

1



**INGENIERÍA,
DOCENCIA E
INVESTIGACIÓN**

Estado del arte
del relleno
fluido para
subbases y
bases
granulares
(Primera parte)

Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina
ISSN 0124-8170 No. 12 - julio de 2002
(Págs. 9 - 22)

LUZ ELENA SANTAELLA VALENCIA Ph. D.¹
RODRIGO SALAMANCA CORREA²

El artículo recoge una parte del estado del arte del proyecto de investigación "Diseño del mortero fluido para remplazar la subbase y base granular" patrocinado por la Universidad Militar Nueva Granada y Concretos Premezclados S.A.. El grupo de investigación está conformado por la investigadora principal, la Ingeniera Civil Luz Elena Santaella Valencia Ph.D egresada de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta) y docente de medio tiempo de la UMNG. Coinvestigador, Rodrigo Salamanca Correa, Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia y director de los laboratorios de la Universidad Militar Nueva Granada. Coinvestigador, el Ingeniero Civil Hernán Pimentel, Jefe del Área Técnica de la empresa Concretos Premezclados. Investigadora, Luz Yolanda Morales, Ingeniera Civil, egresada de la Universidad Militar Nueva Granada, quien se ha desempeñado como Jefe del Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UMNG. También se encuentran dentro del grupo ocho estudiantes de noveno y décimo semestre del programa de Ingeniería Civil.

- 1 Ing. Civil, Coordinadora de la línea de investigación en concreto, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.
- 2 Ing. Civil, Docente de la Facultad de Ingeniería y Director de laboratorios de la Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.

RESUMEN

El artículo presenta una recopilación de información actualizada sobre el tema de los Rellenos Fluidos, normalmente conocidos en la literatura técnica como 'materiales de baja densidad y de baja resistencia controladas'. La finalidad de tal información es sentar una conceptualización básica sobre el tema, de modo que sirva como punto de partida para un proceso investigativo que se emprende conjuntamente entre la Universidad Militar "Nueva Granada" y Concretos Premezclados, S.A.. En este trabajo se pretende optimizar tanto el conocimiento como el diseño y el uso aplicado de tal material a las bases y sub-bases de pavimentos, bajo las condiciones de desarrollo tecnológico, y de disponibilidad específica de materiales locales. En consecuencia, se presenta información sobre: generalidades del tema; conceptos básicos y las aplicaciones del relleno fluido; los materiales componentes; los criterios de dosificación; las propiedades tanto en estado fresco como endurecido; los conceptos de mezclado, transporte y colocación del producto; criterios sobre el diseño estructural del pavimento, y sobre la construcción de los pavimentos, utilizando bases en relleno fluido; el control de calidad, y las ventajas y desventajas asociadas a la aplicación propuesta.

Palabras clave: Materiales de baja resistencia controlada (CLSM), relleno fluido sin encoge (RFSE), mortero o relleno fluido, mortero fluido.

SUMMARY

The article presents an updated compile on 'Fluid Fillers', better known in technical reports as 'controlled low density and low strength materials'. The purpose of the article is to build a basic conceptualisation as a starting point of a research process jointly managed by Universidad Militar "Nueva Granada" and Concretos Premezclados, S.A.. It is the objective to optimise knowledge, design and application of material to base and sub-base in pavements, under local conditions of technical development and available raw materials. Consequently, information is given as fol-

low: introduction; basic concepts and applications of fluid fillers; components; dosage criteria; properties in fresh and hard status; mix, transport and placing concepts; criteria on structural design of pavement, and their construction using fluid filler; Quality Control; advantages and disadvantages of proposed application.

Key Words: controlled low strength material (CLSM), backfilling, flowability, flowable fill.

INTRODUCCIÓN

Para la construcción de un pavimento rígido o flexible se utiliza el material granular para la conformación de la base y subbase, mientras que el concreto hidráulico o el asfalto constituyen la capa de rodadura. El material granular de la base o subbase puede presentar grandes deflexiones o incluso hundimientos superiores a 10cm. con el paso de los vehículos, debido a factores, tales como: la utilización de materiales inadecuados según las especificaciones de las normas, una compactación incorrecta por los grandes espesores de capas, equipos inadecuados y deficiente control de calidad ⁽²⁸⁾.

Cuando el material granular no cumple con las especificaciones de la norma, se puede estabilizar con materiales químicos tales como: cemento, cal, cenizas volantes, asfalto, etc, o compactando la arena y la grava con medios mecánicos, hasta conseguir 100% del valor solicitado, todo esto retrasa la construcción de la obra encareciendo su costo ⁽²⁸⁾. En consecuencia, el relleno fluido es adecuado para reemplazar la base y subbase granular de un pavimento, aumentando su durabilidad y disminuyendo los costos de construcción y mantenimiento. Sin embargo, las mezclas de relleno fluido no son aptas para resistir ciclos de hielo-deshielo, fuerzas abrasivas o ataques químicos ^(19, 16).

Este material recibe otros nombres, tales como: mortero o relleno fluido, suelos líquidos o fluidos, relleno fluido que no encoge (RFSE), mor-

tero o materiales de densidad controlada, mortero o materiales de baja resistencia controlada (CLSM), etc. Los términos reseñados anteriormente describen una familia de mezclas para una variedad de aplicaciones ⁽¹⁹⁾. A continuación, se expondrán los conceptos básicos, aplicaciones, materiales utilizados, dosificación, manejo y propiedades de los rellenos fluidos.

1. Conceptos básicos y aplicaciones del relleno fluido

Definición. El relleno fluido es un mortero o concreto, más ligero que los de peso normal, de baja resistencia controlada, que lo hace excavable y una vez endurecido es capaz de soportar cargas moderadas sin deformarse. De acuerdo con las características propias del relleno, se puede clasificar en dos: relleno de baja resistencia controlada y relleno fluido de resistencia y densidad controlada.

