



**Universidad Austral de Chile**

---

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

**“ANÁLISIS DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA  
DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL  
HORMIGÓN”**

Trabajo para optar al título de:  
**Ingeniero Civil en Obras Civiles**

Profesor Patrocinante:  
Sr. José Arrey Díaz  
Constructor Civil, especialidad Hormigón  
Diplomado en Prevención de Riesgos Ocupacionales

**NÉSTOR GERMÁN SOTOMAYOR BAHAMONDE**  
VALDIVIA – CHILE  
2014

---

*Este estudio es la continuación del trabajo de titulación denominado “Análisis comparativo del tiempo de fraguado entre hormigones grado H20, H25 y H30 en base a cemento corriente y alta resistencia” desarrollado el año 2013 por el mismo autor, esto con la finalidad de optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles.*

---

## RESUMEN

Conocer el tiempo de fraguado del hormigón, permite controlar de mejor manera diversos factores que conducen a lograr mejor calidad del hormigón y mayor eficiencia en los procesos de construcción. Algunos aspectos que se pueden optimizar conociendo cómo funciona el tiempo de fraguado son: costos, tiempo de ejecución, resistencia, trabajabilidad e incluso posibles fallas del hormigón.

Esta investigación es la continuación de la tesis realizada por Sotomayor (2013), denominada “*Análisis comparativo del tiempo de fraguado entre hormigones grado H20, H25 y H30 en base a cemento corriente y alta resistencia*”. Consiste en una investigación analítica de formas alternativas para medir los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón. Tiene como objetivo investigar y presentar un modelo matemático para estimar el tiempo de fraguado sin tener la necesidad de realizar ensayos, este método es comprobado con los ensayos de tiempo de fraguado realizados por Sotomayor (2013). Además se da a conocer un nuevo equipo (calorímetro) para obtener los tiempos de fraguado del hormigón, más eficiente y preciso que el método tradicional indicado en la norma NCh 2183, que fue el utilizado por Sotomayor (2013).

El modelo matemático entrega resultados que duplican los tiempos de fraguado determinados por Sotomayor (2013), sin embargo, al realizar una adaptación al modelo y bajo ciertas condiciones de temperatura se obtienen resultados satisfactorios. Por su parte, el equipo para determinar el tiempo de fraguado del hormigón que es descrito en este trabajo posee una serie de ventajas respecto al método tradicional de ensayo. Tanto el modelo matemático como el calorímetro, son una forma práctica de prever de manera aproximada el tiempo de fraguado del hormigón.

---

## ABSTRACT

Knowing the setting time of concrete, allows to control in a better way different factors which lead to get a better concrete quality and a higher efficiency in construction processes. Some facts that can be optimized knowing how the setting time works are: costs, execution times, strength, workability and even possible failures of the concrete.

This research is the continuation of the thesis made by Sotomayor (2013), called "*Comparative analysis of setting time among concretes of grade H20, H25 and H30 based on standard and high strength cement*". It consists in an analytic research of alternative ways of measuring the initial and final setting times of concrete. It has as a goal to investigate and to show a mathematical model to estimate the setting time without having the need to make tests, this method is checked with the setting time tests made by Sotomayor (2013). Also a new tool (calorimeter) to get the setting times of concrete in a more efficient and accurate way than the traditional method of the norm NCh 2183, which was used by Sotomayor (2013).

The mathematical model gives results that duplicate the setting times established by Sotomayor (2013), however, satisfactory results are obtained making an adjustment to the model and under certain temperature conditions. Meanwhile, the tool to establish the setting time of concrete that is described in this work, has several advantages compared with the traditional test method. Both the mathematical model as the calorimeter, are a practical way to foreknow approximately the setting time of concrete.

---

## INTRODUCCIÓN

Históricamente el hombre ha buscado condiciones de vida cada vez mejores. El rubro de la construcción no se queda al margen de esto. Mayor calidad al menor costo y en el menor tiempo posible, son algunas de las principales exigencias que hoy en día caracterizan la ejecución de diversas obras de infraestructura.

Uno de los materiales más utilizados es sin duda el hormigón, y pese al alto nivel de especialización que se ha alcanzado, aún es posible lograr mayor eficiencia en su utilización. En este trabajo se estudia el hormigón en su primera etapa, donde se produce la transición gradual de un estado líquido a un sólido, llamada fraguado del hormigón.

Este estudio es la continuación del trabajo realizado por Sotomayor (2013) denominado “*Análisis comparativo del tiempo de fraguado entre hormigones grado H20, H25 y H30 en base a cemento corriente y alta resistencia*”, en el cual se llevó a cabo un estudio práctico de diferentes hormigones, analizando y comparando los tiempos de fraguado. En dicho estudio (ver anexo), los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón se determinaron a partir de ensayos de resistencia a la penetración según la norma NCh 2183.

La importancia del fraguado inicial radica en que una vez alcanzado este punto, el hormigón ya no puede ser vibrado sin dañar su estructura interna. En condiciones de calor, el tiempo de fraguado inicial será más corto, lo que puede reducir de manera importante el tiempo disponible para el transporte, colocación y acabado del hormigón. En condiciones de frío, el tiempo de inicio de fraguado es mayor, lo que otorga mayor tiempo de trabajabilidad al hormigón, sin embargo se producen otros efectos adversos, como mayor riesgo de que se produzcan agrietamientos por retracción plástica. Estos son algunos ejemplos de efectos en el hormigón que pueden ser mejor manejados controlando el tiempo de fraguado.

Esta investigación tiene como objetivo estudiar y presentar un modelo matemático para estimar el tiempo de fraguado del hormigón, sin tener la necesidad de realizar ensayos. El modelo matemático es comprobado con los ensayos prácticos de tiempo de fraguado realizados por Sotomayor (2013). Además se da a conocer un nuevo equipo, llamado calorímetro, para determinar los tiempos de fraguado del hormigón.

La metodología de trabajo consiste en el estudio bibliográfico de diversos autores, referente al tiempo de fraguado del hormigón. Schindler (2004) desarrolló un modelo para predecir el tiempo de fraguado del hormigón, esto, partiendo de las hipótesis de que el fraguado está influenciado principalmente por la hidratación del cemento (Pinto y Hover, 1999), y que el grado crítico de hidratación depende de la razón agua/cemento (Byfors, 1980). Este modelo será la base para de este trabajo.

Complementariamente se analizan algunos conceptos y antecedentes importantes que han desarrollado otros autores. Una vez presentado el modelo para predecir el tiempo de fraguado, se recurre a la información de los hormigones confeccionados por Sotomayor (2013), se calculan los tiempos de inicio y fin de fraguado de estos mediante el modelo matemático y se realiza una

---

comparación. A continuación se hacen algunos ajustes al modelo matemático para lograr una mejor aproximación.

Una vez analizado el modelo matemático se presenta el calorímetro, donde se entregan sus características y forma de funcionamiento. Finalmente se establecen conclusiones y comentarios de acuerdo al estudio realizado.

---

## **OBJETIVO GENERAL**

Investigar y analizar un modelo matemático para predecir el tiempo fraguado del hormigón, además de dar a conocer un equipo alternativo para la determinación del tiempo de fraguado.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar y analizar un modelo matemático para predecir los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón.
- Establecer si este modelo matemático desarrollado con hormigones en base a cementos extranjeros, se puede aplicar en hormigones elaborados con cementos nacionales.
- Determinar los tiempos de inicio y fin de fraguado de los hormigones elaborados por Sotomayor (2013) utilizando el modelo matemático.
- Realizar una comparación teórico-práctica del tiempo de fraguado de los hormigones elaborados por Sotomayor (2013), entre los resultados de sus ensayos y los determinados con el modelo matemático.
- Dar a conocer una nueva herramienta tecnológica para determinar el tiempo de fraguado del hormigón.
- Establecer ventajas y desventajas de estos métodos alternativos en comparación al método tradicional para determinar el tiempo de fraguado del hormigón.

---

## ANTECEDENTES

Como se dijo en la introducción, este estudio es la continuación de la tesis realizada por Sotomayor (2013) denominado “*Análisis comparativo del tiempo de fraguado entre hormigones grado H20, H25 y H30 en base a cemento corriente y alta resistencia*”, el cual se adjunta íntegramente al final de este trabajo para una mejor comprensión del tema.

Los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón se determinan a través de un ensayo directo de resistencia a la penetración descrito en la norma NCh 2183, detallado también en la sección 2.5 del trabajo de Sotomayor (2013).

Cada día es más común ver modelos matemáticos para caracterizar el comportamiento del hormigón. Al respecto, uno de los objetivos de este artículo es investigar y analizar la existencia de modelos matemáticos que permitan predecir el tiempo de fraguado del hormigón. Anton Schindler ha investigado diversos aspectos del comportamiento del hormigón a edades tempranas, entre sus estudios, desarrolló un modelo matemático para predecir los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón. En esta sección, se describen conceptos que han sido adoptados por Schindler para elaborar dicho modelo.

### Edad equivalente del hormigón

La temperatura de curado del hormigón es posiblemente la variable que tiene el efecto más significativo en el tiempo de fraguado del hormigón. Las reacciones de hidratación del cemento, como todas las reacciones químicas, se aceleran si aumenta la temperatura y se retardan si esta disminuye (Solas y Giani, 2010). En relación a esto, Sotomayor (2013) señala que la temperatura es un factor que influye de manera importante en el tiempo de fraguado del hormigón, donde variaciones no muy significativas de ésta controlan tanto el inicio como el fin de fraguado.

Para poder comparar el tiempo de fraguado de diferentes hormigones, que han sido expuestos a diferentes temperaturas durante el período de curado, es necesario hacerlo a una misma “edad equivalente”, ya que esta representa la edad del hormigón a una temperatura de referencia específica.

Freiesleben Hansen y Pedersen (1977) desarrollaron el siguiente modelo, conocido como método de madurez, para determinar la edad equivalente de hidratación del hormigón a una temperatura de referencia:

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

---

Donde,

- $t_e(T_r)$  = edad equivalente a la temperatura de curado de referencia (horas)
- $\Delta t$  = intervalo de tiempo (horas)
- $T_c$  = temperatura promedio del hormigón durante el intervalo  $\Delta t$  (°C)
- $T_r$  = temperatura de referencia del hormigón (°C)
- $E$  = energía de activación (J/mol)
- $R$  = constante universal de los gases (8,3144 J/mol/K)

### Energía de activación

En la ecuación 1, la energía de activación ( $E$ ) define la sensibilidad a la temperatura de la mezcla de hormigón. Schindler (2003) desarrolló el modelo de energía de activación que se muestra en la ecuación 2, que es independiente de la temperatura de curado.

$$E = 22100 \cdot f_E \cdot p_{C_3A}^{0,30} \cdot p_{C_4AF}^{0,25} \cdot Blaine^{0,35} \quad (2)$$

Donde,

- $p_{C_3A}$  = peso de C<sub>3</sub>A en relación al contenido total de cemento
- $p_{C_4AF}$  = peso de C<sub>4</sub>AF en relación al contenido total de cemento
- $Blaine$  = valor Blaine, superficie específica del cemento (m<sup>2</sup>/kg)
- $f_E$  = factor de modificación de la energía de activación, definido como:

$$f_E = 1 - 1,05 \cdot p_{FA} \cdot \left( 1 - \frac{p_{FACaO}}{0,40} \right) + 0,40 \cdot p_{SLAG} \quad (3)$$

Donde,

- $p_{FACaO}$  = peso de CaO en relación al contenido de cenizas volantes
- $p_{SLAG}$  = masa de escoria siderúrgica de alto horno en sustitución de cemento
- $p_{FA}$  = masa de cenizas volantes en sustitución de cemento

### Grado de hidratación

El grado de hidratación ( $\alpha$ ) es una medida del alcance que tiene la reacción entre el cemento y el agua, y se define como la razón entre la cantidad de cemento hidratado y la cantidad total de cemento. El grado de hidratación varía entre 0%, en el inicio de la hidratación, y 100% cuando la hidratación es total. En realidad, no todo el cemento se hidrata, Mills (1966) señala que un grado de hidratación del 100% probablemente nunca se alcance.

Se ha demostrado que **la razón entre el calor liberado y el máximo calor disponible en el sistema es un práctico y preciso método para cuantificar el grado de hidratación** (Van Breugel, 1997), lo que se expresa matemáticamente de como muestra la ecuación 4.

$$\alpha(t) = \frac{H(t)}{H_T} \quad (4)$$

Donde,  $\alpha(t)$  = grado de hidratación en el tiempo  $t$   
 $H(t)$  = calor de hidratación acumulado en el tiempo  $t$  (J/m<sup>3</sup>)  
 $H_T$  = calor de hidratación final del hormigón (J/m<sup>3</sup>)

La curva del grado de hidratación se utiliza para caracterizar el comportamiento de la hidratación de una mezcla de hormigón a la temperatura de referencia ( $T_r$ ). En la figura 1 se observa el desarrollo de la hidratación en el tiempo. Esta figura ilustra por qué el inicio y fin de fraguado pueden ser relacionados con el grado de hidratación (Schindler, 2004).

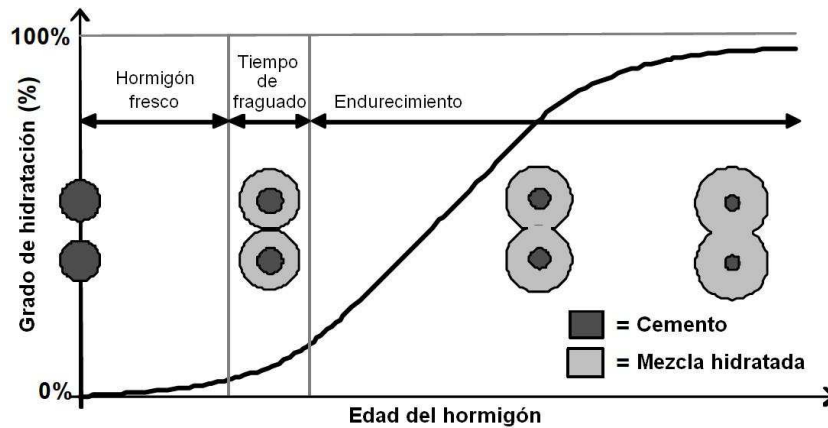


Figura 1: Desarrollo del grado de hidratación del hormigón (Schindler, 2004)

Por su parte, Freiesleben Hansen y Pedersen (1985) desarrollaron un modelo exponencial que representa con precisión la curva en forma de S del desarrollo de la hidratación (figura 1).

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \cdot e^{\left(-\left[\frac{\tau}{t_e}\right]^\beta\right)} \quad (5)$$

Donde,  $\alpha(t_e)$  = grado de hidratación a la edad equivalente  $t_e$   
 $\tau$  = parámetro del tiempo de hidratación (horas)  
 $\beta$  = parámetro de la forma de hidratación  
 $\alpha_u$  = grado último de hidratación

Pinto y Hover (1999) establecieron que si bien “...el proceso de fraguado está influenciado por los efectos reológicos de la razón agua/cemento, los áridos, el aire incorporado, la exudación y la evaporación, **el fraguado está influenciado principalmente por la**

**hidratación del cemento**". Aunque los resultados de los ensayos de fraguado de Pinto y Hover (1999) variaron considerablemente cuando se ensayaron a diferentes temperaturas, llegaron a la conclusión de que la edad equivalente calculada para el fraguado era mucho más uniforme. Esto indica que el fraguado se alcanza cuando se ha producido un nivel específico de desarrollo del grado de hidratación. Con esta información, Schindler (2004) evaluó los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón en función del grado de hidratación.

