

Tesis de Posgrado

Influencia de la temperatura sobre la estabilidad de mezclas asfálticas para pavimentos (Sheet asphalt) : definición del coeficiente térmico de estabilidad Hubbard-Field

Petroni, Eberto

1941

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Química de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Petroni, Eberto. (1941). Influencia de la temperatura sobre la estabilidad de mezclas asfálticas para pavimentos (Sheet asphalt) : definición del coeficiente térmico de estabilidad Hubbard-Field. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0267_Petroni.pdf

Cita tipo Chicago:

Petroni, Eberto. "Influencia de la temperatura sobre la estabilidad de mezclas asfálticas para pavimentos (Sheet asphalt) : definición del coeficiente térmico de estabilidad Hubbard-Field". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1941.

http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0267_Petroni.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ESTABILIDAD DE MEZCLAS
ASFALTICAS PARA PAVIMENTOS (Sheet Asphalt)**

.....
DEFINICION DEL COEFICIENTE TERMICO DE ESTABILIDAD HUBBARD-FIELD

.....

**TRABAJO DE TESIS
DE
EBERTO PETRONI**

.....

1941

Tesis: 267

CEMBA.

Este trabajo ha sido ejecutado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Municipalidad de la Ciudad de Buenos Aires.

Quiero expresar ante todo mi reconocimiento al Dr Celestino L. Ruiz a cuya capacidad y comprensión debe exclusivamente la realización de mi tarea.-

Octubre de 1941.-

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ESTABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS (Sheet Asphalt).

DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA ESTABILIDAD HUBBARD-FIELD.

U. S. A.

Algunos antecedentes sobre pavimentos asfálticos.-Sheet Asphalt.-

La utilización del asfalto en la construcción de pavimentos data de épocas muy remotas encontrándose entre las primeras referencias su utilización como ligante en los pavimentos de piedra de las calles de Babilonia (3.200 años A.J.) con el mismo fin lo emplearon los Incas del Perú para la construcción de caminos de los que aún quedan restos visibles. En 1802 se utiliza la roca asfáltica en Francia para superficies de puentes y veredas. Entre 1850 y 1860 fueron pavimentadas con asfalto cierto número de calles de París y poco más tarde se le utilizó en Londres y Washington. El tipo denominado "Sheet Asphalt" fué realizado por primera vez por E.J. de Smedt en Newark, New Jersey.

Se llama mezcla para pavimento asfáltico o mezcla asfáltica al conglomerado formado por un agregado mineral y asfalto. El carácter del agregado mineral regula la proporción y características del asfalto a usarse para ligarlo y es conveniente por lo tanto su clasificación con relación al tamaño medio de las unidades individuales que lo constituyen. Teniendo en cuenta los tipos usados comunmente puede tomarse el tamiz N° 10 (diez mallas por pulgada) como elemento de clasificación. El agregado mineral constituido unicamente por porciones que quedan retenidas en el tamiz 10 se considera como agregado grueso y el constituido totalmente por partículas que pasan a través de dicho tamiz se denomina agregado fino.

Dentro de cada tipo de agregado pueden establecerse diferentes relaciones, en peso o en volumen, entre las cantidades de unidades individuales de determinados tamaños medios. Esta relación se denomina Granulometría y en el caso de agregados finos, que son los que interesan en este trabajo, se expresa en peso por ciento del agregado total, definiéndose los distintos tamaños medios mediante pares de tamices; generalmente se toman tres dimensiones medias correspondientes a las partículas que pasan por el tamiz 10 y quedan retenidas sobre el 40, pasan por el 40 y quedan retenidas sobre el 80 y finalmente a las que pasan por el 80 y quedan sobre el 200.

La división de los agregados minerales en dos clases conduce a tres tipos diferentes de mezclas asfálticas:

1º: Mezclas constituidas exclusivamente por agregado grueso como agregado mineral.

2º: Mezclas en las que el agregado mineral está constituido exclusivamente por agregado fino. En este caso se utilizan arenas de las que se ha separado la porción que queda retenida sobre el tamiz 10.

3º: Mezclas constituidas por combinación de agregados gruesos y finos.

Las mezclas pertenecientes al segundo tipo son conocidas comunmente con el nombre de "Sheet Asphalt" o carpeta asfáltica.

Estabilidad de una mezcla asfáltica.

Una de las condiciones que debe cumplir un "sheet asphalt" es poseer suficiente resistencia interna para soportar, con deformaciones mínimas, los esfuerzos a que está sometido en el uso práctico (giro, aceleración, frenado, etc. de los vehículos); a esta propiedad mecánica de las mezclas asfálticas se le llama Estabilidad.

Se sabe que la estabilidad de una mezcla asfáltica depende de la trabazón y fricción entre las partículas minerales y de la resistencia viscosa del asfalto; los dos primeros factores se controlan mediante la granulometría del agregado mineral, la naturaleza de la arena y la compactación de la mezcla asfáltica, en cuanto al último, además de las características del asfalto usado, se puede modificar mediante el agregado de polvo mineral finamente dividido (debe pasar casi totalmente por el tamiz 200) que aumenta la consistencia del betón (1), este material se denomina "filler" y la práctica ha demostrado que el polvo calizo o el cemento portland son los que dan mejores resultados. El filler desempeña en realidad un doble papel pues interviene también aumentando la fricción del agregado mineral.

La granulometría más conveniente, independientemente de toda teoría, puede

establecerse, dentro de ciertos límites, por los resultados prácticos obtenidos en el uso; del mismo modo pueden fijarse las relaciones óptimas entre el filler, el betún y el agregado mineral. Se obtiene así la dosificación más conveniente de la mezcla desde el punto de vista de la trabajabilidad, duración y resistencia, estableciéndose además las características más apropiadas de sus constituyentes, grado de compactación, espesor de la capa, etc.

Puede determinarse también la dosificación de una mezcla asfáltica, en una forma más racional, mediante la teoría de los vacíos: la idea fundamental de esta teoría consiste en calcular la granulometría de la arena en forma tal que la cantidad de agregado de un tamaño medio dado sea la necesaria para llenar los vacíos que dejan entre sí las partículas de tamaño mayor; a su vez los vacíos finales del agregado mineral son colmados con el filler, que desempeña un verdadero papel de relleno y finalmente los vacíos de la mezcla arena-filler se llenan con el asfalto en una proporción tal que una vez convenientemente compactada la mezcla queden todavía de 3 a 5 % de vacíos para permitir la dilatación térmica (2). En realidad ambos métodos se complementan en la práctica partiendo de ciertos datos experimentales y aplicando la teoría de los vacíos dentro de determinados límites.

La naturaleza de la arena es el factor de mayor influencia en la estabilidad (3). Recientemente el Sr. C. L. Ruiz demostró que esta influencia se debe en gran parte a la forma de las partículas, con arena de granos irregulares (granítica) la estabilidad de la mezcla aumenta enormemente (4).

Las características del asfalto influyen sobre las propiedades generales de la mezcla (estabilidad, durabilidad, etc.) estas características están ya establecidas por los resultados prácticos obtenidos y se controlan por los ensayos de ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, Ollens, etc.

Una carpeta está sometida además, en el uso práctico, a un conjunto de factores desintegrantes constituidos principalmente por los agentes climatológicos (calor, agua, aire, sol, etc.) y la acción de desgaste del tráfico, de ahí que su vida útil depende del criterio y acierto en la elección de los materiales, fórmula de la mezcla y proceso constructivo.

En la práctica el "sheet asphalt" se construye sobre otra capa de mayor espesor de mezcla asfáltica del tercer tipo que recibe el nombre de base negra. Para preparar la carpeta asfáltica se calientan la arena y el filler a una temperatura de 150-180°C y se mezclan con el asfalto fundido a la misma temperatura hasta obtener una buena homogeneización. La mezcla se coloca sobre la base negra, previamente consolidada, a una temperatura de 120-150°C, se extiende con rastrillos y se compacta con un rodillo de 7-10 toneladas hasta lograr el espesor deseado.

Métodos de control del "sheet asphalt".

No ofrece mayores dificultades determinar si una mezcla responde o no en su composición a las exigencias de un Pliego de Condiciones y estos análisis constituyen un trabajo de rutina en los laboratorios especializados en pavimentación. En cambio, prever el comportamiento práctico de una mezcla frente a los factores naturales y artificiales que ya hemos mencionado es un problema muy difícil, cuya resolución cae dentro del amplio campo del Ensayo de Materiales.

En líneas generales puede decirse que ensayar un material significa constatar si dado un conjunto de condiciones límites, el material es capaz de soportarlas satisfactoriamente durante un cierto tiempo.

