

**PROPUESTA DE NUEVO MÉTODO DE CÁLCULO DE  
COMBINACIÓN GRANULOMÉTRICA PARA EL DISEÑO DE  
HORMIGONES ASFÁLTICOS.**

**Ing. Milkos Borges Cabrera<sup>1</sup>, M.Sc. Alfredo Fundora Rolo<sup>2</sup>, Dra.C. Lourdes  
Tarifa Lozano<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>ENIA UIC Matanzas, MICONS*

*<sup>2</sup>Departamento de Matemática, Facultad de Informática, Universidad de Matanzas “Camilo  
Cienfuegos*

## **Resumen.**

Este trabajo es una alternativa para el diseño de hormigones asfálticos a través de un nuevo método de búsqueda de la combinación granulométrica, que permite minimizar los efectos que ocasiona en la producción, los problemas con el suministro de áridos o cemento asfáltico hacia las plantas de asfaltos y facilitar la obtención de la combinación granulométrica a los especialistas, además de considerar la disponibilidad de materiales como un factor que influye en el diseño y producción del hormigón. Este nuevo método de búsqueda se logró desarrollar a partir de sistemas de inecuaciones con la utilización del método de Lagrange. Con su ayuda es posible dar respuesta a criterios de búsqueda de la combinación granulométrica, que nunca antes se le ha podido dar solución no solo en Cuba, sino en el mundo.

***PALABRAS CLAVES:*** *combinación granulométrica, hormigón asfáltico, sistema de inecuaciones, método de Lagrange*

---

## **Introducción.**

Resulta de gran interés no solo para Cuba, sino para muchos países del mundo que después del tendido y compactado del hormigón asfáltico, este mantenga un buen comportamiento en obra por un periodo de tiempo determinado; de no ser así, esto traería un gasto adicional de recursos tanto para el mantenimiento de la vía, como para el mantenimiento del parque automotor; que recibe un deterioro superior que si la vía estuviera en buen estado.

Desde un punto de vista estructural, para garantizar el buen comportamiento en obra, por parte de los hormigones asfálticos, se han desarrollado a lo largo de la historia múltiples investigaciones, para definir cuales son los factores que más influyen en el desempeño del mismo, a la hora de resistir las cargas y la influencia del clima a que es sometido una vez que es colocado y compactado. Estos factores son:

- Calidad del agregado.
- Dosificación de las fracciones componentes.
- Grado de compactación del hormigón en la obra.
- Naturaleza y tipo de ligante incluido su contenido en el hormigón.

Es objetivo de este trabajo centrar la atención en el segundo de los factores mencionado anteriormente.

### **Objetivo general**

- Determinar un nuevo método de búsqueda de combinación granulométrica.

### **Objetivos específicos**

- Mitigar los efectos que ocasiona en la producción, los problemas con el suministro de áridos y cemento asfáltico hacia las plantas de asfalto.

- Facilitar la obtención de la combinación granulométrica a los especialistas.
- Considerar la disponibilidad de materiales como un factor que influye en el diseño y producción del hormigón asfáltico.
- Crear un nuevo método para la determinación de la combinación granulométrica, que se enfrente eficazmente a todos los casos posibles que puedan surgir.
- Aumentar la cantidad de criterios, que se pueden considerar a la hora de realizar la búsqueda de la combinación granulométrica.
- Obtener la combinación granulométrica que más se ajuste al criterio de búsqueda que se le quiera dar solución.

La combinación de las componentes a mezclar se logra debido a que existen especificaciones por cada país, de cuáles deben ser los rangos de los por cientos pasados por cada tamiz después que se realice la combinación de los áridos que se van a utilizar en la elaboración del hormigón asfáltico, en dependencia del tamaño máximo del árido y del tipo de mezcla que se quiera diseñar.

Para poder cumplir con estas especificaciones se han creado numerosos métodos de cálculos tanto gráficos como analíticos (Amoedo, W. 2005), que le permiten realizar la combinación de las fracciones que se desean mezclar para obtener el esqueleto mineral de un hormigón asfáltico que se encuentre en la fase de diseño.

A medida que ha pasado el tiempo, estas especificaciones han aumentado su complejidad y su nivel técnico. Los valores extremos de los rangos de por cientos pasados por cada tamiz han disminuido sus diferencias. Han surgido saltos en la serie de tamices, en las zonas que deben ser evitadas por la curva granulométrica, y puntos obligados entre los cuales deben pasar las curvas granulométricas.

Todo, con el objetivo de garantizar un incremento en la calidad del hormigón asfáltico; pero los métodos de cálculo para hallar la combinación de los áridos, no han tenido el mismo desarrollo, incluso se debe pensar en la búsqueda de nuevos métodos que no solo den la información de cuál es la combinación que más se ajuste a la media de la especificación con la cual se quiere cumplir, sino que también ofrece la información de cual es el mayor y el menor por ciento posible de participación de cada uno de los áridos que se desean combinar, de tal forma que los métodos de búsqueda de la combinación granulométrica, también ayuden a enfrentar los problemas que se dan en la práctica con el suministro de los materiales.

Por esta razón, se dirigen los esfuerzos a la búsqueda de nuevas formas de enfrentar este tipo de problema, que garanticen cumplir satisfactoriamente, con las especificaciones y aumentar el nivel de información que dichos métodos brindan acerca de los áridos que se desean combinar, aunque las especificaciones sean muy estrictas.

## **Métodos de cálculo tradicionales para realizar la combinación granulométrica manual.**

Los métodos tradicionales, para realizar la combinación granulométrica de forma manual de las fracciones que van a conformar el hormigón asfáltico son los siguientes (NC 253 2005):

- Método del nomograma.
- Método de Routhfuchs.
- Método del triángulo.

Es bueno aclarar que el método del nomograma y el método de Routhfuchs son los más usados para realizar la combinación granulométrica de forma manual, debido a que el método del triángulo es un poco engorroso su ejecución.

### Método del nomograma

- Se construye un gráfico cuadrado en el cual se trazan escalas en sus 4 lados de 0 → 100 de forma que los lados opuestos horizontales, los valores homólogos sumen 100.
- Se va uniendo un valor con el otro en las escalas verticales para construir los ejes de cada tamiz.
- Sobre estas rectas trazadas que corresponden a cada tamiz se marcan los puntos donde los valores de la especificación para cada tamiz en particular cortan a estas líneas.
- Se seleccionan los dos valores que están más cerca uno del otro, y por ellos se trazan dos líneas verticales, las mismas van a definir un área interior, una opción sería ir al centro del área y ver que valores nos dicen arriba y abajo, los cuales serían los valores del % de cada material.

### Variante del nomograma

- Se trabaja con la media de las especificaciones para interceptar las líneas de los tamices.
- Se traza una línea vertical que compense a ambos lados el área restringida por los puntos de intercepción de las líneas de los tamices.

