

Adaptación del ensayo del pulimento acelerado (NLT-174/93) para la obtención de un coeficiente de pulimento de los morteros de cemento

Aplicación al análisis de la influencia del árido fino silíceo en la resistencia al deslizamiento de los morteros de cemento.

Por Enrique Fernández del Castaño,
Profesor Asociado de la E.T.S de I.C.C.P. de la Universidad Politécnica de Valencia, y
Miguel Vera García, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Resumen

Con el objeto de completar las prescripciones que el art. 550 del vigente Pliego de

Prescripciones Técnicas Generales PG-3/75 establece para la fabricación de hormigones para pavimentos de hormigón, se lleva a cabo un análisis de la influencia del árido fino silíceo

en la resistencia al deslizamiento de estos. Se adapta para ello la metodología del ensayo del Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA) y se define un coeficiente de Valor de Pulido de Mortero (VPM) que permite, empleando el péndulo de fricción y probeta de mortero de cemento, concluir en la efectiva influencia del porcentaje de árido fino silíceo en dicho valor de pulimento, y en la posibilidad de reducir el porcentaje que establece el PG-3 del 30% a valores del 10%, concentrándolos en las fracciones granulométricas comprendidas entre 0,32 a 0,08 mm.

Palabras clave. Resistencia al deslizamiento, Art. 550 PG-3, Valor de pulimento del mortero, pavimentos de hormigón.

Introducción

El empleo del hormigón en la construcción de pavimentos no tiene lugar en España hasta principios del siglo XX. Los primeros tramos de ensayo datan¹ de 1915, y se encontraban en Canarias y en la carretera de Barcelona a Santa Cruz de Calafell. Pese a realizarse algunas obras singulares durante las décadas posteriores, hasta la década de los 70 los pavimentos de hormigón no empiezan a emplearse con continuidad y a gran escala.

En la actualidad el proyecto, ejecución y control de los pavimentos de hormigón en España debe ajustarse a las prescripciones que establece las modificaciones aprobadas



en 1990, 2001 y 2002 del art. 550 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3/75. En el citado artículo se recogen las exigencias y especificaciones de los materiales que se emplean en la fabricación de las mezclas.

La clasificación entre árido grueso y árido fino es distinta para los pavimentos de hormigón y para las mezclas bituminosas, fijándose para los hormigones de pavimentos en el tamiz 5 UNE.

Entre las prescripciones que se exigen al árido fino para la fabricación de pavimentos de hormigón están las siguientes: la proporción de partículas silíceas del árido fino no será inferior al 30% o al 35%, según casos (residuo insoluble), y su curva granulométrica deberá ajustarse a un huso preestablecido.

1.1. El origen de la investigación

El hecho de obligar al empleo de un porcentaje mínimo de árido de naturaleza silícea es para garantizar la adecuada resistencia al deslizamiento del pavimento a bajas velocidades, pues se ha comprobado que a bajas velocidades la resistencia al deslizamiento está ligada a la microtextura del pavimento, la cual está asociada a la naturaleza del árido fino, además de a los métodos de puesta en obra; si bien este último factor está más relacionado con la macrotextura. Además, la práctica profesional ha sancionado la validez de dicha prescripción.

El límite del 30-35% y no otro es consecuencia de haberse extrapolado las conclusiones extraídas de experimentos realizados en Estados Unidos, en los que se puso de manifiesto que el empleo de proporciones de árido fino silíceo superiores al 30% no mejoraba de manera significativa lo que llamaron *índice de desgaste*¹.

A la vista de las citadas exigencias surgen los siguientes interrogantes:

¿Es suficiente el empleo de un 30-35% para garantizar una adecuada resistencia al deslizamiento,

sin provocar un encarecimiento de las mezclas ni provocar un desgaste excesivo de los neumáticos?

¿Influirá en la resistencia del pavimento al deslizamiento la forma en que el 30-35% de árido silíceo esté repartido a lo largo de la granulometría del árido fino?

¿Conviene concentrar el árido silíceo en alguna de las fracciones del huso exigido?

Inherente a estas cuestiones, surge la de cómo medir la resistencia al deslizamiento. En este sentido, y con

Se ha comprobado que a bajas velocidades la resistencia al deslizamiento está ligada a la microtextura del pavimento

el objeto de dar respuesta a las preguntas formuladas, se planteó la adaptación del método de ensayo del coeficiente de pulido acelerado (NLT-174/93). Este ensayo se emplea para caracterizar la susceptibilidad de los áridos gruesos (empleados en capas de rodadura) para conseguir una adecuada resistencia al deslizamiento, especialmente a altas velocidades. En este ensayo se determina el grado de pulimento, o coeficiente de pulimento acelerado (CPA) empleando el mismo péndulo de fricción con el que se mide el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) en las capas de rodadura.

La adaptación de dicho procedimiento operativo persigue definir un coeficiente de pulido acelerado de morteros de cemento, lo que se ha llamado valor del pulido del mortero

y designado con la abreviatura VPM, con el objeto de caracterizar la resistencia a la fricción que ofrecen las diferentes composiciones granulométricas ensayadas.

1.2. Objeto y alcance de la investigación

El objeto de la investigación es analizar la influencia que la naturaleza y composición granulométrica de la fracción fina del árido tienen en la resistencia al deslizamiento de pavimentos de hormigón, por extrapolación de los resultados obtenidos sobre probetas de mortero de cemento. Para cumplir con este objetivo, se hace necesario establecer un método de ensayo que, de manera justificada y basándose en el ya conocido del coeficiente de pulimento acelerado, permita dar respuesta a las cuestiones planteadas. Establecido éste, se propone y se lleva a cabo el diseño de experimentos específicos que justifiquen las conclusiones a las que se llegará.

