

CONSIDERACION ESTRUCTURAL DE LAS CAPAS DE SUELO-CEMENTO POR MEDIO DE SU RESISTENCIA A COMPRESION INCONFINADA ANTE LA GAMA DE SISTEMATICAS DE ENSAYO ASOCIADAS

Julián Rivera, Martín Villanueva, Gladys Sosa

LEMaC Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata, Calle 60 y 124, (1900) La Plata, Bs. As., Argentina
+54-221-4890413, jrivera@frlp.utn.edu.ar

RESUMEN

Las capas de suelo-cemento constituyentes del paquete estructural de un pavimento, suelen considerarse ante el desconocimiento de su módulo dinámico, tomado habitualmente como el parámetro de referencia (en este caso constante), por medio de su resistencia a compresión inconfiada a una edad de 7 días. Los modelos de diseño estructural de uso más difundidos en la región, establecen que las correlaciones entre la respuesta modular de estas capas y su resistencia a compresión inconfiada, se aplican respecto a metodologías de ensayo de origen extranjero. En el medio local, la Dirección Nacional de Vialidad establece el análisis de este material mediante normativa desarrollada a tal efecto en la institución, y la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires lo hace siguiendo la suya propia, siendo que ambas difieren significativamente entre sí y de lo establecido por la normativa extranjera citada. Adicionalmente, existen otros procedimientos que adaptan lo establecido por normas extranjeras a las condiciones locales, constituyéndose en nuevas metodologías de análisis que deberían considerarse.

Lo descripto evidencia la existencia de un grado de incertidumbre en la aplicación de los resultados obtenidos con unas u otras metodologías en los modelos de diseño. Atentos a esta situación se encara un trabajo de investigación, encuadrado en el Proyecto I+D "Análisis para la calibración a las condiciones locales de modelos para el diseño de pavimentos basados en evaluaciones superficiales y estructurales" del Programa de Incentivos del Ministerio de Educación de la Nación, abordando la temática. En el presente trabajo se presentan los detalles de las tareas realizadas y las conclusiones a las cuales se han arribado.

INTRODUCCION

Uno de los materiales habitualmente empleados en la región central de la Argentina como base de pavimentos, logrados mediante la estabilización de suelos finos que presentan características aceptables desde el punto de vista vial, más específicamente suelos A-2 o A-4 de la metodología de clasificación de la Highway Research Board (HRB), es el suelo-cemento.

Este tipo de bases, cuando se realizan con un contenido máximo de cemento de aproximadamente el 8 %, dependiendo del suelo empleado, se constituyen en una opción admisible en la constitución de paquetes estructurales flexibles, pues por estudios realizados en laboratorio y en diversas obras se ha establecido que cuentan con una adecuada relación

modular con las capas asfálticas habitualmente aplicadas sobre las mismas, sin presentar hasta ese contenido de cemento una marcada fragilidad que pudiera llevar a la posterior aparición de fisuras por contracción reflejadas (Rivera, 2013).

Dadas estas características es difundido el uso de las mismas, por lo cual deben ser consideradas desde el punto de vista estructural de una manera adecuada. La metodología que aun hoy en día resulta de uso más difundido en tal sentido es la que establece la "Guide for design of pavement structures 1993" de la American Association of State Highway and Transportation Officials (habitualmente conocida como la Guía AASHTO93), lo cual puede observarse incluso volcado en los Términos de Referencia de los proyectos viales de mayor relevancia, como es en el caso de los llevados adelante bajo créditos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en la última década (DNV, 2010).

Al analizar entonces la Guía AASHTO93 se observa que el aporte estructural de este tipo de bases se obtiene mediante lo expresado en la Figura 1, que correlaciona el Aporte Estructural Unitario de la Capa de Base (a_2) con la Resistencia a Compresión Inconfinada obtenida a una edad de 7 días aplicando la normativa de la American Society for Testing Materials (ASTM), específicamente la Norma ASTM D-1633 (AASHTO, 1993), entre otros parámetros mecánicos.

