luego se incorpora, a temperatura ambiente, el agregado fino con un contenido de humedad entre el 3 y 4%, lo que causa el espumado del asfalto. *Low Energy Asphalt* (LEA) es un ejemplo de estos sistemas.
- *Aditivos orgánicos o ceras.* En esta categoría es posible disminuir la temperatura de mezclado debido a la reducción, que el aditivo genera, en la viscosidad del asfalto. Ejemplos de ella son, entre otros, *Sasobit*, *Asphaltan A* y *Romonta N*.
- *Aditivos químicos.* Usualmente incluyen la combinación de agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros o aditivos para mejorar el cubrimiento de los agregados por el asfalto, la trabajabilidad y la compactación, y promover la adherencia. *Evotherm*, *Evotherm ET*, *3G*, *Evotherm DAT*, *Rediset WMX*, *Cecabase* y *Revix* son algunos ejemplos dentro de esta categoría.
- *Sistemas híbridos.* Corresponden a la combinación de algunas de las tecnologías anteriores, como el *Low Emission Asphalt*.

A continuación se resumen algunos aspectos relacionados con varias de las tecnologías más comunes de WMA (cuadro 1). Se indican los requerimientos de las plantas convencionales de HMA para adaptarlas a la tecnología de WMA específica, el uso de aditivos, las temperaturas de producción y los costos asociados. De esta información es posible concluir que mientras en la mayoría de las tecnologías de espumado con sistema de inyección de agua se requiere una inversión inicial

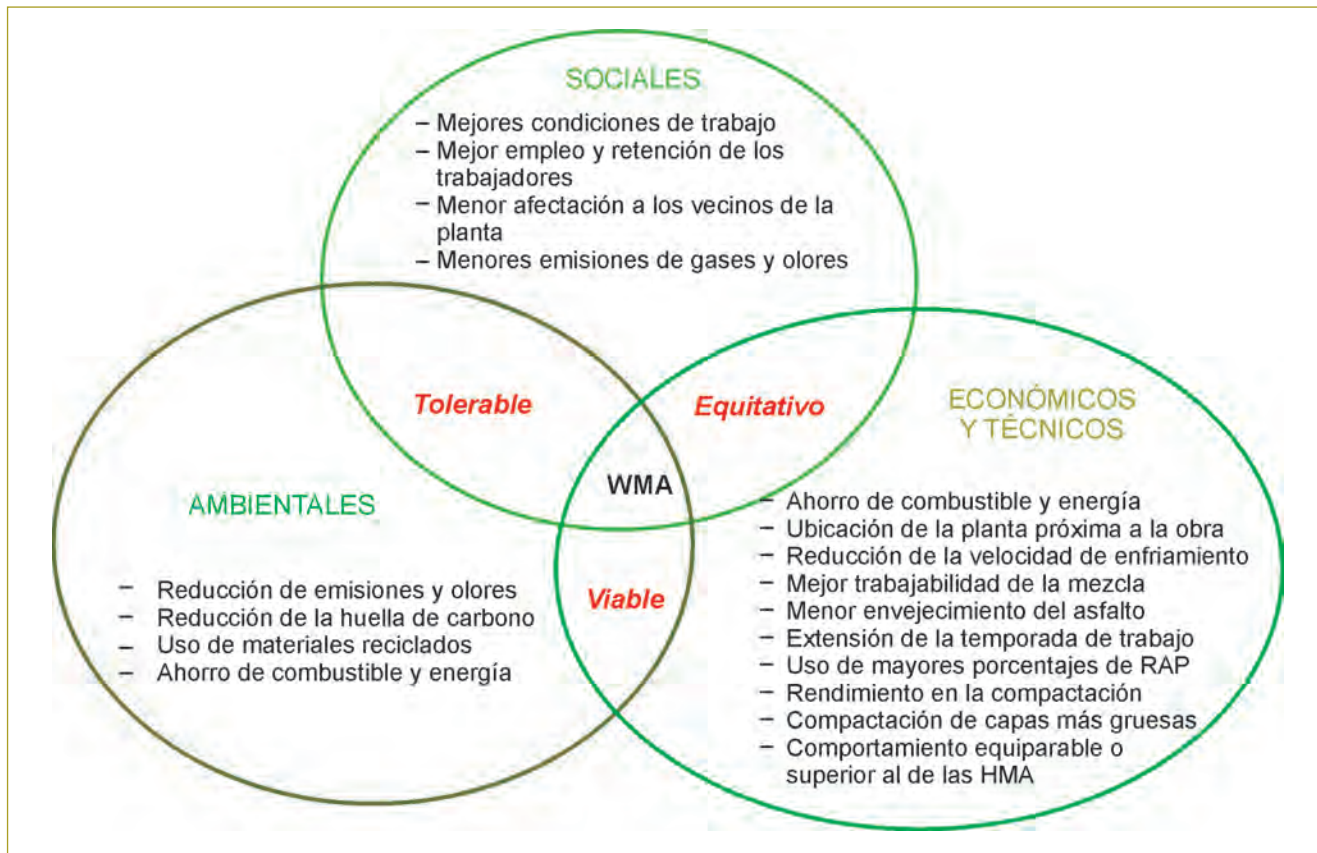
1. En algunos ambientes de habla hispana, las mezclas semitibias se conocen también como mezclas templadas.

**Cuadro 1**  
Descripción general de algunas tecnologías de WMA<sup>(3,4,16,26,27)</sup>

Tecnología	Descripción	Modificación Planta	País	Aditivos	Temperatura <sup>1</sup>	Costos adicionales
Double Barrel Green	Inyección de agua para espumado del asfalto	Tanque de reserva para el agua, sistema de control de inyección de agua con boquillas de espumado. El fabricante ofrece el kit completo y se puede instalar en plantas continuas y discontinuas de cualquier marca.	Estados Unidos	Agente <i>antistripping</i> , por elección.	116 - 135 °C	Entre US\$100.000 y US\$120.000 por modificación de equipo e instalación. Ningún incremento en el costo de la mezcla.
Aquablack WMA	Inyección de agua para espumado del asfalto	Boquillas de espumado, bomba de agua, sistema medidor y panel de control.	Estados Unidos	No son necesarios.	No está especificada	N.D.
Warm Mix Asphalt System	Inyección de agua para espumado del asfalto	Tanque de agua, bomba de agua, medidor de agua, cámara de expansión con múltiples boquillas.	Estados Unidos	No son necesarios.	[<32° C]	N.D.
LEAB	Basada en agua - Mezcla de agregados por debajo del punto de ebullición del agua.	Seis boquillas con cámaras de expansión se instalan en la línea de suministro de asfalto	Holanda	0,1 % del peso del asfalto para promover adherencia y cubrimiento.	90° C	N.D.
Low Energy Asphalt (LEA)	Basado en agua - Agregado grueso caliente mezclado con arena húmeda.	Tolva para alimentación del agregado fino húmedo con sistema medidor, adición de humedad y sistema de control, sistema de bomba y medidor en línea para aditivos.	Estados Unidos, Francia, España, Italia	±0,5 % del peso del asfalto, aditivo promotor de adherencia y cubrimiento.	105 - 124°C o ≤100°C	Modificación de equipos y costos de instalación entre US\$75.000 y US\$100.000. Incremento en costo de la mezcla entre US\$0,50 y US\$1,00.
Advera	Agua aportada por aditivo mineral -empleo de zeolita.	Alimentador modificado o selección de equipos especiales, ofrecidos por el productor del aditivo	Estados Unidos	0,25 % por peso de mezcla.	[10 - 3 0° C]	N.D.
Aspha-min	Agua aportada por aditivo - zeolita sintética.	Añadido en la planta de diferentes maneras (manual o automáticamente, en alimentación del RAP o de paleta).	Alemania, Estados Unidos	0,3% del peso de la mezcla.	[30°C]	N.D.
Sasobit	Uso de cera Fisher - Tropsch, en forma de polvo blanco o granulado.	Alimentador modificado o bomba neumática para adición en línea, o unidad de mezclado para agitar el Sasobit con el asfalto caliente. Cambio en el programa de mezclado, si se añade en el mezclador con peso en tolva. No se requieren modificaciones si es en forma de emulsión.	Principalmente Alemania, Unión Europea, Estados Unidos	1,0 a 3,0 % del peso de asfalto, dependiendo del país.	[10 - 54° C]	Ninguno a US\$40.000 por modificación de equipos o costos de instalación, US\$1,7/kg por costo de material. Incremento en costo por tonelada de mezcla entre US\$1,30 y US\$2,60.
WAMI-Foam	Proceso de espumado usando dos grados de asfalto. Asfalto blanco seguido por un asfalto duro espumado.	Se requiere una nueva línea de asfalto con sistema de adición de agua (boquilla) para introducir el asfalto duro en la mezcla. Las plantas de tambor son más fáciles de modificar.	Francia, Inglaterra, Holanda, Italia, Estados Unidos, Noruega	Pueden agregarse agentes <i>antistripping</i> al asfalto blanco	80 - 120° C, incluso se ha reportado a 62°C	US\$30.000 a US\$70.000 por modificación de la planta o costos de instalación. Impuestos entre US\$5.000 y US\$15.000 por año e incremento en costo de US\$0,30 por tonelada.
Evotherm ET	Paquete químico de agentes emulsificantes y aditivos.		E. Unidos, Francia, otros países	Despachado en forma de emulsión.	[37 - 75°C] 85 - 115°C	N.D.