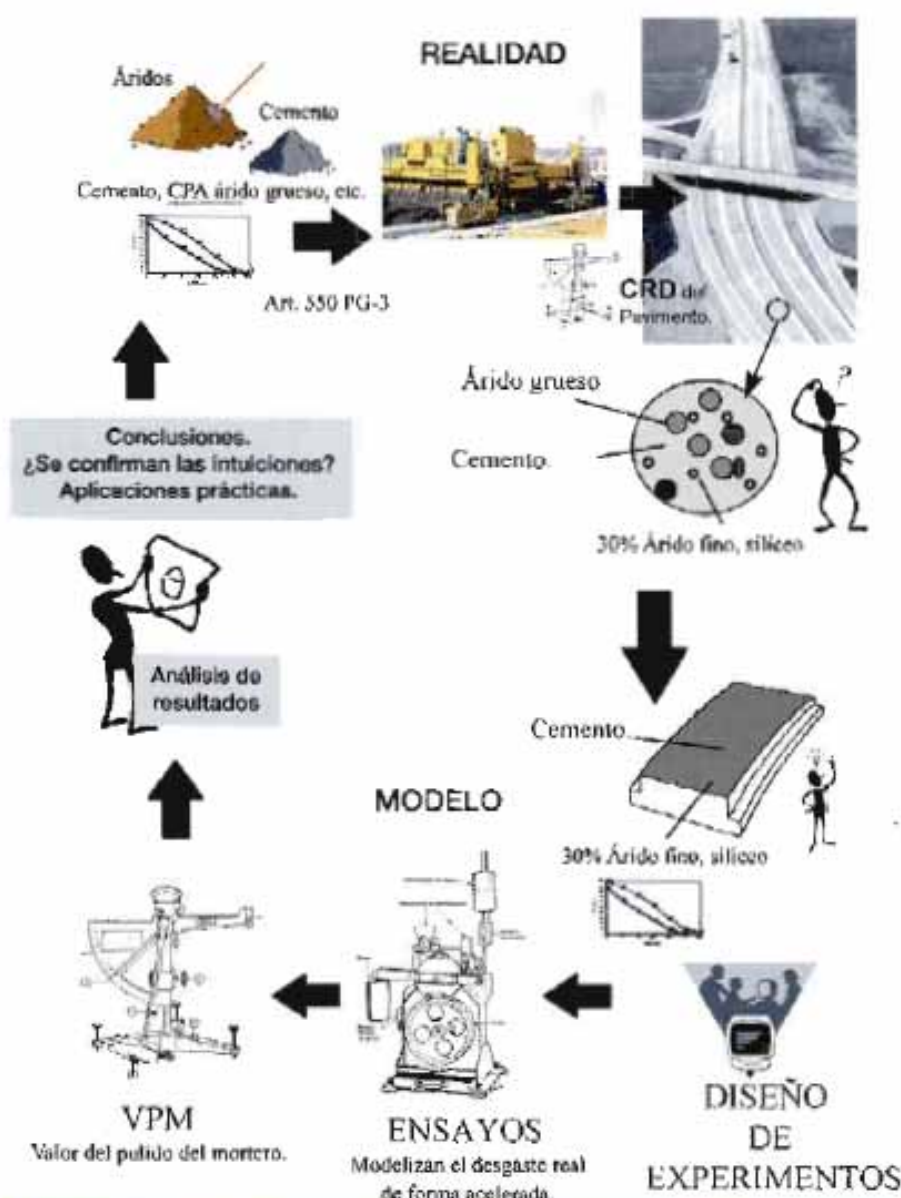
No se pretende en este trabajo cuestionar la validez de las prescripciones en materia de firmes rígidos, y especialmente en relación a la fracción fina, contenidas en la normativa española. Se trata de matizar, si cabe, algunas de dichas especificaciones. En cualquier caso, este estudio podría englobarse en una primera aproximación a una línea de investigación de mayor alcance, en la que los resultados extraídos en laboratorio pudieran contrastarse y correlacionarse con experimentaciones y pruebas realizadas en pavimentos in situ o en pistas de prueba. En cualquier caso, las conclusiones finalmente obtenidas son las que pueden marcar el rumbo a nuevos trabajos de investigación.

1.3. Medios materiales

Enunciados los objetivos perse-

1. Según ponencia de Manuel Aguilar. 4º Congreso Mundial de Carreteras. Sevilla 1993.

2. Colley & Balmer. Laboratory Studies of the Skid Resistance of Concrete. Journal of Materials. 1966



Línea de Investigación: modelización de la realidad.

guiados con la investigación, se van a presentar los medios materiales que se hizo necesario emplear, así como el método empleado.

Se ha hablado de caracterizar la influencia que la composición granulométrica y la naturaleza del árido fino podían ejercer sobre la resistencia al deslizamiento de los pavimentos de hormigón. Parece intuitivo pensar que, para valorar la existencia de tal influencia, será necesario disponer de pavimentos fabricados con diferentes composiciones, a fin de poder comparar los valores de resistencia al deslizamiento que cada uno de ellos ofrece. Pero ¿cómo valoramos la resistencia al deslizamiento del pavimento? Para ello podría emplearse el método de determinación

del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (CRD), empleando el péndulo del TRRL³.

Dadas las limitaciones en medios materiales y temporales en las que se desarrolló esta primera investigación, resultaba inviable emplear muestras de pavimentos de hormigón in situ, sobre las que medir el CRD tras un determinado periodo de servicio de la carretera con unas condiciones de tráfico determinadas.

Como alternativa, y justificada la validez, se optó por caracterizar la influencia que la naturaleza y granulometría del árido fino tenían en la resistencia al deslizamiento midiendo el deslizamiento sobre muestras de **mortero de cemento** fabricadas con la granulometría y proporciones de

árido fino que se emplearían en la fabricación de hormigones, solo que no intervenían los áridos gruesos.