Relleno fluido de baja resistencia controlada (CLSM). Es un mortero o concreto de baja resistencia, de fácil nivelación y autocompactante, que se puede utilizar en aplicaciones tales como: soleras para tuberías de todo tipo de conducciones o para envolver completamente la tubería de agua potable, aguas residuales, gas, teléfono, energía eléctrica, etc. Sin embargo, el uso más común del relleno de baja resistencia es como relleno de zanjas, en reemplazo del suelo procedente de la propia excavación o de la utilización de materiales granulares de préstamo, colocándolo directamente del camión a la zanja, se acomoda alrededor de las tuberías brindando un soporte uniforme, sin necesidad de ser compactado ni vibrado, por lo tanto, las dimensiones de la excavación pueden ser mínimas. Después de 5 horas, se puede trabajar encima del relleno fluido, el cual puede alcanzar una resistencia a la compresión de 0.35 a 0.7 MPa similar a la capacidad de soporte del suelo de una zanja, permitiendo ser reexcavado con medios manuales.

Otra utilidad del relleno de baja resistencia es para la subbase y la base de pavimentos, en

tráfico ligero de vías urbanas, caso en el cual se vierte directamente entre los bordillos previamente colocados. El espesor de la capa de relleno fluido depende de la resistencia a la compresión del material. Para un rango de resistencias a la compresión entre 3 y 9 MPa los coeficientes estructurales (es una medida de la capacidad relativa de bases y subbases, como un componente estructural de un pavimento flexible) pueden oscilar entre 0.16 y 0.28, superior al de las subbase y bases granulares y similares a los suelos tratados con cemento ⁽¹⁸⁾. Además de estos usos, se pueden aplicar para: protección de taludes o cuencos amortiguadores de presas, control de erosión en taludes, canales y zonas costeras, inyección para relleno de huecos bajo los pavimentos, aceras y losas de transición en aproximaciones a puentes.

Relleno fluido de resistencia y densidad controladas. Si además de la baja resistencia del mortero o concreto se requiere baja densidad, (entre 400 y 1700 kg/m³) esto se consigue añadiendo un aditivo inductor de aire o agentes espumantes a la mezcla de cemento, árido y agua, obteniendo así los rellenos fluidos de baja resistencia y densidad controlada. Cuando se adiciona el espumante al mortero o concreto, es usual llamarlos concretos o morteros espumados o celulares.

El aire incluido en la mezcla produce una gran cantidad de burbujas con diámetros que van de 20 a 200 micras. Mientras que en las mezclas con aditivos espumantes, 75% de las burbujas tienen diámetros entre 0.3 y 1.5mm., por lo tanto, la estructura y el material endurecido presentan características diferentes, según el aditivo utilizado.

En el relleno de baja resistencia y densidad controlada no es aconsejable utilizar áridos gruesos, por su tendencia a presentar segregación, aunque es posible utilizar áridos ligeros de densidad similar al material endurecido. Estos rellenos se pueden utilizar en todas las aplicaciones anteriores y en otras específicas para reducir el peso propio de una estructura o en:

- Azoteas para la formación de pendientes y en cubiertas como capa aislante.
- En estructuras subterráneas de poca profundidad.
- Tableros de puentes, para rellenar las zanjas donde se alojan las tuberías de servicios.
- Para rellenar los espacios detrás de los muros de contención y de los estribos en puentes.

Como este trabajo está enfocado a la utilización del relleno fluido para bases y subbases, se tendrán en cuenta los materiales, dosificaciones y las propiedades más importantes para el relleno fluido de baja resistencia controlada, que es el más apropiado en este caso.

2. Materiales para relleno fluido de baja resistencia controlada.

Los materiales más utilizados en las mezclas de relleno fluido de baja resistencia controlada son: el cemento portland con o sin adiciones, agua, aditivo espumante o inductor de aire, agregados finos, y cuando se requiera mayor resistencia o alta densidad se utilizan agregados gruesos (18). Para seleccionar los materiales se debe considerar la disponibilidad, los costos, la aplicación y las características de fluidez, resistencia, densidad, excavabilidad, contenido de aire, etc. (4,19).

Cemento. Es el material que suministra cohesión y resistencia a la mezcla, siendo utilizado el cemento con o sin adiciones tipo I y II especificado en la norma NTC 121 (4, 19, 23). También se utilizan los cementos portland Tipo IV y V, siempre y cuando los resultados sean aceptables. El contenido de cemento en un metro cúbico de relleno fluido varía entre 60 y 200 kg, dependiendo de las resistencias requeridas (32,4).

Agua. Debe ser clara y limpia, libre de sustancias perjudiciales para el relleno fluido como aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica, etc., es decir, los requerimientos exigidos para el agua que se utiliza en los concretos según la norma NTC 3459 son los mismos que para los morteros

de relleno fluido (23). El contenido de agua en un metro cúbico de mezcla de relleno fluido puede estar entre 140 y 350 (31). En las mezclas de CLSM con adiciones de cenizas o con altos contenidos de finos, la cantidad de agua aumenta hasta 620 litros para alcanzar una buena fluidez. Este rango tan amplio se debe principalmente a las características de los materiales usados en la mezcla de CLSM y el grado de fluidez deseado (4).

Cenizas volantes. Proceden de la combustión del carbón pulverizado en las centrales térmicas y se utilizan las clases F (proceden de la combustión de antracitas y carbones bituminosos) o C (proceden de la combustión de lignitos y carbones subbituminosos) en mayor o menor proporción, con el fin de mejorar la fluidez, incrementar la resistencia a largo plazo y reducir: la densidad, la exudación, la retracción y la permeabilidad de las mezclas (19,32). El uso de las cenizas no es necesario cuando la resistencia del mortero está entre 0.5 y 1.5 MPa (32). La cantidad de ceniza volante puede estar entre 0 y 120 kg/m³ (31).

Aditivos químicos. El más utilizado es el inductor de aire para aumentar la fluidez y reducir tanto la densidad como la resistencia de la mezcla. También se mejoran las propiedades aislantes, como por ejemplo en cubiertas, y se disminuye el contenido de agua en 50% (18). Cuando la mezcla se diseña con suficiente cantidad de finos los contenidos de aire pueden estar entre 15 y 20% para aumentar la cohesión y evitar la segregación (19). También se usan los aditivos espumantes en las mezclas de los rellenos fluidos para producir densidades menores de 1000 kg/m³, en casos donde se necesita un alto aislamiento (13,31). Los aditivos acelerantes y reductores de agua se usan en mezclas con bajos contenidos de finos, para acelerar el fraguado y disminuir el asentamiento (18,19).

