



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos
Canales y Puertos**



TESIS DOCTORAL



**DESARROLLO Y ANÁLISIS DE PAVIMENTOS
INDUSTRIALES DESDE EL PUNTO DE VISTA
DEL ACABADO SUPERFICIAL**



Autor

ÁLVARO GARCÍA HERNÁNDEZ

Directores

DANIEL CASTRO FRESNO

JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

Santander, Noviembre 2007

4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL FRAGUADO DEL HORMIGÓN

Un mejor conocimiento de fraguado del hormigón podría ayudar a los constructores en la planificación de los tiempos de texturizar y acabar un pavimento. Con este propósito en mente, en este Capítulo se presenta el desarrollo de un método basado en la función de madurez de Freiesleben-Hansen y Pedersen para evaluar la influencia de la temperatura en los tiempos de fraguado. Con el fin de determinar que la energía de activación encontrada era correcta, fue aplicada a la resistencia a penetración del hormigón hecha a diferentes temperaturas, con varias relaciones agua/cemento y tres tipos diferentes de cemento. De estos experimentos se encontraron relaciones lineales entre los puntos, encontrando que estas líneas son paralelas para los tres tipos de cementos estudiados. En el Capítulo se concluye que este método puede ser usado para evaluar la influencia de la temperatura en el hormigón sin aditivos.

El hormigón puede ser considerado como un sistema de tres fases, agua, partículas sólidas y aire [12, 200]. Justo después de mezclar el agua con el cemento, las partículas sólidas se encuentran desconectadas o conectadas por fuerzas de Van der Waals, con lo que el hormigón se comporta como un líquido viscoplastico cuya resistencia última depende de la fracción de volumen de sólidos. En este momento, las partículas pueden ser consideradas como completamente aisladas; con lo que en una escala de 0 a 1, la conectividad (percolación) de los poros del hormigón será 1. Es decir, los capilares se encuentran completamente conectados [29]. Conforme la hidratación tiene lugar, las partículas de cemento construyen puentes entre ellas (percolan), incrementando gradualmente la fracción volumétrica de sólidos e interrumpiendo la porosidad capilar, que se encuentra rellena de agua. Como indica Bentz [28], estos puentes generados por los productos de hidratación son mucho más fuertes que las fuerzas interparticulares de Van der Waals, que hacen que floculen existiendo un momento en el que la resistencia de la masa crece más rápidamente que la fracción volumétrica de sólidos, formando de esta manera el esqueleto sólido del hormigón. El fraguado inicial indica el momento en el que la masa ha adquirido tanta rigidez que no puede ser vibrado sin dañar su estructura interna. Por lo tanto, el conocimiento del comportamiento de fraguado del hormigón es esencial, por ejemplo, para planear los tiempos de acabado de un pavimento.

Como se ha descrito en el Apartado 2.6: el grado de hidratación (α) es una medida del progreso de la reacción entre el agua y el cemento [43]. Es un parámetro objetivo que permite la caracterización del grado de madurez del hormigón. Cuando el valor de α es 0, el proceso de hidratación todavía no ha comenzado; mientras que el valor 1 indica que el proceso de hidratación está terminado. Desde un punto de vista teórico, no es posible

describir el proceso de hidratación completo del hormigón en términos de un único grado de hidratación, considerando las numerosas reacciones que ocurren simultáneamente. Desde un punto de vista práctico, establecer un grado de hidratación global para todas las reacciones [44] será suficiente para conocer la influencia de la temperatura en el tiempo de fraguado del hormigón.

Es bien conocido que la temperatura es uno de los parámetros que más influencia tienen en el desarrollo de resistencias del hormigón: un incremento de la temperatura hará que la mezcla madure más rápidamente que cuando ésta permanece constante. Esto se debe a una aceleración de la reacción de hidratación, que es térmicamente activada. Además, la temperatura puede provocar efectos adversos en el hormigón [59]:

- Una temperatura del hormigón demasiado elevada al inicio de la hidratación puede conducir a una pérdida permanente de resistencia.
- Grandes variaciones de temperatura pueden generar la fisuración del hormigón.
- Las heladas antes de que el hormigón haya alcanzado suficientes resistencias pueden causar pérdidas de resistencia permanentes.

Para prevenir estos daños y asegurar un funcionamiento adecuado del hormigón será necesario un conocimiento previo de los efectos de la temperatura en el fraguado de la masa.

A partir de los datos de un calorímetro adiabático, puede cuantificarse la evolución del calor desprendido conforme la hidratación de la mezcla progresa [193]. Se ha demostrado y está completamente aceptado que el porcentaje de calor desarrollado, comparado con el calor total disponible en el sistema, es un método práctico para cuantificar el grado de hidratación.

El desarrollo de calor en el hormigón varía con su madurez. Ésta se expresa habitualmente con respecto a alguna condición de referencia: una madurez de 72 horas indica que el hormigón ha alcanzado un grado de hidratación equivalente a estar sometido a un curado durante 72 horas a una temperatura constante de 20°C [59].

El concepto de madurez hace posible una estimación simple de los efectos de la temperatura en la velocidad de hidratación del cemento. El parámetro que regula esta influencia se denomina “energía de activación”. Una vez calculado dicho parámetro se puede establecer una relación entre la madurez y una propiedad del hormigón como la ganancia de resistencias [47] o su resistencia a la penetración [141], con lo que los cambios en el tiempo de fraguado del hormigón podrán ser previstos. Por ejemplo, en el caso de un pavimento, se puede delimitar el tiempo de inicio de fratasado en función de la temperatura del hormigón, marcando el tiempo adecuado para llevar a cabo estas actividades.

Para obtener la energía de activación existen diferentes métodos: uno es el descrito en la norma ASTM C 1074-4 [15]. Consiste en realizar probetas de mortero con el material que se va a usar en la obra y curarlas a tres temperaturas. Dos de ellas deberán ser la mínima y la máxima esperadas en el lugar donde se vaya a colocar el hormigón, y la tercera deberá ser la intermedia entre los extremos. Para conocer la energía de activación en un determinado momento, se representa el logaritmo de la inversa de la edad a la que la muestra alcanza una resistencia fijada ($\ln(1/edad)$) con respecto a la inversa de la temperatura. Esta aproximación resulta una línea recta, con lo que la energía de activación se obtiene de multiplicar la pendiente de la línea obtenida por la constante universal de los gases 8.314.