La máquina de ensayo

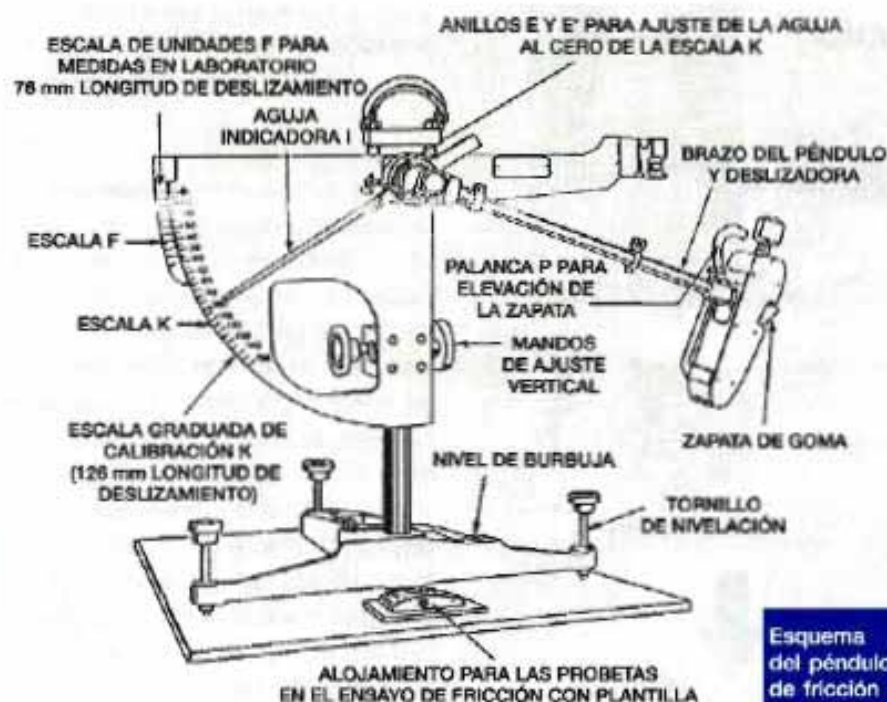
Para modelar el desgaste que experimentaba el pavimento en su vida útil, y para conocer cómo evolucionaban las características antideslizantes del pavimento (por extrapolación de lo observado sobre probetas) en función del grado de desgaste (tiempo), se recurrió al empleo de la máquina de ensayo del CPA.

No puede asegurarse que el proceso de desgaste que sufren las probetas de mortero en la máquina del CPA sea equiparable al que experimentan in situ como consecuencia del tráfico de vehículos y del ataque de los agentes atmosféricos durante la vida útil del pavimento. Lo que sí puede asegurarse es que, en la medida en que pueda garantizarse que todas las probetas (con diferentes composiciones) experimentan análogo grado de desgaste al ser ensayadas, determinadas composiciones si ofrecen mejores resistencias al deslizamiento; tales diferencias deberían reproducirse en igual medida en pavimentos in situ fabricados con la misma composición. Confirmar estas intuiciones es objeto de futuras investigaciones, a la vista de los resultados que de ésta se obtuvieron.

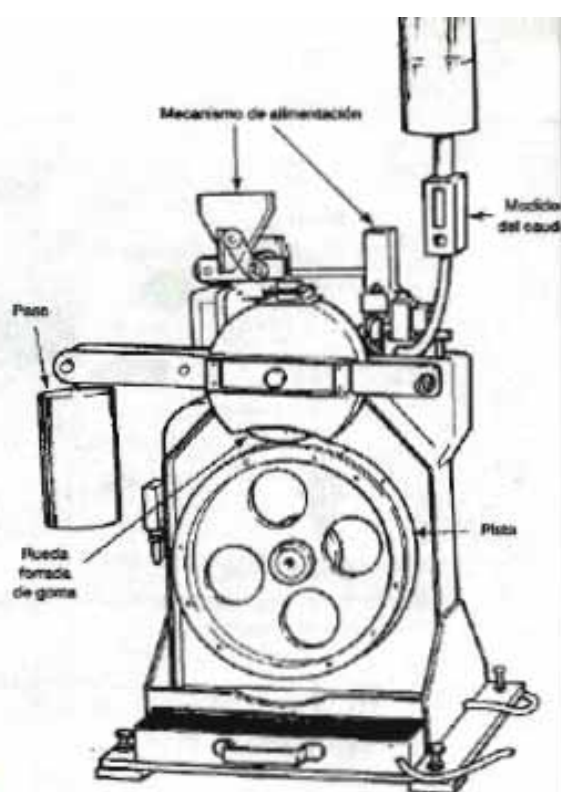
Para llevar a cabo la investigación se revisó el método del ensayo del CPA a fin de aceptarlo para su empleo sobre probetas de mortero de cemento. Inicialmente no se sabía el comportamiento que podían tener las probetas de mortero; quizá los regímenes de abrasivos resultarían muy elevados y acabarían por desprenderse los áridos de la superficie de la probeta; o, por el contrario, podían resultar escasos, de modo que no se encontrarán diferencias en el desgaste experimentado por todas las probetas.

Otros aspectos que se consideraban importantes para la preparación del mortero fueron la relación ári-

3. TRRL: Transport and Road Research Laboratory del Reino Unido.



Esquema del péndulo de fricción del TRRL.



MÁQUINA DE ENSAYO DEL CPA.

do/cemento, el tipo de cemento empleado o la conveniencia de cepillar las probetas a fin de semejar las condiciones de puesta en obra. Para aclarar estos interrogantes se formuló el ensayo de prueba en el que se trataron estos aspectos.

Otro aspecto cuya influencia se consideró fue la duración de los ensayos. Para ello se ensayaron varias series de probetas en un primer ciclo de tres horas de duración, con arena de esmeril; y en un segundo ciclo de 6 horas más, completando un total de 9 horas. Después de cada hora de ensayo se procedía a la lectura del VPM, a fin de disponer de la evolución del VPM en función de las horas de ensayo.

Lectura de la fricción

La fricción o resistencia al deslizamiento de las probetas en cada instante del ensayo se valoró por el valor del pulido del mortero (VPM). Por analogía al coeficiente de pulido acelerado, el VPM se obtuvo empleando el péndulo de fricción del TRRL. Las únicas modificaciones que se realizaron al método descrito en la norma del CPA fue el proceso de acondicionamiento de las zapatas, así como el orden de lectura de las probetas, comprobándose la validez del método.

