

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE	RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ
VOCALES	GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS JAIRO URIBE ESCAMILLA HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ DANIEL ARMANDO VERA RUIZ
RECTOR	ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ
SECRETARIO	RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR	RICARDO SALAZAR FERRO
COMITÉ EDITORIAL	JAIME ALEJANDRO BOHÓRQUEZ VILLAMIZAR Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito CONSUELO MONTES DE CORREA Universidad de Antioquia MANUEL MORCILLO LINARES Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (Cenim) de Madrid, España CARLOS PATERNINA ARBOLEDA Universidad del Norte LEONARDO PINEDA SERNA Universidad del Rosario PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito LUIS SUÁREZ COLCHE Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez
COMITÉ CIENTÍFICO	LUIS GUILLERMO DÍAZ VÁSQUEZ Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito RUBY MEJÍA GUTIÉRREZ Universidad del Valle MARITZA PÁEZ COLLIO Universidad de Santiago de Chile JESÚS IGNACIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ Universidad de Zaragoza ALLEN BATEMAN PINZÓN Universidad Politécnica de Cataluña
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.: (091) 668 3600, EXTS. 394 Y 397
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. NUEVOS RUMBOS

Eduardo Silva Sánchez

7-17

Diseño sísmico de VIS construidas con muros de concreto

Julián Carrillo

El desempeño de viviendas de baja altura ha sido notoriamente deficiente durante los últimos sismos ocurridos en Latinoamérica.

La ausencia de códigos adecuados para diseño de vivienda es la causa principal de esta tendencia. Actualmente, la construcción de viviendas de concreto es una de las opciones más eficientes. Si se considera la resistencia inherente de estructuras con muros de concreto, las demandas sísmicas son limitadas y, por tanto, se emplean muros con resistencia baja de concreto, espesor reducido, cuantías de refuerzo menores que la mínima especificada en el código y mallas de alambre soldado como refuerzo a cortante en el alma.

19-32

Modelo de gestión para la rehabilitación de redes troncales de alcantarillado

Alfonso Rodríguez Díaz y Héctor Matamoros Rodríguez

En este proyecto se aplican conceptos y técnicas de la gestión de inventarios al manejo de miles de ítems en una cadena de venta minorista. Inicialmente se analiza el problema desde sus antecedentes y después se estudian diferentes factores que afectan la demanda de los ítems, con el propósito de identificar comportamientos que deban manejarse dentro del modelo propuesto; para esto se utiliza una muestra representativa de ítems del catálogo. A continuación se propone la aplicación de una clasificación ABC de los ítems y de los puntos de venta, con el fin de priorizar con este criterio las decisiones relacionadas.

33-44

Inventario sanitario del departamento del Quindío

Shirley Andrea Bautista Castellanos y Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo se incluyen los resultados más relevantes del estudio realizado para la elaboración del inventario sanitario del departamento del Quindío. En el informe se reportan las características principales de los sistemas de abastecimiento, de potabilización, de recolección de agua residual, de tratamiento de aguas residuales y del sistema de recolección y disposición de residuos sólidos, en cada municipio. Se encontró que todos los municipios del Quindío tienen una cobertura de servicio de acueducto mayor del 90%, con excepción de Pijao (66%) y Génova (87%). La cobertura del servicio de alcantarillado es inferior al 90% en Pijao (51%), Génova (75%), Quimbaya y Montenegro (88%). La cobertura del servicio de aseo es mayor del 95%, con excepción del municipio de Pijao (80%). El 83% de los municipios no posee tratamiento de aguas residuales.

Contenido

45-55

Comportamiento operacional de un tornillo simple con diferentes configuraciones de dado

Jaime Alejandro Puentes Parodi y Germán Andrés Higuera Camargo

Actualmente, un alto porcentaje de máquinas extrusoras usadas en la industria colombiana no cuenta con información técnica suficiente para optimizar su proceso; esto es de gran importancia, puesto que se pueden obtener mejores productos en menores tiempos y costos energéticos a niveles óptimos de operación. El objetivo de este trabajo fue determinar los puntos óptimos operacionales y los flujos totales que se relacionan directamente con la temperatura y la presión a la que se está operando la máquina.

57-66

Determinación rápida de la susceptibilidad térmica del asfalto para el diseño de mezclas asfálticas en caliente

Luis Guillermo Díaz y Adrián R. Archilla

El estándar actual para la determinación de la viscosidad con el viscosímetro rotacional (INV E-717) exige que para cada temperatura a la que se quiera determinar la viscosidad del asfalto se utilicen diferentes muestras de ensayo. Considerando que para la construcción de las curvas de susceptibilidad térmica del asfalto (VTS) es necesario determinar la viscosidad a diferentes temperaturas, se deben ensayar varias muestras.

67 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Nuevos rumbos

EDUARDO SILVA SÁNCHEZ

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

eduardo.silva@escuelaing.edu.co

Cuando hace diez años, en esta misma revista, se propuso una visión para el 2010 se dijo que era un sueño. En efecto, era un sueño teñido de pesadilla que presentaba indicadores de relieve nacional e internacional, un sueño que mostraba un panorama de intensa participación en nuevos modelos de enseñanza, un renovado esfuerzo por desentrañar nuevos caminos de conocimiento en los campos definidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería para su acción y una intervención vigorosa en la orientación de la sociedad en que estamos inmersos. En ese mismo sueño se dijo que todo lo anterior podría no cumplirse y que lo único que valdría la pena sería que, al cabo de los diez años, esta comunidad se sintiera orgullosa de mostrarse como un conjunto de mejores personas.

Sin embargo, el mundo cambió; los parámetros en que se basaba esa visión desaparecieron y se tomaron nuevos rumbos. Hoy, la educación mira hacia el negocio. El estudiante es una persona desconocida por sus preceptores. El frenesí por el consumo de tecnología introdujo otros valores. Las redes sociales lo hacen todo. La autorregulación es una norma. El objetivo es todo. Los medios son válidos y se autolegitiman. Sobre estos axiomas se encamina el nuevo mundo, el nuevo siglo.

Inútilmente, algunos pocos se niegan a pensar que el mundo ha cambiado. Sostienen que el mundo nunca cambia,

que el mundo que conocieron se puede reconstruir, pero la probabilidad de que estén equivocados es muy alta.

El rumbo es nuevo, y el compromiso está en darle orientación a ese nuevo rumbo desde los altos niveles de la academia. No podemos volver atrás. No podemos, simplemente, dejarnos llevar por la inercia.

La *Revista de la Escuela*, al reanudar su camino, debe ser motivo de inspiración para orientar el futuro que se quiere, fuente para mantener vivas las ideas que forjaron los principios de la Escuela Colombiana de Ingeniería, animadora de las iniciativas para formar profesionales con una identidad, de un modo novedoso, de una manera que recoja los valores de la época y les dé sustento. La divulgación del pensamiento de la Escuela, la formalización de una comunidad altamente respetuosa de las personas y el compromiso de servicio a la sociedad pueden ser los elementos de un nuevo ideal.

Pero como en el caso mencionado al principio de esta página, mantener el propósito de que con el paso del tiempo las personas sean mejores debería ser el verdadero sueño, un sueño que con el esfuerzo de todos podríamos hacer realidad.

Diseño sísmico de VIS construidas con muros de concreto

Seismic design of Social Interest Housing (SIH) using concrete walls

JULIÁN CARRILLO

Ingeniero civil, Ph.D. en Ingeniería Estructural. Profesor investigador de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), Colombia. wcarrillo@umng.edu.co.

Recibido: 10/05/2010 Aceptado: 20/06/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El desempeño de viviendas de baja altura ha sido notoriamente deficiente durante los últimos sismos ocurridos en Latinoamérica. La ausencia de códigos adecuados para diseño de vivienda es la causa principal de esta tendencia. Actualmente, la construcción de viviendas de concreto es una de las opciones más eficientes. Si se considera la resistencia inherente de estructuras con muros de concreto, las demandas sísmicas son limitadas y, por tanto, se emplean muros con resistencia baja de concreto, espesor reducido, cuantías de refuerzo menores que la mínima especificada en el código y mallas de alambre soldado como refuerzo a cortante en el alma. Debido a las características particulares de los muros, los modelos analíticos y los requisitos de los códigos disponibles no son directamente aplicables. Con base en los resultados de un estudio experimental y analítico, y utilizando un enfoque de diseño por desempeño, se proponen recomendaciones para estimar la capacidad de resistencia y los parámetros de desplazamiento en viviendas de baja altura.

Palabras claves: diseño sísmico por desempeño, muros de concreto, vivienda de interés social, concreto ligero, ensayos dinámicos, ensayos cuasiestáticos.

Abstract

The performance of low-rise housing has been noticeably inadequate during the most recent earthquakes occurred in Latin America. The lack of suitable building codes is the main reason associated to this trend. Construction of concrete housing is currently one of the most accomplished techniques. Due to inherent strength of concrete wall structures, seismic demands are limited, thus leading to the use of walls with low concrete strength, small thickness, web steel ratio smaller than the minimum ratio prescribed by the code and shear web reinforcement made of welded wire meshes. Considering the particular wall characteristics, existing analytical models and requirements in current codes are not directly applicable. Based on results of an experimental and analytical study and using a performance-based seismic design approach, we give some recommendations for predicting strength capacity and the displacement parameters for low-rise housing.

Keywords: performance-based seismic design, concrete walls, economic housing, cellular concrete, dynamic testing, quasi-static testing.

INTRODUCCIÓN

El colapso parcial o total de un número significativo de viviendas durante los sismos ocurridos en Colombia, Haití, México y Perú (Pujol et ál., 1999; Eberhard et ál., 2010; Johansson et ál., 2007) ha evidenciado otra vez la ausencia de recomendaciones y códigos de diseño eficientes para la construcción de viviendas de baja altura. Infortunadamente, la población con recursos económicos limitados resulta ser la más afectada tras la ocurrencia de desastres naturales. Una de las opciones más eficientes para la construcción de viviendas de interés social es el desarrollo de conjuntos habitacionales con viviendas de concreto en su totalidad (cimentación, muros, losas de entrepiso y techos). Si bien el costo unitario de los materiales empleados en los muros de concreto es superior al de la mampostería tradicional, el ahorro económico y la edificación sustentable se logran con la rapidez de construcción y el uso de concretos de características especiales. Por ejemplo, la utilización de sistemas de formaletas de acero, al igual que de mallas de alambre soldado como refuerzo a cortante en el alma garantizan la disminución del tiempo y el costo de la vivienda. Adicionalmente, el empleo de concretos de tipo ligero y autocompactable promueve el ahorro de energía y prolonga la vida útil de las viviendas.

A partir de un diseño sísmico por desempeño es posible proporcionar a la vivienda las características necesarias, de acuerdo con el tipo de materiales empleados, la geometría de la estructura y la demanda sísmica sobre los elementos. Por ejemplo, considerando la resistencia inherente de estructuras con muros de concreto, en viviendas de baja altura se pueden utilizar muros con resistencia de concreto baja y espesor reducido. Además, en zonas donde las demandas sísmicas

no son una preocupación en el diseño estructural, el refuerzo mínimo a cortante estipulado en el código ACI-318 (2008) parece ser excesivo para controlar el agrietamiento por tensión diagonal en los elementos. Debido a las características particulares de los muros, los modelos de predicción y las recomendaciones de diseño en los códigos de construcción disponibles no son directamente aplicables. Con el propósito de incrementar y mejorar la oferta tecnológica de las viviendas de interés social construidas con muros de concreto, manteniendo una seguridad estructural adecuada, se desarrolló un programa de investigación experimental y analítico. Como parte de los resultados del proyecto, en este artículo se formula un modelo basado en desempeño capaz de estimar la capacidad de resistencia de los muros y se proponen parámetros de diseño sísmico que caracterizan la capacidad de desplazamiento de los muros (ductilidad y deriva permisible). En el artículo también se discute la habilidad de algunos modelos disponibles para predecir el comportamiento de los muros, así como las limitaciones de las ecuaciones y recomendaciones propuestas.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental del proyecto incluyó el ensayo de 39 muros aislados de concreto; 33 muros ensayados bajo carga lateral cuasiestática (monótona, cíclico-reversible) y 6 muros a escala levemente reducida ensayados de manera dinámica en mesa vibratoria. Las variables de estudio se obtuvieron de las empleadas con más frecuencia en la práctica del diseño y construcción de viviendas de concreto en Latinoamérica (tabla 1). En los ensayos cuasiestáticos la carga horizontal se aplicó a

Tabla 1
Descripción de las variables de estudio

Variable	Descripción
Relación de aspecto:	cuadrados ($H/l_w = 1$), robustos ($H/l_w = 0,5$), esbeltos ($H/l_w = 2$) y muros con aberturas (puerta y ventana). El espesor (t_w) y la altura libre nominal (H) de todos los muros (en escala natural) fueron iguales a 100 mm y 2,4 m, respectivamente. Por tanto, para alcanzar una determinada relación de aspecto se varió la longitud del muro.
Tipo de concreto:	de peso normal, peso ligero y autocompactable, con resistencia nominal a la compresión, $f'_c = 14,7$ MPa. Las resistencias medidas variaron entre 15 y 25 MPa, aproximadamente.
Cuantía de refuerzo a cortante en el alma (vertical y horizontal):	$100\% \rho_{min}$ (0,25%), $50\% \rho_{min}$ (0,125%), $0 =$ sin refuerzo en el alma. El porcentaje de la cuantía se expresó como fracción de la cuantía mínima (ρ_{min}) estipulada en el código de diseño ACI-318 (2008). En todos los muros se proporcionó suficiente refuerzo en los extremos para prevenir falla por flexión.
Tipo de refuerzo a cortante en el alma:	barras corrugadas de acero con esfuerzo de fluencia nominal, $f_y = 412$ MPa y malla de alambre soldado con esfuerzo de fluencia nominal, $f_y = 491$ MPa.
Tipo de ensayo:	cuasiestático monótono, cuasiestático cíclico-reversible y dinámico en mesa vibratoria.

nivel de la losa mediante gatos hidráulicos de doble acción. En los ensayos dinámicos la sollicitación horizontal estuvo representada por registros sísmicos aplicados a una mesa vibratoria, sobre la cual se sujetaron los especímenes. En los ensayos dinámicos se adicionó la masa necesaria para que el periodo de vibración inicial de los modelos fuera similar al de las viviendas típicas de baja altura.

PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA

Actualmente existen varios modelos analíticos para predecir la resistencia de muros de concreto (Benjamin y Williams, 1957; Barda et ál., 1977; Hernández y Zermelo, 1980; Mau y Hsu, 1986; Wood, 1990; Hidalgo y Jordán, 1996; Leiva y Montaña, 2001; Gérin y Adebar, 2004; ACI-318, 2008; Gulec y Whittaker, 2009; Sánchez, 2010; entre otros). Sin embargo, considerando las características particulares de muros de concreto para vivienda de baja altura, la mayoría de las ecuaciones de predicción de los modelos disponibles tiene restricciones para aplicarse en el diseño de viviendas de las características estudiadas.

En general, las principales limitaciones son: a) se calibraron para un intervalo muy amplio de los parámetros que controlan el comportamiento de muros de concreto; no obstante, para las viviendas analizadas la mayor parte de los parámetros varía en un intervalo limitado (resistencias bajas del concreto, espesor reducido de muros, esfuerzo axial bajo, cuantías de refuerzo reducidas, entre otras); b) no se incluye el comportamiento de muros reforzados con malla de alambre soldado, en los cuales el alargamiento de los alambres y la capacidad de desplazamiento del muro son un parámetro fundamental para diseño sísmico por desempeño; c) todas las metodologías se han calibrado utilizando resultados de especímenes ensayados bajo carga lateral cuasiestática; es decir, no se incluyen los efectos de la velocidad de aplicación de carga, el número de ciclos, los parámetros acumulados de ductilidad y energía disipada, y los efectos dinámicos de interacción entre la carga axial (compresión o tensión), el momento flexionante y la fuerza cortante en el plano (Carrillo y Alcocer, 2008), y d) algunas han sido planteadas para fines académicos; en otras palabras, su formato no es realmente práctico y sencillo para usarlas con fines de diseño.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrolló un

modelo de predicción de resistencia para muros de concreto en viviendas de baja altura.

ESTADOS LÍMITE Y DESARROLLO DEL MODELO

Uno de los desarrollos más significativos en el diseño sísmico en los últimos 20 años ha sido el aumento de importancia que se le ha dado al diseño por estados límite, denominado actualmente ingeniería basada en desempeño (Priestley, 2000). Para desarrollar el modelo de predicción de resistencia de este estudio se identificaron tres estados límite o niveles de desempeño: agrietamiento diagonal (V_{cr}), resistencia máxima ($V_{máx}$) y capacidad última de desplazamiento (V_u). Los parámetros del modelo asociados a los estados límite se midieron en cada uno de los especímenes de ensayo. Para establecer la forma funcional de las ecuaciones se tomaron en cuenta las tendencias de los modelos de predicción disponibles, resultados de estudios previos, las observaciones de los ensayos, la teoría del comportamiento de estructuras de concreto reforzado y los lineamientos de la metodología de diseño del ACI-318 (2008). La mayoría de los códigos de concreto en los países latinoamericanos se basan parcial o totalmente en el código ACI-318. La forma de las ecuaciones se optimizó a partir de análisis de regresión no lineal y de la investigación de las tendencias entre los residuos (errores de predicción) y las variables de diseño.

Para evaluar el comportamiento observado de los muros se definieron tres tipos de modos de falla: a) cuando fluye la mayor parte de refuerzo a cortante en el alma del muro y el concreto no sufre aplastamiento, se indica que se presenta una *falla por tensión diagonal* (TD); b) cuando ninguna o sólo algunas barras de refuerzo a cortante fluyen pero el aplastamiento del concreto es significativo, se presenta una *falla por compresión diagonal* (CD), y c) cuando se observa una combinación de los tipos de falla anteriores, esto es, fluye la mayor parte de las barras de refuerzo a cortante en el alma del muro y el aplastamiento del concreto es importante, se menciona que se presenta una *falla combinada de tensión y compresión diagonal* (TD-CD).

RESISTENCIA MÁXIMA

De modo similar al enfoque del código ACI-318 (2008), el modelo aquí propuesto pretende que las fallas por tensión diagonal ocurran antes que las fallas por compresión diagonal o por deslizamiento. Por tanto, se propone calcular la resistencia de un muro de concreto por medio de la ecuación 1.

(1)

El primer término de la ecuación 1 representa la resistencia por tensión diagonal asociada a la suma de la contribución del concreto (V_c) más la contribución del refuerzo horizontal (V_s). El segundo término simboliza un límite superior de la resistencia a cortante para prevenir la falla por compresión diagonal. Para facilitar los cálculos la ecuación se calibró con el área total del muro ($A_w = t_w \times l_w$). A continuación se desarrollan expresiones para estimar los tres parámetros desconocidos en la ecuación 1: η_h , α_1 y α_2 .

Factor de eficiencia del refuerzo horizontal

El factor η_h busca representar la eficiencia del refuerzo horizontal del alma para contribuir a la resistencia a cortante del muro. A partir de las observaciones y las tendencias de los resultados experimentales se propone utilizar $\eta_h = 0,8$ para barras corrugadas y $\eta_h = 0,7$ para malla de alambre soldado. Los factores η_h aquí propuestos consideran la distribución de deformaciones a lo largo de las diagonales, la cuantía de refuerzo en el alma del muro y el tipo de refuerzo utilizado para proveer dicha cuantía. De acuerdo con los valores de η_h aquí propuestos, todas las barras/alambres de refuerzo horizontal no alcanzan a fluir/plastificar al momento de alcanzar la resistencia del muro. En cuanto a la cuantía de refuerzo, Sánchez (2010) y Wood (1990) detectaron que la eficiencia del refuerzo horizontal en transmitir cortante se reduce al incrementar su cuantía. Sin embargo, para las cuantías de refuerzo típicas en muros para vivienda de baja altura no se observó una tendencia clara de disminución de efectividad al aumentar el valor de dicha cuantía y, por tanto, se propone un valor constante para muros con $\rho_h f_{yh} \leq 1,25$ MPa.

La distribución de deformaciones se refiere a la variación de la magnitud de esfuerzos cortantes en la

altura del muro, lo cual genera que el ancho de las grietas inclinadas sea mínimo en las zonas cercanas a los extremos de las secciones del muro (Leiva y Montaña, 2001; Sánchez, 2010). Por consiguiente, en la mayor parte de los casos no es posible que todo el refuerzo horizontal que cruza las grietas en la base o en el extremo superior del muro desarrolle la fluencia. Este efecto se observó notoriamente en los muros ensayados dinámicamente en mesa vibratoria y su magnitud fue más pronunciada en los muros con malla de alambre soldado.

El factor η_h toma en cuenta también las diferencias evidentes entre el comportamiento esfuerzo-deformación de las barras corrugadas y los alambres de malla. El término “fluencia” se define para aceros de refuerzo en los cuales sólo se observa aumento de resistencia cuando se desarrolla una plataforma de fluencia bien definida. En el caso de los alambres de las mallas no existe un punto de fluencia específico y, por consiguiente, al extrapolar el término “fluencia” a este tipo de refuerzo (para malla se debe hacer referencia a plastificar), algunos códigos aceptan la disminución de las cuantías de refuerzo en función del incremento del esfuerzo de fluencia de las mallas en comparación con el de las barras corrugadas de acero.

Sin embargo, el concepto anterior es aplicable a los alambres de malla que desarrollan ductilidad adecuada antes de presentarse la fractura; es decir, no se debe extrapolar en forma directa a los alambres de refuerzo con capacidad de ductilidad limitada (alargamiento). Por ejemplo, en los alambres aquí utilizados el tramo comprendido entre el inicio de la “fluencia” y la capacidad máxima de deformación fue muy corto en comparación con las barras corrugadas, lo cual originó que se presentara la fractura del material con sólo un leve incremento de la deformación. Tal como se observó durante los ensayos de los muros estudiados, una vez que se fracturaron los alambres se generó un mecanismo de falla súbito no deseado. Por tanto, para tener en cuenta el mayor efecto de la distribución de deformaciones en los muros con malla de alambre soldado y para prevenir que se alcance el alargamiento máximo de los alambres antes de registrar la resistencia del muro, el factor $\eta_h = 0,7$ limita los esfuerzos de los alambres de malla en comparación con las barras corrugadas.

Contribución del concreto a la resistencia por tensión diagonal

En la ecuación 1 el factor α_1 relaciona la contribución del concreto a la resistencia al cortante y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto. Este factor depende principalmente de la geometría y las condiciones de frontera del muro (cociente M/Vl_w , cociente entre el momento flexionante y el producto de la fuerza cortante por la longitud del muro) y del esfuerzo vertical axial sobre el muro (σ_v). En cuanto al cociente M/Vl_w se ha observado que los muros con valores M/Vl_w bajos desarrollan resistencias a cortante mayores que muros más altos con propiedades de materiales similares. En lo referente al esfuerzo axial, Carrillo y Alcocer (2008) indican, a partir de modelos de elementos finitos, que para los muros de concreto en viviendas de baja altura el esfuerzo vertical axial de compresión en condiciones de servicio es relativamente bajo ($\sigma_v \approx 0,25$ MPa). Sin embargo, ante una sollicitación sísmica real las aceleraciones verticales o el efecto de acoplamiento entre muros pueden originar que los esfuerzos verticales axiales de compresión se incrementen o que se produzcan esfuerzos verticales axiales de tensión. Si se presentan esfuerzos de tensión, la capacidad a cortante del muro disminuirá; por tanto, con fines de diseño sísmico no parece adecuado incluir en forma directa la contribución del esfuerzo vertical axial a la resistencia a cortante del muro. Para hacer una estimación del factor α_1 a partir de las tendencias de los resultados experimentales, se calculó el cociente para los muros estudiados en el programa experimental de la investigación. Se incluyeron los especímenes ensayados en forma dinámica y bajo carga lateral cíclica

en los cuales se observó un modo de falla por “TD” o un modo de falla por “TD-CD”. No se incluyeron los muros con aberturas porque no se caracterizan con un cociente M/Vl_w único. En total, se utilizaron los resultados experimentales de 22 especímenes. La contribución del concreto a la resistencia a cortante se calculó a partir de la ecuación 2.

$$(2)$$

donde V_{max} corresponde a la fuerza cortante máxima medida en el ensayo del muro y V_s es la contribución del acero de refuerzo horizontal calculada usando los factores η_h aquí propuestos. En los cálculos se utilizaron las dimensiones reales de los muros (t_w y l_w) y las propiedades mecánicas de los materiales determinadas experimentalmente en una fecha cercana al ensayo de los muros. En la figura 1a) se muestran los resultados junto con la línea que representa la tendencia observada (“Este estudio”), así como las propuestas del capítulo 21 del ACI-318 (2008), de Gulec y Whittaker (2009), y de Sánchez (2010).

Como se observa en la figura 1a), la propuesta del capítulo 21 del ACI-318 (2008) es insegura, especialmente para cocientes M/Vl_w menores de 1,5. En la propuesta de Sánchez (2010) la contribución del concreto a la resistencia siempre es mayor que la contribución medida, mientras que en la propuesta de Gulec y Whittaker (2009) se predice adecuadamente la contribución del concreto para muros con cocientes M/Vl_w cercanos a 0,5, pero es muy conservadora para muros con cocientes M/Vl_w mayores que 0,75. A partir de las tendencias de

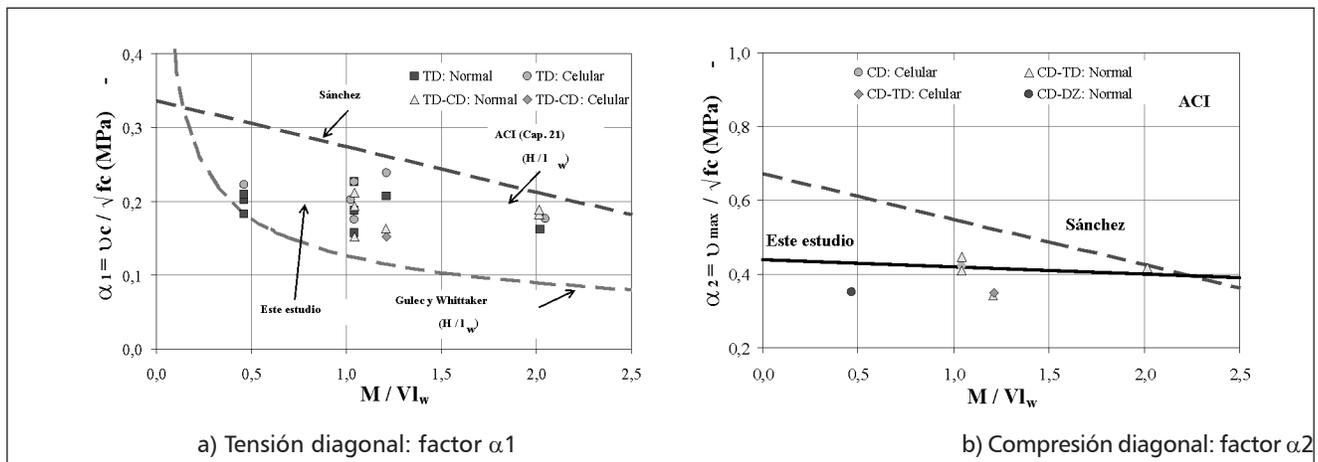


Figura 1. Contribución del concreto a la resistencia.

los resultados experimentales, para propósitos de diseño sísmico de viviendas de las características estudiadas se propone calcular α_1 por medio de la ecuación 3 (línea “Este estudio”, figura 1a)).

$$\text{(MPa)} \quad (3)$$

Límite de resistencia a cortante

Las fallas por compresión diagonal se presentan principalmente en muros con cuantías altas de refuerzo a cortante, en muros con resistencias bajas a la compresión del concreto o en muros de concreto agrietados. En la ecuación 1 el límite superior representa la resistencia que puede desarrollar el muro antes que se origine una falla por compresión diagonal. En este límite, el factor α_2 relaciona la contribución máxima del concreto a la resistencia al cortante por compresión diagonal y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto. Para hacer una estimación del factor α_2 utilizando las tendencias de los resultados experimentales, se calculó el cociente α_2 para los muros en los cuales se observaron modos de falla por “CD”, “CD-TD” y “CD-DZ”. No se incluyeron los resultados de los ensayos cuasiestáticos monótonos ni los muros con aberturas. En total, se usaron los resultados experimentales de diez especímenes. La contribución del concreto a la resistencia a cortante por compresión diagonal se calculó por medio de la ecuación 4.

$$(4)$$

En la figura 1b) se muestran los resultados junto con la línea que representa la tendencia observada (“Este estudio”), así como las propuestas del ACI-318 (2008) y Sánchez (2010). En el ACI-318 (2008) se propone un valor constante para el factor α_2 . Sánchez (2010) plantea que $\alpha_2 = 2 \alpha_1$. Como se observa en la figura 1b), en ninguno de los casos el ACI-318 (2008) hace una predicción acertada; es decir, la resistencia calculada por falla de compresión diagonal siempre es mayor que la resistencia medida. En la propuesta de Sánchez (2010), el factor α_2 depende del cociente M/V_l pero hace una estimación acertada sólo para cocientes M/V_l mayores que 2,0. A partir de las tendencias de los

resultados experimentales, para propósitos de diseño sísmico de viviendas de las características estudiadas se propone calcular α_2 por medio de la ecuación 5 (línea “Este estudio”, figura 1b)).

$$\text{(MPa)} \quad (5)$$

Las ecuaciones 3 y 5 no dependen del tipo de concreto, ya que no se observaron tendencias diferentes entre muros de concreto de peso normal, peso ligero y autocompactable. Estas ecuaciones dependen sólo de un parámetro e incluyen el efecto de la cuantía de refuerzo vertical en el alma del muro, la cual garantiza la distribución del agrietamiento diagonal. Adicionalmente, al utilizar los resultados de los ensayos dinámicos en mesa vibratoria, en las ecuaciones 3 y 5 se incluyen los efectos de la velocidad de aplicación de carga, el número de ciclos, los parámetros acumulados de ductilidad y disipación de energía, así como el efecto dinámico del esfuerzo vertical axial sobre la resistencia. Teóricamente, un modelo más robusto para determinar α_1 y α_2 debe incluir el efecto del ablandamiento en la resistencia a la compresión del concreto; sin embargo, se consideró que un modelo más refinado no es práctico para fines de diseño normativo.

