

Sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas (parte I)

About the permeability of dense graded asphalt mixes

FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL

Ingeniero civil
elexdos@yahoo.com

Recibido: 10/09/2011 Aceptado: 12/10/2011
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

La infiltración de agua a través de los vacíos interconectados de las capas asfálticas produce pérdidas de adherencia entre el ligante y los agregados, dando inicio a desprendimientos que pueden derivar en la destrucción del pavimento. Un primer paso para enfrentar los problemas causados por la presencia de agua en estos sistemas, consiste en cuantificar la permeabilidad de las mezclas asfálticas utilizadas en las capas de rodadura. Partiendo de datos sobre la granulometría de los agregados y sobre la permeabilidad y la composición volumétrica de núcleos de pavimentos asfálticos en servicio, se ha desarrollado una ecuación que permite estimar la permeabilidad de una mezcla asfáltica densa a partir de su porcentaje de vacíos con aire y de la granulometría de los agregados que la constituyen. La ecuación puede ser utilizada por los ingenieros de pavimentos para controlar los niveles de permeabilidad de estas mezclas tanto durante la fase de diseño, como durante su colocación en el terreno.

Palabras claves: mezcla asfáltica, permeabilidad, pavimento, vacíos con aire, carreteras.

Abstract

Infiltration of water through the interconnected voids of the asphalt layers produces the loss of the adhesive bond between the aggregate surface and the asphalt binder, initiating deterioration which can result in the destruction of the mat. A first step to face the problems caused by the presence of water in these systems is to quantify the in-place permeability of asphalt mixes used on the surface layers that wear traffic.

Based on data on the aggregate gradation and on the permeability and the volumetric composition of existing asphaltic pavement cores, an equation has been developed to estimate the permeability of a dense graded asphalt mix, starting from the percentage of air voids and the gradation of the aggregate that constitute it. The equation can be used by pavement engineers to control the permeability of these mixtures during the design phase as well as during its setting in-place.

Keywords: asphalt mix, permeability, pavement, air voids, highways.

INTRODUCCIÓN

El problema relacionado con la humedad en las mezclas asfálticas densas es la permeabilidad (1). Debido a que estas mezclas casi nunca son impermeables, la presencia de algún grado de humedad dentro de ellas es inevitable. Al permitir el ingreso de aire, agua y vapor de agua desde la superficie o desde la base, una elevada permeabilidad favorece el endurecimiento prematuro del asfalto, la pérdida de adherencia y el desprendimiento de partículas, lo que se traduce en una pérdida de soporte y de estabilidad (2).

Los investigadores y las agencias viales han reconocido siempre la necesidad de limitar la permeabilidad de las capas asfálticas superficiales de tipo denso para obtener pavimentos estables y durables. Un elevado volumen de vacíos con aire ha sido asociado frecuentemente con una alta permeabilidad. Hace más de 50 años, McLaughlin et al. (3) hallaron una relación directa entre el volumen de vacíos con aire y el coeficiente de permeabilidad de una mezcla densa compactada y llegaron a conjeturar que este último pronosticaba, mejor que la densidad, la posible durabilidad de la mezcla. En los años sesenta, Shklarsky et al. (4) encontraron una relación similar al ensayar una mezcla de arena asfalto y opinaron, además, que la ley de Darcy resultaba válida para estudiar el flujo de agua a través de los vacíos de un pavimento asfáltico denso. Zube (5) concluyó que las mezclas asfálticas densas se volvían excesivamente permeables al agua a partir de un contenido de vacíos con aire de 8% y, años más tarde, Brown (6) llegó a la misma conclusión. Algunos investigadores han sugerido emplear la permeabilidad como parte de los controles de calidad durante la construcción de las capas de rodadura de concreto asfáltico (7, 8).

Aunque desde los primeros estudios se había aceptado que, además de su contenido total, la continuidad y el tamaño de los vacíos con aire afectan la permeabilidad (5, 14), esta consideración sólo recibió suficiente atención a partir del momento en que se empezaron a construir las mezclas del tipo Superpave, las cuales mostraron, con alguna frecuencia, permeabilidades excesivas *in situ*, a pesar de contener volúmenes totales de aire inferiores al límite anteriormente citado (9). Encontrar mezclas densas con idénticos contenidos de vacíos con aire y coeficientes de permeabilidad muy diferentes ha sido frecuente en los últimos años.

Hasta el momento se han realizado numerosos estudios para analizar la incidencia que, sobre la permeabilidad, tienen diversos factores relacionados con las mezclas asfálticas (vacíos con aire, granulometría, tamaño máximo nominal de los agregados, contenido de asfalto en la mezcla, tipo y energía de compactación, espesor de la capa, etc.). Dada la dificultad práctica que aún se presenta para la ejecución rutinaria de las pruebas de permeabilidad sobre mezclas asfálticas compactadas, los autores de algunos de estos estudios han propuesto ecuaciones para estimarla de manera indirecta; sin embargo, no ha resultado posible la aplicación de ninguna de ellas con carácter general. Algunas sólo son aplicables a unas mezclas específicas, otras se han desarrollado a partir de los resultados de ensayos de permeabilidad efectuados sin apego a norma alguna, otras requieren la determinación de coeficientes de ajuste para cada caso particular y, por último, las dispersiones entre los valores de permeabilidad medidos y los calculados suelen ser amplias (4, 10, 9, 11).

PROPÓSITO DEL ESTUDIO

El propósito del presente estudio fue obtener una ecuación empírica, de aplicación general, para estimar el coeficiente de permeabilidad de un concreto asfáltico compactado en el terreno, a partir de propiedades elementales de la mezcla que sean de obtención rutinaria (contenido de vacíos y granulometría de los agregados), ecuación que pueda ser utilizada tanto en el diseño de las mezclas como en el control de su construcción, con el fin de prevenir el efecto adverso del agua sobre el comportamiento y la durabilidad de los pavimentos asfálticos.

El objetivo se alcanzó mediante el desarrollo de las siguientes tareas:

1. Análisis de los factores de una mezcla asfáltica de tipo denso que inciden sobre su permeabilidad.
2. Recopilación y análisis de modelos existentes para estimar la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas.
3. Elección de los parámetros requeridos para el desarrollo de la nueva correlación.
4. Recolección de datos, obtenidos bajo condiciones de ensayo debidamente normalizadas, en relación con el coeficiente de permeabilidad y con las propiedades de las mezclas asfálticas compactadas en el terreno.

5. Desarrollo de la ecuación de permeabilidad.
Verificación de la ecuación.

FACTORES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS QUE INCIDEN SOBRE SU PERMEABILIDAD

La revisión de la literatura permite inferir que son varios los factores asociados con las mezclas de concreto asfáltico que afectan su permeabilidad. Los resultados de todas las investigaciones coinciden en el hecho de que el contenido total de vacíos con aire de la mezcla es el factor de mayor incidencia potencial (3, 4, 5, 6, 9, 12, 13). Hudson y Davis (14) concluyeron que la permeabilidad dependía no sólo del porcentaje de vacíos con aire, sino también del tamaño de éstos. En otros estudios se indica que la granulometría de los agregados, su forma y su textura ejercen influencia sobre la manera como se interconectan los vacíos con aire dentro de la mezcla y, en consecuencia, sobre la permeabilidad (15). Igualmente, hay documentos que muestran la incidencia del espesor de la capa compactada y del tamaño máximo nominal del agregado, así como de la relación entre ellos sobre la permeabilidad (11, 13, 16, 17, 18, 19). Factores asociados con los equipos y el patrón de compactación también se han estudiado (5, 20, 21), aunque es evidente que ellos están ligados con los vacíos con aire finalmente obtenidos.

Vacíos con aire

Constituyen el factor potencialmente más incidente sobre la permeabilidad de una mezcla densa. A medida que éstos aumentan, la permeabilidad también lo hace. Massad et al. (22) reportan que pasar los vacíos con aire de 4 a 8% implica aumentar del orden de 18 veces el coeficiente de permeabilidad. La figura 1 ilustra una relación típica entre estos dos parámetros (11).

Cuando el volumen de vacíos con aire supera un valor crítico, la mezcla se hace muy permeable al agua y al aire. El primero produce los deterioros típicos asociados con la humedad, mientras que el aire genera oxidación y endurecimiento del ligante, haciendo la mezcla más propensa al agrietamiento prematuro.

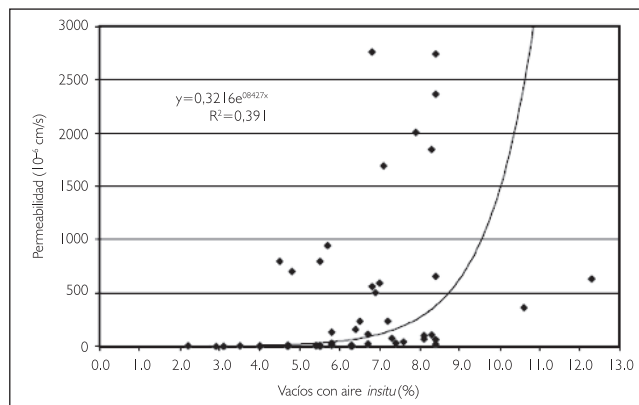


Figura 1. Relación típica entre los vacíos con aire y la permeabilidad de una mezcla densa compactada (11).

Factores asociados con los agregados pétreos

La granulometría es, quizás, la característica de los agregados que más incide sobre las propiedades y el comportamiento de una mezcla asfáltica densa. La distribución de los tamaños de las partículas influye prácticamente en todas las propiedades importantes de la mezcla, entre ellas la composición volumétrica, la permeabilidad, la estabilidad, la rigidez, la resistencia a la fatiga, la trabajabilidad y la resistencia al deterioro por acción del agua (23).

La forma de la curva granulométrica cumple un papel importante en la determinación del tamaño y la continuidad de los vacíos con aire en la mezcla compactada. Las gradaciones gruesas contienen una mayor cantidad de partículas de agregado grueso, lo que se traduce en un mayor volumen de vacíos con aire y en un mayor potencial para su interconexión. Referencias sobre ello aparecen tanto en publicaciones muy antiguas (3) como en otras recientes (24).

La permeabilidad presenta también una relación directa con el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado. A medida que éste aumenta, también lo hace el volumen de los vacíos con aire interconectados y, consecuentemente, el potencial de una alta permeabilidad de la mezcla (11). Por lo tanto, mientras mayor sea el TMN, es de esperar que el nivel de vacíos con aire a partir del cual la mezcla se hace excesivamente permeable sea menor. En otras palabras, para un contenido dado de vacíos con aire, las mezclas con agregados con mayor TMN serán más permeables. La forma típica como se produce esta variación se muestra en la figura 2. En ella se puede apreciar, sin embargo, que el efecto

sólo es verdaderamente marcado cuando los tamaños máximos nominales son mayores, pues las mezclas con los TMN más bajos (9.5 y 12.5 mm), que son las más empleadas en las mezclas densas, presentan características de permeabilidad muy similares.

Al estudiar mezclas del tipo Superpave para un determinado tamaño máximo nominal (TMN), Choubane et al. (9) encontraron que aquéllas cuya granulometría pasaba por encima de la línea de máxima densidad y de la zona restringida tendían a ser menos permeables que las mezclas gruesas, a igual cantidad de vacíos con aire.

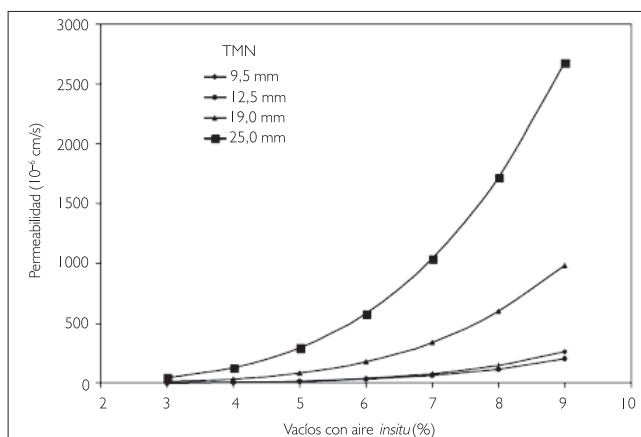


Figura 2. Efecto de los vacíos con aire sobre la permeabilidad en mezclas con distintos tamaños máximos nominales (10).

La forma de las partículas del agregado pétreo afecta el modo como éstas se acomodan dentro de la mezcla compactada. Aquéllas cuya forma tiende a la cúbica no se empaquetan de una manera tan apretada como lo hacen las aplanadas. Bajo la acción del tránsito, las partículas aplanadas tienden a orientarse horizontalmente unas sobre otras, dejando poco espacio entre ellas. Por esta razón, las especificaciones de construcción limitan el grado de aplanamiento de las partículas, con el fin de asegurar la formación de un volumen mínimo de vacíos en los agregados minerales (VAM) que permita alojar una cantidad suficiente de asfalto que prevenga su envejecimiento prematuro y que contribuya adecuadamente a la resistencia a la fatiga de la mezcla, a la vez que brinde suficientes vacíos con aire que prevengan afloramientos de ligante y deformaciones permanentes de la mezcla compactada.

La manera como se acomodan las partículas del agregado con una determinada gradación depende también

de su textura. Las texturas rugosas generan una mayor fricción entre las partículas y, consecuentemente, una mayor estabilidad de la mezcla compactada. Las caras de los fragmentos obtenidos por trituración tienen mayor rugosidad que las de los agregados rodados. El efecto práctico de ello es que, bajo un determinado esfuerzo de compactación y para el respectivo contenido óptimo de asfalto, los vacíos en los agregados minerales (VAM) y los vacíos con aire (VA) de una mezcla elaborada con mayor cantidad de agregados triturados son mayores. La tabla 1 presenta los resultados pertinentes de un concreto asfáltico ensayado durante una investigación realizada por Ruiz et al. (25), manteniendo constante la granulometría y reemplazando el pétreo de trituración por uno natural de la misma procedencia, con textura lisa.

Tabla 1
Efecto de la trituración del agregado sobre los vacíos de la mezcla (25)

Naturaleza del agregado	Propiedades de la mezcla óptima				
	Asfalto (%)	VAM (%)	VA (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
Triturado	5,00	15,3	3,5	1285	4,2
Redondeado	3,75	12,2	3,2	511	2,1

Incidencia del ligante bituminoso

El asfalto afecta la compactación de la mezcla a través de su viscosidad. A mayor viscosidad del ligante, es de esperar que sea mayor la resistencia de la mezcla a la compactación. En consecuencia, se requerirá una mayor energía para alcanzar un determinado contenido de vacíos con aire. Por otra parte, las mezclas con bajo contenido de asfalto son más difíciles de compactar, debido a la carencia de lubricación. Así mismo, un bajo contenido de ligante trae como consecuencia una película muy delgada de éste sobre las partículas pétreas, cuyos efectos probables son su envejecimiento temprano y la posterior desintegración de la mezcla.

Método de compactación de la mezcla

El método de compactación repercute en la orientación que toman las partículas, a medida que éstas se alejan de la forma cúbica. La orientación alcanzada por las parti-

culas al ser compactadas en la vía suele ser diferente de la obtenida en el laboratorio empleando equipos como el de impacto Marshall, el compactador de amasado Hveem o el giratorio Superpave.

En una investigación realizada por el National Center for Asphalt Technology (NCAT) sobre un limitado número de muestras, se encontró una correlación aceptable entre la densidad y la permeabilidad de laboratorio para núcleos tomados del terreno y probetas elaboradas en el compactador giratorio Superpave, lo cual permitió concluir que estas últimas tenían el potencial para ser usadas con el fin de estimar el nivel necesario de compactación en el campo para producir una mezcla impermeable (10). Esta conclusión es opuesta a la efectuado en un estudio efectuado en la Florida en relación con la permeabilidad al agua de las mezclas Superpave de gradación gruesa (9), según la cual la estructura de los vacíos con aire de las probetas elaboradas en el compactador giratorio no era comparable con la hallada en probetas extraídas del terreno al mismo nivel de vacíos con aire.

Ante la duda que genera esta disparidad, parece prudente tener siempre en consideración el tipo de compactación al cual se somete la mezcla en el instante de estimar su permeabilidad en relación con su contenido de vacíos con aire.

Espesor de la capa compactada

Se suele considerar que el potencial de permeabilidad disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa asfáltica. Ello se atribuye a dos razones (26): la primera, que las mezclas espesas son más fáciles de compactar debido a que retienen mejor el calor y permiten que el esqueleto granular se acomode de manera más apropiada; la segunda, que a medida que la capa tiene mayor espesor, disminuye la posibilidad de que los vacíos se interconecten en una longitud suficiente para permitir el flujo de agua.

Sin embargo, para que este principio general se cumpla, es necesario que exista una apropiada relación entre el espesor de la capa compactada (h) y el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado utilizado en la mezcla. Para un determinado TMN, se requiere que la capa tenga el espesor suficiente para que, al compactarla, las partículas del agregado se puedan orientar de modo que se obtenga la densidad deseada, previniendo una

permeabilidad excesiva. De acuerdo con estudios recientes (13), se sugiere que, para favorecer la compactación, la relación h/TMN sea cuando menos de tres (3) para las mezclas de gradación fina y no menor de cuatro (4) para las de gradación gruesa. Aunque es posible utilizar relaciones inferiores, se deberá tener presente que se requerirá una mayor energía de compactación para lograr el nivel de densidad exigido, a través del cual se controla en la práctica el contenido de vacíos con aire de la capa.

FACTORES RELACIONADOS CON EL ENSAYO DE PERMEABILIDAD

En los estudios realizados en relación con la permeabilidad de las mezclas asfálticas compactadas se han empleado diversos equipos y procedimientos de ensayo. En la mayoría de los casos, se ha utilizado el agua como fluido y el coeficiente de permeabilidad se ha determinado con la fórmula de Darcy. Su empleo implica suponer que la saturación de las muestras es total antes de comenzar el ensayo y que el flujo de agua es unidireccional y laminar durante el desarrollo de la prueba (27).

Los ensayos citados en la literatura incluyen tanto pruebas de laboratorio como de campo. En la mayoría de las pruebas de laboratorio se han utilizado permeámetros de carga variable, de empleo más sencillo y rápido que los de carga constante, y se ha usado el agua como fluido (12, 13, 27, 28, 29, 30). A la fecha no existe en los Estados Unidos de América un protocolo nacional normalizado en relación con el equipo y el procedimiento de ensayo; sin embargo, el método de prueba de mayor raigambre en los años recientes ha sido el del permeámetro Karol-Warner, adoptado provisionalmente por la ASTM bajo el estándar PS 129-01, tanto para ensayar probetas compactadas en el laboratorio como núcleos extraídos de pavimentos construidos. Aunque la ASTM retiró la norma en 2003, ella es equivalente a la vigente en algunos estados norteamericanos (31, 32, 33). En cuanto a las medidas de campo, éstas se han realizado empleando tanto dispositivos que utilizan aire (29, 34, 35, 36, 37) como agua (5, 10, 13, 16, 28, 29, 37, 38).

Existe una diferencia significativa entre los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos de laboratorio y los de campo, aun usando los mismos principios de

medición (39). La causa fundamental de ello es que el mecanismo de percolación del agua es distinto en los dos casos. En el laboratorio, la ley de Darcy resulta aplicable debido a que se puede garantizar el flujo unidimensional. En el terreno, por el contrario, la forma de determinarla ha de ser distinta, debido al carácter bidireccional del flujo.

Otros factores que hacen diferentes los resultados de campo y de laboratorio son el grado de saturación de la mezcla en el instante de la prueba, el tipo de flujo y las condiciones de borde de la misma. Aunque en un trabajo del NCAIT se obtuvieron valores de permeabilidad similares en el campo y en el laboratorio sobre mezclas elaboradas con agregados con TMN no mayor de 12,5 milímetros (11), en la inmensa mayoría de los estudios se ha concluido que los valores de campo son consistentemente mayores que los obtenidos en el laboratorio y tanto mayores cuanto más permeable es la mezcla (39). Una explicación plausible para esta diferencia es que mientras en el laboratorio el flujo está restringido a la dirección vertical, en el ensayo de campo se dispersa horizontalmente, y tanto más cuanto más gruesa sea la gradación y mayor el TMN, por la mayor posibilidad que se presenta de interconexión de vacíos.

La medida de la permeabilidad en el terreno presenta, además, algunos problemas de tipo práctico (10): el grado de saturación de la mezcla no puede ser establecido con exactitud; el espesor de mezcla involucrado en la prueba de campo sólo puede ser conocido con precisión si se toman probetas en los sitios de ensayo, mientras que en las pruebas del laboratorio el espesor de la muestra siempre se conoce; en el ensayo *in situ* se debe estimar el área efectiva de pavimento a través de la cual fluye el agua, pues, como ya se mencionó, el flujo se dispersa horizontalmente más allá de los límites del recipiente de alimentación de agua del permeámetro. Igualmente, sin algún tipo de prueba destructiva, no es posible establecer si el agua fluye solamente a través de la capa que se ensaya o si se extiende hacia las capas inferiores. Por último, en el terreno no es posible determinar si el flujo a través del pavimento es laminar o turbulento, lo que genera dudas para la aplicación de la fórmula de Darcy.

En los últimos años se han realizado estudios para establecer la permeabilidad de los pavimentos asfálticos mediante modelos numéricos a partir de imágenes tridimensionales de las microestructuras de las mezclas, cap-

tadas mediante rayos X de tomografía computarizada. Estos modelos han permitido determinar el coeficiente de permeabilidad en las direcciones vertical y horizontal, teniendo en cuenta la anisotropía y la distribución heterogénea que tienen los vacíos con aire en las mezclas (40, 41). Los resultados indican que la permeabilidad en sentido horizontal es mucho mayor que en sentido vertical. A pesar del avance que supone este procedimiento, a la fecha existen muchas dificultades de tipo práctico para su utilización habitual.

ECUACIONES PARA DETERMINAR DE MANERA INDIRECTA LA PERMEABILIDAD DE LAS MEZCLAS DENSAS COMPACTADAS

Dada la heterogeneidad y la naturaleza anisotrópica de las mezclas asfálticas, no resulta fácil establecer una relación precisa entre la permeabilidad y las variables que la afectan. A pesar de estas limitaciones, diferentes investigadores han realizado análisis estadísticos para desarrollar modelos que permitan predecir el coeficiente de permeabilidad de las mezclas asfálticas densas. Algunos de ellos se presentan a continuación.

Ecuación de Shklarsky y Kimchi (4)

A partir de los resultados de ensayos efectuados con mezclas del tipo arena asfalto, empleando un permeámetro de laboratorio de concepción propia, estos investigadores establecieron la siguiente relación general:

$$k = a \times (VA)^m \quad (1)$$

Siendo:

k : coeficiente de permeabilidad, cm/s.

VA : vacíos con aire, %

Las constantes a y m dependían de la granulometría y era necesario establecerlas sobre cada mezcla particular. Para las arenas asfalto ensayadas por los autores, $a=10^{-16}$ y $m=10$.

Ecuación del Arkansas Department of Transportation (DOT) (17)

En 1998, el Departamento de Transporte de Arkansas llevó a cabo un estudio luego de que algunas mezclas

del tipo Superpave presentaran signos preocupantes de permeabilidad tras un mes de agosto de 1997 anormalmente lluvioso. El análisis de los resultados de los ensayos realizados sobre las mezclas de 16 proyectos dio lugar a la siguiente ecuación, cuyo coeficiente de correlación (R) fue 0,748:

$$k=(1,38 \times 10^{-7}) \times (3,92^{VA}) \times (0,61^h) \quad (2)$$

Donde:

k : coeficiente de permeabilidad, cm/s

VA : vacíos con aire, %

h : espesor de la capa asfáltica, cm

Ecuaciones de Cooley, Prowell y Brown (10)

Estudiando en 2002 algunas mezclas gruesas Superpave, estos investigadores del NCAT elaboraron regresiones lineales múltiples para relacionar la permeabilidad, medida tanto *in situ* como en el laboratorio, con las variables que consideraron de mayor incidencia sobre ésta.

Las determinaciones de permeabilidad *in situ* se realizaron con un permeámetro concebido por el NCAT, mientras las de laboratorio se hicieron conforme a la norma ASTM PS 129-01. Las ecuaciones obtenidas, con coeficientes de determinación (R^2) de 0,66 y 0,51, respectivamente, fueron las siguientes:

$$\ln k (insitu) = -1,787 + 0,592 \times (VA) + 0,1966 \times (TMN) - 0,23 \times (h/TMN) \quad (3)$$

$$\ln k (\text{laboratorio}) = -5,335 + 4,61 \times \ln(VA) + 0,138 \times (TMN) - 0,24 \times (h) \quad (4)$$

Siendo:

\ln : logaritmo natural.

k : coeficiente de permeabilidad, 10^{-5} cm/s.