### Grado último de hidratación

La hidratación de la pasta de cemento se detiene antes de que el cemento se consuma totalmente (Mills, 1966). En la ecuación 5, se ha introducido un parámetro ( $\alpha_u$ ) para caracterizar el grado último de hidratación. Mills (1966) desarrolló numerosas pruebas para determinar el grado último de hidratación y recomendó que para hormigón de cemento portland saturado se utilice la ecuación 6. Cabe señalar que esta variable está fuertemente afectada por la razón agua/cemento y que no se ve afectada por la temperatura de curado.

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot a/c}{0,194 + a/c} \quad (6)$$

### Parámetros de hidratación

Para determinar los parámetros de hidratación  $\tau$ ,  $\beta$  y  $\alpha_u$  de la ecuación 5, se utilizan las relaciones desarrolladas por Schindler y Folliard (2003), estos parámetros dependen de la composición del cemento y se calculan de la siguiente manera:

$$\tau = 66,78 \cdot p_{C_3A}^{-0,154} \cdot p_{C_3S}^{-0,401} \cdot Blaine^{-0,804} \cdot p_{SO_3}^{-0,758} \cdot e^{(2,187 \cdot p_{SLAG} + 9,50 \cdot p_{FA} \cdot p_{FA-CaO})} \quad (7)$$

$$\beta = 181,4 \cdot p_{C_3A}^{0,146} \cdot p_{C_3S}^{0,227} \cdot Blaine^{-0,535} \cdot p_{SO_3}^{0,558} \cdot e^{(-0,647 \cdot p_{SLAG})} \quad (8)$$

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot a/c}{0,194 + a/c} + 0,50 \cdot p_{FA} + 0,30 \cdot p_{SLAG} \leq 1,0 \quad (9)$$

Donde,

- $p_{C_3A}$  = peso de C<sub>3</sub>A en relación al contenido total de cemento
- $p_{C_3S}$  = peso de C<sub>3</sub>S en relación al contenido total de cemento
- $p_{SO_3}$  = peso de SO<sub>3</sub> en relación al contenido total de cemento
- $p_{SLAG}$  = masa de escoria siderúrgica de alto horno en sustitución de cemento

---

$p_{FA}$  = masa de cenizas volantes en sustitución de cemento  
 $p_{FACaO}$  = peso de CaO en relación al contenido de cenizas volantes  
 $Blaine$  = valor Blaine, superficie específica del cemento ( $m^2/kg$ )

### Grado crítico de hidratación

Byfors (1980) definió el “grado crítico de hidratación” ( $\alpha_{CR}$ ) como el grado de hidratación que se alcanza justo antes de que el hormigón comience a adquirir resistencia. Byfors (1980) concluyó que el grado crítico de hidratación depende de la razón agua/cemento y se expresa de la siguiente manera:

$$\alpha_{CR} = k_s \cdot (a/c) \quad (10)$$

Donde,  $k_s$  = constante que varía entre 0,4 y 0,46  
 $a/c$  = razón agua/cemento

### MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL HORMIGÓN

Schindler (2004) desarrolló un modelo matemático capaz de predecir el tiempo de fraguado del hormigón. Para esto realizó un trabajo experimental que consistió en determinar el tiempo de fraguado de distintos hormigones, obtenidos de proyectos de pavimentación realizados en distintas épocas del año y en regiones climáticas diferentes. Estos ensayos fueron realizados en terreno (temperaturas variables) y en condiciones de laboratorio (temperatura constante). Los tiempos de inicio y fin de fraguado fueron determinados mediante el ensayo de resistencia a la penetración descrito en la norma ASTM C 403, similar al de la norma NCh 2183 utilizado por Sotomayor (2013). En la tabla 1 se resume la información del lugar, el cemento, contenido de cemento ( $kg/m^3$ ) y razón agua/cemento para cada mezcla utilizada por Schindler (2004).

En dicha tabla, el cemento Tipo I corresponde al cemento portland, o sea cuya composición es únicamente clínquer. Normalmente a la composición de este cemento se le agrega un porcentaje de adiciones como cenizas volantes o escoria granulada de alto horno (GGBF, según su sigla en inglés). Existen dos clases de cenizas volantes, una de clase F y la otra de clase C, se diferencian en la composición del material. Las cenizas volantes de clase F, tienen menos de un 15% de cal y contienen un porcentaje alto de la combinación de sílice, alúmina y óxido de hierro (superior al 70%). Una de sus principales características es que genera menor

calor de hidratación. La ceniza volante de clase C tiene un porcentaje alto de cal, normalmente superior al 30%.

Tabla 1: Resumen de las mezclas de hormigón ensayadas por Schindler (Schindler, 2004)

Mezcla N°	Lugar	Cemento	Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	a/c
1	Dallas - May	Tipo I + 20% cenizas volantes clase F	293	0,39
2	Houston - May	Tipo I + 25% cenizas volantes clase C	318	0,44
3	Dallas - Ago	Tipo I	346	0,46
4	Houston - Ago	Tipo I + 35% cenizas volantes clase C	320	0,41
5	El Paso - Ago	Tipo I + 50% escoria GGBF	279	0,54
6	Dallas - Sept	Tipo I + 20% cenizas volantes clase F	272	0,50
7	Houston - Oct	Tipo I + 25% cenizas volantes clase C	347	0,41

Los datos de la temperatura del hormigón determinados por Schindler (2004), fueron utilizados para calcular las edades equivalentes al inicio y fin de fraguado. Utilizando estas edades equivalentes, determinó los valores del grado de hidratación  $\alpha(t_e)$  correspondientes al inicio y fin de fraguado del hormigón.

Como se observa en la tabla 2, los valores del inicio y fin de fraguado pueden ser muy distintos para mezclas diferentes. Sin embargo, si en la tabla 3 comparamos una misma mezcla realizada en condiciones de laboratorio (temperatura constante) con una confeccionada en terreno (temperatura variable), **tanto el inicio como el fin de fraguado, se producen a una edad equivalente muy similar.**

Tabla 2: Tiempos de inicio y fin de fraguado obtenidos por Schindler (Schindler, 2004)

Mezcla N°	Lugar	Laboratorio (horas)		In situ (horas)			
		Fraguado inicial	Fraguado final	Parte 1		Parte 2	
				Fraguado inicial	Fraguado final	Fraguado inicial	Fraguado final
1	Dallas - May	4,9	6,5	-	-	-	-
2	Houston - May	7,9	10,1	-	-	-	-
3	Dallas - Ago	4,1	5,4	2,6	3,3	-	-
4	Houston - Ago	5,8	8,7	4,4	5,4	3,3	4,7
5	El Paso - Ago	7,0	10,3	2,9	4,1	3,5	5,4
6	Dallas - Sept	7,2	9,1	3,3	4,2	-	-
7	Houston - Oct	5,1	6,8	5,3	6,7	-	-

En la tabla 3 que se muestra a continuación, están los resultados obtenidos por Schindler (2004) en las mezclas de hormigón que evaluó. Se observa el tiempo de fraguado inicial obtenido

a través del ensayo de resistencia a la penetración, la edad equivalente ( $t_e$ ), el grado de hidratación al inicio de fraguado ( $\alpha_i$ ) y el valor de  $k_{si}$ , que corresponde a la razón entre el grado crítico de hidratación en el fraguado inicial ( $\alpha_i$ ) y la razón agua/cemento ( $a/c$ ). Esto, para los ensayos realizados tanto en terreno como en condiciones de laboratorio. La tabla 4 muestra la misma información que la tabla 3, pero esta vez para el fin de fraguado.

Tabla 3: Resumen de parámetros del inicio de fraguado obtenidos por Schindler (Schindler, 2004)

Mezcla N°	Condiciones de laboratorio				Condiciones de campo			
	Inicio de fraguado (horas)	$t_e$ (horas)	$\alpha_i$	$k_{si}$	Inicio de fraguado (horas)	$t_e$ (horas)	$\alpha_i$	$k_{si}$
1	4,9	5,9	0,052	0,14	-	-	-	-
2	7,9	9,9	0,066	0,15	-	-	-	-
3	4,1	5,7	0,080	0,19	2,6	5,0	0,060	0,14
4	5,8	7,0	0,055	0,14	4,4 3,3	7,8 7,3	0,069 0,061	0,18 0,16
5	7,0	6,9	0,054	0,10	2,9 3,5	6,6 7,5	0,050 0,060	0,09 0,11
6	7,2	5,9	0,094	0,19	3,3	5,4	0,082	0,16
7	5,1	6,4	0,059	0,14	5,3	7,1	0,067	0,16

Tabla 4: Resumen de parámetros del fin de fraguado obtenidos por Schindler (Schindler, 2004)

Mezcla N°	Condiciones de laboratorio				Condiciones de campo			
	Fin de fraguado (horas)	$t_e$ (horas)	$\alpha_f$	$k_{sf}$	Fin de fraguado (horas)	$t_e$ (horas)	$\alpha_f$	$k_{sf}$
1	6,5	8,1	0,105	0,29	-	-	-	-
2	10,1	12,7	0,105	0,24	-	-	-	-
3	5,4	7,8	0,138	0,33	3,3	7,8	0,137	0,33
4	8,7	10,4	0,109	0,28	5,4 4,7	10,3 10,8	0,108 0,116	0,28 0,30
5	10,3	12,2	0,112	0,21	4,1 5,4	10,6 11,7	0,096 0,107	0,18 0,20
6	9,1	7,7	0,133	0,27	4,2	7,9	0,136	0,27
7	6,8	9,0	0,093	0,23	6,7	9,3	0,097	0,24

---

En las tablas 3 y 4 puede verse que para la mayoría de las mezclas los valores de  $k_s$  resultan constantes, tanto para el inicio como para el fin de fraguado, sin embargo en el caso de la mezcla N°5 este factor resulta ser menor, y se debe a que la composición de dicha mezcla es a base de cemento que contiene escoria siderúrgica de alto horno, que justamente corresponde al tipo de cemento utilizado por Sotomayor (2013). Al no tener mayores antecedentes acerca del comportamiento de la escoria de alto horno, Schindler (2004) no considera este efecto. De este modo, y basado en la hipótesis de que el grado crítico de hidratación depende de la razón agua/cemento (Byfors, 1980), determinó el promedio de los valores de  $k_s$  tanto para el inicio ( $k_{si}$ ) como para el fin ( $k_{sf}$ ) de fraguado, incorporando estos valores a la fórmula de Byfors (1980) del siguiente modo:

$$\alpha_{CR} = k_s \cdot (a/c) \quad \text{Grado crítico de hidratación (Byfors, 1980)}$$

$$k_{si} = 0,15 \quad \text{Valor promedio de } k_{si} \text{ determinado por Schindler (2004)}$$

$$k_{sf} = 0,26 \quad \text{Valor promedio de } k_{sf} \text{ determinado por Schindler (2004)}$$

$$\alpha_i = 0,15 \cdot (a/c) \quad \text{Grado de hidratación en el inicio de fraguado (Schindler, 2004)}$$

$$\alpha_f = 0,26 \cdot (a/c) \quad \text{Grado de hidratación en el fin de fraguado (Schindler, 2004)}$$

Con esta información, Schindler (2004) desarrolló un modelo matemático para predecir los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón.

A partir de la ecuación 5, con la que se determina el grado de hidratación del hormigón, realizó un arreglo tal que la edad equivalente es ahora la variable dependiente:

$$t_e = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{\alpha(t_e)}{\alpha_u} \right] \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Luego sustituyó el grado de hidratación  $\alpha(t_e)$  por  $\alpha_{CR} = k_s \cdot (a/c)$ :

$$t_e = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{k_s \cdot (a/c)}{\alpha_u} \right] \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Y finalmente, con los valores  $k_{si} = 0,15$  para el inicio de fraguado y  $k_{sf} = 0,26$  para el fin de fraguado determinados por Schindler (2004), llegó a las siguientes expresiones para calcular las edades equivalentes del hormigón al inicio y fin de fraguado:

$$t_{ei} = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot a/c}{\alpha_u} \right] \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

$$t_{ef} = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot a/c}{\alpha_u} \right] \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

Donde,

- $t_{ei}$  = edad equivalente al inicio de fraguado (horas)
- $t_{ef}$  = edad equivalente al fin de fraguado (horas)
- $a/c$  = razón agua/cemento
- $\tau$  = parámetro del tiempo de hidratación (horas)
- $\beta$  = parámetro de forma de hidratación
- $\alpha_u$  = grado último de hidratación

Este modelo entrega resultados de edad equivalente del hormigón a una temperatura de referencia del hormigón de 21,1°C, correspondiente a la temperatura de ensayo estándar americana, que fue la utilizada por Schindler (2004).

### APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL INICIO Y FIN DE FRAGUADO DEL HORMIGÓN

En esta sección se determinará teóricamente el tiempo de fraguado de los hormigones elaborados en el trabajo de titulación desarrollado previamente por Sotomayor (2013), que consistió en analizar de manera práctica diferentes aspectos del fraguado del hormigón.

Tabla 5: Hormigones ensayados por Sotomayor (Sotomayor, 2013)

Hormigón grado	Grado del cemento utilizado
H20	Corriente
H25	
H30	
H20	Alta Resistencia
H25	
H30	

Para poder aplicar el modelo matemático presentado anteriormente, es necesario determinar los parámetros de hidratación  $\tau$ ,  $\beta$  y  $\alpha_u$  (ecuaciones 7, 8 y 9 respectivamente). Para esto, es preciso conocer el detalle de la composición química del cemento. Los cementos que se comercializan en Chile, no tienen una especificación exacta de sus proporciones, sino más bien, sólo se conocen los rangos aproximados de clínquer y adiciones en el cemento. A continuación se muestra la información disponible, correspondiente a las proporciones de los componentes del cemento grado corriente y alta resistencia utilizados por Sotomayor (2013):

Tabla 6: Proporción de los componentes del cemento Bío Bío Siderúrgico grado corriente comercializado en Chile (Elaboración propia)

Fuente	Proporción de los componentes del cemento siderúrgico grado corriente	
	Clínquer	Escoria
Requisito NCh 148	25 - 70%	30 - 75%
Información fabricante	30 - 60%	40 - 70%

Tabla 7: Proporción de los componentes del cemento Bío Bío Siderúrgico grado alta resistencia comercializado en Chile (Elaboración propia)

Fuente	Proporción de los componentes del cemento siderúrgico grado alta resistencia	
	Clínquer	Escoria
Requisito NCh 148	$\geq 70\%$	$\leq 30\%$
Información fabricante	70 - 80%	20 - 30%

En las tablas 6 y 7 se observa que los rangos que el clínquer y la escoria pueden adoptar son muy amplios. Además, el clínquer está formado por una serie de compuestos cuyas proporciones se desconocen más aún.

Específicamente se necesita la siguiente información del cemento para poder definir los parámetros de hidratación  $\tau$ ,  $\beta$  y  $\alpha_u$ :

$p_{C3A}$  = peso de  $C_3A$  en relación al contenido total de cemento

$p_{C3S}$  = peso de  $C_3S$  en relación al contenido total de cemento

$p_{SO_3}$  = peso de  $SO_3$  en relación al contenido total de cemento

$CaO$  = Cal libre

$Blaine$  = valor Blaine, superficie específica del cemento ( $m^2/kg$ )

$p_{SLAG}$  = masa de escoria siderúrgica de alto horno en sustitución de cemento

$p_{FA}$  = masa de cenizas volantes en sustitución de cemento

$p_{FACaO}$  = peso de  $CaO$  en relación al contenido de cenizas volantes

---

Esta información se obtiene a través de un análisis químico del cemento. Sin embargo, para efecto de este trabajo se utilizará información obtenida por otros autores, en ensayos de hormigones con similares características a las de Sotomayor (2013).

Como el proceso de fraguado del hormigón es dependiente de las características del cemento, principalmente de su composición y su finura, es importante dejar en claro que para lograr un alto grado de precisión en los resultados, necesariamente se debe realizar el análisis químico al cemento para obtener el detalle de su composición.