AGRIETAMIENTO DIAGONAL Y RESISTENCIA ÚLTIMA

Benjamin y Williams (1957) indican que la carga asociada a la formación de la primera grieta en el alma es independiente de la configuración del refuerzo en el alma y que el primer cambio de rigidez en la curva ocurre cuando se presenta un agrietamiento general en el alma del muro. El agrietamiento diagonal distribuido se relaciona fundamentalmente con el esfuerzo principal de tensión en el concreto. Por tanto, en el modelo se supone que la resistencia al agrietamiento diagonal (V_{cr}) es similar a la contribución del concreto a la resistencia; es decir, V_{cr} se calcula por medio de la ecuación 6, en la cual α_1 se calcula utilizando la ecuación 3.

$$(6)$$

Similar a otras metodologías disponibles, en el modelo se consideró que el estado límite de capacidad última de desplazamiento está asociado a una disminución de resistencia del 20% respecto a la máxima alcanzada. Por

consiguiente, la resistencia última se calcula utilizando la ecuación 7.

(7)

EVALUACIÓN DE LA PREDICCIÓN

Con el propósito de evaluar la efectividad de los modelos de predicción de resistencia con fines de diseño, se calcularon los cocientes entre las resistencias teóricas y experimentales para los muros ensayados en forma dinámica y bajo carga lateral cíclica dentro del proyecto de investigación. Para incluir sólo el efecto de carga cíclica no se usaron los muros ensayados bajo carga lateral monótona. La resistencia experimental corresponde a la fuerza cortante máxima medida en el ensayo del muro. La resistencia teórica se calculó con la metodología aquí propuesta y con varias metodologías disponibles en la literatura. En los cálculos se utilizaron las dimensiones reales de los muros y las resistencias de los materiales determinadas experimentalmente y, por tanto, no se incluyeron los factores de reducción de resistencia. Para analizar estadísticamente los datos, en la figura 2 se indica gráficamente la media aritmética (círculo), la variación en términos de la desviación estándar (la altura total del recuadro representa dos veces la desviación estándar), los valores máximo y mínimo (línea continua) y el porcentaje de sobrepredicciones (S_p). De manera práctica, el porcentaje de sobrepredicción corresponde al cociente (porcentual) entre el número de datos en los cuales el valor del cociente de resistencias es mayor

que 1,05 y el número de datos de la muestra analizada (31 datos).

En una metodología adecuada para diseño sísmico las resistencias calculadas deben ser menores o iguales que las resistencias experimentales, y los valores del coeficiente de variación y sobrepredicción deben ser bajos. En la figura 2 se observa que los resultados de las ecuaciones disponibles para calcular la resistencia a cortante de muros para vivienda de baja altura no se correlacionan adecuadamente con los resultados medidos en ensayos, lo cual origina una dispersión sustancial de los datos. La fuente principal de variación de la mayoría de las metodologías probablemente está relacionada con la calibración de ecuaciones empleando resultados experimentales de especímenes con resistencias a la compresión del concreto medias o altas, así como con cuantías de refuerzo a cortante iguales o mayores que la mínima especificada en el ACI-318 (2008). A continuación se presentan las observaciones de la predicción de la resistencia a cortante de muros de concreto, utilizando los resultados de las metodologías principales:

- La metodología aquí propuesta (“Este estudio”) junto con el método de puntales y tensores del ACI-318 (ACI Ape. A) son las únicas donde se hace una estimación conservadora de la predicción de resistencia. Sin embargo, en la metodología de puntales y tensores del ACI-318 el coeficiente de variación es más alto
- Tal como se ha señalado en otros estudios (Gulec y Whittaker), las ecuaciones del capítulo 11 del ACI-318 hacen una mejor estimación de la resistencia que las ecuaciones del capítulo 21, aun cuando estas últimas forman parte de los requisitos de diseño sísmico. No obstante, en las dos metodologías el porcentaje de sobrepredicción es muy elevado.
- La metodología del capítulo 21 del ACI-318 sobrestima la resistencia en el 93,5% de los casos. Adicionalmente, la media aritmética y el coeficiente de variación son relativamente altos. El promedio y la variación de los resultados de la metodología de Sánchez son similares a los obtenidos al utilizar las ecuaciones del capítulo 21 del ACI-318.
- En el modelo de Gulec y Whittaker la media aritmética es cercana a uno pero la variación es alta.
- A partir del análisis de los resultados estadísticos se considera que la predicción de la resistencia a

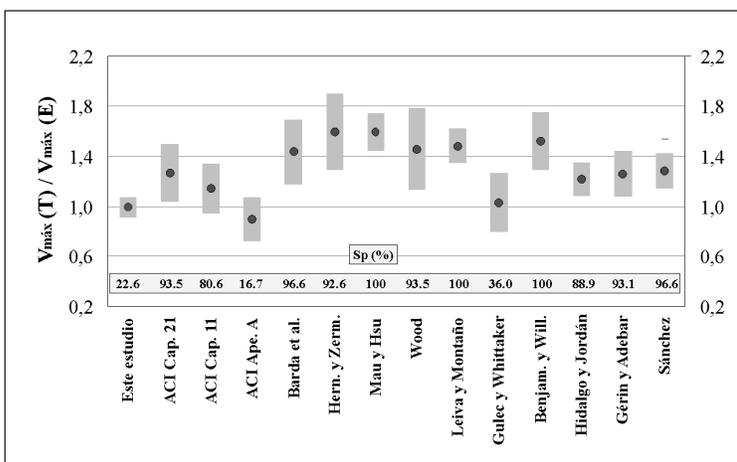


Figura 2. Evaluación de la predicción de resistencia.

cortante, empleando la metodología aquí propuesta, es adecuada para fines de diseño sísmico normativo de muros de concreto para vivienda de baja altura.

PARÁMETROS PARA DISEÑO SÍSMICO

Para diseño sísmico de estructuras, los códigos especifican parámetros y procedimientos que simplifican y hacen más “amigable” el proceso de diseño en la práctica. Cada uno de estos parámetros y procedimientos se establecen a partir de mediciones experimentales o estudios analíticos de los elementos o sistemas estructurales. En la figura 3a) se ilustra la representación del procedimiento que adopta la mayoría de los códigos de diseño sísmico. A partir de la respuesta medida en los ensayos cuasiestáticos y dinámicos, a continuación se presentan recomendaciones para estimar la capacidad máxima de ductilidad (μ_{cap}) y las derivas permisibles de entrepiso (R_{perm}) en muros de concreto para vivienda de baja altura.

CAPACIDAD MÁXIMA DE DUCTILIDAD

Por razones básicamente económicas, es impráctico pretender que las estructuras resistan los grandes temblores sin rebasar su intervalo de comportamiento elástico; por tanto, los criterios actuales de diseño admiten que la estructura experimente incursiones en el intervalo no lineal ante el sismo que caracteriza el estado límite de colapso. Esto permite limitar las demandas de fuerza en los elementos estructurales, a cambio de que se presenten demandas de ductilidad limitadas y cierto nivel de daños. En la mayoría de los códigos las fuerzas

sísmicas de diseño se reducen en función de la capacidad de ductilidad de las estructuras, empleando el factor de reducción por ductilidad (R_{μ}). Sin embargo, no todo el exceso de la capacidad estructural real ante sismo con respecto a la calculada se debe a comportamiento dúctil. La mayoría de las estructuras cuenta con reservas de capacidad ante carga sísmica no consideradas en el diseño convencional. Estas reservas extras hacen que la estructura tenga una sobrerresistencia y son consecuencia de diversas situaciones, tales como: a) el uso de factores reductores de la resistencia en el diseño; b) resistencias reales de los materiales mayores que sus resistencias nominales; c) el enfoque conservador de las fórmulas que se emplean para calcular la capacidad de la sección de un elemento. La opción más práctica de tomar en cuenta el efecto de la sobrerresistencia consiste en aplicar un factor reductor (Ω) del lado de las acciones (figura 3a)).

El factor de reducción por ductilidad (R_{μ}) se define como la máxima disminución de resistencia que se puede usar para mantener la demanda de ductilidad de desplazamiento por debajo de la capacidad máxima de ductilidad (μ_{cap}). En la figura 3b) se muestran gráficamente los parámetros estadísticos de μ_{cap} para los especímenes ensayados bajo carga lateral cíclica y en forma dinámica. Si se toma en cuenta que μ_{cap} debe estar relacionada con límites tolerables de capacidad de resistencia y disipación de energía, para su determinación se usó el desplazamiento asociado a una disminución de resistencia del 20% respecto a la máxima alcanzada (similar al cálculo de V_u , ecuación 7). Para fines prácticos de diseño normativo, se agruparon los datos de acuerdo

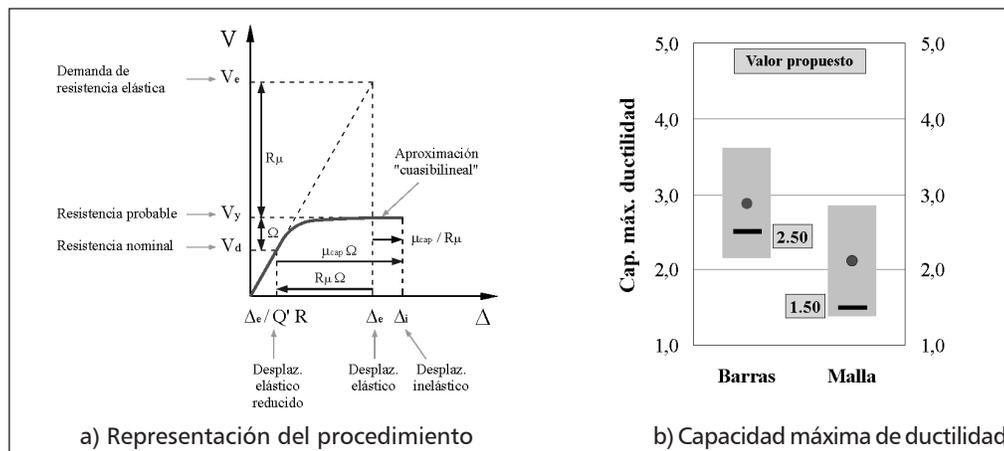


Figura 3. Diseño sísmico con fines normativos.

con el tipo de refuerzo en el alma. Tal como se esperaba, en la figura 3b) se observa que los valores de μ_{cap} son bajos, especialmente para los muros reforzados con malla de alambre soldado. En estos muros la capacidad máxima de desplazamiento se alcanzó para una deriva sólo un poco mayor que la asociada a la resistencia. A pesar de que los muros reforzados con barras corrugadas incursionaron apreciablemente en el intervalo inelástico, las derivas asociadas a una disminución de resistencia del 20% fueron relativamente bajas a causa de la tasa elevada de degradación de resistencia (Carrillo y Alcocer, 2008). En la figura 3b) se observa que el valor promedio fue igual a 2,1 para muros reforzados en el alma con malla de alambre soldado y 2,9 para muros con barras corrugadas. Si se considera que la muestra analizada corresponde a muros con diferentes geometrías (robustos, cuadrados y esbeltos), similar a lo que se tendría en una vivienda real, la dispersión de los resultados es alta.

El ACI-318 (2008) no se especifica explícitamente el valor de m_{cap} para muros de concreto en viviendas de baja altura y, por tanto, a partir de los resultados experimentales se recomienda utilizar $m_{cap} = 2,5$ para muros reforzados con barras corrugadas y $m_{cap} = 1,5$ para muros con malla de alambre soldado. Los valores recomendados también se indican en la gráfica de la figura 3b) por medio de una barra horizontal más gruesa. El valor recomendado para muros reforzados con barras corrugadas corresponde al percentil 42; es decir, el 58% de los datos se encuentran por encima de este valor, y para los muros reforzados con malla de alambre soldado corresponde al percentil 7; esto es, el 93% de los datos se encuentra por encima del valor recomendado. Estos porcentajes reflejan el factor de seguridad intrínseco en los dos tipos de refuerzo usado en los muros; en otras palabras, el factor de seguridad es mayor en los muros reforzados con malla de alambre soldado, donde se observó un modo de falla frágil caracterizado por la plastificación y posterior fractura de los alambres.

DERIVAS PERMISIBLES DE ENTREPISO

Normalmente, los límites normativos de las derivas permisibles (R_{perm}) están asociados a niveles de seguridad adecuados para su aplicación en la práctica de la ingeniería estructural; por tanto, para diseño sísmico es deseable definir los valores de R_{perm} a partir de resultados experimentales. De acuerdo con Duffey et ál. (1994),

las derivas permisibles especificadas en la mayoría de los códigos de diseño son generalmente poco conservadoras para muros con relación de aspecto baja, ya que los valores especificados están más dirigidos a estructuras de gran altura que a muros bajos. En la figura 4 se muestran curvas de histéresis características para muros cuadrados, robustos y esbeltos, reforzados con el 50% de la cuantía mínima a cortante estipulada en el ACI-318 (2008). Las curvas de histéresis se presentan en términos de deriva total y la resistencia normalizada; es decir, el cociente entre la fuerza cortante medida y la calculada con el modelo de predicción propuesto (“Este estudio”). En la primera fila de la figura 4 se muestran las curvas para muros con refuerzo a cortante en el alma utilizando barras corrugadas, y en la segunda fila, para muros con malla de alambre soldado. De manera similar a μ_{cap} , al determinar el valor de R_{perm} se observó que el tipo de refuerzo a cortante en el alma y la relación M/Vl_w o H/l_w son las características que afectan mayormente el valor de R_{perm} . Por ejemplo, para muros esbeltos se podrían plantear valores mayores que los propuestos para muros cuadrados o robustos. Sin embargo, para fines de diseño normativo no sería práctico proponer valores de R_{perm} o de μ_{cap} en función de la relación M/Vl_w o H/l_w , teniendo en cuenta que se debe utilizar un solo valor para el diseño de la vivienda. Por consiguiente, de acuerdo con la figura 4, para el estado límite último es conveniente establecer como derivas permisibles (seguridad contra el colapso) los siguientes valores: $R_{perm} = 0,65\%$ para muros reforzados con barras corrugadas y $R_{perm} = 0,35\%$ para muros con malla de alambre soldado.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las ecuaciones propuestas son de carácter determinista e incluyen las características particulares de muros en viviendas de interés social en Latinoamérica. En general, las ecuaciones están destinadas a capturar la respuesta promedio de la base de datos utilizada y se desarrollaron a partir de un análisis de regresión no lineal iterativo. Los valores aquí recomendados de μ_{cap} y R_{perm} están asociados a niveles de seguridad adecuados para su aplicación en la práctica de la ingeniería estructural y, por tanto, no representan la capacidad máxima de los especímenes estudiados.

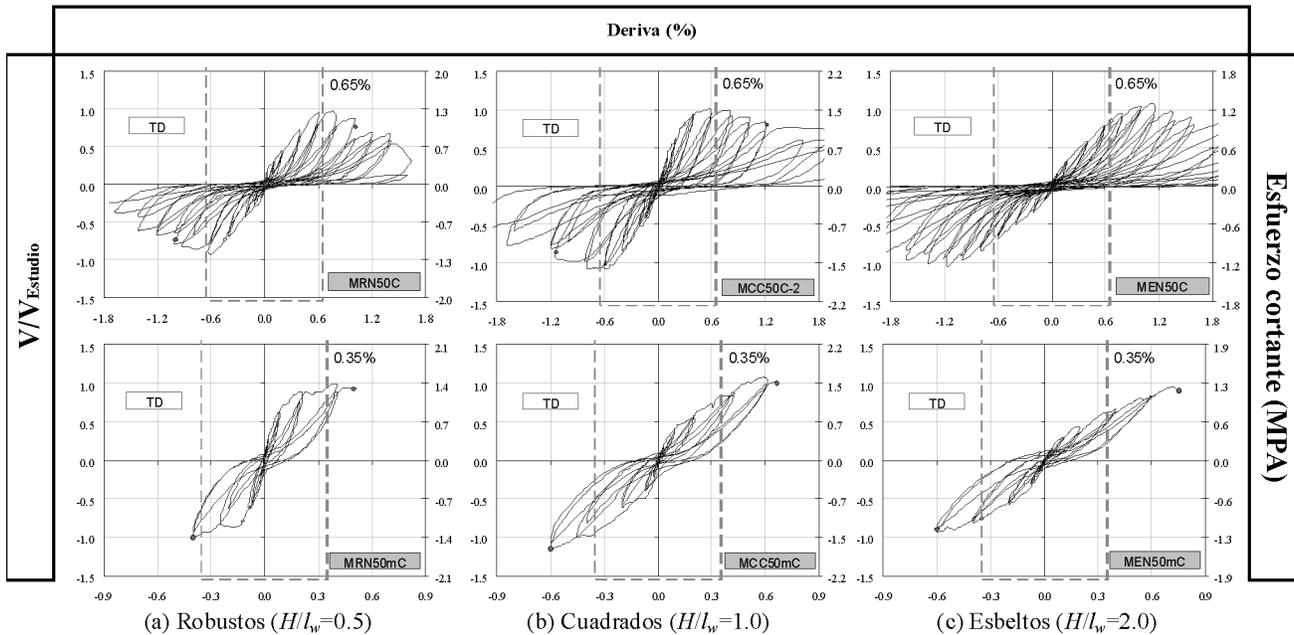


Figura 4. Derivas permisibles de entropeso.

LIMITACIONES

La aplicación de las ecuaciones del modelo está limitada a muros de concreto para vivienda de interés social de uno y dos niveles; es decir, el modelo desarrollado simula apropiadamente el comportamiento sísmico de muros con relación de aspecto menor o igual que 2,0 y muros con aberturas; muros cuya respuesta está gobernada por las deformaciones de corte; muros construidos con concreto de peso normal, peso ligero y autocompactable; resistencia a la compresión del concreto entre 15 y 25 MPa; muros con esfuerzo axial menor que 3% de f_c' ; cuantías de refuerzo en el alma menores o iguales que 0,25%; refuerzo en el alma del muro conformado por barras corrugadas o malla de alambre soldado, y con la misma cuantía de refuerzo horizontal y vertical en el alma.

EVALUACIÓN DE LAS ECUACIONES PROPUESTAS

Para la calibración de las ecuaciones propuestas se utilizaron resultados de especímenes ensayados bajo carga lateral cíclica y en forma dinámica en mesa vibratoria y, por tanto, se incluyen los efectos de la velocidad de aplicación de carga, el número de ciclos, los parámetros acumulados de ductilidad y energía disipada, así como

los efectos dinámicos de interacción entre la carga axial, el momento flexionante y la fuerza cortante. El análisis estadístico de los cocientes entre la respuesta calculada y medida demostró que las resistencias predichas con las ecuaciones propuestas son muy similares a las medidas y que la dispersión es evidentemente menor que en los modelos disponibles. Considerando que el énfasis del diseño sísmico está cambiando a un enfoque por desempeño, el modelo desarrollado proporciona una herramienta robusta para que los diseñadores y desarrolladores de códigos evalúen la efectividad de los procedimientos de diseño disponibles.

APLICACIÓN

Las ecuaciones y parámetros de diseño están planteados para incluirse en códigos de diseño. Los resultados pueden emplearse para desarrollar nuevas recomendaciones de diseño de acuerdo con la capacidad y la demanda de las viviendas; esto es, con un enfoque de diseño por desempeño. Por ejemplo, considerando la resistencia inherente de estructuras con muros de concreto, para sitios de amenaza sísmica limitada probablemente es factible disminuir o eliminar la cuantía de refuerzo a cortante en el alma, siempre y cuando se provean mecanismos eficientes para controlar el agrietamiento por

contracción y se disponga refuerzo por integridad estructural en los extremos de los muros de las viviendas. Las recomendaciones se deben establecer en función de la amenaza sísmica local de cada país; por ejemplo, a partir de la aceleración máxima del terreno y la demanda sísmica sobre cada elemento. Adicionalmente, dichas recomendaciones se deben verificar a partir de los resultados del análisis y diseño de un número apropiado de prototipos de vivienda reales.

CONCLUSIONES

Si se consideran las características particulares de los muros de concreto utilizados en la construcción de viviendas de interés social en Latinoamérica, los modelos de predicción y los requerimientos de diseño no son directamente aplicables. Con el propósito de promover la construcción de viviendas económicas de interés social, manteniendo una seguridad estructural adecuada, se desarrollaron recomendaciones para estimar los parámetros principales de diseño sísmico normativo de este tipo de estructuras: resistencia a cortante, capacidad máxima de ductilidad y deriva permisible. A partir de la respuesta medida en 39 especímenes, ensayados en forma cuasiestática y dinámica, se calibró un modelo de predicción de resistencia y se evaluaron los parámetros asociados a la capacidad de desplazamiento. El análisis de los resultados estadísticos demostró que la predicción de resistencia a cortante usando la metodología aquí propuesta es adecuada para fines de diseño sísmico de muros de concreto para vivienda de baja altura. Adicionalmente, las ecuaciones y parámetros de diseño están planteados de una manera práctica y sencilla para ser incorporados dentro de un código de diseño.

Si se toma en cuenta que en los últimos años el diseño sísmico por resistencia ha experimentado una reevaluación trascendental, con el énfasis cambiando de “resistencia” a “desempeño”, los resultados de esta investigación podrían contribuir al desarrollo de modelos de predicción más precisos y recomendaciones de diseño para mejorar o replantear los códigos actuales. Si se adoptan las recomendaciones aquí propuestas, se espera que el diseño sísmico por desempeño promueva una vivienda de interés social más segura, económica y confortable para la población latinoamericana.

REFERENCIAS

- ACI - Comité 318 (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08). Farmington Hills, MI, EUA.
- Barda, F., Hanson, J. & Corley, W. (1977). Shear strength of low-rise walls with boundary elements: Publicación SP-53. Detroit: Instituto Americano del Concreto (ACI), pp. 149-202.
- Benjamin, J. & Williams, H. (1957). The behavior of one-story reinforced concrete shear walls. *Journal of the Structural Division-Asce*, vol. 83, N.º ST3, pp. 1-49.
- Carrillo, J. & Alcocer, S. (2008). Shaking table test of low-rise concrete walls for housing. 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, artículo 12-01-0011.
- Duffey, T., Goldman, A. & Farrar, C. (1994). Low-rise shear wall ultimate drift limits. *Journal of Earthquake Spectra*, vol. 10, N.º 4, pp. 655-674.
- Eberhard, M., Baldrige, S., Marshall, J., Mooney, W. & Rix, G. (2010). The Mw 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010, V1.1: USGS/EERI Advance Reconnaissance Team. U.S. Geological Survey and Earthquake Engineering Research Institute. California, EUA, p. 56.
- Gérin, M. & Adebar, P. (2004). Accounting for shear in seismic analysis of concrete structures. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, artículo 1747.
- Gulec, C. & Whittaker, A. (2009). Performance-based assessment and design of squat reinforced concrete shear walls. Reporte Técnico - MCEER, N.º 09-0010. EUA.
- Hernández, O. & Zermeño, M. (1980). Strength and behavior of structural walls with shear failure. 7th World Conference on Earthquake Engineering. Estambul, vol. 4, pp. 121-124.
- Hidalgo, P. & Jordán, R. (1996). Strength and energy dissipation characteristics of reinforced concrete walls under shear failure. 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, artículo 816.
- Mau, S. & Hsu, T. (1986). Shear design and analysis of low-rise structural walls. *ACI Structural Journal*, vol. 83, N.º 2, pp. 306-315.
- Johansson, J., Mayorca, P., León, E. & Torres, A. (2007). Pisco earthquake, Peru, August 15, 2007: JSCE/JAEE/UT Investigation Team. Japón: Japan Society of Civil Engineers, Japan Association of Earthquake Engineering, p. 109.
- Leiva, G. & Montaña, E. (2001). Resistencia al corte de muros de hormigón armado. *Revista de Ingeniería Sísmica*, N.º 64, pp. 1-18.
- Priestley, M. (2000). Performance based seismic design, 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand, artículo 2831.
- Pujol, S., Ramírez, J. & Sarria, A. (1999). Coffee zone Colombia, January 25 Earthquake: Observations on the behavior of low-rise reinforced concrete buildings. <http://nisee.berkeley.edu/lessons/columbia.pdf>, p. 9.
- Sánchez, A. (2010). Comportamiento sísmico de viviendas construidas con muros de concreto. Tesis de doctorado. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Wood, S. (1990). Shear strength of low-rise reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal*, vol. 87, N.º 1, pp. 99-107.

Modelo de gestión para la rehabilitación de redes troncales de alcantarillado

Management model to restore sewerage main networks

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ Y HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ²

1. Profesor titular del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asistente del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Recibido: 20/05/2010 Aceptado: 25/06/2010

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

Resumen

En este artículo se expone un modelo de gestión para reparar redes troncales de alcantarillado, desarrollado por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. A partir de este modelo, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá construyó y desarrolló una herramienta informática soportada por el Sistema de Información Geográfica, que permite evaluar variables de gestión y reparación de redes troncales de alcantarillado, estudiando sobre todo topología, población, uso del suelo, hidrología e hidráulica de flujo inestable, así como características geotécnicas, estructurales, ambientales y económicas para elaborar propuestas de reparación del sistema.

Palabras clave: alcantarillado, reparación, modelo de gestión, sistema de información geográfica

Abstract

This article presents the general outline of a management model for restoring sewerage main networks developed by the Centro de Estudios Hidráulicos, Escuela Colombiana de Ingeniería. Taking this model as a starting point, the Aqueduct and Sewerage Company of Bogotá has built and developed a computational tool, supported by GIS. With this tool you can evaluate variables involved in the management and restoration of sewerage main networks emphasizing in topological aspects, population, land use, hydrology, and hydraulics of unsteady flow, as well as geotechnical, structural, environmental, and economic features to propose alternatives for restoring the system.

Keywords: sewerage, restoration, management model, geographic information system.

INTRODUCCIÓN

El Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito realiza para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá el proyecto de investigación “Desarrollo de un modelo de gestión para la rehabilitación de la red troncal de alcantarillado”. En el presente proyecto intervienen quince especialistas, adscritos principalmente al Centro de Estudios Hidráulicos y a otros Centros de Estudios de la Escuela.

Esta investigación, que se viene llevando a cabo desde el mes de diciembre de 2009, tiene como objetivo principal el planteamiento y desarrollo de un modelo de gestión para la rehabilitación de una red troncal de alcantarillado, y se incluyen su diseño y aplicativo, que debe estar soportado en una plataforma de Arc SIG. Para el planteamiento del modelo se han considerado varios aspectos, pero principalmente se han involucrado los correspondientes a la topología de la red troncal, la hidrología y los caudales de retorno, los análisis de la capacidad hidráulica del sistema en condiciones de flujo no permanente, las condiciones geotécnicas y estructurales de las redes, las características de la calidad del agua, las técnicas disponibles para reparación, renovación, remplazo y desarrollo de obras complementarias, y la evaluación financiera y de costos.

ANTECEDENTES

Las sociedades organizadas necesitan transportar y disponer adecuadamente de sus residuos líquidos para garantizar condiciones de salubridad y comodidad en las zonas urbanas. También deben construir sistemas para captar, conducir y evacuar la escorrentía de aguas lluvias, de manera que se pueda garantizar la seguridad de la vida y los bienes de la gente, al igual que la comodidad y facilidad en la movilidad. Para satisfacer estas necesidades en las ciudades se construyen sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial, o combinado, que en general están compuestos por redes menores, secundarias y troncales.

Adicionalmente, de acuerdo con el crecimiento y la evolución de la sociedad, estos centros urbanos se transforman y por tanto los sistemas de alcantarillado crecen, se envejecen y deterioran, condiciones que obligan a adecuar, mantener y mejorar estos sistemas de transporte.

La evolución de los núcleos urbanos y de estos sistemas de alcantarillado hace necesario realizar una gestión que conduzca necesariamente al planteamiento y ejecución de planes y obras para su rehabilitación, de tal manera que se adecue a las nuevas condiciones impuestas. Esta gestión tiene especial importancia y complejidad, debido principalmente al número de variables involucradas en las conducciones mayores, las cuales conforman la espina dorsal del sistema, denominado el sistema troncal de alcantarillado.

No invertir en obras de rehabilitación para un sistema troncal de alcantarillado puede ocasionar altos costos de indemnización y reconstrucción de la infraestructura deteriorada o destruida, ya que esto representa un riesgo para la sociedad y para las finanzas de las empresas encargadas de su operación y mantenimiento.