Otra alternativa es la propuesta por Pinto y Hover (1999) [141]. Estos autores demostraron que, a partir de los tiempos de fraguado de hormigón, medidos mediante un ensayo de resistencia a la penetración, como indica la norma ASTM C 403 [17], a diferentes temperaturas podía aplicarse el método de madurez descrito en la norma ASTM C 1074-4 [15] para averiguar las correspondientes energías de activación usando el método de madurez y la ecuación de Freiesleben-Hansen, y Pedersen.

El propósito de este Capítulo es probar la validez de la energía de activación del hormigón obtenida de ensayos de Vicat, de una manera similar, pero más simple que la propuesta por Pinto y Hover [141]. Como resultado, la influencia de la temperatura en el hormigón podrá ser determinada por medio de un ensayo disponible en casi todos los laboratorios. Con el fin de estimar la energía de activación, en primer lugar, se ha llevado a cabo un estudio de los tiempos de fraguado con diferentes tipos de pastas de cemento (ANEXO III). Después, de manera parecida a la investigación realizada por Pinto y Hover [141], se ha hecho una

aplicación del método de madurez, tal y como se encuentra descrito en la norma ASTM C 1074 [15]. Para probar la validez de las energías de activación encontradas mediante este método, se han comparado los resultados con las resistencias a la penetración del hormigón obtenidas a diferentes temperaturas en el Capítulo 3.

4.1. DESARROLLO TEÓRICO

4.1.1. Estimación del tiempo de fraguado

El tiempo de inicio de fraguado se define como el tiempo en el que la masa deja de ser un líquido para convertirse en un sólido. Amziane [11] postuló que antes del fraguado, las presiones son hidrostáticas, siendo el tiempo de inicio de fraguado el momento en que las presiones laterales en el hormigón se hacen cero. Alternativamente, el fraguado puede ser estudiado como un proceso de percolación con las partículas de cemento interconectadas (percoladas) por los productos de hidratación. El grado crítico de percolación; es decir, el instante en que la masa deja de ser un líquido para convertirse en un sólido es del 16% de las partículas conectadas [197, 55].

Normalmente, para conocer el tiempo de fraguado del hormigón y del mortero se usa un ensayo de resistencia a la penetración. En este método, descrito en la norma ASTM C403 [17], el tiempo de inicio de fraguado se define como el tiempo que ha pasado entre el contacto inicial entre el agua y el cemento hasta que la resistencia a la penetración del mortero extraído del mortero usando el tamiz N° 4 es de 3.5 MPa y de 27.6 MPa para los tiempos de inicio y final de fraguado, respectivamente.

Sin embargo, teniendo en cuenta lo dicho acerca de la teoría de la percolación, será lógico pensar que el fraguado del hormigón dependerá, no solo de la resistencia a penetración en la pasta de cemento en un instante dado, sino también, de los factores que afecten el nivel de conectividad entre partículas y vacíos, como por ejemplo su consistencia.

Recordando, en el Capítulo 2 de esta Tesis Doctoral se definió el inicio de fraguado por medio de su resistencia a la penetración como “el momento cuando la profundidad del cráter hecho por un objeto cayendo es del 18% de la profundidad inicial después de la colocación y vibración del hormigón”, comparando este tiempo con la consolidación secundaria de un suelo, tal como está definida en geotecnia. Esta definición de inicio de

fraguado corresponderá a diferentes resistencias a la penetración, contrariamente a lo definido en la norma ASTM C403.

Finalmente, el método que más se usa para conocer el fraguado de la pasta de cemento es el de la aguja de Vicat, recogido en la norma UNE 83-311 86 [179], en el que se describe cómo en una muestra de cemento hecha con suficiente agua para tener consistencia normal, el inicio y el final de fraguado se miden a partir de la penetración de una aguja de 1 mm de diámetro con una longitud de 50 mm y un peso de 300 g.

4.1.2. Métodos de madurez

Los métodos de madurez se usan para conocer la influencia de la temperatura en el desarrollo de las resistencias del hormigón. Los primeros estudios en este campo se presentaron en una serie de artículos relacionados con el curado acelerado del hormigón [128, 136, 153], que dieron lugar a la conocida como función de madurez de Nurse-Saul:

$$M = \sum_0^t (T - T_r) \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

Donde:

- M = Grado de madurez, °C- tiempo (horas ó días)
- T = Temperatura del hormigón durante el tiempo Δt (°C)
- T_r = Temperatura de referencia (normalmente -10 °C)
- Δt = Edad cronológica real

Esta ecuación se basa en el principio de que la velocidad de ganancia de resistencias en el período después del fraguado del hormigón es una función lineal de la temperatura. Sin embargo, se demostró que esta ecuación no era válida en el caso en que las temperaturas variaran en un rango muy amplio [44].

En 1977, Freiesleben, Hansen y Pedersen [64], propusieron una nueva función, basada en la ecuación de Arrhenius, para computar el índice de madurez en función de la historia de temperaturas del hormigón.