### **Determinación de los parámetros de hidratación**

Los parámetros de hidratación  $\tau$  y  $\beta$  se adoptarán de valores típicos obtenidos por Schindler (2003) para cementos que contienen adiciones de escoria (ver tabla 8). Para la determinación de los parámetros  $\tau$  y  $\beta$  de proporciones de escoria diferentes a las indicadas, se extrapolará linealmente para obtener una aproximación de estos.

Tabla 8: Parámetros de hidratación para cementos con adiciones de escoria (Schindler, 2003)

<b>Contenido de escoria en el cemento</b>	<b>Parámetros de hidratación</b>	
	$\beta$	$\tau$ (horas)
Sin escoria*	0,905	13,69
30%	0,625	25,22
50%	0,554	38,22
75%	0,465	54,47

\*Cemento portland puro, sin contenido de escoria.

Por otro lado, el grado último de hidratación  $\alpha_u$  será determinado de acuerdo a la ecuación 9 para cada hormigón en particular, según la razón agua/cemento y al contenido de escoria en el cemento.

### **Cálculo del tiempo de fraguado para los diferentes hormigones según modelo matemático**

Para el cálculo del tiempo de inicio y fin de fraguado de los hormigones elaborados por Sotomayor (2013), se utilizarán las ecuaciones 11 y 12 presentadas anteriormente.

Como no se conocen con exactitud las proporciones de clínquer y escoria que contiene el cemento, se considerarán los dos extremos posibles indicados en las tablas 6 y 7 para el cemento grado corriente y alta resistencia respectivamente (se considerarán los rangos exigidos por la

norma NCh 148). La tabla 9 muestra las proporciones que serán consideradas, en esta se indican cuatro combinaciones posibles de clínquer y escoria, dos para el cemento grado corriente (A y B), y dos para el caso del cemento grado alta resistencia (C y D).

Tabla 9: Combinaciones límite de clínquer y escoria contenidas en el cemento, que serán utilizadas en los posteriores cálculos (Norma NCh 148)

Grado del cemento	Combinación	Proporción de los componentes del cemento		Contenido de escoria de alto horno
		Clínquer	Escoria	
Corriente	A	25%	75%	Contenido máximo de escoria en cemento grado corriente según NCh 148
	B	70%	30%	Contenido mínimo de escoria en cemento grado corriente según NCh 148
Alta Resistencia	C	70%	30%	Contenido máximo de escoria en cemento grado alta resistencia según NCh 148
	D	100%	-	Cemento portland (no contiene escoria)

### Hormigón H20 en base a cemento grado corriente

$$a/c = 0,56$$

#### Combinación A

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,56}{0,194 + 0,56} + 0,30 \cdot 0,75 = 0,991$$

$$t_{ei} = 54,47 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,56}{0,991} \right] \right)^{\frac{1}{0,465}} = 7,81hr \approx 7 : 49$$

$$t_{ef} = 54,47 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,56}{0,991} \right] \right)^{\frac{1}{0,465}} = 13,43hr \approx 13 : 26$$

---

**Combinación B**

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,56}{0,194 + 0,56} + 0,30 \cdot 0,30 = 0,856$$

$$t_{ei} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,56}{0,856} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 6,55hr \approx 6 : 33$$

$$t_{ef} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,56}{0,856} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 10,10hr \approx 10 : 06$$

**Hormigón H20 en base a cemento grado alta resistencia**

$$a/c = 0,63$$

**Combinación C**

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,63}{0,194 + 0,63} + 0,30 \cdot 0,30 = 0,878$$

$$t_{ei} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,63}{0,878} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 7,09hr \approx 7 : 54$$

$$t_{ef} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,63}{0,878} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 11,01hr \approx 11 : 06$$

**Combinación D**

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,63}{0,194 + 0,63} = 0,788$$

$$t_{ei} = 13,69 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,63}{0,788} \right] \right)^{-\frac{1}{0,905}} = 5,96hr \approx 5 : 58$$

---

$$t_{ef} = 13,69 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,63}{0,788} \right] \right)^{-\frac{1}{0,905}} = 8,31hr \approx 8 : 19$$

### **Hormigón H25 en base a cemento grado corriente**

$$a/c = 0,50$$

#### ***Combinación A***

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,50}{0,194 + 0,50} + 0,30 \cdot 0,75 = 0,968$$

$$t_{ei} = 54,47 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,50}{0,968} \right] \right)^{-\frac{1}{0,465}} = 7,23hr \approx 7 : 14$$

$$t_{ef} = 54,47 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,50}{0,968} \right] \right)^{-\frac{1}{0,465}} = 12,17hr \approx 12 : 10$$

#### ***Combinación B***

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,50}{0,194 + 0,50} + 0,30 \cdot 0,30 = 0,833$$

$$t_{ei} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,50}{0,833} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 6,18hr \approx 6 : 11$$

$$t_{ef} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,50}{0,833} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 9,36hr \approx 9 : 22$$

---

### **Hormigón H25 en base a cemento grado alta resistencia**

$$a/c = 0,57$$

#### ***Combinación C***

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,57}{0,194 + 0,57} + 0,30 \cdot 0,30 = 0,859$$

$$t_{ei} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,57}{0,859} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 6,62hr \approx 6 : 37$$

$$t_{ef} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,57}{0,859} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 10,23hr \approx 10 : 14$$

#### ***Combinación D***

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,57}{0,194 + 0,57} = 0,769$$

$$t_{ei} = 13,69 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,57}{0,769} \right] \right)^{-\frac{1}{0,905}} = 5,74hr \approx 5 : 44$$

$$t_{ef} = 13,69 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,57}{0,769} \right] \right)^{-\frac{1}{0,905}} = 7,89hr \approx 7 : 53$$

### **Hormigón H30 en base a cemento grado corriente**

$$a/c = 0,45$$

#### ***Combinación A***

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,45}{0,194 + 0,45} + 0,30 \cdot 0,75 = 0,945$$

---

$$t_{ei} = 54,47 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,45}{0,945} \right] \right)^{-\frac{1}{0,465}} = 6,76hr \approx 6 : 45$$

$$t_{ef} = 54,47 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,45}{0,945} \right] \right)^{-\frac{1}{0,465}} = 11,17hr \approx 11 : 10$$

### **Combinación B**

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,45}{0,194 + 0,45} + 0,30 \cdot 0,30 = 0,810$$

$$t_{ei} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,45}{0,810} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 5,88hr \approx 5 : 53$$

$$t_{ef} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,45}{0,810} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 8,77hr \approx 8 : 46$$

### **Hormigón H30 en base a cemento grado alta resistencia**

$$a/c = 0,52$$

### **Combinación C**

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,52}{0,194 + 0,52} + 0,30 \cdot 0,30 = 0,841$$

$$t_{ei} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,52}{0,841} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 6,31hr \approx 6 : 18$$

$$t_{ef} = 25,22 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,52}{0,841} \right] \right)^{-\frac{1}{0,625}} = 9,61hr \approx 9 : 36$$

---

### Combinación D

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot 0,52}{0,194 + 0,52} = 0,751$$

$$t_{ei} = 13,69 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,15 \cdot 0,52}{0,751} \right] \right)^{-\frac{1}{0,905}} = 5,55hr \approx 5 : 33$$

$$t_{ef} = 13,69 \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,26 \cdot 0,52}{0,751} \right] \right)^{-\frac{1}{0,905}} = 7,54hr \approx 7 : 33$$

### Resumen de resultados

De los resultados teóricos obtenidos anteriormente, se adoptó el más cercano al resultado práctico, que en todos los casos corresponde al hormigón cuyo cemento contiene el menor porcentaje posible de escoria de alto horno. En la tabla 10 se presenta una comparación de los tiempos de fraguado entre los resultados prácticos obtenidos en los ensayos de laboratorio por Sotomayor (2013) y los resultados teóricos determinados según modelo matemático, se indica también la temperatura ambiente promedio medida en los ensayos.

Tabla 10: Comparación teórico-práctica del tiempo de fraguado de los hormigones grado H20, H25 y H30 confeccionados por Sotomayor (2013) (Elaboración propia)

Grado hormigón	Grado del cemento	Temperatura ambiente de ensayo, °C	Tiempo de fraguado	Resultado práctico	Resultado teórico
H20	Corriente	19,2	Inicial	3:15	6:33
			Final	5:50	10:06
	Alta resistencia	19,6	Inicial	3:10	5:58
			Final	4:45	8:19
H25	Corriente	17,5	Inicial	3:45	6:11
			Final	6:25	9:22
	Alta resistencia	19,3	Inicial	2:50	5:44
			Final	4:20	7:53
H30	Corriente	19,0	Inicial	3:35	5:53
			Final	5:35	8:46
	Alta resistencia	20,7	Inicial	3:00	5:33
			Final	4:25	7:33

---

Se observa que los resultados obtenidos a través del modelo matemático arrojan valores de tiempo de fraguado mayores que los obtenidos en los ensayos. Esto puede deberse principalmente a los siguientes motivos:

1. Los ensayos realizados por Sotomayor (2013) fueron desarrollados bajo condiciones de humedad y temperatura ambiente, lo que pudo generar que se acelere el proceso de fraguado del hormigón.
2. La validación del modelo por parte de Schindler (2004) se hizo mediante ensayos de hormigones mayoritariamente en base a cementos con adiciones de cenizas volantes, no con cementos a base de adiciones de escoria de alto horno, que fue el tipo de cemento utilizado por Sotomayor (2013). En relación a esto, Schindler (2004) señala que “cuando se utiliza escoria de alto horno, el fraguado se produce en un grado de hidratación menor”.
3. Para la utilización del modelo matemático no se contó con la información detallada de los componentes del cemento, necesaria para determinar los parámetros de hidratación, por lo que el resultado teórico es una aproximación basada en algunos datos determinados por Schindler (2003).

### **Modelo matemático modificado**

La comparación teórico-práctica del tiempo de fraguado de los hormigones tiene grandes diferencias, donde el resultado teórico duplica en tiempo al resultado práctico, sin embargo, Schindler (2004) logró aproximaciones mucho mejores cuando validó su modelo.

Como se señaló previamente, para determinar el factor  $k_s$  correspondiente a la razón entre el grado crítico de hidratación ( $\alpha$ ) y la razón agua/cemento ( $a/c$ ), Schindler (2004) calculó el promedio de los valores  $k_s$  de diversos hormigones (tablas 3 y 4), para lo que utilizó cementos con adiciones de cenizas volantes y también con adiciones de escoria. No obstante, para la mayoría de las mezclas el valor de  $k_s$  resulta constante, pero cuando se utiliza escoria de alto horno, el fraguado se produce en un grado de hidratación menor. Este efecto se presenta en los tres casos en los que empleó escoria. La razón de este efecto no está clara, y en base a la escasa información disponible sobre el comportamiento de la escoria de alto horno, Schindler (2004) omite este efecto y no modifica el modelo de fraguado cuando se usa escoria.

Como Sotomayor (2013) ensayó mezclas de hormigón en base a cemento con adiciones de escoria, ahora se modificará el modelo matemático desarrollado por Schindler (2004), para esto se utilizarán únicamente los valores de  $k_s$  derivados del cemento con adiciones de escoria (ver tablas 3 y 4), esto porque los cementos utilizados por Sotomayor (2013) son en base a este tipo de adiciones. De este modo los valores de  $k_{s,i}=0,10$  y  $k_{s,f}=0,21$  serán utilizados en las ecuaciones 11 y 12 quedando de la siguiente manera:

$$t_{ei} = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,10 \cdot a/c}{\alpha_u} \right] \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

$$t_{ef} = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,21 \cdot a/c}{\alpha_u} \right] \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (14)$$

Los resultados de este modelo teórico modificado se muestran en la tabla 11, se puede ver que los resultados teóricos se acercan un poco más a los resultados prácticos, pero aún la aproximación no es buena.

Tabla 11: Resultado del tiempo de fraguado según modelo teórico modificado (Elaboración propia)

Grado hormigón	Grado del cemento	Temperatura ambiente de ensayo, °C	Tiempo de fraguado	Resultado práctico	Resultado teórico modificado
<b>H20</b>	Corriente	19,2	Inicial	3:15	5:04
			Final	5:50	8:25
	Alta resistencia	19,6	Inicial	3:10	4:55
			Final	4:45	7:13
<b>H25</b>	Corriente	17,5	Inicial	3:45	4:49
			Final	6:25	7:52
	Alta resistencia	19,3	Inicial	2:50	4:46
			Final	4:20	6:54
<b>H30</b>	Corriente	19,0	Inicial	3:35	4:37
			Final	5:35	7:25
	Alta resistencia	20,7	Inicial	3:00	4:37
			Final	4:25	6:38

### Modelo matemático calibrado

Por último, para alcanzar un mejor acercamiento del modelo matemático con los resultados prácticos, se utilizarán valores  $k_s$  calibrados de tal manera que logren la mayor cercanía posible a los resultados prácticos. Esto se logra con los valores  $k_{si}=0,05$  y  $k_{sf}=0,12$ . Así las ecuaciones 11 y 12 quedan de la siguiente forma:

$$t_{ei} = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,05 \cdot a/c}{\alpha_u} \right] \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (15)$$

$$t_{ef} = \tau \cdot \left( -\ln \left[ \frac{0,12 \cdot a/c}{\alpha_u} \right] \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (16)$$

En la tabla 12 se ilustran los resultados del modelo teórico calibrado (ecuaciones 15 y 16). Se observa que estos se acercan mucho más a los resultados prácticos que los obtenidos con el modelo original.

Tabla 12: Resultado del tiempo de fraguado según modelo teórico calibrado (Elaboración propia)

Grado hormigón	Grado del cemento	Temperatura ambiente de ensayo, °C	Tiempo de fraguado	Resultado práctico	Resultado teórico calibrado
<b>H20</b>	Corriente	19,2	Inicial	3:15	3:32
			Final	5:50	5:40
	Alta resistencia	19,6	Inicial	3:10	3:46
			Final	4:45	5:20
<b>H25</b>	Corriente	17,5	Inicial	3:45	3:23
			Final	6:25	5:22
	Alta resistencia	19,3	Inicial	2:50	3:40
			Final	4:20	5:10
<b>H30</b>	Corriente	19,0	Inicial	3:35	3:16
			Final	5:35	5:07
	Alta resistencia	20,7	Inicial	3:00	3:35
			Final	4:25	5:00

Si bien los resultados teóricos en este caso son muy cercanos a los resultados prácticos, con la información manejada hasta aquí no es posible generalizar el modelo matemático para los hormigones utilizados en Chile. Por otra parte, Schindler (2004) encontró que cuando se utiliza escoria de alto horno como adiciones del cemento, el fraguado del hormigón se produce en un grado de hidratación anterior. De este modo, se recomienda investigar más a fondo la interacción entre el fraguado y la escoria de alto horno para llegar a un modelo matemático confiable.

Con respecto a la validez del modelo matemático calibrado, es importante señalar que, por un lado es válido para hormigones a base de cemento con adiciones de escoria de alto horno, y además para ciertas condiciones de temperatura ambiente, en este caso, las comprendidas entre

---

17 y 20°C, que de acuerdo a la tabla 12 es al rango promedio de temperaturas en los ensayos de Sotomayor (2013).

Sin dudas que este modelo cuenta con una serie de ventajas respecto a los ensayos para determinar el tiempo de fraguado, entre ellas, una de las más notables es el costo y el tiempo que demanda. Al ser un modelo teórico no es necesario incurrir en gastos para su utilización, además de obtener la estimación del tiempo de fraguado de forma inmediata.

Entre las desventajas encontramos principalmente el hecho de no contar fácilmente en Chile con la información específica de los componentes del cemento. Otra desventaja es que a pesar del buen grado de precisión que su autor determinó, no logrará el mismo grado de exactitud que los ensayos directos.