El reto presente y futuro para el operador de un sistema troncal de alcantarillado consiste en mantener eficiente un sistema que se envejece y deteriora, con la mínima cantidad de recursos, y a la vez garantizar que se puede adaptar a continuas y permanentes variaciones.

En la actualidad se cuenta con diferentes técnicas para el mantenimiento, reparación y rehabilitación del alcantarillado que ofrecen a los gestores alternativas de solución con diversos costos, situación que obliga a realizar análisis de mayor envergadura para brindar soluciones óptimas desde los puntos de vista técnico y económico. Entre estas posibilidades de operación y manejo también se debe incluir la incorporación de estructuras especiales, como tanques y lagunas de amortiguamiento, alivios y divisores de caudal, compuertas, etc., que permiten el trabajo adecuado del sistema, sobre todo si se cuenta con estaciones de medición y control y modelos computacionales de predicción y operación del sistema, integrados en un centro de control y monitoreo de las operaciones.

La distribución espacial de los sistemas de alcantarillado y su dinámica, la gran cantidad de información necesaria para la gestión de la rehabilitación y la disponibilidad del almacenamiento de información exigen el desarrollo de modelos predictivos, soportados sobre plataformas computacionales SIG que faciliten el manejo y la visualización de los resultados, de modo tal que se constituyan en herramientas de soporte efectivas. Estos argumentos obligan a desarrollar herramientas computacionales que posibiliten el manejo de mucha

información, que evalúen los aspectos técnicos y económicos involucrados y que faciliten la toma de decisiones para que el gestor del sistema de alcantarillado pueda seleccionar los proyectos de rehabilitación más adecuados, que garanticen la mejor inversión de los recursos disponibles.

MARCO CONCEPTUAL

La rehabilitación de un sistema de alcantarillado forma parte de las labores generales de operación y mantenimiento y, por tanto, está incluida dentro de la gestión. Como el objetivo principal es definir y establecer las características de una herramienta de gestión que permita plantear y desarrollar adecuadamente las labores de rehabilitación, es necesario precisar su marco de referencia y definir una serie de términos técnicos involucrados en el tema.

Los alcantarillados son sistemas productivos que prestan un servicio de recolección y transporte de agua desde los puntos de consumo o entrada hasta uno o varios puntos de descarga (o tratamiento y descarga). Son sistemas ramificados complejos, compuestos por elementos de diferentes características para cubrir una región geográfica urbanizada. Los alcantarillados son básicamente de dos tipos: separados o combinados (unitarios). Los alcantarillados separados se emplean para transportar aguas residuales domésticas, industriales y comerciales, en cuyo caso se pueden denominar también alcantarillados sanitarios, o para transportar aguas provenientes de la precipitación atmosférica, en cuyo caso se denominan alcantarillados pluviales. En los alcantarillados combinados se reúnen y transportan tanto aguas residuales como aguas lluvias.

La operación de estos sistemas de alcantarillado exige algunas veces, debido a la extensión y complejidad de las redes municipales, realizar subdivisiones generalmente relacionadas con la extensión del área servida y el tamaño de los conductos. Es posible hacer una división entre redes locales, de tal manera que se conformen tramos iniciales de alcantarillas, ramales secundarios y colectores secundarios, redes troncales conformadas por colectores principales, interceptores y emisarios. Esta subdivisión resulta muy útil para las labores de modelación, operación, mantenimiento, etc.

Gestión de alcantarillados

La gestión de un sistema de alcantarillado hace referencia a las acciones y diligencias que permitan obtener unos objetivos claros y precisos que aseguren el funcionamiento eficiente del sistema, con los menores costos; por tanto, la administración de los recursos disponibles será clave para que el sistema capte, conduzca y entregue los caudales de aguas residuales sin afectar la salubridad, la seguridad y el medio ambiente dentro del área urbanizada y fuera de ella.

Durante muchos años se ha creído que los sistemas de alcantarillado pueden operar solos y que únicamente se debe hacer un monitoreo y un control periódico sobre las estaciones elevadoras. Por esto el mantenimiento de los sistemas sólo se ha efectuado en forma reactiva ante la ocurrencia de situaciones que afectan su operación y se actúa únicamente cuando la comunidad reporta el fallo. Durante la vida útil de la obra, también es frecuente olvidar el envejecimiento y el deterioro de los alcantarillados debido a que realmente su vida se ha prolongado gracias a los diseños conservadores derivados de los factores de seguridad aplicados en la determinación de los caudales, en los diseños estructurales y en las consideraciones geotécnicas. Los fallos en el sistema, al igual que con el mantenimiento, se han atendido una vez que ocurre el problema, para superar la emergencia, y asumiendo los costos producidos por daños a terceros.

En la actualidad, estas condiciones han cambiado y las empresas prestadoras del servicio de alcantarillado entienden y reconocen la necesidad de conservar, controlar, mantener y operar los sistemas, mediante manejos predictivos y no reactivos. Adicionalmente, a causa del establecimiento de normas ambientales más rígidas que buscan minimizar los impactos adversos que producen los sistemas mal manejados y que operan deficientemente, se ha venido consiguiendo este propósito.

En el futuro próximo es necesario realizar una gestión integral del alcantarillado de las zonas urbanas, de tal manera que se minimicen los riesgos sobre la salubridad, la seguridad y la movilidad pública, teniendo en cuenta que estos sistemas hidráulicos dinámicos, extendidos geográficamente y construidos a lo largo del tiempo con técnicas y materiales diferentes, sometidos a variaciones en las condiciones de operación, geotécnicas y medioambientales, son muy susceptibles de presentar en el tiempo dificultades que hay que prever y corregir.

Adicionalmente, se requiere considerar el sistema de alcantarillado en conjunto con las plantas de tratamiento y los cuerpos naturales de agua, receptores finales de las aguas residuales. De acuerdo con lo anterior, para la gestión de un sistema de alcantarillado se debe disponer de la máxima cantidad de información, producida y validada por especialistas de cada una de las áreas técnicas involucradas, de tal modo que sea posible efectuar un análisis de las inversiones necesarias, contrastadas con los recursos disponibles, para realizar inversiones que garanticen el cumplimiento de los objetivos para diferentes horizontes de análisis.

Operación de alcantarillados

La operación se enfoca en el funcionamiento del sistema de alcantarillado, que incluye el mantenimiento y la rehabilitación, teniendo presente que como todo sistema productivo el funcionamiento ocasiona desgaste y deterioro de sus componentes. Los alcantarillados están sometidos a procesos de corrosión, erosión, obstrucción, sedimentación, sobrecarga, etc., que pueden llevar al colapso en puntos específicos, lo cual repercute en el funcionamiento de los sectores aguas arriba de éste.

Los conceptos modernos de operación exigen un conocimiento exacto del sistema y de todos los activos que lo componen, e incluyen un monitoreo continuo del funcionamiento del sistema, así como de modelos predictivos de su funcionamiento para diferentes eventos, con variadas probabilidades de ocurrencia y modificaciones en el entorno urbano. A diferencia del pasado, hoy por hoy, en la operación de los sistemas de alcantarillado es indispensable cumplir permanentemente con tareas de mantenimiento, monitoreo, control, modelación, actuación y rehabilitación.

Mantenimiento de alcantarillados

El mantenimiento se define como todas las acciones que se deben ejecutar sobre los activos del sistema de alcantarillado con el fin de mantener su funcionamiento adecuado, de forma tal que se garantice la salubridad pública y se disminuyan los riesgos a la comunidad, así como también que se asegure su movilidad, objetivos que coinciden plenamente con los objetivos del sistema de alcantarillado. Su mantenimiento adecuado garantiza

y prolonga su vida útil, con lo cual ahorra en inversiones de sustitución.

Existen dos modos de hacer el mantenimiento: el reactivo y el predictivo o planeado. El mantenimiento reactivo se realiza cuando aparece un reporte sobre el funcionamiento deficiente del sistema en un punto o zona. En ese caso, los recursos deben estar disponibles para solucionar la emergencia y restablecer lo antes posible la normalidad del servicio. En el mantenimiento predictivo o planificado se tratan los problemas potenciales antes de que ocurra la falla, el trabajo es proactivo y su objetivo es reducir los riesgos de falla.

Para efectuar el mantenimiento preventivo planeado es indispensable ejecutar tareas rutinarias de localización e inspección, razón por la cual hoy en día es prioritario que un operador de alcantarillado moderno cuente con una base de datos geográfica confiable, donde se tengan todas las características relevantes de la red, en lo posible que conserve registros de su estado físico y operativo y, lo más importante, que su actualización sea ágil y permanente. Ahora se puede contar también con elementos de monitoreo remoto permanente de la operación del sistema, que ayudan a maximizar la eficiencia de las labores de planificación y ejecución del mantenimiento. Fenómenos como la corrosión interna por la acción de los sulfuros, o la externa de suelos agresivos, las sobrecargas sobre los elementos estructurales, como las producidas por los sismos, son muy difíciles de prever y cuantificar, aunque existan diversos modelos para tratar de estimarlos. Otros factores, como los bloqueos por mal uso del sistema, son más difíciles de predecir. Estas razones pueden conducir a que la mejor alternativa sea efectuar inspecciones periódicas, con intervalos que se ajustan según se adquiera un conocimiento del comportamiento en el tiempo del deterioro de los activos.

Localización de los activos del sistema de alcantarillado

El primer paso en las labores de mantenimiento y operación de alcantarillados es verificar la exactitud y veracidad de los registros existentes sobre la ubicación y características de los elementos que conforman el sistema, para iniciar el estudio juicioso de los elementos sobre los que se tenga duda. Esta información se puede recopilar por medios tradicionales topográficos o por vías más rápidas pero menos precisas, como el uso de

sistemas de posicionamiento global (GPS, por su sigla en inglés). Es frecuente que las tapas estén cubiertas por capas de suelo o pavimento, casos en los que se utilizan detectores de metales o sondas electrónicas o de radar para su ubicación. Así mismo, en las labores de inspección, recopilación o validación de la información hay que determinar las cotas de fondo de los pozos, las cotas de batea de los tramos de conducción que llegan y salen de cada estructura inspeccionada, así como sus diámetros y materiales. Cuando se realiza el estudio de localización del sistema de alcantarillado, es necesario elaborar un registro de cada una de las estructuras especiales, tales como alivios, sifones invertidos, estructuras de división del flujo, almacenamientos, entre otras.

Inspección del alcantarillado

La inspección del alcantarillado se debe realizar después de que la campaña de localización, en la zona de estudio, está completa y se ha finalizado. Estas labores de inspección se efectúan usando técnicas que van desde inspección personal directa, hasta inspecciones remotas con equipos electrónicos. Cuando el acceso es limitado y la inspección no puede ser personal, el sistema más utilizado es la inspección con equipos CCTV, mediante el cual la cámara de video se monta sobre un elemento móvil autopropulsado, controlado remotamente desde un vehículo adecuado con consolas de comando y registro y donde la cámara se acompaña con reflectores de luz. Las unidades móviles pueden ser de flotadores o vehículos de ruedas, dependiendo de la profundidad de la lámina de agua. Cuando el conducto está parcial o completamente lleno de agua, la inspección se hace utilizando dispositivos de sonar para la parte sumergida y cámaras de CCTV para la zona en la que no existe flujo. Algunos equipos con cámara de video o sonar se acompañan de dispositivos perfiladores láser que proyectan un haz de luz sobre las paredes del conducto, condición que permite establecer deformaciones o anomalías en la conducción que a simple vista no son detectables. Otra técnica para la inspección del alcantarillado es la que emplea imágenes térmicas, en la que se usa una cámara infrarroja.

Limpieza del alcantarillado

La inspección rutinaria del alcantarillado permite identificar y mostrar los problemas típicos que pueden requerir un mantenimiento básico, es decir, limpieza. Los problemas más frecuentemente encontrados en los alcantarillados, que ocasionan una reducción de la capacidad del sistema o un deterioro estructural de éste, son los siguientes:

- Sedimentación
- Acumulación de grasa
- Bloqueo
- Penetración de raíces
- Intrusión de tuberías laterales

Estos inconvenientes pueden eliminarse utilizando diferentes técnicas de limpieza de alcantarillado, las cuales pueden incluirse en planes de mantenimiento planeado o reactivo, para facilitar labores de inspección o para iniciar trabajos de rehabilitación.

En el alcantarillado a superficie libre, la limpieza se hace para eliminar materiales acumulados, tales como grasas, aceite, basuras y sedimentos. Además, se utiliza para corregir defectos estructurales, como sellos o uniones que sobresalen y la intrusión de raíces, los cuales pueden causar también bloqueos que pueden removerse en la operación de limpieza.

Es posible limpiar las alcantarillas con métodos hidráulicos o mecánicos, o una combinación de los dos. En las alcantarillas de gran tamaño, donde la entrada de hombres es relativamente fácil y donde las condiciones de seguridad lo permitan, la limpieza puede ser manual, con mangueras a presión y cepillos de lavado, y para eliminar los obstáculos más grandes y de escombros el personal podrá utilizar herramienta y medios de transporte comunes usados en trabajos subterráneos. Técnicas como la limpieza hidráulica (*jetting*), dispositivos de varilla (*rodders*), equipos de cablestrante (*winch*), lavado por olas (*flushing*) o trampas de fondo son comunes en las labores de limpieza de alcantarillado.

Monitoreo de un sistema de alcantarillado

El monitoreo es el conjunto de actividades encaminadas a vigilar la operación del sistema con estrategias o mecanismos que permitan conocer en forma periódica

o permanente el desempeño de los componentes del sistema.

En la actualidad, con ayuda de una gran variedad de equipos electrónicos de medición y los sistemas de comunicación, es posible establecer estaciones de observación o de medición, comunicadas con un centro de monitoreo que eventualmente también puede establecerse como centro de control. De acuerdo con el sistema de comunicación y transmisión de información, el monitoreo puede realizarse a intervalos de tiempo predeterminados o de modo permanente, caso en el cual se denomina en tiempo real.

Para un sistema de alcantarillado las principales variables que se monitorean de manera continua son las hidráulicas y las ambientales. Las estaciones de medición se ubican principalmente en puntos de la red troncal, en estructuras especiales que son susceptibles de definir controles hidráulicos o en puntos de la red donde, por las condiciones de la infraestructura, se facilita la instalación de las unidades. Cuando el objetivo del monitoreo tiene que ver con aspectos ambientales hay que efectuar siempre mediciones simultáneas de caudal, junto con la de los parámetros de calidad del agua.

El monitoreo puede tener diferentes objetivos, el más simple de los cuales es tener la posibilidad de recibir alarmas o avisos sobre funcionamientos deficientes o exigencias extremas en componentes específicos del sistema. Otro objetivo puede ser medir para conocer el desempeño del sistema en las condiciones de operación de un determinado intervalo de tiempo. En otros casos se debe medir y monitorear cuando hay que calibrar modelos físicos o numéricos del sistema, que pueden

predecir su comportamiento. Más adelante se presenta un esquema general, con los elementos que componen un punto de monitoreo (figura 1).

Control de alcantarillados

Dentro del desarrollo de la gestión de un sistema de alcantarillado el paso siguiente, una vez implantado su monitoreo, es el control del sistema. El control de un sistema de alcantarillado es el conjunto de componentes que regula su desempeño, vigilando de manera permanente los caudales transportados y la calidad del agua dentro de las conducciones y estructuras hidráulicas que lo componen, para evitar desbordes o inundaciones y descargas con elementos contaminantes superiores a los que los cuerpos naturales o plantas de tratamiento de agua puedan depurar.

Los sistemas de control más modernos en ingeniería están en capacidad de automatizar procesos con base en la medida de parámetros y reciben el nombre de controladores de automatización programables (PAC o PLC, *Programmable Logic Controller*). Estos sistemas reciben información de sondas y dispositivos de monitoreo, los cuales registran los parámetros seleccionados y envían la información a un tablero de control que traduce la información analógica a digital y la envía a una terminal de computador, donde un *software* especializado procesa la información y, de acuerdo con la programación definida, retorna las respuestas al tablero de control, el cual traduce la información digital a analógica y la remite a los dispositivos accionadores electromecánicos, con el fin de que cambien las condiciones de operación del sistema. Para los sistemas de alcantarillado, los PLC son de uso común en estaciones de bombeo y en compuertas o mecanismos de control de estructuras hidráulicas; están compuestos por sensores que miden alturas de lámina de agua, velocidades de flujo, parámetros de calidad del agua como pH, temperatura, OD, SS, etc., de tal manera que el control sobre el sistema es dinámico y en tiempo real. A renglón seguido se presenta un esquema general de un sistema de controladores de automatización programable, aplicado a un sistema de alcantarillado (figura 2).

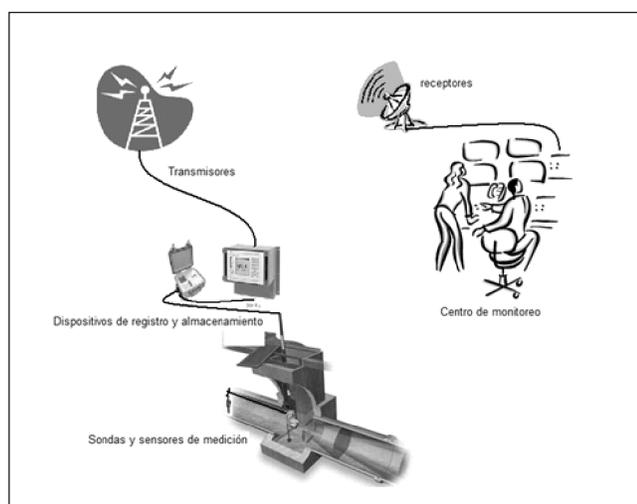


Figura 1. Esquema de una estación de monitoreo.

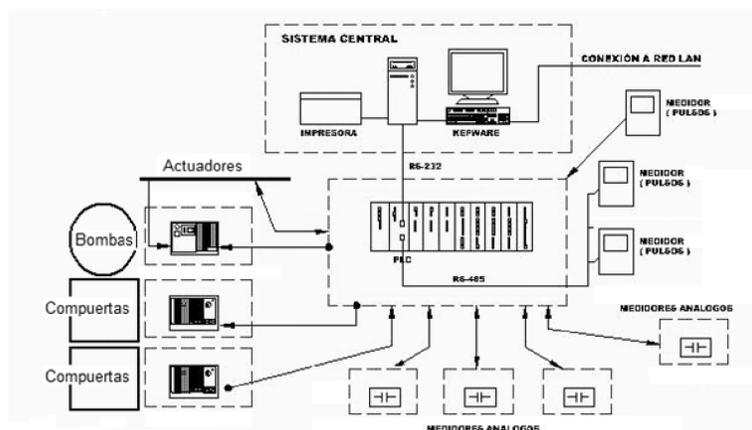


Figura 2. Esquema general de un sistema de controladores de automatización programable.

Modelación hidráulica e hidrológica de un sistema de alcantarillado

En la gestión de un sistema de alcantarillado será siempre conveniente predecir su comportamiento ante diferentes condiciones de operación. Esta necesidad exige el desarrollo de un modelo del sistema de alcantarillado, bien sea físico o numérico. Los sistemas físicos a escala son inviables debido a la extensión y complejidad de los alcantarillados, dejando únicamente como acción posible el modelo numérico. Los modelos computacionales de drenaje urbano existente, comercial o de dominio público, en general poseen componentes hidrológicos e hidráulicos y realizan los análisis en condiciones de flujo permanente o no permanente. El componente hidrológico determina las condiciones de la zona urbana o cuenca hidrológica, y con los parámetros climáticos, según la información de la zona de estudio, hace una modelación de precipitación, infiltración, interceptación y escorrentía, parámetros con los cuales es posible determinar los aportes al sistema. Con el componente hidráulico, se efectúa el tránsito dentro de los elementos del sistema de alcantarillado de las condiciones hidrológicas determinadas. En la actualidad, muchos de los paquetes comerciales incluyen herramientas o interfaces con sistemas de información geográfica, lo que potencia aún más su alcance.

Los modelos de drenaje urbano son en general determinísticos y no tienen en cuenta las características aleatorias que envuelven los procesos hidrológicos, involucran hipótesis simplificadoras que posibilitan el cálculo o lo reducen y, por tanto, tienen como conse-

cuencia un resultado aproximado. Hoy en día se encuentra en el mercado una amplia variedad de modelos, entre los que se pueden destacar el SWMM, InfoWorks, SewerGems, Mouse, Hydro.

Actuación sobre los alcantarillados

El estado más avanzado de la operación del alcantarillado es la actuación directa sobre el sistema y hacer modificaciones en las condiciones físicas del sistema o partes determinantes de él, con el fin de obtener un funcionamiento específico ante una demanda prevista. Para actuar sobre el sistema de acuerdo con estas condiciones es necesario disponer de un sistema de control y un modelo computacional, calibrado con la información de campo.

Adicionalmente, es indispensable la información climática predictiva, tomada de un centro de monitoreo del clima de la región donde se ubica el sistema de drenaje urbano. Con estas herramientas disponibles en el centro de control del sistema de alcantarillado se recibe la información climática predictiva; por ejemplo, una tormenta, con una magnitud y una duración aproximadas. Con estos datos se alimenta el modelo numérico con el que se analiza el evento y el desempeño del sistema de alcantarillado, previendo por ejemplo posibles puntos de inundación. Con esta información se modifican las condiciones de los elementos de control del sistema, compuertas, estaciones de bombeo, derivaciones, etc., con los cuales se pueden establecer unas condiciones adecuadas de apertura y cierre de los elementos de control. Si las condiciones fijadas en el modelo mitigan los problemas o los eliminan, con esta información se modifican mediante el programa maestro del controlador de automatización programable, con el propósito de que el sistema de alcantarillado responda a las exigencias de la tormenta prevista, habiendo actuado con antelación al evento y garantizado un adecuado desempeño del sistema.

Rehabilitación de alcantarillados

La rehabilitación de los sistemas de alcantarillado se entiende como el conjunto de métodos y acciones cuya finalidad es mantener o recuperar las condiciones para recoger y transportar aguas residuales. Una rehabilitación de alcantarillados efectiva se realizará mediante un

conjunto de actividades establecidas en un modelo de gestión del sistema, encaminadas a la recuperación de la funcionalidad perdida o disminuida de los componentes existentes, para cumplir su cometido de recolección y transporte de aguas residuales.

Dentro de la rehabilitación, las labores de renovación, reparación, remplazo y de obras complementarias para el sistema tienen una gran importancia en el proceso de toma de decisiones del modelo de gestión, las que podrían explicarse de la siguiente manera:

- *Renovación.* Conjunto de actividades conducentes a recuperar el estado primario de capacidad y resistencia de los activos del sistema.
- *Reparación.* Arreglo del estado físico de un activo del sistema de alcantarillado que ha sufrido el daño de sus componentes, para que recupere su estado de funcionalidad original.
- *Remplazo.* Eliminación del activo deteriorado y su sustitución por uno nuevo, que tenga iguales o superiores características.
- *Obra complementaria.* Conjunto de actividades necesarias y construcción de activos del sistema de alcantarillado que permiten recuperar o mejorar las condiciones de operatividad.

Consideraciones y aspectos de la gestión para la rehabilitación

De acuerdo con los criterios que se han planteado, la gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado busca restablecer o mejorar las condiciones de operatividad, con el fin de cumplir con el cometido para el que se diseñó y construyó dicho sistema. La necesidad de la rehabilitación surge de una serie de agentes externos que deterioran las condiciones de los elementos que constituyen el alcantarillado y que los someten a unas exigencias mayores que aquellas contempladas cuando se proyectaron y diseñaron. Estos agentes se pueden clasificar en varios grupos, de acuerdo con la naturaleza de su procedencia. Dichos agentes o elementos se pueden clasificar en varios grupos, que a continuación se mostrarán como aspectos que hay que tener en cuenta para la gestión del alcantarillado que debe rehabilitarse.

- *Aspectos técnicos.* Categoría en la que se agrupan los aspectos relacionados con las disciplinas de la ingeniería involucradas en el proceso. El alcantarillado,

desde el punto de vista de la ingeniería, es un conjunto de estructuras hidráulicas subterráneas que conforman un sistema ramificado abierto, el cual ocupa una región urbanizada, que necesariamente involucra diferentes especialidades con los siguientes aspectos:

- Estructurales
- Geotécnicos
- Hidráulicos
- SIG
- *Aspectos ambientales.* Aunque estos elementos se pueden considerar dentro de las especialidades de la ingeniería, se presentan de manera independiente dada su relevancia y tomando en cuenta que es un objetivo primario del sistema de alcantarillado. Igualmente, es importante considerar que su relación con los aspectos normativos y legales es muy fuerte, aparte de que el sistema de alcantarillado y el área urbana sirven como un subsistema del sistema biótico que los contiene.
- *Aspectos económicos.* El alcantarillado como sistema productivo implica una inversión de recursos económicos, en tanto que la gestión para la rehabilitación requiere un análisis económico que permita direccionar la inversión de los recursos disponibles en la opción que genere un mejor retorno a la comunidad y una mejor rentabilidad.

Definidos y estudiados los aspectos fundamentales para el planteamiento de la rehabilitación del sistema de alcantarillado, se encontrarán las causas o agentes que afectan el desempeño del sistema de alcantarillado, las cuales se podrán agrupar de acuerdo con los aspectos técnico-ambientales a que correspondan y teniendo en cuenta los aspectos económicos. A continuación se presenta el árbol del problema para la rehabilitación de una red troncal de alcantarillado, en el que se listan las causas y se clasifican dentro de uno de los aspectos ya mencionados (figura 3).

En la parte inferior del árbol del problema se presentan las opciones para la rehabilitación del alcantarillado, las cuales se agrupan en los mismos tres aspectos que hay que tomar en cuenta en la gestión del alcantarillado. Se destaca que los aspectos técnicos y ambientales son de doble vía o podrían estar dentro de una sola categoría.

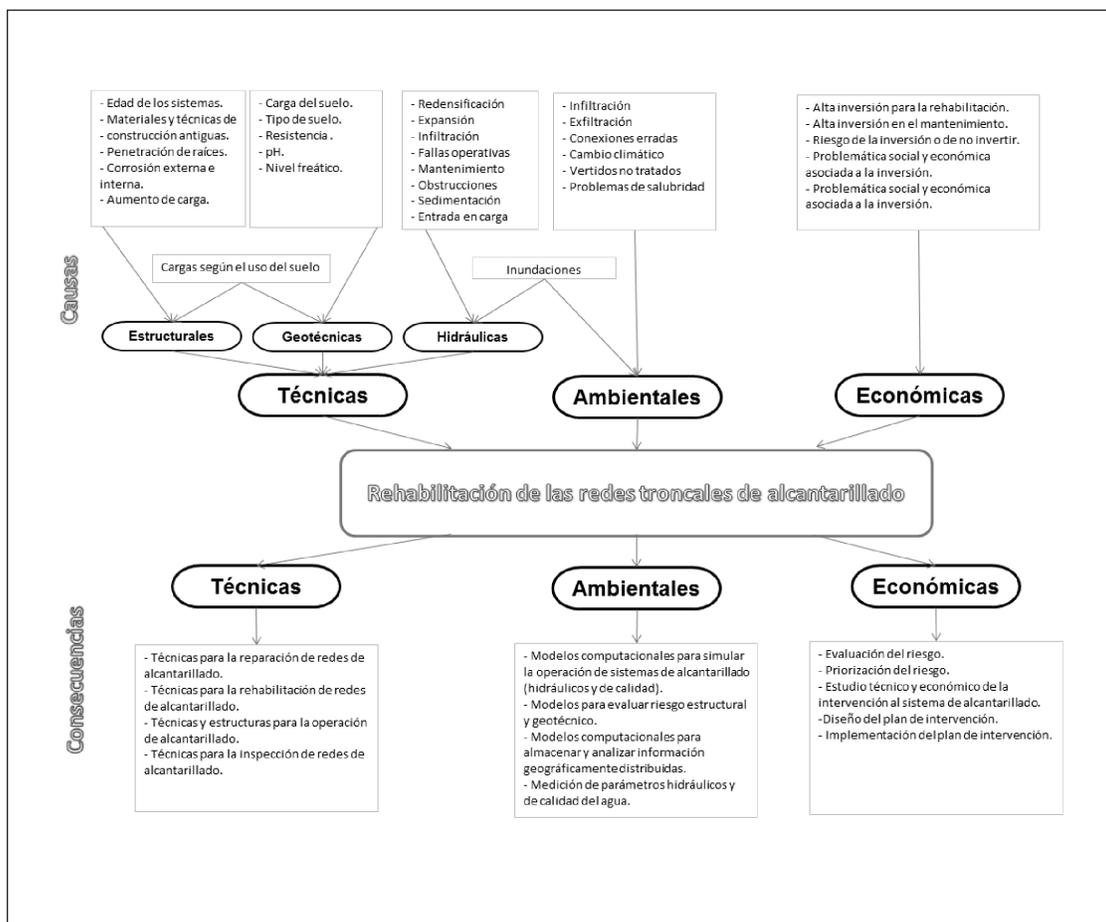


Figura 3. Árbol del problema de la rehabilitación de un alcantarillado troncal.