Al analizar esta norma se observa que la misma contempla dos métodos de análisis de acuerdo a la tipología de suelo-cemento en cuestión (Método A y B). De estos, el Método B es el que resulta de interés, por aplicar sobre muestras confeccionadas con material que pasa en su totalidad el Tamiz N° 4 (4,75 mm de abertura), empleando probetas cilíndricas de diámetro 71 mm y altura 142 mm, es decir con esbeltez de 2,0 (ASTM, 2000). Las mismas deben ser moldeadas y curadas siguiendo la Norma ASTM D-1332, y ensayadas al cumplirse los 7 días de edad a una velocidad de avance de 1 mm/minuto cuando se ensayan en una prensa con tornillo, o a una velocidad de incremento de carga de entre 70 kPa/s y 140 kPa/s si se ensayan con una prensa hidráulica. Por su parte, la Norma ASTM D-1632 establece una metodología de moldeo de las probetas estática a doble pistón (ASTM, 1996).

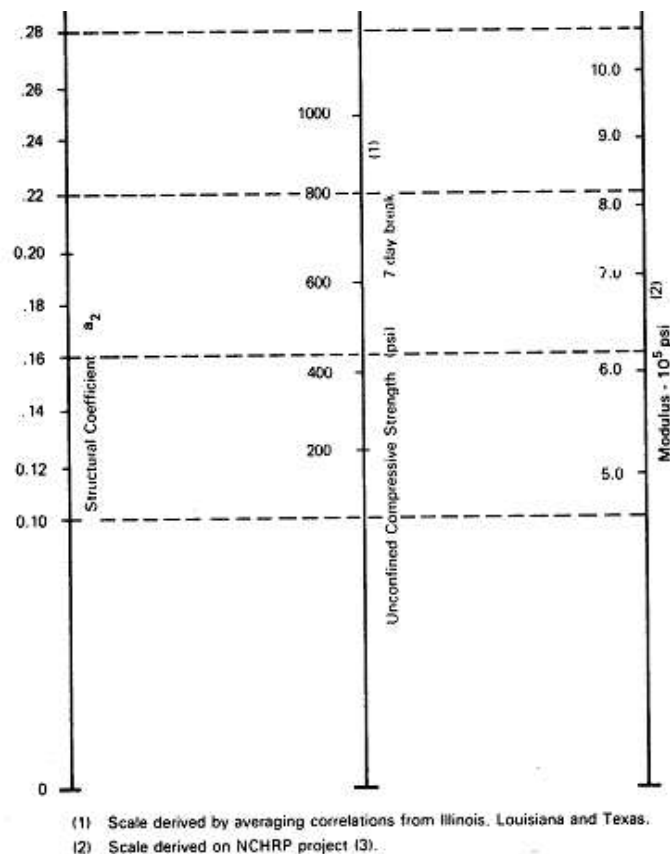


Figura 1. Variación en una base tratada con cemento de los parámetros de resistencia (figura 2.8)
 Fuente: Guía AASHTO93

Al analizar lo establecido por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) como sistemática de ensayo aplicable en la consideración de este tipo de material, ente por excelencia del cual se utilizan sus indicaciones como las de referencia en toda la Argentina, se observa que se establece una velocidad de ensayo de $1,4 \pm 0,7 \text{ kg/cm}^2$ en la Norma VN-E33-67, que entiende sobre el ensayo a compresión de las probetas de suelo-cemento, referenciando a la Norma VN-E19-66 y a la Norma IRAM 10522 el moldeo de las probetas (DNV, 1998b). Estas últimas definen para el “material fino” un sistema de moldeo de las probetas de diámetro de 101,6 mm y altura 116,6 mm, dinámico en tres capas de 25 golpes con el pisón T-99 (DNV, 1998a; IRAM, 1972), similar al del Ensayo Proctor Tipo I.

La Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (DVBA), ente del cual también su normativa es utilizada como de referencia, por su parte establece en su Norma Técnica N°49 para los “suelos finos”, con menos del 50 % de material que pase el Tamiz N°270, el moldeo de probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura y su curado hasta una edad de 7 días (DVBA, 1991). Dicho moldeo se realiza acomodando con pisón la muestra en tres capas y efectuando la compactación en forma estática y a simple pistón.

