

Consideraciones geotécnicas en la construcción de llenos de brechas con arenas del Stock de Altavista

Geotechnical aspects of utility cut backfills with sands from the Stock de Altavista

Julián Duque Bernal

Ing. Civil, Esp. Vías, MSc. Geotecnia

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Maestría Ing. Geotecnia

Resumen

Los altos costos derivados de las reparaciones en pavimentos flexibles construidos sobre llenos de reposición de brechas de servicios públicos son motivo de cuantiosas inversiones económicas por parte de las empresas prestadoras de servicios en Medellín y el resto del país.

El artículo inicialmente presenta un recuento histórico con los principales aspectos relacionados con el deterioro de estos pavimentos. Posteriormente se plantean consideraciones geotécnicas sobre los actuales controles de calidad al proceso constructivo de los llenos, donde la oferta local se refiere a arenillas del Stock de Altavista.

Finalmente, se indican los componentes metodológicos básicos de interés en el desarrollo de una norma constructiva de estos llenos basada en criterios de desempeño del pavimento. De esta forma, se lograrán reducir los costos de mantenimiento y reparación de estos pavimentos y los costos sociales que se puedan derivar, representándole ahorros en tiempo y recursos a las entidades encargadas de la construcción y mantenimiento de dichos pavimentos.

Abstract

The escalating cost of repairing road damage resulting from poorly performing restored utility cuts within the right-of-way of urban roads is creating serious financial stresses on cities and utility companies alike, in Medellín and the whole country.

This paper is divided in three parts. Firstable, a brief review of literature which reveals the main factors involved utility cut repairs and some recent advances related is presented. Later, there is a discussion of several aspects to improve in constructive practice - quality control measures (QC) of utility cut backfills, which usually comes from residual sands of the Sock de Altavista, in Medellín. Finally, central components necessary to improve in new pavement - performance constructive guidelines are indicated.

All mentioned previously, will allow reducing costs not only for maintenance and repairing but also social costs derived of this interventions.

1 INTRODUCCIÓN

Las “brechas” o zanjas para la instalación de redes de servicios públicos, generalmente se hacen en secciones completas del pavimento con el propósito de emplazar redes eléctricas o de acueducto y alcantarillado por debajo de la malla vial. En algunas ciudades se han desarrollado guías para la apertura y restauración de brechas, observándose sin embargo, cómo el desempeño de los pavimentos sobre las mismas es insatisfactorio, aún cuando se supone que las prácticas constructivas se llevan a cabo de acuerdo a las normas locales (Monaham, 1994).

En Medellín, estas brechas generalmente son rellenadas con arenas residuales del Stock de Altavista y luego compactadas en capas de 20cm de espesor en promedio, utilizando equipos de impacto. La geometría de las zanjas normalmente es variable: con profundidades típicas entre 1.0 y 4.0 metros y anchos de brecha entre 0.5 y 2.0 metros. Una vez compactado el lleno y aprobado el tramo, se construye sobre éste una nueva estructura de pavimento flexible, la cual presenta un comportamiento satisfactorio durante un periodo aproximado de dos años, después del cual, se advierte su deterioro en algunos tramos que presentan fallas (Duque, 2009).

Aunque los principales aspectos geotécnicos que inciden en esta problemática se relacionan con la naturaleza de los diferentes materiales, con las prácticas constructivas y con las condiciones ambientales locales, existen elementos generales que pueden ser estudiados y abordados apropiadamente bajo una misma metodología, siempre y cuando esta se adapte a las condiciones específicas de cada lugar y a la oferta de materiales disponibles.

2 RECUENTO HISTÓRICO

2.1 Generalidades

Alrededor del mundo se han llevado a cabo numerosos estudios relacionados con los pavimentos construidos sobre llenos en brechas. Reportes estadísticos de la ciudad de San Francisco (EEUU), muestran como la condición del pavimento puede disminuir a medida que aumenta el número de intervenciones por la construcción de brechas de servicios públicos. En

la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el impacto de las zanjas en el desempeño del pavimento, medido a partir del Índice de Condición del Pavimento, PCI.

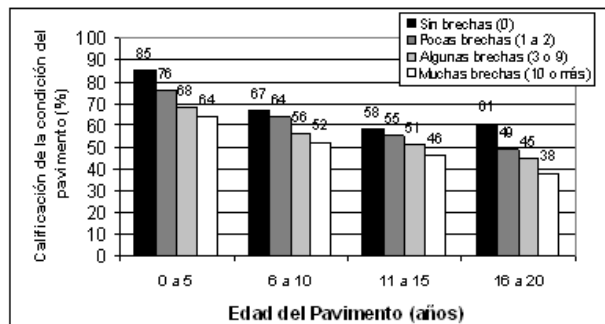


Figura 1 Efecto de las brechas en la condición del pavimento (APWA, 1998)

2.2 Aspectos relacionados con el impacto potencial de la construcción y restauración de brechas en el desempeño del pavimento.

Se enuncian a continuación algunos aspectos claves a considerar en la evaluación del impacto potencial de las brechas en el posterior desempeño de los pavimentos, a saber:

- Calidad de los materiales superficiales: la calidad de los materiales de las capas superficiales puede influir en el desempeño estructural del pavimento. Sin embargo, la mayoría de los estudios al respecto se limitan a estudiar pavimentos flexibles conformados por una capa de concreto asfáltico (CA), dispuesta sobre una capa de base granular (BG) y materiales de subrasante in situ (Adedeji, 2007).
- Capacidad de soporte del material de subrasante: tanto el desempeño del pavimento existente como el de la nueva estructura de pavimento, tienen compromiso de las condiciones de soporte de las capas subyacentes. Los materiales nativos o la subrasante original generalmente están conformados por suelos de diferentes características, o por roca. Por su parte, los materiales de préstamo para el lleno, según su origen, pueden presentar comportamientos especiales como el caso de algunas arenas potencialmente colapsables, o las arcillas expansivas que tienen un alto contenido de montmorillonita. En la mayoría de los casos,

los diferentes estudios al respecto dejan a un lado las condiciones de soporte del material de lleno o subrasante (AMEC, 2000).