### Método de Routhfuchs

- Se construye un rectángulo y en el cual se traza una diagonal que representará una curva granulométrica que se necesita, que puede ser la curva de Fuller o el valor medio de una especificación determinada.
- Las ordenadas del rectángulo están divididas en % de 0 → 100 sobre una escala lineal. La escala horizontal para la abertura de los tamices, se obtiene trazando para

cada tamiz una línea vertical que corta la diagonal en el punto donde la ordenada es igual al tanto por ciento que pasa por cada tamiz de la curva de referencia.

- La granulometría de los áridos que se van a mezclar, se dibujan en esta escala de aberturas de tamices. Generalmente se encontrará que no son líneas rectas.
- Con la ayuda de una recta transparente se dibujan líneas rectas que más se aproximen a las curvas granulométricas de cada árido. Esto se realiza siguiendo para cada una de las líneas rectas, de tal forma que el área comprendida entre ellas y la curva sea un mínimo y que la suma de las áreas que quedan a cada lado de la línea recta sean aproximadamente iguales.
- Los extremos expuestos de estas líneas se unen, los puntos donde estas líneas cortan la diagonal de la granulometría que se necesita, van a definir las proporciones en que se van a mezclar estos áridos, ya que la diferencia entre las ordenadas de estos puntos expresan los % de cada material.

### Método del triángulo

- Se utiliza un triángulo equilátero, en cuyos lados se trazan escalas que van de 0 a 100 y en las cuales se leerá el por ciento correspondiente a cada material de la mezcla.
- En los vértices del triángulo se levantan tres perpendiculares, A, B y C de igual longitud que los lados de este y que llevarán escalas de 0 a 100 en por cientos y se utilizarán para representar los por cientos pasados de las granulometrías de cada fracción.
- Se marcan en cada una de las verticales anteriores, los valores de por cientos pasado de cada material correspondiente, por cada uno de los tamices.
- Se traza una recta de un punto de la escala de A al punto correspondiente a la escala de B, de la escala de B a la escala de C y de la escala de C a la de A nuevamente, de tal forma que se delimite un plano que corresponde a un mismo tamiz en específico.
- Una vez efectuadas las operaciones anteriores, con todos los tamices se procede a marcar en cada escala vertical los valores que para cada tamiz tiene la curva de referencia.
- Estos valores después se unirán con una recta de una escala a otra en el orden de A a B, de B a C y de C a A (con pequeños trazos en el punto que corten a las rectas que representan a los tamices).
- Después se procede a bajar perpendiculares desde los puntos en que la especificación corta a las rectas que representan al tamiz, hacia los lados del triángulo base.
- Por último se unen los puntos que originan las perpendiculares que se bajaron en el paso anterior al triángulo base, con una recta

Como se puede apreciar estos métodos descritos, son métodos gráficos y sus procedimientos son un poco engorrosos para hacerle frente a la prontitud con que se necesitan hoy en día las combinaciones de las fracciones que se van a utilizar en un diseño determinado.

Por eso se han creado software para poder realizar las operaciones de búsqueda de combinación granulométrica con más agilidad, entre los cuales podemos mencionar el software Mezcla desarrollado por especialistas cubanos y el software Cálculo de Dosificación desarrollado por especialistas españoles. El software cubano solamente da la opción de calcular el mejor ajuste a la media de la especificación, el software español brinda más facilidades de búsqueda además de mejor ajuste a la media, da la posibilidad de aclarar el rango de por ciento de participación que se desea para cada uno de los áridos a combinar, pero no es capaz de informar si ese rango deseado es posible o no, también se puede buscar la combinación más barata, pero no es del todo confiable ya que hay muchas combinaciones granulométricas que no se consideran para realizar la elección. Dichos programas de computación usualmente, tienen como forma de cálculo métodos matemáticos, pero uno de los más comunes es el método de los mínimos cuadrados, que se trabaja a partir de una curva base o patrón (generalmente la media de la especificación) a buscar el mejor ajuste, pero se corre el riesgo de que el por ciento hallado para cada uno de los áridos que se desea combinar, dé como respuesta una curva de la combinación granulométrica que no cumpla con el huso granulométrico (que es la región que determina la norma), que se esté considerando para el diseño, ya que dicha solución es la mejor por el método empleado, lo cual no quiere decir, que no existe una respuesta que se ajuste más, de ser usada otra forma de búsqueda al huso granulométrico con el cual se quiere cumplir o que sencillamente con las granulometrías de los áridos que se están utilizando, no es posible realizar ninguna combinación granulométrica que satisfaga el huso granulométrico.

Algunos especialistas, (Amoedo, W. 2009), han tomado la decisión de realizar la búsqueda de la combinación por tanteo, basándose en la experiencia adquirida a lo largo de los años, a partir de una aplicación automatizada creada en algún programa de computación, por lo general el programa utilizado con estos fines es el Microsoft Office Excel, aunque existen especialistas que sencillamente toman la decisión de realizar el tanteo de forma manual o deduciendo los por cientos de participación más adecuados para las fracciones que se desean combinar.

Es consideración de este colectivo de autores que no se deben escatimar esfuerzos en la búsqueda de nuevas formas de cálculo de la combinación granulométrica y que las mismas aumenten el nivel de información sobre los por cientos de participación de las fracciones en la combinación granulométrica, que se pretenden usar para obtener el esqueleto granular del hormigón asfáltico, ya que después de haber aprobado la fuente de suministro de los áridos, el primer paso en el diseño, es precisamente la búsqueda de dicha combinación granulométrica, lo que influye positiva o negativamente en la calidad del hormigón asfáltico. Muchos especialistas a nivel internacional han realizado diversos estudios con el objetivo de demostrar la gran influencia que tiene la combinación granulométrica y las especificaciones de la combinación granulométrica en las propiedades físico-mecánicas, en la durabilidad, en la deformación, en fin en el desempeño en obra de los hormigones asfálticos. (Velásquez, M. 1970) Entre los trabajos realizados se puede mencionar cuatro estudios desarrollados en Brasil: Momm, L. Domingues, F. A.A. Triches, G. s/a Vasconcelos, K. L. Soares, J. B. s/a, Momm, L. s/a, Momm, L. Domingues, F.A.A. Bariani Bernucci, L.L. s/a, Castro Fernández, P.L, s/a, Reyes Ortiz, Oscar Javier. Camacho Tauta, Javier Fernando. Nieto Leal, Andrés. s/a., Del Pilar Galarza Guzmán, M. Sánchez Sabogal, F. s/a.