Agregados. Los más adecuados son los que cumplen con las normas NTC 174. Los materiales granulares de excavación han mostrado variabilidad en las propiedades físicas de la mezcla. Mientras que los suelos con finos de arcilla, demandan mayor can-

tividad de agua, contracción y resistencia variable y la mezcla es pegajosa ⁽¹⁹⁾. La cantidad de arena oscila entre los 1400 y 1800 kg/m³ ⁽³²⁾. Cuando se quieren obtener resistencias superiores a 3 MPa, se utiliza una proporción de agregado grueso con respecto al

fino de 1 a 1.4, y siendo el contenido total del agregado del orden de 1400-2100 kg/m³ ^(32, 18). Las granulometrías de los agregados para rellenos fluidos que se proponen en el proyecto de norma ⁽²³⁾, deben cumplir los requisitos de las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Granulometrías para los agregados utilizados en los rellenos fluidos ⁽²³⁾

TAMIZ Pulg. (mm.)	ARENA PARA CONCRETO		ARENA PARA MORTERO	
	Natural	triturado	Natural	Triturado
1/2" = 12.5	-	-	-	-
3/8" = 9.5	100	100	-	-
Nº 4 = 4.75	95-100	95-100	100	100
Nº 8 = 2.36	80-100	80-100	95-100	95-100
Nº 16 = 1.18	50-85	50-85	70-100	70-100
Nº 30 = 0.589	25-60	25-60	40-75	40-75
Nº 50 = 0.297	10-30	10-30	10-35	20-40
Nº 100 = 0.149	2-10	2-10	2-15	10-25
Nº 200 = 0.074	0-5	0-7	0-5	0-10 ⁽¹⁾

(1) Verificar que los finos proceden de la trituración.

Tabla 2. Requisitos que deben cumplir los agregados ⁽²³⁾

REQUISITOS	VALOR MÁXIMO PERMITIDO
Módulo de finura	1.7
Absorción (%)	2.5
Material pasa T200 (%)	7
Materia orgánica	Escala de color 3
Partículas deleznableles (%)	1
Reactividad potencial a los álcalis del cemento.	Ver NTC 174 y ASTM C289

Cualquier material que se vaya a utilizar es necesario ensayarlo antes de su uso para determinar su aceptabilidad en las mezclas de relleno fluido. Entre los materiales disponibles que se pueden utilizar y son más económicos, están: cenizas volantes con contenidos de carbón hasta de 22%, arena procedente de los procesos de fundición, concreto reciclado, etc. ⁽¹⁹⁾.

3. Dosificación de la mezcla

Actualmente no existe un método específico de dosificación para el relleno fluido de baja

resistencia controlada (RFBRC); los métodos que se utilizan para morteros y concretos corrientes no son apropiados, por lo tanto, es habitual proceder por tanteos hasta conseguir las propiedades deseadas. En algunos trabajos se ha utilizado el método de "Selección de las proporciones para concreto normal en peso y masa, (ACI 211)" y se ha afirmado que es fiable su uso ⁽⁶⁾. El diseño de la mezcla varía según los requerimientos de cada obra, tal como se puede observar en algunos ejemplos de dosificaciones utilizadas en varias obras ⁽¹⁸⁾, realizadas en países como Canadá, Estados Unidos y México, con diferentes alternativas de

aplicación como se puede observar en algunos de los proyectos que se exponen a continuación:

Caso 1. En Toronto Canadá, el contratista ELES DON realizó un relleno en el paso subterráneo Spadina, debajo de la autopista Halen, que era importante reabrir al tráfico en el menor tiempo posible. La excavación se hizo a más de 15 metros con un volumen total de 7.700 m³ de relleno. Para reducir el tiempo de construcción se utilizó el "relleno fluido que no encoge" (RFSE), con la dosificación que aparece en la Tabla 3 ⁽¹³⁾.

Caso 2. Se disponía de cuatro horas para rellenar una zanja en una calle de alto tráfico en San Francisco (California). El relleno fluido que no encoge cuya dosificación aparece en la Tabla 3, se colocó a una profundidad de 1.5 m por encima de la tubería, después de treinta minutos se colocó el geotextil y encima de este, una capa de concreto de 30 cm., que al fraguar lo suficiente, permitió abrir la calle al tráfico a las cuatro horas estipuladas ⁽¹³⁾.

Caso 3. En las Vegas, se realizó el relleno de una zanja en la cual se colocó una tubería de PVC de 20 cm. de diámetro, para proteger unos cables eléctricos que se encontraban dentro de esta. Se utilizó el relleno fluido que no encoge, con un contenido de aire en la mezcla de 30% y una densidad de 1600 kg/m³, con el fin de mantener los tubos sumergidos hasta conseguir el fraguado inicial; la dosificación utilizada se puede apreciar en la Tabla 3 ⁽¹³⁾.

Caso 4. En el sótano del edificio de correos en Boston se quitó un tanque oxidado de combustible. Se extrajeron 615m³ de tierra contaminada que se reemplazaron con relleno fluido que no encoge (RFSE), que permitió la autonivelación y la apertura del correo en corto tiempo; la dosificación utilizada se puede apreciar en la Tabla 3 ⁽¹³⁾.

La masa total de la mezcla se calcula como la suma de las masas de los componentes. La unidad de medida que se utiliza en las plantas de mezclado para la venta es el metro cúbico de la mezcla de relleno fluido fresco ⁽²³⁾.

4. Propiedades del relleno fluido

Las propiedades más importantes en las mezclas de relleno fluido de baja resistencia controlada, para bases y subbases de pavimentos son: gran capacidad de soporte estructural, estabilidad de volumen, gran facilidad de colocación y manejo, no se erosiona en presencia de agua ⁽²⁰⁾.

Las propiedades de una mezcla de relleno fluido de baja resistencia controlada (RFBRC) es un híbrido entre un suelo y un concreto, por que se fabrica con los materiales usados en el concreto y se coloca de igual manera, pero en servicio sus propiedades se parecen a la de los suelos de calidad controlada. No obstante, los materiales y su dosificación afectan las propiedades de la mezcla de RFBRC, por lo cual, existe un gran rango de valores para los parámetros que lo caracterizan ⁽¹⁹⁾.

Tabla 3. Dosificaciones de RFSE utilizadas en cuatro proyectos ⁽¹³⁾.