Byfors [43] definió el grado de hidratación del cemento como la relación entre la cantidad de materiales cementosos hidratados y la cantidad de materiales que quedan por hidratar;

por lo tanto, el grado de hidratación puede expresarse en función de su variación con el tiempo:

$$V = \frac{d\alpha}{dt} \quad (4.2)$$

Las funciones de madurez se basan en que la velocidad de hidratación V de los materiales cementosos puede expresarse en función del grado de hidratación α y de la temperatura T en un instante dado [156]:

$$V = \frac{d\alpha}{dt} = g(\alpha) \cdot f(T) \quad (4.3)$$

Por otra parte, como puede suponerse, la temperatura T de la reacción en un instante dado es una función del tiempo t en el proceso de hidratación del cemento [59,60]. Por lo tanto:

$$V = \frac{d\alpha}{dt} = g(\alpha) \cdot f(T(t)) \quad (4.4)$$

Separando las variables e integrando se obtiene:

$$\int_0^{\alpha} \frac{1}{g(\alpha)} d\alpha = G(\alpha) = \int_0^{\tau} f(T(t)) dt \quad (4.5)$$

Normalizando la función $f(T(t))$ con respecto al valor de la misma a la temperatura T_0 , se tiene:

$$\frac{f(T(t))}{f(T_0)} = H_0(T) \quad (4.6)$$

Donde $H_0(T)$ es la función de temperatura.

Si se compara un proceso que ocurre a temperatura T , con otro que ocurra a la temperatura de referencia T_0 para el mismo grado de hidratación se tiene:

$$G(\alpha) = \int_0^{\tau} f(T(t))dt \quad (4.7)$$

$$G(\alpha)' = \int_0^{\tau} f(T_0)dt \quad (4.8)$$

Igualando (4.7) y (4.8):

$$\int_0^{\tau} f(T(t))dt = \int_0^{\tau_0} f(T_0)dt = f(T_0) \cdot \tau_0 \quad (4.9)$$

donde τ_0 es la edad equivalente del tiempo real τ a la temperatura T_0 . Despejando:

$$\tau_0 = \int_0^{\tau} \frac{f(T(t))}{f(T_0)} dt = \int_0^{\tau} H_0(T) dt \quad (4.10)$$

Muchos autores han desarrollado diversas funciones de madurez [34, 63, 147], pero la más aceptada es la hallada empíricamente por Freiesleben-Hansen, y Pedersen [64], que está basada en la ecuación de Arrhenius [60]:

$$f(T) = \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_K}\right) \quad (4.11)$$

Donde:

E_a = Energía de activación del cemento

R = Constante universal de los gases (8.3144 J/mol/K)

T_K = Temperatura expresada en grados Kelvin.

De la ecuación de Freiesleben-Hansen, y Pedersen (FHP), la única variable desconocida es la energía de activación.

Para sistemas basados en cementos Pórtland, Freiesleben-Hansen y Pedersen [64] determinaron una energía de activación empírica como función de la temperatura en grados centígrados:

$$E(T) = 33.5 \text{ kJ/mol, para } T \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E(T) = 33.5 + 1.47 (20-T) \text{ kJ/mol, para } T < 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Empleando la ecuación de Arrhenius (4.11), para una temperatura de referencia dada T_r , la función de temperatura $H_{T_r}(T)$ queda de la siguiente manera:

$$H_{T_r}(T) = \frac{f(T)}{f(T_r)} = \exp\left(\frac{E(T)}{R} \cdot \left(\frac{1}{273+T_r} - \frac{1}{273+T}\right)\right) \quad (4.12)$$

Si se introduce esta ecuación en (4.10) se tiene:

$$\tau_0 = \int_0^{\tau} H_0(t) dt = \int_0^{\tau} \exp\left(\frac{E(T)}{R} \cdot \left(\frac{1}{273+T_r} - \frac{1}{273+T}\right)\right) dt \quad (4.13)$$

O lo que es lo mismo:

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \exp\left(\frac{E(T)}{R} \cdot \left(\frac{1}{273+T_r} - \frac{1}{273+T}\right)\right) \Delta t \quad (4.14)$$

Donde:

$t_e(T_r)$ = Edad equivalente a la temperatura de referencia (minutos)

Δt = Edad cronológica real

T_c = Temperatura del hormigón durante el tiempo Δt (°C)

T_r = Temperatura de referencia (°C)

E = Energía de activación (J/mol)

R = Constante universal de los gases (8.3144 J/mol/K)

Estudios comparativos han mostrado que esta función refleja mejor el proceso que la función de madurez de Nurse-Saul [43, 45].

Carino [47] propone que el valor de la energía de activación depende de la composición del cemento, así como del tipo, cantidad, finura y de las adiciones incorporadas como sustitución parcial del clínker de Pórtland. Además, sugiere que la energía de activación puede ser también función de la relación agua/cemento. Otros trabajos, han demostrado que este parámetro no tiene un efecto evidente en la energía de activación [96]. Este investigador recogió datos de diferentes publicaciones previas, con valores de la energía de activación que variaban entre 31.2 y 63.6 kJ/mol.

Por otra parte, varios autores afirman que la energía de activación depende del grado de hidratación del cemento en la mezcla [15, 138]. Por lo tanto, la energía de activación calculada a partir de la resistencia a compresión a 28 días no tomará el mismo valor que la obtenida a partir del fraguado inicial del hormigón, por ejemplo por medio del método de resistencia a la penetración descrito en la norma ASTM C 403, tal y como fue propuesto por Pinto y Hover [141]. Sin embargo, en la norma ASTM C 1074-4, se define un rango de energía de activación de 40 a 45 kJ/mol para CEM I sin adiciones en todas sus etapas de hidratación.

4.2. METODOLOGÍA Y MATERIALES USADOS

Para el estudio de la influencia de la temperatura en la madurez del hormigón, se han realizado una serie de ensayos de Vicat, según indica la norma UNE-EN 196-3 [189], con cuatro tipos diferentes de cementos: (CEM I 52.5R (UNE EN 197-1), CEM II/A-V 42.5 R (UNE EN 197-1), CEM II/B-M (V-LL) 32.5 (UNE-EN 197-1) y CEM IV/A 32.5 N/SR (UNE 80 303-1)) en un intervalo de temperaturas entre 10 °C y 35 °C, que es el rango habitual en la colocación en condiciones reales de los hormigones para pavimentos industriales (ANEXO III).

Para calcular la energía de activación de la pasta de cemento a edades muy tempranas, se representaron las leyes de Arrhenius para el inicio y final de fraguado como se indica en la norma ASTM C 1074-4 [15], teniendo en cuenta que su pendiente es proporcional a la energía de activación del cemento.