Ahora bien, el establecimiento de este conjunto de condiciones resulta casi siempre tarea poco menos que imposible pues el gran número de factores que actúan simultáneamente dan al problema una enorme complejidad. El ideal en este sentido sería el conocimiento exacto de los fenómenos que ocurren en cada caso y en consecuencia de las leyes que se cumplen en el uso práctico, lo que permitiría la aplicación de métodos físicos absolutos de medida. Esto, como ya dijimos, es muy poco probable en la práctica y por otra parte la aplicación de métodos científicos resulta generalmente demasiado larga y exige instrumental costoso y delicado, de aquí que en muchos casos sea necesario recurrir a procedimientos empíricos, realizados en condiciones meticulosamente especificadas, para efectuar medidas cuyo valor reside en que por el gran número de ensayos realizados se ha llegado a establecer una relación entre un número, o un conjunto de números, y el resultado práctico. Este método, que se basa en la repetición de ensayos, permite una valoración del

material.

Dentro de estas ideas generales se ha realizado el presente trabajo, empleando métodos que la práctica repetida ha admitido como eficientes pero que carecen de todo fundamento teórico y utilizando máquinas, dispositivos y técnicas de trabajo de uso corriente en este tipo de ensayos.

Considerando en particular el caso de la resistencia de una mezcla asfáltica contra los esfuerzos que tienden a deformarla, a la que hemos denominado estabilidad, no queda otro camino, si se quiere llegar a una medida de la misma, que recurrir a ensayos puramente empíricos del tipo que acabamos de describir.

De todos los métodos conocidos, el más comunmente usado es el propuesto en 1925 por Hubbard y Field en los Estados Unidos de Norteamérica.

Método de Hubbard-Field.-Estabilidad Hubbard-Field.-

Los primeros intentos de los autores de este ensayo tendían a obtener un método para determinar la estabilidad relativa de agregados minerales, como los usados en la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentos, sin relación con el ligante asfáltico. Esto lo hacían con el objeto de eliminar del problema de la determinación de la resistencia de una mezcla tantas variables como fuera posible, pero la finalidad fundamental era su utilización posterior en el ensayo de mezclas completas. Fué necesario para ello modificar en cierta medida los aparatos utilizados en el primer caso y estandarizar cuidadosamente cada etapa del método.

El ensayo fué perfeccionado gradualmente hasta que se obtuvieron resultados aparentemente consistentes que se reproducían dentro de una aproximación de más 5 % a menos 5 % del promedio de varias determinaciones.

En el procedimiento definitivo las mezclas son ensayadas a una temperatura que se considera como la máxima que puede alcanzar el pavimento terminado, pues se supone que los desplazamientos pueden ocurrir más fácilmente a esa temperatura que a otra más baja (5).

Las muestras para el ensayo pueden ser preparadas en el laboratorio, tomadas de las plantas de elaboración o sacadas directamente del pavimento terminado. En los dos primeros casos la mezcla se moldea en forma de probetas cilíndricas de dos pulgadas de diámetro y una de altura aplicando una carga total de 4.270 kilos, la cantidad de mezcla necesaria para cada probeta es de 100-120 gramos.

Para realizar ensayos de estabilidad sobre pavimentos terminados se extraen con dispositivos especiales muestras cilíndricas del diámetro establecido cortándolas luego a la altura estipulada. Los resultados obtenidos sobre pavimentos ya construidos son prácticamente iguales, en promedio, a los realizados sobre las mismas mezclas preparadas y comprimidas en el laboratorio según las normas establecidas en el método. (5)

El ensayo consiste en determinar la carga máxima necesaria para forzar la probeta a través de un orificio de dimensiones "standard", a una temperatura de 60°C y con una velocidad constante de aplicación de la carga (6).

A la carga máxima así determinada se le denomina Estabilidad Hubbard-Field.

Según sus propios autores el ensayo tiene por objeto dar una idea de la resistencia al desplazamiento, bajo la acción del tráfico, de la mezcla comprimida, es decir de su resistencia a aquellas fuerzas que tienden a producir corrimientos, ondulaciones y huellas y su valor radica en que gracias a numerosas observaciones, entre ellas las realizadas por Emmos sobre pista y por Hubbard sobre pavimentos terminados bajo la acción del tráfico, se ha podido establecer que cuando la mezcla asfáltica posee una estabilidad de 900 kilos (2.000 lbs) o más no se producen ondulaciones ni huellas apreciables, pero cuando la estabilidad es inferior a 550 kilos (1.200 lbs) los desplazamientos se vuelven muy pronunciados obteniéndose resultados prácticos deficientes. (6').

Influencia de la temperatura sobre la estabilidad.-

El ensayo de Hubbard-Field da una medida de la resistencia de un "sheet asphalt" a una temperatura fija que se considera como la máxima que puede alcanzar un pavimento en el verano. Es evidente que esta temperatura máxi-

Mezclas preparadas.-

- G1 -Arena Granítica con Betún N°1
- C1 -Arena Cuarzosa con Betún N°1
- M1 -Partes iguales de ambas arenas en cada fracción con Betún 1
- G2 -Arena Granítica con Betún N°2
- G3 -Arena Granítica con Betún N°3
- G4 -Arena Granítica con Betún N°4
- C4 -Arena Cuarzosa con Betún N°4

- RESULTADOS EXPERIMENTALES -

En los cuadros N°1 al N°7 se registran los valores experimentales obtenidos para cada mezcla en el siguiente orden: Estabilidad de cada una de las probetas ensayadas, valor más probable \bar{x} , error medio de cada observación m , error medio del valor más probable ξ y el error relativo porcentual del valor más probable e %, finalmente, al pié de cada cuadro se expresa el error medio relativo de cada observación μ .

Para el cálculo de los errores mencionados se ha seguido la teoría de Gauss (7). Las fórmulas utilizadas son:

Valor más probable: Si se realizan n determinaciones de igual aproximación x_1, x_2, \dots, x_n de una misma magnitud X , el valor más probable es:

$$x' = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Error aparente:

$$a_i = x_i - x'$$

Error medio de cada observación con respecto al valor exacto:

$$m = \pm \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{(n-1)}}$$

Error medio del valor más probable:

$$\xi = \pm \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n(n-1)}}$$

Error relativo porcentual: Si x_i es el error cometido en una determinación x_i , el error relativo porcentual e es:

$$e = \frac{x_i}{x_i} 100$$

Error medio de cada observación: Si en un conjunto de n determinaciones se cometen los errores x_1, x_2, \dots, x_n (aparentes o relativos), el error medio de cada observación es:

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

CUADRO N°1

Arena Granítica - Betón N°1 (G1)

Temp. °C	N°	Lectura en Kg	E en Kg	log E	± m	± ε	± e %	e ²
30	1	3180	3120	3,494	70	40	1,3	1,7
	2	3140						
	3	3040						
40	4	2360	2380	3,376	50	30	1,3	1,7
	5	2350						
	6	2440						
50	7	1810	1890	3,276	70	40	2,1	4,4
	8	1920						
	9	1940						
60	10	1590	1590	3,201	10	6	0,4	0,2
	11	1600						
	12	1580						
70	13	1420	1380	3,140	50	25	1,8	3,2
	14	1390						
	15	1420						
	16	1360						
	17	1310						
80	18	1230	1230	3,090	25	15	1,2	1,4
	19	1190						
	20	1250						
	21	1250						
	22	1240						
85	23	1060	1090	3,037	30	15	1,4	2,0
	24	1090						
	25	1120						
	26	1110						
	27	1060						
90	28	930	870	2,940	55	25	2,9	8,4
	29	800						
	30	840						
	31	860						
	32	910						

n=8

$$\sum e^2 = 23,0$$

El error relativo medio de la estabilidad más probable a cada temperatura es:

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{23}{8}} = \pm 1,7 \%$$

CUADRO N°2

Arena Cuarzosa - Betún NEI (Cl)

Temp. °C	Nº	Lectura en Kg	E en Kg	log E	± m	± ε	± e %	e ²
30	1	2040						
	2	2050	2020	3,305	50	30	1,5	2,3
	3	1960						
40	4	1200						
	5	1170	1200	3,079	30	20	1,7	2,9
	6	1230						
50	7	850						
	8	790						
	9	830						
	10	850	840	2,924	35	15	1,8	3,2
	11	850						
	12	900						
60	13	830						
	14	610						
	15	550	580	2,763	30	20	3,4	11,6
	16	590						
	17	410						
	18	350						
70	19	400						
	20	350	380	2,580	30	15	3,9	15,2
	21	380						
	22	360						
	23	420						
	24	310						
75	25	310						
	26	290	320	2,505	25	10	3,1	9,6
	27	350						
	28	330						
80	29	290						
	30	320						
	31	280	300	2,477	25	10	3,3	10,9
	32	330						
	33	310						
85	34	270						
	35	240	250	2,398	20	10	4,0	16,0
	36	270						
	37	230						
90	38	180						
	39	190						
	40	190	200	2,301	25	10	5,0	25,0
	41	230						
	42	230						

n=9

$\sum e^2 = 96,7$

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{96,7}{9}} = \pm 3,3 \%$$

CUADRO N°3 (N 1)