VA : vacíos con aire, %.

TMN : tamaño máximo nominal del agregado, mm.

h : espesor de la capa asfáltica, mm.

El tamaño máximo nominal (TMN) al cual se refieren estas ecuaciones corresponde a la definición de Superpave, es decir, el tamaño de abertura del tamiz inmediatamente superior al que retiene más de 10% acumulado del agregado.

Ecuación de Hainin, Cooley & Prowell (30)

En un estudio presentado a comienzos de 2003, estos investigadores encontraron la siguiente ecuación de regresión, con un coeficiente de determinación $R^2=0,76$, tras ensayar 354 probetas extraídas de 42 proyectos en ejecución con mezclas Superpave de gradaciones gruesa y fina. Los vacíos con aire de las probetas se calcularon a partir de la densidad determinada con el dispositivo Corelock (norma ASTM D6752). La permeabilidad se estableció de acuerdo con la norma provisional ASTM PS129-01.

$$\ln k = -19,2 + 5,96 \times \ln(VA) + 1,47 \times (RAG) + 0,078 \times P_{12,5} + 0,0485 \times P_{1,18} - 0,00928 \times N_{DIS} - 0,0124(h) \quad (5)$$

Donde:

\ln : logaritmo natural.

k : coeficiente de permeabilidad, cm/s.

VA : vacíos con aire, %.

RAG : relación de agregado grueso.

$P_{12,5}$: porcentaje que pasa el tamiz de 12,5 mm (1/2").

$P_{1,18}$: porcentaje que pasa el tamiz de 1,18 mm (N.º 20).

N_{DIS} : número de giros de diseño de la mezcla (método Superpave).

h : espesor de la capa asfáltica, mm

La relación de agregado grueso (RAG) incluida en esta ecuación, fue definida por los autores como el porcentaje de agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (N.º 4) dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz.

Ecuación del Louisiana Transportation Research Center (LTRC) (42)

En 2005, investigadores del LTRC presentaron varios modelos de regresión estadística para predecir la permeabilidad a partir de los resultados de pruebas efectuadas sobre probetas extraídas de diez (10) pavimentos construidos en Louisiana con mezclas del tipo Superpave. Los ensayos de permeabilidad se realizaron en el laboratorio con un permeámetro de carga variable, acorde con la norma ASTM PS 129-01. La ecuación obtenida para el caso en que los vacíos con aire se determi-

naron a partir de la densidad medida con el método de las probetas saturadas y superficialmente secas (norma ASTM D2726) fue la que se presenta a continuación. Su coeficiente de determinación (R^2) fue 0,73:

$$k=10^{-4} \left[\begin{array}{l} 23,8(VA)^2 - 147,8(VA) \\ + 114,5P_{0,075} - 49,1P_{0,3} \\ + 65,5P_{0,6} - 48,7P_{2,36} + 5,4P_{12,5} \end{array} \right] \quad (6)$$

Donde:

k : coeficiente de permeabilidad, mm/s.

VA : vacíos con aire, %.

$P_{0,075}$: porcentaje que pasa el tamiz de 0,075 mm (N.º 200).

$P_{0,3}$: porcentaje que pasa el tamiz de 0,3 mm (N.º 50).

$P_{0,6}$: porcentaje que pasa el tamiz de 0,6 mm (N.º 30).

$P_{2,36}$: porcentaje que pasa el tamiz de 2,36 mm (N.º 8).

$P_{12,5}$: porcentaje que pasa el tamiz de 12,5 mm (1/2").

Ecuación obtenida por Brown, Hainin, Cooley & Hurley (13)

Como parte del proyecto 9-27 del NCHRP, un grupo de trabajo del NCAT desarrolló en 2004 varias regresiones lineales múltiples combinando diversos factores de las mezclas, incidentes sobre la permeabilidad. Las regresiones se hicieron sobre una muestra de 226 probetas extraídas de pavimentos en servicio, ensayadas todas ellas en el laboratorio con un permeámetro de carga variable ajustado a la norma provisional ASTM PS 129-01. Los vacíos con aire de las probetas fueron calculados a partir de la densidad determinada con el dispositivo Corelock (norma de ensayo ASTM D6752).

Los resultados de las regresiones llevaron al grupo a recomendar la siguiente expresión como la más representativa, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,722 y un coeficiente de Mallows (C_p) igual a 3,1:

$$\ln k = -2,20 + 6,75 \times \ln(VA) + 0,316 \times (RAG) - 3,05 \times \ln(VAM) \quad (7)$$

Donde:

\ln : logaritmo natural.

k : coeficiente de permeabilidad, 10^{-5} cm/s.

VA : vacíos con aire, %.

RAG : relación de agregado grueso, %.

VAM : vacíos en los agregados minerales de las probetas compactadas, %.

En desarrollo de esta expresión, los autores definieron la relación de agregado grueso (RAG) como el porcentaje retenido en un tamiz tres tamaños más pequeño (dentro de la serie normal de tamices usados para controlar la granulometría de los agregados de las mezclas asfálticas) que el correspondiente al TMN, dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz. De acuerdo con esta definición, los tamaños de las aberturas de los tamices asociados con los TMN de 19,5, 12,5 y 9,5 mm fueron 4,75, 2,36 y 1,18 mm, respectivamente.

Ecuación de Masad, Al-Omari y Lytton (44)

La fórmula de Kozeny-Karman ha sido empleada desde hace mucho tiempo para estimar la permeabilidad de los materiales granulares. Algunos investigadores la han utilizado también como base para obtener aproximaciones de la permeabilidad de las mezclas asfálticas, a partir de sus propiedades volumétricas y de la granulometría y de la superficie específica de los agregados. En 2006, Masad et al. (44), investigadores del Instituto de Transporte de Texas, desarrollaron la siguiente expresión a partir de una adaptación de dicha fórmula:

$$K = \frac{\bar{C}n^3}{(1-n)^2} \left[D_s \left(1 + \frac{G_{sb}(P_b - P_{ba}(1 - P_b))}{G_b(1 - P_b)} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \frac{\gamma}{\mu} \quad (8)$$

Donde:

k : coeficiente de permeabilidad.

\bar{C} : coeficiente empírico de calibración.

n : vacíos con aire en la mezcla.

D_s : tamaño promedio de partícula.

G_b : gravedad específica del asfalto.

P_{ba} : proporción de asfalto absorbido por el agregado (tanto por uno).

P_b : proporción de asfalto respecto del peso total de la mezcla (tanto por uno).

G_{sb} : gravedad específica del agregado.

γ : peso unitario del agua.

μ : viscosidad del agua.

Se puede apreciar que, además de los factores típicos de vacíos, granulometría y gravedades específicas, la fórmula incluye un coeficiente de calibración que depende del tipo de ensayo utilizado y que intenta con-

siderar, además, las dificultades existentes para asegurar la saturación de la probeta y las pérdidas alrededor de su circunferencia, así como las diferencias que existen entre las diversas pruebas para registrar el gradiente hidráulico y la velocidad del flujo de agua. Ello obliga, en la práctica, a determinar dicho coeficiente para cada caso particular.

Análisis general de las ecuaciones

A pesar de las diferencias que se presentan en cuanto a los tipos de ensayos de permeabilidad ejecutados y a las variables independientes analizadas, las ecuaciones reseñadas permiten establecer la presencia de algunos factores y tendencias determinantes.

Ante todo, es evidente que la permeabilidad es directamente proporcional al contenido total de vacíos con aire. También lo es a la relación de agregado grueso; en otras palabras, cuanto más gruesa sea la gradación, es de esperar que los vacíos con aire individuales sean mayores, lo que genera una probabilidad más alta de que se interconecten. Igualmente, se aprecia que la permeabilidad aumenta al disminuir el espesor de mezcla involucrado y también al incrementar el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado pétreo. Por último, una de las ecuaciones da a entender que la permeabilidad aumenta al decrecer los VAM (13), lo que los autores interpretan con el argumento de que menores valores de VAM generan un menor espacio para el cemento asfáltico en la mezcla, lo que se traduce en un mayor potencial de interconexión de los vacíos con aire.

REFERENCIAS

- Gierhart, D. (2010, June 18th). *Correcting permeability in dense-graded HMA mixes*. Asphalt Institute.
- Asphalt Institute (1995). *Mix Design Methods. Manual Series*, N.º 2, 6th ed. Lexington, Ky.
- McLaughlin, J.F. & Goetz, W.H. (1955). Permeability, Void Content and Durability of Bituminous Concrete. *HRB Proceedings*, vol. 34, pp. 274-286.
- Shklarsky, E. & Kimchi, A. (1962). Influence of Voids, Bitumen and Filler Content on Permeability of Sand-Asphalt Mixtures. *HRB Bulletin*, 358. Washington, D.C., pp. 1-11.
- Zube, E. (1962). Compaction Studies of Asphalt Concrete Pavements as Related to the Water Permeability Test. *HRB Bulletin*, 358. Washington, D.C., pp. 12-37.
- Brown, E.R., Collins, R. & Brownfield, J.R. (1989). Investigation of Segregation of Asphalt Mixtures in the State of Georgia. *Transportation Research Record*, 1217. Washington, D.C.: National Research Council.
- Gotolski, W.H., Roberts, J.M., Smith, R.W. & Ciesielski, C.A. (1972). Permeance as a Mix Design Criterion for Asphaltic Concrete Pavements. *Research Project*, 68-1. Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation.
- Maupin Jr., G.W. (2000). Asphalt Permeability Testing in Virginia. Presented at the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Choubane, B., Page, G.C. & Musselman, J.A. (1997, July). Investigation of Water Permeability of Coarse Graded Superpave Pavements. *Research Report*, FL/DOT/SMO/97-416. Florida DOT.
- Cooley Jr., L.A., Prowell, B.D. & Brown, E.R. (2002, July). Issues Pertaining to the Permeability Characteristics of Coarse-Graded Superpave Mixes. *NCAT Report*, N.º 2002-06. Auburn, AL 36830: National Center for Asphalt Technology.
- Mallick, R.B., Cooley Jr., L.A., Teto, M.R., Bradbury, R.L. & Peabody, D. (2003, June). An Evaluation of Factors Affecting Permeability of Superpave Designed Pavements. *NCAT Report*, N.º 03-02. Auburn, AL 36830: Auburn University, National Center for Asphalt Technology.
- Maupin Jr., G.W. (2000, June). Investigation of Test Methods, Pavements, and Laboratory Design Related to Asphalt Permeability. *Report VTRC 00-R24*. Charlottesville, Virginia: Virginia Transportation Research Council.
- Brown, E.R., Hainin, M.R., Cooley Jr., L.A. & Hurley, G. (2004, September). Relationships of HMA In-Place Air Voids, Lift Thickness, and Permeability. *NCHRP Web Document 68* (Project 9-27). Auburn, Alabama: Auburn University, National Center for Asphalt Technology.
- Hudson, S.B. & Davis, R.L. (1965). Relationship of Aggregate Voidage to Gradation. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 34.
- Ford, M.C. & McWilliams, C.E. (1988). *Asphalt Mix Permeability*. Fayetteville, AR: University of Arkansas.
- Cooley Jr., L.A., Brown, E.R. & Maghsoodloo, S. (2001, September). Development of Critical Field Permeability and Pavement Density Values for Coarse-Graded Superpave Pavements. *NCAT Report*, 01-03. Auburn AL 36830: Auburn University, National Center for Asphalt Technology Auburn University.
- Westerman, J.R. (1998, January 21). AHTD's Experience with Superpave Pavement Permeability. Little Rock, Arkansas: Arkansas Superpave Symposium.
- Musselman, J.A., Choubane, B., Page, G.C. & Upshaw, P.B. (2006). *Superpave Field Implementation: Florida's Early Experience*. Gainesville, FL 32609: Florida Dept. of Transportation, State Materials Office, N.E. Waldo Road.
- Mohammad, L.N., Herath, A. & Huang, B. (2003). *Evaluation of Permeability of Superpave Asphalt Mixtures*. TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM.
- Cechetini, J.A. (1974). *Vibratory Compaction of Asphalt Concrete Pavements. Proceedings*, vol. 43. Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 384-408.
- Abd El Halim, O. & Abdelzaher, M. (2006). *Asphalt Multi-Integrated Rollers and Steel Drum Compactors: Evaluating Effect of Compaction on Permeability of Asphalt Pavements*. Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering, Transportation Research Record, Issue 1967, pp. 173-180.
- Massad, E., Al-Omari, A. & Lytton, R. (2006). *Simple method for predicting laboratory and field permeability of hot-mix asphalt*. Washington, D.C.: Transportation Research Record N.º 1970, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 55-63.
- Brown, E.R., Decker, D. Mallick, R. & Bukowski, J. (1999). Superpave construction issues and early performance evaluation.

- Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 68, pp. 613-623.
24. Waddah, S.A., Obaidat, M.T. & Abu-Sa'da, N.M. (1998, May). Influence of aggregate type and gradation on voids of asphalt concrete pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, N.º 2. Reston, Virginia, pp. 76-85.
25. Ruiz, C., Rivara de Ronchi, Y. & Llano, O.M. (1997, mayo). Sobre la estructura granular de las mezclas asfálticas convencionales. Segunda parte. Vigésima Reunión del Asfalto. Buenos Aires: Comisión Permanente del Asfalto, pp. 45-76.
26. Khosla, N.P. & Sadasivam, S. (2005, February). *Determination of Optimum Gradation for Resistance to Permeability, Rutting and Fatigue Cracking*. Report N.º FHWA/NC/2004-12. North Carolina State University, Department of Civil Engineering.
27. Gogula, A.K., Hossain, M. & Romanoschi, S.A. (2004, November). *A Study of Factors Affecting the Permeability of Superpave Mixtures in Kansas*. Report N.º K-TRAN: KSU-00-02. Manhattan, Kansas: Kansas State University, Department of Civil Engineering.
28. Prowell, B.D. (2001, October). *Investigation of Pavement Permeability: Old Bridge Road*. Report N.º VTRC 02-TAR5. Charlottesville, Virginia: Virginia Transportation Research Council.
29. Russell, J.S., Bahia, H.U., Kanitpong, K., Schmitt, R. & Croveti, J. (2005, April). *Effect of Pavement Thickness on Superpave Mix Permeability and Density*. WisDOT Highway Research Study 0092-02-14. University of Wisconsin.
30. Hainin, M.R., Cooley Jr., L.A. & Prowell, B.D. (2003, January). *An Investigation of Factors Influencing Permeability of Superpave Mixes*. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board.
31. Florida Department of Transportation (2000, September, 1.º). *Florida Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures - Designation: FM 5-565*. Revised: January 26, 2006.
32. Virginia Department of Transportation (2005, October 6). *Virginia Test Method - 120 Method of Test for Measurement of Permeability of Bituminous Paving Mixtures Using a Flexible Wall Permeameter - (Asphalt Lab)*.
33. Oklahoma Department of Transportation (2007). *OHD L-44 Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Paving Mixtures*. Revised 9/24/07.
34. James, J.M. (1988, September). *Asphalt Mix Permeability, Final Report, TRC-82, FHWA/AR-88/003*. Arkansas State Highway and Transportation Department.
35. Kari, W.J. & Santucci, L.E. (1963). Control of Asphalt Concrete Construction by the Air Permeability Test. *Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 32.
36. Allen, D.L., Schultz Jr., D. & Fleckenstein, L.J. (2001, July). *Development and Proposed Implementation of a Field Permeability Test for Asphalt Concrete*. Research Report KTC-01-19/SPR216-00-1F. Lexington, Kentucky: Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, College of Engineer (revised June, 2003).
37. Cooley Jr., L.A. (1999, February). Permeability of Superpave Mixtures: Evaluation of Field Permeameters. *NCAT Report*, N.º 99-1. Alabama: National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
38. Cooley Jr., L.A. & Brown, E.R. (2000). *Selection and Evaluation of a Field Permeability Device for Asphalt Pavements*. Transportation Research Record 1723.
39. Gogula, A.K., Hossain, M., Romanoschi, S. & Fager, G.A. (2003, August). *Correlation between the Laboratory and Field Permeability Values for the Superpave Pavements*. Kansas State University and Kansas Department of Transportation. Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Ames, Iowa.
40. Al Omari, A.M. (2004, December). *Analysis of HMA Permeability through Microstructure Characterization and Simulation of Fluid Flow in X-Ray CT Images*. Texas A&M University.
41. Kutay, M.E., Wydilek, A.H., Masad, E. & Harman, T. (2007, March). Computational and Experimental Evaluation of Hydraulic Conductivity Anisotropy in Hot-Mix Asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 8, N.º 1, pp 29-43.
42. Mohammad, L.N., Herath, A., Wu, Z. & Cooper, S. (2005). *Factors Influencing the Permeability of Hot-Mix Asphalt Mixtures*. Shreveport, Louisiana: Louisiana Transportation Research Center, Louisiana Asphalt Technology Conference, February 23-24.
43. Hainin, M.R., Cooley Jr., L.A. & Prowell, B.D. (2003). *An Investigation of Factors Influencing Permeability of Superpave Mixes*. National Center for Asphalt Technology, TRB 2003 Annual Meeting.
44. Masad, E., Al-Omari, A. & Lytton, R.L. (2006). *Simple Method for Predicting Laboratory and Field Permeability of Hot-Mix Asphalt*. Washington D.C.: Transportation Research Record, N.º 1970, pp. 55-63.

Concepción de un circuito magnético para motores de alta eficiencia utilizando acero de grano orientado

Design of a magnetic circuit for high efficiency motors using grain oriented steel

SAMUEL FERNANDO LÓPEZ

Ing., M.Sc., Ph.D. Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Artois.

Experto técnico en ArcelorMittal Dunkerque (Francia).

samuel.lopez@arcelormittal.com

Recibido: 22/09/2011 Aceptado: 15/10/2011

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

Resumen

En este artículo se presenta una parte de los resultados de una investigación realizada sobre el desarrollo de un circuito magnético para motores eléctricos de alta eficiencia utilizando acero de grano orientado. Es una nueva aplicación para este tipo de acero, el cual se usa casi exclusivamente para la fabricación de transformadores debido a su alta anisotropía. Desde un punto de vista técnico, la ventaja de utilizar este tipo de acero consiste en aprovechar sus características magnéticas superiores comparadas con las del acero de grano no orientado el cual se emplea para la fabricación de motores eléctricos. Gracias al uso de este tipo de circuito magnético, las pérdidas en el hierro se reducen sustancialmente y permiten un aumento de la eficiencia del motor. Los resultados presentados conciernen a los prototipos que mostraron la viabilidad del circuito magnético en cuestión.

Palabras claves: motores AC, circuitos magnéticos, pérdidas en el hierro, materiales magnéticos suaves, motores de alta eficiencia.

Abstract

This paper presents a part of the results of a research project aiming to design a magnetic circuit for high efficiency electric motors using grain oriented steel. This is a new application for this kind of steel which is almost exclusively used for the manufacture of transformers because of its high anisotropy. From a technical standpoint, the benefit of using such steel is to take advantage of its magnetic characteristics that are better than those of the nonoriented steel which is commonly used for the manufacture of electrical motors. Thanks to the use of this magnetic circuit the iron losses are reduced resulting in an increase of the motor efficiency. The results presented in this paper concern the prototypes that showed the viability of such magnetic circuit.

Keywords: AC motors, magnetic cores, iron losses, soft magnetic materials, high efficiency motors.

INTRODUCCIÓN

La reducción del consumo de energía eléctrica es un tema que cobra cada vez más importancia en el mundo, ya sea desde la óptica del desarrollo sostenible (uso de recursos no renovables) o desde el punto de vista ecológico (cambio climático). Una parte de esta reducción puede provenir del aumento de la eficiencia de los equipos utilizados en la industria.

En los países desarrollados la mayor parte de la energía se consume para alimentar motores eléctricos. La industria y los servicios son responsables del 69 y 38% del consumo total respectivamente [1]. Un motor eléctrico de 4 polos 11 kW funcionando 10 h/día con una eficiencia estándar de 87,6% durante diez años consumirá en sólo pérdidas 57 MWh. Esto representa un costo superior al precio del motor. Por otro lado, los gobiernos de diferentes países están poniendo en marcha leyes que exigen un aumento de la eficiencia de los motores eléctricos [2]. En la Unión Europea, por ejemplo, a partir de junio de 2011 y enero de 2015 todos los motores fabricados o importados deberán ser de alta eficiencia (IE2) y Premium (IE3), en ese orden (Commission Regulation (EC) N.º 640/2009), según la norma IEC-60034 [3]. Esto muestra la importancia actual de los motores de alto rendimiento [4], [5], [6].

Las pérdidas en las máquinas eléctricas se deben en parte a las pérdidas en el hierro (aproximadamente 15% [4]). El acero utilizado para la fabricación de circuitos magnéticos de motores eléctricos es, en la mayoría de los casos, acero de grano no orientado (NO). El acero de grano orientado (GO), que posee características magnéticas superiores, se usa principalmente para la fabricación de transformadores. Esto se debe a la anisotropía del acero GO, que presenta sus mejores características solamente en la dirección de laminado (DL). En las otras direcciones, el acero GO tiene características magnéticas similares o inferiores a las del NO. En las máquinas eléctricas el campo magnético es giratorio, lo que impide el uso del acero GO, ya que éste sería magnetizado en todas las direcciones. Algunos motores de alta potencia son fabricados con acero GO cortado en segmentos y ensamblado posicionando la DL en la dirección del flujo magnético (e.g. [7]). Este proceso no sería rentable en motores de mediana o baja potencia.

El estudio descrito en el presente artículo está centrado en una técnica que permite utilizar el acero GO para la fabricación de motores de mediana y baja

potencia de alto rendimiento. Primero, se presentan las características y las aplicaciones de los aceros magnéticos, seguidas de una explicación detallada del circuito magnético GO; luego, experimentos realizados y sus resultados, son presentados y finalmente se exponen las conclusiones.

Caracterización de los aceros GO y NO

Los átomos del acero magnético forman cristales cúbicos en una estructura llamada “cúbica centrada”. En el caso del acero GO, la mayoría de estos cristales son orientados en la DL (figura 1). Esta textura cristalográfica se denomina “textura de Goss”.

Las características magnéticas de las aristas de los cristales son superiores a las de las otras direcciones como se muestra en la figura siguiente (figura 2) donde se presenta la curva de magnetización de un monocristal FeSi 3.8% (hierro con 3,8% de silicio). Esta figura registra la densidad de flujo magnético máxima \hat{b} en función del campo magnético de excitación máximo \hat{h} para las tres principales direcciones. Se puede ver cómo la permeabilidad relativa μ de la arista es superior a la de la dirección transversal. La permeabilidad más baja es dada a un ángulo de 54,73° con respecto a la arista. Esto muestra por qué el campo magnético de excitación debe estar dirigido en la DL. Para más detalles sobre las características y la fabricación del acero magnético, ver [8], [9], [10], [11].

Caracterización a 50 Hz

Las características magnéticas del acero NO₅₀, NO₃₅ y GO₃₅ (tabla 1) se midieron en varias direcciones con respecto a la DL para diversos valores de \hat{b} .

Para lograrlo, se emplearon bandas de acero cortadas en diferentes direcciones α (figura 3). La caracterización se hizo usando el cuadro de Epstein con una excitación a 50Hz (método normalizado para la caracterización magnética) según la norma (IEC-60404-2 1996 [12]).

Así mismo, se presentan las pérdidas por unidad de masa P_m en función de \hat{b} y las curvas de magnetización de \hat{b} en función de \hat{h} para diferentes valores de α del GO₃₅, NO₅₀ y NO₃₅ (figura 4).

Igualmente, es posible ver la fuerte anisotropía del GO₃₅ (figura 4a)). La dirección $\alpha=0^\circ$ presenta la mejor permeabilidad y la menor cantidad de pérdidas. Las direcciones 55° y 90° presentan características menos

buenas que los dos tipos de NO. Esto confirma lo mencionado sobre la orientación de los granos en el acero GO. El ángulo 55° es muy cercano a $54,73^\circ$, que es la dirección de difícil magnetización.

Tabla 1
Aceros utilizados para la caracterización

Notación según la norma EN10107	Espesor (mm)	Tipo de acero	Denotación
M 400-50 A	0,50	NO	NO ₅₀
M 235-35 A	0,35	NO	NO ₃₅
M 140-35 S	0,35	GO	GO ₃₅

Esta fuerte anisotropía es la razón por la cual el acero GO no se emplea para aplicaciones en campo giratorio. En esas aplicaciones el campo magnético es orientado en diferentes direcciones lo que implicaría una prestación de baja calidad.