Con respecto a los hormigones, con el fin de probar el método propuesto, se han analizado las cuarenta y cinco dosificaciones elaboradas para comprobar las variaciones de la resistencia a la penetración (Capítulo 2), con los tres tipos de cemento indicados en el Capítulo 3 (CEM I 52.5R (UNE EN 197-1), CEM II/A-V 42.5 R (UNE EN 197-1), CEM II/B-M (V-LL) 32.5 (UNE-EN 197-1)), manteniendo la proporción de áridos y variando el tipo y cantidad de cemento, así como la relación agua/cemento.

Los ensayos sobre el hormigón se llevaron a cabo a temperatura ambiente, entre los meses de Julio y Diciembre de 2005, con temperaturas que oscilaron de 8 °C a 26 °C y la humedad ambiental del 83% al 56% (Tabla 4.1).

	CEM I 52.5 R	CEM II/A-V 42.5R	CEM II/B-M (V-LL) 32.5
Intervalo de temperaturas del hormigón (°C)	26-17	19.6-14.5	15-8.3
Temperatura media del hormigón (°C)	20.6	17.4	13.3
Desviación estándar (°C)	1.84	2.1	1.65
Intervalo de humedades ambientales relativas (%)	83-56	75-57	82-64
Humedad ambiental relativa media (%)	69.4	66.7	70.9
Desviación estándar (%)	8.47	7.07	7.07

Tabla 4.1: Tabla de temperaturas medias y humedades ambientales relativas del hormigón

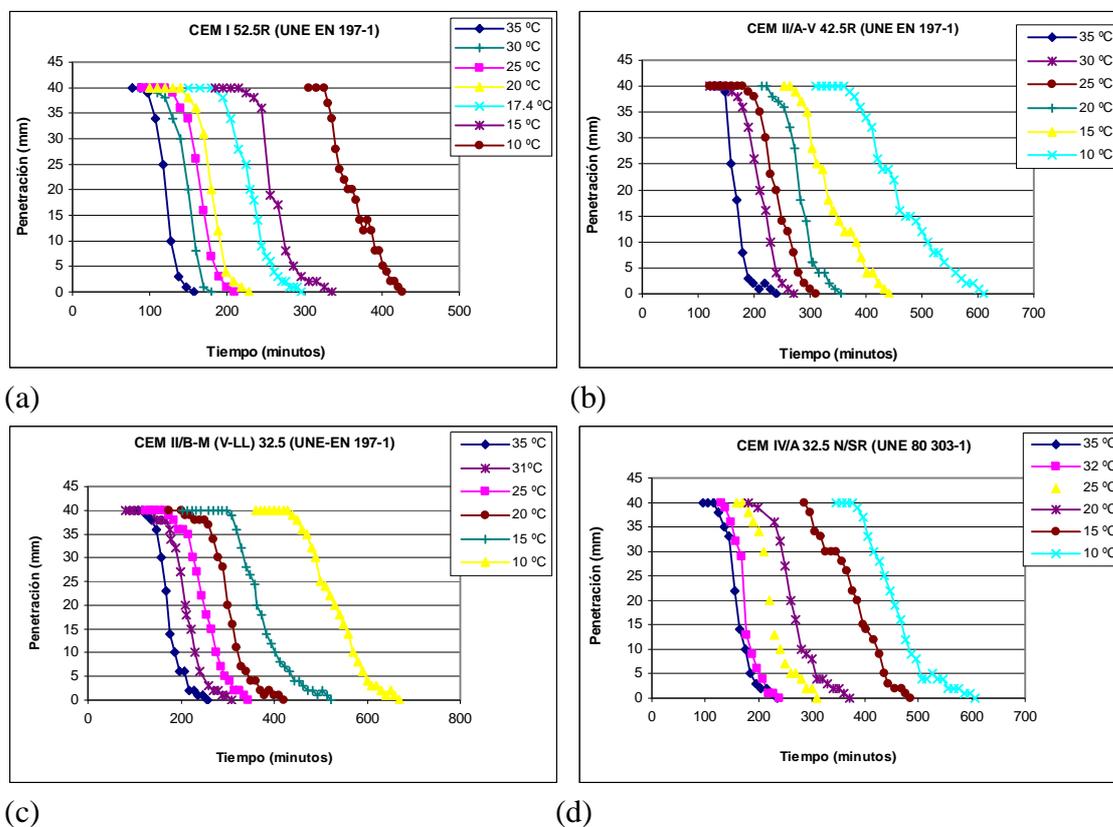


Figura 4.1: Evolución de la profundidad de penetración de la aguja de Vicat a diferentes temperaturas para (a) CEM I 52.5 R (UNE-EN 197-1). (b) CEM II/A-V 42.5R (UNE EN 197-1). (c) CEM II/B-M (V-LL) 32.5 N (UNE-EN 197-1). (d) CEM IV/A 32.5 N/SR (UNE 80 303-1)

4.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 4.1 se muestran los resultados obtenidos tras los ensayos de Vicat hechos con los cementos estudiados a diferentes temperaturas. En la Tabla 4.2, se detallan los valores para el inicio y final de fraguado de las pastas de aditivos. En la Figura 4.2 se representan

los valores de la evolución de los tiempos de inicio y final de fraguado como una función de la temperatura.

En la Figura 4.3 se muestra el tiempo desde el momento en que el agua se mezcla con el cemento hasta el instante en que la profundidad de la huella hecha por una esfera de 4.6 cm de radio que cae desde 1 m de altura es 1 cm, lo que aproximadamente se corresponde con una resistencia a penetración de 3.5 MPa.