1. Temperatura de producción [rango de reducción de temperatura].

N.D.: no disponible.



**Figura 1.** Beneficios de las tecnologías WMA.

en equipos para la adaptación de la planta, en las tecnologías que emplean aditivos –minerales, químicos u orgánicos– esta inversión es baja o prácticamente nula, pero se tiene un incremento permanente de costo en las mezclas, derivado del costo de los aditivos.

### VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS WMA

Las tecnologías de las WMA tienen diferentes niveles de impacto, dependiendo de cuánto se pueda reducir la temperatura de producción y, podría decirse, presentan diferente desempeño, dependiendo del tipo de proceso o de aditivo empleado; pero, en general, son tecnologías consideradas sostenibles por los beneficios ambientales, sociales, económicos y técnicos que se derivan de ellas (figura 1).

En cuanto a limitaciones, al igual que con los beneficios, éstas dependen del tipo de tecnología. De manera general, relacionadas con el desempeño de las WMA, se han observado las siguientes:

- Mayores niveles de deformación permanente –ahuellamiento– a edades tempranas, atribuibles posiblemente al menor envejecimiento del asfalto que se presenta al calentarlo a temperaturas más bajas.
- El comportamiento a largo plazo resulta difícil de precisar, por tratarse de tecnologías relativamente jóvenes, con datos insuficientes para su evaluación.
- Las menores temperaturas de mezcla y compactación también pueden contribuir a un secado incompleto de los agregados o a una vaporización parcial del agua en las tecnologías que involucran la introducción de este elemento para el espumado del asfalto, y conducir así a un incremento potencial de daño inducido por humedad en la mezcla resultante.
- Se requiere un tiempo de curado, especialmente en aquellas tecnologías cuyos procesos o productos incorporan humedad, para promover el cubrimiento de los agregados, al igual que la trabajabilidad y la compactación de las mezclas.

- Algunas características del asfalto pueden verse afectadas por ciertos aditivos, particularmente por los de tipo orgánico, los cuales, a bajas temperaturas, tienden a hacerlo más rígido, incrementándose el potencial de fisuración térmica.
- Mayores costos derivados de la implementación de la tecnología, asociados a las modificaciones necesarias de la planta de elaboración de la mezcla, a los aditivos o incluso a los costos de patentes.
- Algunos beneficios ambientales pueden perderse con la huella de carbón encubierta en algunas tecnologías que requieren la producción de aditivos o la fabricación de equipo adicional para la elaboración de la WMA. Es necesaria una adecuada evaluación del ciclo de vida.

## LAS TECNOLOGÍAS DE ESPUMADO MECÁNICO - DISEÑO Y DESEMPEÑO

Varias técnicas se aplican para transformar, de manera temporal, el asfalto en espuma, con la consecuente reducción de su viscosidad, en un corto periodo, lo que facilita la mezcla y el cubrimiento de los agregados por el asfalto a menores temperaturas. Cuando la espuma colapsa, el asfalto recupera su condición original, en principio, sin cambios en sus propiedades químicas ni reológicas.

Mientras que en laboratorio es relativamente simple producir WMA usando aditivos orgánicos o químicos con tecnologías de espumado que involucran sistemas de inyección de agua fría (1 a 3 %) al asfalto caliente (140 a 170 °C), resulta un poco más complicado reproducir, con propósitos de diseño, los procesos de producción y de compactación que se efectúan en planta y en campo. Los sistemas, procesos, equipos, boquillas, su distribución y ubicación en la planta y, en general, los principios de espumado, varían entre los proveedores o fabricantes de los equipos. Más adelante se presentan algunos ejemplos de boquillas y cámaras donde se produce el espumado del asfalto (figuras 2 y 3).

Para fabricar la espuma en laboratorio, tratando de simular las condiciones de producción en la planta de mezcla de algunas tecnologías de espumado, se han diseñado equipos piloto (figuras 4 y 5). Con este mismo propósito, se han ideado sistemas como el que se muestra esquemáticamente en la página siguiente (figura 6).

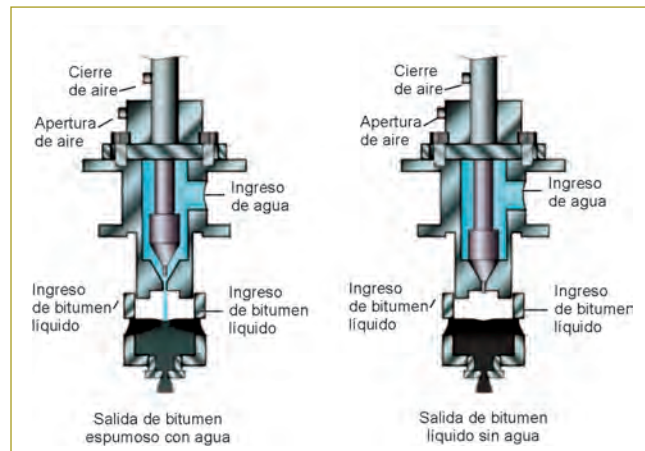


Figura 2. Boquilla del *Double Barrel Green*, de Astec (5).

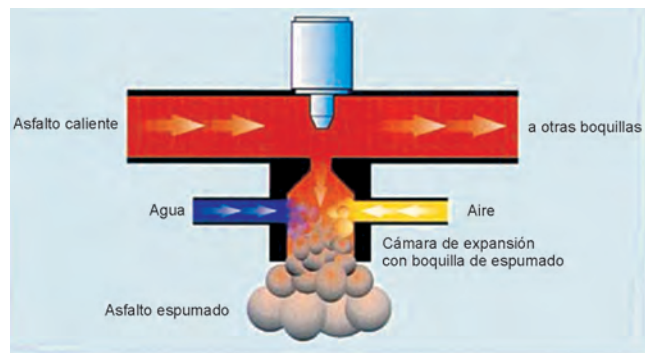


Figura 3. Boquilla de espumado, tecnología Wirtgen GmbH (6).



Figura 4. Esquema del *Foamer*, Pavement Technology Inc. (7).