Mezcla de arena granítica y cuarzosa- Betón N°1

Temp. °C	Nº	Lectura en Kg	E en Kg	log E	±m	±ε	±e %	e ²
30	1	2620	2720	3,435	285	165	6,1	37,2
	2	2500						
	3	3040						
40	4	1780	1900	3,279	115	65	3,4	11,6
	5	2000						
	6	1930						
50	7	1360	1430	3,155	65	35	2,4	5,8
	8	1480						
	9	1440						
60	10	910	1050	3,021	140	80	7,6	57,8
	11	1130						
	12	1100						
70	13	760	780	2,892	20	10	1,2	1,4
	14	790						
	15	780						
80	16	670	640	2,806	20	45	7,0	49,0
	17	700						
	18	550						

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\sum e^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{162,8}{6}} = \pm 5,2 \%$$

CUADRO N°4
Arena Granítica Betón N° 2 (U 2)

Temp. °C	Nº	Lectura en Kg	E en Kg	log E	±m	±ε	±e %	e ²
30	1	4790	4700	3,672	120	85	1,8	3,2
	2	4620						
40	3	3050	3180	3,502	120	70	2,2	4,8
	4	3280						
	5	3200						
50	6	2010	2030	3,307	40	25	1,2	1,4
	7	2000						
	8	2070						
60	9	1550	1530	3,185	25	15	1,0	1,0
	10	1500						
	11	1530						

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\sum e^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{10,4}{4}} = \pm 1,6 \%$$

CUADRO N° 5

Arena Granítica - Betún N°3 (G 3)

Temp. °C	N°	Lectura en Kg	E en Kg	log E	±m	±ε	±e %	e ²
30	1	2960	3000	3,477	125	75	2,5	7,2
	2	3140						
	3	2900						
40	4	2530	2480	3,394	185	80	3,2	10,2
	5	2530						
	6	2730						
	7	2310						
	8	2290						
50	9	2230	2020	3,305	200	120	5,9	34,8
	10	1820						
	11	2000						
60	12	1560	1710	3,233	150	70	4,1	16,8
	13	1610						
	14	1640						
	15	1860						
	16	1870						
70	17	1670	1560	3,193	120	55	3,5	12,2
	18	1380						
	19	1610						
	20	1640						
	21	1490						
80	22	1350	1300	3,114	95	70	5,3	28,1
	23	1240						

n=6

$\sum e^2 = 109,3$

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{109,3}{6}} = \pm 4,3 \%$$

CUADRO N° 6

Arena Granítica - Betón N° 4 (G 4)

Temp. °C	N°	Lectura	\bar{G} en Kg	log B	$\pm m$	$\pm \varepsilon$	$\pm e \%$	e^2
30	1	3380	3390	3,530	25	15	0,4	0,2
	2	3420						
	3	3380						
40	4	2560	2520	3,401	125	55	2,2	4,8
	5	2380						
	6	2670						
	7	2590						
	8	2420						
50	9	2230	2160	3,334	110	65	3,0	9,0
	10	2030						
	11	2210						
60	12	1750	1700	3,230	140	80	4,7	22,2
	13	1550						
	14	1810						
70	15	1240	1310	3,117	150	75	5,7	32,5
	16	1190						
	17	1290						
	18	1520						
80	19	1090	1200	3,079	105	60	5,0	25,0
	20	1230						
	21	1290						
90	22	1080	1070	3,029	40	25	2,3	5,3
	23	1030						
	24	1110						

$n=7$

$\sum e^2 = 99,0$

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{99}{7}} = \pm 3,7 \%$$

CUADRO N° 7

Arena Cuarzosa - Betún N° 4 (C 4)

Temp. °C	N°	Lectura en Kg	E en Kg	log E	± m	± E	± %	e ²
30	1	2120	2140	3,330	55	30	1,4	2,0
	2	2100						
	3	2200						
40	4	1360	1390	3,143	75	45	3,2	10,2
	5	1470						
	6	1330						
50	7	930	980	2,991	65	40	4,1	16,8
	8	950						
	9	1050						
60	10	690	640	2,806	50	30	4,7	22,2
	11	660						
	12	680						
	13	600						
70	14	590	460	2,663	25	20	4,3	18,5
	15	450						
80	16	480	340	2,531	30	20	5,9	34,8
	17	360						
	18	310						
90	19	350	210	2,322	15	10	4,8	23,0
	20	220						
	21	220						
	22	200						

n=7

$\sum e^2 = 127,5$

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{127,5}{7}} = \pm 4,4 \%$$

Representando gráficamente los valores de la Estabilidad en ordenadas y las temperaturas en abscisas se obtienen, para todas las mezclas ensayadas, curvas como la representada en el gráfico N° 1, correspondiente a la mezcla C 1, que siguen aproximadamente una función exponencial del tipo:

$$y = A e^{kx}$$

siendo e la base de los logaritmos naturales.

En coordenadas semilogarítmicas se obtiene una función lineal entre el logaritmo de la Estabilidad y la temperatura (Gráfico N° 2) como se constata tomando logaritmos en la expresión anterior

Los resultados experimentales obtenidos permiten establecer por lo tanto que en primera aproximación y en el intervalo de temperatura considerado, por lo menos las mezclas asfálticas estudiadas siguen la siguiente ley física :

$$E = A e^{kt} \quad (I)$$

donde E es la Estabilidad, t la temperatura en grados centígrados y A y k dos constantes características de cada mezcla.

El significado de estas constantes es el siguiente .

Haciendo $t = 0$ y llamando E_0 a la estabilidad a $0^\circ C$ resulta :

$$E_0 = A \quad (II)$$

luego A es la estabilidad a $0^\circ C$.

Tomando logaritmos naturales (ln) en la expresión (I) y recordando la (II) queda :

$$\ln E = \ln E_0 + k.t$$

y derivando con respecto a t :

$$k = \frac{d \ln E}{d t}$$

es decir que k es la variación del logaritmo natural de la estabilidad por cada grado de temperatura.

Por razones prácticas conviene considerar logaritmos decimales (log) en lugar de los naturales, en este caso :

$$\log E = \log E_0 + t.k.\log e$$

y llamando

$$\beta = k.\log e$$

resulta

$$\log E = \log E_0 + \beta.t \quad (III)$$

(podríamos haber llegado directamente a esta expresión considerando la base de los logaritmos decimales en lugar del número e y β en lugar de k en la I).

Análogamente

$$\beta = \frac{d \log E}{d t} \quad (IV)$$

o sea la variación del logaritmo decimal de la estabilidad por cada grado centígrado.

La expresión inicial de la ley de variación de la estabilidad con la temperatura se ha transformado así en una función lineal (III).

Resulta de particular interés la constatación de que tanto la variación de la viscosidad absoluta (8) como la de la penetración (9), (10) de ciertos asfaltos (susceptibilidad) con la temperatura, corresponden también a una función exponencial entre determinados límites de temperatura. Análogamente Vokac (11) halló también una función exponencial para la variación de la resistencia a la compresión en función de la temperatura desde $2,7^\circ C$ hasta $56^\circ C$.

La expresión (IV) establece claramente el significado de la constante β , sin embargo podemos relacionarla con otra constante de sentido físico más preciso; en efecto, según la expresión (IV) .

— Grafico N° 1 —

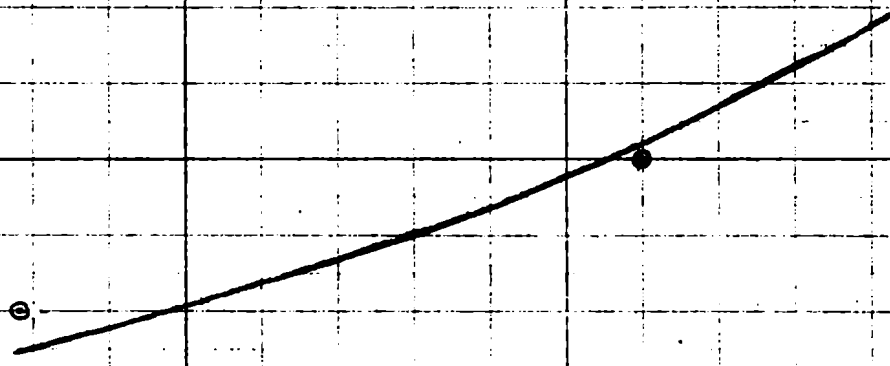
U. en Kg.