## Propuesta de un nuevo método de cálculo

Los autores del trabajo opinan que para dar solución al problema de buscar la combinación granulométrica de las fracciones que van a formar el esqueleto granular de un hormigón asfáltico, no se debe establecer solo una forma de cálculo para obtener el por ciento de participación de cada uno de los áridos que se desean combinar. Además de querer obtener una curva granulométrica que se ajuste lo más posible a la media de la especificación con la cual se quiere cumplir, también se pueden tener otros criterios, por tanto es conveniente hacer una combinación de formas de cálculo, para tratar de ajustarse a los criterios que puedan tener uno u otro especialista respecto a los por cientos de participación que desea obtener de las fracciones a combinar, en dependencia de una situación determinada que pueda surgir en la práctica.

Realizando un análisis de los datos que se disponen para buscar la combinación granulométrica de las fracciones a utilizar, se llega a la conclusión que si es posible cambiar el punto de vista o la forma de enfrentar este problema.

El método que se describe a continuación recibe el nombre de Combigrá:

- Formar un sistema de inecuaciones con los por cientos pasados de cada uno de los áridos a utilizar en la combinación, para cada uno de los tamices de la serie y el valor inferior y superior de cada uno de los rangos de la especificación seleccionada.
- Solución del sistema de inecuaciones obtenido.
- Búsqueda de los porcentajes de cada material y de la combinación granulométrica que más se ajuste al criterio o los criterios que se están considerando para la elección.

Si se está siguiendo algún criterio de búsqueda, para obtener el valor extremo del % de participación de algún árido, estos criterios pueden ser:

- Mayor por ciento de árido grueso (si son 2 áridos a combinar).
- Mayor por ciento de árido fino (si son 2 áridos a combinar).
- Mayor por ciento de un árido grueso en específico (si existen 2 áridos gruesos o más).
- Menor por ciento de un árido grueso en específico (si existen 2 áridos gruesos o más).
- Mayor por ciento de un árido fino en específico (si existen 2 áridos finos o más).
- Menor por ciento de un árido fino en específico (si existen 2 áridos finos o más).

La elección de la solución, no es un gran problema ya que estos valores se pueden obtener de la solución que se realizó en los sistemas de inecuaciones.

Pero, si el criterio que se sigue es el de mejor ajuste a la media de la especificación, se proponen los siguientes pasos:

- La combinación lineal de los por ciento de participación que se obtienen de la solución de los sistemas de inequaciones, son considerados vectores, los cuales son multiplicados por un coeficiente y sumados para generar nuevos vectores. La suma de dichos coeficientes es 1 y cada uno es mayor o igual a 0.
- Se calcula el valor del por ciento pasado por los áridos combinados por cada tamiz, con cada vector generado, incluyendo los vectores originales.
- Se calcula la desviación cuadrática (D) restando el por ciento pasado de los áridos combinados por cada tamiz, menos la media de la especificación con la que se quiere cumplir, y estas diferencias se elevan al cuadrado y se suman. De tal forma que D, quede en función de los coeficientes.
- Usando el Método de Lagrange se determina el punto de menor desviación cuadrática.

En caso que se quiera obtener una combinación granulométrica fijando un por ciento de participación de una fracción o varias fracciones que se desean combinar, pueden darse dos casos: que exista solución única o varias soluciones. Si se fija el por ciento de participación de una cantidad de fracciones que es igual al total a combinar menos 1, se obtiene una única solución si los por cientos de participación fijados, están dentro de los rangos hallados en la solución del sistema de inequaciones. Si se fija el por ciento de participación de una cantidad de fracciones que sea igual al total a combinar menos 2, se obtendría más de una solución, en este caso sería saludable realizar alguna otra restricción por parte del especialista para decidirse por una combinación.

Para el caso que se quiera fijar un por ciento pasado de los áridos combinados, para uno o varios tamices en específico puede ocurrir que se obtenga una solución o más de una. Si se obtiene más de una solución el especialista debe realizar alguna otra restricción para poder elegir una.

También se puede realizar la búsqueda de la combinación granulométrica, para obtener el hormigón asfáltico más barato, con el objetivo de minimizar los gastos de las empresas que se encargan de la elaboración de este tipo de hormigón.

Otro criterio a tener en cuenta, para la búsqueda de la combinación granulométrica, es obtener los por cientos de participación de cada fracción que faciliten obtener el menor contenido óptimo de asfalto, para enfrentar la escasez del mismo en caso que esta situación se presente en la práctica.

### **Resumen de criterios para realizar la búsqueda de la combinación granulométrica.**

- Para obtener mayor por ciento de participación de un árido en específico.
- Para obtener menor por ciento de participación de un árido en específico.
- Para obtener un mejor ajuste a los valores medios de las especificaciones.
- Teniendo la opción de fijar un valor que se desea de participación en por ciento de un árido o varios áridos en específico, para buscar los por cientos de participación



de los demás áridos. Teniendo la información del método, si dicho valor, está dentro o no de las soluciones posibles.

- Teniendo la opción de fijar un valor de % pasado que se desea cuando se realice la combinación de los materiales, para un tamiz en específico o varios tamices en específico. Teniendo la información del método, si dicho valor, está dentro o no de las soluciones posibles.
- Donde se obtenga el hormigón asfáltico más barato.
- Que facilite utilizar menor contenido de asfalto por tonelada de hormigón.

El método de cálculo de la combinación granulométrica descrito anteriormente, sería sumamente engorroso tratar de ejecutarlo sin el auxilio de métodos de cómputo, por tanto se requiere, de un Software, que se encargue del volumen de operaciones que se deben realizar para poder obtener una combinación de los áridos que se desean utilizar.

Para el uso de la forma de cálculo descrita anteriormente se hace necesario precisar algunas definiciones con el objetivo de facilitar el trabajo con el mismo.

Juego de por ciento de participación: Es el conjunto de valores, donde cada uno define el por ciento de participación de una fracción en el hormigón asfáltico, respecto al total de áridos y la suma de dichos valores es siempre 100.

Recta de la combinación de los por cientos de participación de cada material: Es la recta que surge al plotear en un sistema de ejes, todos los juegos de por cientos de participación, que cumplan con el huso granulométrico escogido para el diseño, donde cada eje representa el por ciento de participación de un árido en específico y dicha recta es única para un grupo específico de fracciones que se desean combinar.

Área de la combinación de los por cientos de participación de cada material: Es el área que surge al plotear en un sistema de coordenadas, todos los juegos de por cientos de participación, que cumplan con el huso granulométrico escogido para el diseño, donde cada eje representa el por ciento de participación de un árido en específico y dicha área es única para un grupo específico de fracciones que se desean combinar.

Área Solución de la Combinación Granulométrica: Es el área que surge dentro del huso granulométrico con el cual se quiere cumplir, al graficar todas las curvas de combinaciones granulométricas que pertenecen a todos los juegos de porcentajes de participación, que corresponden a un segmento cualquiera que alcanza dos extremos, de la región delimitada por los por cientos de participación extremos de cada material, al darle solución al sistema de inequaciones.