**Figura 5.** Planta piloto para fabricar asfalto espumado, Wirtgen GmbH.

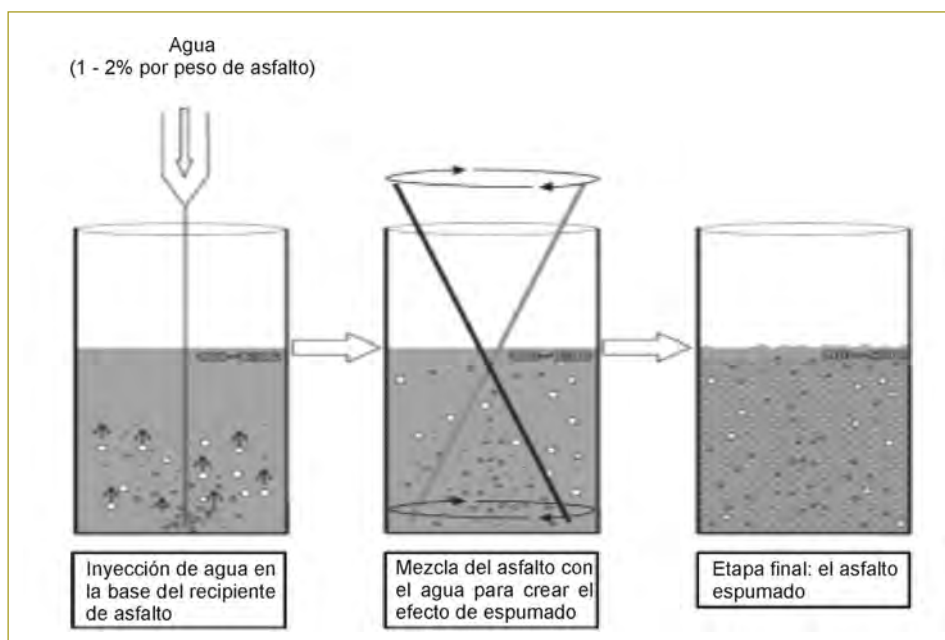
Varias de las tecnologías de espumado mecánico para fabricar WMA están patentadas, y no se tienen estudios disponibles sobre cómo los equipos o sistemas para la fabricación de la espuma de asfalto afectan la calidad de ésta, en cuanto a la relación de expansión –relación entre el volumen máximo del asfalto en forma de espuma y el volumen de éste una vez que la espuma ha menguado completamente– y a la estabilidad o vida media –tiempo, medido en segundos, que tarda la espuma en sedimentarse desde su volumen máximo hasta la mitad del volumen expandido–.

Algunos proveedores de estas tecnologías, como Stansteel™ y Maxam Equipment, aseguran que con sus sistemas Accu-Shear™ y AQUABlack™ la acción de espumado del asfalto aumenta más que en los

métodos tradicionales de inyección de agua. En el caso de Accu-Shear, se utiliza un proceso especial de cizallamiento para mezclar el agua con el asfalto, por medio de un molino coloidal, y también es posible introducir, junto con el agua, aditivos químicos usados para fabricar WMA u otros aditivos líquidos, para favorecer el espumado o promover la adherencia del asfalto con los agregados. AQUABlack utiliza un sistema patentado, desarrollado por Maxam, denominado Microbubble™, con el que se producen microburbujas en el asfalto al inyectar agua a una presión superior a las 1000 lb/pg<sup>2</sup>, aumentando la expansión y mejorándose la trabajabilidad de la mezcla por un tiempo mayor, debido a que la espuma es más estable.

Está demostrado que las propiedades de la espuma también dependen de la cantidad de agua inyectada, de la temperatura del asfalto y de la fuente y del tipo de asfalto, aun cuando no se tiene una relación directa entre las propiedades físicas de éste y el comportamiento de la espuma. El empleo de ciertos aditivos, tales como surfactantes o superplastificantes, puede promover una mejor calidad de la espuma.

Actualmente, no se cuenta con correlaciones entre las propiedades de la espuma y las propiedades de la mezcla, tales como compactación, densidad o trabajabilidad. Aunque es evidente el efecto benéfico del espumado en el momento de la elaboración de la mezcla, aún no se tiene claro, en estas tecnologías, por cuánto



**Figura 6.** Sistema para la fabricación de asfalto espumado en el laboratorio (8).

tiempo permanece la mezcla trabajable para realizar la compactación. Por lo anterior, guías para la evaluación de la espuma de asfalto, para su empleo en la fabricación de WMA, no han sido implementadas por la industria o especificadas por las agencias viales.

De varios de los sistemas de espumado no se conoce que tengan disponibles plantas pilotos para los diseños de laboratorio, por lo que normalmente las mezclas tibias con esta tecnología se elaboran siguiendo sólo las recomendaciones del fabricante. En algunos casos, en los diseños de laboratorio se emplea asfalto no espumado a menor temperatura para elaborar las mezclas y luego las propiedades se verifican directamente con el material producido en planta. La práctica más extendida para el diseño de las WMA consiste en utilizar los procedimientos de diseño de una HMA estándar, siguiendo las metodologías Marshall o Superpave, con ligeras adaptaciones.

En el Reporte 691 de la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (9), se presentan recomendaciones sobre los métodos de diseño de mezclas para las WMA, las cuales están incluidas en el apéndice “Consideraciones especiales y métodos de diseño de mezclas asfálticas tibias (WMA)” de la norma AASHTO R35. Una de las consideraciones más relevantes de este reporte es que para el diseño de una WMA se pueden aplicar los resultados de los diseños de una HMA, cuando la absorción de asfalto en la mezcla es menor de 1 %. De hecho, aun cuando en las WMA se reconoce que, debido a las menores temperaturas de mezclado se presenta en principio una menor absorción de asfalto por parte de los agregados, normalmente las mezclas se fabrican con el contenido de asfalto correspondiente al óptimo determinado en el diseño de la HMA.

En las tecnologías de WMA en general, en particular en las que involucran el espumado mecánico del asfalto, las temperaturas de mezcla y de compactación están asociadas a aquellas con las cuales se obtienen un adecuado cubrimiento de los agregados por el asfalto y una compactabilidad apropiada de la mezcla. Algunas referencias (4) indican que la selección de la temperatura de compactación se puede hacer comparando la densidad de probetas de WMA, fabricadas a diferentes temperaturas, con la densidad de una HMA de referencia (la temperatura de la WMA a la cual ambas densidades son iguales se toma como la temperatura de compactación).

Para las tecnologías de WMA en las que se incorpora agua para el espumado del asfalto, varias referencias (9, 10) sugieren tener en cuenta en los diseños en laboratorio un tiempo de curado de la mezcla, antes de la compactación, para expeler la humedad y obtener así predicciones de comportamiento más realistas.

Teniendo en cuenta que en la WMA la compactabilidad, el cubrimiento, la resistencia a la deformación permanente - ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla, varían con respecto a la HMA, estas propiedades deben ser evaluadas dentro de los procesos de diseño. Un gran número de investigaciones efectuadas en laboratorio se han enfocado en la evaluación de estas propiedades, comparándolas con las encontradas en una HMA equivalente.

En estudios realizados en la Michigan Technological University, por Wei Goh (8), donde se trabajó con el sistema de espumado ya mostrado (figura 6), se elaboraron mezclas tibias con espumas de asfalto, fabricadas variando la concentración de agua (1, 1,5 y 2 %) y las temperaturas de calentamiento del asfalto (100, 115 y 130 °C) a las cuales también se les hicieron la mezcla y la compactación. Las probetas así fabricadas se ensayaron y evaluaron, comparándolas con una HMA equivalente o de control, elaborada a 165 °C y compactada a 153 °C, con los siguientes resultados: el módulo dinámico  $|E^*|$  de las WMA no se vio afectado por la temperatura ni por la cantidad de agua y, en todos los casos, su magnitud fue inferior al obtenido en la HMA de control; la resistencia a la tracción indirecta (ITS) también fue menor en las WMA que la de la mezcla de control y, en algunos casos, la resistencia conservada fue superior a 1,0. Las WMA presentaron mayor vida de fatiga y mayor ahuellamiento que la HMA de control.

En estudios efectuados en el estado de Washington (11, 12) se evaluó el comportamiento en laboratorio y en campo de varias tecnologías de mezclas tibias, entre ellas las de espumado mecánico, comparándolas también con HMA equivalentes, usadas como control. Los resultados de campo revelan que en las WMA se alcanzaron compactaciones y desempeños semejantes a los de las mezclas de control. Las propiedades, medidas en el laboratorio, de rigidez, fatiga y de susceptibilidad a la humedad, también fueron equiparables a las obtenidas en las correspondientes HMA, exhibiendo, en general, mayor resistencia a la fisuración térmica y menor resistencia al ahuellamiento que éstas. La conclusión

general de estos estudios es que las WMA parecen ser una alternativa aceptable para reemplazar las HMA.