En la Figura 4 b) y c) es posible ver que, contrariamente al GO₃₅, los aceros NO₃₅ y NO₅₀ son casi isotrópicos, con una diferencia entre $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$ de $\hat{b}=0,1T$ a $\hat{b}=1000$ A/m para el NO₃₅ y de $\hat{b}=0,07$ T para el NO₅₀ [13], [14], [15], [16].

Por otro lado, se puede ver la influencia del espesor d de las láminas en P_m . Este parámetro tiene una influencia sobre todo en las pérdidas clásicas P_{cl} y en las pérdidas por exceso P_{exc} , como se muestra en la ecuación (1).

$$P_m = P_{sta} + P_{cl} + P_{exc} \quad (1)$$

$$P_m = k_1 f \hat{b}^2 + k_2 d^2 f^2 \hat{b}^2 + k_3 d^{1/2} (\hat{b} f)^{3/2}$$

Donde P_{sta} son las pérdidas estáticas o por histéresis, f es la frecuencia de excitación, y k_1 , k_2 y k_3 son constantes definidas experimentalmente [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

Es posible observar que el parámetro d tiene una influencia importante sólo en P_{cl} y P_{exc} . Este postulado se probó experimentalmente realizando una caracterización a baja frecuencia.

Aceros magnéticos y sus usos

Más adelante se presentan las principales aplicaciones de los aceros magnéticos (tabla 2). Estas aplicaciones dependen, principalmente, del espesor de las láminas y de su contenido de silicio. Así mismo, se registran las ca-

racterísticas más importantes dadas por los fabricantes: P_m a 50 Hz a $\hat{b}=1,5T$ (medidas en el cuadro de Epstein), el porcentaje de silicio y \hat{b} a 1000 A/m para el GO y a 5000 A/m para el NO. Se da el porcentaje de silicio, ya que tendrá una influencia en la resistividad del acero y, por tanto en las pérdidas. Estas son las características principales tomadas en cuenta por los diseñadores de máquinas eléctricas para escoger el tipo de acero que van a utilizar para una aplicación dada.

Los fabricantes de acero usan la norma IEC-60404-2 de 1996 [12] para la caracterización. La norma estipula que el GO debe probarse con bandas cortadas en la DL y el NO con la mitad de las bandas en la DL y la otra mitad en la dirección transversal.

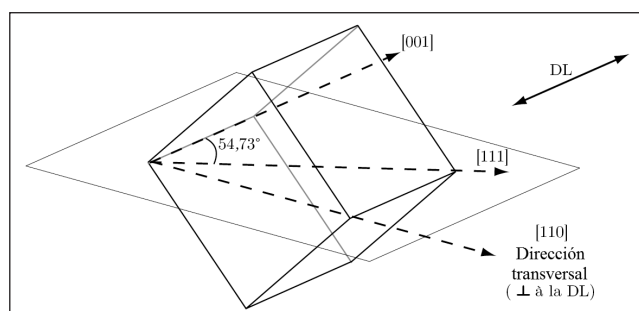


Figura 1. Orientación de los ejes de un cristal cúbico con respecto a la DL en el acero GO.

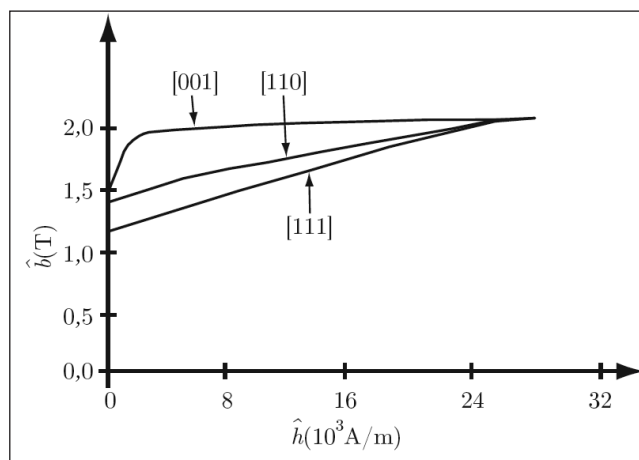


Figura 2. Curvas de magnetización de una aleación FeSi 3,8% medidas aplicando un campo magnético \hat{h} paralelamente a una de las tres principales direcciones cristalográficas [24].

Con el fin de evaluar la originalidad del proyecto, se hizo un estudio bibliográfico de patentes sobre el

GO aplicado en motores eléctricos. Posteriormente se presentan algunos ejemplos de los resultados de este estudio (figura 5), así como una lamina de GO utilizada para la fabricación de motores sincrónicos, donde la DL es orientada en la dirección de los dientes (figura 5 a)).

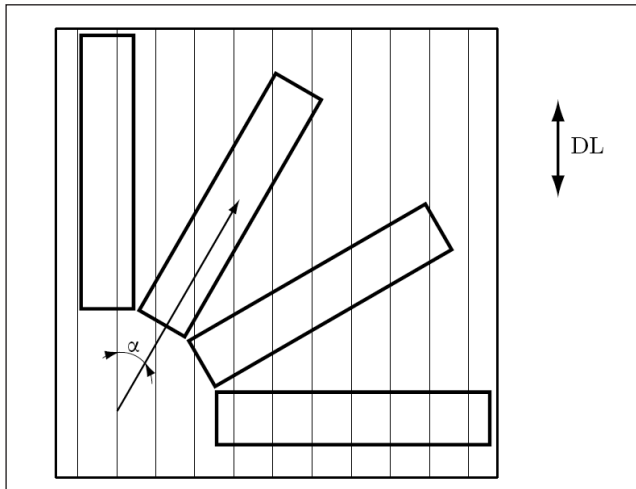


Figura 3. Esquema de corte de las bandas Epstein.

También se muestran una parte de un estator de una máquina de reluctancia variable, donde los dientes son fabricados con acero GO (figura 5 b)) muestra un circuito estatórico donde la DL del GO es posicionada en la dirección local del flujo magnético (figura 5 c)) y la estructura de un rotor de máquina sincrónica (figura 5 c)).

En las aplicaciones que utilizan el GO las láminas son cortadas de modo que se pueda posicionar la DL convenientemente. Estos procesos son muy costosos, ya que requieren un tiempo suplementario de corte y ensamblado. Por tal razón esta técnica se emplea para la fabricación de motores y alternadores de alta potencia. En ese caso se obliga a los fabricantes, de todas formas, a cortar las láminas en segmentos debido a las dimensiones de las máquinas (diámetro más grande que las dimensiones máximas de las láminas).

Tabla 2

Principales aplicaciones del acero magnético

Notación según la norma EN10107	Espesor (mm)	P_m a 1,5 T a 50 Hz (W/kg)	Contenido de silicio %	\hat{b} (1 kA/m) GO \hat{b} (5 kA/m) NO	Aplicación típica
Acero GO: características medidas en la DL.					
M 120-23 S	0,23	0,85	3,1	1,85	Transformadores de alta eficiencia
M 130-27 S	0,27	0,79	3,1	1,85	
M 140-30 S	0,30	0,92	3,1	1,85	
M 150-35 S	0,35	1,05	3,1	1,84	
Acero NO: características medidas utilizando la mitad de las bandas cortadas en la DL y la otra mitad a 90° de la DL.					
M 300-35 A	0,35	3,00	2,9	1,65	Motores de alta potencia
M 400-50 A	0,50	4,00	2,4	1,69	Transformadores pequeños
M 800-65 A	0,65	8,00	1,3	1,73	Motores de mediana y baja potencia
M 1000-65 D	0,65	10,00	-	1,76	
M 420-50 D	0,50	3,90	-	1,74	

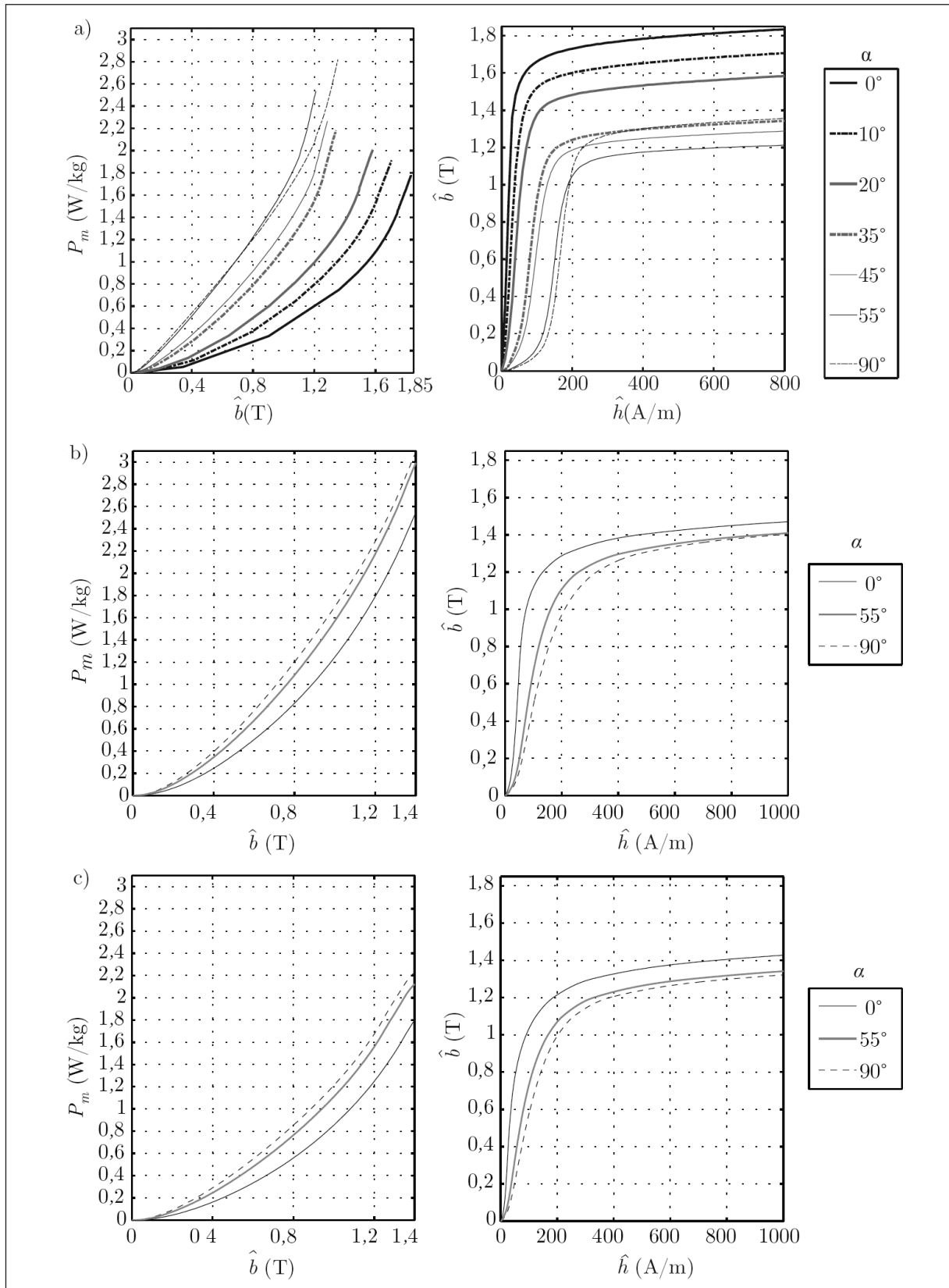


Figura 4. P_m en función de \hat{b} y \hat{b} en función de \hat{h} para diferentes valores de α de a) GO₃₅ b) NO₅₀ y c) NO₃₅.

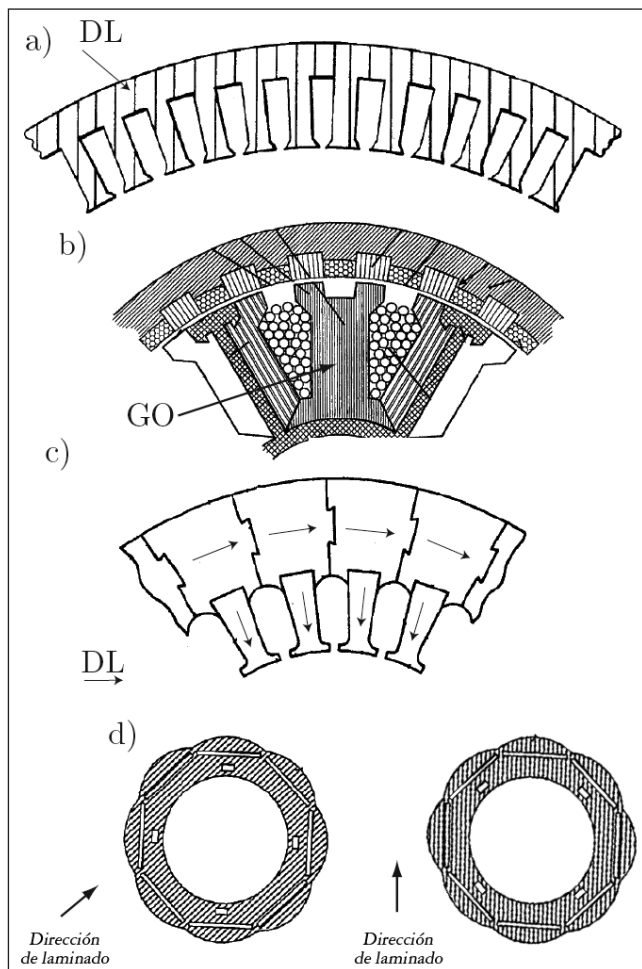


Figura 5. a) Lámina GO de una máquina sincrónica [24]. b) Diente de una máquina de reluctancia variable [25]. c) Estator de una máquina de campo giratorio [26]. d) Láminas de un rotor GO [27].

METODOLOGÍA

Se presenta una estructura especial para la fabricación de un circuito magnético estátorico en acero GO. Con el fin de verificar la viabilidad de dicho circuito, se hizo una serie de ensayos utilizando prototipos de circuitos magnéticos estátoricos. Los resultados obtenidos con dichos prototipos se emplean para analizar el funcionamiento de la estructura GO y así optimizarla.

Estator GO

Teniendo en cuenta las características del GO presentadas anteriormente, la técnica de ensamblado debe sacar provecho de las características de la DL, procurando que

las otras direcciones no afecten el desempeño del circuito. Por otro lado, hay que evitar los cortes suplementarios, ya que implicaría un costo adicional en la fabricación.

Considerando estas limitaciones, se diseñó una técnica especial de ensamblado de un circuito magnético estátorico. Su principio básico consiste en rotar cada lámina con respecto a la anterior de un ángulo constante β . La rotación es realizada alrededor del eje vertical normal al plano de las láminas \hat{z} (figura 6).

En el estator se pueden definir dos direcciones principales: la tangencial y la radial. Si se analiza la dirección tangencial del estator GO, se puede ver que el ángulo con respecto a la DL α_t (α teórico) dependerá de la posición θ (figura 7).

Si se toma en cuenta lo visto con anterioridad, es posible suponer que esta evolución tendrá una influencia muy importante en la permeabilidad y las pérdidas de dicho circuito magnético.

Por otro lado, el hecho de rotar las láminas va a permitir superponer diferentes valores de α_t . Así, para la primera lámina $\alpha_t = \theta$, para la segunda $\alpha_t = \theta + \beta$ y para la n -ésima $\alpha_t = \theta + (n - 1)\beta$. Posteriormente se presenta la evolución de α_t con respecto a θ para diferentes valores de β (figura 8). Se puede ver, por ejemplo, que en el caso de $\beta=90^\circ$ a $\theta=0^\circ$, $\alpha_t = 0^\circ$ y $\alpha_t = 90^\circ$ para la primera y la segunda lámina, respectivamente. Conociendo las características magnéticas de $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$ (figura 4 a)) es factible imaginar que la repartición del flujo magnético no será homogénea en el circuito.

Gracias a la anisotropía del GO y a la rotación de las láminas, el flujo magnético se repartirá siguiendo el principio de la minimización de la energía de una manera heterogénea en las tres dimensiones.

Con el fin de encontrar el valor de β óptimo y compararlo con un circuito magnético convencional, se hicieron varios experimentos con prototipos de circuitos magnéticos estátoricos.

Prototipos para la experimentación

Para una mejor comprensión de lo expuesto se presenta un esquema de los prototipos utilizados para la experimentación. Se trata de un circuito magnético compuesto de láminas de acero similar a un transformador circular de $b_c=5$ cm de altura. El circuito es excitado gracias a la aplicación de una tensión v_i en el devanado primario de $n_i=100$ espiras (figura 9).

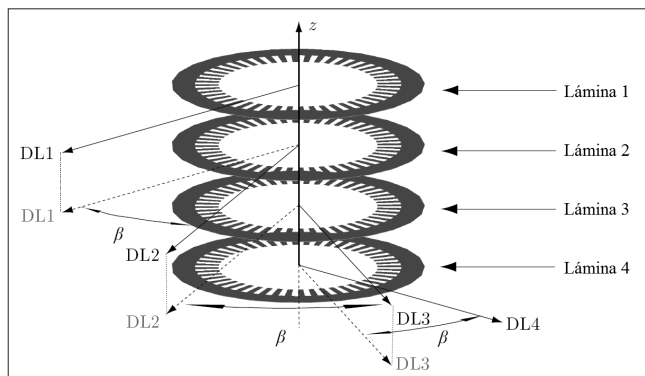


Figura 6. Principio básico de ensamblado del estator GO.

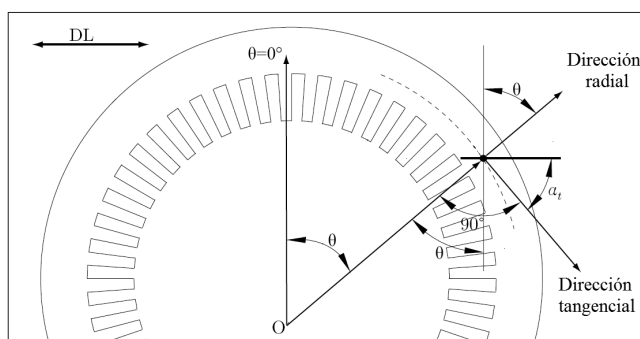


Figura 7. Evolución de α_t en el estator GO.

El bobinado secundario, de $n_2=100$ espiras, se emplea para realizar las medidas de densidad de flujo global máxima \hat{b}_g y de pérdidas en el hierro P_b , según las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$\hat{b}_g = \frac{\hat{v}_2}{2 \pi n_2 S f} \quad (2)$$

$$P_b = \frac{1}{T} \int_0^T v_2 i_1 dt \quad (3)$$

Donde \hat{v}_2 es el valor máximo de la tensión secundaria v_2 , S es la sección transversal del circuito magnético, f es la frecuencia de la excitación e i_1 es la corriente del devanado primario.

Se habla de densidad de flujo global porque el flujo magnético tenderá a concentrarse en el centro del círculo y a instaurarse en las láminas que presenten una permeabilidad más alta. Es decir, que localmente habrá partes del circuito magnético que tendrán una densidad de flujo diferente de \hat{b}_g .

La ventaja de usar el devanado secundario para la realización de las medidas es que es posible medir directamente \hat{b}_g y P_b sin la influencia de la caída de tensión en la impedancia del devanado primario. Esto implica que las medidas se hagan como en el caso de los ensayos en vacío de un transformador monofásico.

Diferentes prototipos se ensamblaron utilizando NO_{50} , NO_{35} y GO_{35} . El GO_{35} se probó con diferentes valores de β (tabla 3). Los prototipos de NO_{50} y NO_{35} sólo se ensamblaron con $\beta=00^\circ$ por su carácter casi-sotrópico.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales fueron utilizados para encontrar el valor de β óptimo que permita minimizar las pérdidas en el hierro. Estos resultados se comparan los obtenidos con el circuito convencional NO.

Tabla 3
Prototipos realizados

Acero	β	Denotación
NO_{50}	00°	NO_{50}
NO_{35}	00°	NO_{35}
GO_{35}	00° a 90°	$GO_{35} 00^\circ$ a $GO_{35} 90^\circ$

Pérdidas en el hierro

En primer lugar, resulta interesante comparar los estatores GO y el NO_{50} utilizado generalmente para la fabricación de motores de mediana potencia (tabla 2). También se presentan P_b y P_m en función de \hat{b}_g para los prototipos en GO_{35} y en NO_{50} (figura 11). Se puede ver que la mejor característica la da el $GO_{35} 90^\circ$, seguido del $GO_{35} 60^\circ$ y $GO_{35} 45^\circ$ (que presentan valores muy cercanos). Finalmente, los prototipos que registran la mayor cantidad de pérdidas en el hierro son el $GO_{35} 00^\circ$ y el NO_{50} .

La diferencia constatada en porcentaje corresponde a: 60% y 40% ($\hat{b}_g = 0,2$ y $1,2$ T) entre $GO_{35} 90^\circ$ y NO_{50} . 60% y 20% ($\hat{b}_g = 0,2$ y $1,2$ T) entre $GO_{35} 90^\circ$ y $GO_{35} 00^\circ$.

De esto es posible deducir que el valor de β que da los mejores resultados es 90° . Por otro lado, comparado

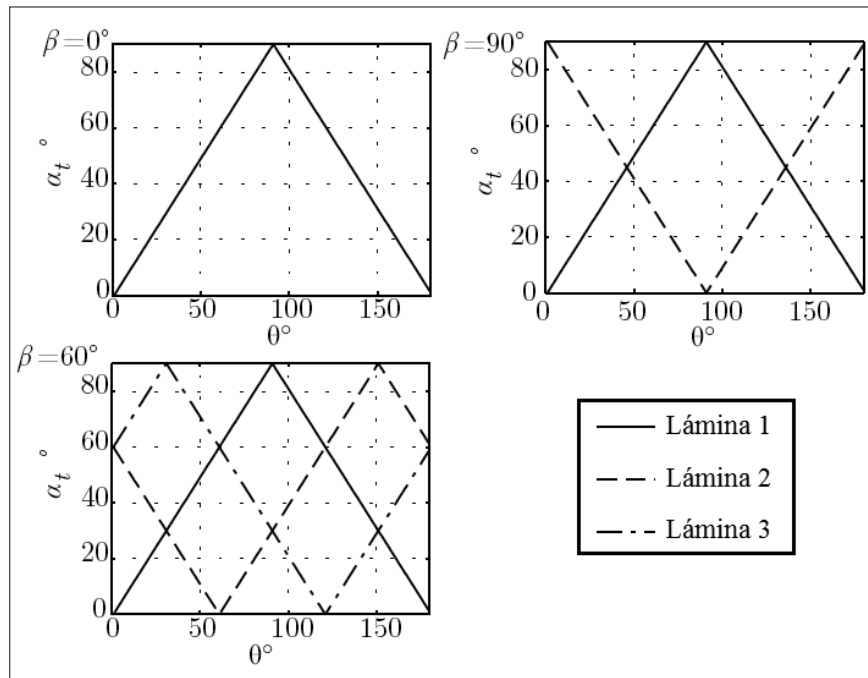


Figura 8. Evolución de α_t con respecto a θ para diferentes valores de β .

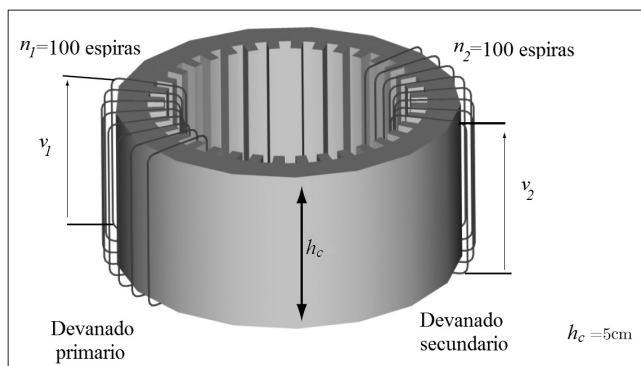


Figura 9. Prototipos utilizados para la experimentación.

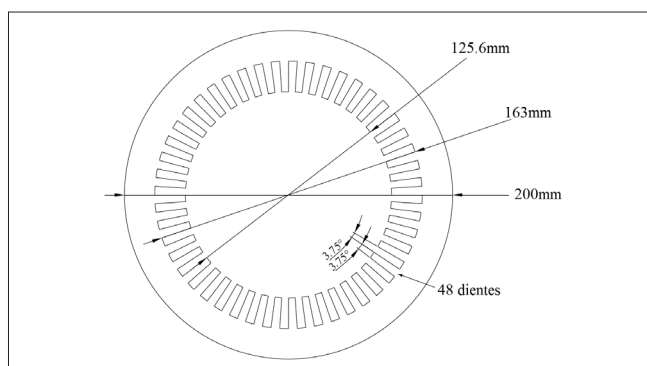


Figura 10. Geometría de corte de las láminas utilizadas.

con el NO_{50} , el $GO_{35} 90^\circ$ registra una diferencia considerable de pérdidas en el hierro.