Área Solución Absoluta de la Combinación Granulométrica: Es el área que surge dentro del huso granulométrico con el cual se quiere cumplir, que contiene todas las posibles curvas de combinaciones granulométricas para un grupo de materiales dados.

También se hace necesario definir:

Área de no Solución de la Combinación Granulométrica: Área que surge de la sustracción de la superficie que ocupa el huso granulométrico con el cual se quiere cumplir y la superficie que ocupa el Área Solución de la Combinación Granulométrica.

Área de no Solución Absoluta de la Combinación Granulométrica: Área que surge de la sustracción de la superficie que ocupa el huso granulométrico con el cual se quiere cumplir y la superficie que ocupa el Área Solución Absoluta de la Combinación Granulométrica.

### **Factibilidad de uso del método.**

Este colectivo de autores es de la opinión, que el conocimiento del rango en que los porcentajes de participación de cada fracción se pueden mover, teniendo la certeza de que dichos valores si pueden ser solución para la combinación granulométrica que se está buscando, con el fin de cumplir con un huso granulométrico, es de gran importancia.

Esto se debe a que al escasear algún árido que se esté utilizando para la elaboración del hormigón asfáltico, por problemas en la fuente de suministro o cualquier otro problema que puede surgir en la práctica, se puede buscar el menor porcentaje posible de la fracción de material que escasea y utilizar esa combinación, para la fórmula de trabajo; pero tiene que estar previamente realizado el diseño para los nuevos porcentajes de cada fracción que se pretende implantar en la fórmula de trabajo.

Pensando de esta forma, la disponibilidad de materiales, es otro factor que influye en el cálculo de los porcentajes de participación de cada material y de la combinación granulométrica, con el objetivo de adaptar el diseño a las condiciones reales existente en la planta.

Sería bastante engorroso, para el que está diseñando el hormigón asfáltico, tener que realizar un diseño para cada juego de por ciento de participación, en dependencia del criterio de búsqueda que se esté utilizando para obtener la combinación granulométrica.

Por esta razón, se propone obtener una relación entre el % de asfalto teórico calculado al inicio del diseño y el contenido óptimo de asfalto hallado en el diseño que ya se realizó. Después se calcula la superficie específica de los áridos combinados, para los nuevos porcentajes de participación de cada material y se calcula el % de asfalto teórico; entonces este valor es dividido entre la relación hallada inicialmente, con el objetivo de obtener un contenido óptimo de asfalto aproximadamente igual al que se obtendría si se realizara el diseño completo; este proceder es justificable ya que se estaría trabajando exactamente con los mismos materiales, pero se han cambiado los por cientos de participación de cada uno. Además existe una relación directa entre la superficie específica del material y el contenido óptimo de asfalto cuando se trabaja con los mismos materiales, ya que al aumentar la superficie específica, aumenta el contenido óptimo de asfalto o si disminuye la superficie específica también disminuye el contenido óptimo de asfalto para un determinado diseño que se esté realizando, trabajando con los mismos materiales.

Una vez terminado el procedimiento anteriormente descrito, se realiza una mezcla de prueba a nivel de laboratorio y después a nivel de planta para efectuarle a la misma los ensayos que se hacen en el diseño; de esta forma se comprobará si dicho hormigón cumple

o no con los parámetros establecidos. Todo este proceder es para poder abreviar un poco la obtención del contenido óptimo de asfalto para los nuevos porcentajes de participación de las fracciones que se están utilizando en la elaboración del hormigón asfáltico.

### Comparación entre el Método Combigrá y los métodos existentes.

Para poder hacer una valoración del Método Combigrá, es recomendable realizar una comparación entre los resultados que se obtienen con él y los resultados que se obtienen con los métodos existentes.

No sería factible establecer una comparación con los resultados que se obtendrían a partir de los Métodos Nomograma, Routhfuchs y Triángulo, ya que a los mismos se le hace muy engorroso obtener un resultado de por ciento de participación de un árido y cumplir con las especificaciones que existen hoy en día (puntos de control y zona de restricción). También el tanteo manual y automatizado presenta el inconveniente de que el resultado que se obtiene, no tiene la certeza de que es el mejor posible.

Para ello los autores efectuaron una comparación entre los resultados por el Método Combigrá y el Método de los Mínimos Cuadrados.

Resultados obtenidos del Método de los Mínimos Cuadrados para un hormigón D-19 (se realizó una intersección de los intervalos de la especificación seleccionada por cada tamiz, para después hallar la media de la especificación resultante cada vez que se utilizó el Método de los Mínimos Cuadrados)

Tamices (mm)	Á 1	Á 2	Á 3	Á 4	% A 1	% A 2	% A 3	% A 4	Comb	Prop de norma D-19	Esp SUPERPAVE		Media Esp Result
											Puntos Control	Zona Restricción	
					34.4	10.3	46.1	9.2					
25.4	100	100	100	100	34.4	10.3	46.1	9.2	100	100	100		100
19.1	75	100	100	100	25.8	10.3	46.1	9.2	91.4	80-95	90-100		92.5
12.7	45	70	100	100	15.5	7.2	46.1	9.2	78	65-80			72.5
9.54	30	60	90	100	10.3	6.2	41.5	9.2	67.2	60-75			67.5
4.76	20	50	70	100	6.9	5.2	32.3	9.2	53.6	47-62			54.5
2.38	10	25	50	100	3.4	2.6	23.1	9.2	38.3	35-50	23-49	34.6-34.6	42.0
1.16												22.3-28.3	
0.6	0	5	25	100	0	0.5	11.5	9.2	21.2	18-30		16.7-20.7	25.35
0.3	0	4	18	100	0	0.4	8.3	9.2	17.9	13-23		13.7-13.7	18.0
0.18	0	2	10	100	0	0.2	4.6	9.2	14	7-15			11.0
0.074	0	0	5	80	0	0	2.3	7.	9.7	4-8	2-8		6.0

								4					
Nota: Se incumple en el tamiz 0.074												Desviación cuadrática	85.9

### Resultados obtenidos del Método Combigrá para un hormigón D-19

Tamices (mm)	Á 1	Á 2	Á 3	Á 4	% A 1	% A 2	% A 3	% A 4	Com b	Prop de norma D-19	Esp SUPERPAVE		Media Esp Result
											Puntos Control	Zona Restricción	
					36.5	0	57.1	6.4					
25.4	100	100	100	100	36.5	0	57.1	6.4	100	100	100		100
19.1	75	100	100	100	27.4	0	57.1	6.4	90.9	80-95	90-100		92.5
12.7	45	70	100	100	16.4	0	57.1	6.4	79.9	65-80			72.5
9.54	30	60	90	100	10.9	0	51.4	6.4	68.7	60-75			67.5
4.76	20	50	70	100	7.3	0	39.9	6.4	53.6	47-62			54.5
2.38	10	25	50	100	3.7	0	28.6	6.4	38.7	35-50	23-49	34.6-34.6	42.0
1.16												22.3-28.3	
0.6	0	5	25	100	0	0	14.2	6.4	20.6	18-30		16.7-20.7	25.35
0.3	0	4	18	100	0	0	10.2	6.4	16.6	13-23		13.7-13.7	18.0
0.18	0	2	10	100	0	0	5.7	6.4	12.1	7-15			11.0
0.074	0	0	5	80	0	0	2.9	5.1	8	4-8	2-8		6.0
Nota: Se cumple en todos los tamices												Desviación cuadrática	100.2