Ali y otros (13) evaluaron el comportamiento en laboratorio de WMA fabricadas con calizas y gravas naturales y asfaltos convencionales y modificados, espumados en una planta piloto (figura 5). Los resultados muestran en las WMA gravedades específicas máximas ligeramente menores que en las HMA equivalentes, tal vez debido a dos factores: la presencia de burbujas de aire en el asfalto espumado, aun después del mezclado, y la reducción ligera que se presenta en la cantidad de asfalto absorbido por el agregado. En todos los casos, en las WMA se presentó buen cubrimiento de los agregados por el asfalto, mejores trabajabilidad y compactabilidad, menores resistencias a la tracción indirecta (ITS), y resistencias conservadas y módulos dinámicos similares a los obtenidos con las HMA equivalentes. Los resultados sugieren que usando agregados y asfaltos apropiados se pueden resolver los efectos adversos que pueda presentar la tecnología de espumado en el desempeño de la mezcla y corroboran que las WMA se pueden producir y colocar a menores temperaturas, dando lugar a mezclas con propiedades, en general, similares a las de las HMA tradicionales.

Sobre las WMA que emplean la técnica de espumado, varias agencias viales e investigadores tienen inquietudes sobre el agua que pueda permanecer, tanto en las muestras de laboratorio como en el pavimento en servicio, por un periodo de tiempo significativo después de la compactación. Es posible que al realizar los ensayos los resultados se vean afectados significativamente por la presencia de agua y no sea posible predecir con mayor precisión el desempeño real de las mezclas en servicio. Las evidencias obtenidas por el Instituto de Transporte y la Universidad de Texas A&M (14) indican que, ocasionalmente, las mezclas frescas o recién fabricadas no pasan la prueba de ahuellamiento en la rueda de Hamburger, pero cumplen después de cierto periodo, por lo que recomiendan un procedimiento de curado.

Aun cuando los resultados de laboratorio para las WMA que emplean técnicas de espumado, algunas veces predicen que no se comportarán tan bien como las HMA en términos de susceptibilidad a la humedad y al ahuellamiento, los resultados obtenidos en el campo y en tramos de prueba de diferentes categorías: desarrollo, demostración, implementación o validación, indican lo contrario (3, 15, 16, 17). En estas experiencias, las

temperaturas de producción de las WMA han variado entre 120 y 145 °C y las mezclas han sido colocadas a temperaturas tan bajas como 115 °C, con ahorros de energía del 24 %. Los resultados han puesto en evidencia que las WMA presentan comportamientos equiparables al de las HMA usadas de referencia, con buena trabajabilidad, compactación equivalente y adecuada rigidez. Su resistencia en pruebas de tracción indirecta se incrementa con el tiempo a valores similares a los obtenidos con las HMA, no se aprecia una diferencia sustancial entre el ahuellamiento de los dos tipos de mezcla y se ha visto que son más resistentes al agrietamiento térmico que sus correspondientes HMA.

En síntesis, en la producción de WMA con técnicas de espumado, la durabilidad y el daño por humedad son las mayores preocupaciones. Sin embargo, el uso de aditivos *antistripping* y, en especial, de cal hidratada, para disminuir la susceptibilidad a la humedad, ha sido probado con buenos resultados (7).

Así mismo, se han tenido experiencias exitosas de las tecnologías WMA con espumado mecánico, empleando asfalto – caucho (19, 20), asfaltos modificados con polímeros y, en particular, usando diferentes concentraciones de asfaltos recuperados de pavimentos (RAP).

## RAP EN LAS WMA

La escasez de fuentes de agregados pétreos y el aumento en las distancias de transporte de estos materiales, con los consecuentes incrementos en los costos, en los consumos energéticos y en la emisión de gases, los elevados costos del asfalto y el uso racional de los recursos no renovables, son las razones principales que han conducido a las agencias de transporte y a los contratistas, a mostrar un creciente interés en el uso de RAP en aplicaciones viales, especialmente en la producción de mezclas asfálticas.

El empleo de 20 a 50 % de RAP en las mezclas asfálticas puede generar ahorros del orden del 35 % en su costo, por lo que resulta ideal maximizar la cantidad de RAP para minimizar la cantidad de materiales vírgenes y, por consiguiente, el costo de la mezcla. De manera general, en una mezcla asfáltica se define un alto contenido de RAP a partir del 25 % de este material por masa de la mezcla total (21).

En Estados Unidos, el empleo de RAP en mezclas asfálticas ha tenido un crecimiento importante en los

últimos años. En 2007, la FHWA conformó un grupo de expertos para promover su uso entre los contratistas y las agencias de transporte. Para ese mismo año, el RAP constituía, aproximadamente, el 12 % en volumen del total de las mezclas asfálticas producidas en este país. Entre los años 2007 y 2009, cerca de 27 estados incrementaron la cantidad de RAP permitida en las mezclas asfálticas, y para el 2009, 23 habían experimentado con altos contenidos de RAP. En el año 2011, más de 40 estados ya permitían el empleo de RAP en cantidades superiores al 30 %. La limitación de la proporción de RAP en las mezclas asfálticas se ha debido, principalmente, a la ausencia de guías que orienten su uso y de información documentada sobre su desempeño a largo plazo.

El RAP es inherentemente un material rígido, debido al endurecimiento sufrido por el asfalto a causa de la oxidación y de otros mecanismos de envejecimiento que tienen lugar durante la exposición al ambiente del pavimento en servicio. La presencia de RAP en las mezclas asfálticas aumenta su rigidez, haciéndolas más propensas al agrietamiento, lo que ha sido otra razón para que se limite su uso.

En un esfuerzo por reducir el efecto de rigidización de las mezclas, asociado con el asfalto envejecido del RAP, recientemente se ha introducido su empleo en los procesos de WMA, aumentando así los beneficios de pavimentación sostenible, probados en ambas tecnologías. En general, se ha encontrado que las WMA con alto contenido de RAP no presentan cambios significativos en sus propiedades o en el desempeño, aun cuando son mezclas más rígidas, lo que sugiere una mayor susceptibilidad al agrietamiento. Sin embargo, si se comparan con las mismas WMA, sin RAP, aquellas presentan mayor resistencia al ahuellamiento y menor susceptibilidad a la humedad.

La mayor posibilidad de uso de RAP en las WMA se encuentra justificada en la reducción en la temperatura de mezclado. Se prevé que la mezcla del asfalto envejecido del RAP con el asfalto adicionado en el proceso en tibio tendrá mejores propiedades que las de la misma mezcla de asfaltos, obtenida a través de un proceso en caliente, debido al menor envejecimiento que se presenta en los asfaltos. Adicionalmente, con la reducción de la viscosidad del asfalto en las WMA, mezclas más rígidas se pueden hacer más fáciles de trabajar.

Los factores claves que gobiernan la producción de mezclas asfálticas con RAP de buena calidad incluyen la uniformidad en las propiedades de los agregados y del asfalto presentes en el RAP y el conocimiento de dichas propiedades, especialmente el contenido de asfalto se debe tener en cuenta en la etapa de diseño, verificando regularmente su consistencia. Si el contenido de RAP supera el 12 %, se recomienda triturarlo y tamizarlo para separarlo por fracciones, asegurando de esta manera su consistencia y facilitándose el control de su granulometría y de su contenido de asfalto.

El RAP se puede obtener de las capas asfálticas existentes con máquinas fresadoras, lo cual constituye la práctica más común en muchos países desarrollados, aun cuando para este mismo propósito también es posible el uso de excavadoras o de buldóceres. El RAP luego es transportado a sitios de acopio o a plantas de trituración o de producción de mezclas asfálticas. El material obtenido por fresado tiene ventajas sobre las otras formas de obtención, entre ellas la fragmentación hasta alcanzar un tamaño uniforme y el retiro en el espesor especificado sin alteración de las capas subyacentes, preservándose así la calidad del material.