## **CALORÍMETRO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO**

Hoy en día existen nuevas formas mucho más precisas y eficientes para medir el tiempo de fraguado del hormigón. Es el caso del calorímetro F-Cal 4000/8000 de la marca Calmetrix (figura 2). Este equipo permite medir el desarrollo de la temperatura del hormigón en el tiempo. Para ello, mediante un computador conectado al equipo, se ingresan las especificaciones del hormigón a ensayar a través de un software (figura 3). Luego es necesario extraer una muestra de hormigón, la que debe ser colocada en los espacios destinados para esto en el calorímetro.



Figura 2: Calorímetro (www.calmetrix.com)

Sample 1 (a) Sample 2 Sample 3 Sample 4

Mix ID  Water / Cement Ratio 0.00

Cement Source / ID  Cement Content 0.00 Units lbs / cy

SCM 1: Type None Percent 0.00 Source

SCM 2: Type None Percent 0.00 Source

SCM 3: Type None Percent 0.00 Source

Admix 1: Name  Dose 0.00 Units oz / cwt

Admix 2: Name  Dose 0.00 Units oz / cwt

Admix 3: Name  Dose 0.00 Units oz / cwt

Workability: Type slump Measure 0.00 Units inches Unit Weight 0 Units lbs / cft

(c) Mix Date / Time May 04, 2010 22:59 Mix Temperature 32.0 % Air 0.0 (b) Sensor Enabled

Figura 3: Pantalla donde se ingresan las características de los materiales componentes del hormigón (www.calmetrix.com)

Una vez ingresada la información correspondiente al hormigón a ensayar, es posible desconectar el calorímetro de la computadora, permitiendo que el equipo trabaje de forma independiente. Los resultados se pueden analizar de manera instantánea o posterior a los ensayos. Estos son entregados en una computadora a través de un software como se ve en la siguiente figura:

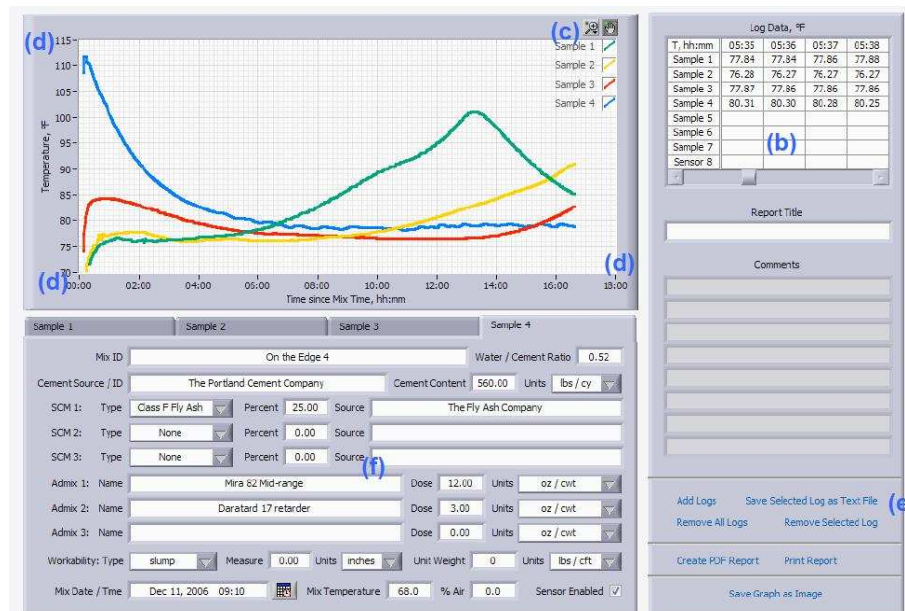


Figura 4: Pantalla de datos y resultados de la temperatura de las muestras de hormigón (www.calmetrix.com)

El software calcula los tiempos de inicio y fin de fraguado de cada muestra de hormigón, además muestra el desarrollo de la temperatura durante el proceso de fraguado, como se observa a continuación:

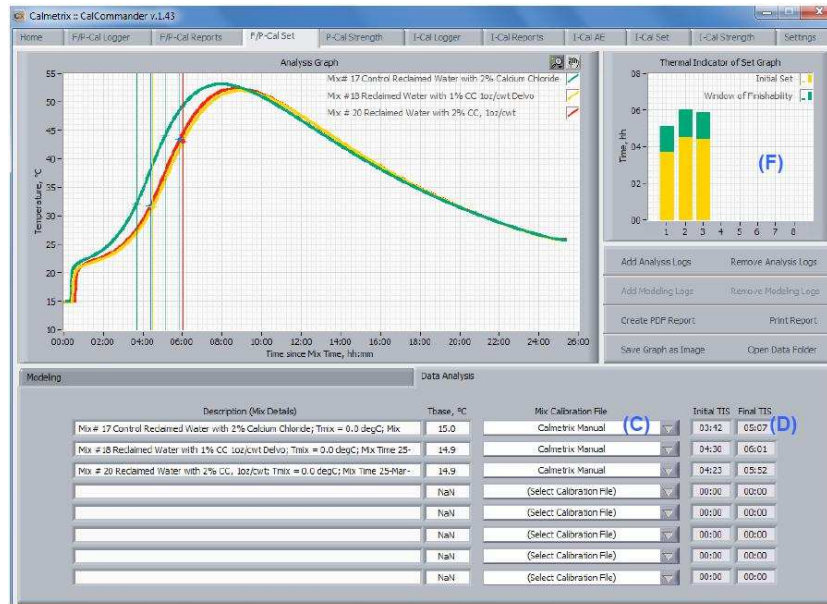


Figura 5: Resultados del tiempo de fraguado y desarrollo de la temperatura de las muestras de hormigón (www.calmetrix.com)

## Evaluación del calorímetro

Este equipo presenta mayoritariamente ventajas, una de ellas es la simplicidad con que obtiene los resultados del tiempo de fraguado, a diferencia de los ensayos de resistencia a la penetración, donde es necesario realizar penetraciones cada 15 minutos hasta alcanzar el fin de fraguado, este equipo entrega los resultados a través de un software que automáticamente detecta y entrega de manera amigable los tiempos de inicio y fin de fraguado. Otra ventaja es que se pueden ensayar hasta 8 muestras de diferentes hormigones al mismo tiempo. Al igual que el penetrómetro, este equipo también es transportable.

Al ser un equipo semiadiabático, entrega resultados a una misma edad equivalente, no importando la condición de exposición.

Dentro de las desventajas está que, al menos en Chile, la normativa no lo considera para determinar el tiempo de fraguado del hormigón. Por otro lado, es necesario tener ciertos cuidados para no dañar el equipo.

---

## IMPORTANCIA Y APLICACIONES DEL TIEMPO DE FRAGUADO DEL HORMIGÓN

### Importancia del tiempo de fraguado

Saber el tiempo de fraguado del hormigón es una propiedad física muy importante, el objetivo de las pruebas del tiempo de fraguado es determinar el lapso desde que el cemento entra en contacto con el agua hasta que el hormigón deja de ser fluido y plástico (fraguado inicial) y el tiempo requerido por el hormigón para adquirir cierto grado de dureza (fraguado final).

El fraguado inicial indica el momento en el cual la masa ya no puede ser vibrada debido a que ha adquirido la resistencia suficiente en la cual puede dañar la estructura interna (Gabalec, 2008), por lo que es deseable que no ocurra muy pronto para dar tiempo al transporte y colocación del hormigón. Sin embargo, una vez que el hormigón ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido.

La determinación del fraguado inicial y final es muy poco precisa, Gabalec (2008) señala que normalmente el fraguado inicial ocurre entre 2 y 4 horas después de realizada la mezcla y el fraguado final ocurre entre 4 y 8 horas.

A continuación se señalan algunas ventajas y desventajas según la velocidad de fraguado:

Tabla 13: Ventajas y desventajas de un fraguado rápido en el hormigón (Elaboración propia)

FRAGUADO RÁPIDO	
Ventajas	Desventajas
<p>Genera mayor dinamismo en la ejecución de las obras</p> <p>Disminuye los costos, al reducir los plazos de desmolde y alzaprimado</p> <p>Aumenta la resistencia a corto plazo</p> <p>Disminuye el período en que el hormigón está expuesto a posibles agrietamientos por retracción plástica. Esto, siempre que se evite la evaporación inmediatamente después de su colocación, por ejemplo, a través de un adecuado proceso de curado</p>	<p>Afecta la trabajabilidad del hormigón, reduciendo el tiempo de transporte y generando dificultades de colocación, compactación y acabado superficial</p> <p>En hormigones en masa puede dar origen a gradientes de temperatura, en su masa, lo suficientemente elevadas para generar fisuras</p> <p>Disminuye las resistencias a largo plazo</p>

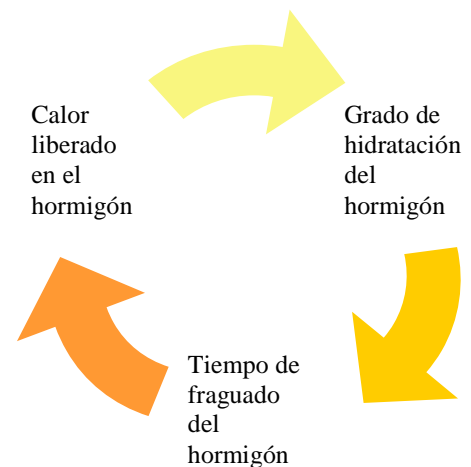
Tabla 14: Ventajas y desventajas de un fraguado lento en el hormigón (Elaboración propia)

<b>FRAGUADO LENTO</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<p>Otorga el tiempo suficiente para la trabajabilidad del hormigón: tiempo de transporte, colocación, compactación y acabado superficial</p> <p>Incrementa las resistencias a mediano y largo plazo</p> <p>Reduce los gradientes de temperatura del hormigón en masa, ayudando a prevenir posibles fisuras</p> <p>Ayuda a contrarrestar los efectos de una temperatura elevada y baja humedad relativa del aire</p>	<p>Retardo en el desarrollo de las resistencias mecánicas</p> <p>Retraso en la ejecución de las obras</p> <p>Mayores costos, producto de la necesidad de mayores plazos de desmolde y del retiro de alzaprimsas</p> <p>Aumento del riesgo de fisuración por retracción plástica, al permanecer el hormigón más tiempo en estado plástico, que es cuando se encuentra vulnerable a este fenómeno</p>

### Aplicaciones del tiempo de fraguado del hormigón

En esta sección se entregan algunas generalidades del uso que se le puede dar a los tiempos de inicio y fin de fraguado dependiendo de lo que se desee lograr en el hormigón.

Calor desarrollado en el hormigón: de acuerdo al modelo teórico desarrollado por Schindler (2004), los tiempos de inicio y fin de fraguado del hormigón dependen del calor liberado en la mezcla de hormigón. Entonces, el tiempo de fraguado puede ser utilizado como un indicador del calor desarrollado en el hormigón a edades tempranas.



---

Retracción plástica: la retracción plástica es un fenómeno del hormigón que está relacionado con la pérdida paulatina del agua en la mezcla. Este fenómeno se refiere a que el hormigón experimenta variaciones de volumen cuando su estado es plástico, o sea, durante el período de fraguado, generando grietas en su superficie. La retracción no es una fuerza impuesta, sino que es una deformación que provocará tensiones de tracción (Munizaga, 2009).

La velocidad de fraguado del hormigón influye directamente en la retracción plástica. Un fraguado rápido podría estar asociado a una temperatura más elevada de lo normal en el hormigón, lo que puede causar una pérdida de agua por evaporación de la superficie del hormigón que agrave la retracción plástica. Por otro lado, no es bueno que el tiempo de fraguado sea demasiado lento, ya que este fenómeno se produce mientras el hormigón se encuentra en proceso de fraguado, aumentando de este modo la probabilidad de su ocurrencia.

Resumiendo, para reducir el riesgo de retracción plástica, es aconsejable que el hormigón desarrolle un proceso de fraguado relativamente rápido, evitando la evaporación inmediatamente después de su colocación, por ejemplo, a través de un adecuado proceso de curado.

Hormigones en masa: si se trata de hormigón en masa, al elevarse la temperatura interna el proceso de hidratación se acelera y con ello la liberación del calor de hidratación, lo que puede dar origen a gradientes de temperatura, en su masa, lo suficientemente elevadas para generar fisuras.

El tiempo de fraguado del hormigón también puede ser utilizado como una medida para reducir los efectos de las elevadas temperaturas internas del hormigón en masa, donde un fraguado lo más lento posible es la condición ideal para un adecuado desarrollo de la resistencia de este tipo de hormigones, evitando posibles fisuras.

Temperatura de conservación y humedad relativa del aire: una baja humedad relativa del aire en el ambiente que rodea un hormigón, sobre todo si va unida a temperaturas elevadas, puede producir un aumento de la velocidad de fraguado (Solas y Giani, 2010). En caso de presentarse esta situación, se puede ver afectada la trabajabilidad del hormigón e incrementar la retracción plástica generando grietas en su superficie. Por otro lado, un fraguado rápido implica mayor temperatura en el hormigón, o sea, en caso de utilizar hormigones en tiempo caluroso es deseable un fraguado lento.

La velocidad de fraguado del hormigón es determinante para lograr buenos resultados en las situaciones descritas anteriormente, donde un fraguado lento resultaría una medida adecuada para contrarrestar los efectos de una temperatura elevada y baja humedad relativa del aire. Para retardar el tiempo de fraguado del hormigón es necesario

---

utilizar cementos con una composición química menos reactiva, como por ejemplo la que se obtiene disminuyendo su finura o aumentando los porcentajes de adición (puzolanas o escorias de alto horno). Comercialmente en Chile, el cemento grado corriente cumple con estas condiciones.

*Resistencia mecánica del hormigón:* la temperatura en la masa del hormigón durante el período de fraguado, es determinante en las resistencias finales del hormigón. Se ha comprobado que las bajas temperaturas disminuyen las resistencias a temprana edad e incrementan las resistencias a mediano y largo plazo, mientras que las temperaturas elevadas producen el efecto contrario (Solas y Giani, 2010). Considerando que el tiempo de fraguado puede ser utilizado como un indicador del calor desarrollado en el hormigón a edades tempranas, se puede concluir que para incrementar la resistencia a mediano y largo plazo es necesario que el proceso de fraguado sea lo más lento posible, por el contrario, para lograr resistencias más altas en el hormigón a corto plazo, 7 y 28 días, es preciso acelerar el tiempo de fraguado.

### **Cómo controlar la velocidad de fraguado del hormigón**

Algunas medidas que ayudan a controlar la velocidad de fraguado del hormigón son las que se muestran a continuación:

- Emplear cementos de grado corriente, con adiciones de puzolana o escoria granulada de alto horno retarda la velocidad de fraguado del hormigón. El cemento grado alta resistencia produce el efecto contrario.
- Utilizar bajas dosis de cemento compatible con los requisitos de resistencia y durabilidad genera un proceso más lento de fraguado. Una dosis mayor de cemento tiende a aumentar la velocidad de fraguado.
- Mantener los áridos saturados y ubicando los acopios en lugares ventilados y a la sombra, es una medida adecuada para evitar el aumento de temperatura en estos materiales, y por consiguiente en el hormigón. Esta medida ayuda a evitar que se acelere el tiempo de fraguado del hormigón.
- Realizar un adecuado proceso de curado, o las acciones tomadas para impedir un desecamiento acelerado de la masa del hormigón son importantes para evitar que se acelere el proceso de fraguado.

---

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

### Modelo matemático

A través de este modelo se pudo determinar de manera teórica los tiempos de inicio y fin de fraguado de los hormigones elaborados por Sotomayor (2013), sin embargo, los resultados no coinciden, obteniéndose valores del tiempo de fraguado del orden de dos veces el tiempo determinado a través de ensayos.