- Condiciones climáticas: las condiciones climáticas tales como las lluvias torrenciales, y los ciclos de humedecimiento y secado durante la construcción de los llenos, pueden incidir en el desempeño final del pavimento. Los diferentes estudios generalmente se llevaron a cabo en diferentes entornos bajo condiciones climáticas diferentes, en los cuales la variable clima fue un elemento ignorado.

- Volumen de tráfico: el volumen de tráfico puede generar un impacto diferente sobre la nueva estructura del pavimento. Por lo general, la variable tráfico ha sido caracterizada en función del tipo de vía (arteria, colectora o residencial), la designación del carril, el tipo de vehículo predominante (bus, camión o vehículo con pasajeros) o por medio del volumen de tráfico relativo (alto, medio, bajo). El impacto de la variable tráfico sobre estos pavimentos fue estudiado inicialmente por Shalin et al. (1986) utilizando deflectometría de impacto (FWD).

- Índice de Condición del Pavimento (PCI): la condición o estado del pavimento previo al momento de la construcción de la brecha es un factor importante a tener en cuenta, puesto que esta puede diferir en términos del desempeño de un pavimento original a uno nuevo. Se destacan los estudios de Lee & Laughter (1999), Tighe et al. (2002) y Chow & Troyan (1999) quienes buscaron cuantificar los daños para establecer la condición del pavimento, relacionando la condición del pavimento original con la del nuevo pavimento en términos del PCI o de un índice equivalente. Sin embargo, son pocos los estudios al respecto donde se ha utilizado el PCI para cuantificar el impacto por la construcción y reposición de brechas en los requerimientos y los costos de rehabilitación.

- Los procedimientos de reparación de las entidades encargadas: los equipos utilizados y los procedimientos constructivos, inciden tanto en el desempeño del pavimento nuevo como en el del pavimento original (Nichols-

Vallerga, 2000). Por lo general se carece de un registro sobre los procesos de calidad de la entidad encargada de la reparación, y no se tiene en cuenta la geometría de la excavación, ni el equipo utilizado. No obstante, varios estudios entre los que se destacan los realizados por Todres & Wu (1990) y Mangolds & Carapezza (1999), compararon los resultados obtenidos al utilizar excavaciones de sección en T con otras de secciones tradicionales). Por su lado, Emery & Johnson (1987) y Humphery & Parker (1998) consideraron variaciones en el grado de compactación de la subrasante y del material de base.

3 ASPECTOS GEOTÉCNICOS A TENER EN CUENTA EN LAS ACTUALES PRÁCTICAS CONSTRUCTIVAS LOCALES

3.1 Generalidades

La mayoría de los esquemas de gestión de control de calidad buscan garantizar la correcta ejecución de las obras por parte del contratista por medio de una norma o especificación técnica de construcción, lo cual se traduce en un control de aceptación o rechazo del producto (en este caso del lleno construido). Sin embargo, en muchos casos dichos controles distan de constituirse en una garantía para lograr un comportamiento aceptable en los nuevos pavimentos. A continuación se enuncian algunos aspectos a tener en cuenta dentro de los controles de calidad de la norma constructiva para estos llenos.

3.2 Densidad de Compactación

Generalmente las exigencias de control de calidad a la compactación de los llenos están basadas en la relación entre los parámetros de densidad y humedad del material, medidos en campo, con los respectivos parámetros del mismo material medidos en laboratorio.

La incertidumbre radica en poder garantizar que dichos controles, hechos a partir de variables físicas, se constituyan en garantía para que después de su construcción el nuevo pavimento alcance condiciones de servicio satisfactorias que se mantengan en el tiempo. En la

Figura 2 se presentan los resultados de un estudio llevado a cabo por Khogali (1995) donde se relaciona la curva de compactación de un material arenoso con el Módulo de Resiliencia (MR), parámetro mecánico que describe la relación esfuerzo desviador – deformación unitaria recuperable del suelo.

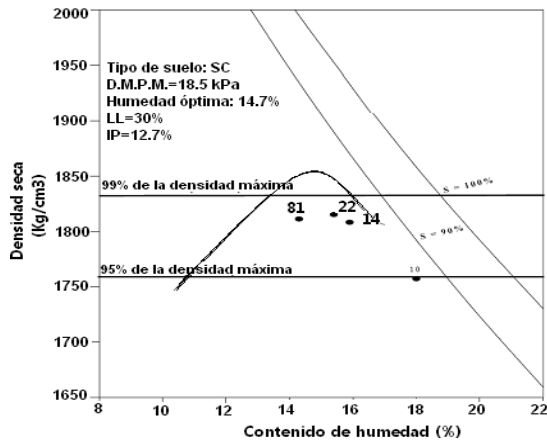


Figura 2 Comparación de los resultados obtenidos a partir de una curva de compactación con los valores del Módulo de Resiliencia en una arena arcillosa (Khogali, 1995).