Obras para la rehabilitación

Del estudio y análisis de todos los aspectos relacionados con el funcionamiento y desempeño de un sistema de alcantarillado, es posible detectar e identificar los problemas que desencadenan la baja en su rendimiento y la falla en el cumplimiento de los objetivos establecidos. Identificadas las causas, la siguiente tarea es buscar el restablecimiento o mejora de las condiciones del sistema, mediante el planteamiento, análisis, diseño y construcción de obras para la rehabilitación, como las presentadas en la tabla siguiente, en la que se hace un resumen de algunas de las obras y técnicas para la rehabilitación del alcantarillado (tabla 1). Cabe mencionar que debido al alto costo de los métodos tradicionales de construcción de alcantarillados, a los costos derivados de la afectación a la comunidad por alteraciones al tráfico, al desarrollo normal de los negocios y en general a la afectación de los sistemas bióticos, abióti-

cos y antrópicos del medio intervenido, se han venido desarrollando desde hace algunas décadas técnicas sin zanja, que permiten disminuir estos impactos sobre el medio ambiente urbano y a unos costos competitivos. Entre las técnicas indicadas en esta tabla se presenta una clasificación en la que se toman en cuenta las técnicas con zanja o sin ésta, y la posibilidad de que los trabajadores puedan ingresar o no al sistema. La clasificación que se ha establecido define cuatro grandes grupos, considerando los conceptos fijados sobre reparación, renovación, remplazo y obras complementarias en el sistema.

Se destaca además que no se incluyen las labores de mantenimiento porque éstas, aunque pueden restaurar las condiciones de operatividad en ciertos casos, no implican una obra que entre a formar parte de los activos del sistema, pues son sólo actividades que remueven materiales ajenos al sistema que perturban su normal desempeño.

HERRAMIENTA DE GESTIÓN PARA LA REHABILITACIÓN

Todos los conceptos y elementos que se han presentado permiten entender y dimensionar la complejidad del problema al que se enfrenta el gestor de un sistema de alcantarillado cuando realiza la planificación para la rehabilitación. Con esta cantidad importante de variables espaciales y temporales, surgen muchas dudas y preguntas: ¿qué elementos rehabilitar?, ¿cómo se deben rehabilitar?, ¿en qué momento se deben rehabilitar?, ¿cuándo y qué recursos asignar? La respuesta a estas y otras preguntas involucra una serie de procesos de análisis, en los que el gestor estará apoyado por una serie de asesores técnicos y económicos que le ayuden a determinar, de entre numerosas posibilidades, cuál de ellas es la más adecuada. Para el análisis de cada una de las posibilidades, la cantidad de información involucrada

y la complejidad de sus relaciones son elevadas. Con el planteamiento anterior, se concluye que es conveniente y necesario diseñar y desarrollar una herramienta computacional para la gestión de la rehabilitación de los sistemas de alcantarillado que permita manejar este complejo problema multidimensional de optimización multiobjetivo.

Requerimientos de la herramienta de gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado

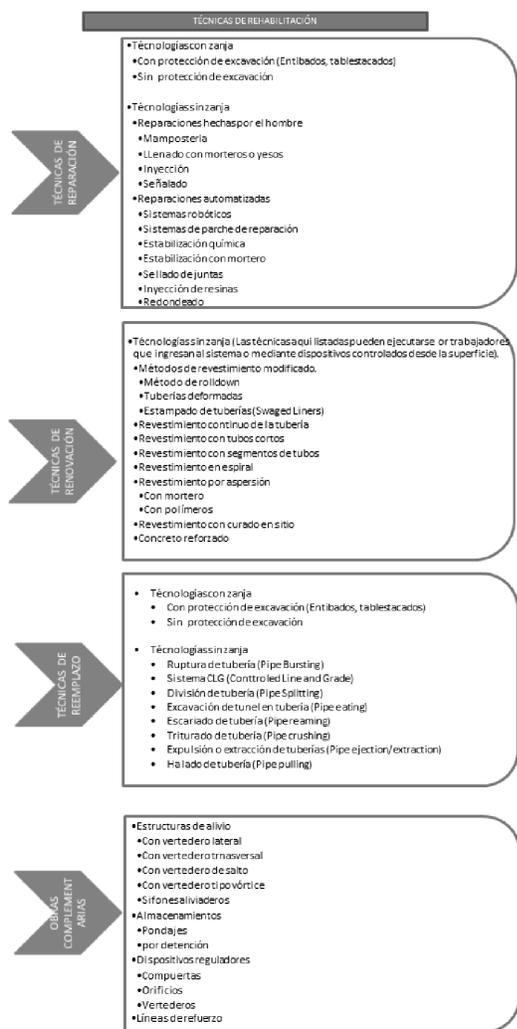
La herramienta de gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado (HGR) debe cumplir con una serie de requerimientos, los cuales se agrupan según la espacialidad de la ingeniería que los estudia, para alcanzar los objetivos deseados como instrumento de apoyo para la gestión. A continuación se hace una precisión de dichas exigencias.

En primer lugar, como el sistema de alcantarillado está distribuido espacialmente dentro del área urbana que sirve y sus activos se encuentran dispersos a lo largo de ella, la HGR los debe tener referenciados y ubicados espacialmente.

Es muy recomendable acceder a la base de datos desde la HGR, pero ésta se debe manejar y actualizar desde un sistema de información geográfica (SIG). La construcción de la base de datos de los activos se obtiene a partir de campañas de catastro de redes y estructuras, realizadas a partir de los levantamientos topográficos o con los sistemas de posicionamiento global (GPS).

Un segundo aspecto que hay que considerar es el correspondiente a la caracterización geotécnica. Así por ejemplo, es necesario caracterizar el suelo y determinar parámetros tales como pH, contenidos de sulfatos, nitratos y amonio, nivel freático, al igual que la capacidad portante y el peso unitario de los estratos de suelo. La estructura de la información debe permitir la consulta y manipulación desde el SIG, para poder generar así coberturas de cada uno de los parámetros, las cuales se puedan intersecar con la ubicación de las estructuras para obtener información de la posible afectación del suelo sobre los activos del sistema. Con la información geotécnica, adicionalmente a la evaluación de las características geomecánicas se busca establecer corrosión externa en las estructuras por acción del suelo y las cargas de suelo y agua sobre éstas.

Tabla 1. Obras de rehabilitación



La información estructural debe estar ligada por completo al activo referenciado. Estructuralmente, entre los datos básicos requeridos están la edad (a partir de la fecha de construcción), el material y tipo o modo de construcción y fabricante. Es muy importante contar con información sobre el estado estructural de la tubería, la cual se extrae del análisis de los videos y documentos de inspección hechos a las estructuras del alcantarillado. La base de datos debe tener en su componente estructural un vínculo con el video de inspección y, en lo posible, con el reporte de ésta. Otro aspecto estructural fundamental son las cargas vivas actuantes sobre las estructuras subterráneas del alcantarillado, las que se pueden relacionar con el tipo de vía o uso del suelo en el que se encuentran los activos.

En cuanto a los aspectos ambientales, la HGR debe contar con una base de datos en la que se puedan registrar aspectos como la infiltración y exfiltración, detectadas hacia y desde el interior de las estructuras por medio de las inspecciones o de los monitoreos realizados sobre puntos del sistema, parámetros ambientales, periódicos o continuos, en los puntos de muestreo, con los cuales se pueden estimar fenómenos como el de corrosión interna de las estructuras debidas a la acción agresiva de las aguas residuales, cargas contaminantes transportadas que puedan aportar información sobre la existencia de infiltración o conexiones erradas, o sobre vertidos frecuentes o superiores a los que puedan manejar los cuerpos naturales de agua o las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

En la HGR se debe contar con un modelo hidrológico e hidráulico del sistema de alcantarillado. Esta herramienta, fundamental para establecer las condiciones aproximadas de operación del sistema, será la que ayude a proporcionar respuestas a las preguntas del gestor sobre la necesidad de ampliar o no la capacidad del sistema para diferentes horizontes y con diversas condiciones climatológicas. Los aspectos hidráulicos e hidrológicos de la HGR tienen una estrecha relación con los demás componentes anteriores y con las labores previas de levantamiento de información. La topología del sistema de alcantarillado para la modelación hidrológica e hidráulica se obtiene a partir de la base de datos geográfica de los activos, por lo que es indispensable que la información tenga las cotas debidamente referenciadas. Los datos necesarios para calibrar el modelo

resultan de las campañas de monitoreo y medición, que se deben ajustar para obtener datos de alturas de lámina de agua y los caudales correspondientes. Otro insumo fundamental para la modelación del sistema es la generación de caudales de aguas sanitarias y lluvias. La HGR debe estar en capacidad de manejar la información de población (cantidad, distribución espacial y temporal) y consumos (actuales y futuros) para determinar escenarios de aguas residuales de origen residencial, industrial, comercial e institucional. Además, el modelo debe estar en capacidad de manejar la información de tormentas (su distribución temporal y espacial), con diferentes probabilidades de ocurrencia, para estimar lluvias, que aplicadas a las cuencas urbanas, proporcionen la escurritía efectiva que se debe transitar en el sistema de alcantarillado. El modelo hidráulico debe interactuar con la HGR, recibir información de él, procesarla y retornar resultados de las modelaciones para determinar las capacidades actuales y futuras del sistema. Un módulo hidráulico para el sistema debe interactuar con las bases de datos geográficas y ser pilar fundamental del sistema.

El objeto de la HGR es obtener alternativas de rehabilitación con diferentes características y escenarios que se puedan comparar para que estén a disposición del gestor y sea posible decidir qué, cómo, cuándo y con qué recursos se ejecutan. Hoy en día se dispone de diversas tecnologías de rehabilitación, con aplicabilidad técnica y costos diversos. Es necesario disponer de una base de datos con la información técnica y económica de cada una de las técnicas disponibles, donde se definan claramente las condiciones de aplicabilidad y los costos por unidad de longitud, de acuerdo con la geometría, las situaciones y las condiciones de construcción.

La información de costos obtenida de los análisis de los costos unitarios de cada técnica en los tramos o sectores aplicables no es suficiente para hacer una buena evaluación económica, ya que se deben tener en cuenta los beneficios que cada técnica proporciona. Entre los beneficios y su estudio detallado se logran escenarios cada vez más completos, partiendo por ejemplo únicamente de la prolongación de la vida útil de los activos, pasando por la disminución de costos por desvíos de tráfico, afectación a las actividades productivas del sector, riesgo de invertir o no invertir, problemática social y económica asociada con la inversión o no inversión, beneficio ambiental, etc. La cuantificación de los be-

neficios indirectos siempre será una tarea difícil, en la que se podrá ir escalando en forma progresiva desde un análisis básico como costo mínimo, hasta relaciones beneficio-costos más completas, en la medida en que se puedan incorporar evaluaciones de beneficios indirectos y de intangibles. La HGR debe contar con una metodología para realizar análisis económico a partir de la información incorporada a la base de datos de las técnicas de rehabilitación sobre la prolongación de la vida útil de cada técnica, rendimientos de avance del trabajo, impactos sociales y ambientales, etc.

La empresa operadora del servicio público de recolección, transporte, tratamiento y disposición de aguas servidas también debe contar con un modelo de indicadores de gestión que permita evaluar las actuaciones y la administración desde puntos de vista económico, operativo, ambiental, del recurso humano, entre otros. Es deseable que la HGR tenga un procedimiento o una metodología para evaluar los indicadores de gestión para las diversas alternativas planteadas, condición que puede colaborar en la toma final de decisiones sobre la rehabilitación.

Esquema general para una herramienta de gestión de rehabilitación de una red troncal de alcantarillado

Con este número importante de requisitos definidos se ha diseñado un esquema del modelo de la herramienta de gestión para la rehabilitación de sistemas de alcan-

tarillado, en el que se establecen los componentes y las relaciones necesarios para su correcta explotación. El esquema propuesto ha sido la base para elaborar la herramienta detallada y el aplicativo por parte del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figura 4).

Como se observa en el esquema, cada uno de los componentes está precedido de un proceso de obtención de información y alimentación de la base de datos geográfica de la herramienta, que se puede manejar como una o como varias bases relacionadas por medio de un código de identificación del activo. La base de datos alimenta un componente de análisis técnico, que luego del proceso suministra información específica al módulo de análisis y gestión de la herramienta, para presentar alternativas valoradas que el gestor utilizará para definir las acciones que hay que realizar de acuerdo con los criterios establecidos y según las condiciones presupuestales y las políticas generales de la empresa.

De cada uno de los análisis técnicos hechos en cada componente se produce adicionalmente una calificación del estado del activo. Así por ejemplo, de los resultados del análisis geotécnico se generarán datos para determinar el grado de corrosión externa de una tubería. De los análisis efectuados con las herramientas hidráulica y ambiental se obtendrá información sobre corrosión interna de la tubería. Esta información, más la estructural y los datos geográficos del activo, determinará unas condiciones estructurales del tubo, información que procesará el modelo para obtener una calificación

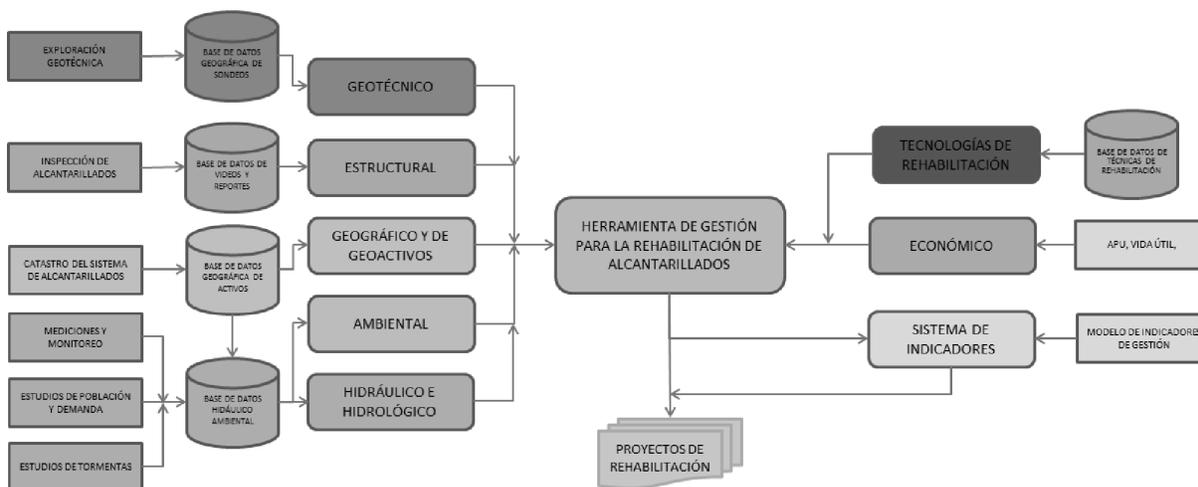


Figura 4. Esquema general del modelo de la herramienta de gestión para la rehabilitación de sistemas de alcantarillado.

geotécnico estructural fácil de analizar. Del análisis estructural realizado con base en la inspección, se obtiene una calificación de acuerdo con los fallos encontrados (grietas, fisuras, desprendimientos, etc.). De su repetitividad y magnitud, según unas escalas predefinidas, se obtiene una calificación de su estado estructural. El análisis hidráulico califica la capacidad de transporte de agua residual del activo. El componente ambiental producirá una calificación por infiltración y conexiones erradas. Las calificaciones alimentarán el módulo de análisis de la HGR, y mediante la ponderación de variables y las técnicas de rehabilitación disponibles se presentarán alternativas técnicas de mejoramiento del sistema de alcantarillado. El componente económico evaluará los costos y beneficios y mostrará una priorización de las alternativas. El componente de indicadores hará una evaluación de acuerdo con los índices definidos y reportará una priorización con base en los pesos establecidos. Las alternativas de rehabilitación presentadas por el modelo tendrán entonces una calificación técnica, económica y de gestión, que permitirá al gestor tomar una decisión para invertir adecuadamente los recursos disponibles en la rehabilitación del sistema de alcantarillado.

Seguidamente se presenta la ventana principal del aplicativo del modelo de gestión para la rehabilitación de una red troncal, desarrollado para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figuras 5 y 6).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El manejo y operación de los sistemas troncales de alcantarillado es un problema complejo que involucra numerosas variables espaciales y temporales que exigen un tratamiento integral.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de información disponible y la necesidad de su utilización, los sistemas de información geográfica (SIG) se convierten en una herramienta potente que permite integrar y analizar todas las variables involucradas en el problema, con una ventaja adicional: la facilidad para manejar e interpretar los resultados. Una herramienta de gestión predictiva para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado, como la que se ha presentado, permite al gestor evaluar múltiples opciones de solución y escoger la que más se ajuste a las necesidades presentes y futuras del sistema

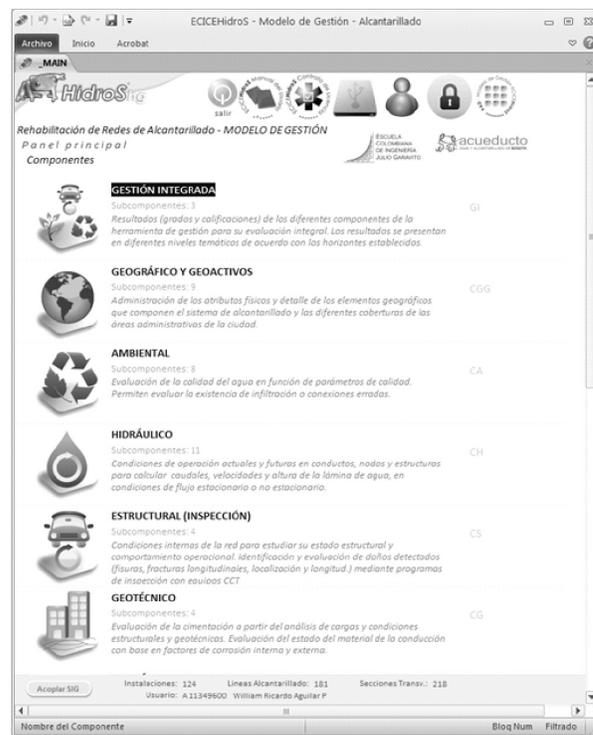


Figura 5. Ventana principal del modelo de gestión para la rehabilitación de redes de alcantarillado. Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

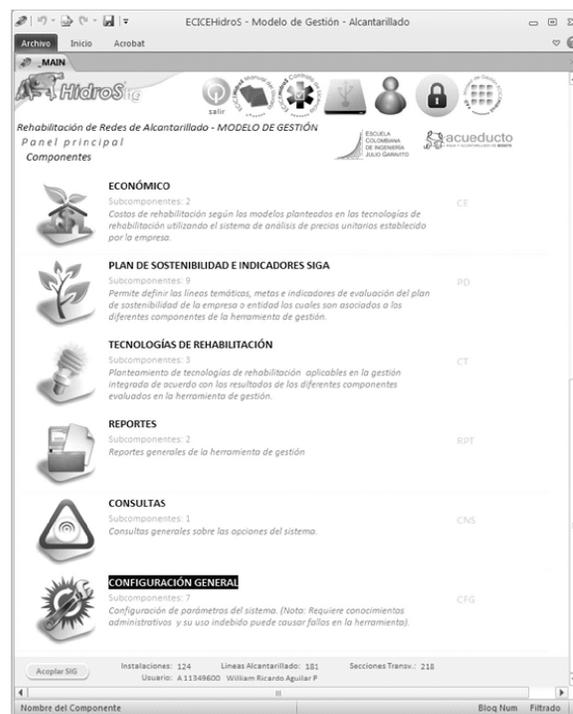


Figura 6. Ventana principal del modelo de gestión para la rehabilitación de redes de alcantarillado. Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

y de la empresa operadora. Análisis de la capacidad del sistema en condiciones de flujo no permanente, proyecciones de crecimiento y uso de la red, condiciones estructurales y geotécnicas del sistema, evaluación de la calidad del agua transportada, variables económicas y muchas otras variables son los elementos principales del modelo presentado.

Otro aspecto que vale la pena destacar es que los modelos de gestión para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado pueden efectuar los análisis en tiempo real si las redes se encuentran debidamente instrumentadas y es posible disponer de la información en un centro de control.

REFERENCIAS

1. Butler, David & Davies, John W. (2004). *Urban Drainage*, 2nd ed. Spon Press.
2. Consorcio Grucon - IEH - Soprin (1999). Estudio para la rehabilitación del sistema de alcantarillado de la ciudad. Bogotá: EAAB.
3. Escala Ingeniería y Proyectos (2005). Estudio para definir el programa de rehabilitación de las redes de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Bogotá: EAAB.
4. Forero, José A. (2009). *Hidroconsulta. Manual de rehabilitación y renovación sin zanja del sistema de alcantarillado de Bogotá*. Bogotá: EAAB.
5. Pontificia Universidad Javeriana (2008). Indicadores del sistema de gestión de alcantarillado. Bogotá: EAAB.
6. Sveinung, Saegrov (2006). *Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks*, 1st ed. London: IWA Publishing, Alliance House, 140 pp.
7. Tochobanoglous, George, Metcalf & Eddy (1996). *Ingeniería de aguas residuales, redes de alcantarillado y bombeo*. McGraw Hill.
8. Water Research Centre. *Sewerage Rehabilitation Manual*. <http://Srm.wrcplc.co.uk>.
9. WEF, Asce & EWRI (2009). *Existing Sewer Evaluation and Rehabilitation*, 3rd ed. McGraw Hill.

Inventario sanitario del departamento del Quindío

A sanitary inventory in the Department of Quindío

SHIRLEY ANDREA BAUTISTA CASTELLANOS¹ Y JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Ingeniera civil, especialista en Saneamiento Ambiental y magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil, MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Recibido: 10/06/2010 Aceptado: 20/07/2010

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

Resumen

En este artículo se incluyen los resultados más relevantes del estudio realizado para la elaboración del inventario sanitario del departamento del Quindío. En el informe se reportan las características principales de los sistemas de abastecimiento, de potabilización, de recolección de agua residual, de tratamiento de aguas residuales y del sistema de recolección y disposición de residuos sólidos, en cada municipio. Se encontró que todos los municipios del Quindío tienen una cobertura de servicio de acueducto mayor del 90%, con excepción de Pijao (66%) y Génova (87%). La cobertura del servicio de alcantarillado es inferior al 90% en Pijao (51%), Génova (75%), Quimbaya y Montenegro (88%). La cobertura del servicio de aseo es mayor del 95%, con excepción del municipio de Pijao (80%). El 83% de los municipios no posee tratamiento de aguas residuales.

Palabras claves: saneamiento ambiental, servicios públicos, acueducto, alcantarillado, purificación de agua, tratamiento de aguas residuales, residuos sólidos.

Abstract

This paper shows the most important findings of a study on a sanitary inventory in the Department of Quindío. The report encloses the characteristics of the water supply system, water treatment plant, sewerage system, wastewater treatment system, and collection and disposal of solid wastes in each municipality. Study showed all municipalities have coverage of water supply greater than 90%, except for Pijao (66%) and Génova (87%). The coverage of the sewerage service is less than 90% in Pijao (51%), Génova (75%), and Quimbaya and Montenegro (88%). The coverage of the solid waste service is greater than 95%, apart from Pijao (80%). An 83% of the municipalities do not have waste water treatment plant.

Keywords: sanitation, utilities, water, sewage, water purification, wastewater treatment, solid waste.

INTRODUCCIÓN

Uno de los requisitos para proveer adecuadamente los servicios de saneamiento básico a la población es conocer el estado actual de sus componentes para proyectar las necesidades que se deben satisfacer. El conocimiento de la cobertura, estado y capacidad de cada servicio público permite prever las soluciones y demandas económicas requeridas por cada municipio para el propósito básico de garantizar la salud y el bienestar de la sociedad.

METODOLOGÍA

Los datos de las características y condiciones más relevantes del servicio de acueducto, alcantarillado y aseo de cada municipio se consiguieron mediante encuestas remitidas por correo electrónico a los responsables de la prestación de los servicios, gerentes de operadores o alcaldes municipales, con copia a los secretarios de infraestructura o de planeación.

SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO

Aducción

Seguidamente se observan las pérdidas de agua cruda en la aducción de los sistemas de abastecimiento (tabla 1).

Las pérdidas de agua cruda en la aducción varían

Tabla 1
Caudal de bocatoma y de PPA

Municipio	Caudal bocatoma (L/s)	Caudal PPA (L/s)	Pérdidas (%)
Armenia	3000	1050	65
La Tebaida	450	120	73
Quimbaya	360	120	67
Circasia	125	120	4
Pijao	54	20	63
Buenavista	60	20	67
Montenegro	650	120	82
Salento	60	20	67
Génova	180	60	67
Filandia	75	25	67
Calarcá	495	180	64
Córdoba	26	10	62
Promedio (L/s)			62
Desviación estándar (L/s)			19
Intervalo (L/s)			(4 - 82)

entre 4 y 82%; en promedio, $62 \pm 19\%$, valores excesivos en todos los municipios, con excepción de Circasia. Es necesario revisar el estado de las conducciones, de las bocatomas y los aforos correspondientes, en cada municipio.

Plantas de purificación de agua (PPA)

Como se puede observar a continuación, el 75% de las PPA son de tipo convencional, el 17% de tipo compacto y el 8% de características atípicas, que corresponde al municipio de Córdoba con una PPA integrada por sedimentación, filtración y desinfección (figura 1).

En la tabla siguiente se presentan los caudales afluente y efluente en las PPA (tabla 2).

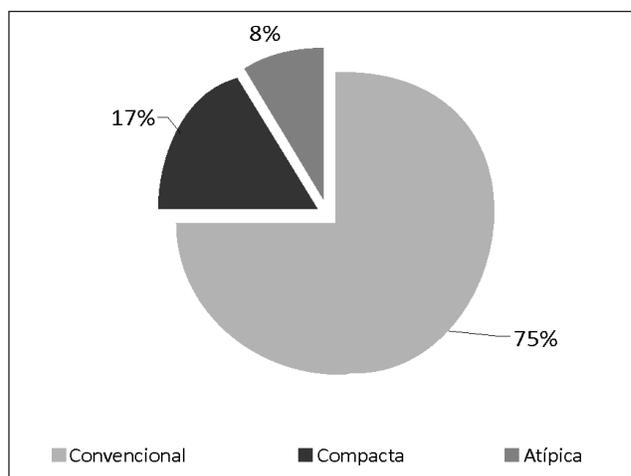


Figura 1. Tipo de PPA en el Quindío.

Se observan pérdidas entre 0 y 62% en las PPA, con un promedio de $36 \pm 21\%$. Las mayores pérdidas se presentan en las PPA de Pijao, Buenavista y Génova, mientras que los menores valores se registran en Circasia, Córdoba y Filandia. Los valores de caudal reportados indican que, con excepción de Circasia y Filandia, es necesario revisar la representatividad de los aforos y los procedimientos de operación y mantenimiento para mantener los consumos en planta por debajo del 10%.

Tabla 2
Caudales afluente y efluente en las PPA

Municipio	Número de PPA	Caudal afluente (L/s)	Caudal efluente (L/s)	Pérdidas (%)
Armenia	1	1050	721	31
La Tebaida	1	120	92	23
Quimbaya	1	120	70	42
Circasia	2	120	113	6
Pijao	1	20	8	61
Buenavista	1	20	8	62
Montenegro	1	120	87	28
Salento	1	20	11	45
Génova	1	60	25	59
Filandia	1	25	22	12
Calarcá	1	180	133	26
Córdoba	1	10	10	0
Promedio (%)				33
Desviación estándar (%)				21
Intervalo			(0-62)	

Almacenamiento

A renglón seguido se presentan las características del almacenamiento en los municipios del Quindío (tabla 3).

Se determina que el almacenamiento promedio es

Tabla 3
Características del almacenamiento

Municipio	Número de tanques	Caudal macromedio (L/S)	Caudal macromedio (m³/d)	Capacidad tanques (m³)	Almacenamiento (%)
Armenia	8	721	62.294	25.743	41
La Tebaida	1	92	7949	4000	50
Quimbaya	1	70	6048	1500	25
Circasia	1	113	9782	1900	19
Pijao	1	8	674	348	52
Buenavista	1	8	662	148	22
Montenegro	1	87	7517	4050	54
Salento	1	11	950	300	32
Génova	1	25	2129	600	28
Filandia	1	22	1901	1000	53
Calarcá	1	133	11.491	4345	38
Córdoba	2	10	864	228	26
Promedio (%)					37
Desviación estándar (%)					13
Intervalo					(19-54)

de $37 \pm 13\%$ del consumo diario. Los municipios de Montenegro, Filandia y Pijao cuentan con el mayor almacenamiento, superior a un 52%. El único municipio con almacenamiento inferior al 20% es Circasia, con un 19%.

Consumo

A continuación se presentan los índices de agua no contabilizada (tabla 4 y figura 2).

Tabla 4
Índice de agua no contabilizada en el departamento del Quindío

Municipio	Micro-medición	Consumo histórico (m³/mes* suscriptor)	Índice de agua No contabilizada (%)
Armenia	Sí	13,9	39
La Tebaida	Sí	14,0	37
Quimbaya	Sí	16,0	33
Circasia	Sí	13,0	39
Pijao	No	15,0	33*
Buenavista	Sí	12,1	35
Montenegro	Sí	16,0	37
Salento	Sí	15,0	30
Génova	Sí	15,0	22
Filandia	Sí	13,0	32
Calarcá	Sí	14,0	30
Córdoba	Sí	0,0	30
Promedio (%)	33		
Desviación estándar (%)	5		
Intervalo	(22-39)		

* Valor supuesto por Esaquín.