Otro aspecto importante que hay que considerar en los procesos de WMA que involucran el uso de RAP es el contenido de humedad de este material. Altos contenidos de humedad dan lugar a una disminución en la tasa de producción de la mezcla e incrementan los costos de energía y la emisión de gases. Tan solo un cambio del 1 % en el contenido de humedad, resulta en un cambio del 10 % en el consumo de combustible requerido para calentar el RAP. Por lo anterior, es ideal que la humedad en el RAP sea uniforme y no exceda de 4 %. Tomando en cuenta que el RAP, por su naturaleza, tiende a retener humedad en mayor extensión que los agregados, se han generado guías y orientaciones (2, 19) para su acopio y procesamiento.

En la práctica, el asfalto comúnmente empleado en las WMA que contienen 10 % RAP corresponde al tipo 60/70. Cuando el porcentaje de RAP aumenta, se hace necesario usar asfaltos más blandos, como los de los tipos 80/100 o 150/200. La selección del asfalto apropiado dependerá no solamente de la cantidad de RAP, sino también de las propiedades del asfalto que éste contenga. Los diseños con RAP requieren hacer suposiciones con respecto a la interacción entre el asfalto envejecido del RAP y el asfalto adicionado. El

concepto de roca negra asume que el asfalto del RAP no interactúa con el asfalto nuevo, mientras que el concepto de mezcla total asume una interacción completa. En el primer caso, el asfalto presente en el RAP no es tenido en cuenta, en el segundo sí. A la fecha, no hay una teoría definitiva a este respecto, requiriéndose mayores estudios en los que se investigue cómo es la interacción entre el asfalto envejecido y el asfalto adicionado en los procesos de fabricación de las WMA.

Se han realizado estudios, tanto en campo como en laboratorio, para evaluar el comportamiento de las WMA que emplean la técnica de espumado, con diferentes concentraciones de RAP y, en general, se han obtenido comportamientos adecuados (23, 24, 25). Por ejemplo, Middleton y Forfyflow (16), investigaron las propiedades de WMA fabricadas en el Double Barrel Green, usando concentraciones de RAP de 15 y 50 %, comparando su comportamiento con el de mezclas fabricadas con agregados vírgenes, concluyendo que la presencia de RAP no rigidizó significativamente las mezclas y se mejoraron las resistencias al ahuellamiento y al daño por humedad. En Alemania se han construido tramos experimentales con contenidos de RAP tan altos como 90-100 %, empleando *Sasobit* y *Aspha-min* para la elaboración de las WMA. En Holanda, la técnica LEAB para fabricar WMA se realiza de manera rutinaria usando 50 % de RAP.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Numerosas investigaciones reconocen en las WMA beneficios ambientales, sociales, económicos y técnicos, cuya magnitud varía dependiendo de la tecnología. En general, coinciden en que con las WMA se obtienen reducciones en el consumo de energía y en la emisión de GHG y una mejor trabajabilidad, lográndose compactaciones adecuadas en condiciones climáticas adversas, siendo posible operar mayores distancias de acarreo, incorporar mayores concentraciones de RAP y mejorar las condiciones de trabajo de los operadores.
- Empleando tecnologías de WMA, se han fabricado mezclas densas, mezclas de tipo SMA, mezclas porosas y másticos, usando diferentes tipos de agregados y de asfaltos, incluyendo asfaltos modificados con polímeros. Las mezclas han sido colocadas en una gran variedad de espesores, para soportar diferentes niveles de tránsito, comportándose satisfactoriamente.
- Las WMA admiten mayores concentraciones de RAP que las HMA, lo que las hace más atractivas desde puntos de vista energético, económico y de preservación de los recursos naturales.
- Para las tecnologías de WMA que usan agua para el espumado del asfalto, se tienen inquietudes acerca de su desempeño, en especial con respecto al daño inducido por la humedad y a las deformaciones permanentes que se puedan presentar a edades tempranas. Sin embargo, las experiencias de campo están poniendo en evidencia un adecuado comportamiento en estos aspectos.
- Mientras que en el laboratorio es relativamente simple producir WMA con aditivos orgánicos o químicos, debido a que solamente requieren la adición de la cantidad correcta de aditivo, la producción de WMA usando tecnologías de espumado mecánico es complicada, por cuanto requiere equipos especiales.
- El desarrollo de las WMA es, sin lugar a dudas, uno de los mayores logros recientes de la industria del asfalto. Los tramos de prueba contribuirán en gran medida a ganar suficiente confianza y conocimiento para la producción y la colocación a temperaturas, como mínimo 20 °C por debajo de las mezclas tradicionales en caliente, así como para la incorporación de cantidades significativas de RAP.
- Teniendo en cuenta que el desempeño de las tecnologías de WMA varía dependiendo de las circunstancias, para evaluar las características de un proceso y de un producto en particular, es recomendable ejecutar un examen cuidadoso con los materiales locales, en las condiciones climáticas del proyecto, antes de su implementación. Las WMA tienen el potencial para remplazar las HMA y, en circunstancias especiales, pueden tener ventajas sobre éstas.
- Una estrategia en la promoción y evaluación de las tecnologías de WMA es incluir, en las demostraciones o tramos de prueba, una sección construida con una HMA de control o equivalente, colocada en las condiciones especificadas, lo que permitirá una comparación directa de la trabajabilidad y del desempeño en campo.
- Es recomendable implementar análisis de costos e impactos del ciclo de vida, que involucren la evaluación de la producción de los materiales vírgenes

y la manufactura de las mezclas, al igual que su distribución, uso y disposición. El desarrollo y la implementación de las WMA dependerá, en gran medida, de los resultados que se obtengan de esta evaluación.