Es muy probable que esta diferencia en los resultados se esté asociada a las siguientes razones:

1. En cuanto a los ensayos, fueron realizados bajo condiciones de humedad y temperatura ambiente, lo que pudo generar que se acelere el proceso de fraguado del hormigón.
2. La validación del modelo por parte de Schindler (2004) se hizo mediante ensayos de hormigones mayoritariamente en base a cementos con adiciones de cenizas volantes, no con cementos a base de adiciones de escoria de alto horno, que fue el tipo de cemento utilizado por Sotomayor (2013). Además, Schindler (2004) establece que “cuando se utiliza escoria de alto horno, el fraguado se produce en un grado de hidratación menor”.
3. Para la utilización del modelo matemático no se contó con la información detallada de los componentes del cemento, necesaria para determinar los parámetros de hidratación, por lo que el resultado teórico es una aproximación basada en datos determinados por Schindler (2003) en hormigones con similares características a los ensayados por Sotomayor (2013).

Se consiguió una mejor aproximación del modelo matemático utilizando los valores  $k_{si}=0,10$  y  $k_{sf}=0,21$  en el modelo matemático, estos fueron los determinados por Schindler (2004) utilizando cementos con adiciones de escoria, sin embargo esta aproximación aún se aleja de los resultados prácticos.

Con los valores  $k_{si}=0,05$  y  $k_{sf}=0,12$  para el inicio y fin de fraguado respectivamente, se logró calibrar un modelo matemático que funciona bastante bien en la predicción del tiempo de fraguado de los hormigones ensayados por Sotomayor (2013). Esto es válido para hormigones a base de cemento con adiciones de escoria de alto horno, confeccionados bajo condiciones de temperatura ambiente que van desde los 18°C hasta los 20°C, correspondiente al rango promedio de temperaturas en que se realizaron los ensayos de Sotomayor (2013).

Al analizar en números los valores obtenidos con este modelo matemático calibrado, la diferencia entre resultados teóricos y prácticos no supera los 60 minutos. En el caso de los hormigones en base a cemento grado corriente, el modelo matemático arroja valores del tiempo de fraguado con

---

20 minutos de anticipo respecto a los resultados prácticos. Mientras que para los hormigones en base a cemento grado alta resistencia, el modelo matemático entrega resultados del tiempo de fraguado con un promedio de 40 minutos de retraso respecto a los resultados prácticos.

Si bien se obtuvo una buena aproximación con el modelo matemático calibrado, es necesario profundizar este estudio en hormigones fabricados en Chile, y particularmente en hormigones en base a cemento con adiciones de escoria. De este modo sería posible establecer con claridad el grado de precisión del método. De ser necesario se debe realizar el ajuste correspondiente para obtener predicciones confiables del tiempo de fraguado del hormigón.

El modelo matemático desarrollado por Schindler (2004) entrega valores a una temperatura de referencia del hormigón de 21,1°C, que corresponde a la temperatura de ensayo estándar americana. Sería interesante estudiar un espectro más amplio de temperaturas de referencia del hormigón, por ejemplo utilizando temperaturas de 10°C, 15°C, 25°C y 30°C.

Si bien el modelo matemático resulta una manera muy rápida y económica para determinar los tiempos de fraguado del hormigón, al entregar resultados a una determinada temperatura de referencia del hormigón, limita bastante su aplicación principalmente cuando las condiciones climáticas no son estables o existe una marcada oscilación térmica. Sin embargo, sería una buena alternativa en el caso de fabricar hormigones bajo condiciones de temperatura y humedad controlada, como podría ser el caso de elementos de hormigón prefabricados.

### **Calorímetro**

El calorímetro presentado en este trabajo es una herramienta muy eficiente para determinar los tiempos de fraguado del hormigón, ya que obtiene los resultados de manera simple y rápida, sin necesidad de mantener al operador pendiente del ensayo, como lo es con el método tradicional a través del ensayo de resistencia a la penetración.

Como trabaja en condición semiadiabática y en base al calor de hidratación del hormigón, logra resultados más precisos que el método de resistencia a la penetración. Esto resulta relevante cuando se pretende estudiar o comparar el tiempo de fraguado de diferentes hormigones (trabajo de laboratorio), sin embargo, si se desea determinar el tiempo de fraguado de hormigones en obra, el método más adecuado es el indicado en la norma NCh 2183, ya que se realiza bajo condiciones reales de humedad y temperatura.

Finalmente, sería interesante realizar ensayos y estudios para determinar el inicio y fin de fraguado del hormigón en nuestro país con el calorímetro, con el fin de analizar la posibilidad de que la norma NCh 2183 lo considere como una nueva alternativa.

---

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- BYFORS, J. 1980. Plain concrete at early ages. Research 3:80, (Swedish Cement and Concrete Research Institute, Estocolmo.
- FREIESLEBEN HANSEN, P; E. PEDERSEN. 1977. Maturity computer for controlling curing and hardening of concrete. En: Nordisk Betong 1(19). Pp. 21-25.
- FREIESLEBEN HANSEN, P; E. PEDERSEN. 1985. Curing of concrete structures. En: Draft DEB-Guide to durable concrete structures, Comité Euro-International du Béton, Suiza.
- GABALEC, M. 2008. Tiempo de fraguado del hormigón. Tesis de Becarios de investigación. La Plata, Univ. Tecnológica Nacional, Fac. Regional La Plata. 28 p.
- MILLS, R. 1966. Factors Influencing Cessation of Hydration in Water-Cured Cement Pastes. En: Special Report N°90. Proceedings of the Symposium on the Structure of Portland Cement Paste and Concrete, Highway Research Board. 2 ed. Washington, D.C. Pp. 406-424.
- MUNIZAGA, G. 2009. Fisuración por retracción en hormigones: influencia del tipo de cemento. Tesis Ing. Civil. Santiago, Univ. de Chile, Fac. Cien. Físicas y Matemáticas. 141 p.
- PINTO, R; K. HOVER. 1999. Application of maturity approach to setting times. En: ACI Materials Journal 96 (6). Pp. 686-691.
- SCHINDLER, A; K. FOLLIARD. 2003. Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete. De: Advances in Cement and Concrete IX Conference. Colorado, USA. 10 p.
- SCHINDLER, A. 2003. Effect of Temperature on the Hydration of Cementitious Materials. En: ACI Materials Journal.
- SCHINDLER, A. 2004. Prediction of Concrete Setting. De: Proceedings of the RILEM International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Editado por J. Weiss, K. Kovler, J. Marchand, y S. Mindess, RILEM Publications SARL, Illinois, USA. 14 p.
- SOLAS, A; R. GIANI. 2010. Tecnología del Hormigón Avanzada. 1 ed. Santiago de Chile, Ediciones UC. 775 p.

---

SOTOMAYOR, N. 2013. Análisis comparativo del tiempo de fraguado entre hormigones grado H20, H25 y H30 en base a cemento corriente y alta resistencia. Tesis Ing. Constructor. Valdivia, Univ. Austral de Chile, Fac. Cien. Ing. 114 p.

VAN BREUGEL, K. 1997. "Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement Based Materials", Ph.D. Tesis, Segunda Edición, Delft University Press, Países Bajos.

# **ANEXO**



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela Ingeniería en Construcción

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TIEMPO DE FRAGUADO  
ENTRE HORMIGONES GRADO H20, H25 Y H30 EN BASE A  
CEMENTO CORRIENTE Y ALTA RESISTENCIA”**

**Tesis para optar al título de:**  
INGENIERO CONSTRUCTOR

**Profesor Patrocinante:**

Sr. José Arrey Díaz

Constructor Civil, especialista en hormigones

Experto en prevención de riesgos ocupacionales

**NÉSTOR GERMÁN SOTOMAYOR BAHAMONDE**

VALDIVIA – CHILE

2013

# ÍNDICE TEMÁTICO

Contenido	Página
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
OBJETIVOS	
<b>CAPÍTULO I. EL HORMIGÓN</b>	
1.1 Un poco de historia.....	1
1.2 ¿Qué es el hormigón?.....	2
1.3 Materiales componentes del hormigón.....	2
1.3.1 Cemento.....	2
1.3.2 Áridos.....	4
1.3.2.1 Requisitos de los áridos para hormigones.....	4
1.3.2.2 Ensayos destinados al diseño de dosificación.....	8
1.3.3 Agua.....	9
1.4 Propiedades del hormigón.....	10
1.4.1 Propiedades del hormigón en su estado fresco.....	10
1.4.2 Propiedades del hormigón en su etapa de endurecimiento.....	12
<b>CAPÍTULO II. FRAGUADO DEL HORMIGON</b>	
2.1 Generalidades.....	17
2.2 Importancia del tiempo de fraguado.....	17
2.3 Factores que influyen en el tiempo de fraguado.....	18
2.3.1 Temperatura ambiente.....	18
2.3.2 Grado del cemento.....	19
2.3.3 Finura del cemento.....	19
2.3.4 Razón agua/cemento.....	20
2.3.5 Humedad ambiente.....	20
2.3.6 Materia orgánica.....	20
2.3.7 Mezclado.....	21
2.4 Antecedentes relacionados con el tiempo de fraguado.....	21
2.5 Normativa.....	22
2.5.1 Aparatos y equipos.....	23
2.5.2 Procedimiento de ensayo.....	24

## ÍNDICE TEMÁTICO (continuación)

Contenido	Página
2.5.3 Expresión de resultados.....	25
2.5.3.1 Tiempo de fraguado inicial de la probeta.....	25
2.5.3.2 Tiempo de fraguado final de la probeta.....	25
2.5.3.3 Tiempo de fraguado inicial y final del hormigón.....	26
2.5.4 Informe.....	26
<b>CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	
3.1 Descripción específica de la investigación.....	27
3.1.1 Especificación e identificación de hormigones.....	28
3.1.2 Volumen de hormigón a utilizar en cada amasada.....	30
3.1.3 Preparación de mezclas de hormigón de hormigón.....	31
3.1.4 Determinación del tiempo de fraguado.....	33
3.1.5 Registro de datos e interpretación de resultados.....	35
3.2 Ensayos realizados a los áridos para la dosificación.....	40
3.2.1 Determinación de la granulometría.....	40
3.2.2 Determinación de impurezas orgánicas en las arenas.....	42
3.2.3 Determinación del material fino menor a 0,080 mm.....	42
3.2.4 Determinación de las densidades reales, densidades netas y absorción de agua.....	42
3.3 Dosificación de hormigones.....	43
3.3.1 Dosificación hormigón H20 en base a cemento corriente.....	43
3.3.1.1 Resistencia media requerida $f_r$ .....	43
3.3.1.2 Determinación de la razón agua/cemento $A/C$ .....	44
3.3.1.3 Agua de amasado $A$ .....	45
3.3.1.4 Cantidad de cemento $C$ .....	45
3.3.1.5 Volumen de áridos $V_A$ .....	45
3.3.1.6 Peso de los áridos $P_A$ .....	46
3.3.1.7 Peso de las fracciones de áridos.....	47
3.3.1.8 Resumen dosificación.....	47
3.3.2 Dosificación para las 6 mezclas de hormigón.....	48

## ÍNDICE TEMÁTICO (continuación)

Contenido	Página
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	
4.1 Resultados determinación del tiempo de fraguado.....	49
4.1.1 Hormigón H20 en base a cemento grado corriente.....	49
4.1.2 Hormigón H25 en base a cemento grado corriente.....	57
4.1.3 Hormigón H30 en base a cemento grado corriente.....	65
4.1.4 Hormigón H20 en base a cemento grado alta resistencia.....	73
4.1.5 Hormigón H25 en base a cemento grado alta resistencia.....	81
4.1.6 Hormigón H30 en base a cemento grado alta resistencia.....	89
4.2 Análisis del tiempo de fraguado de hormigones H20, H25 y H30.....	97
4.2.1 Hormigón en base a cemento grado corriente.....	97
4.2.2 Hormigón en base a cemento grado alta resistencia.....	99
4.3 Análisis del tiempo de fraguado de hormigones elaborados con cemento grado corriente versus cemento grado alta resistencia.....	102
4.3.1 Hormigón grado H20.....	102
4.3.2 Hormigón grado H25.....	105
4.3.3 Hormigón grado H30.....	107
CONCLUSIONES.....	109
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	112
ANEXO.....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Proporciones de los materiales utilizados en el hormigón.....	4
2	Medida del asentamiento del cono de Abrams.....	11
3	Agua de exudación sobre la superficie del hormigón fresco.....	12
4	Hidratación de los granos de cemento.....	20
5	Penetrómetro.....	23
6	Instrumento para medir el tiempo de fraguado de hormigones.....	24
7	Cemento grado alta resistencia y corriente utilizados para elaborar las mezclas de hormigón.....	27
8	Planta Chumpullo áridos Valdicor Limitada.....	28
9	Descripción del código de identificación utilizado en las amasadas.....	29
10	Recipientes utilizados para determinación del tiempo de fraguado.....	31
11	Mezclador mecánico utilizado para elaborar los hormigones.....	31
12	Operación de pesado del cemento para una amasada.....	32
13	Operación de llenado de los recipientes con mortero de hormigón.....	33
14	Recipientes llenos con mortero de hormigón.....	33
15	Medición de penetración para determinación del tiempo de fraguado.....	34
16	Recipiente con mortero de hormigón después de realizadas las mediciones..	34
17	Interpretación de información de mezclas de hormigón.....	35
18	Interpretación de información de medidas de penetración.....	37
19	Ubicación gráfica del inicio y fin de fraguado de probetas.....	39
20	Tiempo de fraguado inicial y final de una mezcla de hormigón.....	39
21	Resultados tiempo de fraguado para las tres mezclas gemelas de un hormigón.....	40
22	Resultado ensayo impurezas orgánicas en las arenas.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Clasificación de los cementos según su composición.....	3
2	Clasificación de los cementos según su resistencia.....	4
3	Colorímetros de referencia para determinación de impurezas orgánicas.....	5
4	Serie de tamices para áridos.....	6
5	Granulometría exigida a la arena.....	6
6	Granulometría exigida a la grava.....	7
7	Correspondencia entre tamices NCh y ASTM.....	7
8	Requisitos material fino menor que 0,080 mm.....	8
9	Requisitos absorción de agua.....	8
10	Influencia del agua y granos finos sobre la trabajabilidad.....	10
11	Valores de fluidez correspondientes a ensayos de asentamiento de cono.....	11
12	Relación de resistencias a diferentes edades para cementos grado alta resistencia y corriente.....	13
13	Tiempo de fraguado mínimo y máximo según clasificación del cemento.....	19
14	Efecto de las cenizas volantes en el tiempo de fraguado del hormigón.....	21
15	Dosificaciones utilizadas en los ensayos por Gabalec.....	22
16	Resultados obtenidos por Gabalec.....	22
17	Cemento utilizado para la elaboración de los hormigones.....	27
18	Hormigones diseñados en base a cemento grado corriente y alta resistencia	28
19	Identificación de hormigones.....	29
20	Programación de amasadas.....	30
21	Resultados granulometría de los áridos.....	41
22	Árido combinado en proporciones óptimas.....	41
23	Resultado ensayo impurezas orgánicas en las arenas.....	42
24	Resultados ensayo material fino menor a 0,080 mm.....	42
25	Resultados ensayo densidades real y neta, y absorción de agua de los áridos.....	43
26	Factor estadístico $t$ según nivel de confianza.....	43
27	Razón agua/cemento para resistencia media requerida, $f_r$ .....	44
28	Volumen estimado de agua de amasado en $m^3$ .....	45
29	Aire promedio atrapado $m^3$ .....	46
30	Resumen dosificación para $1 m^3$ de hormigón grado H20 en base a cemento grado corriente.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS (continuación)