Como se observa en la tabla 4, Pijao es el único municipio del departamento que no cuenta con micro-medición. Todos los municipios del Quindío presentan índices de agua no contabilizada superiores al 22% y requieren un programa de reducción de dicho porcentaje, toda vez que a la luz del artículo 6.º de la Resolución 1795 de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), todos los sistemas de acueducto están comprometidos a realizar esfuerzos para disminuirlas al máximo, pues el nivel máximo de agua no contabilizada que se aceptará para el cálculo de los costos de la prestación del servicio de acueduc-

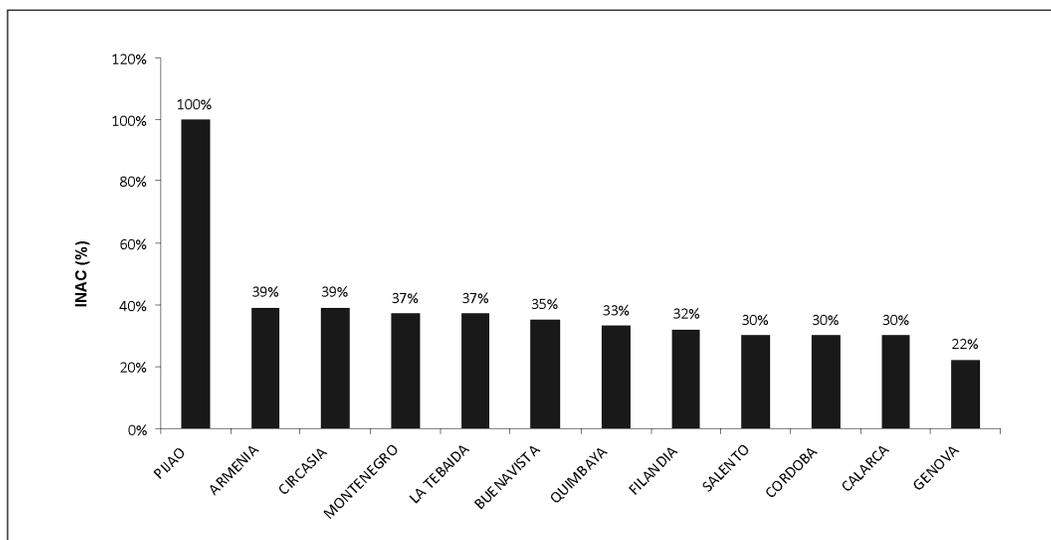


Figura 2. Índice de agua no contabilizada.

to será del 30%. Por otro lado, la Ley 373 de junio de 1997, mediante la cual se establece el programa para uso eficiente y ahorro del agua, invita a hacer esfuerzos ingentes para reducir las pérdidas de los sistemas de acueducto en el territorio nacional.

Más adelante se registran el consumo por suscriptor y por habitante, a partir de los datos de consumo histórico (tabla 5 y figura 3).

El consumo promedio por habitante en el Quindío es de 138 ± 22 L/hab•d. El municipio de Córdoba exhibe el consumo máximo de 182 L/hab•d y La Tebaida el consumo mínimo de 104 L/hab•d. El número promedio de habitantes/suscriptor es de $3,6 \pm 0,4$, con un intervalo de 3 a 4,5 habitantes/suscriptor.

Tabla 5
Consumo histórico en Quindío

Municipio	Consumo m ³ /mes·suscriptor	Habitantes/suscriptor	Consumo por habitante (L/hab·d)
Armenia	13,9	3,3	142
La Tebaida	14,0	4,5	104
Quimbaya	16,0	4,0	134
Circasia	13,0	3,9	112
Pijao	15,0	3,4	147
Buenavista	12,1	3,1	130
Montenegro	16,0	3,9	137
Salento	15,0	3,4	148
Génova	15,0	3,0	168
Filandia	13,0	3,3	131
Calarcá	14,0	3,8	123
Córdoba	17,7	3,3	182
Promedio (L/hab•d)			138
Desviación estándar (L/hab•d)			22
Intervalo			(104-182)

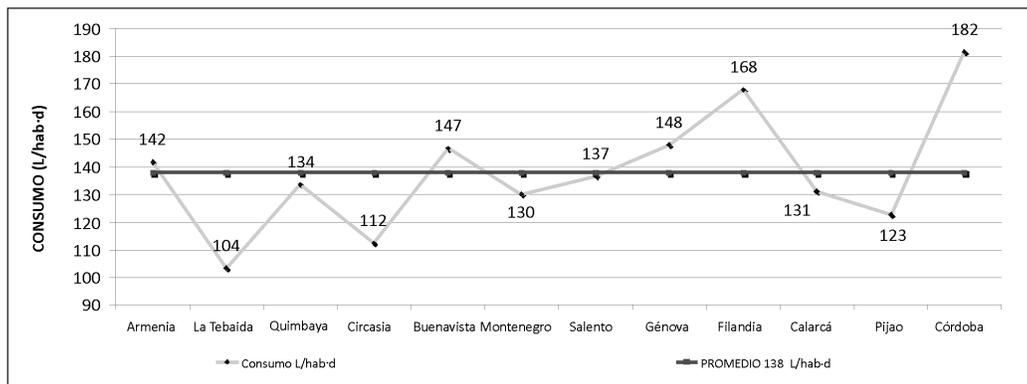


Figura 3. Consumo histórico en el Quindío.

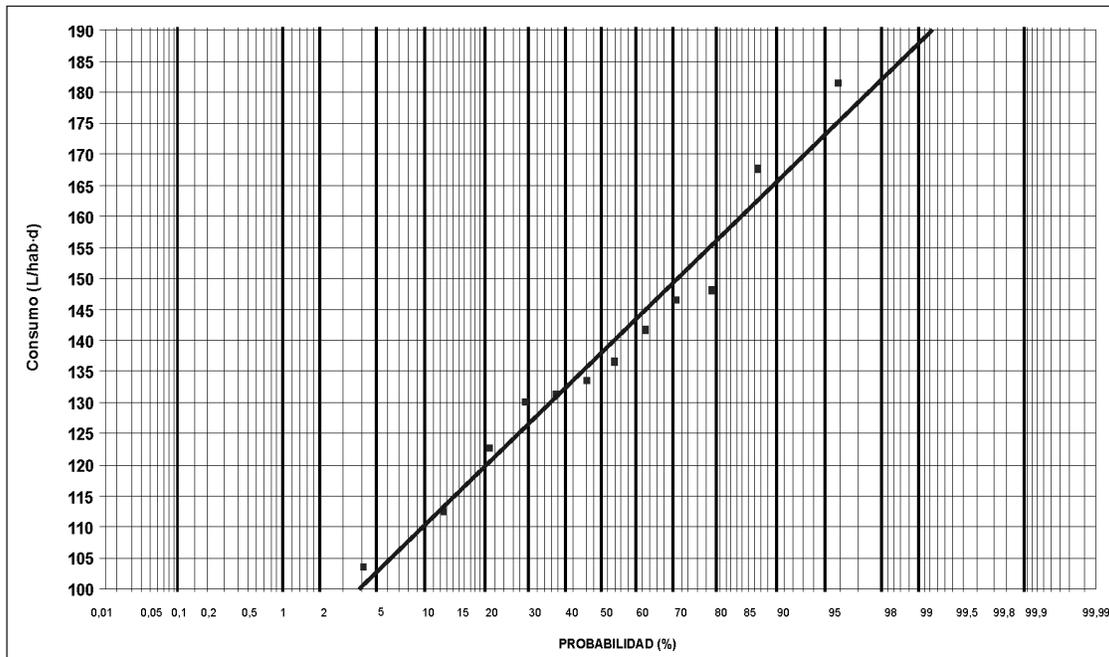


Figura 4. Probabilidad de ocurrencia de consumo por habitante en el Quindío (2009).

El consumo promedio probable en el Quindío es de 138 L/hab·d, y con un 95% de probabilidad de 174 L/hab·d (figura 4).

del Quindío. La cobertura del servicio de alcantarillado oscila entre 51 y 100%. Los municipios de La Tebaida, Filandia, Calarcá, Córdoba y Armenia tienen cobertura de alcantarillado superior al 95%.

SISTEMA DE AGUAS RESIDUALES

Alcantarillado

A continuación se presentan los porcentajes de cobertura de alcantarillado de los municipios del departamento

El 58% de los municipios (Quimbaya, Circasia, Pijao, Buenavista, Montenegro, Salento y Génova) tiene cobertura del alcantarillado menor del 95% y requiere, por tanto, incrementar su cobertura de servicio.

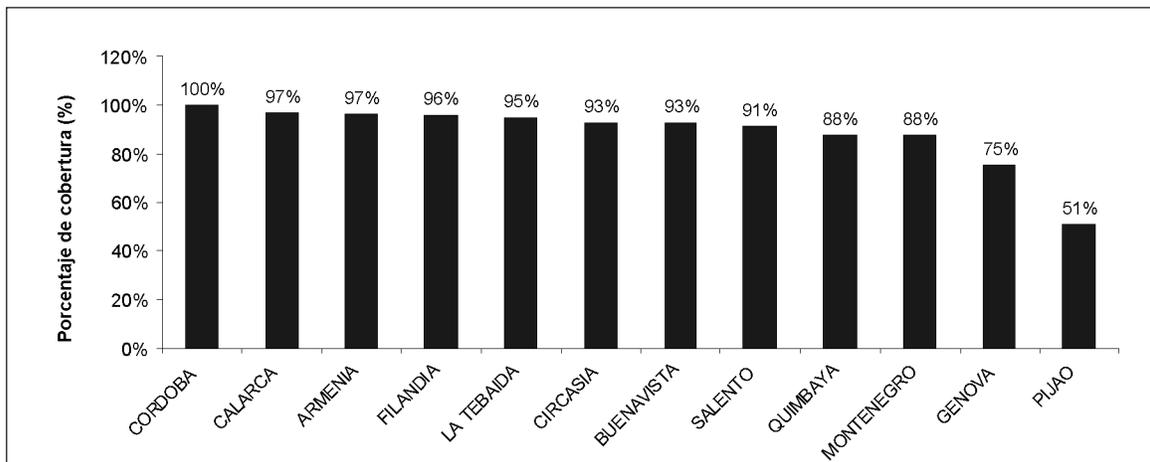


Figura 5. Cobertura de alcantarillado.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En el departamento de Quindío solamente dos municipios, La Tebaida y Salento (17%), poseen plantas de tratamiento de agua residual, del tipo de tratamiento secundario. Los diez municipios restantes (83%) no poseen sistema de tratamiento de aguas residuales. Las PTAR de La Tebaida y Salento están constituidas por cribas, desarenador, trampa grasa y reactor anaerobio de flujo ascensional.

Como se observa a renglón seguido, las PTAR de La Tebaida y de Salento tienen remociones promedio en demanda biológica de oxígeno (DBO) de 58 y 32%,

y en SS de 76 y 65%, respectivamente. Las eficiencias observadas indican que es necesario optimizar los sistemas de tratamiento para aumentar su rendimiento al 80% (figuras 6 y 7).

La DBO promedio del agua residual cruda de los municipios del Quindío es de 240 mg/L, y con un 95% de probabilidad la DBO del agua residual cruda es menor de 450 mg/L. Los municipios del Quindío tienen aguas residuales crudas con concentración orgánica muy variable, entre 45 y 419 mg/L, que indican la necesidad de verificar la exactitud y precisión de los ensayos de DBO practicados y las condiciones de flujo de los alcantarillados (figura 8).

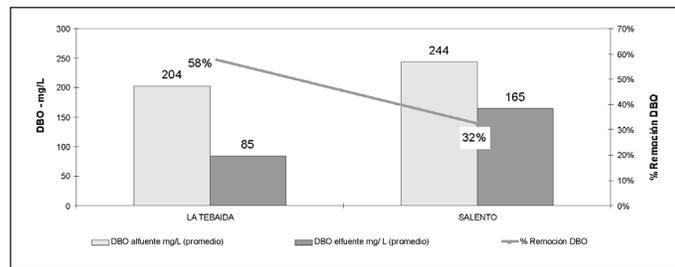


Figura 6. Análisis de remoción de DBO promedio en el Quindío.

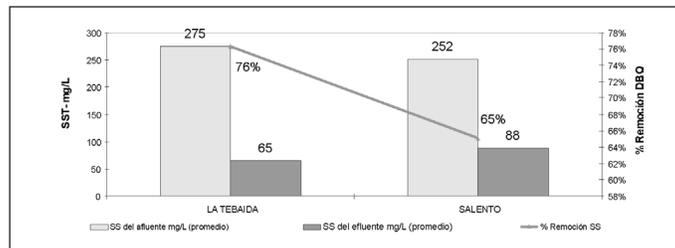


Figura 7. Análisis de remoción de sólidos suspendidos promedio en el Quindío.

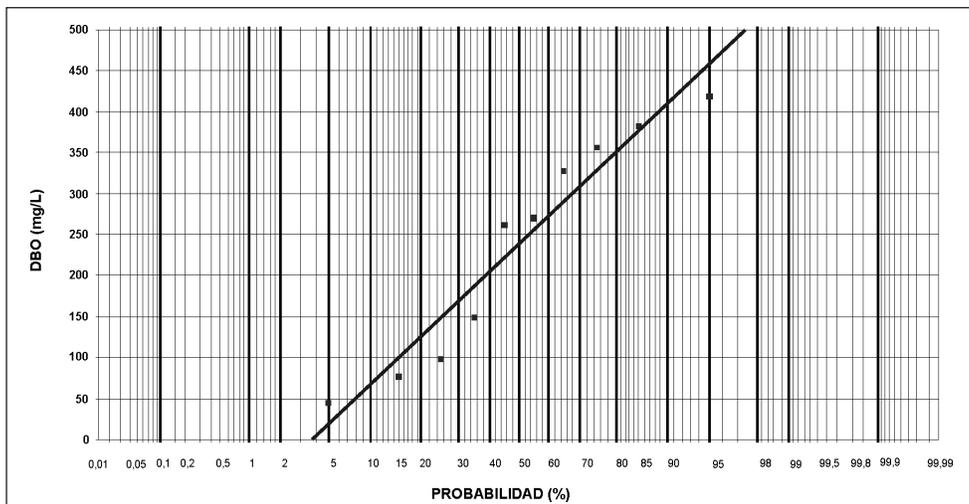


Figura 8. Probabilidad de ocurrencia de DBO en el agua residual cruda.

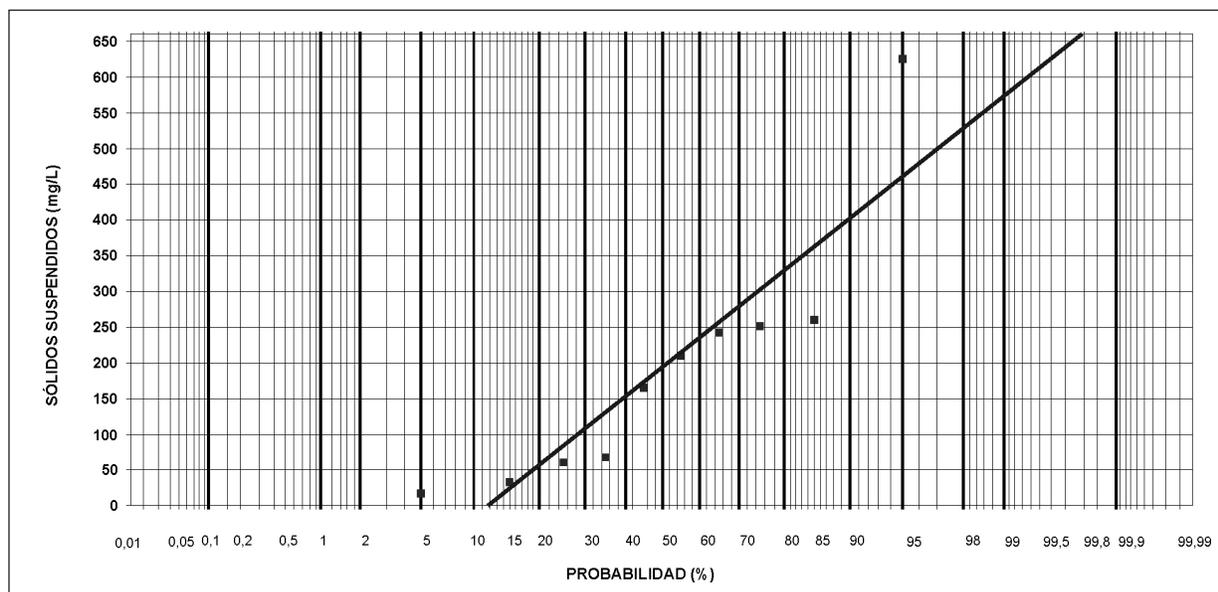


Figura 9. Probabilidad de ocurrencia de sólidos suspendidos en el agua residual cruda.

Los valores de SST de las aguas residuales crudas del departamento del Quindío indican un valor promedio de 190 mg/L y un intervalo de variación de 18 a 625 mg/L, con un valor de ocurrencia para un 95% de probabilidad de 460 mg/L. La alta dispersión de la concentración de SST hace necesario, como sucede con los valores de DBO, verificar la validez y precisión de dichas pruebas y las condiciones de flujo de los alcantarillados (figura 9).

SISTEMA DE ASEO URBANO

Todos los municipios del Quindío prestan el servicio de aseo directamente, con excepción de Armenia, que lo hace a través de Servigenerales S.A. EPS; Calarcá, que lo hace por medio de Multipropósito S.A. ESP; Montenegro, con Café Aseo del Quindío S.A. ESP, y Córdoba, con Esacor S.A. ESP. La cobertura del sistema de aseo en todos los municipios del Quindío es del 100%, con excepción del municipio de Calarcá y de Pijao, los cuales

Tabla 6
Producción de residuos sólidos en el departamento del Quindío

Municipio	Población servida (hab)	Cantidad recogida por día (m ³ /d)	Densidad residuos sólidos (kg/d)	Densidad residuos sólidos (kg/m ³)	Producción por habitante (L/d•hab)	Producción por habitante (kg/d•hab)
Armenia	321.378	236,0	125.080	530	0,73	0,39
La Tebaida	39.136	25,0	13.250	530	0,64	0,34
Montenegro	45.007	27,0	14.310	530	0,60	0,32
Calarcá	55.567	28,3	14.999	530	0,51	0,27
Córdoba	2997	1,2	636	530	0,40	0,21
Salento	7199	2,6	1378	530	0,36	0,19
Filandia	13.017	4,6	2438	530	0,35	0,19
Génova	5805	2,0	1060	530	0,34	0,18
Circasia	28.660	9,0	4770	530	0,31	0,17
Quimbaya	34.437	10,7	5671	530	0,31	0,16
Pijao	5162	1,2	636	530	0,23	0,12
Buenavista	3086	0,7	371	530	0,23	0,12
Promedio					0,42	0,22
Desviación estándar					0,16	0,09
Intervalo					(0,23-0,73)	(0,12-0,39)

cuentan con el 96 y 80% de cobertura, en ese orden.

La producción volumétrica de residuos sólidos (tabla 6) varía entre 0,23 y 0,73 L/hab•d, que corresponde a una producción másica de 0,12 a 0,39 kg/hab•d. El municipio de Armenia tiene la mayor producción volumétrica y másica de residuos sólidos, 0,73 L/hab•d y 0,39 kg/hab•d, respectivamente, mientras que Buenavista tiene la menor producción: 0,23 L/hab•d y 0,12 kg/hab•d. La producción promedio de residuos sólidos es de 0,42 L/hab•d y 0,22 kg/hab•d, respectivamente.

La disposición volumétrica de residuos sólidos (tabla 7) varía entre 0,12 y 0,39 L/hab•d, que corresponde a una producción másica de 0,12 y 0,39 kg/hab•d. En promedio, la disposición másica y volumétrica de residuos sólidos es de 0,22 kg/hab•d y 0,22 L/hab•d. Más adelante se presenta el costo del servicio de aseo por kilogramo de residuos sólidos (tabla 8 y figura 10).

Esto permite inferir que el costo promedio de recolección, transporte y disposición por kilogramo en el

Tabla 7
Disposición de residuos sólidos en el departamento del Quindío

Municipio	Población servida (hab)	Cantidad dispuesta por día (m ³ /d)	Cantidad dispuesta por día (kg/d)	Densidad residuos sólidos (kg/m ³)	Cantidad dispuesta por habitante (L/d•hab)	Cantidad dispuesta por habitante (kg/d•hab)
Armenia	321.376	125,1	125.080	1000	0,39	0,39
La Tebaida	39.136	13,3	13.250	1000	0,34	0,34
Montenegro	45.007	14,3	14.310	1000	0,32	0,32
Calarcá	55.567	15,0	14.999	1000	0,27	0,27
Córdoba	2997	0,6	636	1000	0,21	0,21
Salento	7199	1,4	1378	1000	0,19	0,19
Filandia	13.017	2,4	2438	1000	0,19	0,19
Génova	5805	1,1	1060	1000	0,18	0,18
Circasia	28.660	4,8	4770	1000	0,17	0,17
Quimbaya	34.437	5,7	5671	1000	0,16	0,16
Pijao	5162	0,6	636	1000	0,12	0,12
Buenavista	3086	0,4	371	1000	0,12	0,12
Promedio					0,22	0,22
Desviación estándar					0,09	0,09
Intervalo					(0,12-0,39)	(0,12-0,39)

Tabla 8
Costo del servicio de aseo por kilogramo en Quindío

Municipio	Producción (kg/d)	Número de suscriptores	Costo recolección, transporte y disposición (\$/suscriptor•mes)	Costo recolección, transporte y disposición (\$/suscriptor•d)	Producción (kg/d•suscriptor)	Costo recolección, transporte y disposición (\$/kg)
Armenia	125.080	80.680	11.330	378	1,55	244
La Tebaida	13.250	7423	6000	200	1,78	112
Montenegro	14.310	7959	7200	240	1,80	133
Calarcá	14.999	11.113	11.897	397	1,35	294
Córdoba	636	921	13.516	451	0,69	652
Salento	1378	1037	8674	289	1,33	218
Filandia	2438	2434	6654	222	1,00	221
Génova	1060	1280	7205	240	0,83	290
Circasia	4770	1720	7460	249	2,77	90
Quimbaya	5671	6319	6000	200	0,90	223
Pijao	636	786	2500	83	0,81	103
Buenavista	371	348	2626	88	1,07	82
Promedio						222
Desviación estándar						156
Intervalo						(82-652)

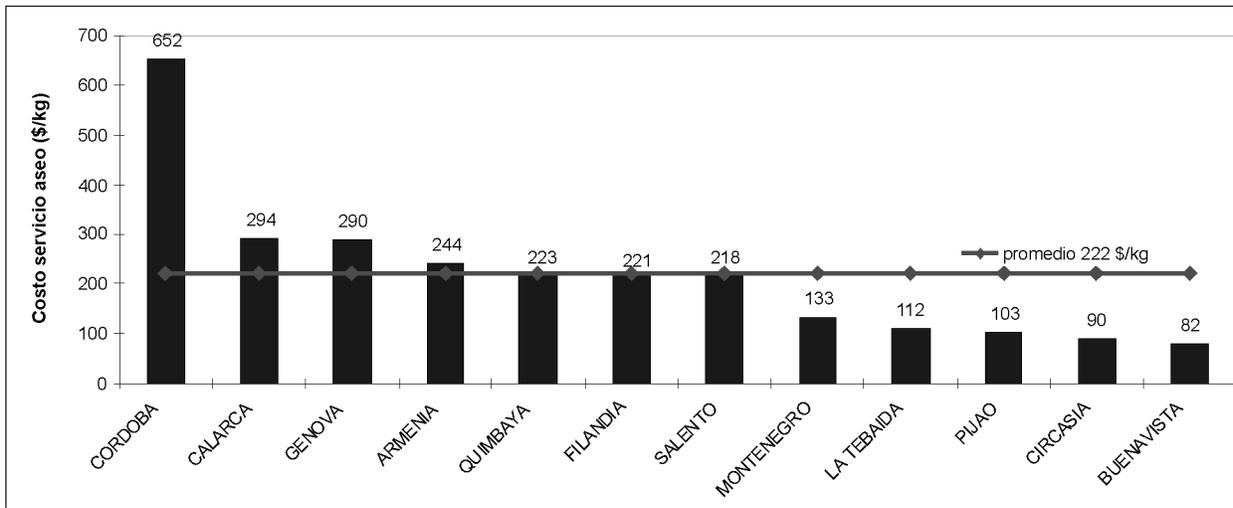


Figura 10. Costo del servicio de aseo por kilogramo.

departamento del Quindío es de \$222/kg. El municipio de Córdoba presenta el mayor costo (\$652/kg) y el municipio de Buenavista, el menor (\$82/kg).

Seguidamente se presenta el costo de servicio de aseo por litro de residuos sólidos (tabla 9).

Con base en lo observado se infiere que el costo promedio de recolección, transporte y disposición por

Tabla 9
Costo del servicio de aseo por litro en Quindío

Municipio	Producción (m³/d)	Número de suscriptores	Costo recolección, transporte y disposición (\$/suscriptor*mes)	Costo recolección, transporte y disposición (\$/suscriptor*d)	Producción (L/d*suscriptor)	Costo recolección, transporte y disposición (\$/L)
Armenia	236,0	80.680	11.330	378	2,93	129,11
La Tebaida	25,0	7423	6000	200	3,37	59,38
Montenegro	27,0	7959	7200	240	3,39	70,75
Calarcá	28,3	11.113	11.897	397	2,55	155,73
Córdoba	1,2	921	13.516	451	1,30	345,78
Salento	2,6	1037	8674	289	2,51	115,32
Filandia	4,6	2434	6654	222	1,89	117,36
Génova	2,0	1280	7205	240	1,56	153,71
Circasia	9,0	1720	7460	249	5,23	47,51
Quimbaya	10,7	6319	6000	200	1,69	117,11
Pijao	1,2	786	2500	83	1,53	54,58
Buenavista	0,7	348	2626	88	2,01	43,52
Promedio						117,57
Desviación estándar						82,53
Intervalo						(0,43-345,8)

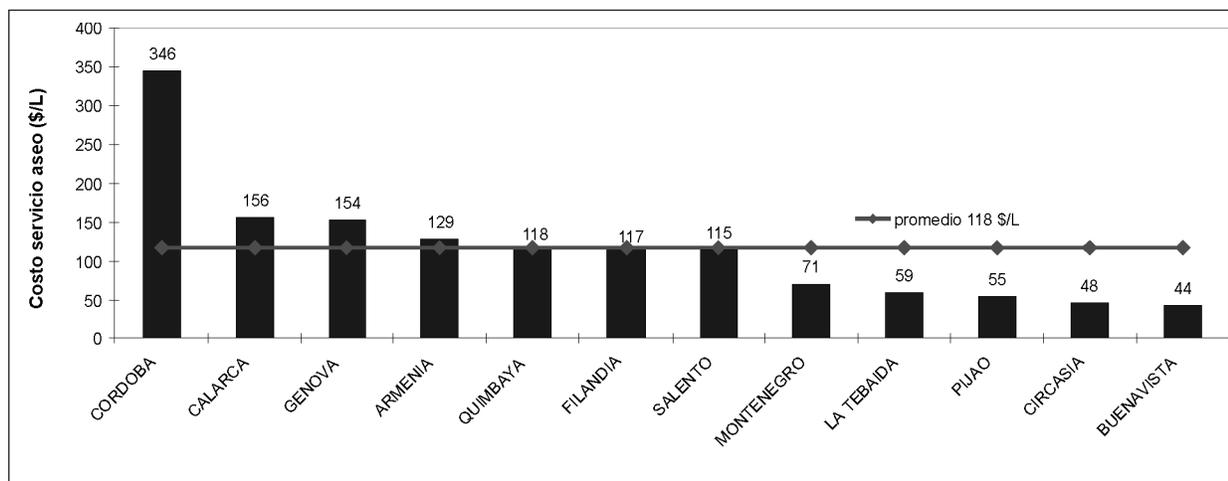


Figura 11. Costo servicio de aseo por litro.

litro en el departamento del Quindío es de \$117,6/L. El municipio de Córdoba presenta el mayor costo (\$346/L), mientras que el municipio de Buenavista registra el menor costo (\$44/L).

COBERTURA DE SERVICIOS BÁSICOS

A continuación se resumen las coberturas observadas de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo (tabla 10 y figura 12).