Como puede deducirse de todo lo citado, la normativa argentina aplicada en la inmensa mayoría de los casos en donde se constituyen capas de base de suelo-cemento con suelos finos, guarda diferencias más o menos notorias con la normativa utilizada de referencia por el método de análisis estructural de mayor uso en ese mismo medio, como lo es la Guía

AASHTO93 (VILLANUEVA et al, 2015). Cabe por esto establecer la incertidumbre en cuanto a si los resultados obtenidos bajo una sistemática son análogos o no a los establecidos bajo las otras. Este fue el motivo que llevó a los profesionales del LEMaC a encarar un trabajo de investigación, encuadrado en el Proyecto I+D “Análisis para la calibración a las condiciones locales de modelos para el diseño de pavimentos basados en evaluaciones superficiales y estructurales” del Programa de Incentivos del Ministerio de Educación de la Nación, abordando la temática.

MATERIALES Y METODOS

Para posibilitar la realización del trabajo inicialmente se procede desde el LEMaC a establecer un procedimiento de laboratorio aplicable en sus instalaciones, basado en los lineamientos especificados en las Normas ASTM D-1633 y D-1632, e introduciendo aquellos detalles operativos y de instrumental faltante en las mismas, dándosele por código el de LEMaC-B05/15 en el marco de su sistema de registro de prácticas y procedimientos internos (LEMaC, 2016).

Se establece un suelo patrón a ser empleado en las experiencias. Si bien en este tipo de aplicaciones lo habitual resulta el empleo de suelos del tipo A-4, se ha seleccionado para este trabajo un suelo base tipo A-7-5 de menor aptitud vial. Esta decisión se ha tomado sobre la base de un conocimiento exhaustivo que se tiene de dicho suelo por haber sido empleado en estudios anteriores, teniéndose la certeza de la no existencia de materia orgánica en el mismo que pudiera tergiversar los efectos de la aditivación con cemento, conocimiento en cuanto a su composición química que posibilita la acción del cemento en la adquisición de resistencia y la previsión de una tendencia a mostrar en forma más notoria las diferencias relativas que podrían darse en tal sentido debido a las variantes metodológicas de los ensayos, por partirse justamente de esa menor aptitud con menor resistencia inicial. Desde el punto de vista vial el suelo reúne las características de la Figura 2.

Clasificación según Norma: (VN-E1-65;VN-E2-65;VN-E3-65)	
LL =	49
LP =	30
IP =	19
PT N° 10 =	99,8
PT N° 40 =	88,6
PT N° 200=	75,4
HRB	A - 7 - 5 (15)

Figura 2. Clasificación HRB del suelo
Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista químico también se cuenta con suficiente información del suelo. En la Tabla 1 y en la Figura 3 se observan los resultados de la Difractometría de Rayos X realizada sobre la muestra.

Tabla 1. Resultados de la Difractometría de Rayos X sobre el suelo

Muestra N°	FRACCION ARCILLAS														Impurezas
	Sm		C		IS			CS			I		K		
	%	Cr	%	Cr	%	Cr	CE	%	Cr	CE	%	Cr	%	Cr	
A75	60	M	Tr		20	M	NC				20	M			Esc: Q-F-Ca

Q: cuarzo
 F: feldespato
 Ca: calcita
 Sm: esmectita
 C: clorita

IS: illita-esmectita
 CS: clorita-esmectita
 I: illita
 K: caolinita
 Cr: cristalinidad