	Temperatura	Inicio fraguado		Final de fraguado	
	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Tiempo equivalente	Tiempo (minutos)	Tiempo equivalente
CEM I 52,5 R (UNE-EN 197-1)	35.0	112	209.628	157	285.514
	30.0	126	192.687	180	269.949
	25.0	150	186.157	210	258.048
	20.0	169		228	
	17.4	210	187.143	295	264.286
	15.0	250	199.938	335	270.680
	10.0	347	220.196	442	286.401
CEM II/A-V 42,5R (UNE EN 197-1)	35.0	150	248.004	239	392.491
	30.0	185	260.107	270	377.881
	25.0	210	249.719	310	367.775
	20.0	256		355	
	15.0	296	247.428	472	395.498
	15.0	294	245.756	442	370.361
	10.0	395	274.258	611	426.317
CEM II/B-M (V-LL) 32,5 (UNE-EN 197-1)	35.0	149	280.276	257	430.832
	31.0	178	284.638	309	453.591
	25.0	215	267.285	345	412.212
	20.0	268		420	
	15.0	356	284.205	523	435.027
	10.0	470	297.170	670	460.551
CEM IV/A 32,5 N/SR (UNE 80 303-1)	35.0	135	244.710	235	411.260
	32.0	150	242.537	238	374.049
	25.0	190	233.211	305	369.858
	20.0	232		370	
	15.0	304	245.917	484	396.463
	10.0	400	259.798	606	403.763

Tabla 4.2: Edades equivalentes para el inicio y final de fraguado para los ensayos de pasta de cemento

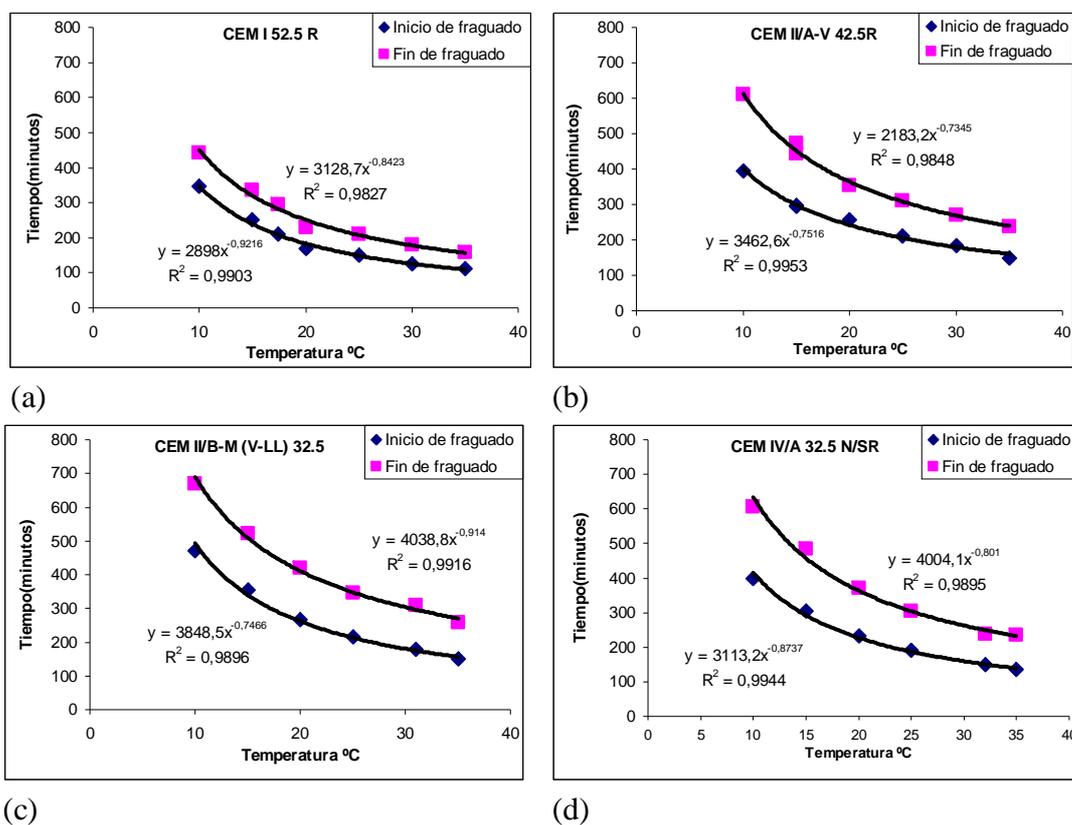


Figura 4.2: Tiempos de inicio y final de fraguado obtenidos a diferentes temperaturas. (a) CEM I 52.5 R (UNE-EN 197-1). (b) CEM II/A-V 42.5R (UNE EN 197-1). (c) CEM II/B-M (V-LL) 32.5 (UNE-EN 197-1). (d) CEM IV/A 32.5 N/SR (UNE 80 303-1).

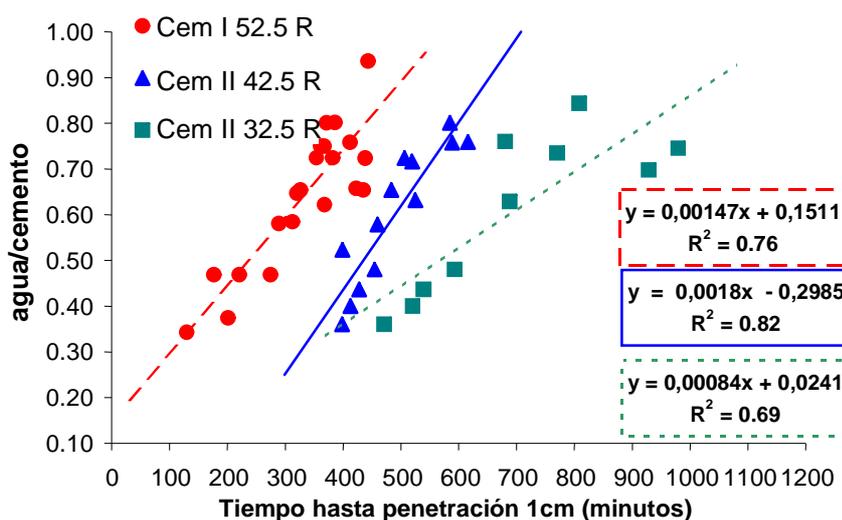


Figura 4.3: Tiempos para una profundidad de penetración 1cm de una esfera de 4.6 cm en el hormigón.