Se requiere una comparación entre el $GO_{35} 90^\circ$ y el NO_{35} ya que, como lo indica la ecuación (1), el espesor de las láminas tiene una influencia importante en P_b . Más adelante se presenta P_b de $GO_{35} 90^\circ$, NO_{35} y NO_{50} (figura 12). Se puede ver que $GO_{35} 90^\circ$ tiene menos pérdidas que los dos prototipos NO para los valores de densidad de flujo inferiores a 1,2 T. A partir de ese valor, los circuitos magnéticos alcanzan un alto nivel

de saturación, haciendo los resultados sean difíciles de interpretar (alto contenido armónico de la densidad de flujo).

Repartición interna del flujo magnético

Gracias a los resultados presentados anteriormente se ha podido comprobar que ensamblar las láminas girándolas 90° permite reducir las pérdidas en el hierro. Con todo, tal constatación no permite entender la razón de

este fenómeno. Para lograrlo, la repartición local del flujo magnético se midió en los prototipos $GO_{35}90^\circ$ y $GO_{35}60^\circ$.

Esto se consiguió merced a la instalación de pequeñas bobinas (cable de $100\ \mu\text{m}$ de diámetro) en dos láminas (figura 13). Las láminas provistas de bobinas se implantaron en los prototipos $GO_{35}90^\circ$ y $GO_{35}60^\circ$.

Se insertaron cuatro bobinas: $l60_1$, $l60_2$, $l90_1$ y $l90_2$. Las bobinas $l60_1$ y $l90_1$ permiten medir lo que sucede localmente en la DL ($\alpha_t=0^\circ$), $l60_2$ a $\alpha_t=60^\circ$ y $l90_1$ a $\alpha_t=90^\circ$. Así, gracias a esta medida local se puede saber cómo se reparte el flujo magnético en la altura del circuito (figura 14).

Se puede ver la densidad de flujo magnético local máxima \hat{b}_l en función de \hat{b}_g medidas con las cuatro bobinas locales (figura 15). Donde se encuentran las medidas correspondientes a $GO_{35}90^\circ$ es posible ver que el flujo magnético se concentra principalmente en la lámina correspondiente a la DL (bobina $l90_1$) (figura 15 a)). La lámina correspondiente a $\alpha_t=90^\circ$ presenta una densidad de flujo magnético muy baja, que llega a un nivel de $\hat{b}_l=0,2\ \text{T}$ a $\hat{b}_g=1,1\ \text{T}$. Esto implica que en el $GO_{35}90^\circ$ una de cada dos láminas canaliza el flujo magnético, gracias a las características de la DL ($\alpha=0^\circ$) y de $\alpha=90^\circ$ (figura 4 a)).

Se presentan también las medidas correspondientes a $GO_{35}60^\circ$, donde la lámina correspondiente a la DL (bobina $l60_1$) tiene un comportamiento muy similar a la DL de $GO_{35}90^\circ$ (figura 15 b)). Por otro lado, la lámina donde $\alpha_t=60^\circ$ (bobina $l60_2$) empieza a magnetizarse a un nivel bajo de \hat{b}_g ($\hat{b}_l=0,2\ \text{T}$ a $\hat{b}_g=0,5\ \text{T}$) y llega a un nivel de densidad de flujo importante mucho antes que la $\alpha_t=90^\circ$ de $GO_{35}90^\circ$. Esto se explica porque en $GO_{35}60^\circ$ sólo una de cada tres láminas está dirigida hacia la DL, lo que implica que éstas se saturan mucho más rápido. Tal saturación prematura fuerza a las láminas “mal” orientadas a magnetizarse. Este fenómeno, desde un punto de vista de pérdidas en el hierro locales, desfavorece el desempeño del $GO_{35}60^\circ$ y explica por qué presenta más pérdidas en el hierro que $GO_{35}90^\circ$ (figura 11).

Es factible concluir que el único valor de β que permite una configuración donde la mayoría de las láminas estén bien orientadas es 90° ($1/2$). Con $\beta=60^\circ$ hay $1/3$ con $\beta=30^\circ$ hay $1/6$ y así sucesivamente (figura 11).

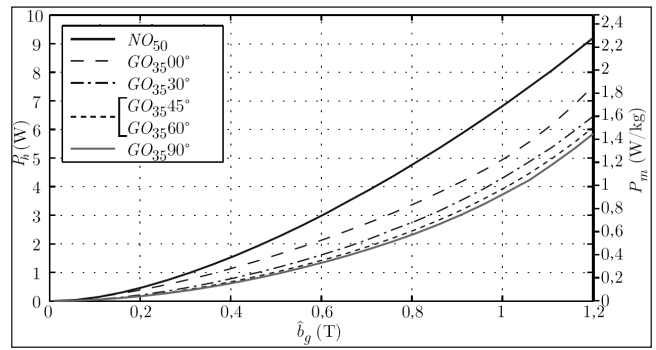


Figura 11. P_h y P_m en función de \hat{b}_g de los prototipos en GO_{35} y en NO_{50} .

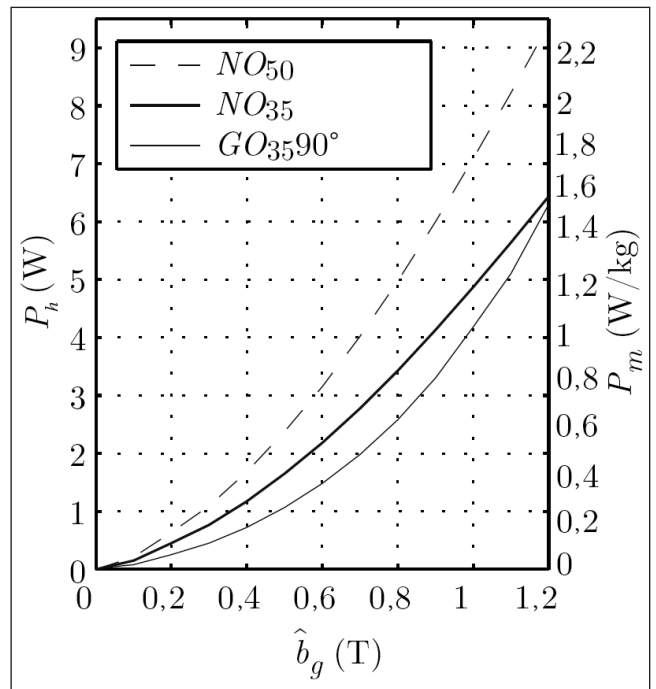


Figura 12. P_h y P_m en función de \hat{b}_g de $GO_{35}90^\circ$, NO_{35} y NO_{50} .

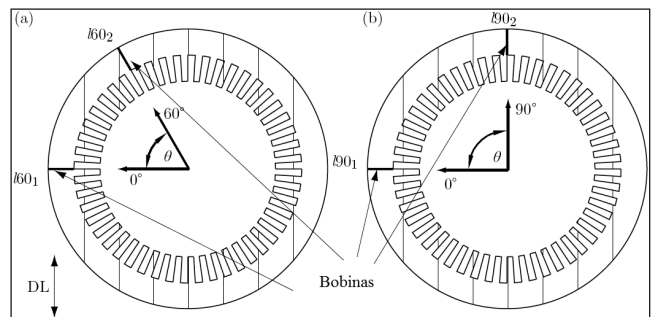


Figura 13. Bobinas para medidas locales para (a) $GO_{35}90^\circ$; (b) $GO_{35}60^\circ$.

CONCLUSIONES

El contexto del trabajo presentado en este artículo es un tema que toma cada vez más importancia; se trata del aumento de la eficiencia de las máquinas eléctricas. Más exactamente, reduciendo las pérdidas en el hierro gracias al uso del acero de grano orientado (GO) en el circuito magnético estatórico.

El acero GO se utiliza para la fabricación de transformadores de alto rendimiento, pero rara vez se emplea en la fabricación de motores de mediana y baja potencia debido a su anisotropía. Para este tipo de aplicaciones se utiliza el acero de grano no orientados (NO). El circuito magnético propuesto (patentado [28]) está basado en una estructura particular en la que las láminas de acero GO son giradas las unas con respecto a las otras de un ángulo constante. Esta estructura permite situar la dirección de fácil magnetización del acero GO en diferentes lugares del circuito magnético. Así, el flujo magnético se concentra en dichas direcciones y optimiza su recorrido.

Una serie de test se realiza utilizando circuitos magnéticos estatóricos. Los resultados muestran que, gracias a la estructura propuesta, las pérdidas en el hierro de los prototipos son reducidas sustancialmente (entre 20 y 30%, dependiendo de la densidad de flujo). Por otro lado, las pérdidas del circuito GO son mucho menores que las de un circuito NO convencional (entre 60 y 40%, dependiendo de la densidad de flujo) [29], [30].

Estos resultados se explican por una serie de medidas de densidad de flujo en el interior de la estructura. El análisis local muestra que el flujo se instaura localmente

en las direcciones de fácil magnetización y lleva a un valor óptimo para el ángulo de rotación de 90°.

Este mismo principio se empleó en prototipos excitados en campo giratorio [31], [32], [33], [34], mostrando que la presencia de dos componentes de campo perpendiculares no afecta el desempeño del circuito y que permite obtener mejores resultados que un circuito convencional NO [35].

Un grupo de motores asíncronos de 10 kW se modificó reemplazando su circuito magnético con el circuito GO. Los resultados muestran que los motores GO presentan una eficiencia, dependiendo del deslizamiento, de 1,5 a 3 puntos superior a la de un motor convencional [36].

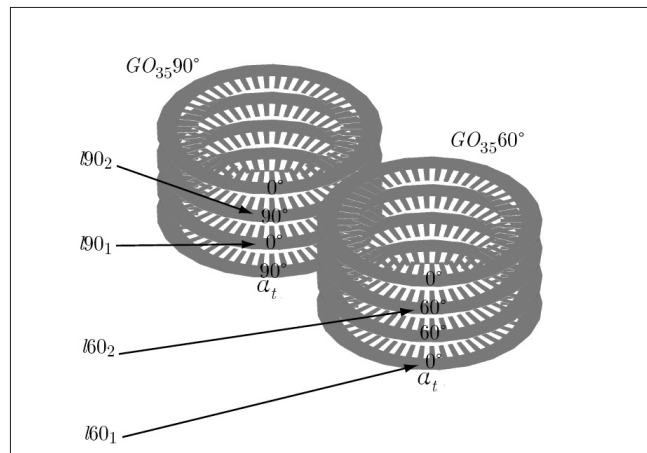


Figura 14. Implantación de las láminas para las medidas locales.

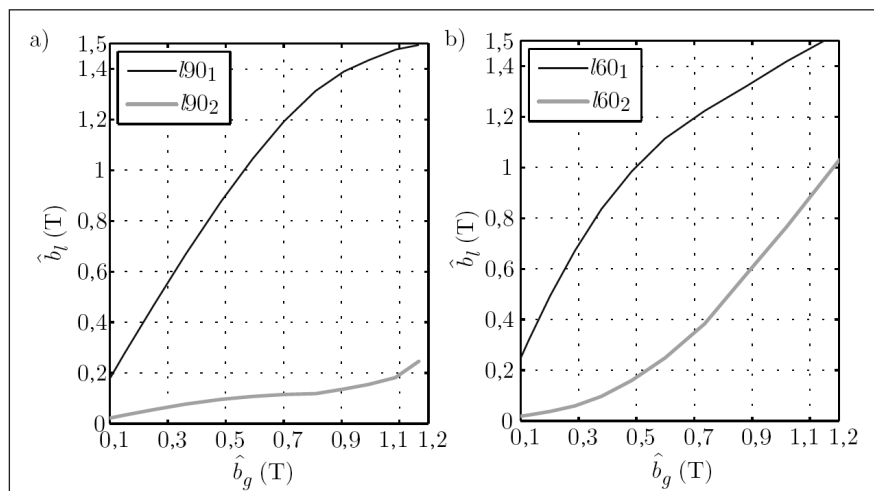


Figura 15. \hat{b}_l en función de \hat{b}_g de: (a) $GO_{35}90^{\circ}$ y (b) $GO_{35}60^{\circ}$.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto lo financió ThyssenKrupp Electrical Steel, la región Nord Pas de Calais (Francia) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Los trabajos de investigación se hicieron en el laboratorio LSEE de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Artois.

ABREVIATURAS

- GO: acero de grano orientado.
 NO: acero de grano no orientado.
 DL: dirección de laminado.
 NO_{35} : acero NO de 0,35 mm de espesor.
 NO_{50} : acero NO de 0,50 mm de espesor.
 GO_{35} : acero GO de 0,35 mm de espesor.

GLOSARIO

α : dirección del campo magnético de excitación con respecto a la DL.

α_i : dirección teórica de la componente tangencial con respecto a la DL.

β : ángulo de rotación de las láminas con respecto al eje z.

b : densidad de flujo magnético.

\hat{b} : densidad de flujo magnético máxima.

\hat{b}_g : densidad de flujo magnético global máxima.

\hat{b}_l : densidad de flujo magnético local máxima.

d : espesor de la lámina o chapa de acero.

f : frecuencia de excitación.

h : campo magnético.

\hat{h} : campo magnético máximo.

h_i : altura del circuito magnético.

i_j : corriente del devanado primario.

$k_1, k_2, y k_3$: constantes experimentales.

$l60_p, l60_2, l90_p, l90_i$: bobinas para la medida de flujo magnético local.

n_1 : número de espiras del devanado primario.

n_2 : número de espiras del devanado secundario.

P_m : pérdidas por unidad de masa.

P_{sta} : pérdidas estáticas o por histéresis.

P_{cla} : pérdidas clásicas o por corrientes de remolino.

P_{exc} : pérdidas por exceso.

θ : coordenada angular.

μ : permeabilidad relativa.

v_1 : tensión devanado primario.

v_2 : tensión devanado secundario.

\tilde{z} : eje vertical normal al plano de la lámina.

REFERENCIAS

- Hanitsch, R. (2002). Energy efficient electric motors, in *Proceedings of World Climate & Energy Event*.
- De Almeida, E. L. F. (1998). Energy efficiency and the limits of market forces: the example of the electric motor market in france. *Energy Policy* 26, 643-653.
- IEC-60034-2 (2007). Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais'. International Electrotechnical Commission.
- Saidur, R. (2009). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renew Sustain Energy Rev*.
- Corino, S., Romero, E. & Mantilla L. (2008). Energy savings by means of energy efficient motors. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality 2008*.
- De Almeida, A., Fonseca, P. & Bertoldi, P. (2003). Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies. *Energy* 28, 673-690.
- Belobrajic (2000). Magnetic core of electric rotational machines made of grain oriented sheets, WO/2001/005015.
- Beckley, P. (2002). Electrical steels for rotating machines, ISBN 0-85296-980-5, IEE.
- Bozorth, R. M. (1951). *Ferromagnetism*, IEEE Press.
- Beckley, P. (2000). Electrical steels. ISBN-10 095400390X. *European Electrical Steels*.
- Brissoneau, P. (1997). *Magnetisme et matériaux magnetiques*. ISBN 2-86601-579-7. Hermes Science Publications.
- IEC-60404-2 (1996). Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Epstein. International Electrotechnical Commission.
- Bertotti, G. (1998). Hysteresis in magnetism for physicists, materials scientists, and engineers. ISBN-10 0120932709. Academic Press Inc.
- Baumgartinger, N. & Pfützner, H. (2000). Practical relevance of the "hard directions" of h.g.o. si-fe. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 147-149.
- Page, J. (1984). Some observations on the magnetic anisotropy of non-oriented 3% si steels. *IEEE Transactions on Magnetics* 20(5). 1542-1544.
- Shiozaki, M. & Kurosaki, Y. (1989). Anisotropy of magnetic properties in non-oriented electrical steel sheets. *Textures and Microstructures* 11, 159-170.
- Ionel, D. M., Popescu, M. & Dellinger, S. (2006). On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. *IEEE Trans. Magn* 42, 658-667.
- De Campos, M., Teixeira, J. Landgraf, F. (2006). The optimum grain size for minimizing energy losses in iron. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 301, 91-99.
- Bertotti, G. & Pasquale, M. (1992). Physical interpretation of induction and frequency dependence of power losses in soft magnetic materials. *IEEE Trans. Magn* 28, 2787-2789.
- Bavay, J. & Verdun, J. (1991). Alliages fer-silicium, Technical Report D2110, *Techniques de l'Ingénieur*, traité génie électrique.
- Bertotti, G. (1988). General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics* 24(1). 621-630.

22. Bertotti, G. & Boglietti, A. (1991). An improved estimation of iron losses in rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Magnetics* 27, 5007-5009.
23. Steinmetz, C. (1984). On the law of hysteresis. *Proceedings of the IEEE* 72, 197-221.
24. Kessens, N. J. & Bowen D. M., Lightweight high power electromotive device and method for making same, US5554902.
25. Wieseman T., Rotor for dynamometric machines, US6960862.
26. Delavie, C., Electric rotary machine plate with oriented grains, WO2001034850.
27. Yamamoto T., Electric motor and apparatus for manufacturing said electric motor, EP1686674.
28. Brudny, J. F., Magnetic core and use of magnetic core for electrical machines, WO 2009/030779 A1.
29. Lopez, S., Cassoret, B. & Brudny, J. F. (2009). Grain oriented steel assembly characterization for the development of high efficiency ac rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Magnetics*. 45, 4161-4164.
30. Hihat, N., Lopez, S. & Cassoret, B. (2010). Characterization of electrical steel disc stacks for the development of new circular magnetic circuits. *Przeład Elektrotechniczny* 5/2010(ISSN 0033-2097). 145-148.
31. Pfützner, H. (1994). Rotational magnetization and rotational losses of grain oriented silicon steel sheets-fundamental aspects and theory. *IEEE Transactions on Magnetics* 30, 2082-2807.
32. Moses, A. J. (1973). Measurement of rotating flux in silicon iron laminations. *IEEE Transactions on Magnetics* 9, 651-654.
33. Dupré, L. R. & Fiorillo, F. (2000). Rotational loss separation in grain-oriented fe-si. *Journal of Applied Physics* 87, 6511-6513.
34. Findlay, R. & Stranges, N. (1994). Losses due to rotational flux in three phase induction motors. *IEEE Transactions on Magnetics* 9, 543-549.
35. Lopez, S., Cassoret, B. & Brudny, J. (2009). Validation of high efficiency ac rotating electrical machine magnetic circuit by particular tests at standstill. *Proceedings of SMM* 19.
36. Lopez, S. (2010). Définition de nouvelles structures de circuits magnétiques de machines AC utilisant des tôles à grains orientés, PhD. Tesis Université d'Artois.

Uso del subproducto de PMMA como material de relleno en poliolefinas

By-product use PMMA as filler in polyolefins

JAIME ALBERTO PARRA¹, WILLIAM APERADOR CHAPARRO², JAIME ALEJANDRO PUENTES PARODI¹

1. Decanatura de Ingeniería Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

2. Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
g.ing.materiales@gmail.com

Recibido: 20/10/2011 Aceptado: 11/11/2011
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este trabajo se utilizó la viruta del procesamiento del polimetacrilato de metilo (PMMA) como material de relleno en resinas de polietileno de alta y baja densidad. Se obtuvieron mezclas con relaciones del 0 hasta el 20% de relleno, dentro de una máquina mezcladora tipo Brabender con capacidad de 60 g, con un periodo de residencia en las cavidades y en los rotores de diez minutos en cada una de las mezclas. Las probetas se moldearon según normas ASTM para realizar las evaluaciones de propiedades mecánicas tales como ensayo tracción. Los ensayos de resistencia a la tracción revelan que el material de relleno disminuye el esfuerzo a la tracción del material a medida que aumenta el porcentaje de inclusión.

Palabras claves: polimetacrilato de metilo, polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad, resistencia a la tracción.

Abstract

In this work we used the chip processing of polymethyl methacrylate (PMMA) as filler in polyethylene resins of high and low density. Blends were obtained with ratios of 0 to 20% filled, in a Brabender mixer type machine with capacity of 60 g, with a period of residence in the cavities and in the rotors of 10 minutes in each of the mixtures. The specimens were molded according to ASTM standards for conducting evaluations of mechanical properties such as tensile test. Tests revealed that the strength of the material was reduced moderately with the increase of inclusions into the polymeric matrix.

Keywords: polymethyl methacrylate, polyethylene, low density polyethylene, high density, tensile strength.

INTRODUCCIÓN

En la fabricación de productos industriales es muy importante tener en cuenta el conocimiento que proporciona la ciencia de los materiales, pues finalmente ésta provee las herramientas necesarias para comprender el comportamiento general de éstos y, por consiguiente, determinar los diseños y procesamientos más confiables, económicos y eficientes tanto para la industria como para el medio ambiente.

El propósito de la investigación es la reutilización de material de PMMA sobrante obtenido durante el proceso de fabricación de láminas de este mismo para diferentes aplicaciones; dicho desperdicio se considera viruta por sus características y no puede reprocesarse como sí ocurre con otro tipo de materiales termoplásticos de fácil reprocesamiento. Se realizó la incorporación de esta masa dentro de un polímero de baja viscosidad para medir las propiedades resultantes de esta mezcla y de esta manera disminuir el impacto ambiental generado por el residuo de PMMA; igualmente, se caracterizaron las propiedades finales de la mezcla para determinar las aplicaciones acordes con los resultados obtenidos.

Existe una gran variedad de aplicaciones en las que los materiales poliméricos pueden usarse gracias a su gran versatilidad y facilidad de procesamiento. Uno de los principales objetivos en la investigación propuesta es mejorar el desempeño de estos materiales ante la exposición de distintos factores, tales como resistencia a la tracción, abrasión, impacto, cargas concentradas, choque térmico y ataque químico. Los productos fabricados de materiales compuestos o mezclas poliméricas traen numerosas ventajas para diversas aplicaciones, entre éstas alta durabilidad, peso reducido, resistencia a la corrosión, bajo costo de manutención y de instalación y estabilidad dimensional [1-5].

Una aplicación directa se encuentra fácilmente en la construcción de pisos industriales que involucra la utilización de una gran variedad de productos que complementan al concreto mismo, con el fin de facilitar su construcción e instalación. Comparado con otros sectores productivos, en el sector de la construcción la expansión de los materiales poliméricos no ha sido tan generalizada ni tan rápida como se podía esperar. Se trata de un sector cuyo conservadurismo histórico se ha visto reflejado numerosas veces cuando se han tratado de introducir grandes cambios. De todos modos, los materiales poliméricos se han ido introduciendo poco a

poco y actualmente son considerados como un tipo de material que hay que tomar en cuenta en un futuro muy cercano. De hecho, la aparición de nuevas construcciones que han usado algún tipo de material compuesto es siempre una señal de que el sector ha ido aceptando la industria de estos materiales. Las aplicaciones de los materiales poliméricos en el mercado de la construcción varían desde pisos, piezas para baños/bañeras y claraboyas, hasta paneles decorativos, paneles para muros cortina y materiales de fachadas. Estos materiales son ideales para su uso en el mercado de la construcción por su estabilidad dimensional, alta durabilidad, ligereza, resistencia al impacto y baja inflamabilidad. Además permiten, mediante una adecuada elección de resinas y aditivos, una alta flexibilidad en el diseño [6-9].

Por tanto, a la hora de escoger materiales que se someterán a diferentes esfuerzos o condiciones extremas, es importante considerar tanto las propiedades mecánicas que éstos pueden llegar a poseer como el diseño con el cual se elaborarán, para aprovechar al máximo dichas propiedades y, por ende, soportar y distribuir adecuadamente las cargas que se van a aplicar, para así garantizar una mayor duración del material [10].

El propósito de la investigación es la reutilización del material de PMMA sobrante obtenido durante el proceso de fabricación de láminas de éste para diferentes aplicaciones; dicha masa es considerada viruta por sus características físicas y mecánicas, la cual no se puede reprocesar. Se realizó la incorporación de esta masa dentro de un proceso productivo, para así disminuir el impacto ambiental generado por dicho material sobrante, así como también se optimizó la fabricación de piezas en otras aplicaciones acordes con las propiedades que pueda suministrar el PMMA como refuerzo dentro de otros materiales.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

Los materiales utilizados como base para el estudio son resinas sin procesamiento previo, las cuales vienen en gránulos de tamaño estándar y carecen de cualquier impureza propia de un reproceso; entre estos materiales están el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) en su estado original. El material como refuerzo es PMMA en estado de viruta, de formas irregulares y con gran cantidad de

impurezas propias como polvo y algunos residuos de película de polietileno de baja densidad lineal (LDPE), correspondientes al procedimiento de fabricación de láminas del mismo material acrílico. En el proceso de obtención de láminas de PMMA se produce una rebaba alrededor de las placas funcionales para la formación de dicho producto, la cual por su impureza no es apta para la reutilización dentro del mismo proceso; por tanto, la cantidad de este material de viruta se acumula en un proceso de almacenaje, ya que representa un gran impacto ambiental al tratarse como basura dentro del manejo de éstas. El estado original de la viruta no es muy adecuado para ningún proceso de reutilización, por lo que se hace necesario pasarlo por un proceso de selección, molienda y tamizado. El tamizado se realiza con una malla N.º 200, la cual permite un tamaño de partícula adecuado; cabe resaltar que después de estos tres procesos de tratamiento previo aún permanecen impurezas en el material, que son susceptibles de afectar un reprocesamiento, pero que representan gran parte del problema ambiental, por lo que se toman en cuenta dentro del estudio de las mezclas y, por consiguiente, en una futura aplicación del material.