En la gráfica, los tres valores del Módulo de Resiliencia: 81 MPa, 22 MPa y 14 MPa para contenidos de humedad del 14.3%, 15.4% y 15.9% respectivamente, fueron determinados utilizando el mismo porcentaje de compactación del 98% de la densidad máxima del Próctor Modificado del material. Se observa sin embargo cómo el Módulo Resiliente varía considerablemente con el cambio en el contenido de humedad del material, para un valor constante de dicha densidad. De lo anterior, puede deducirse que la densidad como variable física a controlar en estos llenos, no siempre representa un parámetro capaz de garantizar el desempeño adecuado de estos pavimentos durante su vida de servicio.

3.3 Humedad de compactación

La humedad es uno de los principales parámetros en la evaluación del comportamiento del material para la ingeniería geotécnica. En el caso específico de Medellín, estos llenos están conformados por arenas limosas provenientes de la meteorización del Stock de Altavista. Una

característica en estos materiales arenosos es que son susceptibles a colapsar bajo condiciones de saturación rápida (Spangler & Handy, 1983).

Un reciente estudio llevado a cabo por Jensen et al. (2005) sobre materiales granulares empleados para estos llenos, relaciona la compactación del material con el índice de colapso, este último, medido a partir de pruebas físicas de laboratorio, con la ayuda de un dispositivo cilíndrico en plexi – glass, adecuado debidamente para la toma de medidas de altura.

Durante la prueba, el agua era suministrada a baja presión por un lado del cilindro hasta inundar el material, buscando con esto evitar un colapso inducido por la presión la misma. La cara inferior del cilindro estaba cubierta por un geotextil para reducir la pérdida de finos por lavado.

Una vez el material colapsaba completamente, se tomaban medidas de altura y se procedía a determinar el índice de colapso. La Figura 3 muestra un esquema ilustrativo del dispositivo empleado en esta prueba.

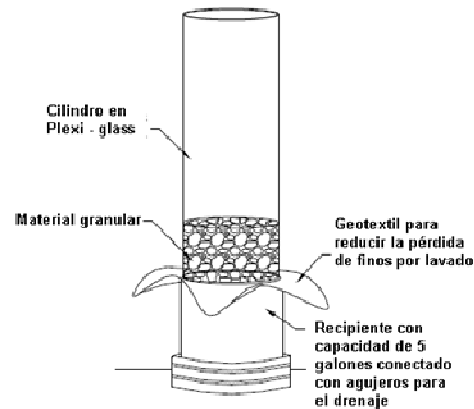


Figura 3 Ilustración esquemática de un dispositivo para medir el índice de colapso en materiales granulares (Jensen et al. 2005).

El escenario más desfavorable estaba representado por el material puesto en su estado suelto (es decir, sin compactación mecánica).

Los resultados obtenidos de las pruebas de colapso, junto con el contenido de humedad y la densidad relativa del material, fueron compilados en el mismo estudio tal como se observa en la Figura 44.

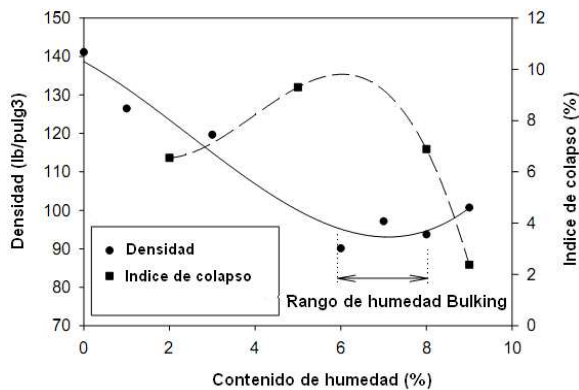


Figura 4. Ilustración de la relación entre la humedad de compactación y la densidad relativa con el índice de colapso para suelos arenosos (Jensen et al. 2005).

Se observa cómo los mayores índices de colapsabilidad caen dentro del rango de humedad “Bulking”, rango en el cual se pueden originar las mayores tensiones capilares. Generalmente, las humedades óptimas de compactación de estas arenas superan el rango mencionado (Duque, 2009), por lo que es necesario controlar la humedad de compactación para tener certeza sobre la rama de compactación durante el proceso constructivo. De esta forma no se perderá de vista la magnitud de los efectos potenciales del colapso en estos materiales.

3.4 Geometría de la excavación

La importancia de la geometría de la excavación no ha sido considerada en su verdadera magnitud. Poco se ha estudiado sobre la forma de la excavación (rectangular, trapezoidales y secciones especiales como en T). Tampoco se ha estudiado el efecto de la orientación del corte respecto a la vía (diagonal, longitudinal o transversal) ni la posición del mismo en relación con la trayectoria de las ruedas.

Por otro lado, la influencia de la geometría de la brecha en la estabilidad volumétrica del lleno muchas veces puede resultar determinante en el comportamiento del nuevo pavimento. En efecto, las paredes de la zanja colaboran aliviando las cargas incidentes sobre las tuberías por el denominado efecto de arco, gracias a la fricción entre los planos verticales laterales (Marston, 1913).

En un reciente estudio llevado a cabo en Medellín (Duque, 2009), sobre varios tramos de pavimento flexible que presentaban fallas tempranas los cuales fueron construidos en estos

llenos conformados por arenas del Stock de Altavista, se propone un modelo sencillo de deformación volumétrica para materiales bajo carga estática, mediante el cual se consideró la influencia de la geometría y el grado de compactación promedio del material en la estabilidad volumétrica.