Como se puede apreciar, el municipio de Pijao tiene la más baja cobertura en los servicios de acueducto, al-

Tabla 10
Cobertura de servicios de acueducto, alcantarillado y aseo

Municipio	Cobertura servicio de acueducto (%)	Cobertura servicio de alcantarillado (%)	Cobertura servicio de aseo (%)
Armenia	90	97	100
La Tebaida	99	95	100
Quimbaya	90	88	100
Circasia	98	93	100
Pijao	66	51	80
Buenavista	93	93	100
Montenegro	90	88	100
Salento	98	91	100
Genova	87	75	100
Filandia	100	96	100
Calarcá	98	97	96
Córdoba	100	100	100

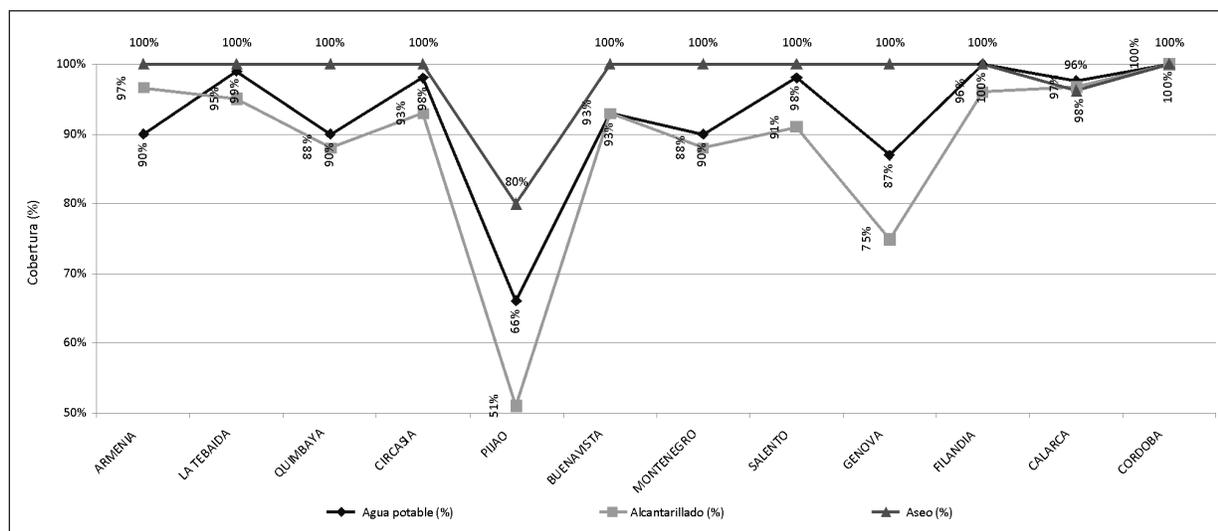


Figura 12. Coberturas de agua potable, alcantarillado y aseo en el Quindío, 2010.

cantarillado y aseo. El municipio de Génova carece también de cobertura adecuada en servicios de acueducto y alcantarillado. Circasia, Buenavista, La Tebaida, Filandia y Salento tienen igualmente muy buenas coberturas en los tres servicios. Armenia debe ampliar la cobertura del servicio de acueducto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las pérdidas de agua cruda en la aducción varían entre 4 y 82%, en promedio $62 \pm 19\%$, valores excesivos en todos los municipios, con excepción del municipio de Circasia (4%). Es necesario revisar el estado de las conducciones y de las bocatomas, y los aforos correspondientes para reducir dichas pérdidas a menos del 5%, como se recomienda en el RAS 2000.
- El 75% de las PPA del departamento del Quindío son de tipo convencional, el 17% de tipo compacto y el 8% de características atípicas.
- Los sistemas de potabilización del Quindío presentan pérdidas entre el 0 y 62% en las PPA, con un promedio de $36 \pm 21\%$. Hay que revisar la representatividad de los aforos y los procedimientos de operación y mantenimiento para mantener los consumos en planta por debajo del 10%.
- El almacenamiento promedio es de $37 \pm 13\%$ del caudal de consumo. Los municipios de Montenegro, Filandia y Pijao cuentan con almacenamiento superior a un 52%.
- El municipio de Pijao carece de micromedición. Es necesario recomendar la dotación de micromedición al municipio de Pijao.
- Los municipios de Filandia, Quimbaya, Buenavista, La Tebaida, Montenegro, Circasia, Armenia y Pijao, que tienen un índice de agua no contabilizada (IANC) superior al 30%, requieren un programa de reducción de dicho porcentaje, toda vez que a la luz del artículo 6.º de la Resolución 1795 de la CRA, todos los sistemas de acueducto están comprometidos a realizar esfuerzos para disminuirlos al máximo, pues el nivel máximo de agua no contabilizada que se aceptará para el cálculo de los costos de la prestación del servicio de acueducto será del 30%. Por otro lado, la Ley 373 de junio de 1997, por la cual se establece el programa para uso eficiente y ahorro del agua, invita a hacer esfuerzos ingentes para reducir las pérdidas de los sistemas de acueducto en el territorio nacional.
- El consumo promedio de agua por habitante en el Quindío es de 138 ± 22 L/hab•d, siendo el consumo máximo de 182 L/hab•d en Córdoba y el mínimo de 104 L/hab•d en La Tebaida. El número promedio de habitantes/suscriptor es de $3,6 \pm 0,4$, con un intervalo de 3 a 4,5 habitantes/suscriptor.
- El consumo de agua promedio probable en el Quindío es de 138 L/hab•d, con un 95% de probabilidad 174 L/hab•d.
- El 58% de los municipios del Quindío (Quimbaya, Circasia, Pijao, Buenavista, Montenegro, Salento y Génova) tiene cobertura del alcantarillado menor del 95% y requiere, por tanto, incrementar su cobertura de servicio.
- Solamente dos municipios (17%) poseen planta de tratamiento de agua residual del tipo de tratamiento secundario. Los diez municipios restantes (83%) no poseen sistema de tratamiento de aguas residuales.
- La eficiencia de las plantas de tratamiento de La Tebaida y de Salento es muy baja, por lo que se requiere aumentar su rendimiento al 80%.
- La DBO promedio del agua residual de los municipios del Quindío es de 240 mg/L, para un 95% de probabilidad; la DBO del agua residual cruda es menor de 450 mg/L. Los municipios del Quindío tienen aguas residuales crudas con concentración orgánica muy variable, entre 45 y 419 mg/L, que indica la necesidad de verificar la exactitud y precisión de los ensayos de DBO practicados y las condiciones de flujo de los alcantarillados.
- El valor de SST promedio del agua residual de los municipios del Quindío es de 190 mg/L, para un 95% de probabilidad; los SST del agua residual cruda son menores de 460 mg/L. Es necesario, como sucede con los valores de DBO, verificar la validez y precisión de dichas pruebas, así como las condiciones de flujo de los alcantarillados.
- La cobertura del sistema de aseo en todos los municipios del Quindío es del 100%, con excepción del municipio de Calarcá y de Pijao, los cuales cuentan con 96 y 80% de cobertura, respectivamente.
- La producción volumétrica de residuos sólidos en el Quindío varía entre 0,23 y 0,73 L/hab•d, que corresponde a una producción másica de 0,12 a 0,39 kg/hab•d.

- El municipio de Armenia tiene la mayor producción volumétrica y másica de residuos sólidos (0,73 L/hab•d y 0,39 kg/hab•d, respectivamente), mientras que Buenavista tiene la menor producción (0,23 L/hab•d y 0,12 kg/hab•d).
- La disposición másica y volumétrica promedio de residuos sólidos en el departamento del Quindío es de 0,22 kg/hab•d y 0,22 L/hab•d.
- El costo promedio de recolección, transporte y disposición por kilogramo de residuos sólidos es de \$222/kg. El municipio de Córdoba presenta el mayor costo con \$652/kg, mientras que el municipio de Buenavista presenta el menor costo con \$82/kg.
- El costo promedio de recolección, transporte y disposición por litro de residuos sólidos es de \$117,6/L. El municipio de Córdoba presenta el mayor costo (\$346/L) y el municipio de Buenavista, el menor (\$44/L).
- El municipio de Pijao tiene la cobertura más baja en los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo. El municipio de Génova carece también de cobertura adecuada en servicios de acueducto y alcantarillado.
- Circasia, Buenavista, La Tebaida, Filandia y Salento tienen muy buenas coberturas en los tres servicios. Armenia debe ampliar la cobertura del servicio de acueducto.

REFERENCIAS

1. Bautista C., Shirley A. (2010, junio). Inventario sanitario de los departamentos del Quindío y Amazonas. Proyecto de grado maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Comportamiento operacional de un tornillo simple con diferentes configuraciones de dado

Operational behavior of a simple screw with die of different shapes

JAIME ALEJANDRO PUENTES PARODI¹ Y GERMÁN ANDRÉS HIGUERA CAMARGO²

1. Ingeniero industrial, magíster. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Estudiante de ingeniería industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Recibido: 15/08/2010 Aceptado: 05/09/2010

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

Resumen

Actualmente, un alto porcentaje de máquinas extrusoras usadas en la industria colombiana no cuenta con información técnica suficiente para optimizar su proceso; esto es de gran importancia, puesto que se pueden obtener mejores productos en menores tiempos y costos energéticos a niveles óptimos de operación. El objetivo de este trabajo fue determinar los puntos óptimos operacionales y los flujos totales que se relacionan directamente con la temperatura y la presión a la que se está operando la máquina. Los datos experimentales se obtuvieron de una máquina extrusora de construcción nacional, con diferentes diámetros de dado, donde se determinaron una serie de variables, tales como la configuración y geometría del tornillo, la presión, la temperatura y la viscosidad del material que se va a procesar.

Abstract

Currently, a high percentage of extruders commonly used in the Colombian industry do not have enough technical information to optimize the process itself; This affects quality of product, the reduction of production time and energetic costs, and the optimal operation levels. The objective of this paper is to determine the optimal operational points of an extruder machine with dies of different diameters, obtain the total polymeric flow and compare it with temperature and pressure. The optimal operation level is calculated by getting a number of variables such as geometry and configuration of the screw, as well as pressure, temperature and viscosity of material.

INTRODUCCIÓN

Hoy día, el uso de materiales plásticos para fabricación de diversa gama de piezas y productos ha aumentado en forma considerable debido a la necesidad de fabricar componentes a un menor costo, pero con igual o mejores características físicas que los productos o componentes que se fabrican normalmente de otros tipos de materiales, como metales y cerámicos. Es necesario, además, conocer y optimizar los procesos por los que pasará el producto en su etapa de fabricación. Uno de los procesos más comunes e importantes en el procesamiento de polímeros es la extrusión.

La extrusión es un proceso de compresión, en el cual el material es forzado a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo, cuya forma está definida por la geometría de la sección transversal del orificio. Es un proceso de conformación para polímeros que se utiliza ampliamente con termoplásticos y elastómeros para producir artículos como tubos, ductos, mangueras, perfiles estructurales, etc. Para este tipo de productos, la extrusión se lleva a cabo como un proceso continuo y se corta en las longitudes deseadas [1]. Además, la extrusión es el proceso más efectivo y eficiente, usado ampliamente para mezclar resinas con aditivos como rellenos, colorantes y otros [2].

Una máquina extrusora está constituida principalmente por un tornillo, que rota para desplazar material sólido hasta fundirlo (figura 1). Actualmente existen máquinas extrusoras que manejan un solo tornillo, o dos, o más tornillos, dependiendo del proceso y el material con que se va a trabajar.

El mono husillo o tornillo sencillo es el equipo más común en la industria del plástico. El tornillo plasti-

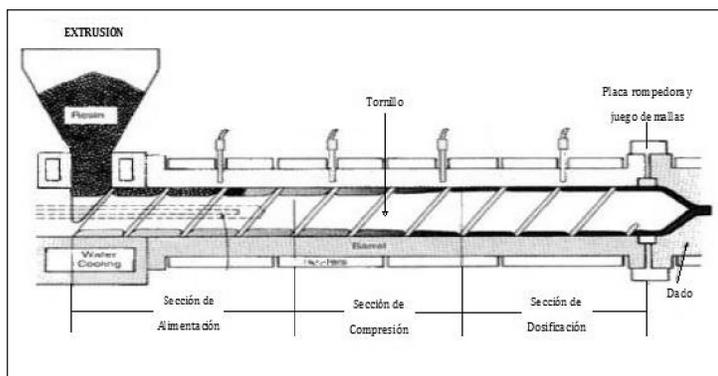


Figura 1. Esquema general de una máquina extrusora [12].

ficador puede dividirse en tres zonas principales [3]: la zona de transporte de masa, la zona de fusión o de transición y la región de dosificación o *metering*. Las funciones del tornillo consisten en transportar los *pellets* sólidos o en polvo desde la tolva hasta el canal del tornillo, compactar los *pellets* y transportarlos, fundir los *pellets*, mezclar el polímero para formar una base homogénea y forzar la mezcla a través del dado de salida [25].

Entre las principales variables que hay que controlar en el proceso de extrusión se encuentra la presión que se mide al final del cañón por medio de un transductor instalado en el dado. Variaciones de presión a la salida del dado producen cambios en el rendimiento del equipo y del producto que se está procesando. Estas variaciones se registran para determinar la eficiencia y rendimiento de la máquina, así como para solucionar problemas posteriores en el proceso.

En la figura anterior se muestra la geometría del tornillo, donde se observa que a medida que el diá-

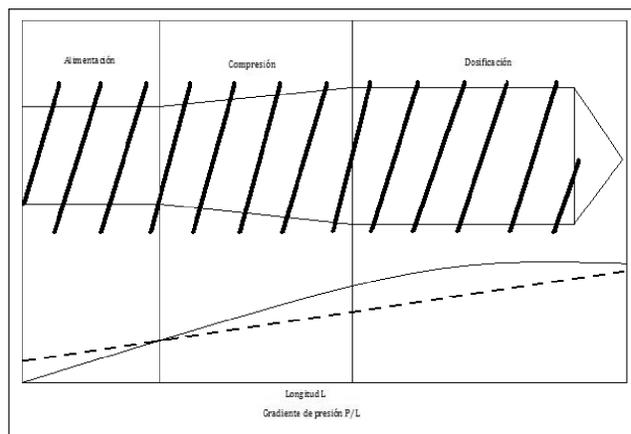


Figura 2. Variaciones de diámetro y presión [12].

metro interno aumenta y la altura del filete disminuye, la presión ejercida sobre el material fundido se hace mayor (figura 2).

La temperatura del proceso es otra variable que debe monitorearse durante el proceso. La temperatura varía con la posición de la termocupla, con el material y las condiciones del procesamiento [25]. La sensibilidad de un material a los esfuerzos de corte y a temperaturas produce diversos niveles de esfuerzo de corte. Mientras la masa fundida se desplaza más rápidamente en el centro del canal, el esfuerzo de cizallamiento es máximo entre las paredes del barril o cañón. El diferencial en la

temperatura de la masa fundida puede llegar hasta los 50 °C en el canal fundido [2].

El flujo de salida de la extrusora decrece debido a que la presión en la zona final del tornillo se eleva. El flujo de salida del dado se incrementa a causa del incremento de la presión a la entrada de éste. Tales variables son independientes y diferentes para cada tipo de extrusora, por geometría y operación [4].

El objetivo de este trabajo fue la caracterización del comportamiento del tornillo con respecto a un material determinado (polietileno de baja densidad), variando tanto los diámetros de los dados como las velocidades del tornillo de una máquina extrusora de construcción nacional.

MATERIALES Y EQUIPOS

Materiales

Los polímeros se caracterizan por ser viscosamente aleatorios, dependiendo de su estructura molecular y de su composición química. Los resultados de flujo de salida del material varían con el cambio de la temperatura y la velocidad de deformación, dependiente de la velocidad a la que gira el tornillo. Estos factores afectan su viscosidad, coeficiente de fricción, presión de salida y acabado superficial del producto final.

El material usado en esta investigación es el LDPE (polietileno de baja densidad), de referencia DOW 641s, cuyas propiedades se muestran más abajo (tabla 1). Esta resina presenta un buen balance de propiedades ópticas y mecánicas, y se caracteriza por su facilidad de procesamiento. Su estructura se muestra a renglón seguido (figura 3).

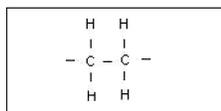


Figura 3. Monómero del poli(etileno) de baja densidad [9].

A continuación se presentan las propiedades del material, proporcionadas por el fabricante:

Tabla 1
Resumen de las características del material

Índice de fluidez(190 °C/ 2,16 kg), g/10 mm:	2
Densidad, g/cm ³ :	0,9215

Equipos

A continuación se describen los componentes internos y externos de la máquina extrusora que tuvieron incidencia directa o indirecta en los resultados obtenidos.

En la caracterización se usó una extrusora de tornillo sencillo o mono husillo de construcción nacional, cuyas características se especifican a continuación [25]:

Motor Siemens: trifásico - 1740 rpm.
Voltaje: 220 Y-440 Y
Corriente: 19,6-9,8 A
Potencia: 6,6 / 4,9 HP/kW
Cos φ: 0,83
Reductor Ramfé: monofásico - 1740 rpm.
Corriente: 15,25 A
Potencia: 4,9 kW
Cañón máquina:
Longitud: 120 cm
Diámetro interno: 38,77 mm
Espesor de las paredes: 2,2 cm
Ventiladores Ametek: (3) -3450 rpm
Voltaje: 115 V
Corriente: 5 A

Tornillo

Para determinar los parámetros óptimos de la máquina fue necesario caracterizar geoméricamente el tornillo. Se debió extraer por completo de la máquina, puesto que no había especificaciones ni planos de éste. Los planos resultantes, cuyos valores se tendrán en cuenta más adelante para determinar los puntos óptimos operativos [25], se representan en la figura siguiente (figura 4).

Dados

Para establecer el diámetro de cada dado, se tuvo en cuenta la serie de Fibonacci, con la cual se determinaron los diámetros finales del experimento (tabla 2). Los diámetros escogidos fueron 32, 15, 7,5 y 3,5 milímetros.

Tabla 2
Dimensiones generales de los dados [25]

	Dado 1	Dado 2	Dado 3	Dado 4
Diámetro	3,5 mm	7,5 mm	15 mm	32 mm
Longitud	7 mm	15 mm	30 mm	35 mm
Radio	1,75 mm	3,75 mm	7,5 mm	16 m

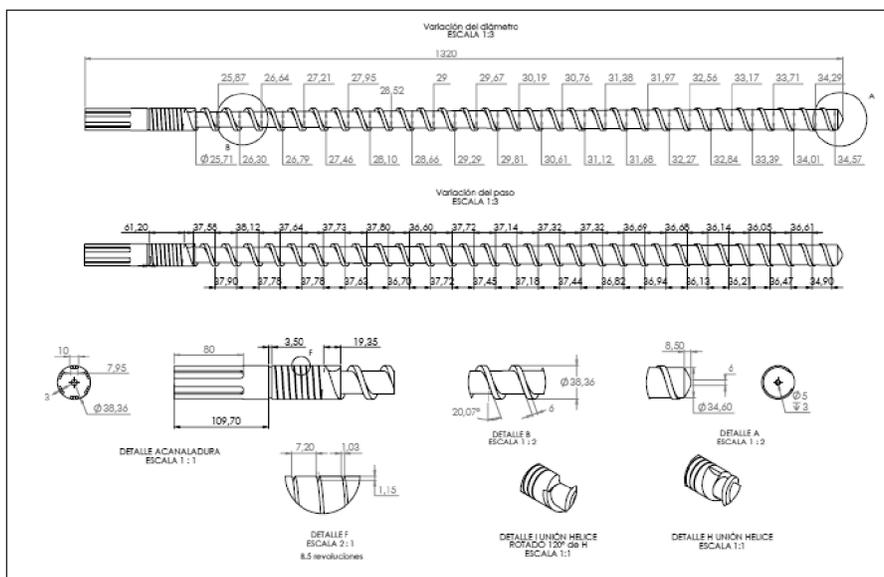


Figura 4. Representación de las dimensiones del tornillo [25].

MÉTODOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Las variables y parámetros analizados en esta investigación son el diámetro del canal de salida en el dado, el tiempo de residencia, la temperatura y presión a la salida del dado y el flujo del material o caudal; estos parámetros se clasificaron en dos categorías:

Variables controlables. Son aquellas que se especifican y configuran en la máquina, permaneciendo constantes durante el experimento; estas variables son velocidad de giro del tornillo, diámetro del canal de salida, tiempos y temperatura en las zonas de calentamiento.

Variables no controlables. Son aquellas que no se pueden modificar, pero que dependen de los parámetros de trabajo de la máquina (en este caso, la presión y el flujo de la masa fundida).

A continuación se presentan las variables que hay que considerar en la caracterización. Además, se determinan los parámetros continuos o discretos, y sus respectivas unidades de medición (tabla 2).

Tabla 3
Resumen de variables que hay que utilizar en el trabajo [25]

Nombre	Sigla	Definición	Tipo	Unidades/Valores
VARIABLES CONTROLABLES				
Velocidad	V	Velocidad de giro del tornillo extrusor.	DISCRETA	25 rpm 50 rpm 75 rpm 100 rpm
Diámetro canal de salida	D	Diámetro interno del dado. Está ubicado al final de la máquina extrusora, y establece la geometría final del material.	DISCRETA	3,5 mm 7,5 mm 15 mm 32 mm
Temperatura	T	Valor calorífico transmitido a la máquina, por acción de resistencias eléctricas. Varía para cada una de las zonas, establecidas según propiedades del material. Valores constantes durante todas las pruebas.	DISCRETA	Zona 1 160 °C Zona 2 178 °C Zona 3 195 °C
VARIABLES NO CONTROLABLES				
Presión	P	Esfuerzo ejercido por el material para pasar a través de un área menor.	CONTINUA	PSI
Flujo de material fundido	Q	Volumen de material obtenido a la salida de la máquina durante el ciclo de trabajo.	CONTINUA	kg/h

Estos datos se registraron en un periodo de dos meses, utilizando tablas guía.

Análisis de datos

En las siguientes tablas se muestran la variación del flujo (kg/h) (tabla 4), la presión (Pa) (tabla 5) y la temperatura (°C) (tabla 6), con respecto a la geometría de los dados. Posteriormente se explicarán en detalle las tendencias y comportamientos de la máquina en relación con las variables mencionadas [25] (figuras 5, 6 y 7).

Tabla 4
Datos de flujo (kg/h)

	Diámetro	Velocidad			
		25 rpm	50 rpm	75 rpm	100 rpm
	3,5 mm	3,6	4,8	9,8	13,2
	7,5 mm	4,3	7,4	10,8	13,5
	15 mm	4,4	7,6	11,6	17,3
	32 mm	4,5	9,1	13,6	18,3

Tabla 5
Datos de presión (Pa) (salida del dado)

	Diámetro	Velocidad			
		25 rpm	50 rpm	75 rpm	100 rpm
	3,5 mm	265	366	530	669
	7,5 mm	137	184	263	299
	15 mm	81	119	225	254
	32 mm	60	106	125	149

Tabla 6
Datos de temperatura (°C) (salida del dado)

	Diámetro	Velocidad			
		25 rpm	50 rpm	75 rpm	100 rpm
	3,5 mm	202	201	201	200
	7,5 mm	188	190	198	199
	15 mm	185	186	196	196
	32 mm	180	183	192	195

Gráficas y puntos de operación

Las gráficas operacionales son resultado del flujo, la velocidad y la presión resultantes para cada uno de los dados, determinando los valores teóricos que se compararan con los datos obtenidos experimentalmente [25].

Flujo de arrastre (Q_d)

Es el flujo máximo que evacua la máquina, que depende de la geometría y velocidades de giro del tornillo. Se presenta por fricción tanto en la superficie del tornillo

como en la pared interior del cilindro; el arrastre del material fundido a lo largo del tornillo, como resultado de las fuerzas de fricción, es equivalente a un arrastre viscoso. Cuando el tornillo gira en relación con la pared del barril, que es estacionaria, uno de los componentes está en movimiento relativo con el otro; esto genera un flujo de arrastre [5], que se define según la ecuación (1):

$$Q_d = \frac{1}{2} * \pi^2 * (Da)^2 * N * h * \sin \varphi * \cos \varphi \quad (1)$$

Donde:

D_a = diámetro entre aspas del tornillo.

N = velocidad de rotación del tornillo.

h = profundidad del canal o filete.

φ = ángulo de la hélice.

Flujo de presión (Q_p)

Producido por el gradiente de presión a lo largo del tornillo que se opone al movimiento del flujo por arrastre.

En la mayoría de los dados de extrusión, el flujo pasante es un flujo de presión pura. La fluidez del polímero a través del dado es el resultado de la presión en la entrada del dado, siendo ésta más alta que la presión de salida [5], que se define en la ecuación (2):

$$Q_p = \frac{\pi * Da * h^2 * \sin^2 \varphi * p}{12 * \eta * L} \quad (2)$$

Donde:

D_a = diámetro entre aspas del tornillo.

h = profundidad del canal o filete.

φ = ángulo de la hélice.

η = viscosidad del material.

p = presión.

L = longitud del cañón.

Con esta ecuación se puede predecir la viscosidad del material a una determinada presión y es dependiente de las características del tornillo y la máquina.

Flujo total (Q_t)

Es el balance del flujo de arrastre menos el flujo de presión [5].

Flujo total = flujo de arrastre - flujo de presión.

$$Q = \frac{1}{2} * \pi^2 * (Da)^2 * N * h * \sin(\varphi) * \cos(\varphi) - \frac{\pi * Da * h^2 * \sin(\varphi) * P}{12 * \eta * L} \quad (3)$$

Con los datos obtenidos dimensionalmente del tornillo, se puede determinar el flujo total saliente del material para cada velocidad, y, en una situación donde la presión es mínima, donde se asume $P = 0$ (sin restricciones a la salida del cañón). La ecuación (3) se reduce a:

$$Q_{max} = 518.94 * N \quad (4)$$

Donde N es la velocidad de giro del tornillo.

Remplazando en la ecuación (4) las velocidades de giro del tornillo (N), se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 7):

Tabla 7

Flujo máximo teórico calculado para cada velocidad, donde $P=0$ (sin dados) [25]

Velocidad de giro (rpm)	Flujo máximo (mm ³ /seg)
25	12.973,5
50	25.947
75	38.920,5
100	51.894

(Flujo, esperado teóricamente, sin dado).

Los datos obtenidos experimentalmente, de flujo, se muestran a renglón seguido (tabla 8):

Tabla 8

Datos de flujo de salida con dados de diferentes diámetros y a diferentes velocidades [25]

	Flujo de salida por dado (mm ³ /seg)			
	25 rpm	50 rpm	75 rpm	100 rpm
3,5 mm	1076,16	1452,16	2948,9	3964,81
7,5 mm	1305,13	2218,26	3244,16	4063,07
15 mm	1335,26	2302,96	3497,23	5198,84
32 mm	1347,31	2728,37	4087,73	5526,63

(Flujo obtenido experimentalmente para todos los dados).

En la tabla anterior se pueden apreciar los datos experimentales obtenidos y medidos a la salida de cada dado, a distintas velocidades.

Con el fin de determinar la viscosidad para cada prueba, se despeja de la ecuación (3) que se simplifica a:

$$\eta = \frac{\pi * Da * h^2 * \sin^2 \varphi * p}{12 * L * (Q_{max} - Q_t)} \quad (5)$$

Remplazando en la ecuación (5) los valores constantes del tornillo, se obtiene la ecuación (6), que es una forma más general para esta máquina.

$$\eta = \frac{0,011 * p}{Q_{max} - Q_t} \quad (6)$$

Donde Q_t es el flujo de salida hallado experimentalmente para cada dado en cada velocidad y el Q_{max} es el flujo obtenido máximo calculado sin presión, es decir, con $P=0$.

Los datos de viscosidad representan las características pseudoplásticas del material en el tornillo. A mayor velocidad de giro del tornillo, menor es la viscosidad en éste.

Presión máxima (P_{max})

Es la que se ejerce por la fricción entre las paredes del cañón y la superficie del tornillo; se obtiene al despejar P de la ecuación (3), generando la siguiente expresión [5]:

$$P_{max} = \frac{6 * \pi * D * L * \eta}{h^2 * \tan(\phi)} \quad (7)$$

Donde

D = diámetro del tornillo.

L = longitud del tornillo.

η = viscosidad Pa-s.

h = profundidad del canal o filete.

ϕ = ángulo de aspas.

La presión máxima (P_{max}) ocurre en la extrusora cuando se presume que no hay flujo de salida a través del dado. Experimentalmente ocurre con la mayor velocidad (100 rpm) y el mayor diámetro (32 mm) [10], de los valores obtenidos en las ecuaciones (3) y

(5); reemplazando en la ecuación 7, se obtiene el valor máximo de presión: $P_{m\acute{a}x} = 85 \text{ MPa}$

Características del dado

Se debe tener en cuenta el flujo de material saliente del dado. Para la ecuación (8), se toman los valores obtenidos de presión máxima de la tabla 9, [25].

$$Q = \frac{\pi * R^4}{128 * \eta * L_d} * P \tag{8}$$

Donde:

- Q = flujo del dado.
- D = diámetro del dado o canal de salida.
- η = viscosidad del material.
- L_d = longitud del canal de salida o abertura del dado.
- P = presión máxima ejercida de cada dado.

Al reemplazar las viscosidades calculadas para cada dado en la ecuación 8, según la tabla 3, y en la ecuación 6, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = K * P \tag{9}$$

Donde K es un valor constante geométrico, calculado en la ecuación 8. Los K para cada dado se muestran en la tabla 9, y P, la presión ejercida experimental.

Tabla 9
Factor de forma K (mm³/Pas) para cada dado [25]

Diámetro	Velocidad			
	25 rpm	50 rpm	75 rpm	100 rpm
3,5 mm	5,2	5,6	7,3	7,6
7,5 mm	16,9	28,2	23,4	27,1
15 mm	61,6	176,2	34,8	49,7
32 mm	25,8	29,5	37,4	42,4

Conociendo estos valores, se puede despejar la ecuación 9 para hallar el flujo teórico para cada dado.