Tras revisar los factores que se creyó podían influenciar el resultado final del VPM asociado a cada probeta, se optó por llevar a cabo un experimento de prueba que permitiera valorar su influencia, así como comprobar el correcto funcionamiento y calibración de la máquina.

Para el ensayo de prueba se fabricaron probetas que fueron designadas como la Serie P_i (i:1,2,...,14). Se fabricaron 14 probetas en las que se hicieron variar los niveles (valores adoptados) para los tres factores que se consideraron más importantes.

Las probetas fueron ensayadas siguiendo el método de ensayo del CPA en lo relativo a duración de los ensayos y a los regímenes de alimentación de abrasivos, si bien tras finalizar el experimento se comprobó que la calibración de los alimentadores de abrasivos, y más concretamente el del polvo de esmeril, no suministraba el régimen fijado por la norma. Como consecuencia de esto, se recalibraron para los ensayos posteriores.

Para el análisis estadístico de los resultados se formuló un diseño factorial 2³ que permite el estudio de la influencia de tres factores a dos niveles en tan sólo 8 pruebas, las ocho probetas seleccionadas.

Los resultados del experimento se resumen en los gráficos de efectos e interacción considerados en el análisis.

El gráfico 1 expresa que el valor medio del VPM_{6h} cuando se emplea cemento V-B/20, independientemente de los valores adoptados para el cepillado y la relación A/C, es superior a cuando se emplea el II-AL32.5. De igual forma, el VPM_{6h} medio cuando las probetas son cepilladas es mayor que cuando no lo son, y resultan valores superiores cuando la relación A/C es 3.

El gráfico 2 de interacciones pone de manifiesto la existencia de interacciones dobles significativas entre cada dos factores.

Las líneas más tendidas (con menor pendiente) para un nivel de un determinado factor expresan que hay poca variabilidad del factor con el que interaccionan. En cambio, las líneas con pendiente acusada son las que expresan una elevada variabilidad según el nivel adoptado para el factor.

Se observa que no cepillar las probetas introduce una variabilidad muy superior a cuando éstas se cepillan. Lo mismo ocurre cuando la relación árido/cemento es 1: la variabilidad es mayor que cuando es 3. En cuanto al tipo de cemento, el V-B/20 mostró mayores valores medios de VPM,

si bien las diferencias con el empleo del CEM II-AL32,5 fueron mínimas para los niveles óptimos de los demás factores. En consecuencia, y puesto que el V-B/20 no es apto para fines estructurales, se optó por el empleo del II-AL32,5.

Como resultado del experimento de prueba se concluyó que para la fabricación de las probetas de los restantes ensayos se emplearía:

Cemento II-AL-32,5, relación árido/cemento = 3 y cepilladas.

1.4. Diseño de experimentos

En las páginas anteriores se han presentado los objetivos de la investigación. Los primeros interrogantes que se plantearon fueron:

¿Por qué un 30% mínimo? ¿Cómo afecta la proporción del árido fino silíceo en la resistencia al deslizamiento?

La respuesta a la primera pregunta se basaba en experiencias realizadas en EE.UU. En cuanto a la segunda pregunta, cabría matizarla y formularla del modo siguiente:

¿Afecta la proporción de árido fino silíceo empleada en la fabricación del hormigón, a la resistencia al deslizamiento medida por el péndulo del TRRL?

Pero no es esta la respuesta que buscamos; y no lo es porque, de serlo, obligaría a disponer de una población formada por los posibles puntos de medida sobre pavimentos de hormigón, lo cual resulta inviable en este nivel de la investigación. Así que finalmente la pregunta es:

¿Afecta la proporción de árido fino silíceo empleado en la fabricación de morteros de cemento, a la resistencia al deslizamiento medida por el péndulo del TRRL?; y, en caso de hacerlo, ¿cómo es esa influencia?

Nota: la resistencia al deslizamiento se valora por el VPM del mortero.

Para dar respuesta a este interrogante se planteó el **EXPERIMENTO N° 1**.

Como se ha dicho, la granulometría del árido fino debe estar dentro

Factores	II-AL32,5		II-AL20,5	
	Cepillado SÍ	Cepillado NO	Cepillado SÍ	Cepillado NO
Árido / cemento				
1	P1	P2	P9	P8
2	-	-	P11	P10
3	P4, P6	P3, P5, P7	P13, P14	P12

Código de probetas para cada nivel de los factores (A/C, cemento, cepillado).



Gráfico 1. Efectos simples de los factores.

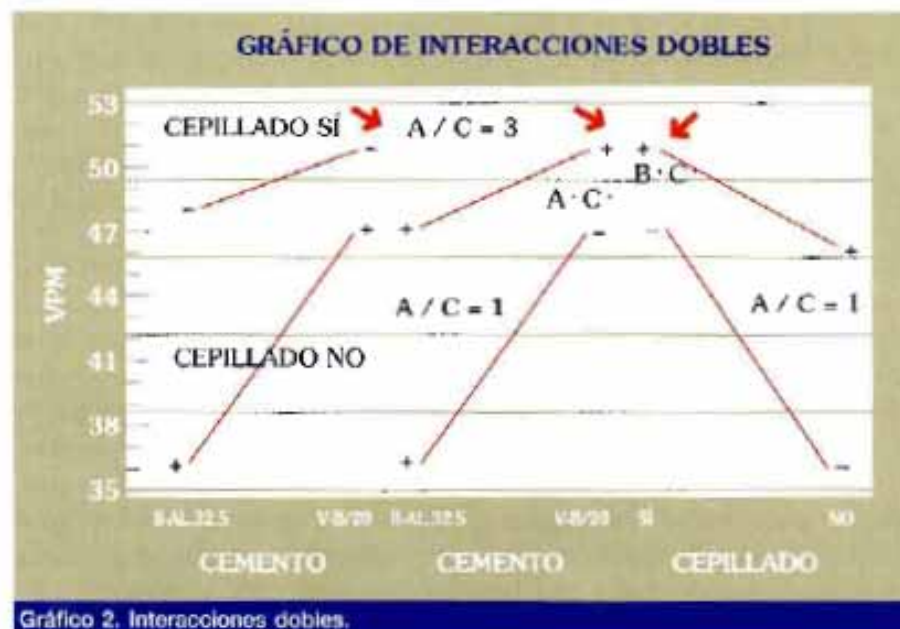


Gráfico 2. Interacciones dobles.