Dentro de dicha investigación, se levantó inicialmente información de archivo sobre el proceso constructivo de los llenos, complementada con datos de campo sobre el estado actual de los pavimentos, dando como resultado una pequeña base de datos, donde se identificaron una serie de variables relacionados con el proceso constructivo y el nivel de servicio prestado por los pavimentos, además de la predominancia de algunas fallas como los hundimientos verticales respecto a otras de menor frecuencia como dilataciones de juntas y grietas longitudinales, a pesar de no tener más de 5 años de construidos los tramos.

Además, del análisis de la información recopilada en dicha base de datos, se llevó a cabo un trabajo de complementación y validación empírica de laboratorio, consistente en pruebas de carga sobre un modelo físico creado exclusivamente para la investigación y pruebas de resistencia a la compresión triaxial en laboratorios certificados, a partir de las cuales se propusieron parámetros mecánicos representativos de las condiciones típicas de compactación del material de lleno.

Todo lo anterior, sumado a otras aproximaciones en cuanto a las consideraciones de tráfico esperadas para estos pavimentos, sirvieron de base para alimentar la modelación hecha a través de una plataforma de elementos finitos PLAXIS 8.0, utilizando un modelo elasto-plástico con criterio de falla Mohr Coulomb.

Uno de los productos de este estudio se presenta en las figuras 5 y 6, donde se relaciona la geometría de las zanjas y el grado de compactación promedio del lleno con la estabilidad volumétrica (convenciones: H=profundidad; B= ancho de la zanja).

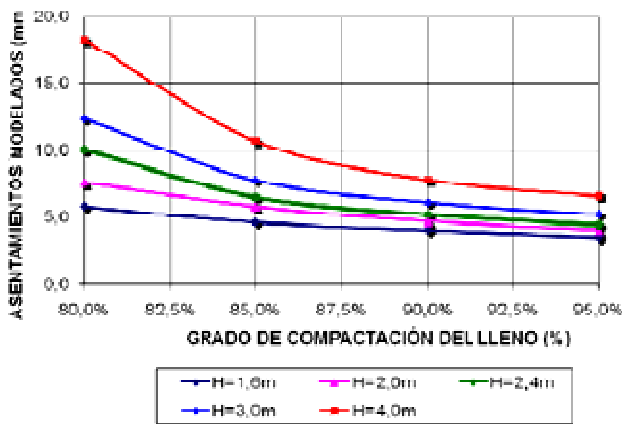


Figura 5 Gráfico propuesto para evaluar el efecto de la profundidad de la zanja y el grado de compactación del material en la estabilidad volumétrica del lleno, para zanjas con una relación típica ancho – profundidad de 0.50 (Duque, 2009).

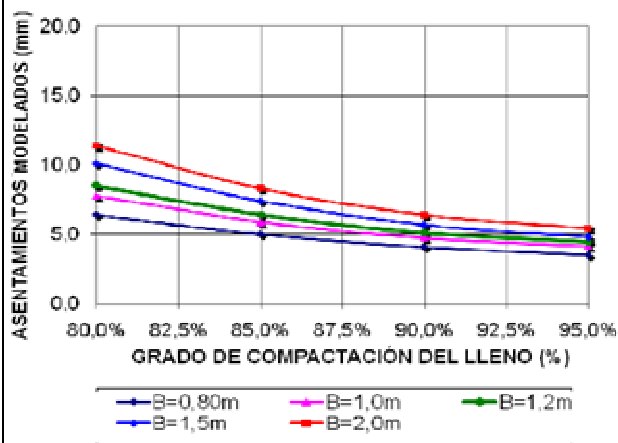


Figura 6 Gráfico propuesto para evaluar el efecto del ancho de la zanja y el grado de compactación del material en la estabilidad volumétrica del lleno, para zanjas con una profundidad típica de 2.50 m (Duque, 2009).

De las dos figuras anteriores puede observarse como los mayores asentamientos tienden a aumentar rápidamente para porcentajes de compactación promedio inferiores al 90%, valor correspondiente al mínimo exigido por la norma local, además de ratificar el efecto que puede alcanzar la geometría de las zanjas en la estabilidad volumétrica del lleno, donde los asentamientos aumentan notablemente con la profundidad primero, y con el ancho de la zanja en segundo lugar.

Precisamente, una de las principales conclusiones de esta investigación, fue la necesidad de incorporar nuevos criterios que permitan controles de calidad más apropiados que

vinculen la influencia que tiene la geometría de las zanjas en la estabilidad volumétrica de los llenos.

3.5 Espesores y número de capas a compactar.

La disposición de las capas del material de lleno, es una de las tareas críticas en la obtención compactación adecuada. A medida que el espesor de la capa aumenta se hace más difícil el proceso de compactación. A nivel mundial se presentan sugerencias de espesores entre 10 cm y 15 cm (Monahan, 1994). Otras especificaciones señalan rangos entre 10 cm y 25 cm, siendo 15 cm el valor más común (Jensen et al, 2005). La norma local habla de compactar en capas de no más de 15 cm. Cabe anotar que no existe en el medio un estudio formal que permita establecer la compatibilidad entre el número de pasadas, con el material, el equipo y el espesor utilizado. Definir previamente el número de pasadas, para condiciones específicas de equipo de compactación y espesor de las capas a compactar, es una tarea necesaria para garantizar una adecuada energía de compactación. Adicionalmente, la geometría puede ser determinante en el comportamiento adecuado de estos llenos, puesto que en términos de estabilidad volumétrica de los llenos, no será igual restaurar una brecha de gran profundidad a una de poca profundidad, o una zanja estrecha a una zanja ancha. De aquí la importancia de hacer tramos de prueba que permitan controlar las características del proyecto, en función de la compactación del lleno y la geometría de la brecha.