DETALLES EXPERIMENTALES

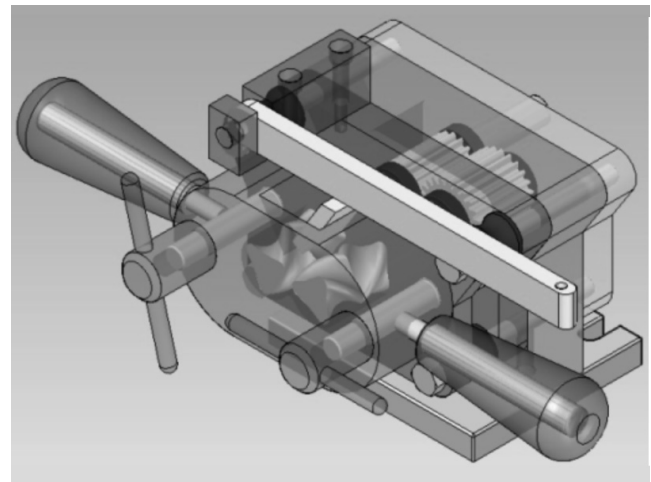
El procedimiento utilizado con el fin de obtener las muestras para cada mezcla contiene cinco partes; 1)

selección, molienda y tamizado de la viruta de PMMA; 2) mezcla de cada proporción y distribución de partículas; 3) proceso de mezclado en la máquina tipo Brabender con condiciones de temperatura y flujo apropiado; 4) obtención de placas de cada muestra por termoformado; 5) obtención de probetas para ensayos físicos y mecánicos.

El material de PMMA considerado desecho en la industria se pasa por un proceso de selección visual para despojarlo de impurezas de gran tamaño y de características análogas al propio material, y luego se clasifica con la ayuda de un tamiz N.º 200 según la ASTM E-11, para un tamaño de partícula menor de 75 micrones; de esta manera se obtuvo un material de refuerzo uniforme y acondicionado para reprocesarlo. Para la obtención de las muestras se procede a hacer una mezcla con proporción en peso de cada uno de los materiales, los cuales son de 5, 10, 15, 20, 25 y 30% de viruta de PMMA, para cada uno de los materiales base; una vez obtenidas las proporciones necesarias, se lleva cada una de ellas al interior de las cavidades de la mezcladora, la cual tiene previamente una velocidad de 50 r.p.m. y una temperatura estabilizada de 200 °C (lectura de la temperatura en las resistencias alrededor de las cavidades, por lo cual no es la temperatura efectiva en la masa mezclada). El proceso de mezclado se hizo en un equipo de rotores tipo Brabender (figura 1).



a.



b.

Figura 1. a) Mezcladora tipo Brabender, donde se obtuvo el material compuesto; b) proyección isométrica del sistema de mezcla con rotores de flujo turbulento.

El proceso de mezclado tiene una duración de diez minutos, a lo largo de los cuales se toman registros de torque y temperatura y se analiza el comportamiento de la mezcla.

Una vez terminado el proceso de mezcla, se detienen los rotores y la entrada de calor, y se extrae con elementos de bronce el material obtenido, el cual se solidifica en el término de tres a cinco minutos.

Debido al método de extracción del material, éste se presenta en formas irregulares y tamaños diversos. Se reúne toda la cantidad de material extraído y se clasifica según sus componentes, hasta obtener todas las muestras necesarias para el análisis.

Para que estas muestras puedan llevarse a ensayos físicos hay que darles una forma geométrica adecuada, por lo que se procede a un proceso de compresión a altas temperaturas con un aparato que consta de una prensa hidráulica, resistencias y un molde de acero ASTM A36. Las cavidades del molde cuentan con dimensiones de 120 x 120 x 2 mm.

El proceso de moldeo de placas se realiza mediante la aplicación de presión y temperatura hasta conseguir la forma del molde. Una vez obtenidas las placas para cada muestra, de éstas se cortan las probetas necesarias para su medición física, según la norma de la ASTM D-2343 para ensayo de tensión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por medio de un control electrónico sobre los parámetros influyentes dentro del proceso de mezclado, se obtienen gráficos de torque y temperatura para cada una de las muestras, con lo cual se han podido observar las condiciones superficiales de procesamiento a las cuales está sometida la mezcla, y a partir de ello deducir un comportamiento esperado en condiciones de un proceso industrial tecnificado. A través de *software* de teoría de control, como Labview 8.0, se consiguen una serie de datos con los cuales es posible hacer gráficos de torque vs. tiempo (figura 2).

Mediante estas pruebas se pueden determinar los picos en el esfuerzo mecánico del motor de la máquina, y de esta manera evaluar la complejidad del suceso de mezclado alrededor de los rotores de mezclado. Esta serie de datos es de especial interés para el establecimiento de condiciones de procesamiento, una vez obtenido un resultado conciso dentro de la evaluación de propiedades mecánicas.

Los gráficos de esfuerzo-deformación del HDPE como material matriz permiten determinar que a medida que aumenta el porcentaje de viruta de PMMA el esfuerzo a la tracción disminuye, por lo cual se considera que la adición de viruta de PMMA es perjudicial para la resistencia mecánica del compuesto. Así mismo, se

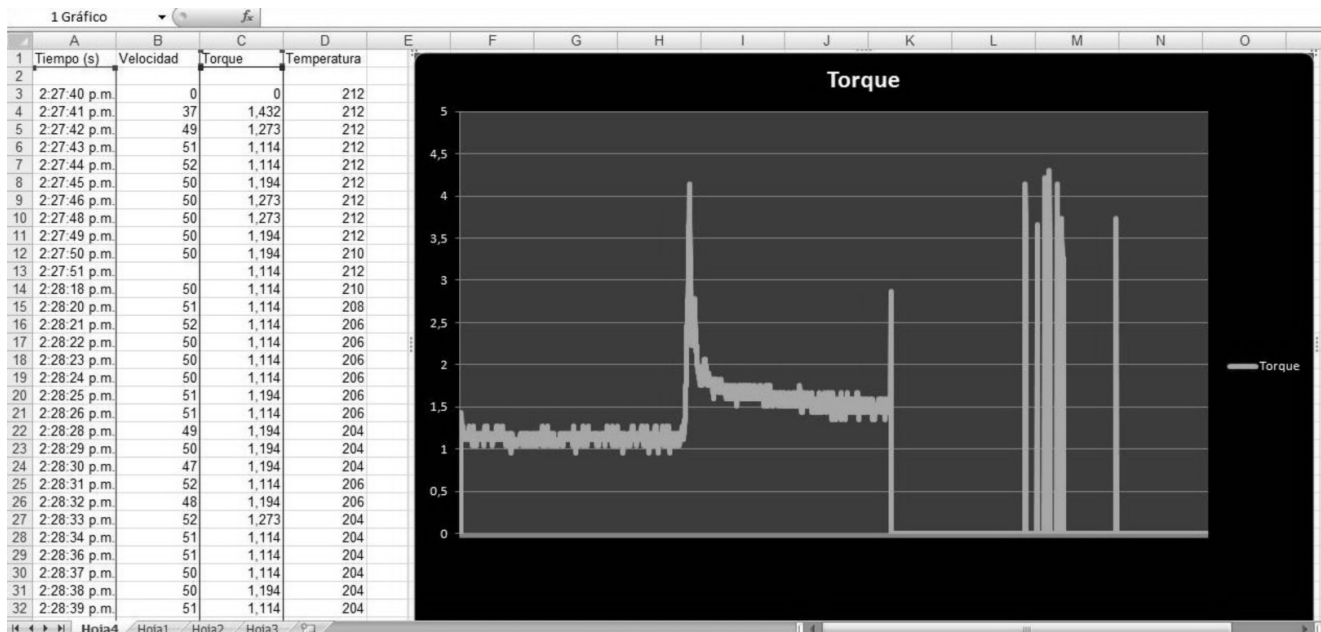


Figura 2. Gráfico del comportamiento del torque de la máquina durante el proceso de mezclado.

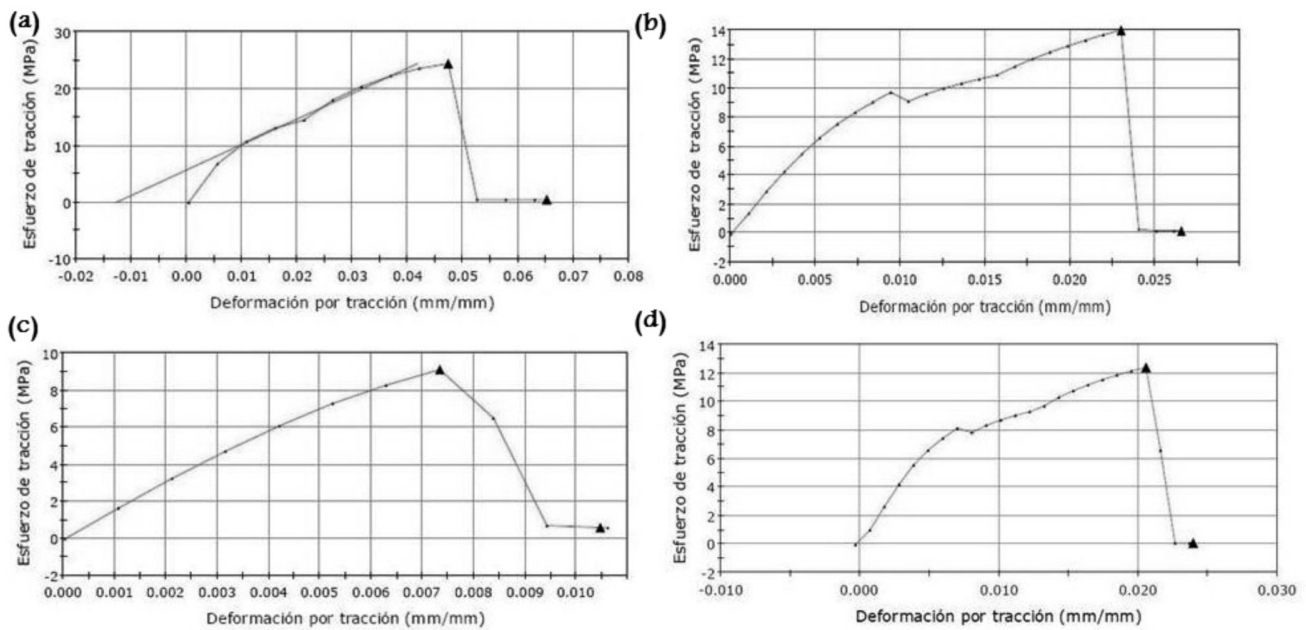


Figura 3. a) Gráfico de esfuerzo-deformación HDPE 100%; b) gráfico de esfuerzo-deformación HDPE con 10% de PMMA; c) gráfico de esfuerzo-deformación HDPE con 20% de PMMA; d) gráfico de esfuerzo-deformación HDPE con 30% de PMMA.

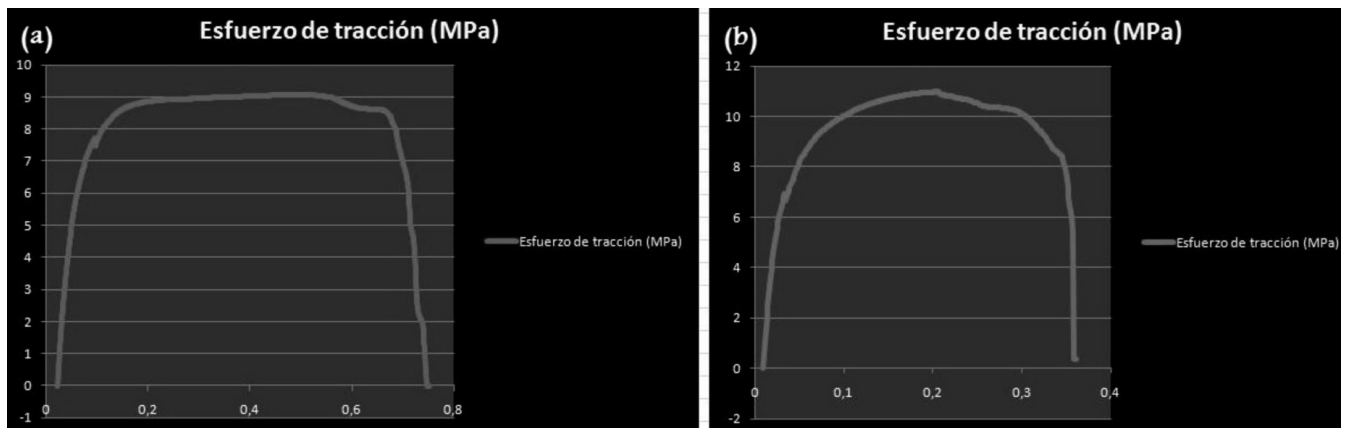


Figura 4. a) Gráfico de esfuerzo-deformación LLDPE con 5% de PMMA; b) gráfico de esfuerzo-deformación LLDPE con 20% de PMMA.

denota que la deformación se hace más corta con la adición de viruta, y por tanto aumenta la fragilidad del material. Esta caracterización mecánica de las muestras con HDPE lo clasifican como no viable, ya que el efecto de la viruta de PMMA sobre esta matriz es perjudicial (figura 3).

En el LLDPE con refuerzo, contrario al comportamiento de HDPE, se obtiene un aumento gradual

en la resistencia mecánica a medida que aumenta el porcentaje de PMMA dentro de la mezcla, encontrando un máximo en la proporción con 20% de viruta. Se establecen comparativos entre puntos extremos, donde se observan los cambios en propiedades mecánicas (figura 4). Aunque se obtiene un incremento en la resistencia mecánica, también ocurre una disminución en la deformación del material, lo cual aumenta su fragilidad. Por

consiguiente, se debe considerar esta mezcla en casos donde no se requieran propiedades altas de ductilidad, como con el material sin refuerzo.

CONCLUSIONES

La mezcla de viruta con polietileno de alta densidad no es viable porque a medida que se aumenta el porcentaje de carga, la resistencia mecánica del compuesto disminuye. Por otro lado, la mezcla de viruta de PMMA con LLDPE resulta factible porque se obtiene una mejora en las propiedades mecánicas, y con esto un mejoramiento de la calidad en los productos procesados a partir de este material, cuya principal característica es la resistencia mecánica y no la ductilidad.

La procesabilidad de la mezcla factible es evaluada y considerada aceptable, ya que se encuentra dentro de los rangos normales, luego de observar el gráfico del torque de la máquina de mezclado con esta proporción.

REFERENCIAS

1. Rosen, B.W. (1965). Mechanics of composite strengthening. *Fibre composite materials*. American Society for Metals, pp. 37-75.
2. Xu, Y.L. & Reifsinder, K.L. (1993). Micromechanical modelling of composite compressive strength. *J Compos Mater*, 27, pp. 572-588.
3. Aref, A.J. & Alampalli, S. (2001). S. Vibration characteristics of a fiber-reinforced polymer bridge superstructure. *Composite Structures*, vol. 52, pp. 467-474.
4. Kenny, J. (2003). Joining technologies for polymeric matrix composites: present and future. *Composit workshop on Joining Technologies for Composite Transportation Structures*. Orbassano.
5. Argon, A.S. (1972). Fracture of composites, *Treatise of material science and technology*, vol. 1. New York: Academic Press.
6. Lagoudas, D.C. & Saleh, A.M. (1993). Compressive failure due to kinking of fibrous composites. *J Compos Mater*, vol. 27, pp. 83-106.
7. Lee, J. & Soutis, C. (2005). Thickness effect on the compressive strength of T800/924C carbon fibre-epoxy laminates. *Compos Part A*, vol. 36, pp. 213-227.
8. Bazant, P.Z., Kim, J.H., Daniel, I.M., Emilie, B.G. & Zi, G. (1999). Size effect on compression strength of fibre composites failing by kink band propagation. *Int J Fract*, vol. 95, pp. 103-141.
9. Recasens, J. (2002). Nuevas aplicaciones de los materiales compuestos en la construcción. *16.ª Jornadas de Materiales Compuestos/Plásticos Reforzados*. Barcelona.
10. Renaud, C.M. (2002). Effect of glass fibers and environmental on long-term durability of GFRP composites. *16.ª Jornadas de Materiales Compuestos/Plásticos Reforzados*. Barcelona.
11. Diseño y caracterización de un compuesto fibrorreforzado de matriz polimérica y fibra de carbono como modelo en la implementación de cascos para ciclismo (2009). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. S1, pp. 1127-1132
12. Kim, C. & White, S.R. (1996). The continuous curing process for thermoset polymer composites. Part 2: Experimental results for a graphite/epoxy laminate, *J Compos Mater*, vol. 30, pp. 627-647.
13. Niklewicz, J. & Sims, G.D. (2002). Size effects in composite materials. Structural Integrity and Performance Project CPD1, National Physical Laboratory, NPL Report MATC (A), vol. 74.
14. Lackey, E. & Vaughan, J.G. (1998). Examination of fiber/resin interface adhesion for pultruded composites. *Proceedings of the 43rd International Sampe Symposium*, vol. 43, pp. 2158-2168.

Sostenibilidad ambiental urbana mediante predicción de patologías en sistemas de alcantarillado

Urban environmental sustainability through prediction of pathologies in sewerage systems

ÓSCAR EFRÉN OSPINA ZÚÑIGA¹, HILDEBRANDO RAMÍREZ ARCILA²

1. Ingeniero civil. M.sc. en Ingeniería y Tecnología Ambiental. Coordinador de Investigaciones del Programa de Ingeniería Civil y director del Grupo de Investigación Aqua de la Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Ibagué.
osefos@gmail.com

2. Biólogo y químico. Especialista en Gerencia de Proyectos Educativos Institucionales. M.sc. en Investigación y Docencia Universitaria. Director de Proyección Social del Programa de Ingeniería Civil y director del Grupo de Investigación Aqua de la Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Ibagué.

Recibido: 20/10/2011 Aceptado: 15/11/2011
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El riesgo ambiental ocasionado por el colapso de sistemas de alcantarillado en Colombia no se ha evaluado en su verdadera dimensión y compromete la sostenibilidad ambiental del conglomerado urbano, con consecuencias nefastas para la salud humana. Las empresas de servicios atienden estos sistemas de manera emergente con acciones curativas, pero que no corresponden a un modelo técnico de planeación y proyección de intervenciones que aplique el principio lógico de la prevención, garante de su sostenibilidad financiera y operacional, pero especialmente ambiental. El Grupo de Investigación Aqua, de la Universidad Cooperativa de Colombia, mediante un proyecto de investigación iniciado en el año 2006, diseñó una plataforma técnica inédita que evalúa y diagnostica integralmente sistemas de alcantarillado, a partir de las diversas patologías que puedan ocasionar deterioro en su infraestructura física y mala disposición de aguas residuales, capaz de prevenir en tiempo real futuros daños y proceder a tomar correctivos a tiempo.

Palabras claves: alcantarillado, patología, plataforma, salud humana, sostenibilidad ambiental.

Abstract

The environmental risk caused by the collapse of sewerage systems in Colombia has not been evaluated in its true dimensions and threatens the environmental sustainability of urban conglomerate with dire consequences for human health. Service companies address these emerging systems with a curative way, do not reflect a technical model for planning and forecasting of interventions to implement the logical principle of prevention, guarantee its financial and operational sustainability, but especially the environment. Aqua Research Group, from the Universidad Cooperativa de Colombia through a research project started in 2006, designed an unprecedented technical platform fully evaluated and diagnosed sewerage systems from the potentially and different pathologies that can cause damage to its physical infrastructure and bad sewage disposal, capable of preventing further damage in real time and proceed to take corrective measures on time.

Keywords: sewer, pathology platform, human health, environmental sustainability.

INTRODUCCIÓN

La importancia del agua y del ambiente sano, y su incidencia sobre la salud y el desarrollo de la población, está plenamente reconocida en la Constitución Política de Colombia, así como en los instrumentos internacionales ratificados por el país. En la Constitución se establece que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano y se afirma que la vida y la salud son derechos fundamentales de los niños (Presidencia de la República, 1991). El agua y el saneamiento gozan de especial protección en las normas del derecho internacional de los derechos humanos, al igual que en el derecho internacional humanitario. En la Declaración de los Derechos Humanos de 1948 se establece que toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure la salud y el bienestar, lo cual hace referencia al derecho de los seres humanos al agua, al saneamiento y al ambiente sano. En la Convención sobre los Derechos del Niño, adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1989 y ratificada por Colombia dos años después, se dice que los niños tienen derecho al disfrute del más alto nivel posible de salud e insta a los estados partes a suministrar agua potable salubre, teniendo en cuenta los peligros y riesgos de contaminación del medio ambiente (ONU, 1989).

El acceso de todos los colombianos a los servicios de agua potable, alcantarillado y demás servicios públicos domiciliarios es el punto de partida para avanzar hacia una sociedad con mejores condiciones de salud, mayor bienestar y más oportunidades para el desarrollo humano, económico y social. Por eso, la inversión para garantizar el acceso de todos los hogares a los servicios públicos domiciliarios tiene una alta rentabilidad, ya que contribuye a disminuir los costos económicos, humanos y sociales que se derivan de las enfermedades, la desnutrición, la baja asistencia y rendimiento escolar, la baja productividad y el deterioro del medio ambiente (Unicef, 2011).

Pronosticar y prevenir las potenciales patologías en sistemas de alcantarillado es la herramienta técnica que permite la inversión acertada y oportuna de recursos técnicos y financieros, mediante la planificación y proyección con mayor impacto y optimizando los menguados recursos económicos de que dispone el Estado. Esta propuesta es una valiosa plataforma para diversas ciudades en Colombia y América Latina que viven situaciones similares, aplicando una inédita

plataforma técnica que contempla los factores internos y externos que pueden incidir en la definición de patologías, además de su magnitud y su posible ocurrencia a corto, mediano o largo plazos si no se toman correctivos. Para la definición de las patologías, la tecnología permite sacar el máximo provecho de la auscultación directa mediante el uso de la robótica, que incorpora cámaras de alta resolución y con autonomía de movilidad, facilitando la visualización con nivel de detalle de lo que ocurre internamente en el ducto. El modelo de detección temprana suministra la información detallada del catastro de redes que toda localidad debe poseer, como inventario de su patrimonio de infraestructura sanitaria, conociendo la situación real de colectores, pozos y acometidas del sistema de alcantarillado.

Problemática detectada

La gravedad de la situación de las aguas residuales en los países latinoamericanos y en el Caribe se debe a tres factores principales que determinan el retraso actual: el elevado costo de la tecnología tradicional, la mala gestión de los servicios de saneamiento y la utilización de soluciones parciales que ayudan a “enmascarar el problema”, donde la solución definitiva se cambia por soluciones parciales, obligando a los consumidores a convivir con aguas negras en el fondo de su casa y en las calles. En la práctica, el problema de aguas negras desaparece a los ojos de la población, pero este factor es determinante en la reproducción de vectores (Restrepo, 2002).

A partir del Censo Sanitario Urbano del departamento del Tolima, realizado en el año 2005, el Grupo de Investigación Aqua del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Ibagué, investigó sobre la deficiente situación de la infraestructura física de todos los sistemas de alcantarillado de los 47 municipios, causantes de afectaciones ambientales en la población urbana y especialmente con graves consecuencias en la salud humana, como reflejo de la actual situación sanitaria del país. En la totalidad de los casos se atiende la infraestructura física con acciones correctivas después de manifestada la patología y ocurrido el colapso, con la consecuente afectación ambiental que desencadena enfermedades en la población (Suárez y Ospina, 2005). Reflejo de ello

es la ilustración en la que se muestra un colapso con afectación ambiental urbana en la ciudad de Ibagué, ocurrido en el año 2007 (figura 1).



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 1. Colapso de tramo de alcantarillado con exposición de contaminación a cielo abierto.

