

Uso de cementos hidráulicos adicionados con puzolana en las bases estabilizadas con cemento.

Ing. Jorge Solano Jiménez.
Director Técnico, ICCYC.

Introducción.

Las especificaciones utilizadas para el diseño y construcción de bases estabilizadas con cemento en el país, no hacen distinción del tipo de cemento hidráulico a utilizar, siempre y cuando cumplan con el Reglamento Técnico vigente.

Desde hace algunos años, los cementos hidráulicos fabricados y utilizados en Costa Rica y casi en toda parte del mundo, utilizan adiciones como suplementos al clínker. Particularmente en Costa Rica, desde el año 2005, cuando se publicó el Reglamento Técnico RTCR 383:2004 para cementos hidráulicos, el uso de adiciones, especialmente puzolanas, es común en los cementos que se venden y utilizan en el país.

Es un hecho, que los cementos adicionados con puzolanas, tienen un comportamiento diferente al de los cementos sin adiciones, sin que esto signifique un deterioro en su desempeño en el concreto, más bien al contrario, generalmente significa una mejoría en su desempeño. Igualmente, los cementos hidráulicos con diferentes contenidos de puzolanas, tendrán un comportamiento diferente, particularmente con el desarrollo a la resistencia inconfina. Por lo tanto, es de suma importancia conocer estos nuevos comportamientos de los cementos hidráulicos adicionados con puzolana, en diferentes cantidades, con el objeto de tomarlos en cuenta y sacar el máximo provecho del cemento hidráulico, cuando se diseña una base estabilizada con cemento.

En un afán de contribuir con el conocimiento del comportamiento diferencial de estos cementos, el Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, patrocinó un proyecto de grado, que consistió en la investigación de laboratorio, para relacionar la resistencia a la compresión inconfina de las muestras de base confeccionadas con cementos adicionados, con diferentes edades de falla, y así obtener el desarrollo de la resistencia de base estabilizada con el tiempo, utilizando diferentes tipos de cementos hidráulicos adicionados con puzolanas.

La investigación la realizó la estudiante de último año en la Escuela de Ingeniería en Civil, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Fidélitas, de Costa Rica, Estefany Muñoz Zamora, como proyecto final, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Civil, bajo la tutoría del autor de este artículo.

El propósito de este artículo, es el de comentar los resultados obtenidos en esta investigación.

Diseño experimental.

Para la investigación, se planteó controlar las siguientes variables:

- Dos tipos de base estabilizada, BE-25 y BE-35.
- Dos tipos de agregados, uno triturado, agregado A y otro no triturado, agregado B.
- Cuatro edades de prueba o falla de las probetas (3, 7, 28 y 56 días)
- Dos tipos de cemento (RTCR UG y RTCR MP-BH)

Para desarrollar el análisis estadístico, se dividieron las variables controladas en cuatro tratamientos por tipo de base estabilizada, a saber:

Base estabilizada tipo BE-25

1. Agregado A con cemento tipo UG
2. Agregado A con cemento tipo MP-BH
3. Agregado B con cemento tipo UG
4. Agregado B con cemento tipo MP-BH

Lo anterior se repitió para cada una de las cuatro edades de falla y todo para la base estabilizada tipo BE-35. Para cada tratamiento, se confeccionaron 3 probetas por edad y se analizaron como el promedio de las 3 probetas. En total se confeccionaron 96 probetas.

La **Tabla 1**, muestra el diseño experimental básico, que se duplicó para la variable BE-35.

Tabla 1. Diseño experimental básico.

BE-25	Agregado	Cemento UG	Cemento MP-BH
	3 días		
	A	3 probetas	3 probetas
	B	3 probetas	3 probetas
7 días			
	A	3 probetas	3 probetas
	B	3 probetas	3 probetas
28 días			
	A	3 probetas	3 probetas
	B	3 probetas	3 probetas
56 días			
	A	3 probetas	3 probetas
	B	3 probetas	3 probetas

Expansiones y contracciones.

Otra parte experimental desarrollada durante esta investigación, fue la medida de contracción/expansión del material, utilizado en cada uno de los diseños. De esta manera, las ocho mezclas que se diseñaron, fueron ensayadas para determinar la contracción o expansión de las mezclas desarrolladas.

El análisis se hizo mediante la preparación de barras, que fueron hechas según los moldes que se establecen en la norma ASTM C 490, las cuales son medidas a las 24 horas desde su preparación y posteriormente se irán midiendo a los 3, 7 y 28 días. Estas medidas arrojarán resultados, que permiten conocer la expansión/contracción de las mezclas utilizadas.