3.7 Controles de calidad de la compactación en campo

Las nuevas tecnologías para controlar los niveles de compactación de estos llenos involucran el uso del Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC), el Geogauge, el Martillo Clegg y el Deflectómetro de Impacto (FWD), entre otros. A nivel local, es de común uso el densímetro nuclear para la toma y control de densidades en campo. No obstante, son varios los estudios donde se muestra como la confiabilidad de los resultados arrojados por el densímetro se altera cuando es utilizado en los controles de la compactación sobre llenos construidos en brechas. En la figuras 7 y 8 se presentan los resultados arrojados por un estudio sobre llenos en materiales arenosos

similares a los empleados en Medellín, utilizando brechas experimentales (Khalid et al. 2005).

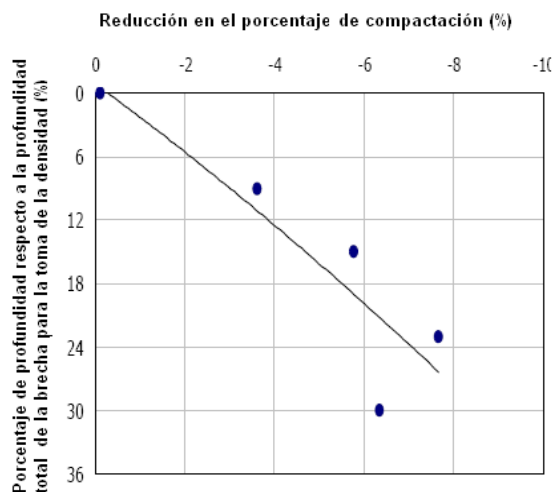


Figura 7. Variación en las lecturas de densidad con la profundidad de la zanja, para llenos construidos en brechas con materiales arenosos utilizando el densímetro nuclear (Khalid et al. 2005).

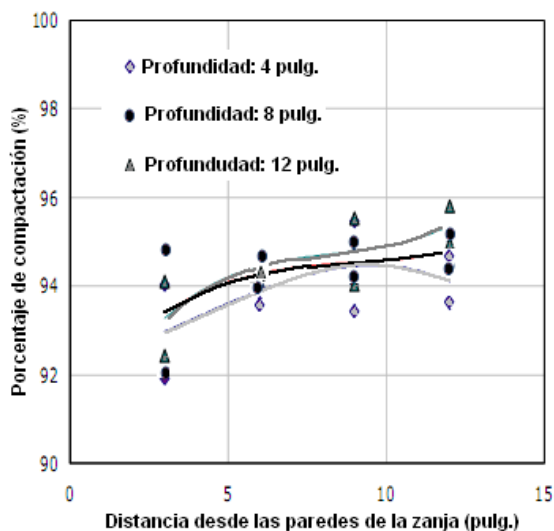


Figura 8 Variación en las lecturas de densidad de campo con el ancho de la zanja, para llenos construidos en brechas con materiales arenosos utilizando el densímetro nuclear (Khalid et al. 2005).

Obsérvese como las lecturas de densidad arrojadas por el densímetro nuclear están alteradas por la distancia con las paredes de la brecha y con la profundidad. En la medida en que el ancho de la brecha aumenta y la profundidad disminuye, puede aumentar el porcentaje de compactación.

Esto invita a evaluar la posibilidad de implementar otras pruebas para el control de calidad de estos llenos, que permitan resultados más confiables, teniendo en cuenta además que la

densidad no necesariamente está relacionada con el comportamiento geomecánico del pavimento.

Una prueba relativamente económica y sencilla de implementar en estos llenos en Medellín, es el Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC). Los resultados del PDC pueden correlacionarse con el grado de compactación del material y con su Capacidad de Soporte, a través del CBR; éste último, de gran importancia en el diseño de los pavimentos. Algunas ciudades en Estados Unidos han implementado recientemente dentro de sus controles de calidad un PDC modificado (en inglés, “utility DCP”) para la toma de densidades en llenos de brechas, cuya diferencia radica en la menor longitud y mayor maniobrabilidad del dispositivo frente al PDC convencional, donde además la geometría de la zanja no es un obstáculo para la confiabilidad en los controles de calidad.

3.6 Equipos de compactación para llenos

Los tipos de equipo empleados en un proyecto dependen de varios factores, tales como el tipo de material, la cantidad de compactación requerida, la cantidad de humedad que contiene el material y la viabilidad de tener el equipo requerido de compactación. Sin embargo, se requiere investigar más a fondo la sensibilidad de las diferentes técnicas de reposición de cortes, al tipo de equipo utilizado. Tampoco se ha estudiado completamente cuál es el mejor equipo a utilizar en las diferentes situaciones constructivas (cortes, llenos, diferentes tipos de material). Además, aún no ha sido definida la relación entre las diferentes clases de excavación y los equipos a utilizar, junto con los métodos de reposición de las brechas.

4 COMPONENTES BÁSICOS NECESARIOS PARA LA INTEGRACIÓN DE UNA NORMA CONSTRUCTIVA CON UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS

Muchos de los actuales esquemas de gestión de calidad se caracterizan por su intención de buscar de una u otra forma el cumplimiento de la norma constructiva por parte del contratista. Sin embargo, poca atención se le ha prestado a la necesidad de articular las actuales normas constructivas de estos llenos, con un sistema de gestión basado en la relación norma constructiva – desempeño esperado. Esta propuesta tiene como propósito indicar los principales aspectos

metodológicos a tener en cuenta en el desarrollo de un futuro sistema de gestión, que permita vincular la norma constructiva al desempeño esperado de pavimento.