Antecedentes

La ciudad de Ibagué, capital del departamento del Tolima, ha presentado la mejor infraestructura de servicios públicos en comparación con los demás municipios tolimenses; sin embargo, su problemática respecto a las condiciones físicas de sus redes de alcantarillado se ha evidenciado por diferentes sucesos de colapso en gran magnitud, con afectaciones en propiedades públicas y privadas y daños ambientales. De acuerdo con el seguimiento efectuado durante el tiempo de estudio (2005-2009), en el año 2007 sufrió el colapso de varios tramos del alcantarillado, situaciones que se divulgaron en algunos artículos del periódico regional *El Nuevo Día* publicados en el mes de julio del año 2007, con perjuicios en propiedad privada, especialmente en viviendas, que pueden ocasionar futuras indemnizaciones por las consecuentes demandas contra el Estado entabladas por los afectados (figura 2).

La salud humana en el entorno se vio afectada por proliferación a cielo abierto de roedores y vectores de enfermedades que afectaron principalmente a la niñez.



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 2. Artículos publicados en el periódico regional *El Nuevo Día* (julio de 2007).



Si la situación en la capital es delicada en este sentido, se puede palpar el problema que tiene el resto de la población urbana del departamento del Tolima, cuyos entes territoriales no disponen de mejores recursos para atender emergencias de gran magnitud (Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009).



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 3. Afectación de propiedad privada por colapso de alcantarillado en la ciudad de Ibagué (2007).

Para la aplicabilidad práctica de la plataforma se tomó la ciudad de Ibagué, capital del departamento del Tolima, como sitio geográfico objetivo de la investigación.

OBJETIVO

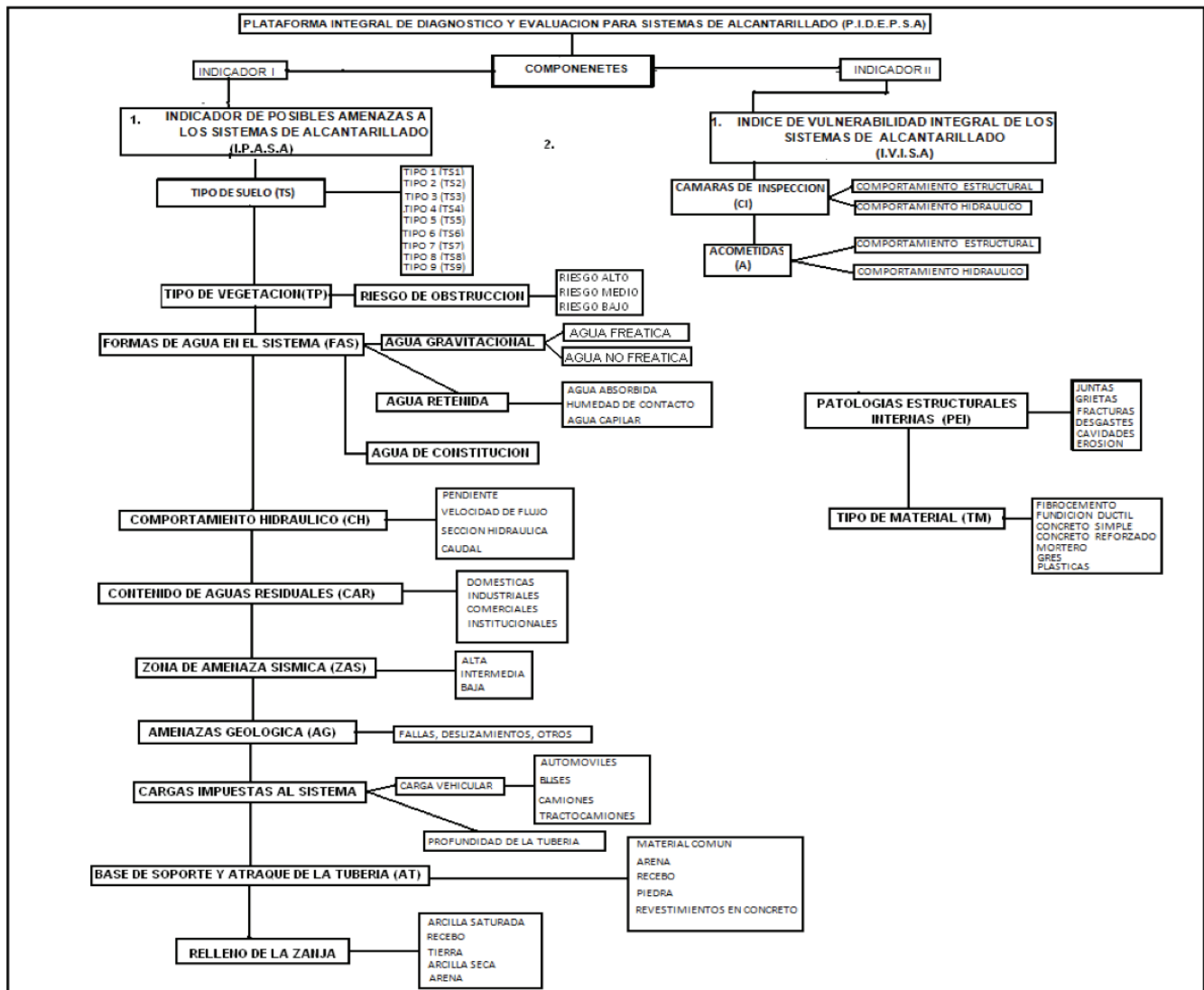
Diseñar una plataforma técnica que garantice la evaluación y el diagnóstico de las potenciales patologías de los sistemas de alcantarillado para efectuar la prevención, a partir del análisis de sus condiciones estructurales e hidráulicas tanto internas como externas, logrando

atender oportuna y eficientemente sus amenazas, garantizando la sostenibilidad ambiental urbana.

METODOLOGÍA

Se conceptuó como un estudio evaluativo para describir y valorar el funcionamiento del alcantarillado, dando una calificación al estado actual de éstos por medio de un modelo inédito que utiliza indicadores de tipo cuantitativo y cualitativo para determinar el riesgo que tiene el sistema de desagüe y sus componentes por tramos. El modelo se aplica para la infraestructura existente y en uso de alcantarillados, evaluando y diagnosticando las tres unidades que lo conforman: tuberías, cámaras o pozos de inspección y acometidas, definidas técnicamente según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Resolución 1096 de 2000). El análisis se efectúa mediante la definición de dos variables principales: *amenaza* y *vulnerabilidad*, a partir de dos indicadores: Indicador de Posibles Amenazas a los Sistemas de Desagüe (Ipasa) y el Indicador de Vulnerabilidad Integral de Sistemas de Desagüe (Ivisa) (figura 3).

Indicador de Posibles Amenazas a los Sistemas de Alcantarillado (Ipasa). Se define amenaza como aquellos factores que evitan el comportamiento ideal para el cual se diseñó el sistema, generando fallas dentro de éste. Se tienen diez parámetros fundamentales basados en la información técnica disponible y ajustada a los requerimientos de la normatividad en Colombia (Resolución 1096 de 2000) y a la teoría de diseño (Corcho, 1994). *Tipo de suelo (TS).* Se clasifican los diferentes suelos que se pueden encontrar como subrasante dentro del sistema de alcantarillado. Es uno de los más importantes puesto que soporta la estructura del sistema, considerando sus propiedades mecánicas, físico-químicas y granulometría, para así determinar su consistencia y capacidad de soporte. *Tipo 1 (TS.1).* Suelo de grano fino, consistencia dura ($Cu > 200$ Kpa), posiblemente preconsolidado y figurado, con una pendiente inferior a 10° y sin presencias de acuíferos confinados. *Tipo 2 (TS.2).* Suelo de grano fino, consistencia media ($50 < Cu < 200$ Kpa), con una pendiente inferior a 10° y sin presencia de acuíferos confinados. *Tipo 3 (TS.3).* Suelo de grano fino, consistencia blanda ($Cu < 50$ Kpa), con una pendiente del terreno inferior a 10° y sin presencias de acuíferos confinados. *Tipo 4 (TS.4).* Suelo



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 3. Mapa conceptual de la plataforma.

del tipo 1, 2 o 3 con presencia de acuíferos confinados. *Tipo 5 (TS.5)*. Suelo del tipo 1, 2 o 3 con pendiente del terreno superior a 10° con acuíferos o sin ellos. *Tipo 6 (TS.6)*. Suelo granular (arena, grava) en terreno plano o en pendiente, sin presencia de acuíferos confinados o libres. *Tipo 7 (TS.7)*. Suelo del tipo 6, con presencia de acuíferos confinados o libres. *Tipo 8 (TS.8)*. Suelo con apreciable grado de cementación, rocas blandas o fisuradas y alteradas. *Tipo 9 (TS.9)*. Roca poco fisurada

o alterada. *Tipo de vegetación (TV)*. Este factor indica qué clase de cobertura vegetal se encontrará en la zona de estudio y el riesgo de obstrucción al sistema que gracias a éstos se pueda presentar. Es necesario realizar una caracterización del tipo de vegetación que presenta riesgo de obstrucción dentro del sistema de desagüe. La presencia de raíces dentro del sistema no sólo disminuye el caudal sino que también genera acumulación de sedimentos, lo que es supremamente perjudicial. Hay dos

CAR.3	COMERCIALES	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	ICAR
CAR.3.1	Estaciones de servicio	10			
CAR.3.2	Asaderos	9			
CAR.3.3	Plazas de mercado	8			
CAR.3.4	Funerarias	8			
CAR.3.5	Restaurantes	6			
CAR.3.6	Panaderías	4			
CAR.3.7	Cafeterías	3			
SUBTOTAL					
CAR.4	INSTITUCIONALES	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	ICAR
CAR.4.1	Hospitales y centros de salud	9			
CAR.4.2	Instituciones educativas	8			
CAR.4.3	Albergues	6			
CAR.4.4	Edificios administrativos	5			
SUBTOTAL					
CAR.5	Precipitación	3			
SUBTOTAL					
TOTAL CONTENIDO DE LAS AGUAS RESIDUALES (CAR)					0,00
CODIGO	ZONA DE AMENAZA SISMICA (ZAS)				IZAS
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
ZAS.1	Alta	10			
ZAS.2	Intermedia	5			4
ZAS.3	Baja	3			
TOTAL					0,00
CODIGO	CARGAS IMPUESTAS AL SISTEMA (CIS)				ICIS
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
CIS.1	CARGA VEHICULAR	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	4
CIS.1.1	Automoviles (hasta 2 Ton)	1			
CIS.1.2	Microbuses, buses y busetas (hasta 6 Ton)	3			
CIS.1.3	Camiones y camionetas hasta 2 ejes (entre 6 y 15 Ton)	5			
CIS.1.4	Tractocamiones y tractomulas (entre 15 y 60 Ton)	10			
CIS.2	PROFUNDIDAD DE LA TUBERIA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	0,00
CIS.2.1	Menores a 0.70 m	10			
CIS.2.2	Entre 0.70 m y 1.20 m	7			
CIS.2.3	Mayores a 1.20 m	3			
TOTAL					0,00
BASE DE SOPORTE Y ATRAQUE DE LA TUBERIA (AT)					
CODIGO	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	iAT
AT.1	Material común	8			
AT.2	Arena	5			
AT.3	Material seleccionado (Recebo)	4			3
AT.4	Piedra	4			
AT.5	Revestimientos en concreto	1			
TOTAL					0,00
CODIGO	RELLENO DE LA ZANJA (RZ)				IRZ
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
RZ.1	Arcilla Saturada	10			
RZ.2	Recebo	8			
RZ.3	Tierra	6			3
RZ.4	Arcilla Seca	5			
RZ.5	Arena	3			
TOTAL					0,00
CODIGO	COMPORTAMIENTO HIDRAULICO (CH)				ICH
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
CH.1	PENDIENTE	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	5
CH.1.1	Pendiente longitudinal mayor a la de diseño	10			
CH.1.2	Pendiente longitudinal igual a la de diseño	3			
CH.1.3	Pendiente longitudinal menor a la de diseño	7			
CH.2	VELOCIDAD DE FLUJO	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
CH.2.1	Velocidad de flujo mayor a la máxima permitida	10			
CH.2.2	Velocidad de flujo acorde al diseño	2			
CH.2.3	Velocidad de flujo menor a la mínima permitida	6			
CH.3	SECCION HIDRAULICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
CH.3.1	Diametro insuficiente para la demanda	10			
CH.3.2	Diametro necesario para la demanda acorde al di	3			
CH.3.3	Diametro mayor al necesario para la demanda	1			
CH.4	CAUDAL	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
CH.4.1	Caudal mayor al correspondiente con el diseño	10			
CH.4.2	Caudal igual al correspondiente con el diseño	1			
CH.4.3	Caudal menor al correspondiente con el diseño	4			
TOTAL					0,00
TOTAL IPASA			TRAMO #	0	0,00

Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 4. Factores y procesos del indicador Ipassa.

tipos de crecimientos radiculares diferenciados entre sí y asociados a dos grandes grupos de árboles: árboles con sistema radicular superficial, asociados generalmente a caducifolias, y árboles con sistema radicular pivotante, asociados a las coníferas.

En la figura 4 se resumen los factores y pesos de cálculo del indicador I_{pasa}. Cada factor contiene sus propias variables, con sus correspondientes valores según su nivel de incidencia en la amenaza, que se suman y se afectan por un peso correspondiente al factor de manera integral, para obtener la calificación cuantitativa.

El rango de valores que definen la potencial amenaza se define así:

Definición	Rango
Inexistente	< 20
Baja	20-99
Media	100-199
Alta	200-400
Extrema	> 400

Indicador de Vulnerabilidad Integral de Sistemas de Alcantarillado (I_{visa}). Se define como la vulnerabilidad de algunos componentes del sistema de alcantarillado frente a los impactos de origen natural, antrópico y de operación. Se determina a partir de los tipos de material en que están construidas las tuberías, juntas, acometidas y cámaras de pozos de inspección. **Tubería (T).** Fibrocemento (FC). Tiene menor peso que otras tuberías rígidas. Puede ser sensible a la corrosión por ácidos y por ataque del sulfuro de hidrógeno, pero si el curado ha sido correctamente efectuado al vapor y alta presión (autoclave) puede utilizarse incluso en ambientes moderados de aguas agresivas o suelos con altos contenidos en sulfatos. **Fundición dúctil (FD).** Se utiliza con frecuencia en cruces de ríos o cuando la tubería tenga que soportar cargas extremadamente elevadas, cuando se requiera un grado elevado de estanqueidad o cuando se prevea que se puedan producir graves problemas debido a las raíces del suelo. Son sensibles a la corrosión por ácidos y al ataque del sulfuro de hidrógeno y, en consecuencia, no deben emplearse en suelos salobres, a menos que se les procure la protección adecuada. **Hormigón armado (HA).** Vulnerable a la corrosión interna si la atmósfera por encima del agua residual contiene sulfuro de

hidrógeno, o a corrosión externa si el suelo es ácido o con alto contenido en sulfatos. **Concreto vibrocentrifugado (CV).** Especialmente adecuado para alcantarillas principales de gran longitud, carentes de conexiones domiciliarias y cuando se requiera buena estanqueidad. Propenso a la corrosión (igual que la de hormigón armado). **Tubería flexible (TF).** Es una alternativa a las tuberías de fibrocemento y gres. Ligeras pero robustas. Muy resistentes a la corrosión. **Gres (GR).** Durante muchos años ha sido la tubería más utilizada en redes de desagüe y todavía lo es para alcantarillas de pequeño y mediano tamaño. Resistente a la corrosión por ácidos y álcalis. No es atacada por el sulfuro de hidrógeno, pero es frágil y de fácil rotura. **Juntas (J).** Para este factor se consideran su óptimo funcionamiento, sus materiales y el estado de las juntas. **Acometidas (A).** En este factor se analiza el estado de las acometidas, así como de los acoples entre éstas y los colectores. **Cámaras de inspección (CI).** Dentro de este factor se analizan el estado de las cámaras de inspección, sección hidráulica, revestimiento, autolimpieza, entre otros.

Cada factor contiene sus propias variables, con sus correspondientes valores según su nivel de incidencia en la vulnerabilidad, que se suman para obtener la calificación cuantitativa (figura 5).

El rango de valores que definen la potencial vulnerabilidad es el siguiente:

Definición	Rango		
	Tuberías	Cámaras o pozos	Acometidas
Inexistente	< 5	< 3	< 3
Baja	6-24	3-10	3-7
Media	25-39	11-15	8-12
Alta	40-55	16-20	13-17
Extrema	< 55	> 20	> 18

Indicador del riesgo. Obtenidos los indicadores I_{pasa} e I_{visa}, se conjugan para alcanzar el nivel de riesgo a que está expuesto cada componente del sistema de desagüe (tubería, colector-pozo y acometida), a partir de la matriz de riesgo (figura 6).

CODIGO	TIPO DE SUELO (TS)		TRAMO #		ITS
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
TS.1	Tipo 1	2			
TS.2	Tipo 2	5			
TS.3	Tipo 3	6			
TS.4	Tipo 4	7			
TS.5	Tipo 5	8			5
TS.6	Tipo 6	4			
TS.7	Tipo 7	10			
TS.8	Tipo 8	2			
TS.9	Tipo 9	1			
SUBTOTAL TIPO DE SUELO (TS)				0,00	0,00
CODIGO	TIPO DE VEGETACION (TV)				iTV
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
TV.1	RIESGO DE OBSTRUCCION				
TV.1.1	Riesgo Alto	10			
TV.1.2	Riesgo Medio	5			5
TV.1.3	Riesgo Bajo	3			
SUBTOTAL TIPO DE VEGETACION (TV)				0,00	0,00
CODIGO	FORMAS DE AGUA EN EL SISTEMA (FAS)				iFAS
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
FAS.1	AGUA GRAVITACIONAL				
FAS.1.1	Agua Freática	10			
FAS.1.2	Agua no Freática	8			
SUBTOTAL AGUA GRAVITACIONAL				0,00	
FAS.2	AGUA RETENIDA				
FAS.2.1	Agua Absorbida	6			5
FAS.2.2	Húmedad de Contacto	2			
FAS.2.3	Agua Capilar	3			
SUBTOTAL AGUA RETENIDA				0,00	
FAS.3	AGUA DE CONSTITUCION	2			
SUBTOTAL AGUA DE CONSTITUCION				0,00	
SUBTOTAL FORMAS DE AGUA EN EL SISTEMA (FAS)				0,00	0,00
CODIGO	CONTENIDO DE LAS AGUAS RESIDUALES (CAR)				iCAR
	CARACTERISTICA	PUNTAJE	INSPECCION	CALIFICACION	
CAR.1	DOMESTICAS				
CAR.1.1	Aguas Negras	7	x		
CAR.1.2	Aguas Grises	4	x		4
SUBTOTAL				0,00	0,00
CAR.2	INDUSTRIALES				
CAR.2.1	Curtiembres	10			
CAR.2.2	Petróleo	10			
CAR.2.3	Pulpa y papel	10			
CAR.2.4	Acero	10			
CAR.2.5	Fertilizantes de fosfato	9			
CAR.2.6	Química orgánica	9			
CAR.2.7	Aluminio	8			
CAR.2.8	Automotriz	8			
CAR.2.9	Fertilizantes de nitrógeno	8			
CAR.2.10	Frigoríficos	8			
CAR.2.11	Acabados de metales	8			
CAR.2.12	Químicos orgánicos	8			
CAR.2.13	Textiles	8			
CAR.2.14	Asbestos	7			
CAR.2.15	Generación de vapor	7			
CAR.2.16	Enlatados	6			
CAR.2.17	Plásticos	6			
CAR.2.18	Levante de animales	5			
CAR.2.19	Lechera	5			
CAR.2.20	Cemento y concreto	5			
CAR.2.21	Azúcar de remolacha	4			
CAR.2.22	Vidrio	4			
CAR.2.23	Molinos de granos	4			
CAR.2.24	Cervecera	3			
SUBTOTAL				0	

Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 5. Factores y procesos del indicador Ivisa.

MATRIZ DE RIESGO: IPASA vs. IVISA						
		MATRIZ DE RIESGO				
IVISA	E	3	3	4	5	5
	A	2	3	4	5	5
	M	2	2	3	4	5
	B	1	1	2	3	4
	I	1	1	1	2	3
		I	B	M	A	E
IPASA						

Figura 6. Matriz de riesgo.

La definición y descripción de cada nivel de riesgo permite especificar las acciones propuestas para intervenir el componente del sistema de desagüe evaluado, así como su cualificación indicada (figura 7).

Nivel	Descripción	Acciones
I	No existe riesgo (I)	No se requiere acción alguna
II	Existe leve riesgo (B)	Se requiere algún tipo de acción o intervención a mediano plazo
III	Existe riesgo notorio (M)	Se requieren acciones e intervenciones a corto plazo
IV	El riesgo es manifiesto (A)	Se requiere la intervención inmediata para rehabilitación y reutilización
V	El riesgo es extremo (E)	Se requiere intervención inmediata y prioritaria para atender la potencial emergencia

La priorización se da a partir del nivel de riesgo del componente, en el siguiente orden descriptivo:

E-E E-A A-A E-B M-M A-B M-B
A-I M-I B-I I-I

Orden de prioridad →
E: Extremo, A: Alto, M: Medio, B: Bajo, I: Inexistente.

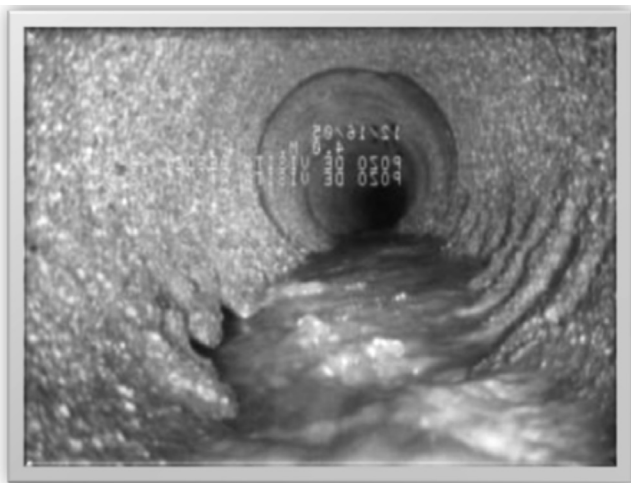
Matriz de riesgo	
Calificación de matriz de riesgo	
1	No se requieren acciones e intervenciones que impliquen modificaciones de la unidad. Se considera apta para funcionar en condiciones seguras y cumple con los requerimientos técnicos.
2	Se requiere algún tipo de acción e intervención, programada a mediano plazo. La unidad puede funcionar en condiciones seguras y requiere monitoreo periódico, sin que implique modificaciones técnicas.
3	Se requiere algún tipo de acción e intervención a corto plazo, para que la unidad pueda funcionar en condiciones seguras y requiere monitoreo periódico con algún tipo de modificación técnica para garantizar su estabilidad.
4	Se requiere la intervención inmediata para que la unidad pueda funcionar en condiciones seguras, verificando su aprovechamiento parcial o total. Se requiere el monitoreo tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad para mitigarlas y evitar repetición de evento. Se considera emergencia sanitaria.
5	Se requiere la intervención inmediata y prioritaria para reemplazar o rehabilitar la unidad y asegurar su funcionalidad en condiciones seguras, mitigando en extremo tanto la amenaza como la vulnerabilidad. Se considera emergencia sanitaria y ambiental, aislando el sector para contrarrestar los efectos posteriores.

Figura 7. Calificación de la matriz de riesgo.

RESULTADOS

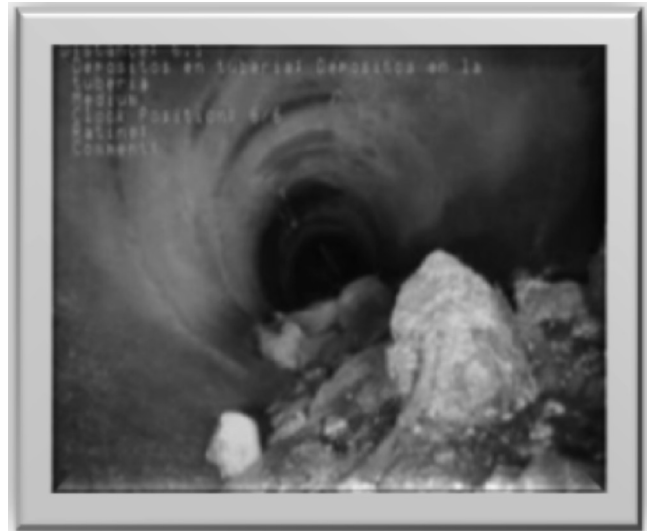
La plataforma diseñada permite definir en tiempo real la situación de cada unidad que compone el sistema de alcantarillado, para tomar decisiones técnicas y financieras a corto, mediano y largo plazos, como se evidenció en su aplicación práctica en varios tramos del sistema de alcantarillado de la ciudad de Ibagué. La principal patología detectada en la investigación fue el desgaste prominente por la vejez de tuberías cuya construcción y tiempo de uso superan los 50 años, seguido de malos procesos constructivos en tuberías más recientes, mal uso del sistema de desagüe por presencia interna de elementos extraños –balones, animales muertos, juguetes, residuos sólidos de gran tamaño–, deficiencia hidráulica y estructural por probables errores de diseño, y el uso de tuberías de concreto de mala calidad (no vibrocéntrica) que se desgastan con menos de cinco años de uso. Las patologías más recurrentes se ilustran más adelante (figuras 8 y 9).