de un huso; pero no se especifica cómo, así que surgen los interrogantes siguientes: *¿Influirá en la resistencia al deslizamiento del pavimento la forma en que la proporción de árido silíceo esté repartida a lo largo de la granulometría del árido fino? ¿Conviene concentrar el árido fino en alguna/s de las fracciones del huso?*

Como conclusión al Experimento n° 1, resultó haber influencia de la proporción de árido silíceo, siendo razonable el valor del 30%, además de estar sancionada su validez por la práctica. Así, pues, se podía matizar la cuestión anterior y formular la pregunta del siguiente modo:

¿Influirá en la resistencia al des-

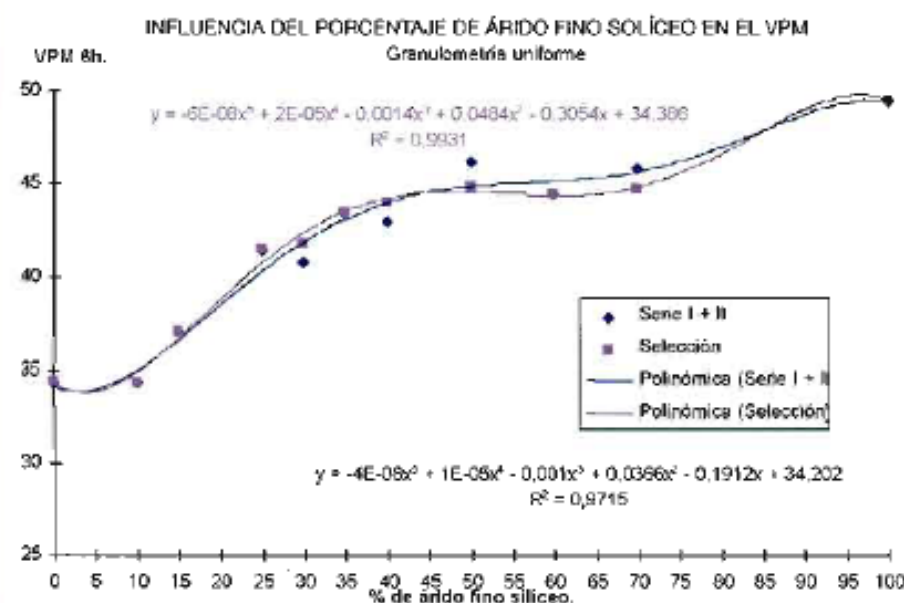


Gráfico 3.

lizamiento del pavimento (por extrapolación de la medida sobre morteros de cemento con ayuda del péndulo del TRRL) la forma en que ese 30% de árido silíceo esté repartido a lo largo de la granulometría del árido fino? ¿Conviene concentrar el árido fino en alguna/s de las fracciones del huso exigido?

Nota: la resistencia la deslizamiento se valora por el VPM del mortero.

Con el objeto de despejar tal incógnita se formuló el **EXPERIMENTO N° 2**.

1.4.1. Influencia del porcentaje de árido fino silíceo en el valor de pulido del mortero: Experimento n° 1

Se trata de investigar la influencia de un solo factor (porcentaje de árido silíceo) en el VPM, variable respuesta. Se trata de un factor cuya variabilidad viene impuesta por el experimentador, puesto que es él quien decide los niveles o variantes que se desea hacer intervenir en el experi-

mento. Se pretende conocer cómo evoluciona el valor del VPM cuando el porcentaje de árido silíceo empleado en la fabricación de las probetas aumenta.

Al hacer referencia a las exigencias del Pliego de prescripciones técnicas generales y a la limitación de la proporción mínima del 30% para el árido fino silíceo, se indicó que tal limitación estaba basada en experimentos llevados a cabo en EE.UU., en condiciones y con medios de ensayo diferentes a los propuestos en la metodología del VPM.

Con tal fin, se fabricaron 14 probetas para completar una rueda de ensayo, en la que se hicieron intervenir probetas con las proporciones de árido silíceo de un 10, 30, 50, 70 y 100%, completándose el resto hasta el 100% con árido calizo. A esta serie se la designó como la serie **PSi%(I)**: en ella, todas las probetas se habían fabricado en idénticas condiciones: cemento **II-AL32,5**, relación **A/C = 3** y **Cepillado**. La granulometría del árido se ajustaba al huso, for-

mando una granulometría continua, distribuyendo tanto el árido calizo como el silíceo en todos los tamaños de la curva granulométrica. Finalmente, se completaron los resultados incluyendo una nueva serie en la que se analizaban los niveles 0, 15, 25, 35, 40, 60 y 100%, Serie **PSi%(II)**, con el objeto de matizar la curvatura de las curvas de evolución del VPM frente a la proporción de árido silíceo, en el entorno del 30%.

Simultáneamente se preparó la que se denominó serie **ABCDE**, en la que las condiciones en cuanto al tipo de cemento, cepillado y A/C fueron las mismas que las series **PSi%**, con la salvedad de que la granulometría empleada para el árido (calizo más silíceo) no fue uniforme, sino que el árido silíceo se concentró únicamente en las fracciones **F5[0,32-0,16 mm]** y **F6[0,16-0,08 mm]** definidas en el huso.

La tabla 1 recoge los valores del VPM6h medio obtenido todas las probetas de cada tratamiento.

Obsérvense los elevados coeficientes de correlación obtenidos para las curvas de ajuste.

Los ensayos de ambas ruedas se prolongaron en el tiempo: un primer ciclo de 3 horas con arena de esmeril, y un segundo ciclo (que se prolongó durante 6 horas) de pulido con polvo de esmeril. De esta forma se pudo analizar la evolución del VPM en función del tiempo, y decidir sobre la conveniencia de mantener su duración en 6 horas. De manera que el VPM característico de una probeta es el promedio de sus lecturas a 6 horas.