Tabla	Página	
31	Resumen dosificaciones para <b>1 m<sup>3</sup></b> .....	48
32	Resumen dosificaciones para <b>50 lt.</b> .....	48
33	Información de hormigón H20/C/1, mezcla gemela 1.....	49
34	Resistencia a la penetración hormigón H20/C/1.....	49
35	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/1, mezcla gemela 1.....	51
36	Información de hormigón H20/C/2, mezcla gemela 2.....	51
37	Resistencia a la penetración hormigón H20/C/2.....	52
38	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, mezcla gemela 2.....	53
39	Información de hormigón H20/C/3, mezcla gemela 3.....	54
40	Resistencia a la penetración hormigón H20/C/3.....	54
41	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, mezcla gemela 3.....	56
42	Resumen tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente.....	56
43	Información de hormigón H25/C/1, mezcla gemela 1.....	57
44	Resistencia a la penetración hormigón H25/C/1.....	57
45	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, mezcla gemela 1.....	59
46	Información de hormigón H25/C/2, mezcla gemela 2.....	59
47	Resistencia a la penetración hormigón H25/C/2.....	60
48	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, mezcla gemela 2.....	61
49	Información de hormigón H25/C/3, mezcla gemela 3.....	62
50	Resistencia a la penetración hormigón H25/C/3.....	62
51	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, mezcla gemela 3.....	64
52	Resumen tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente.....	64
53	Información de hormigón H30/C/1, mezcla gemela 1.....	65
54	Resistencia a la penetración hormigón H30/C/1.....	65
55	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, mezcla gemela 1.....	67
56	Información de hormigón H30/C/2, mezcla gemela 2.....	67
57	Resistencia a la penetración hormigón H30/C/2.....	68
58	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, mezcla gemela 2.....	69
59	Información de hormigón H30/C/3, mezcla gemela 3.....	70
60	Resistencia a la penetración hormigón H30/C/3.....	70
61	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, mezcla gemela 3.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS *(continuación)*

Tabla	Página	
62	Resumen tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente.....	72
63	Información de hormigón H20/AR/1, mezcla gemela 1.....	73
64	Resistencia a la penetración hormigón H20/AR/1.....	73
65	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/1, mezcla gemela 1.....	75
66	Información de hormigón H20/AR/2, mezcla gemela 2.....	75
67	Resistencia a la penetración hormigón H20/AR/2.....	76
68	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/2, mezcla gemela 2.....	77
69	Información de hormigón H20/AR/3, mezcla gemela 3.....	78
70	Resistencia a la penetración hormigón H20/AR/3.....	78
71	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, mezcla gemela 3.....	80
72	Resumen tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado alta resistencia.....	80
73	Información de hormigón H25/AR/1, mezcla gemela 1.....	81
74	Resistencia a la penetración hormigón H25/AR/1.....	81
75	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, mezcla gemela 1.....	83
76	Información de hormigón H25/AR/2, mezcla gemela 2.....	83
77	Resistencia a la penetración hormigón H25/AR/2.....	84
78	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, mezcla gemela 2.....	85
79	Información de hormigón H25/AR/3, mezcla gemela 3.....	86
80	Resistencia a la penetración hormigón H25/AR/3.....	86
81	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, mezcla gemela 3.....	88
82	Resumen tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado alta resistencia.....	88
83	Información de hormigón H30/AR/1, mezcla gemela 1.....	89
84	Resistencia a la penetración hormigón H30/AR/1.....	89
85	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, mezcla gemela 1.....	91
86	Información de hormigón H30/AR/2, mezcla gemela 2.....	91
87	Resistencia a la penetración hormigón H30/AR/2.....	92
88	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, mezcla gemela 2.....	93
89	Información de hormigón H30/AR/3, mezcla gemela 3.....	94
90	Resistencia a la penetración hormigón H30/AR/3.....	94
91	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, mezcla gemela 3.....	96

## ÍNDICE DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
92	Resumen tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado alta resistencia.....	96
93	Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente, incluye asentamiento de cono y temperatura ambiente.....	97
94	Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente.....	98
95	Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia, incluye asentamiento de cono y temperatura ambiente.....	100
96	Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia.....	101
97	Tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	102
98	Promedio tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	103
99	Tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	105
100	Promedio tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	106
101	Tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	107
102	Promedio tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	108

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico		Página
1	Influencia de la razón agua/cemento en la resistencia a la compresión del hormigón.....	12
2	Desarrollo de la resistencia a la compresión de diferentes hormigones expresada como porcentaje en relación a la resistencia a los 28 días.....	13
3	Influencia de la humedad ambiental sobre la resistencia a la compresión....	14
4	Influencia de la temperatura sobre la resistencia a la compresión.....	14
5	Influencia de la temperatura sobre el tiempo de fraguado.....	18
6	Medidas de penetración en forma gráfica.....	38
7	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/1, probeta 1.....	50
8	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/1, probeta 2.....	50
9	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/1, probeta 3.....	51
10	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, probeta 1.....	52
11	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, probeta 2.....	53
12	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, probeta 3.....	53
13	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, probeta 1.....	55
14	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, probeta 2.....	55
15	Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, probeta 3.....	56
16	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, probeta 1.....	58
17	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, probeta 2.....	58
18	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, probeta 3.....	59
19	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, probeta 1.....	60
20	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, probeta 2.....	61
21	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, probeta 3.....	61
22	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, probeta 1.....	63
23	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, probeta 2.....	63
24	Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, probeta 3.....	64
25	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, probeta 1.....	66
26	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, probeta 2.....	66
27	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, probeta 3.....	67
28	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, probeta 1.....	68
29	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, probeta 2.....	69
30	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, probeta 3.....	69
31	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, probeta 1.....	71

## ÍNDICE DE GRÁFICOS *(continuación)*

Gráfico	Página	
32	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, probeta 2.....	71
33	Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, probeta 3.....	72
34	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/1, probeta 1.....	74
35	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/1, probeta 2.....	74
36	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/1, probeta 3.....	75
37	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/2, probeta 1.....	76
38	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/2, probeta 2.....	77
39	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/2, probeta 3.....	77
40	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, probeta 1.....	79
41	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, probeta 2.....	79
42	Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, probeta 3.....	80
43	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, probeta 1.....	82
44	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, probeta 2.....	82
45	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, probeta 3.....	83
46	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, probeta 1.....	84
47	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, probeta 2.....	85
48	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, probeta 3.....	85
49	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, probeta 1.....	87
50	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, probeta 2.....	87
51	Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, probeta 3.....	88
52	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, probeta 1.....	90
53	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, probeta 2.....	90
54	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, probeta 3.....	91
55	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, probeta 1.....	92
56	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, probeta 2.....	93
57	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, probeta 3.....	93
58	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, probeta 1.....	95
59	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, probeta 2.....	95
60	Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, probeta 3.....	96
61	Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente.....	98
62	Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente.....	99

## ÍNDICE DE GRÁFICOS *(continuación)*

Gráfico		Página
63	Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia.....	100
64	Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia.....	101
65	Tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	103
66	Promedio tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	104
67	Tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	105
68	Promedio tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	106
69	Tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	107
70	Promedio tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia.....	108

## RESUMEN

En la vida del hormigón, un buen manejo en la etapa inicial (estado fresco) es fundamental para lograr un adecuado desarrollo de su resistencia. En este período el hormigón adopta una consistencia plástica, esto permite su trabajabilidad (transporte, colocación y acabado).

A medida que transcurre el tiempo, el hormigón va perdiendo su plasticidad, hasta alcanzar un punto en que no puede ser vibrado sin dañar su estructura interna, la mezcla ha llegado al inicio de fraguado. Horas más tarde, el hormigón logra un estado de rigidez muy significativo, marcado por el fin de fraguado. El tiempo transcurrido entre estos dos estados se llama tiempo de fraguado.

Existen diversas variables que pueden intervenir en el tiempo de fraguado, como son la composición del cemento, la razón agua/cemento, la temperatura ambiente, las características de los áridos, etc. Esto, sumado a la escasa información en relación a este tema, han motivado esta investigación, que a través de ensayos, busca recopilar antecedentes sobre el comportamiento del tiempo de fraguado del hormigón.

En esta memoria se comparó el tiempo de fraguado inicial y final entre hormigones grado H20, H25 y H30. Además, se analizó la influencia del grado del cemento (corriente y alta resistencia) en el tiempo de fraguado inicial y final para un hormigón grado H20, para un H25 y para un H30.

Para realizar esto, se elaboraron tres mezclas de cada grado de hormigón (H20, H25 y H30) por cada grado de cemento (corriente y alta resistencia), determinando el inicio y fin de fraguado en cada mezcla.

Finalmente, se desarrolló un análisis comparativo de todos los resultados obtenidos, concluyendo en qué medida el grado del hormigón (según resistencia a la compresión) y el grado del cemento son capaces de acelerar o retardar el tiempo de fraguado del hormigón, obteniendo de este modo información más certera, que permite una mejor planificación en operaciones de transporte, colocación y acabado del hormigón.

## **ABSTRACT**

In concrete's life, a good handle in the initial stage (fresh state) is essential to achieve an appropriate development of its strength. In this period the concrete takes a plastic consistency, this allows its manoeuvrability (transport, placing and finishing).

As the time runs, the concrete is losing its plasticity, until reaching a point in which it cannot be vibrated without spoiling its internal structure, the mixture has reached to the beginning of the setting. Hours later, the concrete gets a significant rigidity state, marked by the end of the setting. The intervening time between these two status is called setting time.

There are several variables which can intervene in the setting time, such as the composition of the cement, the ratio water/cement, the room temperature, the features of the aggregates, etc. This, in addition to the lack of information in relation to this stuff, have motivated this research, which through the tests, looks for a gathering of antecedents about the behaviour of the setting time of the concrete.

In this paper the initial setting time and the final setting time between concretes of grade H20, H25 and H30 were compared. Also, the influence of the cement grade (normal and high resistance) was analysed in the initial and final setting times for a concrete grade H20, for an H25 and for an H30.

To make this, three mixtures of each concrete grade (H20, H25 and H30) were prepared for each cement grade (normal and high resistance), establishing the beginning and the end of the setting in each mixture.

Finally, a comparative analysis of every obtained result was developed, concluding in what extent the concrete grade (depending on the strength to compression) and the cement grade are able to speed up or to delay the setting time of the concrete, this way obtaining a more accurate information, which allows a better planning in transporting operations, placing, and finishing of the concrete.

## INTRODUCCIÓN

Una vez que el cemento entra en contacto con el agua en una mezcla de hormigón, se inicia un proceso de endurecimiento en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar, este estado se conoce como *fraguado inicial*, más tarde el hormigón alcanza una rigidez mucho más significativa, a la que llamamos *fraguado final*. El espacio de tiempo entre estos dos puntos es el *tiempo de fraguado*.

Normalmente el inicio de fraguado ocurre entre dos y cuatro horas después del hormigonado, y nos define el límite de manejo, o sea el tiempo por el cual el hormigón ya no puede ser mezclado adecuadamente, colocado y compactado, el fin de fraguado ocurre entre cuatro y ocho horas después del hormigonado.

La determinación del tiempo de fraguado del hormigón se realiza, prácticamente, en todo el mundo midiendo la resistencia a la penetración del hormigón a lo largo del tiempo, para lo cual se utiliza un instrumento normalizado llamado penetrómetro. En Chile, el procedimiento para determinar los tiempos de fraguado inicial y final del hormigón es establecido por la norma NCh 2183.

Hoy en día se han hecho estudios referentes a este tema en diversas partes del mundo, sin embargo, existen muchos factores que en mayor o menor medida pueden afectar el tiempo de fraguado del hormigón, entre estos están la razón agua/cemento, el grado del cemento utilizado, la temperatura ambiente, aditivos químicos, características de los áridos, entre otros.

Como cada mezcla de hormigón posee características propias según el origen de los materiales y lugar de trabajo, la presente investigación pretende conocer y tener antecedentes más específicos en esta materia, por lo que se utilizaron materiales tanto de origen nacional como regional, y en una zona específica, la Región de los Ríos.

Este estudio se desarrolló en el laboratorio LEMCO de la Universidad Austral de Chile (Valdivia), donde se confeccionaron tres mezclas de hormigón grado H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia, se determinó el inicio y fin de fraguado de estas para finalmente comparar los resultados.

La estructura de esta tesis comienza describiendo en el primer capítulo los materiales utilizados para la elaboración del hormigón, además se presentan las principales características del hormigón.

El capítulo siguiente trata exclusivamente del fraguado del hormigón, su importancia, los factores que influyen en el tiempo de fraguado y el método de medición de acuerdo a la normativa chilena.

En el tercer capítulo se describe la metodología utilizada para realizar esta investigación, desde la descripción de los materiales utilizados hasta cómo se determinaron los resultados. Se incluyen los resultados de los ensayos realizados a los áridos y se explica el método de dosificación empleado para el diseño de los hormigones.

En el cuarto capítulo se entregan los resultados de las mediciones del tiempo de fraguado y los gráficos contruidos a partir de estas, obteniendo de este modo el inicio y fin de fraguado para cada mezcla. Posterior a esto se analizan los resultados.

Finalmente se establecen las conclusiones que se obtuvieron a partir de los resultados.

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar las variaciones que experimenta el tiempo de fraguado del hormigón de acuerdo su grado de resistencia a la compresión y al grado del cemento utilizado para su elaboración.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Realizar el análisis de áridos y diseño de mezclas de prueba para dosificación de hormigones grado H20, H25 y H30.
- ✓ Confeccionar mezclas de prueba para distintos grados de hormigón y grados de cemento.
- ✓ Confeccionar probetas a partir de las mezclas de prueba según la norma NCh 2183.
- ✓ Realizar mediciones para determinar el tiempo de inicio y fin de fraguado de acuerdo al procedimiento definido en la norma NCh 2183.
- ✓ Determinar el tiempo de fraguado, inicial y final, según capítulo 5 de la norma NCh 2183.
- ✓ Expresar los resultados en tablas y gráficos que permitan una clara interpretación.
- ✓ Analizar los resultados y establecer conclusiones de acuerdo a estos.

## **CAPÍTULO I. EL HORMIGÓN**

### **1.1 UN POCO DE HISTORIA**

Sin duda, uno de los elementos más utilizados en las obras civiles hoy en día es el hormigón. Este material que se emplea desde los orígenes de la civilización en la construcción de obras, no tiene un desarrollo histórico muy conocido, Zabaleta (1992) distingue tres etapas en el desarrollo tecnológico del hormigón:

- ☑ Una primera etapa, que abarca principalmente el período comprendido entre 7.000 años a. C. hasta las cercanías del siglo I a. C. se caracteriza por la utilización de aglomerantes en la unión de bloques constituidos por materiales naturales como rocas y materiales más elaborados como ladrillos cerámicos.
- ☑ La segunda etapa, corresponde al importante desarrollo tecnológico logrado por los romanos desde el siglo I a. C., que les permitió obtener un hormigón que, además de constituir un producto que ligaba bloques, podía utilizarse para moldear partes de estructuras y estructuras completas. Este avance permitió mejorar la calidad de las fundaciones, simplificar los procedimientos y construir elementos de grandes dimensiones, resistencia y durabilidad. Sin embargo, la tecnología lograda por los romanos se perdió al decaer la vitalidad del Imperio y ser invadido por otros pueblos.
- ☑ Es en el siglo XIX se inicia la tercera y actual etapa, con el redescubrimiento del hormigón a través de la obtención del cemento como ligante hidráulico, complementado a comienzos del siglo XX con la utilización de los cementos puzolánicos. La tecnología del hormigón en esta etapa adquirió de inmediato un extraordinario ritmo de perfeccionamiento debido al esfuerzo sistemático de investigación. Así, en la actualidad se posee un buen nivel de conocimiento de muchas de las características y propiedades del hormigón, que está posibilitando la construcción de todo tipo de obras necesarias al desarrollo eficiente de la construcción en el mundo.