MATERIALES	CANTIDADES DE LOS MATERIALES			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Cemento (Kg)	25	120	60	60
Arena (Kg)	1365	1540	1420	1400
Agua (Its)	140	145	175	175
Darafil (m)	115	115	115	115
Contenido de aire (%)	28	20	30	30
Acelerante (Its)	-	8	-	-

4.1 Propiedades en estado fresco

Entre ellas se discutirán la consistencia o fluidez, el tiempo de fraguado, el contenido de aire, la segregación y contracción.

Consistencia o fluidez. Permite que el relleno fluya, se autocompacte y autonivele, sin requerir la utilización de equipos como sucede con los materiales granulares que se colocan por capas y se compactan mecánicamente. Por lo tanto, la consistencia del relleno fluido puede variar desde plástica hasta fluida, el relleno de consistencia plástica cuyo rango de asentamiento recomendado está entre 15 y 20 cm. en el cono de Abrams ⁽¹⁹⁾, se coloca en las subbases y bases del pavimento que requieren pendientes cercanas a 2% para el manejo del agua en la superficie del pavimento, y el relleno de consistencia fluida que es autonivelante, el rango de asentamiento es superior a 20 cm. en el cono de Abrams y se aplica en zanjas ^(19,20).

Sin embargo, se debe considerar que un relleno muy fluido ejerce una presión hidrostática; para evitarla, es mejor colocarlo en capas que se dejan endurecer antes de colocar la siguiente. Existen diferentes métodos para determinar la consistencia o fluidez de los RFBR, que son: el cono de Abrams, el cono de flujo y el ensayo del flujo modificado ⁽¹⁹⁾.

El ensayo con el cono de Abrams se utiliza de acuerdo con lo especificado en la norma NTC 396 "Asentamiento de concreto de cemento portland", cuando la consistencia esperada es menor de 200mm. y se enmarca dentro de los siguientes intervalos ^(19, 18):

- Baja fluidez = 15 cm. o menos
- Fluidez normal = entre 15 y 20 cm.
- Alta fluidez = superior a 20 cm.

El ensayo con el cono de flujo según la norma ASTM C939 "Flujo de grout para concreto con agregados precolados", se utiliza en mezclas de con-

sistencia fluida superior a 200mm. y con un tamaño máximo de árido de 6.35mm.. El tiempo recomendado en este método es de 30 ± 5 segundos ^(19,23).

El ensayo de flujo modificado se determina en las mezclas fluidas con predominio de arenas menores a 19mm. (3/4"), cuando el tamaño de la arena es superior a 19mm., el ensayo se realiza con el pasante del tamiz de 19mm. y se utiliza un cilindro recto de hierro, plástico u otro material no absorbente, abierto en los extremos, cuyas dimensiones son: 7.62cm. de diámetro y una altura de 15.24cm.. Se mide el diámetro del material esparcido, que para los CLSM fluidos, el promedio del diámetro de la torta típica es de 20 a 30cm. ^(8, 19).

El ensayo propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los E.U. en la norma CRD-C611-80 "Método de ensayo para flujo de grout", se utiliza para mezclas fluidas con agregados inferiores a 6.35 mm. y el tiempo recomendado en este método es de 12 s ⁽¹⁹⁾.

Tiempo de fraguado. Es el tiempo necesario para que el relleno fluido cambie del estado plástico al endurecido hasta obtener la resistencia para soportar el peso de una persona. El tiempo de fraguado depende del tipo y calidad del cemento, dosificación y fluidez del relleno, temperatura ambiente y de la mezcla, la humedad y el espesor del relleno. En condiciones normales, el paso de personal y máquinas se puede realizar de 3 a 5 horas, y para poder soportar el tráfico normal se requiere de 24 a 36 horas ⁽³²⁾; para su determinación se realiza el ensayo de penetración, según la norma NTC 890 que a su vez nos proporciona la capacidad de soporte del relleno fluido, siendo la más adecuada una penetración entre 500 y 1500 ⁽¹⁹⁾.

Contenido de aire. Los contenidos de aire superiores a 20% disminuyen significativamente la resistencia a la compresión y facilitan la reexcavación de los rellenos ⁽¹³⁾.

Segregación. Las mezclas de alta fluidez obtenidas con altos contenidos de agua, pueden

provocar la separación de los componentes; para evitarlo es necesario realizar una adecuada dosificación, utilizando materiales finos tales como cenizas volantes o limos hasta un 20% del total de los agregados, para que suministren cohesión. También se pueden emplear conglomerantes con gran contenido de cenizas volantes ^(18, 19). Se deben evitar los finos plásticos que incrementan la retracción de la mezcla ⁽¹⁹⁾.

Contracción. Se presenta un cambio de volumen por la evaporación del agua, debido a la temperatura o a la acción del viento, y a la pérdida del agua que es absorbida por el terreno adyacente o es exudada a la superficie, durante el proceso de endurecimiento de la mezcla. El valor típico de contracción en mezclas con altos contenidos de agua, está entre 3.1 y 6.35 mm. por cada 30 cm. de profundidad ^(19, 18).

4.2 Propiedades en estado endurecido

Entre ellas se verán la resistencia, módulo de rotura, módulo de elasticidad, módulo dinámico, valor relativo de soporte, contracción, retracción, aislamiento térmico, excavabilidad, permeabilidad y densidad.

Resistencia. Para determinar la capacidad que tiene el relleno fluido de distribuir cargas, se realiza el ensayo de resistencia a compresión, la cual debe estar entre 20 y 85 kg/cm² para subbase y bases de pavimentos ⁽¹⁹⁾. Según González ⁽¹⁶⁾ y Alonso ⁽³⁾, la resistencia a la compresión de una subbase debe estar entre 7 y 14 kg/cm² con un valor relativo de soporte (VRS) igual o superior a 50% y la resistencia de las bases está entre 15 y 25 kg/cm² con un valor relativo de soporte (VRS) igual o superior a 80% ⁽²⁸⁾. Se permite el uso de un relleno fluido de 85 kg/cm² en aquellos sitios donde se presume que no se hará una excavación futura, como puede ser el caso de un relleno estructural bajo excavaciones ⁽¹⁶⁾. En los RFBRC se debe controlar que la resistencia a largo plazo no alcance un valor alto, para que pueda ser reexcavado posteriormente en caso necesario ⁽¹³⁾.