Como se puede observar, la tabla de resultados a partir del Método de los Mínimos Cuadrados nos muestra que la menor desviación cuadrática posible respecto a la curva base es 85.9, este tipo de ajuste se le ha llamado ajuste a la media, pero no se logra cumplir con la especificación en todos los tamices de la serie, por tanto podemos afirmar que no siempre la menor desviación cuadrática respecto a una curva base es el mejor ajuste respecto al huso granulométrico con el cual se quiere cumplir. No obstante la tabla de resultados a partir del Método Combigrá muestra que con una desviación cuadrática respecto a la curva base de 100.2, se logra cumplir con la especificación seleccionada en todos los tamices de la serie, esto quiere decir que la menor desviación cuadrática posible que logra cumplir con todos los tamices de la serie es 100.2, este tipo de ajuste se le ha llamado ajuste factible a la media.

### Resultados obtenidos del Método de los Mínimos Cuadrados para un hormigón SD-19

Tamices (mm)	Á 1	Á 2	Á 3	Á 4	% A 1	% A 2	% A 3	% A 4	Com b	Prop de norma SD-19	Esp SUPERPAVE		Media Esp Result
											Puntos Control	Zona Restricción	
					28.	31.	35.	4.					

					3	2	8	7					
25.4	100	100	100	100	28.3	31.2	35.8	4.7	100	100	100		100
19.1	75	100	100	100	21.2	31.2	35.8	4.7	92.9	80-95	90-100		92.5
12.7	45	70	100	100	12.7	21.8	35.8	4.7	75	65-80			72.5
9.54	30	60	90	100	8.5	18.7	32.2	4.7	64.1	60-75			67.5
4.76	20	50	70	100	5.7	15.6	25.1	4.7	51.1	43-58			50.5
2.38	10	25	50	100	2.8	7.8	17.9	4.7	33.2	30-45	23-49	34.6-34.6	32.3
1.16												22.3-28.3	
0.6	0	5	25	100	0	1.6	8.9	4.7	15.2	15-25		16.7-20.7	15.85
0.3	0	4	18	100	0	1.2	6.4	4.7	12.3	10-18		13.7-13.7	11.85
0.18	0	2	10	100	0	0.6	3.6	4.7	8.9	6-13			9.5
0.074	0	0	5	80	0	0	1.8	3.8	5.6	3-7	2-8		5.0
Nota: Se cumple en todos los tamices. Esta tabla es con la media inferior												Desviación cuadrática	20.5

### Resultados obtenidos a partir del Método Combigrá para un hormigón SD-19

Tamices (mm)	A1	A2	A3	A4	% A1	% A2	% A3	% A4	Comb	Prop de norma SD-19	Esp SUPERPAVE		Media Esp Result
											Puntos Control	Zona Restricción	
					28.3	31.2	35.8	4.7					
25.4	100	100	100	100	28.3	31.2	35.8	4.7	100	100	100		100
19.1	75	100	100	100	21.2	31.2	35.8	4.7	92.9	80-95	90-100		92.5
12.7	45	70	100	100	12.7	21.8	35.8	4.7	75	65-80			72.5
9.54	30	60	90	100	8.5	18.7	32.2	4.7	64.1	60-75			67.5
4.76	20	50	70	100	5.7	15.6	25.1	4.7	51.1	43-58			50.5
2.38	10	25	50	100	2.8	7.8	17.9	4.7	33.2	30-45	23-49	34.6-34.6	32.3
1.16												22.3-28.3	
0.6	0	5	25	100	0	1.6	8.9	4.7	15.2	15-25		16.7-20.7	15.85
0.3	0	4	18	100	0	1.2	6.4	4.7	12.3	10-18		13.7-13.7	11.85
0.18	0	2	10	100	0	0.6	3.6	4.7	8.9	6-13			9.5
0.074	0	0	5	80	0	0	1.8	3.8	5.6	3-7	2-8		5.0
Nota: Se cumple en todos los tamices. Esta tabla es con la media inferior												Desviación cuadrática	20.5

En las dos tablas anteriores se muestran los resultados obtenidos a partir del Método de los Mínimos Cuadrados y el Método Combigrá respectivamente. En ambos casos la desviación

cuadrática es 20.5, lo cual quiere decir que cuando se realice el ajuste a la media para calcular la menor desviación cuadrática posible respecto a la curva base y se logre cumplir con la especificación en todos los tamices de la serie, la desviación cuadrática que se obtiene a partir del ajuste a la media va a ser la misma que la desviación cuadrática que se obtiene a partir del ajuste factible a la media.

### Resultados obtenidos del Método de los Mínimos Cuadrados para un hormigón SD-19

Tamices (mm)	Á 1	Á 2	Á 3	Á 4	% A 1	% A 2	% A 3	% A 4	Comb	Prop de norma SD-19	Esp SUPERPAVE		Media Esp Result
											Puntos Control	Zona Restricción	
					37.8	6.7	48.8	6.7					
25.4	100	100	100	100	37.8	6.7	48.8	6.7	100	100	100		100
19.1	75	100	100	100	28.4	6.7	48.8	6.7	90.6	80-95	90-100		92.5
12.7	45	70	100	100	17.0	4.7	48.8	6.7	77.2	65-80			72.5
9.54	30	60	90	100	11.3	4.0	43.9	6.7	65.9	60-75			67.5
4.76	20	50	70	100	7.6	3.4	34.2	6.7	51.9	43-58			50.5
2.38	10	25	50	100	3.8	1.7	24.4	6.7	36.6	30-45	23-49	34.6-34.6	39.8
1.16												22.3-28.3	
0.6	0	5	25	100	0	0.3	12.2	6.7	19.2	15-25		16.7-20.7	22.85
0.3	0	4	18	100	0	0.3	8.8	6.7	15.8	10-18		13.7-13.7	15.85
0.18	0	2	10	100	0	0.1	4.9	6.7	11.7	6-13			9.5
0.074	0	0	5	80	0	0	2.4	5.4	7.8	3-7	2-8		5.0
Nota: Se incumple en los tamices 0.6 y 0.074. Esta tabla es con la media superior													66.5
Desviación cuadrática													

En la tabla anterior se muestran los resultados que se obtienen a partir del Método de los Mínimos Cuadrados, donde la menor desviación cuadrática posible respecto a la curva base es 66.5, esta sería el ajuste a la media, pero no se logra cumplir con la especificación en todos los tamices de la serie. Cuando se intenta obtener el ajuste factible a la media a partir del Método Combigrá, no se obtiene respuesta, lo cual quiere decir que no es posible obtener una combinación granulométrica que satisfaga la especificación con la cual se quiere cumplir. Por tanto en este caso, la menor desviación cuadrática posible respecto a la curva base, sería el mejor ajuste respecto al huso granulométrico con el cual se quiere cumplir.