Metodología.

Una vez definido el diseño experimental, se procedió a caracterizar los agregados, tanto base A como base B.

Se realizaron las pruebas comunes en estos casos, necesarias para el diseño de mezcla, a saber:

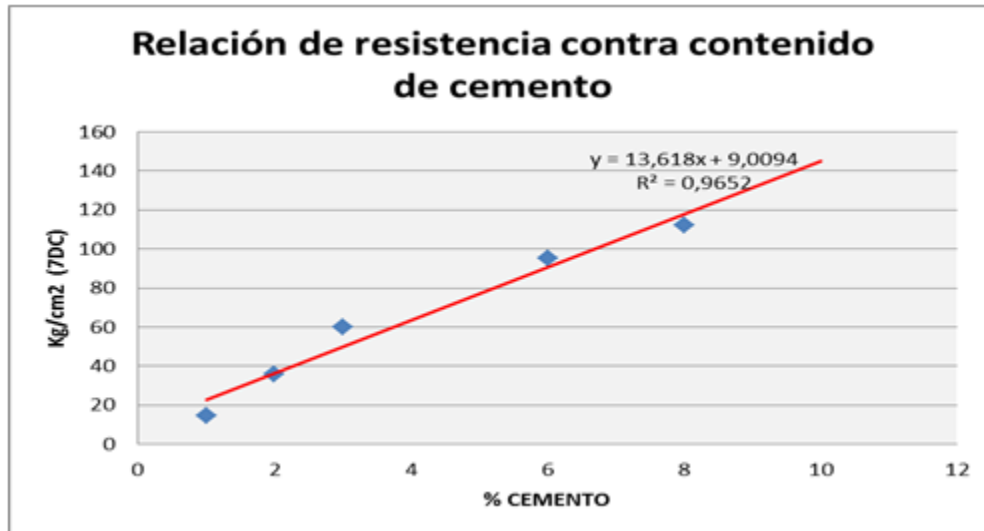
- Granulometría, % pasando el tamiz No. 200, densidad-humedad modificada, sin cemento primero y con cemento después.

Igualmente se procedió con la caracterización de los cementos, realizando las siguientes pruebas:

- Resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (utilizando especímenes cúbicos de 2 in. o [50-mm]), densidad del cemento hidráulico, expansión por autoclave, expansión de barras de mortero en agua, análisis de retenido de 45 micras vía húmeda.

Con los datos de los agregados y los datos de las propiedades de los cementos, se procedió a elaborar los diseños de las mezclas, para los diferentes tratamientos considerados.

Para cada tipo de agregado y cada tipo de cemento, se realizó una curva, como la mostrada a continuación, para el agregado tipo A con el cemento tipo UG. Se realizaron en total cuatro curvas.



Relación resistencia con Agregado A y cemento tipo UG versus porcentaje de cemento.

Estas curvas permitieron seleccionar las cantidades de cemento necesarias, para lograr la resistencia a la compresión a los siete días de una BE-25 (30kg/cm2 promedio) y de una BE-35 (40 kg/cm2 promedio). Esas cantidades, expresadas como porcentaje del peso seco de los agregados, son:

Tipo agregado	Tipo de cemento	BE-25	BE-35
A	UG	1.54%	2.27%
A	MP-BH	2.52%	3.24%
B	UG	1.67%	2.25%
B	MP-BH	2.43%	3.20%

Se procedió con la confección de las probetas, dividiendo el proceso en 8 sesiones continuas. En cada sesión, se confeccionaron las probetas para todos los días de falla de una misma combinación: tipo de agregado-tipo de cemento por cada tipo de base. Las probetas se mantuvieron en la cámara húmeda, hasta el día de su falla.

Resultados.

Los resultados obtenidos, en lo que interesa, la resistencia a la compresión inconfiada de los especímenes de base estabilizada, se calcularon para cada uno de los tratamientos mencionados. Se procedió a sacar un promedio aritmético de las 3 muestras, siempre y cuando no existan muestras con una desviación excesiva, en cuyo caso, se descartó esa muestra y no se consideró en el cálculo del promedio de cada tratamiento y se tabularon.

Un cuadro resumen, ejemplo de esos resultados, particularmente los resultados obtenidos de los diseños con agregado tipo A, con cemento tipo UG, para una base BE-25, se presenta en la siguiente tabla. Igualmente se tabularon los promedios para los restantes tratamientos.