2000

1500

1000



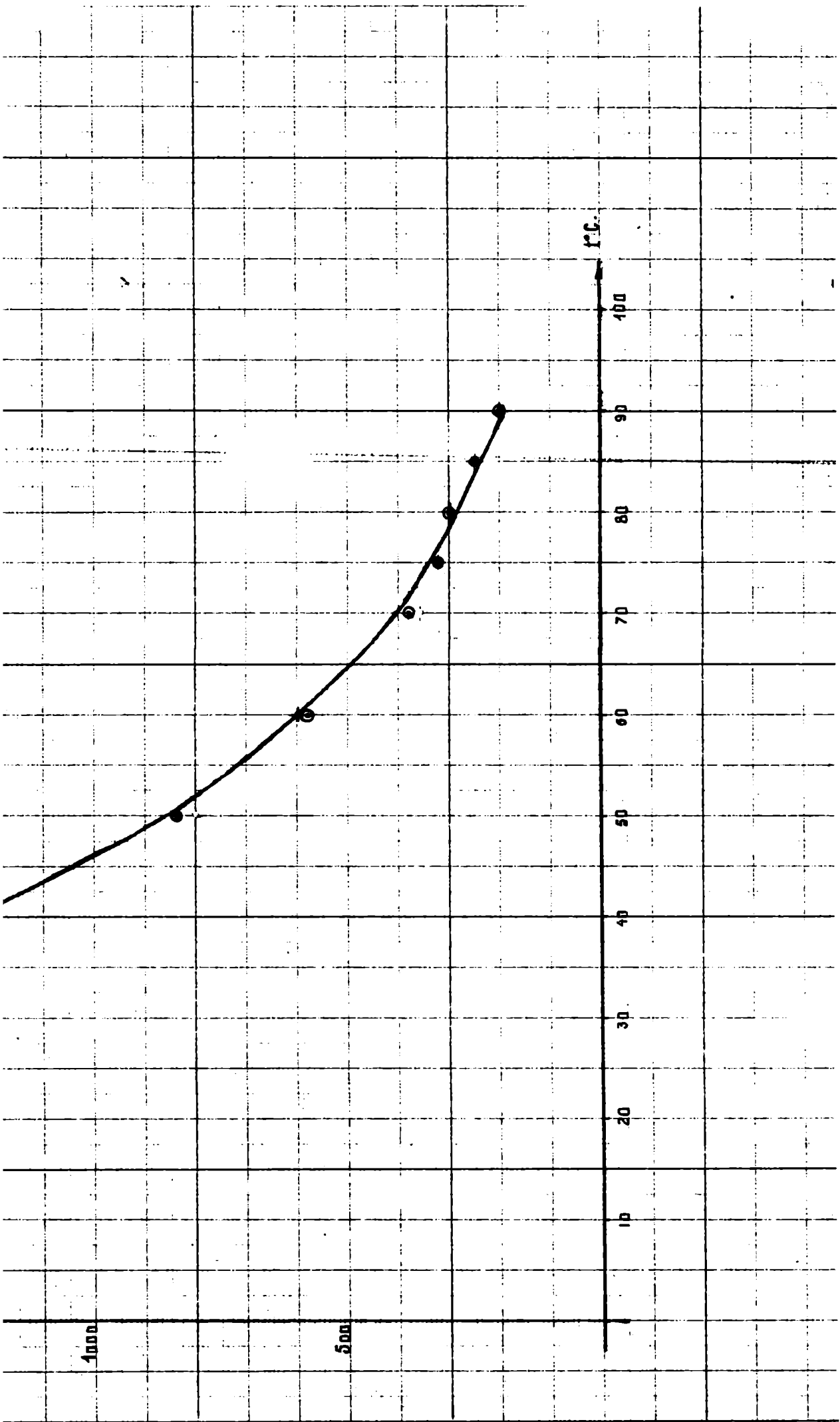
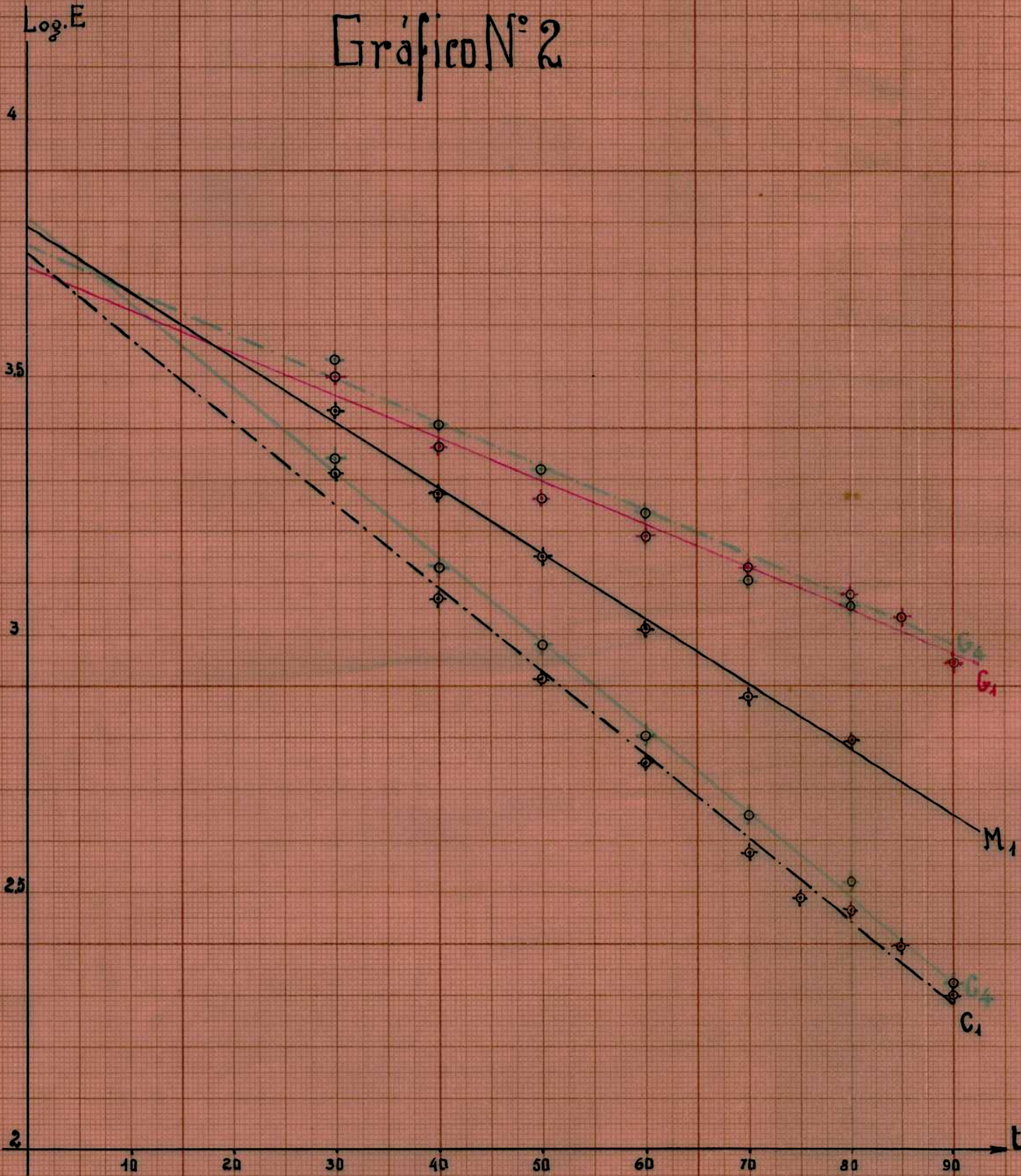


Gráfico N° 2



$$\frac{d \log E}{d t} = \beta \quad \text{dividiendo por } \log E_0 \text{ tenemos:}$$

$$\frac{1}{\log E_0} \cdot \frac{d \log E}{d t} = \frac{\beta}{\log E_0} = \text{constante}$$

el primer miembro de esta expresión tiene la forma de un coeficiente térmico, podemos por lo tanto definir el coeficiente térmico del logaritmo de la estabilidad, que indicaremos con γ , mediante la relación :

$$\gamma = \frac{\beta}{\log E_0} \quad (V)$$

cuyo sentido físico es perfectamente conocido.