## REFERENCIAS

- Campagnoli, S.X. (2012, julio-septiembre). Algunas prácticas asociadas con el desarrollo sostenible en pavimentos. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*, N.º 87. ISSN 0121-5132, pp. 15-25.
- Sabita (2011, September). *Best practice guideline for warm mix asphalt Manual 32*.
- Papacostas, A., Vuong, B., Sharp, K., Rebbechi, J., Boer, S. (2012, November) *Review of Overseas Trials of Warm Mix Asphalt Pavements and Current Usage by Austroads Members Austroads*. Technical Report AP-T215-12. ISBN 978-1-921991-57-8 ARRB Group.
- Zaumanis, M. (2010). *Warm mix asphalt investigation*. Master of Science thesis, Technical University of Denmark. In cooperation with: Danish Road Institute, Denmark.
- [http://es.astecinc.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=117&Itemid=188](http://es.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188).
- Wirtgen GmbH. *Foamed bitumen – The innovative binding agent for road construction*.
- Malladi, H. (2012). *Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Technologies for Moisture and Rutting Susceptibility*. A thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Raleigh, North Carolina.
- Goh, Shu Wei (2012). *Development and improvement of Warm-Mix Asphalt Technology*. A dissertation, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Michigan Technological University.
- Bonaquist, R. (2011). *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. NCHRP Report 691. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Chowdhury, A. Button, J.W. (2008). *A Review of Warm Mix Asphalt*, Report 473700-00080-1. Texas Transportation Institute, Texas A&M University. System College Station, Texas.
- Bower, N., Wen, H., Willoughby, K., Weston, J., DeVol, J. (2012, October). *Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalt in Washington State WA-RD 781.1 - WSDOT Research Report*.
- Bower, N. (2011, December). *Laboratory evaluation of performance of warm mix asphalt in Washington State*. A thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering. Washington State University. Department of Civil and Environmental Engineering.
- Ali, A. W., Abbas, A.R., Nazzal, M., Powers, D. (2012). *Laboratory Evaluation of Foamed Warm Mix Asphalt*. *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 5, N.º 2.
- Estakhri, C., Button, J. & Alvarez, A. (2010, July). *Field and laboratory investigation of Warm Mix Asphalt in Texas*. Texas Transportation Institute Texas A&M University System. FHWA/TX-10/0-5597-2.
- Kvasnak, A., Taylor, A., Signore, J.M. & Bikhari, S.A. (2010, July). *Evaluation of Gencor Green Machine Ultrafoam GX*. NCAT Report 10-03. Final report.
- Middleton, B. & Forfyflow, R.W. (2008, abril). *An evaluation of Warm Mix Asphalt produced with the Doble Barrel Green process*. 7th International Conference on Managing Pavement Assets. Transportation Research Record, N.º 2126 (pp. 19-26) (Icmpa), Calgary.
- Nortjé, W., Lewis, A. & Lewis, T. (2011, September). *Full-scale implementation of Warm Mix Asphalt in South Africa*. 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.
- Prowell, B.D. (2007, julio). *Warm Mix Asphalt. The International Technology Scanning Program*. Summary Report. Submitted to American Trade Initiatives.
- Jones, D., Wu, R., Barros, C. & Peterson, J. *Research findings on the use of Rubbierized Warm-Mix Asphalt in California*.
- Hicks, R.G., Cheng, D. & Teesdale, T. (2010). *Assessment of Warm Mix technologies for Use with Asphalt Rubber Paving applications*. California Integrated Waste Management Board – CIWMB. Tech Report 2010-103 TM. 5-14-2010.
- Vargas-Nordbeck, A. & Timm, D.H. (2013). *Physical and structural characterization of sustainable asphalt pavement sections at the NCAT test track*. NCAT Report 13-02. National Center for Asphalt Technology, Auburn University. February 18.
- Croteau, J-M. & Tessier, B. (2008). *Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's perspective*. Paper prepared for presentation at the "Warm Asphalt Technology as a Sustainable Strategy for Pavements" Session of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- Hajj, E., Chia, Ch., Sebaaly, P. E., Kasozi, A. M. & Gibson, S. (2011). *Properties of Foamed Warm-mix Asphalt incorporating Recycled Asphalt Pavement from two field projects – case studies*. Revised: August 22.
- Hill, B. (2011). *Performance evaluation of Warm Mix Asphalt mixtures incorporating Reclaimed Asphalt Pavement* - Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in Civil Engineering in the graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois.
- O'Sullivan, K. & Wall, P.A. (2009). *The effects of Warm Mix Asphalt additives on Recycled Asphalt Pavement*. A major qualifying project report submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science. March 6.
- Hanz, A.J. (2012). *Quantifying the Impacts of Warm Mix Asphalt on Constructability and Performance*. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Civil & Environmental Engineering) University of Wisconsin – Madison.
- Gutiérrez, J.C. (2011). *Definición, análisis y aplicabilidad de las mezclas asfálticas en tibio en Chile*. Memoria para optar al título de ingeniero constructor. Chile.
- Kristjánsdóttir, O. (2010, June). *Warm Mix Asphalt Technology Adoption*. NVF 33 Annual Meeting, Trondheim, Norway.
- Tsai, J., Lai Y.J., Tsai & Wang, Z. (2010, June). *Evaluating Constructability and Properties of Warm Mix Asphalt*. Final Report. Georgia Institute of Technology. The Georgia Department of Transportation. FHWA-GA-10-0904.
- Sargand, S., Figueroa, J.L., Edwards, W., Al-Rawashdeh, A. (2009, September). *Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements*. Ohio Research Institute for Transportation and the Environment (Orite), FHWA/OH-2009/08.
- Nishant Mukeshkumar, Sheth (2010). *Evaluation of selected warm mix asphalt additives*. University of Iowa. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree in Civil and Environmental Engineering in the Graduate College of The University of Iowa.

32. Diefenderfer, S. D., McGhee, K. K. & Donaldson B. M. (2007, April). *Installation of Warm Mix Asphalt Projects in Virginia*. Virginia Transportation Research Council FHWA/VTRC 07-R25.
33. D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T. et al. (2008, February). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. American Trade Initiatives FHWA-PL-08-007.
34. Santucci, L. (2010). *Warm Mix Asphalt Hits the Road*, Pavement technology update, Technology Transfer Program, Vol. 2, N.º 1.
35. Perkins, S.W. (2009, November). *Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving strategies for use in Montana highway construction*. FHWA/MT-09-009/8117-38. Final report. Prepared for the State of Montana Department of Transportation. In cooperation with The U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
36. Papacostas, A., Sharp, K. & Malone, S. (2013). *Evaluation Protocol for Warm Mix Asphalt*. ISBN 978-1-921991-83-7. Austroads Project No. TT1454. Austroads Publication N.º AP-T231-13, ARRB Group.
37. Worrall, J. & Choi, Y. (2007). *Warm Mix Asphalt (WMA) Review*. ISBN 978-1-921329-37-1. Austroads Project No. TT1220. Austroads Publication N.º AP-T91/07. Austroads technical report.
38. Papacostas, A., Choi, Y., Malone, S. & Sharp, K. (2013). *Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixes*. ISBN 978-1-921991-82-0. Austroads Project No. TT1454. Austroads Publication N.º AP-T230-13. Austroads technical report.
39. Carbone, T. & Alderson, A. (2010). *Review of the Environmental Aspects of Warm Mix Asphalt*. ISBN 978-1-921709-30-2. Austroads Project N.º TT1454. Austroads Publication N.º AP-T163/10.
40. Papacostas, A., Sharp, K., Patrick, S., Thananjeyan, A. & Simpson, C. (2012). *Field Validation of Warm Mix Asphalt Pavements*. ISBN 978-1-921991-56-1. Austroads Project N.º TT1454. Austroads. Publication N.º AP-T214-12. Project ARRB Group.
41. NCHRP (2012). *Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP REPORT 714, Washington, D.C.
42. Campagnoli, S.X. (2008). *Tendencias actuales en la tecnología de los asfaltos espumados*. VI Jornadas Internacionales del Asfalto. Bucaramanga, Colombia.





# Entrevista

## Los grandes retos de la locomotora del transporte

Entrevista: Gustavo Veloza

### **CECILIA ÁLVAREZ-CORREA GLEN**

Ministra de Transporte

Ingeniera industrial de la Pontificia Universidad Javeriana y especialista en Finanzas Privadas del Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.

A lo largo de sus más de 25 años de experiencia laboral se ha desempeñado como vicepresidenta ejecutiva de La Previsora S.A., vicepresidenta de Contraloría de Bavaria S.A., consejera económica, ministra consejera de la Presidencia de la República, y ha prestado sus servicios profesionales al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

El presidente Juan Manuel Santos la nombró ministra de Transporte mediante el Decreto 1847 del 3 de septiembre de 2012. Su experiencia también le ha servido para ser miembro de la junta directiva de respetadas empresas, como Emcali, Telefónica S.A., Cervecería del Grupo Santo Domingo en Portugal, Propilco S.A., Nacional de Seguros, Cervecería Bavaria de Ecuador, Banco Comercial Antioqueño de Panamá y Presto S.A.

La ministra Cecilia Álvarez-Correa es la encargada de que el transporte, el tránsito y la infraestructura del país funcionen cada vez mejor para los colombianos.

- La implementación de grandes proyectos viales debe dirigir el país hacia elevados índices de desarrollo.
- El desarrollo de la logística multimodal debe generar un avance notorio en la infraestructura del sector para aprovechar al máximo los tratados de libre comercio (TLC) que Colombia ha firmado con otras naciones

El Ministerio de Transporte, junto con sus entidades adscritas, elaboró un plan que consta de 70 proyectos viales, férreos, fluviales, aeroportuarios y portuarios, indispensables para la conectividad y productividad del país.

En entrevista concedida a la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, la ministra de Transporte, Cecilia Álvarez-Correa Glen, esboza los aspectos principales de su gestión y la forma como se va a dirigir este sector, fundamental dentro de la infraestructura del país, para alcanzar altos grados de competitividad.

### **CALIDAD DE LA INGENIERÍA**

**¿Cuál es la visión del gobierno frente a la calidad de la ingeniería nacional en la infraestructura del transporte?**

Cada vez existen nuevos retos en materia de ejecución de infraestructura para la ingeniería nacional. Es así como el ministerio promueve, por intermedio de sus ejecutores, el cumplimiento de estándares de calidad más elevados en los proyectos del sector, pues considera que el país cuenta con muy buenas firmas de ingeniería, bastante competentes, capaces de asumir los desafíos que presentan nuestros proyectos.