Como punto de partida es necesario contar con una base científica (repaso del estado del conocimiento) y otra empírica (encuestas al personal de campo). Conforme se haya hecho la búsqueda de los diferentes factores a estudiar, según la base científica referenciada, se diseñarán cuestionarios dirigidos al personal involucrado en la construcción de los llenos, con el fin de recopilar información acerca de las prácticas constructivas, los materiales utilizados, la geometría de la excavación, la condición de agua, las características de la vía, la valoración del tráfico y la condición actual del pavimento a intervenir, entre otros.

Luego, es necesario hacer pruebas experimentales que involucren pruebas de laboratorio y de campo. Las primeras consistirían en pruebas de clasificación y ensayos de resistencia y compresibilidad, cuyo propósito es el de obtener parámetros físicos y mecánicos representativos de los diferentes materiales que componen la estructura del pavimento; las segundas estarían conformadas por una serie de pruebas no destructivas como deflectometría y geofísica, complementadas con instrumentación en campo sobre brechas experimentales donde se obtengan parámetros mecánicos representativos de la estructura del pavimento (a partir de análisis regresivos), y donde se puedan determinar las principales variaciones en el estado de esfuerzos de los materiales de lleno. Esta información permitiría establecer una línea base en el comportamiento de los materiales de la nueva estructura del pavimento.

Posteriormente se plantea una fase analítica, en la cual se lleve a cabo la modelación del comportamiento del pavimento, teniendo en cuenta la interacción entre las variables

identificadas previamente (materiales, geometría de la brecha, proceso constructivo, entre otros). El modelo debe estar diseñado para predecir futuros daños en el pavimento, de tal forma que se puedan hacer predicciones del desempeño de la nueva estructura.

Finalmente, se requiere una etapa de validación del modelo, en la cual se verifique si los resultados arrojados son compatibles con la información empírica y experimental disponible. Para tal efecto, se pueden plantear dos alternativas: la primera donde se correlacionen los resultados del modelo con algunos parámetros asociados a la condición estructural y funcional del pavimento, utilizando parámetros como el PCI o el IRI respectivamente, o sus equivalentes. La segunda consistiría en pistas de prueba conformadas por pavimentos sobre estos llenos en las que se efectúen pruebas de carga aceleradas que permitan la validación del modelo; alternativa que resultaría bastante costosa para las posibilidades del medio local.

Todo lo anterior puede servir de insumo central en una eventual adecuación de nuevas normas basadas en criterios de desempeño del pavimento.

Algunos de los beneficios adicionales de esta propuesta se mencionan a continuación:

- Adecuación de normas constructivas.
- Revisión de los procedimientos de diseño estructural de los nuevos pavimentos.
- Implementación de nuevas tecnologías para el control de calidad.
- Desarrollo de un sistema de gestión basado en la relación predicción del daño – desempeño del pavimento.
- Ahorros en recursos invertidos en la intervención de estos pavimentos

En la Figura9 se ilustra un diagrama de flujo con la propuesta mencionada.