Tabla No. 2. Resultados resistencia inconfiada agregado A con 1,5 % UG (BE-25)

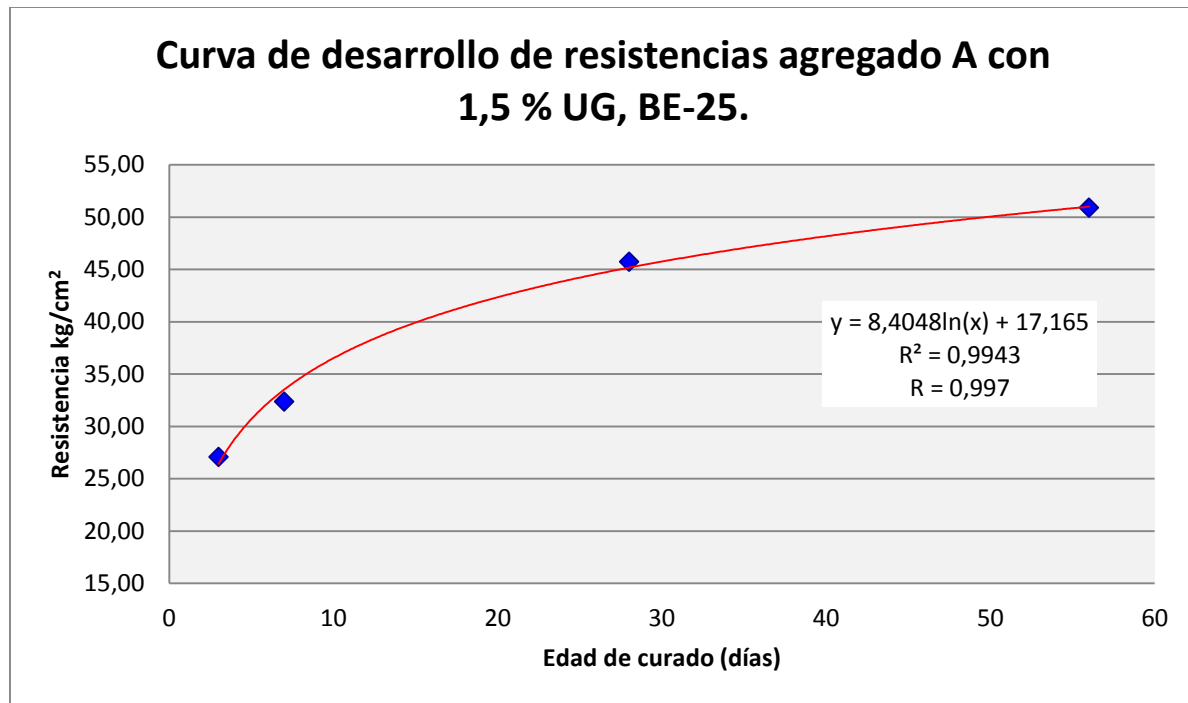
RESISTENCIAS 3DÍAS		
3 DC		
Fecha Falla	15/04/2015	
Código	Agregado A UG 1,5%	
Numero	1	
	Carga Máxima (kN)	Deformación (mm)
X	22,40	8,90
Y	23,80	8,29
Z	18,40	8,71
Carga máxima	21,5	8,6
MPa	2,7	
Kg/cm ²	27,1	

RESISTENCIAS 7DIAS		
7 DC		
Fecha Falla	19/04/2015	
Código	Agregado A UG 1,5%	
Numero	1	
	Carga Máxima (kN)	Deformación (mm)
X	27,10	8,50
y	24,60	8,30
Z	25,50	8,50
Carga máxima	25,7	8,4
MPa	3,2	
Kg/cm ²	32,4	

RESISTENCIAS 28 DIAS		
28 DC		
Fecha Falla	10/05/2015	
Código	Agregado A UG 1,5%	
Numero	1	
	Carga Máxima (kN)	Deformación (mm)
X	37,60	7,77
Y	32,30	8,00
Z	39,20	8,38
Carga máxima	36,4	8,1
MPa	4,5	
Kg/cm ²	45,7	

RESISTENCIAS 56 DIAS		
56 DC		
Fecha Falla	07/06/2015	
Código	Agregado A UG 1,5%	
Numero	1	
	Carga Máxima (kN)	Deformación (mm)
X	40,20	10,80
Y	41,30	12,00
Z	39,90	11,10
Carga máxima	40,5	11,3
MPa	5,0	
Kg/cm ²	50,9	

Para cada uno de los tratamientos, se procedió a graficar los resultados, obteniendo gráficos como el siguiente. En total se obtuvieron ocho cuadros y ocho gráficos.