### Caso de estudio

La granulometría de la gravilla y el polvo de piedra que se utiliza en la Planta de Asfalto de Coliseo, es la siguiente:

Tamices	19.1	12.7	9.54	4.74	2.0	0.42	0.18	0.074
Gravilla	100	60	28	2	1	0	0	0
Polvo de piedra	100	100	100	88	60	28	18	11

La propuesta de diseño para la elaboración del Hormigón Asfáltico Caliente (HAC) de tipo denso y 19,1 mm de tamaño máximo absoluto según NC 253 – 2005.

Proporción de los materiales en frío respecto al peso total de la mezcla y contenido óptimo de asfalto (COA).

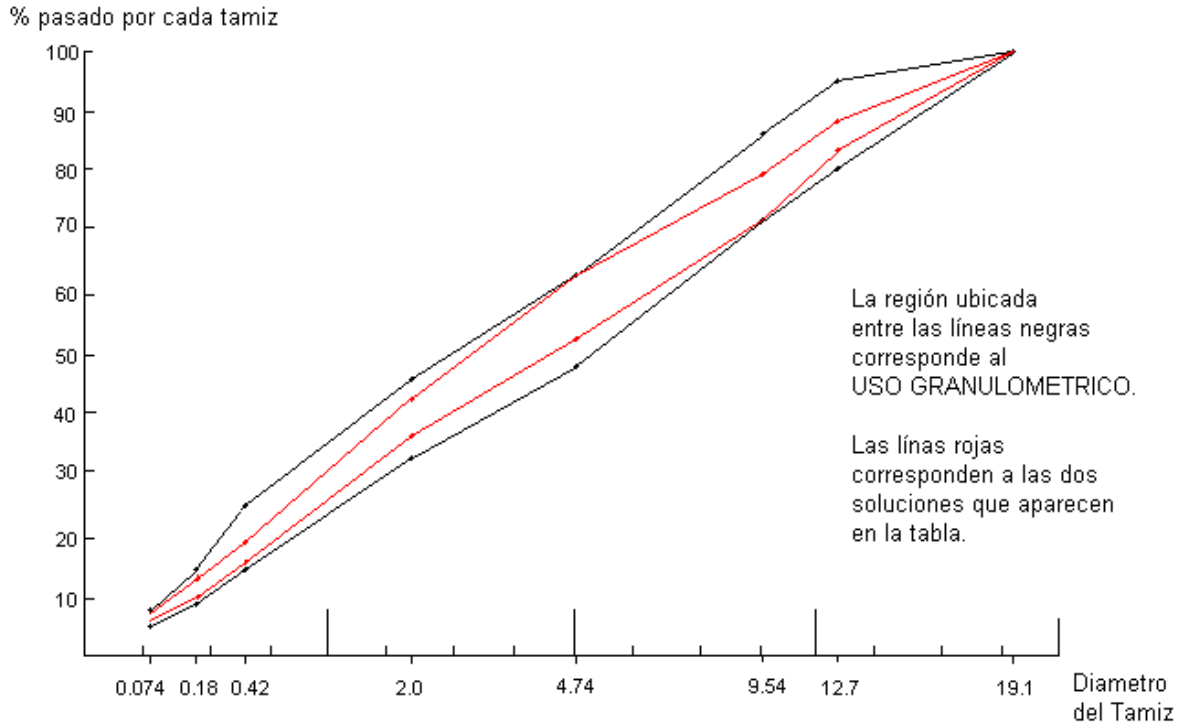
Materiales	%	(kg)
Gravilla	33	330
Polvo de piedra	61.2	612
Asfalto 50/70	5.8	58

Los por cientos de la gravilla y el polvo de piedra referido al peso total de los áridos es 35 % y 65 %, ya que fueron estos los dos por cientos que más se ajustaron a la media de la especificación seleccionada según NC 253 - 2005, cuando se realizó la combinación granulométrica.

Aplicando el Método Combigra para definir cual es el Área Solución de la Combinación Granulométrica y la Recta de la combinación de los por cientos de participación de cada material, que se utiliza en la Planta de Asfalto, se llegan a los siguientes resultados:

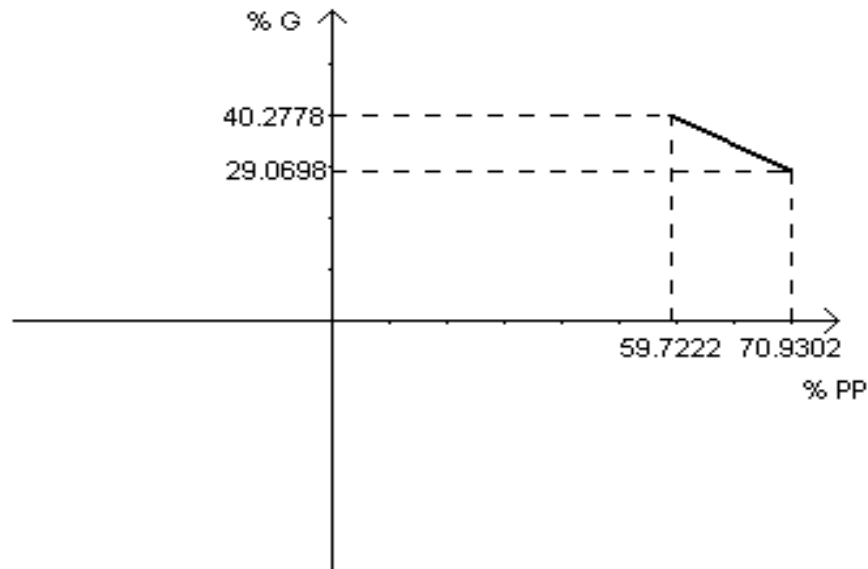
G---Gravilla    PP---Polvo de Piedra

Tamices	G	PP	Combinación para G (29.0698 %) PP (70.9302 %)	Combinación para G (40.2778 %) PP (59.7222)	Esp NC 253 – 2005	Media Esp
19.1	100	100	100	100	100	100
12.7	60	100	88.3721	83.8889	80 – 95	87.5
9.54	28	100	79.0698	71.0	71 – 86	78.5
4.74	2	88	63.0	53.3611	48 – 63	55.5
2.0	1	60	42.8488	36.2361	32 – 46	39
0.42	0	28	19.8605	16.7222	15 – 25	20
0.18	0	18	12.7674	10.75	9 – 15	12
0.074	0	11	7.80233	6.56944	5 – 8	6.5



Área Solución de la Combinación Granulométrica y la Recta de la combinación de los por cientos de participación de cada material.