En los suelos granulares, una resistencia de 50 kg/cm² es elevada, ya que la capacidad portante de un suelo granular bien compactado tiene una resistencia a la compresión de 6 a 8 kg/cm², mientras que un relleno fluido su resistencia a la compresión máxima especificada es de 85 kg/cm². La resistencia del relleno también afecta a los coeficientes estructurales (capacidad relativa de bases y subbases) que oscilan entre 0.16 y 0.28 para una resistencia a la compresión desde 28-84 kg/cm² ^(19, 20).

En consecuencia, la resistencia del relleno fluido puede ser igual o superior a la del material granular compactado de la subbase y base de un pavimento. El relleno fluido con una resistencia menor o igual a la del material granular que se desea cambiar, se puede colocar en aquellos casos en que se deban mantener los espesores de diseño, y un relleno fluido de mayor resistencia a la del material granular que se va a cambiar, se coloca en el caso que se requiera disminuir los espesores de excavación. Para el cálculo del espesor de una placa de relleno fluido se deben considerar: las cargas de tránsito, CBR, nivel freático, la resistencia, etc. ⁽²⁰⁾.

Una capacidad de soporte de 0.5 Mpa es similar a la de un relleno de tierra con una capacidad de resistencia de aproximadamente 70 kg/cm². En clima caliente, el tiempo para soportar el peso de una persona es de 5 a 8 horas y para soportar las cargas del tráfico es de 24 a 36 horas ⁽¹³⁾.

El valor de la resistencia a la compresión a la edad estipulada debe ser el resultado del promedio de por lo menos dos cilindros normalizados. La elaboración, curado y rotura de los cilindros se debe hacer conforme con la norma NTC673, pero reduciendo la velocidad de carga de la prensa a 0.6 KN/seg ⁽²³⁾.

Módulo de rotura (Mr). En el caso de la resistencia a la flexión del relleno fluido, se ha encontrado que los valores pueden variar entre 10 y 20% de la resistencia a la compresión. El valor del módulo de rotura para el relleno fluido, se puede estimar con la siguiente ecuación ⁽¹⁴⁾:

$$M_r = 0.14 * (f'_c)$$

Donde:

$$f'_c = \text{Resistencia a la compresión del relleno fluido (kg/cm}^2\text{)}$$

Módulo de elasticidad (Me). Según González ⁽¹⁶⁾ los valores del módulo de elasticidad para subbases y bases en relleno fluido se encuentran entre 16000 y 67000 kg/cm², se miden en cilindros de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura y se puede aproximar mediante la siguiente expresión, que es válida para determinar el módulo de elasticidad de rellenos fluidos con densidades entre 1750 y 1950 kg/m³ ⁽¹⁴⁾:

$$Me = 10235 \cdot f'_c$$

Donde:

$$f'_c = \text{Resistencia a la compresión del relleno fluido (kg/cm}^2\text{)}$$

Módulo dinámico (E). Según González ⁽¹⁶⁾ los valores del módulo dinámico para subbases y bases en relleno fluido se determinan conforme con la norma ASTM C469, pero debido a la complejidad del equipo pocas veces se realiza, por lo cual son más utilizadas las correlaciones basadas en la resistencia a la compresión y tracción que se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$E = 57000 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ para esfuerzos de compresión}$$

$$E = 6670 * (MR) \text{ para esfuerzos de tracción}$$

Donde:

$$f'_c = \text{Resistencia a la compresión del relleno fluido (psi)}$$

$$M_r = \text{Módulo de rotura (psi)}$$

Valor relativo de soporte (VRS) o CBR. Este valor es superior a 100% a los siete días (según el contenido de cemento) de haber colocado el relleno fluido ⁽¹⁶⁾. Pero según González ⁽¹⁶⁾ el valor relativo de soporte (VRS) de una subbase debe ser igual o superior a 50% y la de la base igual o superior a 80%, dependiendo de las condiciones del tránsito ⁽²⁸⁾. La correlación entre el valor relativo de soporte y la resistencia a la compresión del

relleno fluido, se puede calcular mediante la expresión ⁽¹⁴⁾:

$$VRS = 2.377 * f'_c + 30.25$$

Donde:

$$f'_c = \text{Resistencia a la compresión del relleno fluido (kg/cm}^2\text{)}$$

Contracción. Al contrario que en los rellenos granulares compactados, se ha comprobado que el relleno fluido no presenta asentamiento una vez se ha endurecido ⁽¹⁹⁾. El encogimiento típico del relleno fluido está entre 0.022 y 0.05%, por lo tanto, no afecta su comportamiento ^(19, 18).

Aislamiento térmico. En este caso se fabrica una mezcla con baja densidad y alta porosidad, para lo cual es apropiado utilizar agregados livianos y un aditivo espumante, con el fin de utilizarlos para la formación de pendientes en cubierta y en los rellenos que rodean cables de energía eléctrica ^(19, 18).

Excavabilidad. Esta posibilidad se debe considerar en los proyectos, pensando en futuras reparaciones o renovaciones de servicios (conducciones de agua, gas, electricidad, cables de fibra óptica, etc.), teniendo en cuenta que un relleno fluido con una resistencia a la compresión de 3.5 kg/cm² o menos se puede excavar manualmente, y con una resistencias a la compresión de hasta 14 kg/cm² es necesario utilizar para su excavación una retroexcavadora, martillos neumáticos o hidráulicos. Las mezclas de rellenos fluidos de bajas resistencias con altos contenidos de áridos gruesos son difíciles de excavar a mano ^(19, 18, 13).

Permeabilidad. La del relleno fluido es parecida a la de los materiales granulares bien compactados cuyos valores se encuentran entre 10⁻⁴ y 10⁻⁵ cm/sg y los de mayor resistencia y contenidos más altos de finos se obtienen permeabilidades bajas de 10⁻⁷ cm/sg. La permeabilidad aumenta a medida que se reduce el contenido de cemento y se aumenta el contenido de agregados que pasan por el tamiz de 80 μm ⁽¹⁹⁾.