Siendo

$$\gamma = \frac{1}{\log E_0} \frac{d \log E}{d t}$$

integrando entre 0 y t (suponiendo a γ independiente de la temperatura como hemos admitido implícitamente en el razonamiento) tendremos :

$$\log E = \log E_0 (1 + \gamma t)$$

que es la fórmula habitual de la variación térmica de una magnitud cualquiera.

El conocimiento del valor de γ de una mezcla para "sheet asphalt" nos da una medida de la variación de la estabilidad en función de la temperatura. Es evidente que una mezcla ideal desde el punto de vista de la estabilidad sería aquella para la cual $\gamma = 0$, y por lo tanto su estabilidad es independiente de la temperatura, ya que no solo interesa que una carpeta posea estabilidad a temperaturas altas (60 °C) sino también que, a temperaturas bajas, no sea excesivamente rígida, por las razones enunciadas al principio.

Asociando al número de estabilidad a 60°C el valor de γ se tiene una imagen mucho más perfecta de la resistencia contra los desplazamientos y fisuras, pudiéndose establecer que, alcanzada la estabilidad óptima dada por la práctica, una mezcla será tanto mejor, desde el punto de vista de su resistencia, cuanto menor sea el valor de γ . Por otra parte para determinar dicho valor solo es necesario conocer la estabilidad a dos temperaturas distintas (aplicando la ecuación fundamental hallada) una de las cuales puede ser 60°C, lo que no implica una mayor complicación en el trabajo experimental.

De acuerdo con la expresión (III) representando gráficamente el $\log E$ en función de la temperatura debe obtenerse una línea recta. Vamos a determinar pues cual es la recta más probable correspondiente al conjunto de puntos que representan los valores experimentales obtenidos para cada mezcla, esta recta indica el comportamiento teórico de la mezcla y por lo tanto la diferencia de ordenadas entre un punto cualquiera de la misma y el logaritmo de la estabilidad real a la misma temperatura da una medida de la aproximación con que se verifica experimentalmente la expresión límite:

$$E = E_0 e^{kt}$$

Por otra parte la obtención de la recta más probable no es sino la determinación de los valores $\log E_0$ y β de cada mezcla, y en consecuencia de γ , que era el fin perseguido.

Para hallar la recta más probable se aplicó el método de los cuadrados mínimos (7), (12).

Según la teoría de Gauss, la probabilidad de obtener en una serie de n valores el conjunto de errores z_1, z_2, \dots, z_n será máxima cuando sea mínima la suma :

$$z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2 \quad (VI)$$

luego los valores más probables correspondientes a las n determinaciones realizadas son los que hacen mínima la expresión VI.

sea :
$$y = a + bx \quad \text{(VII)}$$

la ecuación de la recta buscada lo que significa que la expresión VII debe darnos para cada valor de x el valor más probable de y . Por lo tanto, si llamamos y'_i los valores más probables e y_i las determinaciones experimentales, correspondientes al mismo valor de x , debe verificarse que :

$$S = \sum_1^n (y'_i - y_i)^2 = \text{mínimo}$$

o sea
$$S = \sum_1^n (a + bx_i - y_i)^2 = \text{mínimo} \quad \text{(VIII)}$$

siendo conocidos los valores x_i e y_i el problema se reduce a encontrar los valores de a y b que satisfacen la expresión VIII.

Las condiciones del mínimo de S son :

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_1^n (a + bx_i - y_i) = 0$$

de donde
$$n \cdot a + b \sum_1^n x_i = \sum_1^n y_i \quad \text{(IX)}$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_1^n x_i (a + bx_i - y_i) = 0$$

luego
$$a \sum_1^n x_i + b \sum_1^n x_i^2 = \sum_1^n x_i y_i \quad \text{(X)}$$

Las expresiones IX y X constituyen un sistema determinado de dos ecuaciones con dos incógnitas, resolviéndolo se tienen los valores de a y b que satisfacen la VIII con lo que queda resuelto el problema.

En nuestro caso es :

$$\begin{aligned} x_i &= t \\ y_i &= \log E \\ a &= \log E_0 = \alpha \\ b &= \beta \end{aligned}$$

Reemplazando en IX y X tenemos :

$$n \cdot \alpha + \beta \cdot \sum_1^n t = \sum_1^n \log E$$

$$\alpha \cdot \sum_1^n t + \beta \cdot \sum_1^n t^2 = \sum_1^n t \cdot \log E$$

Se trata pues de resolver este sistema para cada conjunto de valores correspondientes a las distintas mezclas ensayadas.

Arena Granítica - Betón N°1 (G1)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,494	104,82
2	40	1600	3,376	135,04
3	50	2500	3,276	163,80
4	60	3600	3,201	192,06
5	70	4900	3,140	219,80
6	80	6400	3,090	247,20
7	85	7225	3,037	258,14
8	90	8100	2,940	264,60

$$n = 8 \quad \sum t = 505 \quad \sum t^2 = 35225 \quad \sum \log E = 25,554 \quad \sum t \cdot \log E = 1585,46$$

$$8 \alpha + 505 \beta = 25,554$$

$$505 \alpha + 35225 \beta = 1585,46$$

$$\alpha = 3,715$$

$$\beta = -0,0082$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = -0,0022$$

Comparando ahora con los resultados experimentales se puede determinar el error medio del valor más probable de α y β para llegar finalmente al error del coeficiente térmico γ , así como la diferencia media entre la estabilidad real y el comportamiento teórico dado por la expresión :

$$E = E_0 \cdot e^{kt}$$

es decir el error relativo medio de la estabilidad experimental con respecto al valor teórico.

La determinación del valor de β para cada punto (ecuación III) se efectuó sobre la base del valor más probable de α hallado por el método de los cuadrados mínimos y reciprocamente el error de α para cada temperatura se calculó utilizando el valor más probable de β .

En el cuadro que sigue a continuación se indica primeramente el log E hallado experimentalmente y el calculado con la expresión (III) con los valores de α y β más probables. A continuación el valor de la estabilidad hallada (E_h) y calculada (E_c) teóricamente (antilogaritmo del log E calculado en la columna anterior). El error absoluto de la estabilidad experimental con respecto a la estabilidad teórica: $\Delta = E_h - E_c$.

Luego el error relativo de la estabilidad experimental:

$$e \% = \frac{\Delta}{E_h} 100$$

El valor de β hallado (β_h) como se indicó más arriba y finalmente la diferencia entre el valor α_h de α hallado para cada punto y el valor más probable, esta diferencia está dada por la expresión :

$$\alpha_h - \alpha = \log E_h - \log E_0$$

ARENA GRANITICA - BETUN N° 1 (Cl.)

n	t	log E hallado	log E calculado	E hallada	E calculada	Δ	%	σ^2	β hallada	$\beta_h - \beta$	$(\beta_h - \beta)^2 \times 10^{-8}$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$
1	30	3,494	3,469	3120	2945	+ 175	+5,6	31,4	-0,0074	+0,0008	64 x 10 ⁻⁸	+0,025	7,2 x 10 ⁻⁴
2	40	3,376	3,387	2380	2440	- 60	-2,5	6,2	-0,0085	-0,0003	9 "	-0,011	1,2 "
3	50	3,276	3,305	1890	2020	- 130	-6,4	40,9	-0,0088	-0,0006	36 "	-0,029	8,4 "
4	60	3,201	3,223	1590	1670	- 80	-4,8	23,0	-0,0086	-0,0004	16 "	-0,022	4,8 "
5	70	3,140	3,141	1380	1385	- 5	-0,4	0,2	-0,0082	0	0	0	0
6	80	3,090	3,059	1230	1145	+ 85	+6,9	47,6	-0,0078	+0,0004	16 "	+0,031	9,6 "
7	85	3,037	3,018	1090	1045	+ 45	+4,1	16,8	-0,0080	+0,0002	4 "	+0,019	3,5 "
8	90	2,940	2,977	870	950	- 80	-9,2	84,6	-0,0086	-0,0004	16 "	-0,037	13,7 "
										$\sum (\beta_h - \beta)^2 = 161 \times 10^{-8}$	$\sum (\alpha_h - \alpha)^2 = 48,4 \times 10^{-4}$		
										$\sum \sigma^2 = 250,7$			

n=8

El alejamiento relativo medio de la estabilidad real con respecto al comportamiento teórico es :

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{250,7}{8}} \quad \mu_E = \pm 5,6 \%$$

El error medio del valor más probable de β es : $\epsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{161 \times 10^{-8}}{56}} = \pm 0,0002$
 y el error relativo : $e_\beta = \pm \frac{0,0002}{0,008} = \pm 0,025$