Las conclusiones de este Experimento N° 1 fueron las siguientes:

1. La proporción de árido silíceo empleado en la preparación de los morteros afecta significativamente al VPM 6h medido sobre las probetas.

TABLA 1. Valor del pulido del mortero. 6h

% árido silíceo	0	10	15	25	30	35	40	50	60	70	100
Serie I + II	34,33	34,33	37,17	41,48	40,78	43,5	42,97	46,22	44,5	45,82	49,42
Selección*	34,5	34,33	37,17	41,5	41,83	43,5	44	44,83	44,5	44,78	49,48

* Hace referencia al empleo de las lecturas sobre probetas de un mismo tratamiento, que mostraron una reducida variabilidad.

Tabla 1.

Evolución del VPM medio para cada tratamiento.
Serie PSi% (I) y Serie ABCDE.

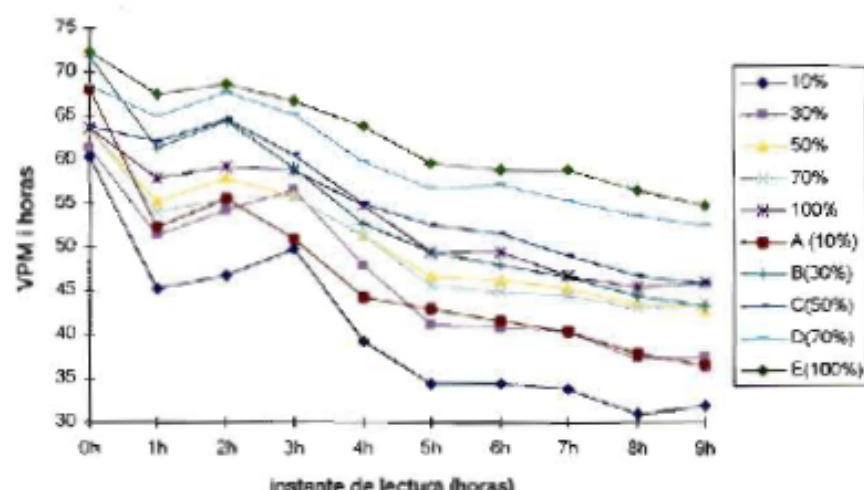


Gráfico 4.

2. Se puede afirmar que proporciones de árido silíceo superiores al 30 - 35% no dan valores de VPM significativamente mayores, al menos en relación con proporciones superiores de hasta un 70%. Es decir, el empleo de un 70% en vez de un 30%, no proporciona mejoras significativas en el VPM.

3. Aunque se fabricó un número reducido de probetas, la mayor parte de las parejas de probetas de un mismo tratamiento no mostraron diferencias significativas; las que sí lo hicieron obligaron a eliminar alguna de ellas. Sólo el tratamiento del 40% se estimó a partir de 3 lecturas; en el resto se emplearon un mínimo de 6 y un máximo de 9.

4. De las dos series ensayadas, las probetas del 100% no mostraron diferencias, consiguiéndose en ambos casos unos coeficientes de variación de 1,65%. Ello da idea de que, pese a la variabilidad que introduce el proceso de fabricación, las condiciones del ensayo debieron ser las mismas, garantizando en ambas series un mismo grado de desgaste y pulido, y en consecuencia de exposición de los áridos.

5. Las lecturas sobre la Serie PSi% (II) mostraron unos parámetros de dispersión mayores que los de la Serie I.

6. Dado que no se consiguen mejoras significativas con el aumento de la proporción de sílice por encima de un 30%, para el desarrollo del Experimento nº 2, se fijó la proporción en un 30%.

7. Para conseguir reducir la varia-

bilidad debida a los procesos de fabricación y demás efectos externos, sería conveniente, en futuras investigaciones, aumentar el número de probetas por tratamiento.

Serie ABCDE: Granulometría discontinua

Como se ha adelantado, además de las series PSi% (I) y (II), se diseñó una serie ABCDE, en la que se hicieron variar los porcentajes de árido silíceo, con la particularidad de que la granulometría conjunta del árido no resultó ser continua, variando para cada uno de los tratamientos A, B, C, D, E, y concentrándose el árido fino en las fracciones F5[0,32,0,16] y F6[0,16, 0,08] del huso que especifica el PG-3.

De manera que se formularon 5 tratamientos en los que la proporción de árido silíceo varió entre 10, 30, 50, 70 y 100 %, para las series de probetas A, B, C, D, E, respectivamente.

Para la fabricación de las probetas se emplearon cemento II-AL 32,5, relación árido/cemento = 3, y todas fueron cepilladas tras el desmoldeo.

A diferencia de las series PSi% en las que se analizaba el factor porcentaje de árido silíceo, para esta serie no puede hablarse de un único factor. En realidad se está analizando la influencia del porcentaje y de la granulometría del árido, de manera conjunta.

Se llamó tratamiento a cada una de las composiciones definidas por las siglas A, B, C, D y E. Para cada

uno de ellos se fabricaron 3 probetas idénticas, con excepción del tratamiento E, del que se fabricaron únicamente 2 probetas.

La granulometría se compuso concentrando la proporción de árido silíceo en las fracciones citadas, y completando el resto con el árido calizo. Como se observará, a medida que se aumentaba el porcentaje de árido silíceo se hacía imposible ajustarse al huso, además de que la trabajabilidad de la mezcla se veía afectada, haciéndose necesario aumentar la relación agua/cemento a valores de 0,65 a 0,7 en las probetas del tratamiento D y E (70 y 100% de árido silíceo).

Del análisis conjunto de los resultados obtenidos sobre ambas series, con granulometría continua y discontinua, se concluyó en la siguiente curva de evolución (gráfico 4).