Además de que muchas de estas firmas tienen ya valiosa experiencia internacional, desde el ministerio hemos incentivado la asociación de compañías nacionales

con extranjeras para participar en los proyectos, y con esto generar, paralelamente, una serie de sinergias en todos los espectros de ingeniería, transferencia tecnológica y de conocimientos, que les permitan a nuestros profesionales potenciar sus capacidades y aprender de aquellos que cuentan con un mayor recorrido en el ramo.

### ¿Se requieren más profesionales para atender las enormes exigencias actuales de la infraestructura?

Ya arrancó la nueva ola de la Cuarta Generación de Concesiones Viales, algo sin precedentes en el país; con ella seguramente se va a requerir que la ingeniería colombiana esté preparada con profesionales aptos para asumir este gran reto.

### ¿Qué debería hacerse para mejorar los programas académicos de ingeniería?

Ante la multimodalidad a la que le apunta el gobierno nacional, necesitamos que la ingeniería civil y de transporte desarrolle líneas de profundización en los modos que el país desea reactivar, tales como el férreo, fluvial y aéreo, para romper el desequilibrio entre los modos. Sería muy positivo incluirlo dentro de los pénsams educativos.

Por otra parte, el Consejo Profesional Nacional de Ingeniería (Copnia), que vela por las buenas prácticas de los ingenieros, insiste en la necesidad de instaurar unas cátedras de ética profesional. Esta es una solicitud que acompaña y coadyuva integralmente nuestro ministerio.



## MOVILIDAD

### ¿Cómo está la movilidad en el país?

En Colombia estamos experimentando el mismo fenómeno de la inmensa mayoría de los países en vías de desarrollo: un incremento acelerado en la compra y uso de automóviles y motocicletas. En las calles, esto se traduce en congestión, ruido, contaminación y accidentes viales. Las personas se ven afectadas a diario por estos impactos, razón por la cual reclaman permanentemente acciones claras para atacar los problemas de movilidad urbana.

El Estado lo ha entendido y por eso desde hace más de una década ha venido implementando paulatina y progresivamente el Programa Nacional de Transporte Urbano, conformado por sistemas integrados de transporte masivo (SITM) y sistemas estratégicos de transporte público (SETP) para prestar este servicio de manera sostenible, a un precio razonable y con un nivel de calidad adecuado. Esto con el ánimo de incentivar el uso del transporte público y de aliviar la carga sobre las vías.

### ¿Este programa ya funciona en todas las ciudades?

En el programa hay catorce ciudades con áreas metropolitanas; seis de ellas ya se encuentran operando y movilizan diariamente cerca de 2,6 millones de colombianos, los cuales en promedio se están ahorrando el 40 % de sus tiempos de viaje.

Es destacable que para mover estas personas se han chatarrizado en todo el país cerca de 12.800 buses, los cuales se han remplazado con 1785 articulados y 1765 padrones y busetones. Esto constituye una acción concreta para combatir la sobreoferta de vehículos y sus consecuentes impactos ambientales. Además, en el marco de dichos proyectos se han construido 210 kilómetros de troncales para sistemas BRT (*Bus Rapid Transit*) y se han rehabilitado y reconstruido cerca de 245 km para rutas alimentadoras y para la operación de los SETP, con una inversión que alcanza los \$5,5 billones. Paralelamente, se han renovado 2,3 millones de m<sup>2</sup> de espacio público y se han recuperado 365.000 m<sup>2</sup> de zonas verdes. Todas estas obras civiles han permitido generar más de 114.000 empleos, mientras que la operación de los sistemas aporta otros 9800 puestos de trabajo, tanto directos como indirectos.

### ¿Cómo han combinado la solución a los problemas de movilidad urbana con el cuidado del medio ambiente?

Estamos repensando la forma de atacar los problemas de movilidad y de lograr beneficios ambientales en el proceso, y en eso somos pioneros mundiales. Por ejemplo, los proyectos de transporte público colombianos son un ejemplo internacional de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (el 30 % de los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio en transporte aprobados por la ONU son colombianos). Además, llevamos a cabo acciones para integrar más eficientemente la planeación del transporte con el desarrollo urbano y en esta forma crear ciudades más amables y competitivas, agrupando proyectos inmobiliarios, de desarrollo comercial y de renovación de espacio público alrededor de corredores y estaciones de transporte público, lo que permitirá consolidar barrios y áreas donde la gente pueda vivir, trabajar, comprar y recrearse de manera segura.

Igualmente, trabajamos en la promoción de tecnologías vehiculares limpias, por ejemplo vehículos de gas, híbridos, eléctricos o que usen biocombustibles. Todo esto permitiría convertir nuestras ciudades en lugares amables y vivibles.

### OBRAS DE PRIMERA MANO

#### ¿Cuáles son los resultados transitorios de la inspección que usted ha hecho en sus giras, para comprobar en qué estado se hallan los contratos viales?

Hay de todo. Hemos encontrado contratistas muy juiciosos, que hacen bien su tarea, y el resultado se ve en el avance de los trabajos que realizan, como algunos tramos de la Ruta del Sol, la Vía al Llano, Galapa, pero también hemos encontrado varios problemas, unos por incumplimiento de los contratistas y otros por temas ambientales o de consultas previas que hemos venido solucionando gracias al compromiso de los contratistas y las autoridades, tales como la vía Toluviejo-Cruz del Viso, las básculas de pesaje en la vía a Puerto López, el puente SAO en Barranquilla, o la doble calzada Cartagena-Barranquilla, a la altura de Turbaco.

### CIFRAS DE LA CARTERA

- El país pasó de tener una inversión en el sector de \$3,5 billones en 2010 a \$7,9 en el 2012 —dobló la cifra— y se podrá duplicar para el 2014, con una proyección de \$14,7 billones.
- A 2018, según el portafolio de proyectos, se estiman inversiones de \$6 billones para obra pública y de \$12 billones a través del sector privado en alianzas público privadas (APP).
- Esto implica la consolidación de unos cimientos tan sólidos para la infraestructura de Colombia con visión renovada, que representan una inversión del 3 % del PIB, un salto extraordinario, pues en el país esta cifra tradicionalmente no alcanzaba el 1 %.

#### ¿Cuáles son los aspectos que destaca de esas giras y que usted ha podido apreciar?

Entre lo positivo destaco la fortaleza de los habitantes de nuestra Colombia, su disposición, su esperanza y confianza en el gobierno, los concesionarios, contratistas e interventores cumplidos y con gran conocimiento, al igual que la ingeniería colombiana sería y de vanguardia.

Entre lo negativo está el regular desempeño de algunos interventores. Las interventorías en Colombia representan entre el 8 y 10 % del costo de las obras y su compromiso no siempre es el ideal. Los interventores son los ojos de las entidades contratantes y de los colombianos y no me satisface lo que están haciendo algunos de ellos. En varios casos hemos identificado seguimientos no adecuados, bajo nivel de exigencia y compromiso, así como que se concentran exclusivamente en el producto terminado y no en la gestión de ejecución, pese a que son también responsables ante el país y su contratante de la ejecución de las obras.

### MEJORAR LA COMPETITIVIDAD

#### ¿Cómo está el país frente a las exigencias de los TLC para agilizar el transporte?

El desarrollo actual de la infraestructura está concebido con el objetivo de mejorar la competitividad del país. Estamos apuntándole a que la infraestructura no se convierta en un cuello de botella y que, por el contrario, responda eficientemente a los TLC actuales y futuros. Para lograr esto, hemos orientado la estrategia a incrementar la capacidad de los principales corredores

de comercio exterior carreteros mediante el programa de dobles calzadas. De esta manera, el interior del país estará eficientemente conectado con los principales puertos de la nación.

En materia portuaria, las inversiones que el gobierno estimula permitirán que la capacidad portuaria aumente en la misma proporción en que lo hace la producción de carbón y otros minerales base de nuestras exportaciones. Por otra parte, en lo referente a los aeropuertos estamos venciendo las limitaciones que teníamos en materia de capacidad y ahora estamos mejor preparados para la llegada de turistas, otro sector en el cual la infraestructura tiene que servir activamente como potenciador de esta actividad.