CE: capas expansivas
 Tr: trazas
 M: mala
 NC: no cuantificable
 Esc: escaso

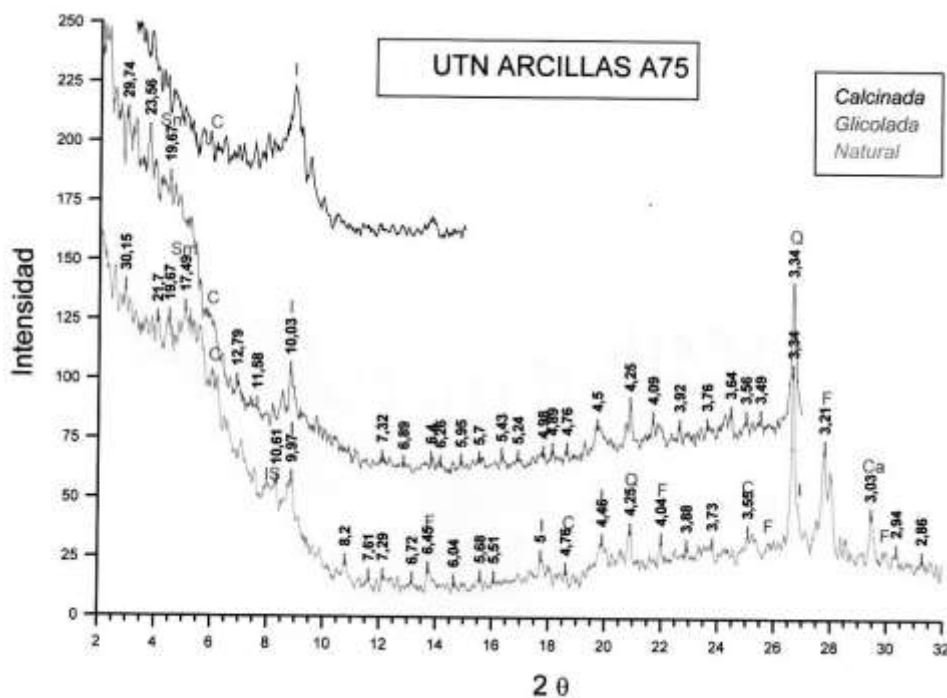


Figura 3. Resultados de la Difractometría de Rayos X sobre el suelo

Se puede decir, en forma general, que la capacidad de intercambio catiónico de la muestra resulta baja para la caolinita, de media a baja para la illita y la clorita, y alta para la esmectita. Los suelos A-4 de la zona suelen presentar mayores contenidos de illita en desmedro de los de esmectita lo que explicaría que muestren menor capacidad de intercambio. En resumen, un suelo A-4 permite alcanzar mayores resistencias a la compresión inconfiada y son los más adecuados para la constitución de una capa de suelo-cemento, pero a los efectos de un estudio comparativo como el que se encara resulta más adecuado el empleo del suelo A-7-5, siempre y cuando éste no presente contenidos de materia orgánica.

A este suelo de lo plantea estabilizar con tres dosificaciones de cemento, analizando las resistencias a compresión inconfiada obtenidas mediante el empleo de las metodologías:

- DNV = De acuerdo a las Normas VN-E33-67, VN-E-19-66 e IRAM 10.522/72
- DVBA = De acuerdo a la Norma Técnica N°49

- LEMaC = De acuerdo al procedimiento LEMaC-B05/15 y las Normas ASTM D-1633 y D-1632

Se establece para el estudio el moldeo de probetas por cada contenido de cemento y por cada metodología en análisis. Los contenidos de cemento a ser analizados son del 6 %, 8 % y 10 %.

Se estipula un curado de las probetas de 7 días en cámara húmeda dentro de una bolsa de polietileno y la inmersión en agua de las probetas durante 1 hora previo a su ensayo para el caso de las metodologías DVBA y LEMaC, y sin inmersión para la metodología DNV, de acuerdo a lo establecido en cada uno de los procedimientos. Las velocidades de ensayo en cada caso son las establecidas por la propia normativa.

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Con los resultados medios obtenidos en el ensayo de Resistencia a Compresión Inconfinada de las probetas moldeadas bajo los parámetros anteriormente citados, pueden realizarse las curvas de tendencias que se observan en la Figura 4.