Al representar juntas las líneas de evolución del VPM para las series PSi%(I) (granulometría continua) y la serie ABCDE (granulometría concentrada, discontinua), se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

- La tendencia de evolución es similar en todos los tratamientos, independientemente del porcentaje de árido silíceo y de la granulometría.
- Las líneas de granulometría uniforme permanecen por debajo de sus homólogas con granulometría concentrada.
- La curva de la serie B (30% concentrado) proporciona valores de VPM semejantes a los obtenidos con un 100% de árido silíceo con la granulometría uniforme.
- Los valores de VPM que se obtienen con un 30% de árido silíceo repartido uniformemente son equivalentes a los obtenidos con un 10% (tratamiento A) concentrado en las fracciones F5 y F6.

• En todos los casos, durante la primera hora de ensayo se produce una fuerte caída del VPM, a consecuencia de la eliminación de la lechada de mortero de cemento.

• Prolongar la duración del ensayo más de 6 horas no aporta mayor información acerca del VPM. Se observa cierta tendencia a la estabilización

del VPM para valores a 6, 7 y 8 horas, y en menor medida para 9 horas.

La figura 5 muestra la evolución del VPM para la serie PSI% (I+II) con granulometría continua para el árido síliceo, frente a la serie ABCDE, de granulometría discontinua, concentrando los áridos síliceos en las fracciones inferiores, en función de la proporción de árido síliceo total empleado en la fabricación de las probetas.

La conclusión que se adelantaba anteriormente, a la vista de las curvas de evolución con el tiempo, puede verse más claramente en la figura: Reduciendo el porcentaje de árido síliceo de un 30% distribuido uniformemente a un 10% concentrado en las fracciones F5 y F6, se consigue el mismo VPM 6h.

La granulometría conjunta del tratamiento A (10%) quedaba prácticamente dentro del huso especificado.

Dada la importancia práctica de estas conclusiones, en el Experimento nº 2 se trató de analizar la conveniencia de alguno de los tratamientos que allí se proponen, tratamientos que se formaron componiendo diferentes composiciones granulométricas (para una granulometría conjunta dada para el árido calizo más síliceo, dentro del huso especificado por el art. 550 del PG-3, 1990) con un 30% fijo de árido síliceo que se reparte en diferentes fracciones según el tratamiento.

1.4.2. Análisis cualitativo de la influencia en la resistencia al deslizamiento (medida con el péndulo del TRRL), de la composición granulométrica empleada en la fabricación de morteros de cemento con un contenido de sílice del 30%. Experimento N.º 2.

El objetivo del Experimento nº 2 fue investigar la influencia de la composición granulométrica conjunta del árido calizo y el síliceo en el VPM a 6 horas. Para ello se hicieron intervenir 12 posibles composiciones granulométricas cada una de las cuales cons-

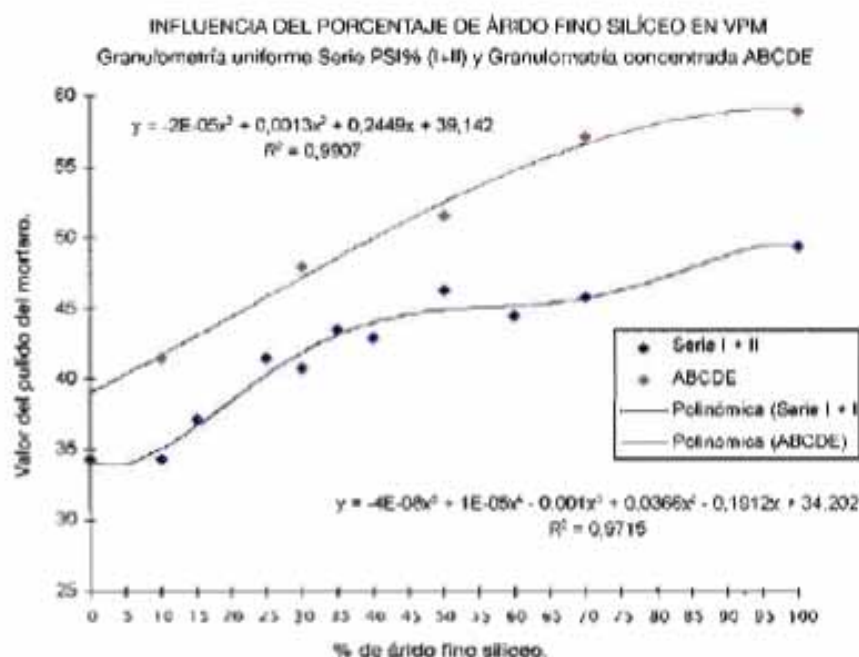


Gráfico 5.

tituyó un tratamiento. En todos ellas la proporción de sílice fue del 30%, y se concentró en diferentes fracciones del huso, cumpliendo sus límites para satisfacer la exigencia del Pliego.

Para cada tratamiento se fabricaron 4 probetas de idéntica composición. Todas ellas se fabricaron con cemento II-AL 32,5, con relación árido/cemento = 3 y relación agua/cemento = 0,5 (con alguna salvedad como se verá). Todas ellas fueron cepilladas tras el proceso de desmoldeo. El orden de fabricación se hizo de un modo aleatorio.

Además de estas, se fabricaron 10 probetas con un 100% de árido síliceo. A estas se las llamó probetas patrón PAi, y en cada ensayo se incluyeron dos de ellas a fin de tener un control de que los ensayos se reproducían en condiciones semejantes.

El total de las probetas se ensayaron en 4 ensayos, 14 probetas por rueda. Las probetas se ensayaron tras permanecer 28 días en cámara de curado. El Experimento nº 2 se descompuso en dos subexperimentos con el fin de disponer de una medida de la reproductividad del ensayo.

El principal objetivo que se persiguió con los ensayos planteados fue llegar a demostrar que existe una clara influencia de la composición gra-

nulométrica empleada y, en definitiva, del tamaño de los granos de sílice, en lo que se ha definido como valor del pulido del mortero. Estas intuiciones quedaron confirmadas al comprobarse que alguna de las composiciones estudiadas proporcionaron VPM significativamente mayores que los del resto.