Densidad. Se determina "in situ" con el densímetro nuclear, cuyos valores se encuentran entre 1800 a 2350 kg/m³ que es superior a la mayoría de los materiales granulares bien compactados ^(18, 19, 31). Con un contenido de aire de 15 a 30%, se producen densidades húmedas de 1550 a 1950 kg/m³ cuyo valor en concretos normales es de 2300 a 2500 kg/m³, siendo muy apto aplicarlo en zanjas ^(13, 22). Cuando se utilizan agregados ligeros, cemento y agua las densidades están entre 1441 y 1602 kg/m³ ⁽¹⁹⁾.

5. Mezclado, transporte y colocación

Para el procedimiento de mezclado, transporte y colocación de las mezclas de relleno fluido de baja resistencia controlada, por lo general se tiene en cuenta el método establecido en la norma ACI 304. Sin embargo, existen otros métodos que se han utilizado con resultados aceptables, en los cuales se tiene en cuenta que el relleno sea uniforme, consistente y que cumpla con las características esperadas del proyecto ⁽⁴⁾.

Mezclado. Se puede realizar en centrales de mezclado, plantas de concreto y en camiones mezcladores de concreto. Se debe seguir la misma secuencia y procedimiento de cargue de los materiales en todas las bachadas, para asegurar la calidad y uniformidad del relleno fluido, teniendo en cuenta los siguientes pasos ^(23, 4):

1. Añadir de 70 a 80% del agua requerida.
2. Añadir 50% de los agregados finos.
3. Añadir toda la cantidad de cemento y ceniza volante requerida.
4. Añadir la cantidad restante de los agregados finos.
5. Añadir la cantidad restante de agua.

Se debe verificar con antelación el tiempo de mezclado para asegurar la calidad y uniformidad del relleno fluido ⁽²³⁾. Es fundamental realizar un buen amasado de la mezcla por un tiempo mínimo de cinco (5) minutos para conseguir la

dispersión del aditivo aireante y lograr la fluidez y estabilidad del material ⁽³²⁾.

Transporte. Se realiza con camiones mezcladores y/o agitadores. El CLSM requiere que la mezcla se agite constantemente con el fin de que los componentes sólidos permanezcan en suspensión, durante el transporte y en el tiempo de espera para la descarga. Para distancias cortas y cantidades inferiores a 0.5m³, el CLSM se ha transportado en equipos sin agitación como camiones de volteo ^(23, 18) a pesar de que los camiones de mezclado suministran un efecto a la mezcla

Colocación. Se puede realizar de forma similar a la de los morteros y concretos corrientes, con los equipos disponibles en las obras, es decir, vertido directo por la canalera de la mixer, utilización de baldes, cintas o incluso con bombeo a baja presión o con bombas rotativas ⁽³²⁾.

6. Diseño estructural del pavimento

Los proyectos de pavimentos se han diseñado con el método de la AASHTO-93, reemplazando la subbase granular por un material cuyo módulo resiliente es de 1.000.000 lb/pulg² para conseguir un resultado aproximado a la estructura requerida. Pero el método AASHTO-93 no tiene en cuenta para sus estructuras analizadas un material similar al relleno fluido, por ser un método empírico ⁽¹⁶⁾.

En Colombia se ha utilizado el programa DEPAV de la Universidad del Cauca, cuyo procedimiento de diseño se basa en los principios de la mecánica racional de los materiales y la presencia de varias capas ⁽¹⁶⁾.

El ayuntamiento de Guadalajara sacó a concurso en 1998 la pavimentación de varias calles, cuya estructura estaba compuesta por una carpeta de 10cm. de espesor de concreto hidráulico $M_r = 50 \text{ kg/cm}^2$, sobre una base de 10cm. de espesor de relleno fluido de $F'c = 25 \text{ kg/cm}^2$. Cemex de México realizó la obra, para la cual determinó el número estructural del pavimento original y el definitivo, teniendo en cuenta los datos que aparecen en la Tabla 4 ⁽³⁾.

Tabla 4. Estructura propuesta para los pavimentos compuestos ⁽²⁾.

Número capas	Coefficiente capa a(i)	Coefficiente de drenaje (Cd)	Espesor de capa (t)	a(i)*Cd*t
Estructura original propuesta				
1	0.50	1.00	2.95	1.48
2	0.31	1.00	1.97	0.61
3	0.10	0.95	5.91	0.56
Número estructural (SN) = 2.65				
Estructura final				
1	0.50	1.00	3.94	1.97
2	0.22	1.00	3.94	0.87
Número estructural (SN) = 2.84				

7. Construcción de pavimentos, colocando una base en relleno fluido

En la construcción del pavimento de siete calles de Guadalajara (México) utilizaron como base el relleno fluido. En una de las calles se presentó agrietamiento plástico del relleno fluido después del fraguado, el cual se corrigió, saturando previamente con agua la base sobre la que se colocó el relleno fluido y curando con agua, por lo menos dos veces al día, hasta que se colocara la capa de rodadura ⁽³⁾.

Cuando la capa de rodadura se construye en concreto hidráulico, previamente se debe saturar con agua la base de relleno fluido para prevenir la pérdida de agua del concreto hidráulico y evitar el fisuramiento plástico. También se debe asegurar la adherencia entre estas capas mediante la limpieza de las partículas sueltas y polvo de la superficie del relleno, previo a la colocación de la capa de rodadura. Se recomienda colocar rápidamente la capa de rodadura para proteger el relleno fluido del medio ambiente y del tránsito de personas y vehículos ⁽³⁾.

Por lo tanto, para evitar la erosión del relleno fluido durante el tiempo que permanezca descubierto, se debe tener en cuenta lo siguiente: cerrar los poros del relleno extendido con una lla-
na de aluminio o magnesio hasta obtener una

superficie lisa, no dejar circular los vehículos sobre el relleno fluido durante el tiempo que permanezca descubierto y colocar en el menor tiempo posible la capa de rodadura, verificando que los camiones de mezclado no provoquen deformaciones en la superficie del relleno fluido ⁽³⁾.

8. Control de calidad

El relleno fluido, por ser un material con gran cantidad de propiedades y usos, requiere un control de calidad de acuerdo con la importancia de la obra, nivel de calidad deseada y de la experiencia que se tenga con el material, para verificar el ajuste de la mezcla con las especificaciones o requisitos.