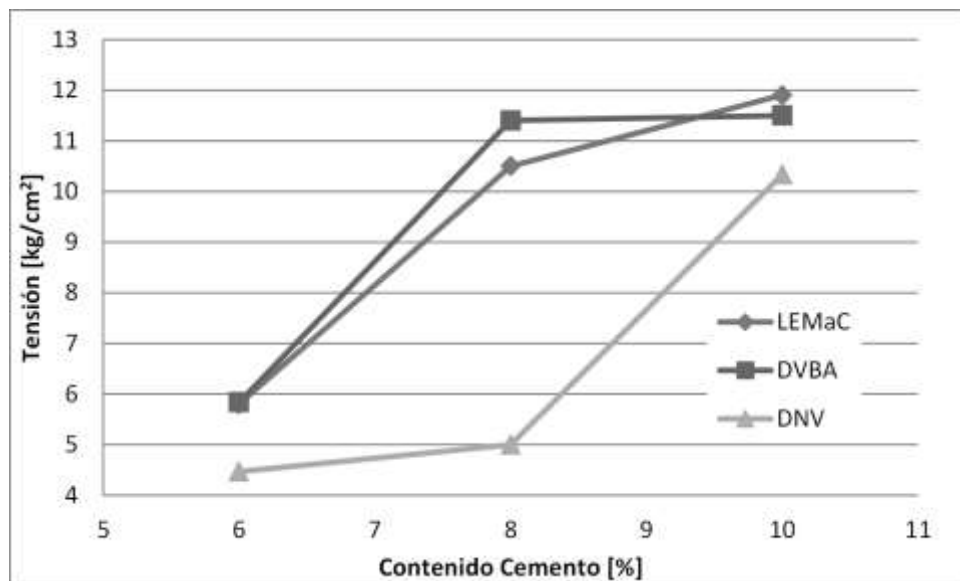


Figura 4. Resistencias promedio obtenidas

Para poder establecer si las diferencias relativas halladas resultan estadísticamente significativas o no, es decir si resulta indiferente si los resultados se obtienen con una u otra metodología, no basta con observar gráficamente sólo sus resultados promedios, sino que debe efectuarse un estudio en donde se analice la componente estocástica en los resultados obtenidos. Para esto puede recurrirse a lo que estadísticamente se conoce como el Análisis de la Varianza (ANOVA), que sirve no sólo para estudiar las dispersiones o varianzas de los grupos, sino también para estudiar sus medias y la posibilidad de crear subconjuntos de grupos con medias iguales (BELLON, 2016). Sus hipótesis nula y alternativa se pueden formular del siguiente modo:

- Hipótesis nula (H_0): $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$. Las medias de los k grupos son iguales y por tanto las diferencias encontradas pueden explicarse por el azar. Dicho de otro modo, los grupos proceden de poblaciones con medias iguales.

- Hipótesis alternativa (H_1): al menos uno de los grupos tiene una media distinta del resto de grupos.

En la prueba ANOVA las comparaciones son siempre bilaterales (a dos colas) ya que estudia globalmente si los grupos tienen medias distintas, y no si un grupo tiene una media menor o mayor que otro por separado. Si se rechaza la hipótesis nula, no se sabe entre qué grupos están las diferencias.

Para saber en cada caso si los grupos tienen medias iguales se construye una tabla ANOVA, señalándose la variabilidad (o varianza total) de los datos, la cual se puede descomponer a su vez en:

- Varianza entre grupos. Mide la variabilidad entre las medias de cada grupo respecto a la media total de todas las observaciones. Denominada también como variabilidad o varianza inter-grupos.
- Varianza dentro de los grupos. Mide la variabilidad de cada observación respecto a la media de su grupo. Podemos encontrarla bajo el nombre de residual, error o varianza intra-grupos.

Luego se divide un efecto observado respecto a un error aleatorio, es decir se divide el efecto debido a la pertenencia de los grupos (varianza entre grupos) respecto a la dispersión debida al azar o error aleatorio (varianza dentro de los grupos). A este cociente se le denomina F , o F de Fisher-Snedecor. Si sobrepasa cierto valor crítico, entonces se puede afirmar que el efecto observado es demasiado grande para poder ser explicado por el azar (error aleatorio) y que por tanto no todos los grupos estudiados tienen la misma media. En concreto, si la probabilidad (p -valor) asociada del valor F es menor a 0,05 puede establecerse con un intervalo de confianza del 95% que puede rechazarse la hipótesis nula y concluir que existe al menos un grupo cuya media es distinta a la media del resto de los grupos.