Especial interés suscitó la presencia de raíces en varios tramos de alcantarillado, por especies arbustivas y arborícolas en tuberías y pozos de inspección, ocasionando problemas de obstrucción y deterioro. El desconocimiento de este tipo de afectación por diversas especies urbanas usadas como componentes ambientales y ornamentales urbanos se evaluó dentro del contenido de la investigación para definir el nivel de riesgo de éstas (figura 10).



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 8. Imagen de una tubería con desgaste prominente por tiempo de uso (sistema de alcantarillado de Ibagué).



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 9. Imagen de una tubería con sedimentos (sistema de alcantarillado de Ibagué).



Fuente: Ospina, Ramírez, Díaz, Morales, Ordóñez y Lozada, 2009.

Figura 10. Imagen de una tubería con afectación radicular (sistema de alcantarillado de Ibagué).

De las tres unidades auscultadas y que conforman el sistema de alcantarillado, el mayor daño ambiental lo ocasiona el colapso de los pozos de inspección, que se caracteriza por afectar áreas más amplias, con difícil manejo de aguas residuales e incontrolada emisión de gases, dada su concurrencia y salida de tramos. El proceso constructivo para su rehabilitación es más

complicado y requiere, en muchos casos, suspender el uso del sistema de alcantarillado aferente.

La Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado de Ibagué (Ibal S.A. ESP. Oficial), encargada del servicio de desagüe, apoyó con logística mediante el préstamo de la tecnología robótica con cámara de alta resolución que permitió la auscultación interna de las tuberías. En el proceso de diseño y aplicación de la plataforma se involucró un funcionario de esa empresa, quien continuó hasta la fecha con su aplicación en buena parte del sistema de alcantarillado, permitiendo la predicción objetiva de la investigación y contrarrestando a tiempo potenciales colapsos. Esto ha permitido entrar en un programa masivo de prevención con un programa de catastro de redes con definición de potenciales patologías, traducido en ahorro de recursos técnicos y económicos y mayor eficiencia del sistema.

La plataforma se está aplicando actualmente a los sectores más vulnerables del sistema de alcantarillado, permitiendo la definición de tramos críticos por diversas patologías y atendiéndolos en un ordenado y eficiente programa de prevención y priorización. No se han completado las estadísticas consolidadas de todo el sistema dada su extensión, pero en la actualidad se está realizando el barrido de inspección, que permitirá obtener el panorama completo. La priorización se hace por sectores, por barrios o por tramos, con especial atención en aquellos que completan mayor tiempo de uso. Los tramos que presentan algún tipo de colapso son atendidos de manera inmediata y prioritaria, pero su incidencia es cada vez menor a causa del dinámico programa de prevención que se lleva a cabo a partir de la plataforma propuesta.

CONCLUSIONES

Esta propuesta es una valiosa herramienta técnica que contribuirá significativamente a la sostenibilidad ambiental urbana, previniendo la exposición a cielo abierto de aguas residuales y gases que circulan por los sistemas de alcantarillado, sobre todo en ciudades capitales, donde se concentra el mayor número de población. Puede implementarse en países de América Latina que viven situaciones similares.

Gracias a la aplicación de la plataforma en la ciudad de Ibagué, se pudo conocer la situación real del sistema de alcantarillado, con preocupantes resultados evidenciados por colapsos de infraestructura. Ha permitido en el último año la planificación acertada de intervención de dicho sistema, hasta el punto de que no se han vuelto a presentar colapsos de gran magnitud ni exposición a cielo abierto de contaminación. De persistir su aplicación, el riesgo se mitigará.

Dada la recurrencia de fenómenos naturales que incrementan la precipitación de aguas lluvias en algunas épocas del año, estas plataformas técnicas cumplen un papel clave porque pueden contribuir a determinar tramos críticos por predicción de potenciales daños y colapsos, al incrementarse el caudal de agua residual a valores inadmisibles por la capacidad hidráulica de las tuberías instaladas.

El transporte de las aguas lluvias se convertirá, en el futuro próximo, en el principal problema de patologías en los sistemas de alcantarillado en zonas urbanas porque su elevado incremento sobrepasará la capacidad instalada, precaria en muchas ciudades, donde incluso se trata de sistemas combinados que por el efecto de reboses producirán problemas sanitarios y ambientales.

REFERENCIAS

1. Presidencia de la República (1991). Constitución Política de Colombia.
2. ONU (1989). Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. Convención sobre los derechos del niño. Extraído el 30 de agosto de 2011 de <http://www2.ohchr.org/spanish/law/crc.htm>.
3. Unicef (2011). El agua potable, el saneamiento y el ambiente sano: un derecho humano. Extraído el 30 de agosto de 2011 de <http://www.unicef.org.co/0-aguaysaneamiento.htm>.
4. Restrepo, G. (2002). *Promoción de la salud: cómo construir vida saludable*. Bogotá: Editorial Médica Panamericana.
5. Suárez, A. & Ospina, O. (2005). Censo Sanitario Urbano del Departamento del Tolima [tesis de pregrado]. Ibagué: Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Ibagué.
6. Ospina, O., Ramírez, H., Díaz, J., Morales, R., Ordóñez, K. & Lozada, H. (2009). Plataforma integral para el diagnóstico y evaluación de patologías de sistemas de alcantarillado (Pidepsa). [tesis meritoria de pregrado]. Ibagué: Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Ibagué.
7. Resolución 1096 (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000. Ministerio de Desarrollo Económico de la República de Colombia.
8. Corcho, F. (1994). *Sistemas de alcantarillado*. Universidad de Medellín. Centro General de Investigaciones.

Gestión tecnológica en el sector textil de Medellín (Colombia). La visión de los empresarios

Technology management in the textile sector of Medellin (Colombia). The entrepreneurs vision

JORGE HENRY BETANCUR AMARILES¹, ISNARDO LUIS VARGAS MARÍN²

1. Institución Universitaria de Envigado. Licenciado en Educación. Magíster en Desarrollo.
jhbeta_@hotmail.com

2. Institución Universitaria de Envigado. Administrador. Magíster en Administración
ivargas30@hotmail.com

Recibido: 31/10/2011 Aceptado: 05/12/2011

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

Resumen

La manera como se han gestionado las empresas del sector textil en Colombia, particularmente en el campo de la tecnología, es tema de investigación, toda vez que los referentes mundiales plantean retos a la recuperación de la competitividad de este sector que tiene una significativa participación en la economía de Colombia.

En este artículo, que forma parte de una investigación, se recogen las percepciones de algunos empresarios de Medellín en aspectos relacionados con la modernización en la gestión tecnológica, procurando hacer un análisis de la situación en que se encuentra el país respecto a los referentes de naciones que han logrado posicionarse en el mercado global. El objetivo es dar algunas recomendaciones que se integren en los proyectos de transformación productiva para el sector.

Palabras claves: gestión tecnológica, sector textil, tendencias, empresarios.

Abstract

The way how textile sector companies has been managed in Colombia, especially in the technology field, is a research topic, due to the fact that the world referents proposed challenges to this sector competitiveness which has a meaningful participation in Colombian economy.

This paper, which is a research product, collects some Medellin entrepreneurs' perceptions, in aspects related to modernization in technological management, doing a Colombia's situation analysis compared to other countries which have achieved positioning in global market. The objective is to provide some recommendations in order to be integrated in productive transformation projects for textile sector.

Keywords: technological management, textile sector, trends, businessmen.

INTRODUCCIÓN

En los estudios que se han realizado sobre el sector textil en Colombia¹⁻⁴ se refleja la importancia que ha tenido este subsector para el desarrollo económico del país, en particular de algunas regiones, entre las que se cuentan Medellín y el Valle de Aburrá. La industria textil de esta región tiene una historia de más de 70 años y conserva una presencia importante en el sector industrial, lo cual se ha fortalecido con la ejecución de proyectos que ubican a esta región en el concierto mundial en temas de moda y producción textil.

Por medio del proyecto “Medellín, ciudad clúster”⁵ se ha vinculado a los empresarios, con el fin de mantenerlos al tanto de eventos relacionados con las tendencias mundiales para este sector y de la agenda de transformación productiva que se quiere desarrollar en el país; en el presente texto se recogen sus percepciones, las cuales se ponen en un escenario que permite contrastarlas con lo que sucede en el sector educativo para este campo, con los estudios efectuados en el país y con las tendencias en el mundo en materia de textiles, diseño y confección.

METODOLOGÍA

Se trabajó con el método deductivo, con un enfoque cualitativo y alcance descriptivo, a partir de un diseño no experimental, con uso de entrevistas como instrumentos básicos.

Las entrevistas fueron no estructuradas y, en la mayor parte de los casos, se programó más de un encuentro con los entrevistados, con el objeto de posibilitar las contrastaciones que resultaron en el proceso de la recolección de información, tanto por los datos obtenidos en los diálogos con otros entrevistados, como por la información recabada en la revisión de textos e investigaciones.

La Unidad de Análisis es el sector textil-confección-diseño y moda del área metropolitana de Medellín (Colombia). Se incluyeron en el grupo de entrevistados empresarios de diferentes eslabones de la cadena que conforman el sector.

El propósito ha sido identificar los últimos avances de las tecnologías que soportan el negocio del sector textil y su respectivo modelo de gestión, y confrontarlos con los procesos de gestión aplicados en el sector

textil-confección-diseño y moda, entre los empresarios de Medellín (Colombia).

RESULTADOS

Con miras a lograr el objetivo propuesto y orientados a la aplicación de la metodología que propone una contrastación de la percepción de los empresarios con otras fuentes de información, se presentan a continuación los referentes que se propondrán para la reflexión, comenzando por la síntesis de las tendencias mundiales, continuando con los estudios actuales sobre la situación del sector en Colombia y cerrando con las percepciones de los empresarios.

La gestión tecnológica en el sector textil a nivel mundial

Con el uso de información secundaria, se sintetizó la caracterización del sector textil-confección-diseño-moda-comercialización a nivel mundial; para ello se entrelazaron las relaciones entre entradas, procesos y subprocesos, con las salidas para los clientes y los mecanismos de monitoreo tanto proactivos como de retroalimentación, que permiten la sustentabilidad del sector en el tiempo (tabla 1).

Allí se detalla la manera como se van ampliando los conceptos y tendencias, a partir de lo que demandan los consumidores y la interrelación con los insumos, lo que permite vincular a un mayor número de actores participantes en el procesamiento, en la medida en que las demandas implican nuevos elementos, con los cuales se requiere la vinculación de nuevos actores que garanticen los insumos y los procesos en función de la respuesta a las necesidades del mercado.

La matriz SWOT refleja situaciones diversas en relación con lo que han conseguido países con desarrollos elevados en la gestión tecnológica aplicada a la producción textil, lo que ha posibilitado identificar factores fuertes y oportunidades para su desarrollo; esto ha debido contrastarse con las debilidades y amenazas que reflejan las características del sector en aquellos países donde se perciben rezagos en la vinculación de los intereses económicos de esta industria con procesos innovadores, dejando una estela de debilitamiento que absorben quienes aprovechan estos debilitamientos para hacerse fuertes.

Tabla 1
Interrelaciones entre entradas, procesos y salidas para los clientes

ENTRADAS-PROVEEDORES	PROCESOS	SALIDAS PARA LOS CLIENTES
Mano de obra	Cosido.	Ventas de mano de obra.
Precio, como base del valor agregado	Cosido, trazo, corte, entretela, servicio de corte, hilos, forros, proveedor de avíos.	Ventas de producto.
Usos funcionales del producto requeridos por el cliente	Cosido, trazo, corte, entretela, servicio de corte, hilos, forros, proveedor de avíos.	Ventas de funcionalidad (tecnología).
Gusto del cliente por lo que se le ofrece.	Patrones, diseño, tendencias de moda, bordado, estampado, definición de tipo de prendas, calidad, finanzas, telas, trazo, corte, entretela, servicios de corte, hilos, forros, proveedor de avíos.	Ventas de moda.
Identidad, orgullo, construcción de marca, creatividad.	Merchandising, lanzamiento, desfiles, posicionamiento, patrones, diseño, tendencias de moda, bordado, estampado, definición de tipo de prendas, calidad, finanzas, telas, trazo, corte, entretela, servicios de corte, hilos, forros, proveedor de avíos.	Ventas de conceptos personalizados, para los clientes, venta de marca antes que diseño.
Glamur, lujo, belleza, misticismo, aventura, poder, música, deporte	Comercialización propia y de otros fabricantes, patrones, diseño, tendencias de moda, bordado, estampado, definición de tipo de prendas, calidad, finanzas, telas, trazo, corte, entretela, servicios de corte, hilos, forros, proveedor de avíos.	Ventas de emoción, para los clientes en forma personalizada.
Responsabilidad social, amor, arte, conciencia.	<i>Retails</i> , corredores, bienes raíces, <i>merchandising</i> , patrones, diseño, tendencias de moda, bordado, estampado, definición de tipo de prendas, calidad, finanzas, telas, trazo, corte, patrones, entretela, servicios de corte, hilos, forros, proveedor de avíos.	Ventas de sentimientos, para los clientes en forma personalizada.

Fuente: Aztex Trading S.A. de CV. México.

Por ello aparecen elementos contrastantes, procuran-do recoger lo que se ha percibido como las principales situaciones que viene presentando este sector de la industria y que no se dan de la misma manera en los diferentes países (tabla 2).

El sector textil colombiano y la gestión tecnológica

En este apartado se sintetizan las grandes líneas sobre el sector textil en Colombia; se destacan las cifras que se manejan en diferentes organismos y se cierra con las propuestas que se han venido haciendo con el fin de recuperar su dinamismo y ponerlo en el escenario mundial a niveles competitivos.

Presencia del sector textil en el desarrollo del país

El sector textil se ha constituido en uno de los subsec-tores con mayor impacto en Colombia, especialmente por la generación de empleo y su participación en el desarrollo industrial y económico del país¹. A través de su mediación, en el siglo XX se dinamizó el ingreso de tecnologías que apoyaron la producción en eslabones básicos de la cadena y catapultaron todo el proceso de producción en confecciones, logrando un posicionamiento en el entorno internacional².

Esto generó un impacto en la economía nacional, sobre todo en aspectos como la demanda de mano de obra en forma masiva; las ventas, que acrecentaron su participación en el PIB nacional y de algunas regio-

Tabla 2

Dofa o Swot sobre la actualidad del sector textil en el mundo

OPORTUNIDADES	FORTALEZAS
<p>Los empresarios interpretan los deseos de los clientes desde los puntos de distribución, comercialización y venta, así anticipan la demanda con mayor confiabilidad.</p> <p>Existe conciencia entre los empresarios de que se encuentran en un mercado de compradores y no de oferta, por lo que están más dispuestos a hacer una venta más circulante y de servicio.</p> <p>Se empieza a tener conciencia de la necesidad de contar con institutos especializados en moda, diseño, marca, fidelización, mercadeo personalizado, lo que les garantiza mayor participación en el mercado o competitividad.</p> <p>Existe una tradición fibreira, en los países líderes, con excelentes materias primas, lo que les garantiza asegurar los productos desde atrás en la cadena.</p>	<p>El nuevo concepto de <i>fast fashion</i> para empresas de cultura de diseño y creatividad.</p> <p>A través del <i>fast fashion</i> es posible producir, a precios atractivos, prendas de última moda del gusto del consumidor, pero con bajos precios, dados sus cortos ciclos de vida.</p> <p>Poder utilizar tecnologías de Kanban en la cadena de manufactura-diseño-moda-comercialización, con la consiguiente optimización de costo de capital de trabajo, al disminuir la inversión en inventarios.</p> <p>Poder usar excedentes no utilizados de inventarios para tener mayores disponibilidades para productos de mayor rotación, por ser más solicitados por los clientes.</p> <p>Poder utilizar las capacidades instaladas de las plantas productoras y comercializadoras, desde la demanda.</p> <p>El nacimiento, desarrollo, madurez de las grandes escuelas, institutos técnicos especializados en diseño, moda, marca, mercadeo personalizado, de prendas de lujo, a nivel mundial, que facilitan el desarrollo y formación de talentos, las innovaciones, hacia el cambio frecuente de colecciones y hacia el enfoque más personalizado de producto y servicio.</p> <p>Disponer de avíos, como complementos adecuados al concepto de diseño que le dan valor al producto ofrecido.</p> <p>La flexibilización mental de los empresarios del sector para cambiar desde el paradigma de las megatendencias, al concepto práctico y real hoy de microtendencias.</p> <p>La mentalización del cambio de enfoque del concepto tradicional de alto volumen al de alto valor.</p> <p>Mercado potencial de paquete completo utilizando la herramienta de <i>just in time</i>.</p>
AMENAZAS	DEBILIDADES
<p>Ya no hay posibilidad de negociar cantidades a largo plazo.</p> <p>El mercado de productos básicos está saturado, con concepto de bajísimo precio, especialmente chinos e hindúes.</p> <p>Prolifera el mercado informal, constituyéndose en una competencia muy fuerte para productores y comercializadores organizados y que pagan impuestos.</p> <p>No existe en muchos países un concepto fuerte de asociatividad fuerte cultural, para promover la comercialización de paquetes completos.</p> <p>No se aprovechan los institutos técnicos especializados de moda, mercadeo, marca, fidelización y de personalización de mercado, para la aplicación del <i>lean retailing</i>.</p> <p>La ilegalidad de las grandes cadenas de comercializadoras, tractoras y manufactureras no retribuye dentro de lo legal a sus colaboradores en muchos países, lo que genera una falta de compromiso de éstos con sus procesos o al menos una debilitación en su cuidado y calidad de las cosas bien hechas, cero defectos.</p>	<p>No hay conciencia de la necesidad de integrar los maquiladores o el <i>outsourcing</i> a la cadena, haciendo un paquete completo sin las garantías de oportunidad, calidad, flexibilidad y precios adecuadas.</p> <p>Los lugares físicos donde se producen tanto las prendas como los diseños no están bien presentados, asépticos, estéticos, lo que contradice el concepto de moda de alta calidad que se pretende.</p> <p>No hay suficientes acabadores o terminadores de la prenda, como fuentes de inspiración en su diferenciación, por el poco valor que se ha dado a su estímulo, incentivo, apropiación de recursos para su desarrollo y formación, y la escasa integración con los institutos externos que tienen esta experiencia.</p> <p>No se ha concientizado a los empresarios de la necesidad de tener planes estratégicos a largo plazo en las compañías, pues parten del paradigma de que como la demanda es difícil de pronosticar, dicha planeación no equipara el costo con el beneficio arrojado.</p>

Fuente: Aguilar y Anderton. Plan estratégico para la recuperación de la competitividad de las pymes de la industria del vestido.

nes; el impulso a economías de escala, que movieron otros sectores y el posicionamiento de la calidad en la producción colombiana. Otro aspecto es la implementación de procesos de formación de mano de obra calificada para el sector, de la mano del Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena) y de algunas otras instituciones.

Entonces se entendía al sector como un consumidor de tecnología³, con la particularidad de que en Colombia se realizó un proceso lento de reconversión y de inversión en nueva maquinaria, con escasos capitales destinados a nuevos desarrollos en tecnología para apoyar el crecimiento que se tuvo en todos los eslabones del sector.

De manera progresiva se fueron ampliando las brechas tecnológicas³ que pusieron a la industria textil en dificultades en los últimos años del siglo XX², como consecuencia de los procesos globalizadores que fueron llegando a todas las latitudes y penetrando todos los sectores económicos, generando reacciones en cadena de cada situación acaecida en cualquier lugar y agudizando el impacto de las crisis mundiales en quienes se hallaron en situación más débil.

Esto llevó a que el sector se sintiera obligado a abordar “un programa de modernización de sus procesos productivos y administrativos”², con miras a responder a los riesgos inminentes para el sector, entre los que se contaron el de la obsolescencia tecnológica³.

La situación en que se encontró el sector textil en Colombia, de cara a los desarrollos mundiales que pusieron en el escenario nuevos protagonistas de la competencia por el mercado, dejaron en evidencia diversos componentes de la caracterización que había conseguido el desarrollo textilero colombiano²:

- El desconocimiento de la evolución que tenía el sector en el contexto mundial y la fuerza que adquirió en una economía globalizada.
- Los desarrollos tecnológicos que apoyaron la producción textil y de confecciones en el mundo, haciendo del sector uno de los que había conseguido grandes avances, de los cuales Colombia no venía participando.
- Los impactos de una economía globalizada y aperturista que exigieron nuevos aprendizajes, vinculados a la manera de hacer negocios y no sólo de producir.
- La forma como las interacciones culturales marcaron nuevas tendencias en los gustos de los consumido-

res y, por tanto, en las demandas de los usuarios de prendas de vestir.

- La alta capacidad de la mano de obra colombiana, que requería con urgencia procesos de fortalecimiento en la formación de nuevas competencias, articuladas a nuevas tecnologías y nuevas maneras de producción.
- La calidad y creatividad de los colombianos como una potencialidad para enfrentarse a las crisis que llegaron de la mano de las transformaciones que tenía el sector en el mundo.
- Los efectos de la devaluación del peso colombiano frente a las monedas de países con desarrollos tecnológicos que soportan el sector.
- Las debilidades del sector educativo en relación con las nuevas demandas de las tendencias del sector en todos los niveles.
- La escasa preparación del país para enfrentar los nuevos desafíos mundiales, expresados en políticas públicas en las que los empresarios del sector no encontraron un apalancamiento.
- La desvinculación del país, tanto de parte de los empresarios del sector como de los administradores del gobierno, respecto a las organizaciones mundiales y el establecimiento de políticas internacionales respecto a esta industria.
- La escasa preparación de los empresarios textileros para abordar las urgencias de extenderse a mercados internacionales, constituyendo la cultura exportadora como una práctica usual en la gestión de las empresas.

Todo ello generó un reto que activó la búsqueda de soluciones creativas y asociadas en las que comenzaron a proponerse estrategias y caminos para seguir, con metas establecidas para las siguientes décadas.

Tradicionalmente, la industria textil se ha concentrado en tres ciudades: Medellín, Bogotá y Cali. Más recientemente, han aparecido otros departamentos con alguna participación porcentual en el sector, como Atlántico, Tolima, Santander y Quindío.

La aparición de programas de formación de capital humano para el sector ha sido reciente; valga anotar que el Sena mantiene sus procesos de formación, especialmente en Medellín y Bogotá. Adicional a esto, algunas universidades de estas ciudades han incurrido en campos como la ingeniería textil y el diseño de

vestuario, ampliando el portafolio ofrecido hasta hace algunos años.

De igual manera, han venido apareciendo una serie de entidades, asociaciones y agremiaciones que, de la mano del gobierno, se vinculan a megaproyectos que apoyan a los empresarios para transformar competitivamente el sector.

Algunas cifras manejadas en las entidades del Estado y organizaciones del sector textil permiten hacerse una idea del panorama textil en la actualidad:

- El sector textil y de confecciones es uno de los más importantes y dinámicos rubros de la economía colombiana. Representa el 9% del PIB del sector industrial/manufacturero y genera más de 600 mil empleos (fuente: Ministerio de Comercio, Industria y Turismo y embajada de Colombia en Japón).
- El sector textil participa con el 20% del empleo del sector industrial y 5% de las exportaciones nacionales (fuente: McKinsey, 2009).
- Las importaciones de textiles (US\$952 millones) son superiores a las exportaciones (US\$707 millones), en tanto que en confección las exportaciones son mayores (US\$1.382 vs. US\$407 millones) (fuente: Dane, 2008).
- La informalidad en el sector se estima en un 43% (fuente: encuesta DNP, 2008). Esto se debe a los altos costos de la formalidad, entre los que se cuentan la tramitomanía y los altos impuestos (Cfr. McKinsey, 2009).
- El tamaño del mercado interno colombiano en el sector es muy pequeño, llegando al 1% del tamaño del mercado de Estados Unidos (Cfr. McKinsey, 2009).
- Apenas el 0,6% de las empresas son grandes, mientras el 98% son microempresas o pymes (fuente: Cámara de Comercio de Medellín).
- La inversión extranjera en el sector en 2008 llegó a US\$35 millones (Fuente: Banco de la República, Proexport) y en 2009 ascendió a US\$45,6 millones (fuente: Banco de la República).