El error medio del valor más probable de α es: $\epsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{48,4 \times 10^{-4}}{56}} = \pm 0,009$
 y el error relativo ; $e_\alpha = \pm \frac{0,009}{3} = \pm 0,003$

Considerando la suma de los errores relativos como el error relativo del cociente, el error relativo de γ será :

$$e_\gamma = \pm (0,025 + 0,003) = \pm 0,03$$

por lo tanto el error absoluto es

$$\epsilon_\gamma = \pm (0,03 \times 0,003) = \pm 0,0001$$

$$\gamma = -0,0022 \pm 0,0001$$

+ +
 +

Arena Cuarzosa - Betún N° 1 (Cl)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,305	99,15
2	40	1600	3,079	123,16
3	50	2500	2,924	146,20
4	60	3600	2,763	165,78
5	70	4900	2,580	180,60
6	75	5625	2,505	187,87
7	80	6400	2,477	198,16
8	85	7225	2,398	203,83
9	90	8100	2,301	207,09

$$n=9 \quad \sum t = 580 \quad \sum t^2 = 40850 \quad \sum \log E = 24,332 \quad \sum t \cdot \log E = 1511,84$$

$$9 \alpha + 580 \beta = 24,332$$

$$580 \alpha + 40850 \beta = 1511,84$$

$$\alpha = 3,747$$

$$\beta = -0,0162$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = -0,0043$$

Comparando con los resultados experimentales se obtiene el cuadro que sigue a continuación :

ARENA CUARZOSA - BETUN N° 1 (C1)

n	t	log E hallado	log E calculado	E hallado	E calculada	Δ	%	σ^2	$\beta_{hallada}$	$\beta_h - \beta$	$(\beta_h - \beta)^2$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$
1	30	3,305	3,261	2020	1820	+ 200	+9,9	98,0	-0,0147	+0,0015	22,5x10 ⁻⁸	+0,044	19,4x10 ⁻⁴
2	40	3,079	3,099	1200	1255	- 55	-4,6	21,2	-0,0167	-0,0005	25 "	-0,020	4,0 "
3	50	2,924	2,937	840	865	- 25	-3,0	9,0	-0,0165	-0,0003	9 "	-0,013	1,7 "
4	60	2,763	2,775	580	595	- 15	-2,6	6,8	-0,0164	-0,0002	4 "	-0,012	1,4 "
5	70	2,580	2,613	380	410	- 30	-7,9	62,4	-0,0167	-0,0005	25 "	-0,033	10,9 "
6	75	2,505	2,532	320	340	- 20	-6,2	38,4	-0,0166	-0,0004	16 "	-0,027	7,4 "
7	80	2,477	2,451	300	280	+ 20	+6,6	43,6	-0,0159	+0,0003	9 "	+0,026	6,8 "
8	85	2,398	2,370	250	235	+ 15	+6,0	36,0	-0,0159	+0,0003	9 "	+0,028	8,0 "
9	9C	2,301	2,289	200	195	+ 5	+2,5	6,2	-0,0161	+0,0001	1 "	+0,012	1,4 "

$\sum \sigma^2 = 321,6$ $\sum (\beta_h - \beta)^2 = 323 \times 10^{-8}$ $(\alpha_h - \alpha)^2 = 61,0 \times 10^{-4}$

n = 9

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{321,6}{9}} = \pm 6 \quad \mu_E = \pm 6 \%$$

$$\varepsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{323 \times 10^{-8}}{72}} = \pm 0,0002$$

$$e_\beta = \pm \frac{0,0002}{0,016} = \pm 0,012$$

$$\varepsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{61 \times 10^{-4}}{72}} = \pm 0,009$$

$$e_\alpha = \pm \frac{0,009}{3} = \pm 0,003$$

$$e_\gamma = \pm (0,012 + 0,003) = \pm 0,02$$

$$\varepsilon_\gamma = \pm (0,02 \times 0,005) = \pm 0,0001$$

$$\gamma = - 0,0043 \pm 0,0001$$

Arena Granítica y Cuarzosa - Betún N° 1 (Ml)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,435	103,05
2	40	1600	3,279	131,16
3	50	2500	3,155	157,75
4	60	3600	3,021	181,26
5	70	4900	2,892	202,44
6	80	6400	2,806	224,48
n=6	$\sum t = 330$	$\sum t^2 = 19900$	$\sum \log E = 18,588$	$\sum t \cdot \log E = 1000,14$

$$6 \alpha + 330 \beta = 18,588$$

$$330 \alpha + 19900 \beta = 1000,14$$

$$\alpha = 3,796$$

$$\beta = - 0,0127$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = - 0,0033$$

Comparando con los resultados experimentales :

ARENA CUARZOSA Y GRANITICA - BETUN N° 1 (M 1)

n	t	log B hallada	calculada	hallada	calculada	Δ	%	e^2	β hallada	β	h^{-3}	$(\beta_h - \beta)^2$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$
1	30	3,435	3,415	2720	2600	+ 120	+4,4	19,4	-0,0120		+0,0007	49x10 ⁻⁸	+0,020	4,0x10 ⁻⁴
2	40	3,279	3,288	1900	1940	- 40	-2,1	4,4	-0,0129		-0,0002	4 "	-0,009	0,8 "
3	50	3,155	3,161	1430	1450	- 20	-1,4	2,0	-0,0128		-0,0001	1 "	-0,006	0,4 "
4	60	3,021	3,034	1050	1080	- 30	-2,9	8,4	-0,0129		-0,0002	4 "	-0,013	1,7 "
5	70	2,892	2,907	780	795	- 15	-1,9	3,6	-0,0129		-0,0002	4 "	-0,015	2,3 "
6	80	2,806	2,780	640	600	+ 40	+6,2	38,4	-0,0124		+0,0003	9 "	+0,026	6,8 "
										$\sum e^2 = 76,2$	$\sum (\beta_h - \beta)^2 = 71x10^{-8}$	$\sum (\alpha_h - \alpha)^2 = 16,0x10^{-4}$		

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{76,2}{6}} \quad \mu_E = \pm 3,6 \%$$

$$\varepsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{71 \times 10^{-8}}{30}} = \pm 0,0002$$

$$e_\beta = \pm \frac{0,0002}{0,012} = \pm 0,02$$

$$\varepsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{16 \times 10^{-4}}{30}} = \pm 0,007$$

$$e_\alpha = \pm \frac{0,007}{3} = \pm 0,0025$$

$$e_\gamma = \pm (0,02 + 0,0025) = \pm 0,023$$

$$\varepsilon_\gamma = \pm (0,023 \times 0,004) = \pm 0,0001$$

$$\gamma = - 0,0033 \pm 0,0001$$

Arena Granítica - Betón N° 2 (G2)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,672	110,16
2	40	1600	3,502	140,08
3	50	2500	3,307	165,35
4	60	3600	3,185	191,10
n=4	∑t=180	∑t ² =8600	∑log E =13,666	∑t.logE=606,69

$$\begin{aligned} 4 \alpha + 180 \beta &= 13,666 \\ 180 \alpha + 8600 \beta &= 606,69 \end{aligned}$$

$$\alpha = 4,162$$

$$\beta = - 0,0166$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = - 0,0040$$

Comparando con los resultados experimentales :

ARENA GRANITICA - BETUN N° 2 (G2)

n	t	log E hallado	E calculado	hallada	E calculada	Δ	%	e^2	$\beta_h - \beta$	$(\beta_h - \beta)^2$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$
1	30	3,672	3,664	4700	4615	+ 85	+1,8	3,2	+0,0003	9×10^{-8}	+0,008	$0,6 \times 10^{-4}$
2	40	3,502	3,498	3180	3150	+ 30	+0,9	0,8	+0,0001	1x "	+0,004	0,2 "
3	50	3,307	3,332	2030	2150	-120	-5,9	34,8	-0,0009	81 "	-0,025	7,2 "
4	60	3,185	3,166	1530	1465	+ 65	+4,2	17,6	+0,0003	9 "	+0,019	3,5 "
n=4								$\sum e^2 = 56,4$	$\sum (\beta_h - \beta)^2 = 100 \times 10^{-8}$		$\sum (\alpha_h - \alpha)^2 = 11,5 \times 10^{-4}$	