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.4.1. Ensayos de Vicat

En la Figura 4.4 se muestra la representación de la Ley de Arrhenius para el inicio y fin de fraguado de los cementos estudiados, asumiendo condiciones isoterma durante el proceso. Las energías de activación obtenidas tanto para el inicio como para el final de fraguado, son las que se muestran en la Tabla 4.3, y oscilan alrededor de los 30 kJ/mol, siendo inferiores a las señaladas por diferentes autores para el mismo tipo de cementos americanos [44, 101, 141]. Los valores equivalentes de inicio y final de fraguado de los ensayos de Vicat, usando 20 °C como temperatura de referencia, se han calculado a partir de estas energías de activación mediante la función de madurez de Freiesleben-Hansen y Pedersen (4.14) (Tabla 4.3). Estos datos se representan gráficamente en la Figura 4.5 y en la Figura 4.6

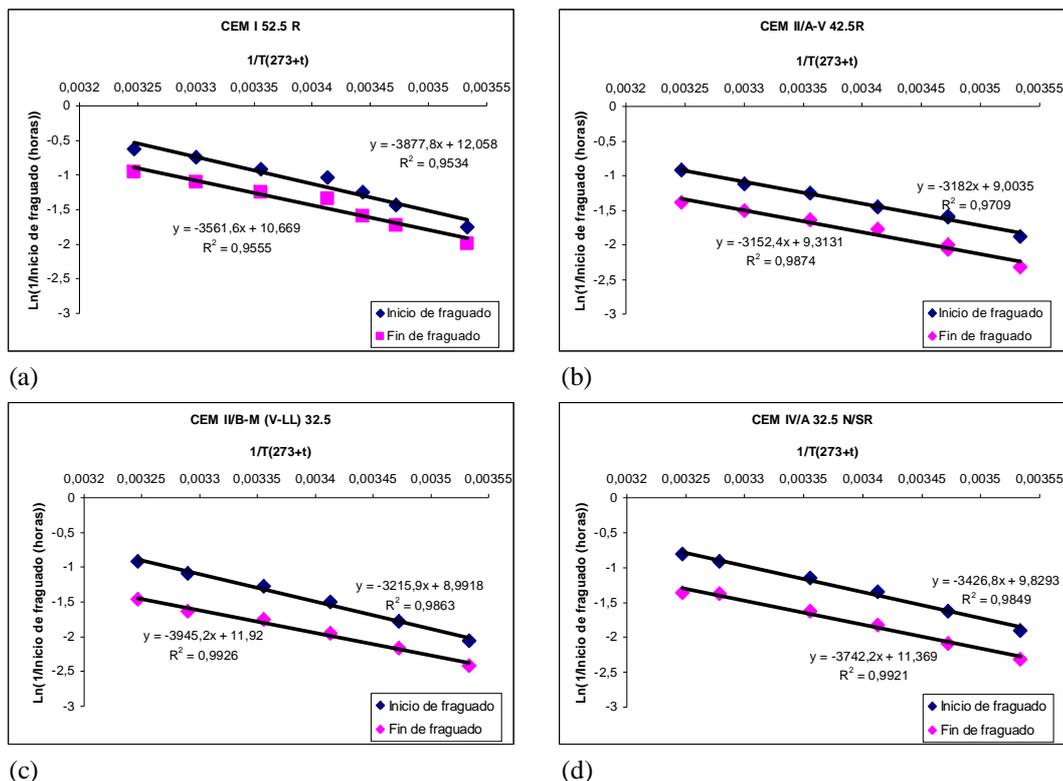


Figura 4.4: Ley de Arrhenius para los tiempos de inicio y final de fraguado. (a) CEM I 52.5 R (UNE-EN 197-1). (b) CEM II/A-V 42.5R (UNE EN 197-1). (c) CEM II/B-M (V-LL) 32.5 (UNE-EN 197-1). (d) CEM IV/A 32.5 N/SR (UNE 80 303-1).

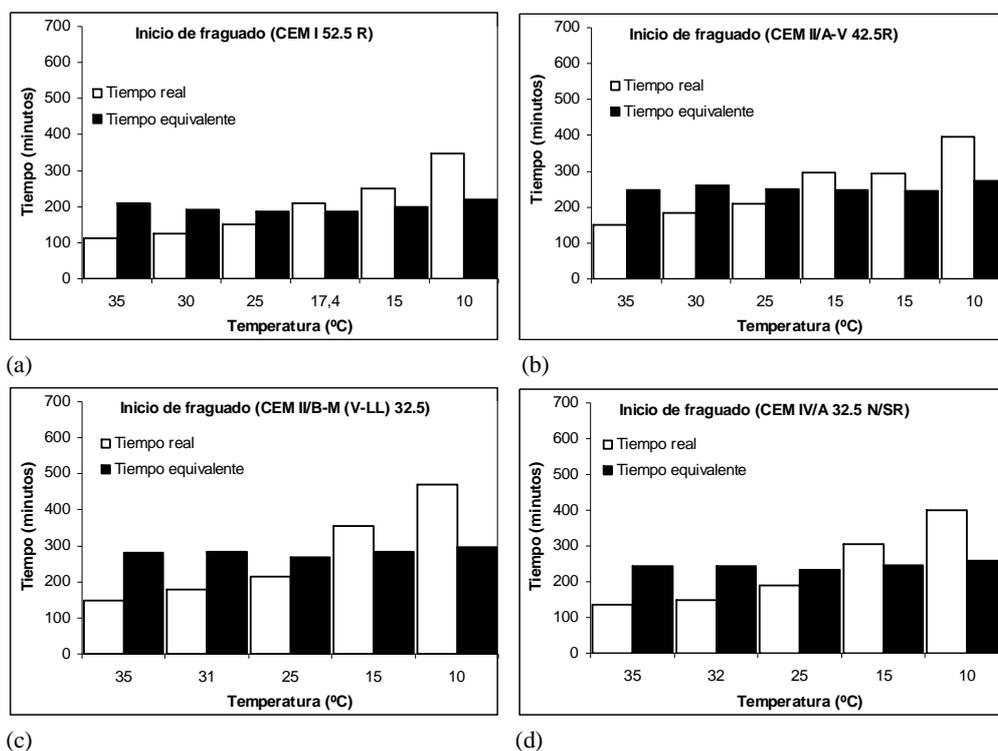


Figura 4.5: Tiempos de inicio de fraguado y edades equivalentes. (a) CEM I 52.5 R (UNE-EN 197-1). (b) CEM II/A-V 42.5R (UNE EN 197-1). (c) CEM II/B-M (V-LL) 32.5 (UNE-EN 197-1). (d) CEM IV/A 32.5 N/SR (UNE 80 303-1).