Como se puede observar, en la tabla anterior la Gravilla puede variar su porcentaje desde 29.0698 % (29.1 %) a 40.2778 % (40.2 %), y el Polvo de Piedra de 70.9302 % (70.9 %) a 59.7222 % (59.8 %). Por tanto al realizar el gráfico de la línea de la combinación de los por cientos de participación de cada material, se obtiene el siguiente gráfico:



El día 22/1/09 se produjo una rotura en el remolador de la Planta de Asfalto y no se podía comprar gravilla ya que la cantera también tenía problemas, por tanto desde el día 22 de



enero se conocía que la gravilla era un material que escasearía debido a la poca reserva que quedaba, aproximadamente 270 m<sup>3</sup>.

Analizando el consumo de materiales para el 35 % de Gravilla y 65 % de Polvo de Piedra, referidos estos por cientos al peso total de los áridos, se llega a la información de la siguiente tabla, en la cual no se especifica la cantidad de polvo de piedra, ni de asfalto porque son materiales que hay bastante en existencia:

Materiales	m <sup>3</sup>	Kg	%	(kg)	Cantidad TM
Gravilla	270	367 740	32.97	330	1 114
Polvo de Piedra			61.23	612	
Asfalto			5.8	58	

Peso unitario suelto de la gravilla (19.1mm) -----1362 kg/m<sup>3</sup>

Peso unitario suelto del polvo de piedra----1547 kg/m<sup>3</sup>

Realizando un análisis del área que se puede cubrir con 1114 TM, para un espesor de 4 cm en una capa de rodadura.

1 TM-----10.21 m<sup>2</sup>

1114 TM-----X

X=11 373.9 m<sup>2</sup>

Si a partir del día 22/1/09 se analiza que el menor porcentaje posible de la gravilla es 29,1% y que el por ciento de polvo de piedra que le corresponde es 70,9 %, además de existir un diseño para estos porcentajes, se podía aprovechar un poco más la gravilla existente en la Planta de Asfalto.

En la siguiente tabla se analiza la producción de TM de asfalto a partir de los 367 740 kg (270 m<sup>3</sup>) de Gravilla en existencia, para un 30 % de Gravilla y un 70 % de Polvo de Piedra, estos por cientos referidos al peso total de los áridos.

Materiales	m <sup>3</sup>	Kg	%	1 TM	Cantidad TM
Gravilla	270	367 740	28.23	282	1304
Polvo de Piedra			65.87	659	
Asfalto			5.9	59	

Realizando un análisis del área que se puede cubrir con 1304 TM, para un espesor de 4 cm en una capa de rodadura.

1 TM-----10.21 m<sup>2</sup>

1304 TM-----X

X=13 313.8 m<sup>2</sup>

Así se puede afirmar, que si se hubiera cambiado el diseño, se hubiesen podido cubrir 1.939.9 m<sup>2</sup> más de lo que se cubrió, y se pudo haber producido 190 TM más que lo que se produjo, siempre cumpliendo con lo que está normado. Es decir, el aumento de la

producción, garantizó mayor cubrimiento, utilizando la misma cantidad de horas laborables.

Se realiza una comparación de costo, entre la TM de HAC que se produce a partir de la combinación granulométrica de mejor ajuste a la media de la especificación y la combinación granulométrica que minimiza el precio por TM de HAC, se obtiene el siguiente resultado:

G—32.97    PP—61.23    COA—5.8→mejor ajuste a la media de la especificación  
 $330*0.0119+612*0.0107+58*0.2983=27.7768$   
G—37.72    PP—56.58    COA—5.7→menor precio por TM de HAC

$377*0.0119+566*0.0107+57*0.2983=27.5456$

Los datos antes mostrados, demuestran que la combinación granulométrica de menor precio por TM de HAC es 0.2312 MN más barato que la combinación granulométrica de mejor ajuste a la media de la especificación.

Si se analiza el precio de la combinación granulométrica solamente, sin tener en cuenta el precio del asfalto se obtienen los siguientes resultados:

G—32.97    PP—61.23→mejor ajuste a la media de la especificación

$330*0.0119+612*0.0107=10.4754$

G—37.72    PP—56.58→menor precio por TM de HAC

$377*0.0119+566*0.0107=10.5425$

Como se puede observar la combinación granulométrica de mejor ajuste a la media de la especificación es 0.0671 MN más barato que la combinación granulométrica de menor precio por TM de HAC, lo cual no quiere decir que cuando se elabore el HAC, la combinación de mejor ajuste a la media de la especificación, da como resultado el HAC más barato.

### **Valoración económica y aporte social**

Los costos de la realización de este trabajo son mínimos, ya que se utilizó pequeñas cantidades de áridos y asfalto 50/70, además de 1 PC. Pero con la aplicación de este método bajo las condiciones específicas de ese momento se aumenta la productividad ya que con los mismos 270 m<sup>3</sup> de gravilla en existencia se hubiera podido hacer 190 TM más de producción en la misma cantidad de jornadas de trabajo, lo que a un precio promedio de 80.00 MN arroja un valor de 15 200.00 MN, si se considera que esta situación se puede presentar en el año 4 veces, se gana entonces 60 800.00 MN. Además si se toma la combinación granulométrica de menor precio por TM de HAC y no la de mejor ajuste a la media de la especificación se ahorraría por tonelada 0.2312 MN, si la planta tiene que elaborar al año 60 000 TM, se ahorraría 13 872.00 MN También con el uso de este método se garantiza obtener la mejor combinación granulométrica para el caso particular de los

materiales que se usan y el tipo de mezcla que se desea diseñar, por tanto se está garantizando un esqueleto granular resistente, aumentando la calidad del hormigón asfáltico que se desea elaborar.