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{56,4}{4}} \quad \mu_E = \pm 3,7 \%$$

$$\varepsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{100 \times 10^{-8}}{12}} = \pm 0,0003$$

$$e_\beta = \pm \frac{0,0003}{0,016} = \pm 0,02$$

$$\varepsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{11,5 \times 10^{-4}}{12}} = \pm 0,01$$

$$e_\alpha = \pm \frac{0,01}{4} = \pm 0,0025$$

$$e_\gamma = \pm (0,02 + 0,0025) = \pm 0,023$$

$$\varepsilon_\gamma = \pm (0,023 \times 0,004) = \pm 0,0001$$

$$\gamma = -0,0040 \pm 0,0001$$

Arena Granfítica - Betún N° 3 (G3)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,477	104,31
2	40	1600	3,394	135,76
3	50	2500	3,305	165,25
4	60	3600	3,233	193,98
5	70	4900	3,193	223,51
6	80	6400	3,114	249,12
n=6	$\sum t = 330$	$\sum t^2 = 19900$	$\sum \log E = 19,716$	$\sum t, \log E = 1071,93$

$$6 \alpha + 330 \beta = 19,716$$

$$330 \alpha + 19900 \beta = 1071,93$$

$$\alpha = 3,677$$

$$\beta = -0,0071$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = -0,0019$$

Comparando con los resultados experimentales :

ARENA GRANITICA - BETUN N° 3 (G3)

n	t	log E hallada	E calculada	E hallada	E calculado	Δ	%	σ^2	β hallada	$\beta_h - \beta$	$(\beta_h - \beta)^2$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$		
1	30	3,477	3,464	3000	2910	+ 90	+3,0	9,0	-0,0067	+0,0004	16 x10 ⁻⁸	+0,013	1,7 x10 ⁻⁴		
2	40	3,394	3,393	2480	2470	+ 10	+0,4	1,6	-0,0071	0	0	+0,001	0		
3	50	3,305	3,322	2020	2100	- 80	-4,0	16,0	-0,0074	-0,0003	9 x10 ⁻⁸	-0,017	2,9 x10 ⁻⁴		
4	60	3,233	3,251	1710	1780	- 70	-4,1	16,8	-0,0074	-0,0003	9 "	-0,018	3,2 "		
5	70	3,193	3,180	1560	1515	+ 45	+2,9	8,4	-0,0069	+0,0002	4 "	+0,013	1,7 "		
6	80	3,114	3,109	1300	1285	+ 15	+1,1	1,2	-0,0070	+0,0001	1 "	+0,005	0,3 "		
								$\sum \sigma^2 = 53,0$						$\sum (\beta_h - \beta)^2 = 39,0 \times 10^{-8}$	$\sum (\alpha_h - \alpha)^2 = 9,8 \times 10^{-4}$

n=6

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{53}{6}} = \pm 3 \quad \mu_E = \pm 3 \%$$

$$\epsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{39 \times 10^{-8}}{30}} = \pm 0,0001$$

$$e_\beta = \pm \frac{0,0001}{0,007} = \pm 0,015$$

$$\epsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{9,8 \times 10^{-4}}{30}} = \pm 0,006$$

$$e_\alpha = \pm \frac{0,006}{3} = \pm 0,002$$

$$e_\gamma = \pm (0,015 + 0,002) = \pm 0,02$$

$$\epsilon_\gamma = \pm (0,02 \times 0,002) = \pm 0,00005$$

$$\gamma = - 0,0019 \pm 0,00005$$

Arena Granítica - Betún N° 4 (G4)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,530	105,90
2	40	1600	3,401	136,04
3	50	2500	3,334	166,70
4	60	3600	3,230	193,80
5	70	4900	3,117	218,19
6	80	6400	3,079	246,32
7	90	8100	3,029	272,61

$$n=7 \quad \sum t = 420 \quad \sum t^2 = 28000 \quad \sum \log E = 22,720 \quad \sum t \cdot \log E = 1339,56$$

$$7 \alpha + 420 \beta = 22,720$$

$$420 \alpha + 28000 \beta = 1339,56$$

$$\alpha = 3,752$$

$$\beta = - 0,0085$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = - 0,0023$$

Comparando con los resultados experimentales :

ARENA GRANITICA - BETUN N°4 (G4)

n	t	log E	hallado	calculado	E	calculada	Δ	o%	o ²	β hallada	$\beta_h - \beta$	$(\beta_h - \beta)^2$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$	
1	30	3,530	3,497	3140	3390	3140	+250	+7,4	54,8	-0,0074	+0,0011	121x10 ⁻⁸	+0,033	10,9x10 ⁻⁴	
2	40	3,401	3,412	2580	2520	2580	- 60	-2,4	5,8	-0,0080	-0,0003	9 "	-0,011	1,2 "	
3	50	3,334	3,327	2125	2160	2125	- 35	-1,6	2,6	-0,0084	+0,0001	1 "	+0,007	0,5 "	
4	60	3,230	3,242	1745	1700	1745	- 45	-2,5	6,2	-0,0087	-0,0002	4 "	-0,012	1,4 "	
5	70	3,117	3,157	1435	1310	1435	-125	-9,5	90,2	-0,0091	-0,0006	36 "	-0,040	16,0 "	
6	80	3,079	3,072	1180	1200	1180	+ 20	+1,6	2,6	-0,0084	+0,0001	1 "	+0,007	0,5 "	
7	90	3,029	2,987	970	1070	970	+100	+9,3	86,5	-0,0080	+0,0005	25 "	+0,042	17,7 "	
										$\sum o^2 = 248,7$		$\sum (\beta_h - \beta)^2 = 197x10^{-8}$		$\sum (\alpha_h - \alpha)^2 = 48,2x10^{-4}$	

n=7

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{248,7}{7}} = \pm 6 \quad \mu_E = \pm 6 \%$$

$$\varepsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{197 \times 10^{-8}}{42}} = \pm 0,0002$$

$$e_\beta = \pm \frac{0,0002}{0,908} = \pm 0,025$$

$$\varepsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{48,2 \times 10^{-4}}{42}} = \pm 0,01$$

$$e_\alpha = \pm \frac{0,01}{3} = \pm 0,003$$

$$e_\gamma = \pm (0,025 + 0,003) = \pm 0,03$$

$$\varepsilon_\gamma = \pm (0,03 \times 0,003) = \pm 0,0001$$

$$\gamma = - 0,0023 \pm 0,0001$$

Arena Cuarzosa - Betún N° 4 (G4)

n	t	t ²	log E	t.log E
1	30	900	3,330	99,90
2	40	1600	3,143	125,72
3	50	2500	2,991	149,55
4	60	3600	2,806	168,36
5	70	4900	2,663	186,41
6	80	6400	2,531	202,48
7	90	8100	2,322	208,98

$$n=7 \quad \sum t = 420 \quad \sum t^2 = 28000 \quad \sum \log E = 19,786 \quad \sum t \cdot \log E = 1141,40$$

$$7 \alpha + 420 \beta = 19,786$$

$$420 \alpha + 28000 \beta = 1141,40$$

$$\alpha = 3,807$$

$$\beta = - 0,0163$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha} = - 0,0043$$

Comparando con los resultados experimentales :

ARENA CUARZOSA - BETUN N° 4 (C4)

n	t	hallado	log E	calculado	hallada	E	calculada	Δ	%	σ^2	β hallada	$\beta_h - \beta$	$(\beta_h - \beta)^2$	$\alpha_h - \alpha$	$(\alpha_h - \alpha)^2$
1	30	3,330	3,318	2140	2080	+ 60	+ 2,8	7,8	+ 0,0004	16×10^{-8}	+ 0,012	$1,4 \times 10^{-4}$			
2	40	3,143	3,155	1390	1430	- 40	- 2,8	7,8	- 0,0003	9 "	- 0,012	1,4 "			
3	50	2,991	2,992	980	980	0	0	0	0	0	- 0,001	0			
4	60	2,806	2,829	640	675	- 35	- 5,4	29,2	- 0,0004	16×10^{-8}	- 0,023	$5,3 \times 10^{-4}$			
5	70	2,663	2,666	460	465	- 5	- 1,1	1,2	0	0	- 0,003	0,1 "			
6	80	2,531	2,503	340	320	+ 20	+ 5,8	33,6	+ 0,0003	9×10^{-8}	+ 0,028	8,0 "			
7	90	2,322	2,340	210	220	- 10	- 4,7	22,1	- 0,0002	4 "	- 0,018	3,2 "			
										$\sum \sigma^2 = 101,7$	$\sum (\beta_h - \beta)^2 = 54 \times 10^{-8}$	$\sum (\alpha_h - \alpha)^2 = 19,4 \times 10^{-4}$			

n=7

$$\mu_E = \pm \sqrt{\frac{101,7}{7}} = \pm 3,8 \quad \mu_E = \pm 3,8 \%$$

$$\varepsilon_\beta = \pm \sqrt{\frac{54 \times 10^{-8}}{42}} = \pm 0,0001$$

$$e_\beta = \pm \frac{0,0001}{0,016} = \pm 0,006$$

$$\varepsilon_\alpha = \pm \sqrt{\frac{19,4 \times 10^{-4}}{42}} = \pm 0,007$$

$$e_\alpha = \pm \frac{0,007}{3} = \pm 0,0025$$

$$e_\gamma = \pm (0,006 + 0,0025) = \pm 0,01$$

$$\varepsilon_\gamma = \pm (0,01 \times 0,005) = \pm 0,00005$$

$$\gamma = - 0,0043 \pm 0,00005$$

Resumiendo los resultados obtenidos en el Cuadro N° 8 se observa que es perfectamente lícito adoptar la ecuación :

$$\log E = \log E_0 (1 + \gamma \cdot t)$$

como expresión general de la ley que rige la variación de la estabilidad con la temperatura, por lo menos para las mezclas aquí estudiadas.