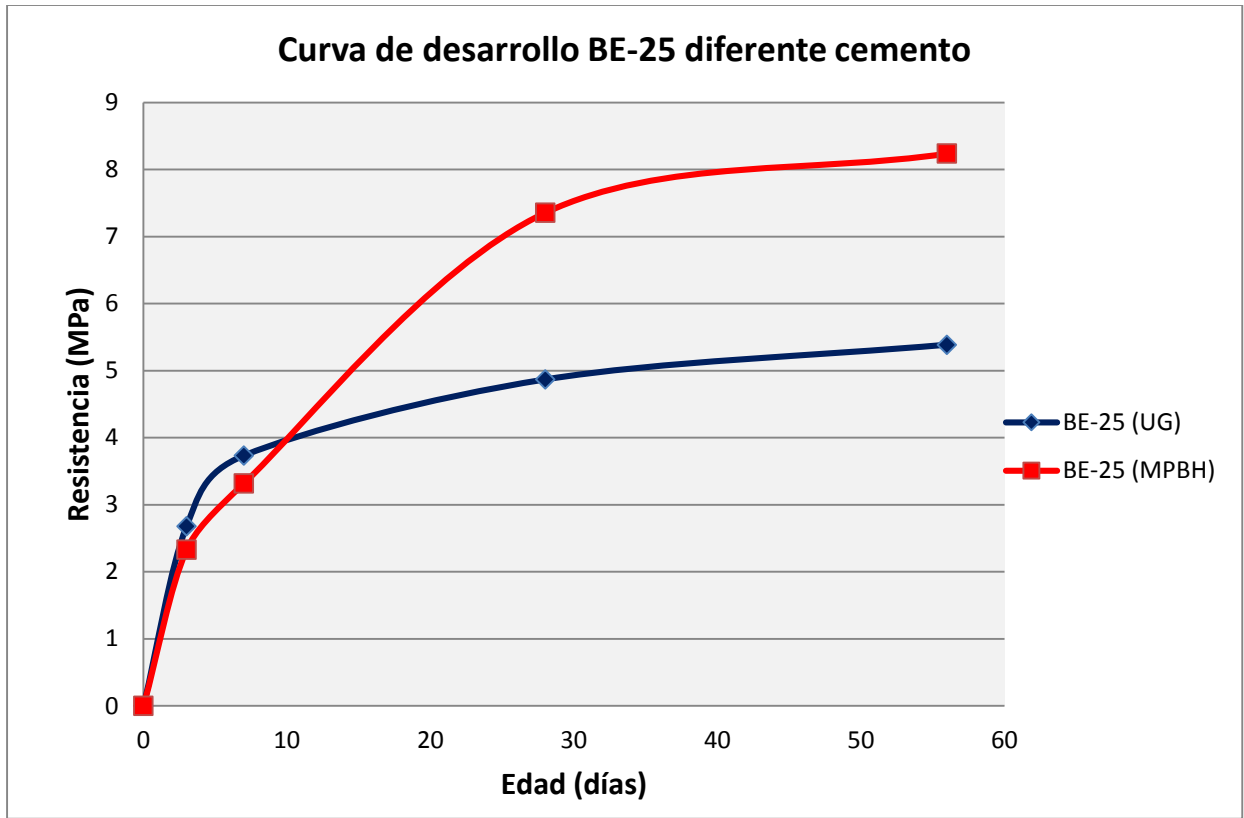
Análisis estadístico.

Además de los promedios, las variaciones estándar y los coeficientes de variación que se obtuvieron para cada grupo de datos, se realizó un análisis de varianza de un factor con el 95% de confianza, con los datos de resistencia a la compresión de las bases estabilizadas BE-25 y BE-35; tanto para el tipo de cemento, como para el tipo de agregado, para valorar si existe evidencia estadística, que permita definir si los conjuntos de datos son significativamente diferentes o no. Se realizó un estudio para cada edad de falla, a saber, 3, 7, 28 y 56 días.

De los resultados obtenidos de estos análisis, se concluye que, con respecto a los agregados tipo A y tipo B, no hay evidencia estadística, con el 95% de confianza, para decir que ambos conjuntos de datos tienen diferencias significativas, por lo que podrían estudiarse como una sola población de datos,

Curvas de desarrollo de resistencia con diferentes tipos de cemento.