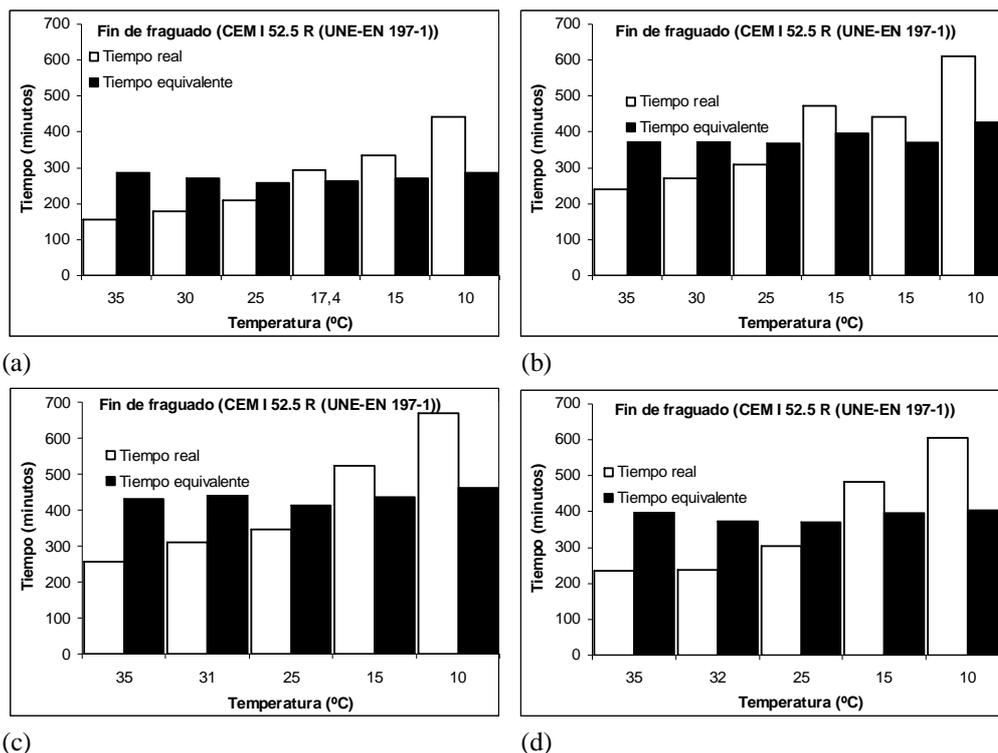


Figura 4.6: Tiempos de final de fraguado y edades equivalentes. (a) CEM I 52.5 R (UNE-EN 197-1). (b) CEM II/A-V 42.5R (UNE EN 197-1). (c) CEM II/B-M (V-LL) 32.5 (UNE-EN 197-1). (d) CEM IV/A 32.5 N/SR (UNE 80 303-1).

CEM I 52.5 R	Inicio de fraguado	Ea = 32.24 kJ/mol
	Fin de fraguado	Ea = 29.61 kJ/mol
CEM II/A-V 42.5R	Inicio de fraguado	Ea = 26.46 kJ/mol
	Fin de fraguado	Ea = 26.21 kJ/mol
CEM II/B-M (V-LL) 32.5	Inicio de fraguado	Ea = 26.73 kJ/mol
	Fin de fraguado	Ea = 32.8 kJ/mol
CEM IV/A 32.5 N/SR	Inicio de fraguado	Ea = 28.49 kJ/mol
	Fin de fraguado	Ea = 31.11 kJ/mol

Tabla 4.3: Energías de activación obtenidas a partir de las leyes de Arrhenius del principio y final de fraguado.

4.4.2. Hormigones

La edad equivalente para los hormigones se calcula mediante la ecuación de madurez de Freiesleben-Hansen y Pedersen, usando 20 °C como temperatura de referencia y los valores de energía de activación señalados en la Tabla 4.3, asumiendo que en el instante en que la penetración es de 1cm, la energía de activación será prácticamente igual a la que se dará durante el inicio de fraguado. De ese modo, los resultados mostrados en la Figura 4.3 quedan como se muestra en la Figura 4.7.

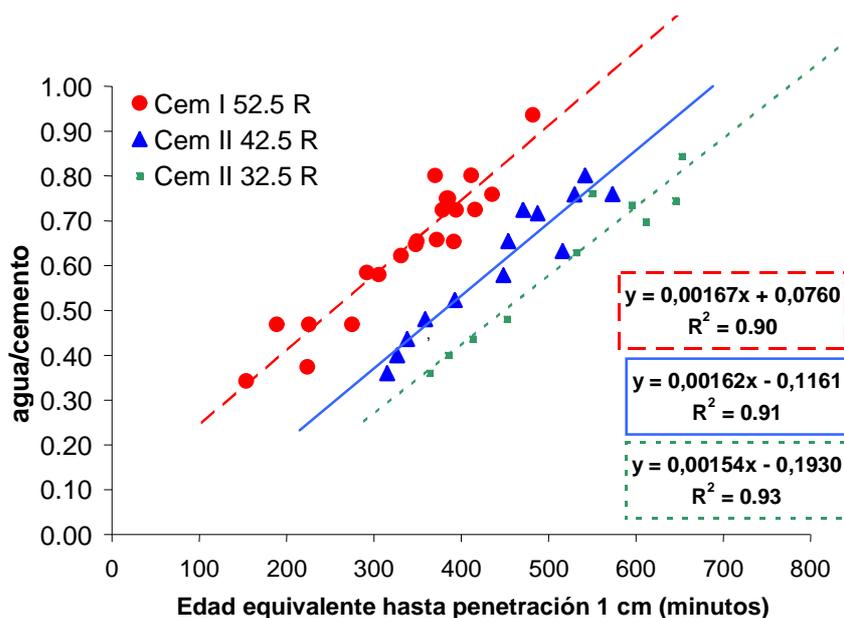


Figura 4.7: Tiempos equivalentes a 20 °C para 1 cm de penetración de una esfera de 4.6 cm de diámetro en el hormigón.