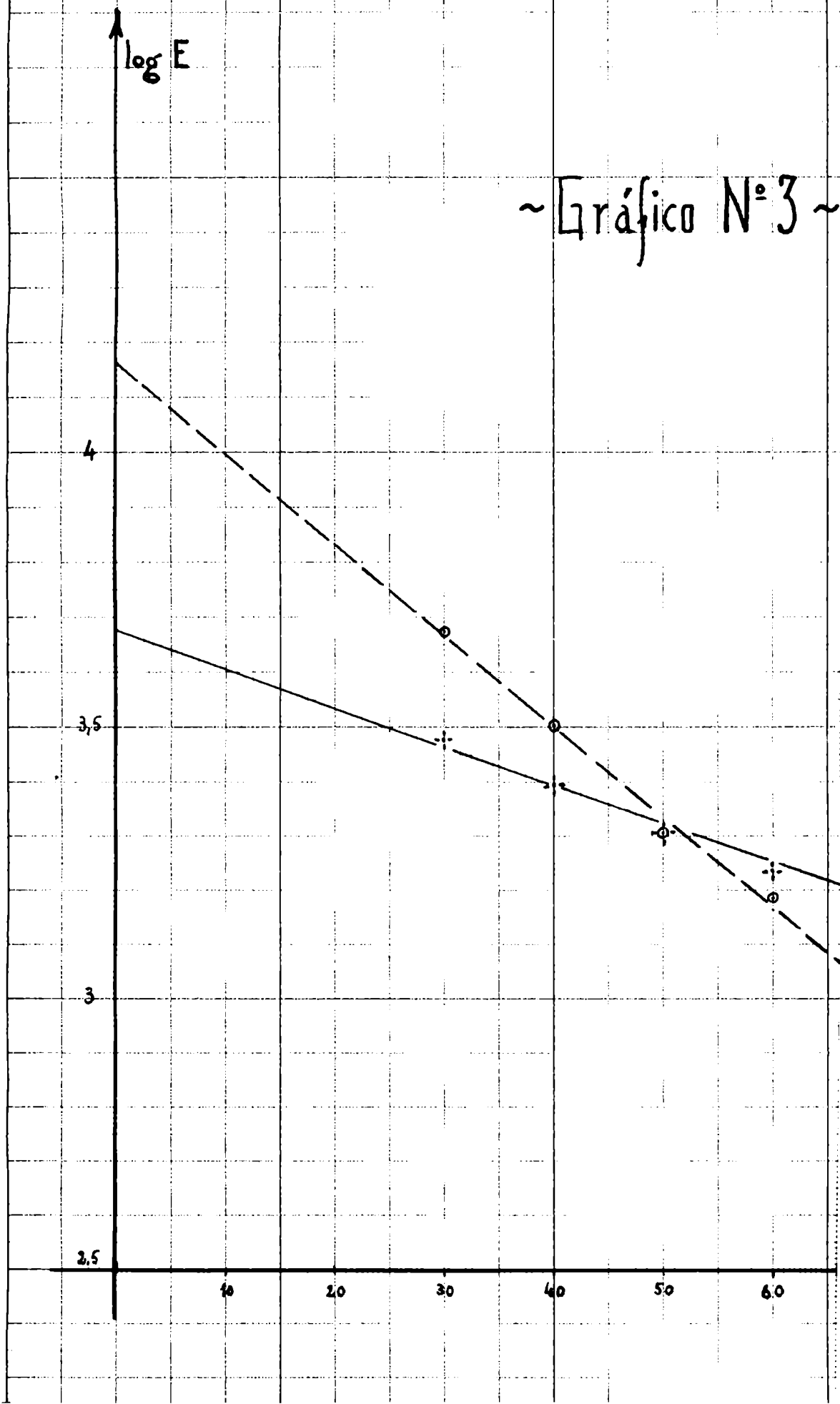
CUADRO N° 8

Mez- cla	arena empleada	α	Estabili- dad a 0°C	Estab.a 60°C	γ	Error relativo medio	
						experimental	con respecto a la recta
G1	Granítica	3,715	5190	1590	-0,0022	$\pm 1,7 \%$	$\pm 5,6 \%$
G3	"	3,677	4750	1710	-0,0019	$\pm 4,3 \%$	$\pm 3,0 \%$
G4	"	3,752	5650	1700	-0,0023	$\pm 3,7 \%$	$\pm 6,0 \%$
C1	Cuarzosa	3,747	5590	580	-0,0043	$\pm 3,3 \%$	$\pm 6,0 \%$
C4	"	3,807	6410	640	-0,0043	$\pm 4,4 \%$	$\pm 3,8 \%$
M1	Mezcla	3,796	6250	1050	-0,0033	$\pm 5,2 \%$	$\pm 3,6 \%$
G2	Granítica	4,162	14520	1530	-0,0040	$\pm 1,6 \%$	$\pm 3,7 \%$

Como se ve el error que se comete considerando que la estabilidad sigue la ley propuesta es poco mayor que el error experimental y en algunos casos está comprendido dentro de él.

La influencia de la naturaleza de la arena (forma y angulosidad de los granos) sobre el coeficiente térmico es muy marcada, como puede observarse en el cuadro anterior las mezclas con arena granítica presentan un coeficiente térmico aproximadamente 50 % menor que las preparadas con arena cuarzosa. Esta menor susceptibilidad de las mezclas con arena granítica hace que a bajas temperaturas posean valores de estabilidad más comparables con los obtenidos para mezclas de arena cuarzosa, en cambio a 60°C las diferencias son muy elevadas; por lo tanto, la estabilidad arbitrariamente determinada a 60°C no puede dar una medida comparativa entre distintas mezclas que en el servicio práctico trabajan en intervalos de temperatura distintos; por ejemplo, en zonas de temperatura alta la mezcla G1 es muy superior a la C1, en cambio para lugares fríos esta diferencia se atenúa.

~ Gráfico N° 3 ~



Bibliografía.-

- 1).- R.M. Traxler - "Ind.Eng.Chem." - 8,185,(1936).
- 2).- A.F.Grisi - "Camino" - N°5 (1934)-N°6 (1936).
- 3).- P.Hubbard - "Asphalt Pav.Mixtures"-The Asph. Institute-
Application of Test Results to... pág.15-17.
- 4).- C.L.Ruiz - "Camino" - Año VII,N°37, (1940).
- 5).- P.Hubbard-F.C.Field - "The Asph. Assoc." Circ. 34 (1925).
- 6).- P.Hubbard -F.C.Field - "Asphalt Pav. Mixtures"-The Asph.
Inst.- Stability and Related Test
for... pág. 6-10.
- 6).- P.Hubbard - "Asphalt Pav. Mixtures"-The Asph. Institute-
The Principles of Design for...(1930) pág. 3.
- 7).- E.Galloni-C.Garcia - "Chemia" - Tomo XI,N°80-81,(1940).
- 8).- Traxler-Schweyer-Coombs - "Proc. A.S.T.M."- 36,531,(1936).
- 9).- Pfeiffer-Van Doormaal - "J. Inst. Pet. Tech."-22,414(1936).
- 10).- Bencowitz - "Ind.Eng.Chem."An.Ed. - 8,157, (1936).
- 11).- Vokac - "Proc. A.S.T.M." - 36,552, (1936).
- 12).- T.Isnardi - "Revista del D.E.I."- N° 325,142, (1929).
- 13).- Holmes-Collins-Child - "Ind.Eng.Chem." An.Ed. 8,100,(1936).
- 14).- Pavimentación Moderna - Anglo-Mexican Petroleum Co.Ltd.

+-----+

Laboratorio de Ensayo de Materiales de
la Municipalidad de Buenos Aires.-

-1941-