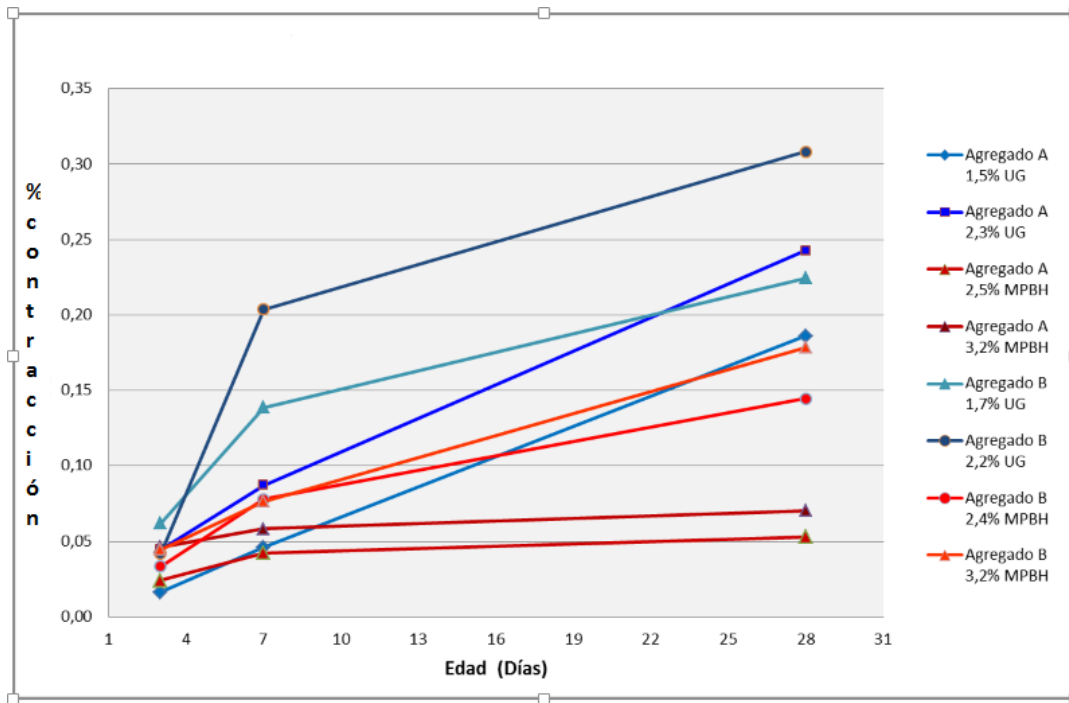
Producto de los análisis estadísticos precedentes, se procede a analizar los resultados obtenidos como un todo, en lugar de hablar de 8 distintos diseños entre las bases estabilizadas BE-25 y BE-35 con Agregado A y Agregado B, y con cemento tipo UG y MP-BH cada uno, se reducen a 4 diseños, hablando únicamente de BE-25, BE-35 con dos tipos distintos de cemento UG y MP-BH, para los cuales se muestran a continuación sus curvas de desarrollo de resistencia con el tiempo.



Curva de desarrollo de Base estabilizada BE-25 utilizando UG y MPBH

Agregado A 1,5% UG	-0,774	-0,804	-0,01	-0,02	-0,904	-0,05	-0,05	-1,204	-0,17
	-0,903	-0,954	-0,02		-1,003	-0,04		-1,403	-0,20
Agregado A 2,3% UG	-0,800	-0,902	-0,04	-0,04	-1,016	-0,09	-0,09	-1,434	-0,25
	-0,766	-0,887	-0,05		-0,986	-0,09		-1,345	-0,23
Agregado A 2,5% MP-BH	-0,98	-1,023	-0,02	-0,02	-1,084	-0,04	-0,04	-1,103	-0,05
	0,762	0,685	-0,03		0,655	-0,04		0,620	-0,06
Agregado A 3,2% MP-BH	-0,33	-0,45	-0,05	-0,05	-0,486	-0,06	-0,06	-0,513	-0,07
	0,522	0,411	-0,04		0,387	-0,05		0,354	-0,07
Agregado B 1,7% UG	-0,866	-1,009	-0,06	-0,06	-1,196	-0,13	-0,14	-1,398	-0,21
	-0,866	-1,033	-0,07		-1,23	-0,15		-1,456	-0,24
Agregado B 2,2% UG	-0,886	-0,993	-0,04	-0,04	-1,381	-0,20	-0,20	-1,634	-0,30
	-0,72	-0,822	-0,04		-1,243	-0,21		-1,513	-0,32
Agregado B 2,4% MP-BH	0,456	0,367	-0,04	-0,03	0,234	-0,09	-0,08	0,114	-0,14
	0,543	0,465	-0,03		0,376	-0,07		0,162	-0,15
Agregado B 3,2% MP-BH	0,634	0,543	-0,04	-0,04	0,457	-0,07	-0,08	0,201	-0,17
	0,785	0,654	-0,05		0,579	-0,08		0,325	-0,18