Para el control de calidad, es necesario realizar los procesos de muestreo, ensayos de control, elaboración y curado de las muestras. El proceso de muestreo lo debe realizar un tomador de muestras, avalado por una entidad certificada; de igual manera, el laboratorio que efectúe los ensayos debe tener la capacidad de asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados de los ensayos, y debe estar certificado por la Superintendencia de Industria y Comercio ⁽²³⁾.

Los proyectos de relleno fluido se realizan mediante un diseño de mezclas, empleando las

materias primas existentes, las cuales para ser evaluadas en estado fresco y endurecido, el productor y el cliente definen el programa de ensayos y establecen los parámetros, condiciones y rangos de aceptación ^(19, 23).

Posteriormente, la verificación en campo se puede realizar visualmente o mediante la realización de ensayos, siendo los más comunes para controlar la calidad del relleno fluido fresco la consistencia, la temperatura, la masa unitaria, el contenido de aire, la elaboración y el curado de los cilindros. En obra, los cilindros se deben realizar aleatoriamente cada 40 metros cúbicos de relleno fluido y mínimo una vez al día. El control de calidad en estado endurecido se realiza mediante la resistencia, que debe ser el promedio de por lo menos dos cilindros normalizados y representativos de una misma mezcla. El ensayo no se tiene en cuenta cuando la diferencia de los resultados de los cilindros de una misma muestra, ensayados a una misma edad, con los mismos procedimientos, equipos y operarios, supere 10% de la resistencia media de la muestra ^(19, 23).

La variación de una bachada se determina para cada propiedad como la diferencia entre el valor más alto y más bajo, obtenidos de las diferentes proporciones de la misma bachada. La comparación se realiza entre dos muestras que representen la primera y última porción de la bachada en ensayo. El relleno fluido se considera uniforme siempre y cuando cumpla la resistencia y con 3 de los 4 ensayos que aparecen en la Tabla 5 ⁽²³⁾.

En el transporte de las muestras de ensayo hacia el laboratorio o sitio de ensayo, se debe evitar el deterioro o alteración de las muestras debido a golpes, vibraciones, pérdida de humedad u otro agente que altere los resultados de ensayo ⁽²³⁾.

9. Ventajas y desventajas del relleno fluido como base y subbase del pavimento

Debido a la facilidad y rapidez de colocación del relleno fluido fresco y a las resistencias superiores del material endurecido con respecto a los rellenos granulares, se ha podido disminuir las dimensiones de las subbases y bases para pavimentos, disminuyendo la profundidad de excavación de las mismas, permitiendo que su utilización disminuya los costos y tiempos de ejecución de la obra ⁽¹⁴⁾.

El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) de Bogotá está implementando actualmente el uso del relleno fluido en reemplazo de la subbase y base granular de los pavimentos, debido a las ventajas que este ofrece, tales como:

Gran capacidad de soporte estructural. Es mayor que los rellenos granulares, garantizando un soporte estructural superior a 100%, a los 7 días de fundido ⁽¹⁶⁾. También es menos permeable y tiene mayor resistencia a la erosión ⁽³¹⁾.

Excavable. Propiedad que depende de la resistencia a la compresión de la mezcla de relleno

Tabla 5. Requisitos para la uniformidad del relleno fluido ⁽²³⁾.

ENSAYO	MÁXIMA DIFERENCIA PERMITIDA
Consistencia por el cono de Abrams	+/- 38 mm.
Consistencia por cilindro de flujo	30 +/- 5 s
Densidad en estado fresco, Kg/m ³	16
Contenido de aire, método de presión, %	2
Resistencia promedio a 7 días, %	7,5

no fluido, que se puede excavar utilizando herramientas manuales como picos o equipos mecánicos (taladros, retroexcavadoras, etc.).

Disponibilidad. Lo fabrica cualquier planta de concreto con materiales locales; el volumen requerido se transporta hasta la obra en camiones mezcladores y/o agitadores, eliminando el acopio de material en las vías que permiten la circulación del tráfico y peatones⁽³²⁾.

Puesta en obra. Se puede colocar con canaletas, rampas, bandas transportadoras, bombas o baldes, no requiere vibración ni compactación; esto se traduce en rapidez, con grandes ahorros en mano de obra y eliminación de los equipo de extendido y compactación^(32, 33).

Apertura rápida al tráfico. Por la rapidez en la colocación y capacidad de endurecer, se puede aceptar el tráfico normal, 36 horas después.

Menos controles. Se requieren menos ensayos para comprobar la idoneidad del material, sobre todo cuando este presenta modificaciones en la obra^(19, 32).

Homogeneidad de la mezcla: Se obtiene debido al proceso de fabricación industrial y a los métodos de ensayos que evalúan su calidad e idoneidad^(19, 32).

La desventaja que presenta el relleno fluido es de tipo económico, ocasionado por el costo de los materiales, pero que se podría equiparar con la subbase y base granular si las estimaciones presupuestales consideraran el mantenimiento que se hace al pavimento mal ejecutado y la reducción del espesor de las capas de subbase y base^(19, 32). Otra desventaja que presenta, es la falta de disponibilidad en las plantas de concreto del relleno fluido para utilizarlo en horas nocturnas y días festivos, debido a los horarios de trabajo de estas plantas.

CONCLUSIONES

La revisión del tema de los rellenos fluidos, los alcances de su utilización, la experimentación muy variada que sobre ellos se ha efectuado en muy diversos países, y la base documental y bibliográfica que se presenta, sirven para definir un plan del trabajo de investigación, haciendo énfasis en algunos aspectos, así:

- La necesidad de realizar ensayos, cuyos resultados prácticos sean aplicables en todo a las condiciones reales de uso en Colombia; prácticos, en cuanto se diseñen y evalúen con los materiales locales, y prácticos también desde el punto de vista comercial, y a costos razonables, para su implementación por parte de la concretera involucrada en la investigación.
- Los resultados esperados después de realizar varios proyectos de investigación relacionados con el relleno fluido, son: 1) definir una metodología para el diseño de las mezclas de relleno fluido con propiedades similares a una subbase o base granular de un pavimento rígido o flexible, 2) implementar una serie de ensayos, que por ser frecuentes en otros materiales, tienen normativa y procedimientos muy extendidos, pero sin desconocer las particularidades inherentes a este nuevo material, que apenas se desarrolla.
- Se prevé, de acuerdo con la literatura revisada, y con los antecedentes encontrados, que la utilización del relleno fluido puede ser muy amplia, y técnicamente muy competitiva, para usarse en reemplazo de las bases y subbases granulares de pavimentos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASOCRETO, "Criterios de control de calidad del concreto y relleno fluido" pp. 21-7, Bogotá.
2. ASOCRETO, "Especificaciones del relleno fluido", pp. 1-20, Bogotá.
3. ALONSO OLLINGER, Pedro E.; "Nuevas tecnologías de pavimentación con concreto hidráulico"; CEMEX; pp. 1-19, Bogotá, 1999.

4. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) 229R-94, "Controlled low strength materials (CLSM); reported by ACI Committee 229, pp. 55-64, julio, 1994.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM D4832-95); "Standard test method for preparation and testing of controlled low strength material, CLSM test cylinders"; pp. 319-322; 1998.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM D5971-96); "Standard practice for sampling inixed controlled low strength material"; pp. 323-324; 1998.
7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM D6023-96); "Standard test method for unit weight, yield, cement content, and air content, gravimetric, of controlled low strength material, CLSM"; pp. 335-328; 1998.
8. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM D6103-97); "Standard test method for flow consistency of controlled low strength material, CLSM"; pp. 332-334; 1998.
9. ADASKA, Wayne S.; "Controlled low strength materials"; En: Concrete International-Farmington Hills; N°4, Vol.19, pp.41-43, 1997.
10. NORMA ESPAÑOLA (UNE 83-312-90), "Determinación de la densidad en el hormigón endurecido"; pp. 1-4, 1990.
11. BREWER, William E.; "Results of the Georgetown, Ohio, USA pavement research using controlled low strength material, controlled pavement base, CLSM"; En: Concrete in the service of mankind: proceedings of the international conference; Vol. 5, pp. 253-261; 1996, London. (B1)
12. BREWER, William E.; "Controlled low strength material, CLSM"; En: Concrete in the service of mankind: proceedings of the international conference; Vol. 5, pp. 655-669; 1996, London. (B2)
13. CODEP-SOCORSA LTDA.; "Fabricación de elementos para la industria de la construcción"; Representantes del aditivo Darafill, pp. 1-9, Bogotá. (C1)
14. CEMEX; "Relleno fluido"; En: Revista Construcción y Tecnología N° 147, Volumen 13, pp. 1-4, México. (C2)
15. FOX, Thomas A.; "Low strength concrete and controlled low strength material"; En: Transportation research record, N° 1234, pp.35-38, Washington, 1989. (F1)
16. GONZÁLEZ, Carlos Hernán; "Caracterización del relleno fluido usado como alternativa de remplazo de bases y subbases granulares"; Concretos Diamante - Samper; En: XII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de pavimentos; pp. 17-1 al 17-14; Julio 4 al 16, 1999, Medellín. (G1)
17. HOFF, George C.; "New applications for low density concretes"; American Concrete Institute (ACI, SP-29); En: Lightweight concrete, pp.181-220, Detroit, 1971. (H1)
18. JOFRÉ, Carlos; "Rellenos con morteros y hormigones fluidos de baja resistencia controlada"; Revista RUTAS N° 67, pp. 5-21, Julio-Agosto, 1998; Madrid (España). (J1)
19. JARAMILLO PORTO, Diego; "Relleno Fluido. Características, propiedades, experiencias"; Asociación Colombiana de productores de concreto: ASOCRETO, En: Seminario hablemos en concreto sobre pavimentos; pp. 1-21, 1999, Bogotá. (J2)
20. JARAMILLO PORTO, Diego; "Relleno Fluido. El nuevo material que reemplaza las bases granulares"; ASOCRETO, pp. 64-68, Bogotá. (J3)
21. LARSEN, Ronald L.; "Case studies demonstrating applications of controlled low strength materials"; American Concrete Institute (ACI); p.40, 1992. (L1)
22. MALLANA RODRÍGUEZ, Ricardo; "Relleno de densidad controlada. Alternativa de cemento para rellenos de zanjas"; En: Boletín ICPC N° 82, julio - diciembre, pp. 9-12, 1998, Medellín. (M1)
23. NTC. Proyecto de norma técnica Colombiana "Especificaciones del relleno fluido", pp. 1-8, Bogotá. (N1)
24. NMAI, Charles; MCNEAL, Frances; MARTIN, Dean; "New foaming agent for CLSM applications"; En: Concrete International-Farmington Hills; N°4, Vol.19, pp.44-47, 1997. (N2)
25. NAIK, Tarun R.; "Low strength concrete and controlled low strength material, CLSM, produced with class fly ash"; University of Wisconsin, Wisconsin electric power-Milwaukee, 15p. 1992. (N3)
26. RAMME, Bruce W.; "Progress in CLSM: continuing innovation"; En: Concrete International-Farmington Hills; N°5, Vol.19, pp.32-33, 1997. (R1)
27. RIGGS, Eugene H.; KECK, Roy H.; "Specifications and use of controlled low strength material by state transportation agencies"; American Society for Testing and Materials (ASTM STP-1331); En: Design and applications of controlled low strength materials, flow able fill; pp.296-305, 1998. (R2)
28. RODRÍGUEZ, José; "Aplicación en vías urbanas. Hormigón ligero para relleno de zanjas"; GRASE, S.A.; pp. 179-181, Madrid. (R3)
29. RAMÍREZ GUEJIA, Élmer y SILVA, Javier; "Morteros de relleno con densidad controlada para relleno de tuberías"; Universidad Militar Nueva Granada; Facultad de Ingeniería; pp. 1-17; Bogotá. (R4)
30. RODRÍGUEZ JALILI, Arturo; "Relleno fluido. Un material para obras de infraestructura"; En: Construcción y Tecnología N° 143, Volumen 13, pp. 36-40, Abril 2000, México. (R5)
31. TORRENT PASCUAL, Roberto J.; "Rellenos fluidos de resistencia controlada"; Instituto Panamericano de Carreteras: IPC; pp. 26-30, 1998, Washington. (T1)
32. VICARIO, Felipe; "Los materiales de baja resistencia controlada (MBRC)"; Revista HORMIGÓN N° 39, Volumen 13, pp. 39-42, Febrero 1999, Madrid. (V1).