Relación flujo vs. temperatura

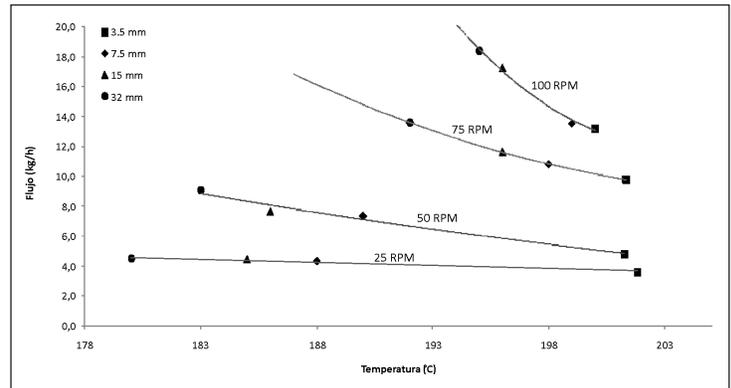


Figura 5. Flujo vs. temperatura a diferentes velocidades y diámetros [25].

Para determinar la relación entre el flujo y la temperatura, se consideraron la velocidad del tornillo y el diámetro del dado; la temperatura de la masa fundida se tomó justo a la salida del respectivo dado. En la figura 5 se evidencia que a mayores velocidades de giro del tornillo, independiente del diámetro del dado, el flujo del material aumenta.

Como se definió anteriormente, este comportamiento se produce por el efecto de la fricción entre el polímero y las superficies tanto del tornillo como de la pared interna del barril; a medida que el diámetro disminuye y la velocidad del tornillo aumenta, la temperatura de la masa fundida es mayor precisamente por el incremento de la fricción.

En cuanto a la calidad del producto extruido, se puede deducir que a medida que disminuye el diámetro del dado y aumenta la velocidad del tornillo, la apariencia de la masa fundida se torna más opaca, en relación con los parámetros opuestos. Esto se debe al exceso de temperatura generado por las altas velocidades, y se infiere que el material puede estar sometido a una degradación térmica debido a las altas temperaturas internas de la máquina. Se sugiere corroborar estos datos en un ensayo DSC.

Relación presión vs. temperatura

A continuación se muestra la relación entre la presión y la temperatura del material a la salida del cañón, así como su variación con respecto a las velocidades del

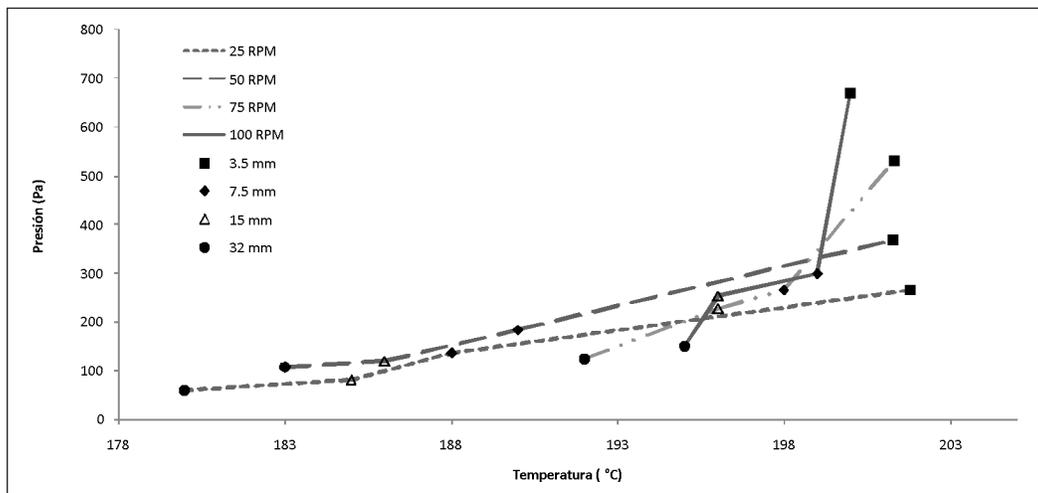


Figura 6. Presión vs. temperatura para diferentes velocidades y diámetros [25].

husillo y los diámetros de salida de cada dado (figura 6). Esta tendencia se explica por los aumentos en los esfuerzos de corte en el material, simultáneamente por el aumento de la velocidad del husillo y la reducción del diámetro

Al igual que en la figura de flujo vs. temperatura, los puntos mostrados son el resultado del promedio de datos experimentales que presentaban un comportamiento homogéneo y continuo.

La relación entre los datos de presión-temperatura se debe analizar conjuntamente con las gráficas de

viscosidad, para cada punto, dado que este parámetro varía respecto a la fricción interna y la temperatura generada por fricción y resistencias. En relación con el comportamiento de los puntos en la figura, se infiere que ambas variables aumentan con el incremento de la velocidad y la fricción entre las partes.

Relación flujo vs. presión

En esta figura se resume el comportamiento del material fundido respecto a los cambios de presión observados con los distintos diámetros de dados y velocidades

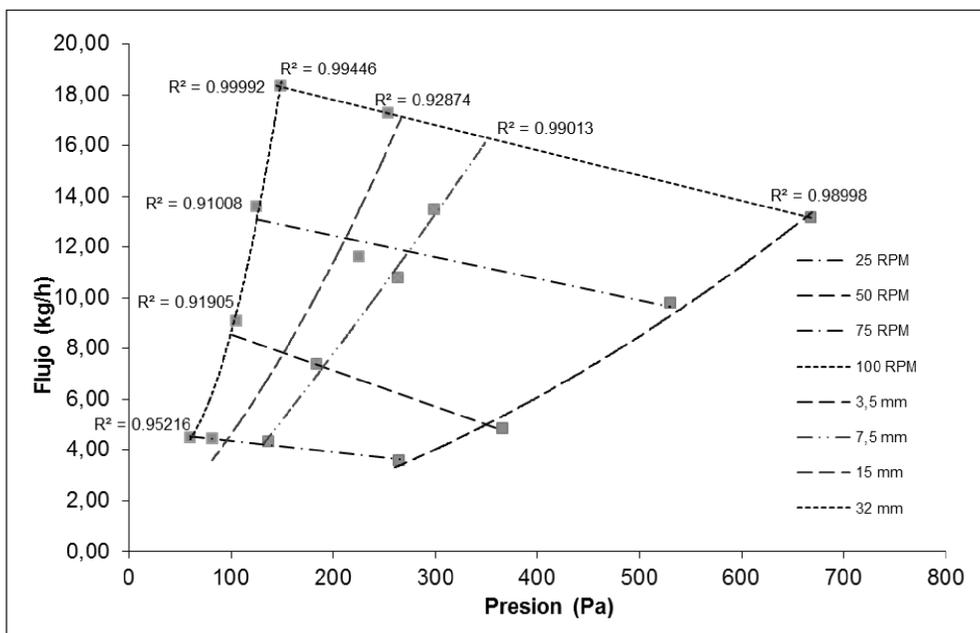


Figura 7. Flujo vs. presión para diferentes velocidades y diámetro [25].

(figura 7). Los puntos se obtuvieron experimentalmente por regresión lineal, la confiabilidad de los datos se demuestra por el coeficiente de determinación (R^2) cercano a 1. Las ecuaciones obtenidas para cada curva representan la relación de flujo-presión que se debe seguir para cada punto dentro y fuera del área demarcada.

En esta figura se indica que para procesos similares, ya sea con los mismos dados u otros, se obtendrán curvas características que estarían dentro de los rangos o límites calculados; estos datos son de gran importancia para configurar el equipo en procesos posteriores.

La intersección de las curvas representa los puntos operativos óptimos, demostrando que para pruebas futuras en esta máquina y con el mismo material, y si se emplea un diámetro diferente de los usados en esta investigación, los resultados deberían ser cercanos a los puntos determinados y localizarse dentro de esta figura, demostrando un comportamiento paralelo al de los otros dados.

Así mismo, se comprueba cómo el dado más pequeño (3,5 mm), a una velocidad de 100 rpm, presenta una mayor presión de salida y un flujo menor con respecto a los demás dados a la misma velocidad. En razón de las características pseudoplásticas del material, su comportamiento no es homogéneo para todas las pruebas.

Las líneas con tendencia vertical muestran el comportamiento del flujo dependiente de la presión a di-

ferentes diámetros de salida, siendo la curva obtenida para el diámetro de 32 mm la más cercana al eje y la del dado de 3,5 mm la más lejana. Las líneas con tendencia horizontal representan las velocidades de trabajo, siendo 25 rpm la más cercana al eje X, y la más lejana la de 100 rpm, demostrando que a mayor velocidad, mayor es el flujo de salida, y a menor diámetro, mayor la presión ejercida.

Viscosidad

Uno de los principales objetivos de esta investigación fue analizar el comportamiento verdadero de la máquina extrusora, y para esto era necesario entender cómo influye la viscosidad del material en el proceso. Debido a la viscoelasticidad, inherente a los polímeros, ésta fluctúa de acuerdo con la temperatura, la presión, la velocidad, el tipo del tornillo y los diámetros de los dados. Para el análisis de la viscosidad se usaron los dados de 3,5, 7,5, 15 y 32 milímetros.

La viscosidad del material extruido a la salida del dado muestra su dependencia de los esfuerzos y velocidades de corte. A velocidades muy altas de deformación, las cadenas poliméricas se encuentran teóricamente alineadas en la dirección del flujo. Cuando esto ocurre, la viscosidad permanece constante en un comportamiento newtoniano [2] [10].

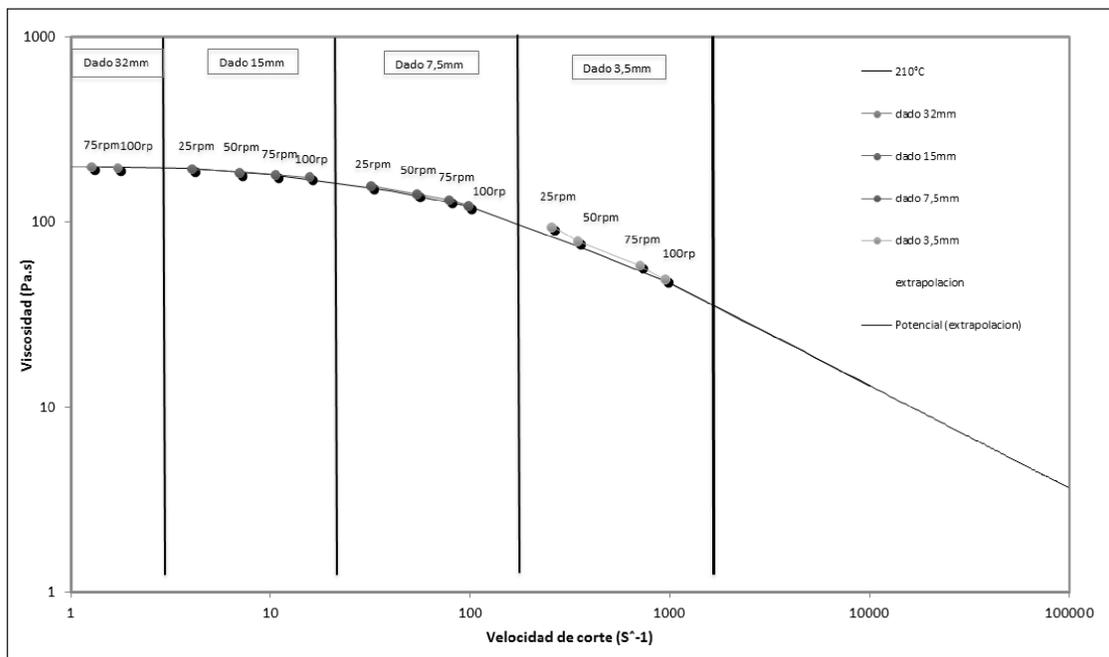


Figura 8. Viscosidad, con dados de 3,5 a 32 mm [25].

En la figura se muestra una curva maestra donde se superponen las viscosidades teóricas con respecto a los esfuerzos de corte en el tornillo a una temperatura de 210 °C. La curva representa el comportamiento del material a cambios de la velocidad de corte, presión y temperatura.

Con base en los resultados se concluye que a medida que aumenta el diámetro de salida y, por efectos de la fricción, la velocidad de corte disminuye, comportamiento contrario al observado en la viscosidad, que se incrementa a medida que aumenta el diámetro de salida del material. Este parámetro es muy difícil de controlar por la presión generada por la placa y la malla a la salida del cañón, ocasionando variaciones de temperatura y, por tanto, de viscosidad.

CONCLUSIONES

- De las figuras 5, 6 y 7, se evidencia que los datos mantienen cierta tendencia al variar el diámetro de los dados y la velocidad de giro del tornillo. Estas variaciones se deben a que no se consideraron otras variables que pueden influir en el proceso: la presión que se ejerce por parte del dado, la fricción entre el tornillo y el cañón, la temperatura que se genera por esta fricción, la longitud del dado, la geometría del tornillo, el tipo de material, entre otras.
- Al ser comparados los datos experimentales con los teóricos, se encontró gran discrepancia; esto se puede explicar por la geometría del tornillo de la máquina a la que se le hizo la caracterización, ya que no cumple con las especificaciones geométricas teóricas.
- Los datos obtenidos a 25 rpm y mostrados en la figura 7 demuestran tener un flujo muy similar, indiferente de la temperatura a la cual se obtuvo. Esto puede deberse al rendimiento óptimo de la máquina y, como se mencionó antes, a la geometría del tornillo.
- La superficie del material a la salida del dado de 3,5 mm demuestra su inhomogeneidad, a medida que aumenta la velocidad del tornillo. Esto puede explicarse por la alta velocidad de corte generada en el material, que puede causar una degradación por altas cargas mecánicas y térmicas y, consecuentemente, el mal acabado superficial.
- En los dados que generan altos esfuerzos de corte, se produce una alta relajación en el posmoldeo del material; esto genera altos porcentajes de contracción en el producto final debido a los altos esfuerzos de corte que alinean las cadenas poliméricas en el sentido del flujo y posterior relajación con el enfriamiento.
- Se demuestra la dependencia de la presión y la temperatura en la máquina, de la velocidad del tornillo más que del tamaño del dado [7], [8].
- Las viscosidades obtenidas a velocidades de giro del tornillo bajas demuestran que el material, LDPE, se comporta como un fluido no newtoniano, pseudo-plástico. A velocidades de giro del tornillo elevadas, el material tiende a comportarse como un fluido newtoniano debido a los altos esfuerzos de corte, presentando un comportamiento viscoso estable.
- La intersección de las curvas de la figura 7 representa los puntos operativos óptimos, para cada dado y velocidad, según su flujo y presión. Esto demuestra que si se quisiera desplazar por alguna de las curvas, se tendría que modificar su velocidad, implicando cambios de temperatura y viscosidad en el material. En esto también influyen los puntos obtenidos de la relación entre el flujo máximo de presión mínima y el flujo de salida para cada dado.
- En la figura 8 se demuestra cómo los puntos obtenidos de viscosidad se adaptan con una pequeña discrepancia a la curva de viscosidad a 210 °C, según [2].
- Con este trabajo se demuestra la importancia que tiene conocer cada una de las partes de una máquina y su correcta operación, con el fin de ayudar a pronosticar el máximo ahorro de energía y de tiempo, así como la cantidad de material utilizado eficientemente y el menor costo de operación.
- El desarrollo de este documento no sólo ayuda a evaluar comportamientos, sino también a establecer la incidencia de cada una de las partes fundamentales en el funcionamiento de la máquina.
- Se recomienda hacer experimentos con dados de diámetros diferentes y otros materiales poliméricos, correlacionándolos con los resultados obtenidos en este trabajo.
- Desarrollar un tornillo que cumpla con las especificaciones geométricas teóricas que aseguren un funcionamiento óptimo.
- Realizar pruebas reológicas para determinar las viscosidades reales o aproximadas del material dentro del tornillo extrusor, es decir, se deben ajustar los

parámetros, como temperaturas y velocidades de corte, cercanos a las del procesamiento. En esta forma se pueden obtener datos confiables en cuanto a la viscosidad.

REFERENCIAS

- [1] UMSS Tecnología Mecánica II [en línea] <<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-23.pdf>>.
- [2] Harper, Charles (1999). *Modern Plastic Handbook*, 1st ed. McGraw-Hill, pp. 1, 79.
- [3] Osswald, Georg Menges (2003). *Materials science of polymers for engineers*, 2nd ed. Hanser.
- [4] White, James & Potente, Helmut (2000). *Screw Extrusion*, 1st ed. Hanser, pp. 292-298.
- [5] Groover, Mikell (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. 2nd ed. Prentice Hall, pp. 315-318.
- [6] Rauwendaal, Chris (2001). *Polymer Extrusion: Important Polymer Properties*, 4th ed. Hanser, p. 155.
- [7] Rauwendaal, Chris & Van Dar Sluis, Guus (2004). Efectos de la superficie del tornillo en el proceso de extrusión. *SPE Antec*. N.º. 147 (julio-agosto 2004). Sociedad de Ingenieros Plásticos, p. 6.
- [8] Rauwendaal, Chris (2001). *Polymer Extrusion: Melt Flow Properties*, 4th ed. Hanser, p. 164.
- [9] Callister D., William (2010). *Materials Science and Engineering*, 8th ed. John Wiley & Sons, Limited.
- [10] Crawford, R. J. (1998). *Plastics Engineering: Extrusion; Extruder/Die Characteristics*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, pp. 257-260.
- [11] Universidad de Zaragoza. Introducción a la reología [en línea]. <http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/pfc_reologia/ane-xo1.doc>.
- [12] Aaron L., Brody & Kenneth S., Marsh (1997). *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, 2nd ed., p. 71.
- [13] Chao, Enrique (2007). El desarrollo de la extrusión: la inversión interminable. En <www.ambienteplastico.com/artman/publish/article_829.php>. (citado el 24 julio de 2007)>.
- [14] Groover, Mikell (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. 2nd ed., Prentice Hall, p. 314.
- [15] Morton, Jones (2000). *Procesamiento de plásticos*, 1st ed. Limusa.
- [16] Rauwendaal, Chris (2001). *Polymer Extrusion: Die Assembly*, 4th ed. Hanser, p. 54.
- [17] Rosato, Dominick (1995). *Extruding plastics: a practical processing handbook*, 1st ed. Kluwer Academic Publishers, p. 59.
- [18] Steven, M.J. & Covas, J.A. (1995). *Extruder Principles and Operation*, 2nd ed. Chapman & Hall, p. 57.
- [19] Petroquímica Dow S.A. Información de producto: Dow LDPE 641S [en línea]. <http://www2.quimicoplasticos.com/index.php?option=com_content&task=view&id=124&Itemid=32>.
- [20] Giles, Harold F., Wagner, John R., Mount, III & Eldridge, M. *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, 1st ed. Plastic Design Library, p. 212, Table 22.10. Extrusion Temperature Guidelines for Polyethylene.
- [21] Karak, Niranjana (2009). *Fundamentals of Polymers: Raw Material to Finish Products, Melt Rheology*, 1st ed. PHI, p. 98.
- [22] *The Free Dictionary*, significado de gutapercha [en línea] <<http://es.thefreedictionary.com/gutapercha>>.
- [23] Rauwendaal, Chris (2001). *Polymer Extrusion: Extruder Screw Design*, 4th ed. Hanser, p. 425.
- [24] Amoedo, Fernando Martín, Coloschi, Mariano & Court, Eugenio (2009). *Características del acero IRAM 4140*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería.
- [25] Higuera & Forero (2010). Caracterización de la máquina extrusora existente en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Industrial.

Determinación rápida de la susceptibilidad térmica del asfalto para el diseño de mezclas asfálticas en caliente*

Setting asphalt temperature viscosity for designing hot-mix asphalt

LUIS GUILLERMO DÍAZ¹ Y ADRIÁN R. ARCHILLA²

1. Profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asociado de la University of Hawaii at Manoa.

luisg.diaz@escuelaing.edu.co - archilla@hawaii.edu

Recibido: 20/09/2010 Aceptado: 20/10/2010

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

Resumen

El estándar actual para la determinación de la viscosidad con el viscosímetro rotacional (INV E-717) exige que para cada temperatura a la que se quiera determinar la viscosidad del asfalto se utilicen diferentes muestras de ensayo. Considerando que para la construcción de las curvas de susceptibilidad térmica del asfalto (VTS) es necesario determinar la viscosidad a diferentes temperaturas, se deben ensayar varias muestras.

Para evitar la utilización de muestras diferentes para cada temperatura, se realizó un estudio con el fin de desarrollar una metodología alternativa que permita establecer curvas VTS del asfalto a partir de ensayos de viscosidad efectuados en una sola muestra.

Los resultados indican que las temperaturas de mezcla y compactación estimadas con las curvas VTS, establecidas a partir de la metodología propuesta, son prácticamente iguales a las determinadas siguiendo la normativa vigente, y podrían utilizarse para determinar las características de susceptibilidad térmica de los asfaltos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Palabras claves: susceptibilidad térmica, asfalto, viscosidad, viscosímetro, rotacional, mezcla asfáltica.

Abstract

The current test standard for rotational viscosity determination (INV E-717) demands that different test specimens be used to determine viscosity at each temperature of interest. Since the development of the Viscosity-Temperature Susceptibility (VTS) curve of given asphalt binder requires the evaluation of its viscosity at different temperatures, different samples are necessary to gather the required information.

To avoid inconveniences and time losses involved in using different samples for each temperature level, we conducted a study aimed at developing an alternative methodology to determine VTS curves of asphalt binders using only one test specimen.

The results indicate that mixing and compaction temperatures estimated with the VTS curves developed with the proposed methodology yield the same values than those obtained following the current standard. We could use it as an alternative methodology to determine the viscosity-temperature susceptibility characteristics of asphalt binders used for designing hot mix asphalt.

Keywords: thermal susceptibility, asphalt, viscosity, viscometer, rotational asphalt.

* Este trabajo se presentó en inglés durante el 89 Annual Meeting - Transportation Research Board (USA, 2010) y durante las 7 Jornadas Internacionales del Asfalto (Colombia, 2010).

INTRODUCCIÓN

La determinación de la viscosidad de los cementos asfálticos es un componente fundamental dentro de su caracterización. Los resultados de los ensayos de viscosidad se emplean, entre otras cosas, para generar curvas de susceptibilidad térmica del asfalto (VTS), utilizadas dentro de métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente (MAC) para determinar las temperaturas a las que éstas se deben mezclar y compactar para obtener una mezcla homogénea entre el asfalto y los agregados pétreos.

Aunque existen diversos procedimientos para medir la viscosidad de los cementos asfálticos, la utilización del viscosímetro rotacional goza de gran popularidad, principalmente por su aplicabilidad dentro del proceso de clasificación de asfaltos basado en su desempeño (clasificación PG, por su sigla en inglés). El estándar actual para establecer la viscosidad con el viscosímetro rotacional (INV E-717) exige que para cada temperatura a la que se quiera determinar la viscosidad del asfalto se usen varias muestras de ensayo. Teniendo en cuenta que para la construcción de la VTS del asfalto hay que determinar su viscosidad a diferentes temperaturas, se requiere ensayar diversas muestras para recolectar los datos necesarios.

Con el fin de evitar los inconvenientes y la pérdida de tiempo en que se incurre con la utilización de muestras diferentes para cada temperatura evaluada, se realizó un estudio para desarrollar una metodología alternativa con el objeto de establecer curvas VTS de cementos asfálticos a partir de ensayos de viscosidad efectuados en una sola muestra.

ANTECEDENTES

El asfalto es un material viscoelástico, cuyo comportamiento mecánico depende tanto de la temperatura como de la frecuencia de carga. Tomando en cuenta su compleja respuesta ante las cargas y los efectos del medio ambiente, su caracterización requiere la evaluación de diferentes propiedades. En particular la viscosidad, definida como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad (o tasa de corte), es una característica muy importante de los asfaltos. La viscosidad tuvo un papel central en los sistemas de clasificación por viscosidad desarrollados a principios de los años sesenta (actualmente ASTM D3381), y se usa en el siste-

ma de clasificación de asfaltos por desempeño utilizado dentro de Superpave (AASHTO MP 1), el método más utilizado para la clasificación de cementos asfálticos en Estados Unidos (1).

En el sistema de clasificación de asfaltos por desempeño, la viscosidad de los cementos asfálticos a altas temperaturas es determinada por medio del viscosímetro rotacional, con el fin de asegurar que el asfalto sea lo suficientemente fluido para su bombeo y mezcla con los agregados. La viscosidad se establece midiendo el torque necesario para mantener una velocidad rotacional constante en una aguja cilíndrica sumergida en una muestra de asfalto a temperatura constante. El torque medido para mantener la velocidad rotacional constante está directamente relacionado con la viscosidad de la muestra de asfalto, la cual aparece en forma automática en la pantalla electrónica del viscosímetro rotacional. La viscosidad medida de esta manera es comúnmente determinada a diferentes temperaturas, con el propósito de establecer la relación entre temperatura y viscosidad mediante parámetros que definen la susceptibilidad térmica del asfalto, utilizada para determinar las temperaturas de mezcla y compactación del asfalto para el diseño de MAC (2), y dentro de la nueva Guía de Diseño Mecanicista-Empírico de Pavimentos de la AASHTO (MEPDG, por su sigla en inglés).

Aunque las características de susceptibilidad térmica del asfalto también pueden estimarse a partir de otros ensayos (como el índice de penetración, determinado a partir de datos del ensayo de penetración [AASHTO T 49] y del ensayo de punto de ablandamiento [AASHTO T 53 - método de anillo y bola]), la naturaleza empírica de estos ensayos hace que sea preferible establecer las características de susceptibilidad térmica de los asfaltos a partir de ensayos de viscosidad.

Dentro de la MEPDG, la curva de susceptibilidad térmica del asfalto está definida por:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (1)$$

Donde:

η = viscosidad en centipoises.

T_R = temperatura en Rankine.

A = intercepto de la regresión.

VTS = pendiente de la curva de susceptibilidad de viscosidad vs. temperatura.

Los parámetros A y VTS del modelo de suscep-

tibilidad térmica utilizado dentro de la MEPDG (ecuación 1) pueden emplearse para tener en cuenta el efecto del envejecimiento del asfalto en su rigidez y, en consecuencia, en la rigidez de la mezcla asfáltica a la que pertenece. Esto se logra dentro del *software* de la MEPDG mediante la utilización de un sistema global de envejecimiento (conocido como *Global Aging System*), que modela los efectos del envejecimiento en la viscosidad del asfalto, por medio de la incorporación de una ecuación de curva maestra de módulo dinámico de la mezcla asfáltica, en la que la viscosidad es una de sus variables independientes (3).

Es importante anotar que la nueva ecuación para la predicción del módulo dinámico $|E^*|$ de la mezcla, incorporada en la versión 1.0 del *software* MEPDG (5) (desarrollada por Bari y Witzak (4), y conocida como el modelo mejorado de Witzak), utiliza el módulo dinámico del asfalto ($|G^*b|$) y su ángulo de fase asociado (δ_b) como variables independientes en vez de la viscosidad del asfalto; sin embargo, este hecho no reduce la aplicabilidad de las curvas VTS, teniendo en cuenta que $|G^*b|$ y δ_b para una temperatura y frecuencia de carga específicas se calculan aún a partir de los parámetros A y VTS de la ecuación 1 (6).

La norma de ensayo vigente en Colombia para determinar la viscosidad por medio del viscosímetro rotacional (INV E-717) requiere que se utilicen diferentes muestras para cada una de las temperaturas de ensayo, y que, una vez ensayada, la muestra sea desechada (7). Considerando que el desarrollo de la curva de susceptibilidad térmica del asfalto requiere la determinación de su viscosidad a diferentes temperaturas, se requerirían múltiples muestras de ensayo para recolectar la información necesaria para su construcción. Aun cuando la determinación de la viscosidad con el viscosímetro rotacional es un ensayo relativamente simple, las actividades de preparación de las muestras, que incluyen el vertido del asfalto en los recipientes de ensayo, la limpieza y preparación de éstos para el siguiente ensayo cuando no se dispone de recipientes de aluminio desechables, y la limpieza de la aguja de ensayo después que se ha probado la muestra, pueden consumir tiempo valioso, especialmente cuando el mismo equipo se emplea para evaluar diferentes tipos de asfalto.

Adicionalmente, si los ensayos de viscosidad se van a ejecutar sobre muestras envejecidas en el horno de

envejecimiento rotatorio (RTFO, por su sigla en inglés), hay que envejecer una cantidad suficiente de asfalto que garantice que se dispone de bastante muestra de ensayo para evaluar la viscosidad a las diferentes temperaturas de interés, aumentando así el tiempo invertido en la preparación de las muestras y sumando el tiempo requerido para la limpieza de los recipientes de vidrio utilizados en el ensayo con el RTFO.