En lo que respecta a Chile, la primera aplicación registrada del uso del cemento corresponde a la infraestructura del puente ferroviario sobre el río Maipo en 1856, en la que se empleó cemento importado. Más tarde, en 1906 se comienza a emplear el hormigón armado en la construcción de diversas obras, ejecutadas principalmente por la Compañía Holandesa de Cemento Armado. A mediados de este mismo año abre en Chile la Fábrica de Cemento Melón, permitiendo que el empleo del hormigón se extienda y diversifique gracias al reemplazo del cemento importado por el nacional. En la actualidad la opción más habitual es el empleo de hormigón premezclado, impulsado principalmente por las garantías de calidad, costo y efectividad (Zabaleta, 1992).

## 1.2 ¿QUÉ ES EL HORMIGÓN?

El hormigón es un material constituido por áridos, cemento y agua. Eventualmente contiene también una pequeña proporción de aire y aditivos utilizados para modificar algunas de sus propiedades (Zabaleta, 1992).

Cuando estos materiales se encuentran recién mezclados, adquieren una condición plástica que permite al hormigón ser transportado y colocado en moldes, y con el tiempo lograr cierta cohesión y resistencia que lo hacen apto para su empleo en las obras de ingeniería. La idea de esta mezcla es obtener un material que reconstruya la roca original, e incluso mejore sus propiedades.

## 1.3 MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN

Se considera que el hormigón es un material heterogéneo y anisótropo, ya que los elementos de volumen son diferentes entre sí y reaccionan en forma diferente según sea la dirección de la sollicitación (Rojas, 1975). Es por esto que cada uno de los elementos que componen el hormigón deben ser lo suficientemente resistentes para soportar las sollicitaciones externas. Para comprender de mejor forma el comportamiento del hormigón, es necesario describir más detalladamente sus principales componentes.

### 1.3.1 Cemento

El cemento es un polvo muy fino, de naturaleza inorgánica y color gris. Este, al ser mezclado con agua, forma una pasta conglomerante, conocida también como *pasta de cemento*, que tiene la propiedad de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

Para la fabricación del cemento se utiliza principalmente dos materias primas: una caliza y un componente rico en sílice, constituido normalmente por arcilla o eventualmente por una escoria de alto horno. Estos componentes, luego de ser triturados, son llevados desde el lugar de extracción (canteras o minas) a la planta de cemento, donde son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de fusión incipiente (clínquerización) en un horno rotatorio, es en esta etapa donde se producen las reacciones químicas más importantes del proceso, obteniéndose un material granular denominado *clínquer*. Finalmente, el clínquer junto con otras adiciones como yeso, es sometido a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en un polvo muy fino. El cemento así obtenido se denomina *Cemento Portland*. Este es el cemento tradicional, sin embargo con el objeto de mejorar la calidad del producto o hacerlo más económico, se pueden adicionar otros productos naturales o artificiales como ser escorias, puzolanas u otros agregados, constituyendo así los *Cementos con Adiciones o Especiales*.

Entre los Cementos Especiales tenemos Cementos Siderúrgicos, Cementos Puzolánicos y Cementos con otros agregados.

Cementos Siderúrgicos: que son mezclas de Cemento Portland con escoria granulada de alto horno, la norma NCh 148 establece un 75% de escoria como máximo, según Rojas (1975) en la práctica se está utilizando aproximadamente el 50%.

Cementos Puzolánicos: se fabrican combinando Cemento Portland con puzolanas, las que pueden ser naturales (tierras volcánicas) o artificiales (cenizas volantes). La norma NCh 148 autoriza hasta un 50% de agregado puzolánico.

Cementos con otros agregados: hay cementos con agregados diferentes a los mencionados anteriormente, se trata del agregado tipo A, que es una mezcla de sustancias compuestas por un material calcáreo-arcilloso que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900 °C y otros materiales a base de óxidos de silicio, aluminio y fierro. Si el cemento contiene menos del 30% del agregado tipo A se llama Cemento Portland con agregado tipo A, y si tiene entre 30 y 50% se llama Cemento con agregado tipo A. El agregado tipo A es un producto chileno que se usó por varios años, pero que se ha dejado de usar.

Tabla 1: Clasificación de los cementos según su composición (Norma NCh 148.Of68).

Clasificación	Proporción de los componentes			
	Clínquer	Puzolana	Escoria	Agregado tipo A
Cemento Portland	100%	-	-	-
Cemento Portland Siderúrgico	$\geq 70\%$	-	$\leq 30\%$	-
Cemento Siderúrgico	25 - 70%	-	30 - 75%	-
Cemento Portland Puzolánico	$\geq 70\%$	$\leq 30\%$	-	-
Cemento Puzolánico	50 - 70%	30 - 50%	-	-
Cemento Portland con agregado tipo A	$\geq 70\%$	-	-	$\leq 30\%$
Cemento con agregado tipo A	50 - 70%	-	-	30 - 50%

Dicha norma establece además una clase para el cemento en cuya composición entran los productos que se emplean normalmente en la fabricación de cementos, cuyos requisitos y propiedades se establecen por acuerdo previo entre productor y consumidor para cumplir determinados fines, este se clasifica como *Cemento con fines especiales*.

Los cementos de cada una de las clases indicadas en la tabla 1 se clasifican además de acuerdo a su resistencia en dos grados: cemento corriente y cemento de alta resistencia, como muestra la tabla 2.

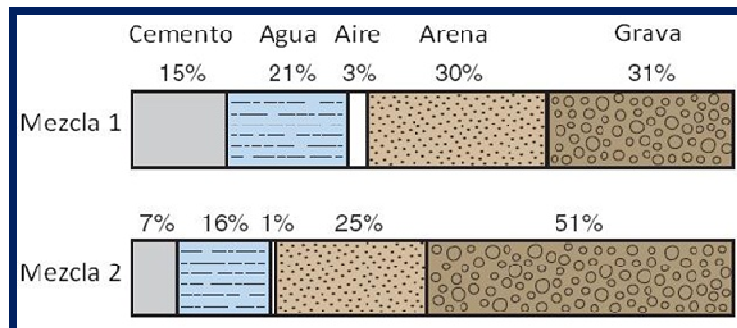
Tabla 2: Clasificación de los cementos según su resistencia (Norma NCh 148.Of68).

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a compresión		Resistencia mínima a flexión	
	Inicial mínimo min	Final máximo h	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta Resistencia	45	10	250	350	45	55

### 1.3.2 Áridos

Otro componente del hormigón es el árido, este elemento es definido por la NCh 163.Of79 como un material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaños estables. Tiene como finalidad colaborar con la neutralización de las tensiones internas que se originan en la contracción de la pasta, además de disminuir los costos del material.

Los áridos constituyen alrededor de un 60 a un 75% del volumen total del hormigón, lo que explica la importancia de la selección del árido. Deben ser de una resistencia adecuada, soportar las condiciones de exposición y ser durables (Kosmatka, 2008).

Figura 1: Proporciones de los materiales utilizados en el hormigón (Kosmatka *et al.*, 2003)

#### 1.3.2.1 Requisitos de los áridos para hormigones

Es de suma importancia la calidad de los áridos, deben estar constituidos por partículas duras, de forma y tamaño estables, limpios y libres de impurezas orgánicas, sales y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad afecten la resistencia del hormigón. Para asegurar que estén en condiciones de ser utilizados en hormigones, los áridos deben cumplir los requisitos que se muestran a continuación y que están especificados en la norma NCh 163.Of79.

Impurezas orgánicas en las arenas: el árido no debe incorporar en el hormigón productos que puedan alterar el proceso de fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Entre los que pueden producir efectos más perniciosos está la materia orgánica, contenida principalmente en la arena, la que provoca un efecto retardador del fraguado, que puede afectar la resistencia, especialmente a edades tempranas del hormigón (Zabaleta, 1992). Por este motivo, es importante detectar su existencia, para lo cual se emplea la Norma ASTM C 40-2004, la que especifica el procedimiento de ensayo para determinar la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales en los áridos finos que se emplean en hormigones. Este procedimiento consiste en sumergir una muestra de arena durante 24 horas en una solución de hidróxido de sodio y observar la coloración que toma la el líquido sobrenadante de la muestra de ensayo, se compara con cinco colorímetros (ver tabla 3), aceptándose como valor límite un color amarillo claro, específicamente el color Gardner N° 11 (disco orgánico N° 3), por el contrario, si la muestra sometida a este procedimiento produce un color más oscuro, se debe considerar que posiblemente el agregado fino sometido a ensayo contiene impurezas orgánicas dañinas.

Tabla 3: Colorímetros de referencia para determinación de impurezas orgánicas (Norma ASTM C 40-2004).

<b>Color Gardner N°</b>	<b>Disco orgánico N°</b>
5	1
8	2
11	3
14	4
16	5

Granulometría: la norma NCh 163 define la granulometría de un árido como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. El procedimiento para su determinación consiste en hacer pasar una muestra representativa del árido por una serie de tamices ordenados (de abertura decreciente) y determinar la masa de las fracciones retenidas en cada tamiz. Hecho esto, se determinan los porcentajes parciales retenidos y se expresa la granulometría en función de dichos porcentajes. Este procedimiento está normalizado por la NCh 165.Of09, que establece además los tamaños nominales de abertura para los tamices en mm, según la tabla 4.

Tabla 4: Serie de tamices para áridos (Norma NCh 165.Of09).

<b>Preferida mm</b>	<b>Complementaria mm</b>	<b>Combinada mm</b>	<b>Nominal mm</b>
75	-	75	80
-	63	63	63
-	50	50	50
37,5	-	37,5	40
-	25	25	25
19	-	19	20
-	12,5	12,5	12,5
9,5	-	9,5	10
4,75	-	4,75	5
2,36	-	2,36	2,5
1,18	-	1,18	1,25
0,600	-	0,600	0,630
0,300	-	0,300	0,315
0,150	-	0,150	0,160

La granulometría debe ser realizada al menos con la serie preferida.

La columna serie nominal corresponde a las aberturas aproximadas de los tamices y se utiliza sólo para efectos de identificación comercial.

La granulometría de los áridos debe cumplir con los límites que se indican en las tablas 5 y 6 para la arena y grava respectivamente.

Tabla 5: Granulometría exigida a la arena (Norma NCh 163.Of79).

<b>Tamices, mm</b>	<b>% acumulado que pasa</b>
9,5	100
4,75	95 - 100
2,36	80 - 100
1,18	50 - 85
0,600	25 - 60
0,300	10 - 30
0,150	2 - 10

Tabla 6: Granulometría exigida a la grava (Norma NCh 163.Of79).

Tamices mm	% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)								
	63-40	50-25	50-5	40-20	40-5	25-5	20-5	12,5-5	10-2,5
75	100	-	*)	-	*)	-	-	-	-
63	90-100	100	100	-	-	-	-	-	-
50	35-70	90-100	90-100	100	100	-	-	-	-
37,5	0-15	33-70	-	90-100	90-100	100	-	-	-
25	-	0-15	35-70	20-55	-	90-100	100	-	-
19	0-5	-	-	0-15	35-70	-	90-100	100	-
12,5	-	0-5	10-30	-	-	25-60	-	90-100	100
9,5	-	-	-	0-5	10-30	-	20-55	40-70	90-100
4,75	-	-	0-5	-	0-5	0-10	0-10	0-15	10-30
2,36	-	-	-	-	-	0-5	0-5	0-5	0-10
1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5

\*) Los grados 50-5 mm y 40-5 mm corresponden a mezclas de los grados 50-25 mm con 25-5 mm y 40-20 mm con 20-5mm, respectivamente.

En la práctica los tamices suelen identificarse según su abertura en pulgadas y números (#), la equivalencia respecto a la serie preferida se muestra a continuación.

Tabla 7: Correspondencia entre tamices NCh y ASTM (Norma NCh 165.Of09).

3"	1½"	¾"	⅜"	#4	#8	#16	#30	#50	#100
75	37,5	19	9,5	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,150

Material fino menor que 0,080 mm: para que el hormigón tenga una adecuada trabajabilidad, necesita de un cierto contenido de granos muy finos, de un tamaño menor a 0,080 mm, sin embargo un exceso de estas partículas puede resultar desfavorable, Zabaleta (1992) menciona tres modos de cómo el hormigón se ve perjudicado por un contenido excesivo de granos muy finos:

- Interfiere en el proceso de cristalización de la pasta de cemento.
- Hace necesario un mayor empleo de agua.
- Daña la adherencia entre árido y pasta de cemento.

La norma que establece el procedimiento para determinar el contenido de material fino menor a 0,080 mm es la NCh 1223.Of77, en que los valores aceptables son los que se resumen en la tabla 8.

Tabla 8: Requisitos material fino menor que 0,080 mm (Norma NCh 163.Of79).

Requisitos		Valores límites		
		Grava	Arena	
a)	para hormigón sometido a desgaste	% máximo	0,5	3,0
b)	para todo otro hormigón	% máximo	1,0	5,0

Absorción de agua: en tecnología del hormigón se define la absorción como el peso de agua que absorbe el material pétreo en 24 horas en condiciones normales de ambiente, lo que representa el volumen de poros accesibles de las partículas de áridos.

La absorción de agua de un árido está relacionada con la porosidad. Una alta porosidad es una característica desfavorable, pues está asociada normalmente a alterabilidad por parte de los agentes atmosféricos; además, introduce un factor de variabilidad en el hormigón al dificultar el control de la dosis de agua, debido a que la cantidad de agua absorbida por el árido resulta dependiente de las condiciones de empleo del hormigón en obra, en particular de los tiempos de espera que se producen desde la elaboración hasta la puesta en obra del hormigón (Zabaleta, 1992).

La norma NCh 163 fija los siguientes requisitos de absorción de agua para grava y arena:

Tabla 9: Requisitos absorción de agua (Norma NCh 163.Of79).

Requisito		Valores límites	
		Grava	Arena
Absorción de agua (porosidad)	% máximo	2	3

Los procedimientos para determinar la absorción de agua de las gravas y las arenas se encuentran en las normas NCh 1117.Of2010 y NCh 1239.Of77 respectivamente.

### ***1.3.2.2 Ensayos destinados al diseño de dosificación***

Además de los ensayos destinados a control de recepción descritos anteriormente, es necesario conocer la información particular de los áridos, esto con la finalidad de poder diseñar la dosificación de los hormigones. Los ensayos realizados con este objetivo son los siguientes:

Granulometría: descrito en *1.3.2.1 Requisitos de los áridos para hormigones*.

Densidades real y neta: la densidad real y neta de los áridos permite conocer los volúmenes compactos del árido con el fin de dosificar hormigones. La norma NCh 1117.Of2010 establece los procedimientos para determinar la densidad real y neta de los áridos gruesos, mientras la norma NCh 1239.Of77 lo hace para los áridos finos.

Absorción de agua: descrito en *1.3.2.1 Requisitos de los áridos para hormigones*.

Humedad: previo a la confección del hormigón es necesario conocer el contenido de humedad de los áridos, de esta manera es posible corregir la cantidad de agua a utilizar en la dosificación. El procedimiento para la determinación de la humedad de los áridos se realiza de acuerdo la norma NCh 1515.Of79.

### **1.3.3 AGUA**

El agua cumple un papel importante en la fabricación del hormigón, ya que su presencia condiciona el desarrollo de las propiedades tanto en su estado fresco como en la etapa de su endurecimiento. Zabaleta (1992) indica dos roles que desempeña el agua en condición de componente del hormigón:

- Participa en el proceso de hidratación del cemento, el cual no puede tener lugar sin su presencia.
- Otorga la trabajabilidad necesaria al hormigón, siendo determinante para definir su fluidez.

La precisión en las dosis de agua en la mezcla es un factor muy relevante para no alterar las características del hormigón diseñado. Un exceso de agua de amasado actúa como retardador de endurecimiento y produce un daño notable en la resistencia mecánica del hormigón, por otro lado, la falta de agua también es perjudicial, 10% menos de agua baja la resistencia de compresión en 15%, y 20% de falta de agua disminuye en 60% la resistencia en relación al hormigón de dosis óptima, incluso el tiempo de fraguado es más corto cuando se utiliza menos agua (Rojas, 1975).