4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los datos de energía de activación presentados en la Figura 4.4, obtenidos mediante ensayos de Vicat sugieren una relación lineal, lo que confirma que este método es válido para edades tempranas de hidratación, como se indica en la norma ASTM C 1074-4.

Sin embargo, estos datos de energía de activación por medio del inicio y final de fraguado son inferiores tanto a los sugeridos en la ASTM C 1074-4 para mezclas hechas con CEM I, como a los reportados por varios autores a edades tempranas de hidratación [101, 141]. Por otra parte, usando estos valores de energía de activación para encontrar la edad equivalente de los datos obtenidos con pastas de cemento a diferentes temperaturas, en la Figura 4.5 y en la Figura 4.6 se observa una uniformidad entre los datos transformados con la ecuación de Freiesleben-Hansen y Pedersen, así como una similitud respecto a los datos sin transformar a 20 °C, obteniendo para todos los tipos de cemento estudiados desviaciones estándares similares a las indicadas por Pinto y Hover [141].

Se observa además, con respecto a los datos transformados para el hormigón, mostrados en la Figura 4.7, una relación lineal entre el tiempo de adquisición de una determinada resistencia a la penetración y la relación agua/cemento. Sin embargo, en la Figura 4.3, esta relación lineal no puede ser encontrada, especialmente en el caso del hormigón hecho con CEM II/B-M (V-LL) 32.5, donde las temperaturas son más frías y en consecuencia, la dispersión es mayor. Comparando los coeficientes de correlación de la Figura 4.7 y de la Figura 4.3 obtenidos mediante la aplicación del método de madurez con la energía de activación señalada, se comprueba que en el segundo caso, estos son mayores. Por ejemplo, para el hormigón hecho con cemento del tipo CEM II/B-M (V-LL) 32.5, se incrementa el coeficiente de correlación de 0.69 a 0.94, obteniéndose líneas paralelas al representar los tiempos equivalentes hasta 1 cm de penetración, con la relación agua/cemento de cada uno de los cementos usados.

Garboczi y Bentz [29] encontraron una relación entre la porosidad capilar del hormigón fresco y la fracción de huecos conectada, sugiriendo que ésta no depende de la relación agua/cemento o de las adiciones, reactivas o no, presentes en el cemento. Estos autores descubrieron también la existencia de una curva de percolación universal. Así, la porosidad capilar del hormigón con una baja relación agua/cemento a edades tempranas es

equivalente a la porosidad del hormigón con una alta relación agua/cemento después de un tiempo más largo, y lo mismo ocurre en el caso de añadir diferentes adiciones al hormigón.

En la Figura 4.7, se han obtenido líneas casi paralelas para los tres cementos estudiados. Esto confirma la existencia de una curva universal de percolación, como proponen estos autores, ya que, independientemente de la relación agua/cemento o del tipo de cemento, la edad equivalente hasta la resistencia a penetración elegida es constante. En esta figura, la dispersión de los puntos con los que se aproximan las líneas rectas ocurre porque corresponden a diversos grados de percolación, y pueden ser aproximados como líneas rectas porque las diferencias entre ellos nunca serán mayores que un determinado valor, que vendrá dado por la consistencia inicial del hormigón [67].

Por lo tanto, para conocer la influencia de la temperatura en el tiempo de fraguado del hormigón fresco de una manera simple, deberían seguirse los siguientes pasos:

1. Realizar al menos tres ensayos de Vicat, como se muestra en la norma ASTM C 191-04a con el cemento que se usará, a la temperatura de referencia de 20 °C, a una inferior y a otra superior.
2. Representar los tiempos de fraguado en un gráfico de Arrhenius para calcular la energía de activación E_a .
3. Una vez que se conozcan los tiempos de fraguado del hormigón de estudio a una temperatura, no importa cual, encontrar los tiempos de fraguado equivalentes a la temperatura de referencia, usando la energía de activación obtenida mediante este método.
4. Usando la función de madurez de Freiesleben-Hansen y Pedersen, la energía de activación calculada de los ensayos de Vicat y los tiempos de fraguado equivalentes del hormigón estudiado, obtener los tiempos de fraguado del hormigón a cualquier temperatura.

4.6. CONCLUSIONES

En este Capítulo se ha comprobado la validez de los ensayos de Vicat, comunes en la mayor parte de los laboratorios, para conocer la energía de activación de los cementos de una manera mucho más simple que con los métodos usados hasta la fecha, analizando la influencia de la temperatura en los tiempos de fraguado del hormigón a partir de la ecuación de madurez de Freiesleben-Hansen usada para predecir los tiempos de fraguado a diferentes temperaturas.

Para ello, se ha realizado un estudio que muestra cómo el incremento de la relación agua/cemento en el hormigón causa un incremento lineal en el tiempo de adquisición de resistencias a la penetración, encontrándose además, que la energía de activación de los cementos españoles es inferior a la reportada por diversos investigadores para el mismo tipo de cementos americanos.

De este modo, con tan sólo conocer los tiempos de fraguado de un hormigón y la energía de activación del cemento usado, asumiendo que ésta no varía con la relación agua/cemento, se puede calcular fácilmente la variación del tiempo de fraguado del hormigón que se está utilizando.