## **Conclusiones.**

Con el método de los mínimos cuadrados, no se enfrentan eficazmente todos los casos posibles de búsqueda de la combinación granulométrica. A menor desviación cuadrática respecto a una curva base, no significa que siempre, se obtenga el mejor ajuste respecto al Huso granulométrico con el cual se quiere cumplir. El Método Combigra, es capaz de enfrentar eficazmente todos los casos posibles de búsqueda de la combinación granulométrica. Este método garantiza, calcular la combinación granulométrica más rápidamente, teniendo la certeza de que no hay otra combinación mejor, por tanto hay garantía de la calidad del esqueleto granular del hormigón. Se marca un antes y un después en la búsqueda de la combinación granulométrica, ya que la misma se convierte en una herramienta para mitigar los problemas que surgen en la práctica con el suministro de áridos o cemento asfáltico. Es posible buscar el menor por ciento de participación de un árido que participa en la elaboración del hormigón asfáltico, cuando este escasea, para poder elaborar más TM con el mismo material que escasea, existente en ese momento en la planta. Al poder elaborar más TM de asfalto, se pueden cubrir más  $m^2$  en una obra determinada, con la misma cantidad del material que está escaseando. Es posible buscar la combinación granulométrica que proporcione el hormigón asfáltico más barato, teniendo los precios de los áridos y el asfalto que se están utilizando en la elaboración de la mezcla. La disponibilidad de materiales es otro factor que influye en el diseño y producción de hormigones asfáltico. Es posible aumentar la cantidad de criterios a tener en cuenta, cuando se realiza la búsqueda de la combinación granulométrica. La combinación granulométrica más barata, no tiene que dar como resultado el hormigón asfáltico más barato. Se abre una nueva puerta a la investigación ya que se podrá analizar, si la variación hasta el límite posible del % de participación de los áridos que intervienen en un hormigón asfáltico, provoca diferencias significativas en los parámetros de dicho hormigón.

## **Recomendaciones.**

Debido a las facilidades de búsqueda que ofrece el método antes mencionado se considera saludable proponer: que el Método Combigra sea usado por los especialistas del país, que tengan a su cargo la responsabilidad de realizar algún diseño de hormigón asfáltico. Realizar el diseño del hormigón asfáltico, para la combinación granulométrica donde se obtenga el hormigón asfáltico más barato y el menor valor de por ciento de participación de cada uno de los áridos que intervienen en el diseño. Considerar la disponibilidad de materiales, otro factor que influye en el diseño de Hormigón Asfáltico. Implementar en las plantas de asfalto el Sistema de Producción de Mezcla Normal de Trabajo, teniendo en cuenta la disponibilidad de materiales. Considerar para la realización de algún Software de cálculo de combinación granulométrica, el mejor ajuste respecto al Huso granulométrico con el cual se quiere cumplir. Considerar en los Software, la búsqueda de la combinación

granulométrica donde se obtenga el hormigón asfáltico más barato, no la combinación granulométrica más barata.

## **Bibliografía.**

Amoedo Fernández, Wilfredo S. 2005. Propuesta de alternativa para el diseño de mezclas de hormigón asfáltico, INVESCONS – CENCOSUT, Ministerio de la Construcción, Cuba.

Amoedo Fernández, Wilfredo S. 2005a. Recuperación vial nacional, Centro Nacional de Capacitación y Superación Técnica, INVESCONS – Ministerio de la Construcción, Cuba.

Amoedo Fernández, Wilfredo S. 2009. Diseño de hormigones asfálticos y técnicas constructivas, INVESCONS Cuba.

NC 253 2005 Hormigón Asfáltico Caliente. Especificaciones.

NC 261 2005 Determinación contenido óptimo de asfalto empleando equipo Marshall.

Velásquez, Manuel. 1970. Asfaltos, Ediciones de Ciencia y Técnica, Instituto del Libro, marzo. España

Solodóvnikov, A.S. 1984. Sistemas de desigualdades lineales, Editorial MIR Moscú, segunda Edición. URSS

Castro Fernández, P. L. s/a. Evaluación del efecto del cambio en las especificaciones para granulometría en Costa Rica, sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de mezclas asfálticas. CILA No. X. Costa Rica

Vasconcelos, K. L. Soares, J. B. s/a. Efeito do tamanho máximo nominal dos agregados no comportamento mecánico de misturas asfálticas tipo SMA. CILA No. XIII. Brasil.

Momm, L. Domingues, F. A.A. Triches, G. s/a. Efeitos da granulometría no concreto asfáltico preparado pelo ensaio Marshall. CILA No. X. Brasil.

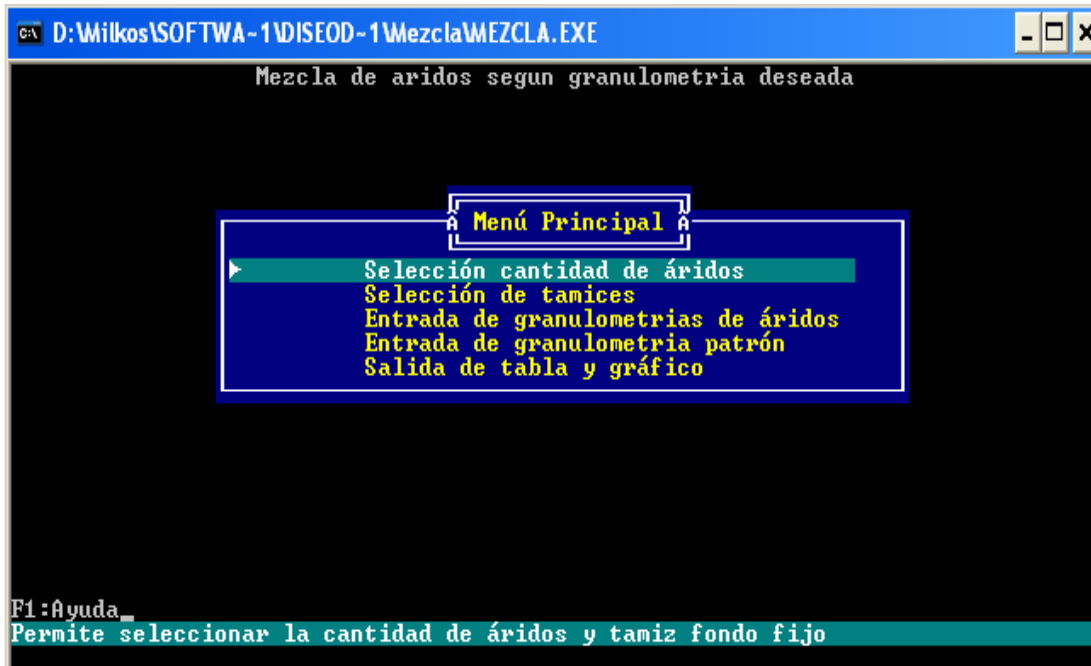
Reyes Ortiz, Oscar Javier. Camacho Tauta, Javier Fernando. Nieto Leal, Andrés. s/a. Deformación permanente en mezclas asfálticas en función de su granulometría. CILA No.XIV. Colombia.

Momm, L. s/a. Fatiga dos concretos asfálticos á deformacao controlada em modo continuo-efeito da granulometría. CILA XI. Brasil.

Momm, L. Domingues, F.A.A. Bariani Bernucci, L.L. s/a. Modulo complexo dos concretos asfáltico-influência da granulometría. CILA XI. Brasil.

Del Pilar Galarza Guzmán, M. Sánchez Sabogal, F. s/a Análisis de criterios sobre las estructuras granulares de las mezclas asfálticas en caliente de tipo denso. CILA XII. Colombia.

**Anexos**  
Software Mezcla



**Software Cálculo de Dosificaciones**