En general, se tiene la percepción de que el sector textil es un sector dinámico en el que existen intereses de organizaciones mundiales, dado que Colombia ha enfrentado reveses para la economía de los textiles, al tiempo que ha demostrado su alta capacidad de recuperación.

Resultados de investigaciones en el sector

Entre los textos revisados se encuentran opiniones coincidentes acerca de las dificultades que ha tenido el sector textil en Colombia, sobre las necesidades de renovación en aspectos administrativos, tecnológicos y de capital humano, y sobre la actitud para asumir retos y cambios; ello se refleja en las siguientes anotaciones:

- **El sector textil en Colombia**². La investigación hecha por Monserrat van der Bruggen entre 1998 y 1999 puso en evidencia los factores incidentes en la crisis vivida por el sector en nuestro país en las últimas décadas del siglo XX; sin embargo, más allá de lo que la investigación refleja se pueden recoger percepciones como que “los empresarios del país han tomado conciencia que para estar a la altura de los estándares productivos, mejorar las instalaciones y los equipos es imprescindible, y la reconversión se situó como una de las prioridades”.
- Los obstáculos para que esto se pueda llevar a cabo están en los altos intereses que impone el sector financiero y la desventaja del sistema arancelario que se tiene en el país.
- La dependencia de insumos ha sido creciente, lo cual coincide con la disminución de empresas en el eslabón de hilaturas especialmente; a esto se suma la creciente entrada al país de productos terminados con mayor valor agregado en el diseño.
- **Tecnologías de información y comunicación en las redes empresariales**⁴. Investigación desarrollada en 2009 por Marleny Cardona, Jahir Gutiérrez y Carlos Ramírez. Se trata de una investigación orientada a varios sectores, en que se hace mención del textil por su fuerte presencia en las regiones estudiadas. Es destacable lo que se refleja en el estudio respecto a los logros individuales, indicando que “además, las empresas han llevado procesos eficientes de manera individual que pueden ser herramientas para generar mayor competitividad si se dan a conocer y se mezclan con las nuevas formas de ver los procesos productivos”.

En relación con el uso y la actualización de tecnologías, los resultados de la investigación reflejan en los empresarios una separación entre las tecnologías de producción y las de información, con pocas experiencias de articulación de ambas. Adicionalmente, en todos los casos se evidencia la escasa capacitación

del capital humano en el manejo de tecnologías novedosas para apoyar los procesos transformadores en la manera de hacer las cosas.

Con el propósito de apalancar los procesos en que se han embarcado muchos empresarios, para ayudar a mejorar la competitividad del sector se hace necesario el compromiso del Estado: “El escenario territorial puede ser competitivo en la medida en que la política pública genere recursos tangibles e intangibles para transformar las condiciones de las empresas”.

- **Desarrollando sectores de clase mundial en Colombia**¹. Informe final sector textil, confección, diseño y moda. Proyecto desarrollado por McKinsey & Company en 2009 para el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. La investigación refleja las características del sector en la actualidad, a partir de la información recogida sobre su comportamiento y consultando la percepción de los empresarios, en una mirada que contextualiza al sector en el entorno de la economía nacional y confronta su estado con los desarrollos textiles a nivel mundial.
- El análisis refleja las “brechas de productividad frente a países desarrollados”, e indica sus causas, entre las que destaca el bajo consumo en el mercado local que no incentiva la variedad, el mínimo poder de negociación de las empresas locales, el escaso valor agregado de un gran número de empresas, la informalidad, la baja inversión en maquinaria, en investigación y desarrollo, la escasa presencia del capital internacional, la debilidad en inteligencias de mercado y en estandarización, y los altos costos en varios factores asociados a la producción.

En el informe se identifican seis barreras que se propone abordar con proyectos orientados al fortalecimiento de factores claves de éxito:

- Infraestructura de producción con tamaño adecuado.
- Competencias para atraer, desarrollar y mantener talento.
- Competencias e infraestructura para desarrollar innovación.
- Cadena de valor estrechamente relacionada.
- Competencias operacionales distintivas.
- Estructura de costos competitiva.

- **Prospectiva y vigilancia tecnológica en la cadena fibra-textil-confecciones**³. Es una investigación realizada en 2009 por Cidetexco, con la dirección de Mauricio Pineda y Marcos Jara. La investigación se orientó a poner la realidad del sector colombiano en el escenario de las tendencias mundiales, con el propósito de identificar las brechas tecnológicas y presentar propuestas (escenarios) para su inserción en la transformación productiva que se requiere en el país.

La investigación sigue reconociendo la importancia que tiene para Colombia el sector textil, por los aportes al empleo, el PIB y las exportaciones, por lo cual hace un llamado a concitar esfuerzos de todos los sectores para generar un nuevo impulso para esta industria.

Uno de los aspectos en que se deberán enfocar los esfuerzos es en la innovación y la adopción de nuevas tecnologías que pongan al sector textil colombiano en los niveles internacionales y que la lleven a pasar de ser usuaria a convertirse en generadora de tecnología, con los requerimientos que van marcando las tendencias mundiales.

Cidetexto presentó un portafolio de proyectos, orientado a la generación de aportes en la vía que ha señalado la propuesta de su investigación; entre ellos se destaca el observatorio de vigilancia tecnológica que permite rastrear las tendencias mundiales y la situación del país con respecto a los líderes internacionales.

La visión de los empresarios

A continuación (tabla 3) se presenta una síntesis de las percepciones que tienen los empresarios en torno a la gestión tecnológica característica en el sector, lo que permite que los entrevistados propongan referentes de contrastación con la realidad nacional y las tendencias mundiales.

Tabla 3
Percepciones de los gerentes

Empresario 1: Paquete completo	Empresario 2: Diseño	Empresario 3: Fibra y textil	Empresario 4: Acabados	Empresario 5:
<ul style="list-style-type: none"> • En fibras, Colombia tiene algunos avances en automatización de maquinaria y en la calidad de la producción. • Tejeduría tiene pocos desarrollos tecnológicos. • Tintorería y acabados ha realizado altas inversiones que le han propiciado adquirir tecnologías de alto nivel, con procesos automatizados. • En corte se han implementado <i>software</i> que acompañan el proceso de las máquinas cortadoras. • El proceso de confección se ha tercerizado. • La tecnología en el proceso de diseño es el talento humano. 	<ul style="list-style-type: none"> • El sector presenta una ruptura entre los eslabones que componen el proceso fibra-textil y la parte de la cadena que corresponde a confección y manufactura. • Mito de creer que en Colombia somos grandes generadores de moda afecta la posibilidad de un posicionamiento del sector en el contexto internacional. • Hoy se requiere una mayor velocidad en la generación de nuevos productos. • El público consumidor demanda un mayor valor agregado diferenciador. • Los fabricantes tienen necesidad de actualizarse en maquinarias y competencias del talento humano. • Ruptura en los procesos. • Ausencia de criterios técnicos en los procesos y el elevado nivel de informalidad de las empresas. • Plan padrino, en el que las relaciones con otros empresarios posibilita el fortalecimiento mutuo entre los participantes del clúster. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se encuentra funcionando tecnología procedente de diversos países (Alemania, Suiza, Italia y Japón) entre 1940 y 1950, combinada con máquinas que desarrollan los mismos procesos de manera automatizada y de reciente adquisición. • La brecha de rendimiento entre las máquinas antiguas y las modernas es de 15 a 50. • El talento humano tiene un mayor protagonismo. • Para el proceso textil, se implementa tecnología electromecánica y automatizada, adquirida en Japón y con procesos de transferencia tecnológica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las principales fuentes de ideas para la innovación son las ferias mundiales (entre las que destacan una realizada en Alemania) y los proveedores de sus insumos. • Conciencia de la necesidad de actualizarse para superar las amenazas de la competencia. • Innovación: en Colombia estamos al mismo nivel que Italia, o mejor. • En la actualidad, en el mundo se prefiere lo hecho a mano. • Se impone una tendencia a la producción de lotes más pequeños. • Comparada con la actual, realiza los procesos de manera similar y responde a los requerimientos de la industria en el momento. • La mayor revolución en los procesos de este eslabón está en la tintura, desarrollada por italianos y alemanes, y se han concentrado en el ahorro de agua y de tinta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las nuevas tendencias para el sector textil han generado una serie de exigencias a los proveedores. • No se ha logrado un gran avance en la implementación de nuevas tecnologías en el sector textil. • Carencia de ingeniería en productos de moda y confeccionistas. • No se ha generalizado el manejo de estandarizaciones de tiempos/prenda. • Se han hecho algunos avances en la generación de valor agregado diferencial. • Uno de los requerimientos que se están demandando para el sector es la alta flexibilidad en todos los aspectos. • Punto clave para superar las dificultades es la adquisición de nuevas tecnologías. • El empoderamiento de la gente permite tomar decisiones y realizar los ajustes que considere pertinentes. • Se tiene una demanda no satisfecha de mano de obra calificada. • La clave de la competitividad no está en TIC y no se justifican las grandes inversiones en este campo.

Fuente: elaboración propia.

Contrastación e ntre las fuentes: recomendaciones

Como se puede inferir de los contenidos presentados en los ítems anteriores, existen concordancias entre la visión de los empresarios, las investigaciones efectuadas y la caracterización expuesta sobre el sector a nivel mundial (tablas 1 y 2).

Ello ha permitido comprender las diferencias entre las dinámicas alcanzadas en países donde la inversión tecnológica, la innovación y la orientación hacia mercados exigentes y cambiantes han marcado brechas en un concepto amplio de gestión tecnológica. Igualmente, se perciben las potencialidades surgidas de la capacidad adquirida en la experiencia que tiene el sector en Colombia y la capacidad de muchos empresarios para reaccionar ante las demandas del cambiante flujo del sector a nivel mundial.

Es evidente un interés en todos los niveles por recuperar el liderazgo que se tuvo en el pasado, para lo cual los referentes que se perciben en el interior del país y por fuera de él movilizan la reflexión y la búsqueda de estrategias, a veces de manera aislada, para afrontar los retos que imponen las dinámicas modernas.

De un análisis más detallado, que no se incluye en el presente texto, se definen las estrategias prioritarias donde se concentrarían los empresarios del clúster textil-confección-diseño-moda-comercialización; éstas serían las siguientes:

- Se podría afirmar que la primera responsabilidad está enmarcada dentro del concepto de visión empresarial⁶, referente a cómo asegurar la *intemporalidad* de la organización en el tiempo, que es una de las características fundamentales con las que se define la creación de ésta⁷.
- Una segunda responsabilidad de los gerentes del sector tiene que ver con la *tecnología de los procesos*⁸ utilizados para diseñar, producir y comercializar su portafolio de productos/servicios; algunos aspectos de reflexión de las tendencias encontradas en este campo, a la “luz” de lo indagado con los empresarios, permiten apreciar que, cada vez más, como se señaló en la caracterización del sector y en la matriz Dofa, el cliente está caracterizado por ser muy personalizado.
- Esto, en relación con el uso de la tecnología⁹, exige gran flexibilidad y está especialmente asociado a la facilidad de hacer “tirajes” de producción más pequeños, lo que descarta aquellas enormes máquinas para producir en serie, por economías de escala,

grandes cantidades de producto; hoy, otros países –como China e India– lo hacen con más propiedad y asegurabilidad.

- En tercer lugar está la responsabilidad sobre el talento humano asociado a este tipo de fabricación¹⁰: No se requiere ser especializado en una parte del proceso, sino que se adecua más a esta tipología productiva la organización del trabajo tipo modular, donde una microsociedad de trabajadores hace productos completos y ese es su producido; por tanto, se genera una compensación, donde todos hacen y conocen todos los procesos involucrados, para relevar, en el caso en que sea necesario, a alguno de los miembros del equipo de trabajo.
- La cuarta responsabilidad esta relacionada con el *mercado y los clientes*¹¹. Si desarrollamos las anteriores estrategias derivadas de las responsabilidades citadas y se mantiene un contacto personal con las expectativas de los clientes, se puede asegurar, como dice la metodología Kano de la Toyota (liderada por japoneses), que no sólo se garantizarán los requisitos básicos del cliente, sino que los sorprenderemos con otros requisitos.
- El mercado en este sector tiene que ver mucho más con el talento humano al servicio de la innovación¹², la creatividad, el conocimiento del sector, a partir de los clientes, antes que de las máquinas utilizadas, por lo que el paradigma de la tecnología “dura” debería dar paso a la tecnología blanda, o a lo que algunos llaman *human-ware* o el *kenom-bon*^{10,13}; esto exige que la organización cambie culturalmente la concepción de su negocio, para lo cual es necesario, según lo expresado por los empresarios, hacer un repensamiento de sí misma, cambiando los paradigmas de sólo eficiencia por el nuevo paradigma de competitividad^{7, 11, 14, 15, 16}, que no es otro que participar cada vez más en las ventas del sector por efectividad operacional y por valor agregado percibido por los clientes.
- La quinta responsabilidad es la de *desarrollo sustentable* (sostenible)^{17, 18}, concebida como que tanto los aspectos de fabricación, comercialización, innovación en nuevos productos se hagan en armonía con la naturaleza, enfoque de desarrollo sostenible, sino que la responsabilidad social empresarial esté presente en las actividades básicas de la compañía, además de la generación de fondos internos que faciliten esta sustentabilidad en el tiempo.

- La sexta responsabilidad tiene que ver con la *rentabilidad*⁹. Se ha dejado como sexta, ya que se podría decir que es la consecuencia consolidada de la gestión gerencial que se hace con las cinco anteriores. Este concepto incluye claramente la conceptualización diferenciada, de que hay rentabilidad para la organización y también para los accionistas.

CONCLUSIONES

Al observar los análisis, conceptos, expresiones, enfoques de los empresarios a lo largo del presente escrito, se podría decir que el hecho de que éstos estén ubicados en la “cuna” de la industria textil en Colombia², facilita que este concepto tan difícil de conseguir y mantener en el tiempo sea asimilado por los mismos de manera natural e intrínseca e inherente a su trabajo en su currir cotidiano.

Esta naturalidad en su concepción está apoyada, facilitada, por el entorno empresarial que rodea a Medellín, donde han estado ubicadas las principales empresas del sector textil-confección-diseño-moda y comercialización, que anualmente convoca a las principales compañías de dicho sector para intercambiar experiencias, tecnologías, innovaciones, diseños y tendencias de la moda a nivel mundial, expresadas en las ferias de Inexmoda y Colombiatex⁵, acompañadas a nivel local por el clúster del sector, que impulsa su desarrollo y competitividad en el ámbito internacional.

La inserción en el Programa de Transformación Productiva del país, liderado por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, con el objetivo de aunar esfuerzos y generar sinergia entre los sectores público y privado, para diversificar la oferta de productos nuevos y darles mayor valor agregado a los existentes, permite integrarse al proceso de construcción de escenarios futuros que superen las brechas identificadas en las investigaciones sobre el sector¹⁻⁴.

Cabe anotar que dos de las estrategias básicas de este programa se refieren a la estructuración de sistemas del conocimiento a través de redes de investigación, desarrollo e innovación, así como fortalecer las alianzas del sector productivo con el sector educativo.

La necesidad de un mayor número de productos de diferente diseño o terminado exige que los cambios de máquinas sean optimizados para asegurar la productividad interna de la organización, por lo que

ya no se trata de grandes tamaños de producción, sino en ser efectivos en los cambios de las condiciones de los parámetros de los procesos y, en consecuencia, de las máquinas y sus accesorios, para poder optimizar los ciclos productivos²⁰⁻²¹. Además, como la programación de la producción se hace tan difícil, para las capacidades instaladas frente a las ventas²², se requiere contar necesariamente con un *software*²³ de programación que enlace los puntos de venta o comercialización con las bodegas de productos terminados y los puntos de fabricación, para hacer “lo justo en el momento justo”, so pena de caer en grandes *stocks* de producto terminado sin ventas, obsoletos, que consumen grandes inversiones en capital de trabajo y que dificultan la comercialización al no lograr el *troutput* necesario para mantener la operación de la organización.

Este aspecto adquiere relevancia porque el pronóstico de la demanda en el horizonte del tiempo en este sector de moda y de cambio constante en tendencias hace que cada vez se presenten más cambios imprevistos y que, si no se cuenta con la flexibilidad necesaria para los ajustes, se pierda la venta y se pierda imagen institucional, por el concepto de no oportunidad en las entregas.

Otro factor está relacionado con el *talento humano*⁹, concebido ya dentro del contexto de volver “*owners* o propietarios” de los procesos en forma integral a los equipos de trabajo, donde responden no por la manga o el cuello individualmente, sino por la camisa completa, de acuerdo con los requerimientos de los clientes. Este aspecto en la cultura “paisa”, con una idiosincrasia de formación dentro del trabajo individual y la desconfianza²⁴ con el “otro”, requiere un cambio cultural, que afortunadamente se pudo observar en algunas de las compañías entrevistadas, donde la confianza directivo-trabajador se fundamenta más en la entrega del producto completo que en un acto policivo y de desconfianza mutua, lo que por consiguiente disminuye tensiones, conflictos, supervisión, tendencias sindicales y paros en la producción.

También es prioritario que los diseñadores antioqueños y colombianos egresados de los institutos de formación sean complementados dentro del enfoque mundial de la tendencia de la moda¹, para lo cual no se deben ahorrar esfuerzos en acercarlos a las ferias que marcan la pauta en diseño, acabados, comercialización⁵; tenerlos conectados con los principales institutos de

moda en el planeta, especialmente en los mejores referentes mundiales; formarlos en contacto con los *software* o tecnologías virtuales de catálogos, magazines u otros, y ponerlos en contacto con los empresarios para que tengan tutores de talla internacional, que orienten sus esfuerzos en todo el aspecto de innovación, desarrollo de nuevos productos, así como en su fabricación y comercialización. Este tipo de inversiones, a decir de los encuestados, se justifica, así la inversión sea alta, con los beneficios que se derivan en valor diferenciador para el cliente y, por tanto, en mayores ventas, así no sea en cantidad, sino por valorización de precios.

Dada la importancia que tiene el cambio del mercado en el sector textil-confección-diseño-moda y comercialización es necesario repensar culturalmente la organización, ajustando la planeación estratégica, si la hay, o haciéndola con estos nuevos parámetros²⁶.

A partir de este diagnóstico se otea la posibilidad de disponer de un modelo evaluativo del estado de la gestión integral y tecnológica¹⁰, que le permita a cada empresa ubicarse dentro de una escala de competitividad para que, de una manera más deliberada, enfoque sus planes a corto, mediano y largo plazos.

Los referentes trabajados obligan a desarrollar el concepto de flexibilidad y oportunidad en las entregas a los clientes, dentro de un nuevo concepto, casi personalizado, de altísima variedad que hoy requiere el mercado, lo que implica entender que los ciclos de trabajo cada vez son más cortos; que la programación de la producción, a pesar de la variabilidad y dificultad en acertar en el pronóstico de la demanda, sea baja; esta programación debe ser en tiempo real y ha de enlazar centros productivos, de comercialización y de almacenamiento.

Se compadece lo anterior con la necesidad de disponer de máquinas y accesorios para la producción y comercialización, donde prime la agilidad para el cambio de diseños y referencias, antes que el volumen y la especialización o estandarización: entender que la mayor participación en la venta se hace por valorización y no necesariamente por cantidad.

Las orientaciones que ha tomado el sector en el país han llevado a desarrollar un concepto de talento humano⁹ en cuanto a formación y desarrollo, donde predomina el concepto cultural de trabajar para el cliente, y donde el diseño y el acabado, fuente de la valorización de la venta, no escatiman esfuerzos ni recursos.

De igual manera, se visualiza la necesidad de desarrollar alianzas o tutorías con referentes mundiales del sector para darles un mayor valor agregado a la gestión y al acierto en la escogencia de las colecciones y en el conocimiento de las tendencias a nivel mundial actuales y futuras.

La propuesta de escenarios futuros que cierren las brechas tecnológicas⁹ implica mantener una conexión permanente con *software* de diseño, de moda, de colecciones de categoría mundial, y una asistencia a las ferias que tengan que ver con su objeto de mercado, dentro de un concepto de gran percepción, receptividad y mente abierta a los nuevos enfoques, pensando bien en la reproducibilidad en una primera etapa y más adelante en desarrollar sus propias colecciones.

Así mismo, hay que estimular los sistemas modulares para que los equipos de trabajadores desarrollen la autogestión, el autocontrol y un sentido mayor de pertenencia con sus responsabilidades y derechos.

REFERENCIAS

1. McKinsey & Company (2009). Desarrollando sectores de clase mundial en Colombia. Informe final sector textil, confección, diseño y moda. Bogotá: Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.
2. Van der Bruggen, M. (2001). El sector textil en Colombia (*online*). Consultado 30-06-2011. Disponible en <http://www.copca.com/.docs/copca/textcol>.
3. Pineda, L. & Jara, M. (2009). Prospectiva y vigilancia tecnológica en la cadena fibra-textil-confecciones. Texto en PDF. Bogotá: Cidetexco-Colciencias.
4. Cardona, M., Gutiérrez, J. & Ramírez, C. (2009). Tecnologías de información y comunicación en las redes empresariales. El caso de las regiones. Medellín: Universidad Eafit.
5. Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia (2007). Avances de la estrategia clúster en Medellín y Antioquia. *Documentos Comunidad Clúster*, N.º 5. Medellín.
6. Anzola, O. & Puentes, M. (2007). Determinantes de las acciones gerenciales en microempresas y empresas pymes. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
7. Deming, E. (1982). Calidad, productividad y competitividad. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
8. Pedroza, A. (2001). Modelo para la gestión estratégica de la tecnología. *Revista Universidad Eafit*. N.º 122. Medellín, Colombia, pp. 23-37.
9. Gaynor, G. (1999). *Manual de gestión en tecnología*, t.1 y 2. Bogotá: McGraw Hill Interamericana.
10. Ortiz, S. & Pedroza, A. (2006). ¿Qué es la gestión de la innovación y la tecnología (GlnnT). *Journal of Technology. Management and Innovation*, vol. 1, N.º 2. Universidad de Talca.
11. Beltrán, A. et al. (2004). Pymes: un reto a la competitividad. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
12. Rosenau, M. (1988). *Innovación, la gerencia de desarrollo de nuevos productos*. Belmont, California: Life Learning Publications.

13. Patterson, M. (1999). Innovación: manejo del proceso. En G. Gaynor (1999). *Manual de gestión en tecnología*, t. 1 y 2. Bogotá: McGraw Hill Interamericana.
14. Senge, P. (1999). *La quinta disciplina*. Barcelona: Granica.
15. Drucker, P. (1986). *Una nueva dimensión de la administración*. Bogotá: Editorial Norma.
16. Corma, F. (2005). Aplicaciones prácticas del modelo EFQM de excelencia en pymes. Díaz de Santos: Madrid.
17. Betancur, J. (2010). La ética de la responsabilidad social empresarial. En *Katharsis*, N.º 9 (enero-junio). Envigado: Institución Universitaria de Envigado, pp. 73-91.
18. Perdiguero, T.G., García, R. & Encabo, B. (2005). La responsabilidad social de las empresas y los nuevos desafíos de la gestión empresarial. Valencia: Universitat de Valencia.
19. Sallenave, J.P. (2002). *Gerencia y planeación estratégica*. Bogotá: Norma.
20. Fajardo, I. *TPM en industrias de proceso*. TGP-HOSHIN, Madrid: S.L. Marqués de Cubas, 25.
21. Spendolini, Michael J. (1994). *Benchmarking*. Bogotá: Editorial Norma S.A.
22. Rey Sacristán, F. (2006). *Técnicas de resolución de problemas*. 2.ª ed. Madrid: Príncipe de Vergara.
23. Gómez, A. & Suárez, C. (2006). *Sistemas de información: herramientas prácticas para la gestión empresarial*. Ra-Ma, Librería y Editorial Microinformática.
24. Rodríguez, G. & Betancur, J. (2010). El Aburrá Sur como microuniverso de las pymes en Colombia. *Revista Con-Ciencia Empresarial*, N.º 4 (enero-junio). Envigado: Institución Universitaria de Envigado, pp. 39-57.
25. Davis, K.R. & McKeown, P. (1998). *Modelos cuantitativos para administración*. México: Iberoamérica.
26. Martínez, O. (2009). *Pyme, estrategia para su internacionalización*. Bogotá: Ecoe-Uninorte.