Al observar los resultados de las expansiones mostradas en la tabla 3 anterior, se observan que todos los valores, muestran contracciones en lugar de expansiones, como era de esperar. Además de que reflejan resultados bastante bajos, todos por debajo del 0,35 %. Más claramente se pueden observar estos resultados, en el siguiente gráfico:



Resultados de Expansión para diseños de bases estabilizadas.

Las líneas de color rojo, corresponden al cemento tipo MP-BH y las azules, al cemento tipo UG. Es claro que los cementos con más adiciones, presentan menos contracciones, que los que tienen menos adiciones o los que no las tienen del todo. Esto a pesar de que se ha utilizado mayor cantidad de cemento MP-BH que UG, para poder cumplir con la resistencia a los siete días. Es claro también, que el tipo de agregado incide en las contracciones de la base estabilizada.

Conclusiones.

- La incorporación de puzolanas, minerales ricos en sílice, en el cemento, impacta positivamente la curva de desarrollo la resistencia de las bases estabilizadas a edades tardías, posteriores a los siete días.
- Para un mismo tipo de agregado y un mismo tipo de base estabilizada, la cantidad de cemento que se necesita para obtener la resistencia especificada a los siete días, es variable, dependiendo del tipo de cemento que se utilice.
- La ganancia de resistencia de las bases estabilizadas con cementos adicionados, posterior a los siete días es muy importante y no debería ignorarse.
- Por ejemplo, el diseño de una BE-25 utilizando un cemento tipo UG, que cumple con la resistencia requerida según la normativa a los 7 días con un valor de 32,4 kg/cm², tiene una resistencia 30 % superior a los 28 días y un 44,5 % superior a los 56 días respecto a los siete días, y si el diseño fuera utilizando cemento tipo MP-BH, que igualmente cumple con la resistencia requerida según la normativa a los 7 días, con un valor de 33,8 kg/cm² tendría una resistencia 120 % superior a los 28 días y un 148 % superior a los 56 días respecto al valor de siete días..
- Una situación parecida, sucede con el diseño de BE-35 utilizando cemento tipo UG, que cumple con la resistencia requerida según la normativa a los 7 días con un valor de 46,5 kg/cm² y tiene una resistencia 37% superior a los 28 días y un 57 % superior a los 56 días, respecto a lo indicado a los siete días. Si el diseño fuera realizado utilizando un

cemento tipo MP-BH, tendría una resistencia 111 % superior a los 28 días y un 136 % superior a los 56 días.

- En cuanto a las contracciones experimentadas por el material estabilizado, éstas son bastante bajas cuando se usa un cemento tipo UG y mucho más bajas cuando se usa un cemento tipo MP-BH. Sin duda, la presencia de puzolanas en los cementos, disminuyen las contracciones del material estabilizado, tal y como lo consigna la literatura al respecto, debido principalmente a la baja velocidad y el poco calor generado durante la reacción del cemento con el agua.
- Finalmente se concluye, que es muy importante evaluar la resistencia de las bases estabilizadas con cementos hidráulicos adicionados a edades tardías, tal vez 28 días o preferiblemente 56 días, para sacar el mayor provecho posible de la capacidad de los cementos de generar resistencia. Para efectos de control de campo, se pueden desarrollar, durante el proceso de diseño de la base estabilizada en el laboratorio, coeficientes de correlación entre 7/28, o 7/56 días.
- Es igualmente imprescindible, definir el tipo de cemento con que se quiere estabilizar el material de base, pues ha quedado demostrado, que diferentes tipos de cemento, generan diferentes resistencias en el tiempo y producen diferentes contracciones en el producto terminado.

Bibliografía.

“Caracterización de bases estabilizadas utilizando cementos adicionados con puzolana”

Estefany Muñoz Zamora,

Proyecto final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Civil.

Escuela de Ingeniería en Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Fidélitas, Costa Rica

Noviembre 2015