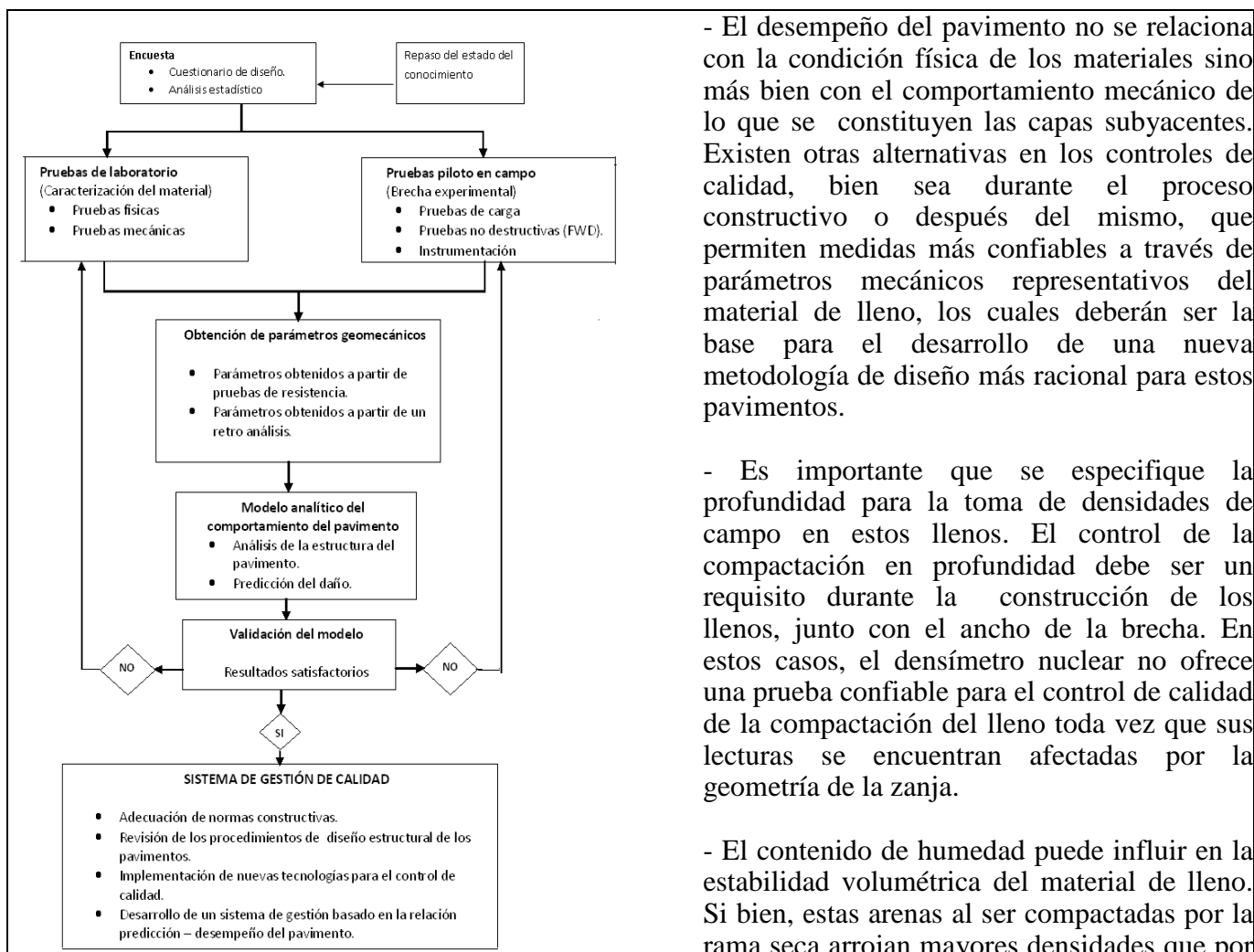


Figura 9 Propuesta metodológica para relacionar los controles de calidad de los llenos con el desempeño del pavimento.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este artículo se puede dividir en tres partes: la primera, donde se resumen algunos de los principales problemas asociados con las prácticas constructivas que se llevan a cabo en la restauración y reposición de brechas. La segunda, donde se plantean una serie de factores a tener en cuenta durante los controles de calidad de estos llenos. Y la tercera, donde se indican los lineamientos metodológicos básicos a tener en cuenta para integrar los actuales controles de calidad al proceso constructivo de los llenos a un modelo de predicción del comportamiento de los nuevos pavimentos.

Respecto a las normas constructivas en Medellín, para la construcción de estos llenos, es importante decir lo siguiente:

- El desempeño del pavimento no se relaciona con la condición física de los materiales sino más bien con el comportamiento mecánico de lo que se constituyen las capas subyacentes. Existen otras alternativas en los controles de calidad, bien sea durante el proceso constructivo o después del mismo, que permiten medidas más confiables a través de parámetros mecánicos representativos del material de lleno, los cuales deberán ser la base para el desarrollo de una nueva metodología de diseño más racional para estos pavimentos.

- Es importante que se especifique la profundidad para la toma de densidades de campo en estos llenos. El control de la compactación en profundidad debe ser un requisito durante la construcción de los llenos, junto con el ancho de la brecha. En estos casos, el densímetro nuclear no ofrece una prueba confiable para el control de calidad de la compactación del lleno toda vez que sus lecturas se encuentran afectadas por la geometría de la zanja.

- El contenido de humedad puede influir en la estabilidad volumétrica del material de lleno. Si bien, estas arenas al ser compactadas por la rama seca arrojan mayores densidades que por la rama húmeda, ante eventuales aumentos en el contenido de humedad (por ej. saturación del material por fugas en tuberías o aumento rápidos del nivel freático), el material compactado por la rama seca podría colapsar por el fenómeno Bulking. Es recomendable que durante el proceso constructivo de estos llenos, el material sea ligeramente humedecido y se pueda controlar la humedad del mismo. En este sentido, se requiere garantizar dispositivos que permitan la toma inmediata de humedades en cualquier momento durante la construcción de los llenos, tales como el Humedómetro.

De lo anterior se derivan tres cosas:

- El diseño por desempeño en los pavimentos, necesita del conocimiento de la mecánica de los geomateriales que los componen.

- Se necesita de un proceso de control y aseguramiento de la calidad congruente con las características de desempeño que se buscan en un pavimento.

- Se requiere de la formación de nuevos profesionales y técnicos cuyo perfil se acondicione a un nuevo proceso de gestión integral para estos pavimentos.

Los beneficios específicos que se pueden derivar de esta iniciativa, se pueden traducir en:

- Menores costos de mantenimiento de las vías intervenidas.
- Vías que presenten mejores niveles de servicio gracias a la menor cantidad de intervenciones en actividades de mantenimiento y rehabilitación.
- Soluciones ingenieriles adaptables a las condiciones locales.
- Soluciones económicas que sean aplicables a otras ciudades.
- Nuevas especificaciones constructivas basadas en el correcto desempeño del pavimento.

REFERENCIAS

Adedeji A. (2007). "Pavement Deterioration and PE Pipe Behavior Resulting from Open-cut and HDD Pipeline Installation Techniques". Tesis Doctoral, Universidad de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 9-20.

AMEC (2002) "Evaluation of pavement cut impacts", prepared for league of Arizona cities by AMEC earth & environmental, inc. Phoenix, Arizona.

American Public Works Association, APWA (1998) "Managing Utility Cuts". Kansas City, MO.

Bodocsi, A., Pant, P. D., Aktan, A. E., Arudi, R. S. (1995). Impact of Utility Cuts on Performance of Street Pavements-Final Report. Cincinnati, OH: The Cincinnati Infrastructure Institute, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati.

Duque J. (2009) "Análisis del comportamiento de deformación volumétrica de llenos en brechas de servicios públicos", Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Minas, Maestría en Ing Geotecnia, Empresas Públicas de Medellín E.S.P., Medellín, Colombia 130pp.

Cardona C. (2007). "Revisión de las especificaciones de construcción de llenos construidos en zanjas de redes de servicios públicos de Medellín". Empresas Públicas de Medellín, Medellín, Colombia.