### ¿Cómo ha sido la ejecución en el primer trimestre en carreteras, puertos, aeropuertos y líneas de ferrocarril, y cuál será la tendencia durante los siguientes trimestres?

Se construyeron 51 km de dobles calzadas. Pero los proyectos que presentaron mayor ejecución fueron la Ruta del Sol sector 2, con 34,4 km, y la Ruta Caribe, con 8 km. En 2013 se proyecta la construcción total de 300 km de dobles calzadas más, para un total acumulado de 1347 km.



## GENERACIÓN DE 4G

### ¿Cómo se estructuró la Cuarta Generación de Concesiones Viales?

Se continuó la estructuración de la Cuarta Generación de Concesiones Viales (4G), que comprende cerca de 9000 km de vías en materia de corredores de competitividad, que se concesionarán entre 2013 y 2014 por un valor cercano a los \$47 billones. Inicialmente, la nación invertirá \$4 billones para unos 550 km de vías que presentan alta afluencia de tráfico en los siguientes proyectos: Perimetral Oriental de Cundinamarca, Au-

topista Girardot-Puerto Salgar, Mulaló-Loboguerrero y Cartagena-Barranquilla. Se espera que estén adjudicados a finales de 2013.

### ¿Y en la red de carreteras?

En la red de carreteras a cargo del Instituto Nacional de Vías (Invías) se ejecutaron la rehabilitación, repavimentación y pavimentación a 54,4 km, de los cuales 27,4 km en el corredor sur Tumaco-Pasto-Mocoa, 16 km a través del Programa Mantenimiento y Rehabilitación por Corredores, 6 km en la segunda calzada Bucaramanga - Pamplona y 2,5 km de pavimento en la red terciaria.

Se hicieron obras de mantenimiento periódico a 149 km, de los cuales 85 km en el corredor sur Tumaco - Mocoa, 23 km a través del Programa de Mantenimiento y Rehabilitación por Corredores, y 41 km en otras vías del nivel nacional.

El Programa de Mantenimiento y Rehabilitación por Corredores empezó en diciembre de 2012, para preservar y mejorar el estado de las vías, así como garantizar una movilidad más rápida y segura de los viajeros; comprende 27 corredores (1520 km en 21 departamentos), con una inversión de \$1,1 billones. Como ya se dijo, se ha avanzado en aproximadamente 39 km de mantenimiento y rehabilitación a través de este programa.

### ¿Cómo ha sido la gestión en el sostenimiento de la red terciaria?

En mantenimiento de la red terciaria se ejecutaron 587 km con cargo al Programa Caminos para la Prosperidad y 18 km con cargo a la red terciaria del Invías, a la red departamental y a la red municipal, para un total de 605 km. La idea es mejorar las vías y carreteras necesarias para la comunicación y el desarrollo de los municipios y generar empleo.

## INFRAESTRUCTURA

### ¿Qué otras obras de infraestructura puede destacar?

En túneles se hicieron obras de excavación a 100 ml en el túnel de la Línea y 449 ml en el tramo Cisneros - Loboguerrero de la vía Buga - Buenaventura, para un total de 549 ml. En materia de puentes, se construyeron dos puentes en el tramo Cisneros - Loboguerrero de la vía Buga - Buenaventura y el puente El Tambor, de la carretera Villagarzón - San José del Fragua.

### PRIORIDADES DEL SECTOR

Entre las prioridades del sector están los “Corredores para la Prosperidad”, que lidera el Instituto Nacional de Vías (Invías), cuyo objetivo es mejorar la conectividad transversal de la configuración vial del país, articulando los corredores troncales para facilitar la conectividad y garantizar la accesibilidad regional. Con la gestión de \$3,6 billones, se pavimentarán 718 km y se construirán 36 km de nuevas vías.

Adicionalmente, el Instituto ejecuta el programa “Corredores de Mantenimiento”, con el objetivo de rehabilitar y mantener en buen estado de transitabilidad y seguridad vial las carreteras pavimentadas a cargo del Invías; para esto se gestionaron recursos por \$1,2 billones, con los cuales se atenderán 1523 km de vías nacionales, distribuidas en 27 corredores.

En dragados a canales de acceso a los puertos públicos, se encuentran en ejecución obras contratadas en la vigencia fiscal 2012, como el dragado de mantenimiento al puerto de Tumaco, en Nariño, incluidos el Plan de Manejo Ambiental y el dragado de mantenimiento del estero de San Antonio, en Buenaventura (Valle del Cauca).

### ¿Qué aspectos interesantes se han desarrollado en el sector aéreo?

En transporte aéreo se pasó de 113.720 m<sup>2</sup> de área construida en el aeropuerto El Dorado en diciembre de 2012, a 130.842 m<sup>2</sup> en marzo de 2013.

Se ejecutaron 17 intervenciones estratégicas en aeropuertos no concesionados, como el mejoramiento de las pistas de los aeropuertos de Bucaramanga, Leticia, Valledupar, Mariquita y Santa Marta; el mejoramiento de la pista y la construcción de calle de rodaje de Yopal; la construcción de las torres de control de Quibdó y Puerto Carreño; las zonas de seguridad de Armenia; el mejoramiento de la plataforma de Florencia, y los cerramientos de Barranquilla, Tolú, Ipiales, Cartagena, Mompox, Aguachica y El Banco.

En cuanto a la carga movilizada anualmente por el modo aéreo, el crecimiento del periodo enero-marzo de 2013 frente al mismo periodo de 2012 fue de 3,05 %, lo que equivale a 5207 toneladas adicionales (nacionales e internacionales).

De la misma manera, el número de pasajeros movilizados anualmente por el modo aéreo registró un crecimiento del 17,6 % en el periodo enero-marzo de

2013 frente al mismo periodo de 2012, lo que equivale a 992.171 pasajeros adicionales (nacionales e internacionales).

Finalmente, en transporte férreo se movilizaron 12,6 millones de toneladas en el lapso enero-abril de 2013. Lo que representa un avance del 28 % frente a la meta de 2013, que es de 45 millones.

### ¿Se están ejecutando bien las obras con respecto a la calidad y duración de los materiales?

El gobierno nacional, por intermedio de sus entes ejecutores, tanto la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) como Invías, les hace un permanente seguimiento a los proyectos de infraestructura, desde una óptica técnica, que tiene entre sus principales ítems un alto control de la calidad tanto de los procesos constructivos como de los materiales.

Dentro de nuestros procesos existen manuales de calidad que se implementan en los proyectos y que forman parte de las exigencias contractuales; es decir, normativamente hablando, exigimos el cumplimiento de múltiples estándares estratégicos que son supervisados de manera permanente por medio de las interventorías de obra. Adicionalmente, la figura de supervisión técnica mediante las interventorías busca asegurar e incrementar los estándares en nuestros proyectos.

### POLÍTICA NACIONAL DE LOGÍSTICA

Con los tratados de libre comercio y acuerdos futuros, consolidar la política nacional de logística en Colombia es una prioridad de todos. El ministerio trabaja para articular y hacer seguimiento a la implementación de la política, así como para lograr la optimización en la eficiencia en toda la cadena de abastecimiento, en beneficio de la competitividad de la economía nacional y del comercio exterior.

Hoy, el mayor desafío está en la trazabilidad de la carga y en los costos logísticos, pues precisamente allí se medirá finalmente la efectividad de la política logística en transporte de carga y se marcará la pauta para la consolidación como jugadores competitivos en un mercado cada vez más exigente.

En esta cadena, cada eslabón es importante para alcanzar metas como disminuir en un 25 % los costos de importación y exportación, crear especialización estatal en el manejo de la logística, incrementar la interoperabilidad entre modos diferentes del transporte carretero de carga, implementar sistemas de inspección eficientes y garantizar modelos de operación 24 horas 7 días en los principales nodos de transferencia.



# REVISTA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

## Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co), adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

## Scope and policy

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

## Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co) with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



# Entregando lo mejor de los **colombianos**

Línea de atención al Cliente Nacional: 01 8000 111 210

Línea de atención al Cliente Bogotá: (57-1) 4199299

➤ [www.472.com.co](http://www.472.com.co)