Se procede entonces a construir las tablas ANOVA para los contenidos del 6 %, 8 % y 10 % de cemento, las cuales se observan en las Tablas 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 2. Tabla ANOVA para el 6 % de cemento

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>
Entre grupos	3,65	2	1,82	2,07	0,208
Dentro de los grupos	5,29	6	0,88		
Total	8,94	8			

Tabla 3. Tabla ANOVA para el 8 % de cemento

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>
Entre grupos	72,02	2	36,01	25,18	0,001
Dentro de los grupos	8,58	6	1,43		
Total	80,60	8			

Tabla 4. Tabla ANOVA para el 10 % de cemento

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>
Entre grupos	3,98	2	1,99	4,02	0,078
Dentro de los grupos	2,97	6	0,49		
Total	6,94	8			

Como puede observarse, no obstante presentarse en la Tabla 2 para el contenido de cemento del 6 % un *p-valor* elevado de 0,208, en la Tabla 3 para el contenido de cemento del 8 % el *p-valor* es de 0,001 (menor a 0,05) y en la Tabla 4 para el contenido de cemento del 10 % es de 0,078 (levemente mayor a 0,05). Como el *p-valor* de 0,05 es el exigible para un intervalo de confianza del 95 %, esto lleva a pensar entonces que no puede asegurarse que sean estadísticamente comparables entre sí las tres metodologías de ensayo.

Llegada a esta conclusión, el problema radica ahora en saber entre qué grupos se encuentran las diferencias. Hay muchas formas de penalizar o ajustar los *p-valor* en las comparaciones múltiples, esto puede lograrse aplicando las metodologías de Bonferroni, Scheffé, Tamhane, Tukey, Student-Newman-Keuls, etc. (BELLON, 2016). De todos modos, resulta claro para este caso en particular, de la simple observación, que es la metodología de DNV la que desvirtúa el análisis, por lo que se decide dejarla directamente de lado y proceder a comparar las otras dos entre sí.

Para la comparación entre los resultados de las metodologías LEMaC y DVBA se decide aplicar la Prueba del estadístico *t* de Student, la cual puede entenderse como una aplicación en particular de la técnica ANOVA cuando la comparación se hace entre sólo dos grupos. Previo a la aplicación de este contraste se debe establecer si las diferencias de varianzas resultan estadísticamente nulas entre grupos, para la cual se aplica la Prueba *F* para varianzas de dos muestras, en los tres contenidos de cemento analizado. En la Tabla 5 se vuelcan los resultados obtenidos.

Tabla 5. Aplicación de la Prueba F para varianzas

	6 % de cemento		8 % de cemento		10 % de cemento	
	LEM _a C	DVBA	LEM _a C	DVBA	LEM _a C	DVBA
Media	5,8	5,83	10,5	11,4	11,9	11,5
Varianza	0,36	1,82	2,37	1,29	0,28	0,76
Observaciones	3	3	3	3	3	3
Grados de libertad	2	2	2	2	2	2
F	0,197		1,837		0,368	
P(F<=f) una cola	0,165		0,352		0,269	
Valor crítico para F (una cola)	0,053		19,000		0,053	

Como puede observarse los p -valor (P) en los tres casos resultan notoriamente superiores a 0,05 por lo que puede estimarse que la diferencia entre varianzas es estadísticamente nula y realizarse la Prueba del estadístico t de Student, la cual se vuelca en la Tabla 6 para los tres contenidos de cemento analizados.

Tabla 6. Aplicación de la Prueba del estadístico t de Student

	6 % de cemento		8 % de cemento		10 % de cemento	
	LEM _a C	DVBA	LEM _a C	DVBA	LEM _a C	DVBA
Media	5,80	5,83	10,50	11,40	11,90	11,50
Varianza	0,36	1,82	2,37	1,29	0,28	0,76
Observaciones	3	3	3	3	3	3
Varianza agrupada	1,09		1,83		0,52	
Diferencia hipotética de las medias	0		0		0	
Grados de libertad	4		4		4	
Estadístico t	-0,039		-0,815		0,679	
P(T<=t) una cola	0,485		0,230		0,267	
Valor crítico de t (una cola)	2,132		2,132		2,132	
P(T<=t) dos colas	0,971		0,461		0,534	
Valor crítico de t (dos colas)	2,776		2,776		2,776	

Nuevamente se observa aquí como los p -valor (P) para los tres contenidos, tanto para una como dos colas, resultan muy superiores a 0,05. Esto indica claramente que puede aceptarse la hipótesis de que los resultados obtenidos mediante la metodología LEM_aC y la metodología DVBA son comparables entre sí.

CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se arriban con el estudio son:

- La metodología de ensayo que la Guía AASHTO93 establece para las correlaciones entre la respuesta modular de una capa de suelo-cemento (obtenida a partir de suelos finos) y su resistencia a compresión inconfiada, es la de la Norma ASTM D-1633.
- Dicha metodología guarda diferencias notorias con las normalizadas por DNV y DVBA, razón por la cual se ha redactado el procedimiento LEM_aC-B04/15 de la

“Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrolladas en el LEMaC”, de forma tal que los resultados obtenidos mediante el mismo puedan ser utilizados directamente en aplicaciones de la Guía.

- De la experiencia realizada puede deducirse que los resultados obtenidos para una misma mezcla de suelo y cemento mediante las tres metodologías no son comparables entre sí.
- Esto último se debe a que los resultados de la metodología DNV resultan estadísticamente no comparables, no así los obtenidos entre el procedimiento LEMaC y la metodología DVBA. Por esto, al menos de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la metodología DVBA también puede ser empleada en aplicaciones de la Guía AASHTO93.

BIBLIOGRAFIA

AASHTO, “AASHTO guide for design of pavement structures 1993”, American Association of State Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2, 1993, EEUU.

ASTM, “ASTM D1632-96 – Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory”, 1996, EEUU.

ASTM, “ASTM D-1633-00 – Standard Test Methods for compressive Strength Molded Soil-Cement Cylinders”, American Society for Testing Materials, 2000, EEUU.

BELLON, JM, “Prueba ANOVA: comparación de las medias de tres o más grupos”. Disponible en <http://epidemiologiamolecular.com/prueba-anova-comparacion-medias-grupos>, consultado marzo de 2016.

DNV, “Norma de Ensayo VN-E19-66 – Compactación de mezclas de suelo-cemento y suelo-cal”, Normas de Ensayo DNV 1° Distrito Buenos Aires, Dirección Nacional de Vialidad, 1998, Argentina.

DNV, “Norma de Ensayo VN-E33-67 – Ensayo de compresión de probetas compactadas de suelo-cal y suelo-cemento”, Normas de Ensayo DNV 1° Distrito Buenos Aires, Dirección Nacional de Vialidad, 1998, Argentina.

DNV, “Términos de Referencia – Autopista RN°33 Rufino-Rosario”, Licitación Pública Nacional N°147/10, Dirección Nacional de Vialidad, 2010, Argentina.

DVBA, “Norma Técnica N°49 – Ensayo de compresión para probetas compactadas de suelo-cal y suelo-cemento”, Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, 1991, Argentina.

IRAM, “IRAM 10.522/72 - Método de ensayo de compactación en mezclas de suelo-cemento”, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, 1972, Argentina.

LEMaC, "LEMaC-B05/15 – Resistencia inconfiada de capas de suelo cemento que emplean suelos finos", Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC - Centro de Investigaciones Viales (Edición 2016), eduTecNe (ISBN 978-987-1896-51-6), Universidad Tecnológica Nacional, 2016, Argentina. Disponible en http://www.edutecne.utn.edu.ar/lemac/guia_metodologias_uso_vial.pdf, consultado junio de 2016.

RIVERA, J, "Diseño estructural de pavimentos basados en metodologías empíricas, mecanicistas y empírico-mecanicistas", Cátedra Vías III, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. La Plata, 2013, Argentina.

VILLANUEVA, M; SOSA, G; LEGATO, N, "Análisis comparativo de resistencia a compresión inconfiada de probetas de suelo-cemento, según Dirección Nacional de Vialidad, Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires y Metodología LEMaC", Tesis de Becarios de Investigación LEMaC – 2014, ISSN 2250-7221, 2015, Argentina.