Gili J.A., Alonso E. E. (2002) "Microstructural deformation mechanisms of unsaturated granular soils". International

Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 26:433-468.

Emery, J. J., and Johnson, T. H. (1987). "Influence of utility cut on urban pavement performance", 2nd North American conference on managing pavements, proceedings Vol. 1, Toronto, Canada.

Jensen K. et al. (2005) "Utility Cut Repair Techniques- Investigation of Improved Utility Cut Repair Techniques to Reduce Settlement in Repaired Areas". Final Report. Iowa DOT Project TR-503. Ames, Iowa: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 144 pp.

Johnson A. W. and Sallberg J. R. (1962) "Factors influencing compaction results". Highway Research Board Bulletin, No. 319 (http://www.fl.fhwa.dot.gov/construction/cmr/documents/hrb_bulletin_319.pdf)

Mangolds, A., and J. Carapezza, (1991). "Assessment of Pavement Cutback Requirements", Foster-Miller, Inc., Final Report, RD & D Project D.28.3, report BUG-D283-FM- 9081-429 prepared for Brooklyn Union Gas Company, Research Development and Demonstration Department, Brooklyn, NY and Consolidated Edison Co. of New York, Inc., Research and Development, New York, NY.

Marston A., A.O Anderson, (1913) "The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Test of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe", Iowa Engineering Experimental Station, Bull 31, Ames, Iowa.

Nichols-Vallerga & Associates, (2000), Final Report: "Impact of Utility Cuts on Performance of Seattle Streets", report submitted to City of Seattle, Seattle Transportation, Project 178.01.30.

Humphrey, M.H., and Parker, N.A. (1998). "Mechanics of small utility cuts in urban street pavements: implications for restoration". Journal of the Transportation Research Record, No. 1629, pp. 226-234.

Khalid F., Vetter D. (2005) "Evaluation of Soil Compaction Measuring Devices", Gas Research Institute, Illinois, USA. 132 pp.

Khogali, W.E.I. (1995) "Assessing Seasonal Variations in Cohesive Subgrade Soils". Ph.D. Dissertation, University of Alberta, Edmonton, Canada.

Khogali, W.E.I., Mohamed H.E. (1999) "Managing utility cuts: issues and considerations", APWA International Public Works Congress NRCC/CPWA Seminar Series "Innovations in Urban Infrastructure"

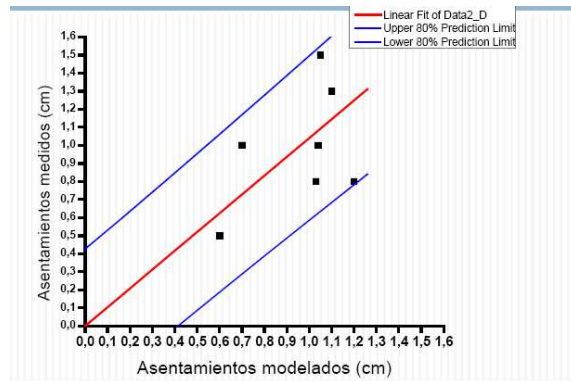
Monahan, E. J. (1994). "Construction of Fills". 2nd Ed. New York, NY: John Wiley & Sons Inc.

Pérez L. E., Pérez S. M. (2003) "Nociones sobre cálculo estructural de conducciones enterradas" Departamento de hidráulica, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Shahin, M.Y., Croveti J A. (1987) "Determining the effect of Utility Cut patching on service life prediction of Asphalt concrete pavement", 2nd North American conference on managing pavements, proceedings Vol. 1, Toronto, Canada, pp. 225-236.

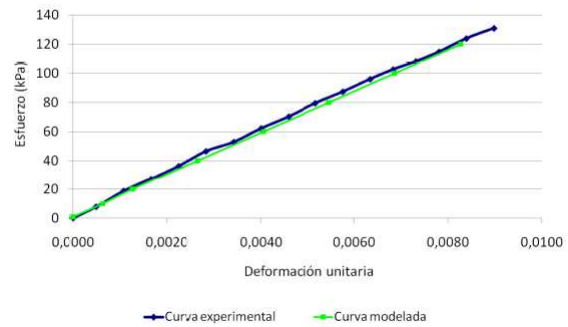
Spangler M.G., Handy R. L. (1982) "Soil Engineering". 4th ed. New York, NY: Harper and Row, Publishers.

Tiewater, P. (1997). "How to Reduce Utility Trenching Costs". Better Roads. Washington Department of Transportation (WSDOT). (<http://www.wsdot.wa.gov/FASC/EngineeringPublications/Manuals/UtilitiesManual.pdf>.)



Validación del modelo.

Curva esfuerzo - deformación unitaria



Curva de calibración del modelo.

ANEXOS NUMERAL 3.4

(Opcional, solo para aclarar o complementar información para el jurado calificador)



Pruebas de carga – modelo físico de laboratorio



Pruebas triaxiales – validación de laboratorio

Denominación del material de lleno	Densidad seca	Porcentaje de compactación	Módulo elástico	Ángulo de fricción
-	γ (kN/m ³)	G.C. (%)	E (kN/m ²)	Φ (°)
Material "muy bien compactado"	18.0	95%	21500	32
Material "bien compactado"	17.1	90%	18000	34
Material "regularmente compactado"	16.2	85%	13000	36
Material "mal compactado"	15.2	80%	9000	38

Valores experimentales obtenidos en esta investigación

Parámetros típicos considerados para los diferentes estados de compactación del lleno ($\mu \approx 0.20$).