De aceptarse tales conclusiones, podrían derivarse consecuencias prácticas en los procesos de preparación de las mezclas para pavimentos de hormigón. En todos los tratamientos se prefijó la proporción de árido síliceo en un 30%, mínimo exigido por el PG-3 (art 550, revisado en 1990, 2001 y 2002); pero futuras investigaciones podrían centrarse en la posibilidad de reducir dicha proporción mínima a otra inferior, a costa de que se concentrara en determinadas fracciones de la curva granulométrica.

En todos los tratamientos analizados, la granulometría conjunta de los áridos fue continua, centrada en el huso (se ajustó a los porcentajes medio del huso). Esto se hizo así atendiendo a las normas de buena práctica y a la trabajabilidad de la masa del hormigón (mortero en este caso). Otra cuestión a la que se podría dar respuesta es la posibilidad de com-

INTERVALOS LSD 95% DE CONFIANZA PARA EL VPM_{6h} DE CADA TRATAMIENTO

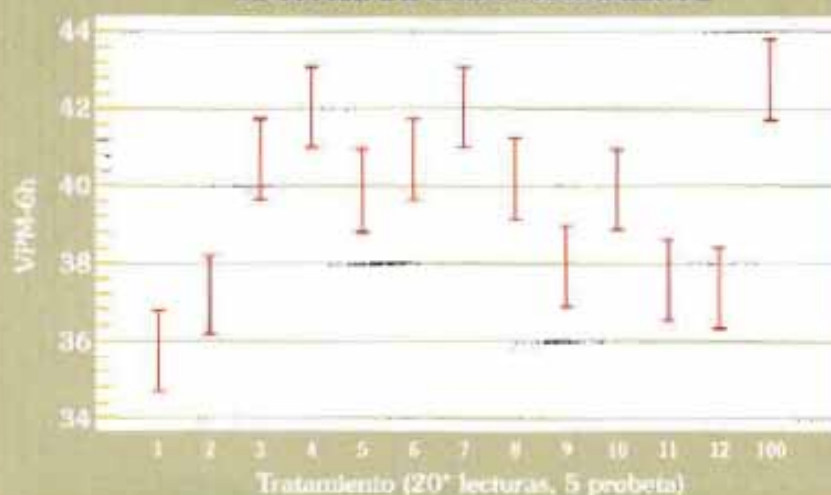


Gráfico 6.

poner granulometrías que, concentrando el árido silíceo en algunas fracciones, no tuvieran granulometrías continuas, aunque si contenidas en el huso. En este sentido, durante la investigación se puso de manifiesto que probetas con 30% de árido silíceo concentrado en las fracciones F5 y F6 proporcionaban unos VPM comparables a los obtenidos con un 100% de árido silíceo repartido de forma uniforme.

Sobre cada probeta se hicieron 5 lecturas de VPM a 0, 3 y 6 horas, empleándose 4 zapatas acondicionadas en idénticas condiciones para todas las probetas.

El método de análisis estadístico de los resultados de los ensayos se basa en las herramientas estadísticas empleadas, a fin de que el lector no familiarizado con la terminología específica del diseño de experimentos, del análisis descriptivo o del análisis de varianzas (ANOVA), pueda entender e interpretar las conclusiones de los ensayos.

El proceso de análisis consistió en realizar un primer análisis descriptivo de los datos, con el objeto de detectar anomalías en los datos, debidos a errores de lectura o a simples errores de transcripción. Posteriormente, se procedió a verificar el cumplimiento de las hipótesis del análisis de varianzas (ANOVA), tras lo cual se procedió a la realización de los ANO-

VA específicos en los que se contrastó la igualdad del VPM para probetas pertenecientes a cada uno de los tratamientos propuestos.

La forma de visualizar los resultados fue mediante el recurso a los intervalos LSD (*Least Significant Difference* o *diferencia significativa mínima*) de comparación de medias.

El valor medio del tratamiento 100, junto con el relativo al tratamiento 7 y 4, son los que valores mayores provocaron (ver gráfico 5).

De los contrastes dos a dos realizados con Statgraphics+ se obtuvie-

ron los siguientes grupos de tratamientos cuyos intervalos LSD se solaparon en un 95% (gráfico 7).

Las principales conclusiones a las que se llegó fueron:

- El tratamiento 7 (que concentraba el 30% de árido silíceo en las fracciones F4, F5 y F6), junto con el tratamiento 4 (que concentraba el 30% de árido silíceo en las fracciones F4 y F5), fue el que mejores resultados proporcionó de los 12 tratamientos con un 30% de sílice.

- El valor promedio de VPM del tratamiento 6, que distribuyó el árido silíceo de forma continua a lo largo de la granulometría, se mantuvo por debajo de los T-4 y T-7 que la concentraban.

- Los tratamientos que proporcionaron los valores mayores (salvo el 6 y el 100), pertenecientes a los Grupos 6 y 7 (tratamientos 7, 4, 3 y 8) concentraron el árido silíceo en las fracciones F4, F5 y F6. En cambio, los tratamientos que concentraban los áridos silíceos en las fracciones más gruesas (tratamientos 1, 2, 11, 12 y 9) dieron los peores resultados.

En consecuencia, puede afirmarse la conveniencia de concentrar el árido silíceo en las fracciones inferiores, para una misma proporción de sílice, a fin de maximizar el VPM. ■

EXPERIMENTO 2 (5 LECTURAS POR PROBETA)

TRATAMIENTOS	N	MEDIA	GRUPOS HOMOGÉNEOS						
			1	2	3	4	5	6	7
1	20	35,7	1						
2	20	37,2	2	2					
12	20	37,5	12	12					
11	20	37,6	11	11					
9	20	37,9		9	9				
5	20	39,85			5	5			
10	20	40,0				10	10		
8	20	40,4				8	8	8	
3	20	40,65				3	3	3	3
6	20	40,7				6	6	6	6
4	20	42,0					4	4	4
7	20	42,25						7	7
100	40	42,35							100

Gráfico 7.