A continuación se presentan los resultados de un estudio efectuado con el objetivo específico de desarrollar una metodología alternativa rápida para establecer curvas de susceptibilidad térmica del asfalto mediante la utilización de una sola muestra de ensayo para determinar la viscosidad a diferentes temperaturas, evitando las inconveniencias y la pérdida de tiempo incurrida cuando se utiliza una muestra de ensayo distinta para cada temperatura (actualmente requerido según la norma de ensayo INV E-717). La metodología propuesta se considera principalmente apropiada para establecer las temperaturas que definen los rangos de temperatura de mezcla y compactación utilizados para actividades de diseño de MAC, teniendo en cuenta los relativamente bajos niveles de precisión utilizados cuando éstas son reportadas (por lo general nunca más allá de una décima de grado centígrado). Los autores consideran que cualquier esfuerzo para reducir el tiempo y recursos necesarios para determinar estos rangos de temperatura será de utilidad para los interesados en el tema.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Con el objetivo específico de investigar si se podía establecer un procedimiento más práctico para determinar las temperaturas de mezcla y compactación para el diseño de MAC, las curvas de susceptibilidad térmica de cinco asfaltos diferentes (incluyendo uno modificado con polímeros) se establecieron a partir de resultados de viscosidad obtenidos con el viscosímetro rotacional con cinco temperaturas diferentes (entre 60 y 165 °C), y con dos protocolos de ensayo, descritos más adelante.

A continuación se registran los resultados de los ensayos de penetración realizados a los asfaltos evaluados según la norma de ensayo INV E 706 (tabla 1).

Las temperaturas de ensayo utilizadas para determinar la viscosidad de los cuatro asfaltos no modificados fueron 60, 90, 115, 135 y 165 °C. A causa de la alta viscosidad del asfalto modificado a 60 °C, para este

Tabla 1
Resultados del ensayo de penetración en los asfaltos evaluados

ID asfalto	Penetración @ 25 °C
AC2	60
AC5	46**
AC6	66
AC7	83
AC9*	63

* AC9 es un asfalto modificado con polímeros.

** Es posible que el asfalto identificado como AC5 haya sido envejecido antes de ser recibido, explicando el bajo valor de penetración.

asfalto la temperatura más baja de ensayo se fijó en 70 °C, con el propósito de no exceder el torque máximo permitido por el viscosímetro rotacional. Las velocidades de rotación de la aguja se cambiaron a las diferentes temperaturas evaluadas con el fin de obtener torques por debajo del límite máximo del viscosímetro, pero lo suficientemente altas como para obtener lecturas de torque representativas. La utilización de diversos gradientes de velocidad a distintas temperaturas no es un problema cuando se ensayan asfaltos no modificados, debido a su comportamiento de flujo newtoniano. Aunque vale la pena reconocer que dicho factor es relevante para el asfalto modificado, este hecho no altera las conclusiones del presente estudio, como se explicará después.

En el primer protocolo de ensayo (escenario 1), las muestras de asfalto se ensayaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma de ensayo INV E-717 (es decir, usando una muestra de ensayo para establecer la viscosidad del asfalto a una determinada temperatura, y desechando dicha muestra una vez que el ensayo terminaba [7]). Después que se recolectaban los datos para todas las temperaturas de ensayo, éstos se ajustaban al modelo de susceptibilidad térmica (VTS) establecido por la ecuación:

$$\log \log \eta = A + \text{VTS} \log T_R \quad (1)$$

Donde:

η = viscosidad (centipoises).

T_R = temperatura (Rankine).

A = intercepto de la curva VTS.

VTS = pendiente de la curva VTS.

En total se evaluaron cinco muestras idénticas (réplicas) a cada temperatura para cada asfalto (es decir, el modelo de la ecuación 1 se estimó con un total de 25 muestras para cada asfalto), generando así un valor para el parámetro A y un valor para el parámetro VTS

para cada uno de los cinco asfaltos evaluados; el coeficiente de determinación (R^2) en todos los casos fue mayor de 0,99.

Los resultados obtenidos en el escenario 1, así como los rangos de viscosidad recomendados en el protocolo de diseño de mezcla establecido en el manual Superpave de diseño de MAC - Nivel I (2), se pueden ver más adelante (figura 1). Como era de esperarse, las medidas de viscosidad para los cuatro asfaltos no modificados muestran claramente una tendencia lineal en el espacio $\log \log \eta$ vs. $\log T$, mientras que los datos para el asfalto modificado, también como era de esperarse, indican cierto grado de no linealidad.

Para el segundo protocolo de ensayo considerado (escenario 2), se evaluó la viscosidad de una misma muestra de ensayo en todo el rango de temperaturas considerado, y los datos obtenidos se ajustaron al modelo indicado en la ecuación 1, generando así parámetros A y VTS basados en una sola muestra de ensayo. Con el fin de considerar la variabilidad de los datos obtenidos para diferentes muestras del mismo asfalto (es decir, entre muestras réplica), se determinaron los parámetros A y VTS para cinco muestras idénticas, y sus resultados promediados para obtener valores únicos de A y VTS para cada uno de los asfaltos evaluados. Las curvas VTS obtenidas al utilizar los valores A y VTS promedio en el escenario 2, incluyendo los rangos de temperatura de mezcla y compactación recomendados en (2), se incluyen en la figura 2 (en esta figura no se grafican datos puntuales, ya que las curvas VTS allí mostradas se obtuvieron al promediar los parámetros A y VTS conseguidos para cada una de las muestras ensayadas).

Con el propósito de comparar los resultados obtenidos en los dos protocolos de ensayo, en la figura 3 se muestran el promedio de las viscosidades obtenidas a las diferentes temperaturas para cada uno de los asfaltos evaluados en el escenario 1 y las curvas VTS promedio obtenidas en el escenario 2. Los sufijos S1 y S2 luego de la identificación del asfalto indican que la serie de datos en cuestión se alcanzó siguiendo los procedimientos correspondientes a los escenarios 1 y 2, en ese orden.

Los parámetros A y VTS de las curvas de susceptibilidad térmica (es decir, de la ecuación 1) en los dos escenarios evaluados, así como también otra información estadística de interés, se resumen posteriormente (tabla 2).

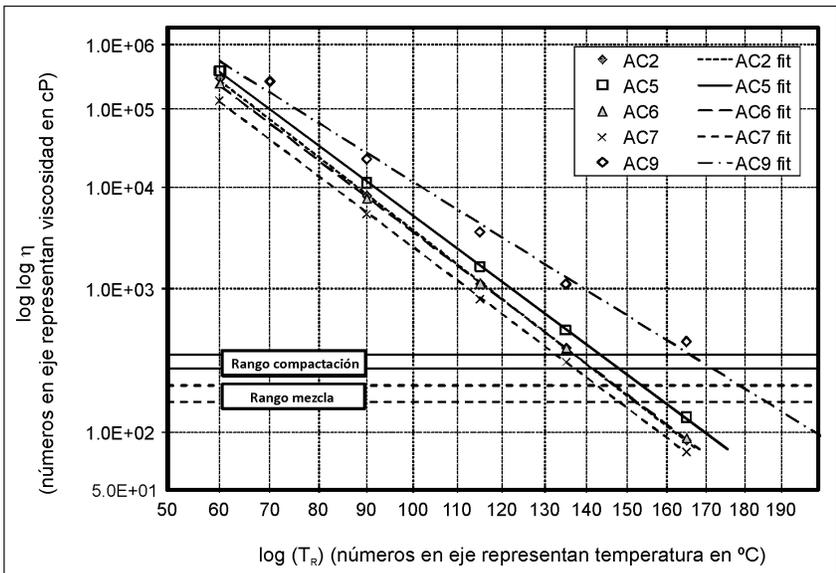


Figura 1. Curvas VTS - escenario 1.

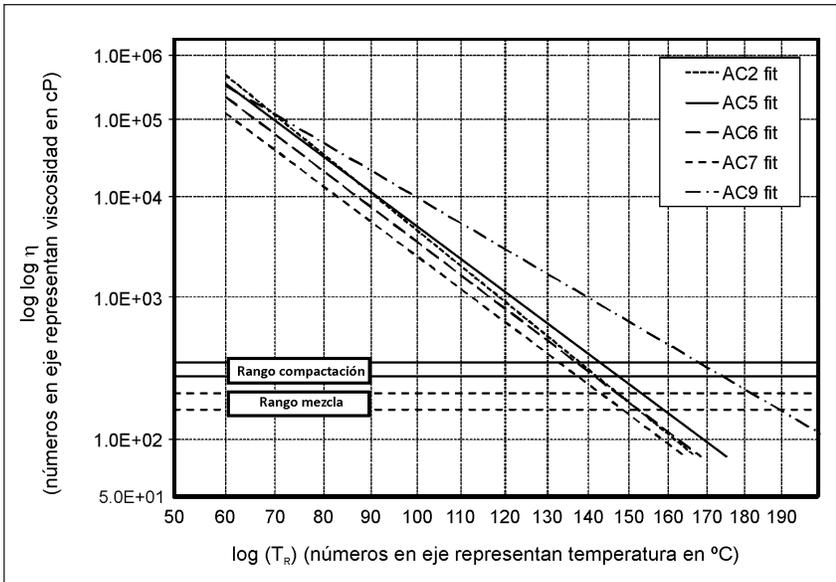


Figura 2. Curvas VTS - escenario 2.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como era de esperarse, el comportamiento de los asfaltos no modificados es lineal dentro del rango de temperaturas evaluado (figura 1). La susceptibilidad térmica de los asfaltos AC5, AC6 y AC7 es muy similar, tal como lo indican las pendientes de las curvas correspondientes a estos asfaltos (figura 2), mientras que el asfalto AC2 presenta una mayor pendiente, sugiriendo que la viscosidad de este asfalto tiene una mayor vulnerabilidad a los cambios de temperatura. Es importante anotar que se presenta una notable diferencia en la pendiente de la curva VTS para el asfalto AC2 en los escenarios 1 y 2, si se observa que la línea de tendencia para AC2 es casi idéntica a la del asfalto AC6 (figura 1), mientras que la tendencia para el asfalto AC2 se cruza con la de los asfaltos AC6 y AC5 (figura 2). No es claro si la divergencia en las tendencias observadas para bajas temperaturas se debe a diferencias durante la preparación de las muestras, realizada con algunos días de diferencia, o a posibles limitaciones del equipo cuando se hacen lecturas de viscosidad a bajas temperaturas y bajos gradientes de velocidad.

Teniendo en cuenta esta anomalía, se efectuaron dos regresiones descartando las temperaturas más bajas (es decir, una regresión descartando

Tabla 2
Parámetros A y VTS de la ecuación 1 para los escenarios 1 y 2

ID asfalto	Escenario 1			Escenario 2					
	A	VTS	R ²	A			VTS		
				Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
AC2	11,106	-3,7339	0,999	11,634	11,664	11,650	-3,9274	-3,9172	-3,9224
AC5	10,735	-3,5963	1,000	10,713	10,730	10,718	-3,5951	-3,589	-3,5909
AC6	10,917	-3,6680	1,000	10,871	10,888	10,878	-3,6582	-3,6521	-3,6545
AC7	10,791	-3,6299	1,000	10,745	10,758	10,751	-3,6181	-3,6133	-3,6157
AC9	9,130	-3,0140	0,990	8,2046	8,9935	8,600	-2,9705	-2,6867	-2,8290

Tamaño de la muestra para cada regresión en el escenario 1 es n = 25; prom. es el promedio aritmético de cinco valores de A y VTS, respectivamente; y R² = coeficiente de determinación; para cada uno de los asfaltos evaluados en el escenario 2: Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Prom. = promedio.

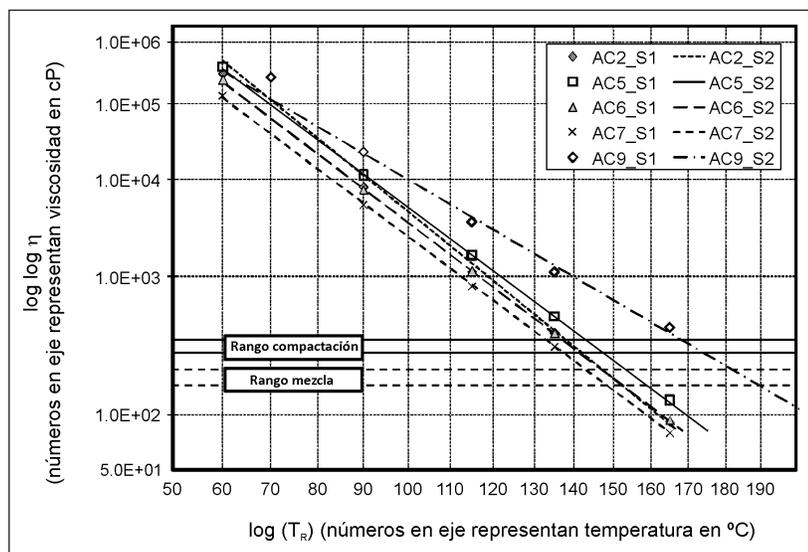


Figura 3. Comparación de curvas VTS en los escenarios 1 y 2.

las lecturas realizadas a 60 °C, y otra descartando las lecturas hechas a 60 y 90 °C). Más adelante se puede apreciar el cambio en los valores mínimo, máximo y promedio de A y VTS para las diferentes regresiones utilizando 5, 4 y 3 temperaturas (tabla 3).

Se observa una clara tendencia de incremento de VTS y disminución de A, lo que hace que los resultados entre los escenarios 1 y 2 para AC2 sean más consistentes a altas temperaturas (para los otros tres asfaltos no modificados la relación log log η vs. log T es claramente lineal en los dos escenarios, al igual que la existente para el asfalto AC2 en el escenario 1). Esta observación es clave si se toma en cuenta que las temperaturas típicas de mezcla y compactación en MAC sobrepasan por lo general los 120 °C (frecuentemente los 130 °C), lo que valida la metodología rápida propuesta si el objetivo de los ensayos de viscosidad es desarrollar curvas de susceptibilidad térmica para determinar los rangos de temperatura para mezcla y compactación.

Tabla 3

Tendencia de A y VTS para el asfalto AC2, descartando las bajas temperaturas

N.º de niveles de temperatura	A			VTS		
	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
5	11,634	11,664	11,650	-3,9274	-3,9172	-3,9224
4	11,486	11,515	11,500	-3,8756	-3,8657	-3,8701
3	11,381	11,440	11,411	-3,8496	-3,8291	-3,8393

El comportamiento del asfalto modificado (AC9) difiere significativamente del comportamiento de los asfaltos no modificados. Como era de esperarse para este tipo de asfaltos, la pendiente de la curva VTS para AC9 evidencia la menor susceptibilidad térmica entre los asfaltos evaluados. Además, mientras que los asfaltos no modificados tienen un buen ajuste al modelo de la ecuación 1, los resultados obtenidos para el asfalto modificado sugieren que la relación entre el doble logaritmo de la viscosidad y el logaritmo de la temperatura no es lineal (figura 1). Esto se veía venir, teniendo en cuenta que la composición de este tipo de asfaltos hace que modelar su comportamiento sea más complejo.

La recomendación general es que cuando se utilicen asfaltos modificados, y las curvas VTS sean desarrolladas con modelos similares a los descritos en la ecuación 1, las temperaturas de mezcla y compactación no sean determinadas a partir de dichas curvas, ya que los rangos de temperatura obtenidos de este modo tienden a ser mucho más altos de lo que se requerirían en realidad. Esta situación se ilustra en la figura 2, si se observan las altas temperaturas que se necesitarían para mezclar y compactar una mezcla asfáltica elaborada con el asfalto AC9, si se siguieran rigurosamente las recomendaciones de viscosidad establecidas (2).

Motivados por observaciones similares, varios investigadores han estudiado metodologías apropiadas para el establecimiento de rangos de temperatura de mezcla y compactación cuando se utilizan asfaltos modificados. Aunque la descripción de los detalles de dichos estudios va más allá del alcance del presente artículo, se recomienda al lector interesado leer reportes publicados en la literatura (8, 9).

Con excepción de la anomalía descrita anteriormente para el asfalto AC2, los resultados obtenidos en los dos protocolos de ensayo (escenarios 1 y 2) parecen proveer resultados muy similares (en particular para las más altas temperaturas), y sugieren que las curvas VTS obtenidas a partir de ensayos de viscosidad, siguiendo cualquiera de los dos protocolos son equivalentes; sin embargo, hay que confirmar o rechazar esta hipótesis

por medios diferentes de una simple inspección visual de los resultados.

Con el fin de establecer si en realidad existe una diferencia significativa entre los parámetros A y VTS del modelo de susceptibilidad térmica (ecuación 1) cuando éstos se determinan en los escenarios 1 y 2, se ejecutó un análisis estadístico no paramétrico. Es importante anotar que, teniendo en cuenta que A y VTS son parámetros de una regresión, su variabilidad está correlacionada, y por esta razón las conclusiones obtenidas para uno de estos parámetros son altamente aplicables al otro (no obstante, el análisis no paramétrico se hizo individualmente para los dos parámetros). El objetivo de este análisis fue probar la hipótesis de que los valores de los parámetros A y VTS obtenidos en los dos protocolos de ensayo eran iguales (o más estrictamente hablando, no diferían mucho entre sí).

La razón principal para realizar la comparación mediante un análisis no paramétrico fue el limitado número de cementos asfálticos evaluados, lo que impide verificar de manera apropiada las suposiciones implícitas en un análisis estadístico paramétrico. Contrario a las pruebas paramétricas –como por ejemplo la prueba t (t-test), que requiere que las poblaciones por comparar tengan una distribución normal–, los métodos de análisis no paramétricos no se basan en suposiciones específicas sobre la normalidad en la distribución de los datos.

En el presente estudio se utilizó la prueba estadística de Wilcoxon (*Wilcoxon Rank Sum Test*, WRST), en la que se evalúa si dos conjuntos de observaciones que se van a comparar provienen de la misma población. Para aplicar este procedimiento, es necesario que las poblaciones que se van a analizar sean continuas y sus distribuciones probabilísticas idénticas en forma y tamaño, pero no necesariamente en ubicación. La prueba consiste en primero combinar las muestras, para luego ordenar las observaciones jerárquicamente (es decir, de menor a mayor, o viceversa) y asignarles posiciones 1, 2, etc., dentro de dicho conjunto. La variable estadística evaluada en la prueba WRST, identificada con la letra T, es la suma de las posiciones correspondientes a una de las muestras, y es una medida de la diferencia jerárquica entre las dos muestras comparadas. El valor obtenido de T calculado de esta manera se utiliza luego para entrar a una tabla y establecer si la hipótesis nula (esto es, la hipótesis de que las muestras pertenecen a la misma distribución poblacional) debe ser o no rechazada para

un grado de confiabilidad determinado. El valor de T y su probabilidad asociada (*p-value*) también se pueden calcular mediante el uso de *software* especializado (S-Plus, en el caso específico del presente estudio).

Como se dijo anteriormente, los parámetros A y VTS provienen de una regresión, su variabilidad está correlacionada, y por tal razón las conclusiones obtenidas para uno de estos parámetros son altamente aplicables al otro. Teniendo en cuenta esta situación, y en aras de la brevedad, en la tabla siguiente se incluyen únicamente los resultados correspondientes al parámetro VTS (tabla 4).

Como se puede observar, el análisis no paramétrico indica que no existe una diferencia significativa entre el valor del parámetro VTS determinado en el escenario 1 y en el escenario 2. Un análisis análogo se hizo para el parámetro A con exactamente el mismo resultado y conclusión.

Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación

Cabe recalcar que el estudio efectuado busca establecer una metodología para la construcción de curvas de susceptibilidad térmica de asfaltos que reduzca el tiempo y costo actualmente incurridos para tal fin, y que al mismo

Tabla 4
Análisis no paramétrico para el parámetro VTS (*Wilcoxon Rank Sum Test*)

ID asfalto	Protocolo ensayo	VTS	Orden jerárquico (Rank)
AC9	Escenario 2	-2,8290	1
AC9	Escenario 1	-3,0140	2
AC5	Escenario 2	-3,5909	3
AC5	Escenario 1	-3,5963	4
AC7	Escenario 2	-3,6157	5
AC7	Escenario 1	-3,6299	6
AC6	Escenario 2	-3,6545	7
AC6	Escenario 1	-3,6680	8
AC2	Escenario 1	-3,7339	9
AC2	Escenario 2	-3,9224	10

Ho: Las dos poblaciones son idénticas (VTS esc1 = VTS esc2)
 Tup = (2+4+6+8+9) = 29 (suma de orden jerárquico para el escenario 1)
 Tlow = (1+3+5+7+10) = 26 (suma de orden jerárquico para el escenario 2)
 p-value = 0,841 (utilizando S-Plus) → Fail to Reject Ho. No hay evidencia de que VTS esc1 es diferente de VTS esc2.

tiempo pueda proveer, en la práctica, la misma información que sería obtenida si se utiliza la norma de ensayo vigente. En otras palabras, si el objetivo principal de la construcción de una curva de susceptibilidad térmica es determinar los rangos de temperatura de mezcla y compactación a ser utilizados durante el diseño de una MAC, y para efectos prácticos los mismos rangos de temperatura son obtenidos a partir de curvas VTS construidas en los escenarios 1 y 2, sería válido argumentar que la utilización de una sola muestra para determinar la viscosidad con el viscosímetro rotacional a diferentes temperaturas sería apropiada, y se justificaría una modificación a la norma de ensayo vigente (INV E-717).

Más adelante se resumen las temperaturas de mezcla y compactación determinadas para cada uno de los asfaltos evaluados en los dos protocolos de ensayo considerados (escenarios 1 y 2) (tabla 5). Los rangos de temperatura reportados se calcularon teniendo en cuenta los rangos de viscosidad recomendados en (2):

$$\text{Rango de viscosidad para mezclado} = 0,17 \pm 0,02 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (170 \pm 20\text{cP}) \quad (2)$$

$$\text{Rango de viscosidad para compactación} = 0,28 \pm 0,03 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (280 \pm 30\text{cP}) \quad (3)$$

Los resultados en la tabla 5 sugieren que, para efectos prácticos, no hay diferencia entre las temperaturas obtenidas a partir de los dos escenarios evaluados. Vale la pena anotar que aunque las temperaturas de mezcla y compactación necesarias para los asfaltos modificados son generalmente mayores que las requeridas para asfaltos no modificados, los resultados obtenidos para el asfalto AC9 (el asfalto modificado incluido en el estudio) son extremadamente altas (por ejemplo, temperaturas de mezcla alrededor de 180 °C). Como ya se discutió, las

temperaturas de mezcla y compactación para este tipo de asfaltos no deben determinarse a partir de curvas VTS como las descritas en el presente artículo (para recomendaciones específicas sobre la determinación de estas temperaturas para asfaltos modificados, el lector es referido a (8, 9)). No obstante, la comparación relativa de las temperaturas obtenidas en los escenarios 1 y 2 se considera válida, ya que muestra que los valores estimados en los dos protocolos de ensayo son similares (aunque mayores de los que realmente se requerirían en el caso del asfalto modificado).

Con el fin de visualizar el efecto de determinar las temperaturas de mezcla y compactación en los dos escenarios considerados de una manera más clara, las diferencias entre las estimaciones en la tabla 5 se incluyen en la tabla 6.

Como lo indican los resultados en la tabla 6, en términos prácticos las temperaturas de mezcla y compactación calculadas con las curvas de susceptibilidad térmica generadas a partir de los dos protocolos de ensayo (escenarios 1 y 2) son iguales. La mayor diferencia observada en los asfaltos no modificados es pequeña (máximo de 1° C), y aún menor (0,4 °C) si la anomalía presentada en la curva VTS del asfalto AC2 a bajas temperaturas es tenida en cuenta. La mayor diferencia observada para el asfalto modificado (AC9) fue de 3,8 °C, resultante de la diferencia entre los límites superiores de las temperaturas de mezcla estimadas para este asfalto en los escenarios 1 y 2 (185,9 °C y 189,7 °C, respectivamente). Es importante resaltar nuevamente que la determinación de las temperaturas de mezcla y compactación reales para asfaltos modificados no debe hacerse utilizando la metodología presentada aquí. Adicionalmente, las diferencias observadas entre los escenarios 1 y 2 para AC9 se podrían reducir en forma sustancial si los ensayos de viscosidad se realizan a los

Tabla 5
Temperaturas de mezcla y compactación en los escenarios 1 y 2

ID asfalto	Temperatura mezcla (°C)				Temperatura compactación (°C)			
	Mín.		Máx.		Mín.		Máx.	
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
AC2	146,9	147,3	152,1	152,3	136,9	137,9	141,2	141,9
AC5	153,6	153,3	159,1	158,9	143,1	142,9	147,6	147,3
AC6	147,2	147,0	152,5	152,3	137,1	136,8	141,4	141,1
AC7	142,6	143,0	148,0	148,3	132,6	132,9	136,8	137,2
AC9	178,9	182,0	185,9	189,7	165,8	168,0	171,4	174,0

Tabla 6

Diferencias entre las temperaturas de mezcla y compactación en los escenarios 1 y 2

ID asfalto	Temperatura Mezcla (°C)		Temperatura Compactación (°C)	
	Mín ₂ - Mín ₁	Máx ₂ - Máx ₁	Mín ₂ - Mín ₁	Máx ₂ - Máx ₁
AC2	0,4	0,2	1,0	0,7
AC5	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
AC6	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
AC7	0,4	0,3	0,3	0,4
AC9	3,1	3,8	2,2	2,6

niveles más altos de temperatura, ya que es aparente en la figura 3 que las diferencias observadas obedecen principalmente a la medida de viscosidad a 70 °C en el escenario 1 (nótese cómo la curva VTS en el escenario 2 se ajusta bastante bien a las otras cuatro observaciones en el escenario 1).

RESUMEN DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque en realidad existen algunas diferencias entre las curvas de susceptibilidad térmica generadas usando datos de viscosidad obtenidos siguiendo estrictamente la norma de ensayo establecida (INV E-717) y la metodología rápida propuesta en el presente artículo, éstas pueden considerarse insignificantes si el propósito de dichas curvas es la determinación de temperaturas de mezcla y compactación de MAC. Esto es particularmente relevante si se considera que las temperaturas de mezcla y compactación son casi siempre (si no siempre) superiores a 125 °C. Cabe anotar que, como ya se mencionó y se encuentra extensamente reportado en la literatura, el modelo descrito en la ecuación 1 no es apropiado para determinar las temperaturas de mezcla y compactación en MAC cuando se utilizan asfaltos modificados.

Los resultados aquí presentados sustentan la hipótesis de que no existe una diferencia significativa entre las curvas de susceptibilidad térmica desarrolladas con base en datos de viscosidad obtenidos en una misma muestra de ensayo a diferentes temperaturas, y las desarrolladas obteniendo los datos de viscosidad como lo sugiere la norma de ensayo actual (INV E-717), y sugieren que no es necesario entonces desechar la muestra de asfalto una vez que su viscosidad ha sido determinada a una temperatura con el viscosímetro rotacional. La conclusión anterior sustenta también la hipótesis de que no es

necesario desechar la muestra de ensayo si un esfuerzo cortante apropiado no es obtenido en el viscosímetro rotacional en el primer intento de ensayo (o dicho de otra manera, si la lectura de torque en el viscosímetro no es apropiada para obtener lecturas de viscosidad de acuerdo con las recomendaciones establecidas por el fabricante del equipo), lo que potencialmente puede reducir el tiempo y los recursos necesarios para determinar la viscosidad del asfalto por medio del viscosímetro rotacional, siguiendo la normativa vigente.

Finalmente, se recomienda que si el único propósito de establecer la curva de susceptibilidad térmica para un asfalto no modificado es la determinación de los rangos de temperatura para mezcla y compactación dentro del diseño de MAC, la mínima temperatura para los ensayos de viscosidad se fije en 115 °C si la metodología en el escenario 2 anteriormente descrita es utilizada (es decir, si se usa una sola muestra de ensayo para construir la curva VTS), con el fin de evitar posibles inconsistencias en las medidas de viscosidad a bajas temperaturas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el apoyo financiero prestado por la Escuela Colombiana de Ingeniería para la realización de este estudio. El contenido del artículo refleja el punto de vista de los autores, quienes se hacen responsables por la precisión y validez de los datos presentados. El artículo no refleja necesariamente la postura oficial ni las políticas de la Escuela Colombiana de Ingeniería, ni constituye norma, reglamentación o especificación alguna.

REFERENCIAS

1. *Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing* (2003). Superpave Series N.º 1 (SP-1), 3rd rev. Lexington, KY: Asphalt Institute.
2. *Superpave Mix Design*, 3rd ed. (2001). Superpave Series N.º 2 (SP-2). Lexington, KY: Asphalt Institute.
3. ARA, Inc. (2004). Eres Consultant Division. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report, NCHRP Project 1-37A, Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies. www.trn.org/mepdg/guide.htm.
4. Bari, J. & Witczak, M. (2006). Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 75, pp. 381-424.
5. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice, Interim Edition* (2008, July). American Association of State Highway and Transportation Officials.

6. Bari, J. & Witczak, M. (2007). New Predictive Models for Viscosity and Complex Shear Modulus of Asphalt Binders: For Use with Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (2007). *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2001. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies, pp. 9-19.
7. Invías Norma E-717-07 (2007). Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
8. Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A. & Anderson, R.M. (2001). *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP Report 459. Washington, D.C.: National Academy Press.
9. Yildirim, Y., Ideker, J. & Hazlett, D. (2006). Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures. *J. Mat. in Civ. Engrg*, vol. 18, issue 4, pp. 545-553.

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, 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 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).

www.4-72.com.co

472

LA RED POSTAL DE COLOMBIA

► Línea de Atención al Cliente Nacional ◀
01 8000 111210