En Chile la norma que establece los requisitos del agua a utilizar en el amasado de hormigones es la NCh 1498 Of.82, y señala que el agua potable de la red puede emplearse como agua de amasado siempre que no se contamine antes de su uso. Todo otro tipo de agua debe ser analizada.

## 1.4 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Una vez hecha la mezcla de hormigón, se desarrolla un proceso de hidratación del cemento, durante la cual el hormigón presenta una etapa inicial en que su estado es plástico. Posteriormente se inicia una etapa de endurecimiento, en que producto de un complejo proceso físico-químico de larga duración, el hormigón se transforma de un material plástico en un sólido.

El hormigón presenta propiedades diferentes en ambas etapas. A continuación se resumen las más importantes, tanto en su estado fresco como en su etapa de endurecimiento.

### 1.4.1 Propiedades del hormigón en estado fresco

Trabajabilidad: la trabajabilidad o docilidad es la facilidad que tiene un hormigón fresco para ser mezclado, transportado y colocado en sitio, sin perder su homogeneidad (Rojas, 1975). La trabajabilidad es el conjunto de dos características: la fluidez y la consistencia del hormigón.

- ☑ La fluidez del hormigón proviene del frotamiento de las partículas granulares entre sí.
- ☑ Y la consistencia del hormigón proviene de la cohesión de la masa, producida por la atracción entre las partículas.

La docilidad del hormigón está directamente relacionada con el contenido de algunos de sus componentes, principalmente con los de agua y de partículas finas, los cuales actúan en sentido contrario entre sí (ver tabla 10).

Tabla 10: Influencia del agua y granos finos sobre la trabajabilidad (Zabaleta, 1992).

Trabajabilidad	Contenido de	
	Agua	Granos finos
Fluidez	↑	↓
Consistencia	↓	↑

Para medir la trabajabilidad se utiliza el método del asentamiento del cono de Abrams. El procedimiento para su determinación está establecido en la norma NCh 1019.Of2009 y consiste básicamente en llenar un molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas, en tres capas apisonadas con 25 golpes de varilla-pisón, y luego de retirar el molde, medir el descenso o asentamiento que experimenta la masa de hormigón colocada en su interior.

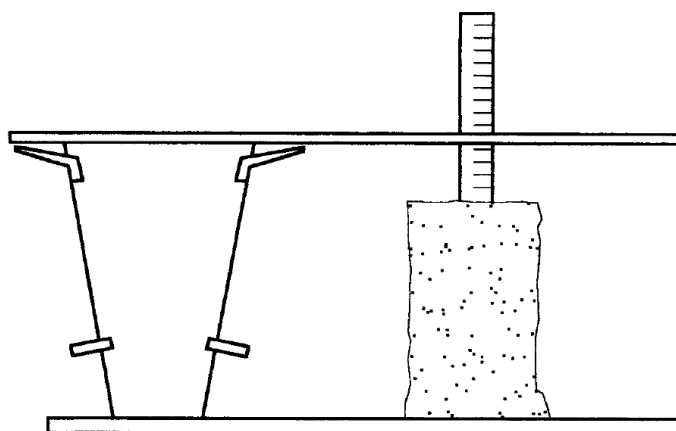


Figura 2: Medida del asentamiento del cono de Abrams (NCh 1019.Of2009).

La tabla 11 muestra una clasificación de la trabajabilidad para tener una idea de la fluidez del hormigón dependiendo del asentamiento experimentado por el hormigón en el ensayo del cono de Abrams.

Tabla 11: Valores de fluidez correspondientes a ensayos de asentamiento de cono (Zabaleta, 1992).

	<b>Fluidez</b>				
	<b>Muy baja</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Muy alta</b>
Asentamiento cono (cm)	0-1	2 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12

**Exudación y sedimentación:** la exudación es la tendencia del agua de amasado de fluir a la superficie libre del hormigón recién vaciado. Es causada por la sedimentación de partículas sólidas (cemento y árido) y el simultáneo ascenso del agua. Este proceso es normal e induce una serie de efectos en el hormigón. A veces el agua que exuda puede ayudar a controlar las fisuras por retracción plástica, sin embargo, lo normal es que produzca efectos desfavorables como los que señala Rojas (1975):

- ☑ Debilidad del hormigón en la superficie debido a un aumento de la razón agua/cemento en esta zona, resultando un material poroso, poco resistente y sensible especialmente al desgaste superficial.
- ☑ Acumulación de agua bajo los áridos de mayor tamaño, originando bajas resistencias de tracción y excesiva permeabilidad.
- ☑ Como la exudación va acompañada por una sedimentación de los materiales sólidos, se produce un asentamiento del hormigón fresco, efecto que cobra

relevancia en las uniones de pilares y muros con las cadenas, losas y vigas, en donde el mayor descenso que experimentan los primeros puede inducir grietas en las zonas de encuentro con los segundos.

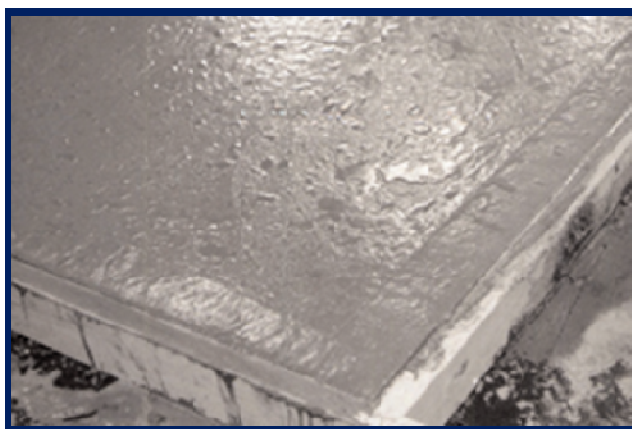


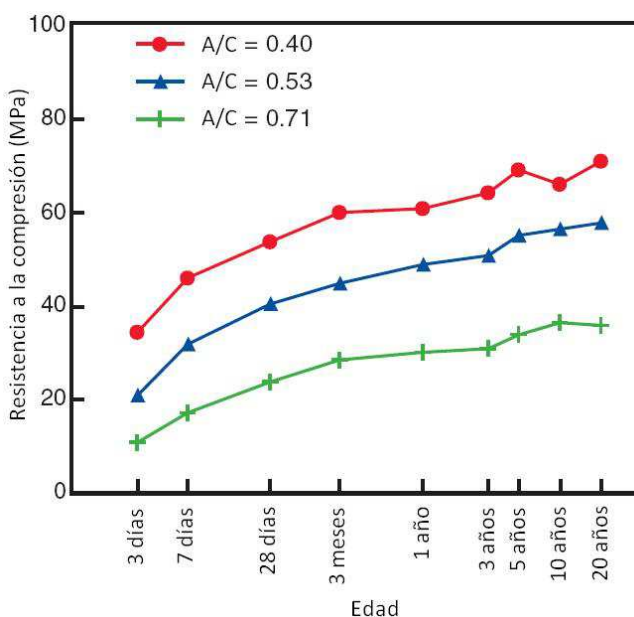
Figura 3: Agua de exudación sobre la superficie del hormigón fresco (Kosmatka *et al.*, 2003).

#### 1.4.2 Propiedades del hormigón en su etapa de endurecimiento

Resistencia mecánica: una de las propiedades más importantes del hormigón es su resistencia mecánica. Los hormigones, en la gran mayoría de las oportunidades, están destinados a resistir compresiones, por ello a continuación se hará un resumido análisis de los factores que más influyen en la resistencia a la compresión del hormigón:

- ☑ La **razón agua/cemento** es determinante en el valor de la resistencia de un hormigón por lo que se ha investigado desde que se comenzó a desarrollar este material. La siguiente gráfica sirve de referencia para apreciar que mientras menor sea la razón agua/cemento mayor es la resistencia del hormigón, relación que se mantiene en el tiempo.

Gráfico 1: Influencia de la razón agua/cemento en la resistencia a la compresión del hormigón (Kosmatka *et al.*, 2003).



- ☑ Otro aspecto a considerar es el **grado del cemento** empleado para la elaboración del hormigón, que condiciona su resistencia a la compresión, en particular la correspondiente a los primeros meses. Para los cementos nacionales, pueden establecerse las cifras medias aproximadas que muestra la tabla 12, donde se observa que la influencia del grado de cemento es menor para mayores edades.

Tabla 12: Relación de resistencias a diferentes edades para cementos grado alta resistencia y corriente (Zabaleta, 1992).

Edad del hormigón (días)	Relación Cemento Alta Resistencia/Corriente
7	1.40
28	1.35
90	1.25

- ☑ La **edad del hormigón**, pues la resistencia del hormigón aumenta con su edad en forma prácticamente indefinida, principalmente en los primeros días. Kosmatka *et al.* (2003) señala que la resistencia del hormigón a los 7 días es alrededor del 75% de la resistencia a los 28 días y que la resistencia a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% más grandes que la resistencia a los 28 días como se aprecia en el gráfico 2.

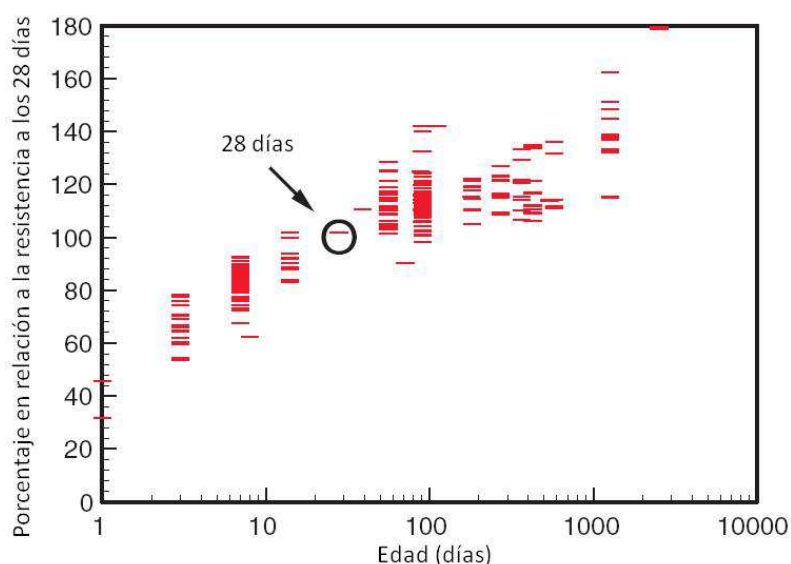


Gráfico 2: Desarrollo de la resistencia a la compresión de diferentes hormigones expresada como porcentaje en relación a la resistencia a los 28 días (Kosmatka *et al.*, 2003).

- ☑ Otro factor que influye considerablemente en la resistencia a la compresión son las condiciones ambientales de **humedad y temperatura** a que se encuentra sometido el hormigón. En el gráfico 3 se puede apreciar la importante influencia que ejerce la humedad ambiente en que es mantenido el hormigón.

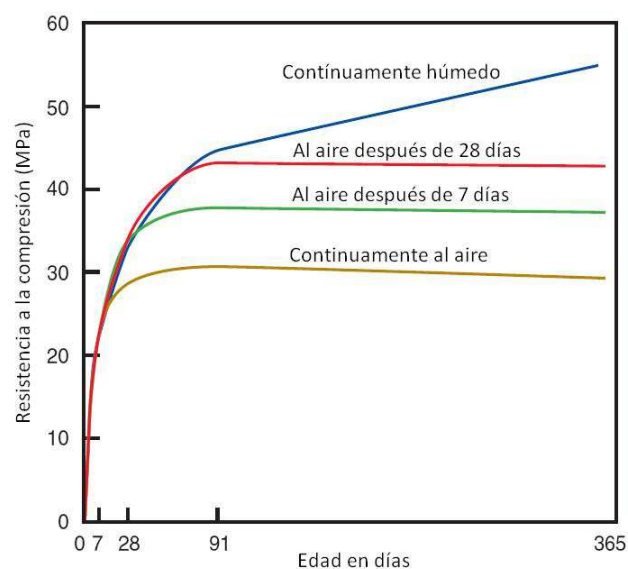


Gráfico 3: Influencia de la humedad ambiental sobre la resistencia a la compresión (Kosmatka *et al.*, 2003).

Por otro lado, la temperatura también juega un papel determinante en la resistencia mecánica del hormigón, en el gráfico 4 se aprecia como diferentes temperaturas de amasado y curado producen significativas variaciones en la resistencia a la compresión del hormigón.

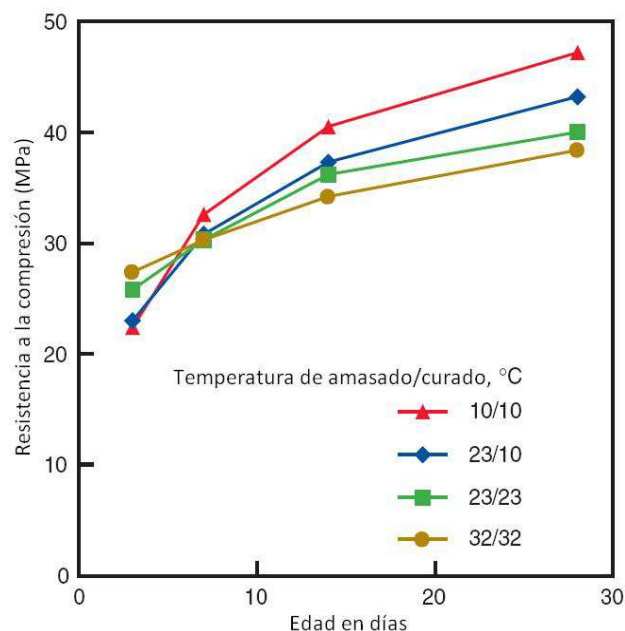


Gráfico 4: Influencia de la temperatura sobre la resistencia a la compresión (Kosmatka *et al.*, 2003).

En cuanto a la resistencia en tracción del hormigón, es un tema que ha sido considerablemente menos estudiado que la resistencia a la compresión, en parte debido a la mayor incertidumbre que existe para su determinación (Zabaleta, 1992). Además Riddell e Hidalgo (2010) señalan que el hormigón presenta baja resistencia en tracción, de hecho, salvo casos excepcionales, es común despreciar su resistencia en tracción, de modo que la propiedad de referencia del hormigón es su resistencia a la compresión.

**Densidad:** la densidad del hormigón es el peso por unidad de volumen. El hormigón convencional, utilizado normalmente en pavimentos, construcciones y otras estructuras tiene una densidad entre 2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup> (Kosmatka *et al.*, 2003). La densidad del hormigón puede variar dependiendo de la cantidad y densidad de los áridos, la cantidad de aire atrapado, y del agua y cemento que contenga, además se ve influenciada por el tamaño máximo del árido. Una reducción en la pasta de cemento implica el aumento del volumen de los áridos, lo que genera un incremento en la densidad del hormigón. La norma NCh 1537.Of09 asume una densidad de 2400 kg/m<sup>3</sup> para hormigón sin armar y de 2500 kg/m<sup>3</sup> para hormigón armado, esto para el cálculo de cargas en edificios.

**Permeabilidad:** el hormigón es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exteriormente, se produce un escurrimiento a través de su masa (Zabaleta, 1992). El exceso de agua, que se debe introducir por razones de trabajabilidad, desaparece y queda la porosidad del hormigón endurecido. Esto, sumado al aire que queda atrapado, no puede ser impedido por el desarrollo de la pasta de cemento.

La impermeabilidad del hormigón dependerá de la distribución y dimensión de sus poros, la presión del líquido, sus características de viscosidad, etc. Puede lograrse mayor impermeabilidad con el uso de incorporadores de aire y otros aditivos, pero el principal factor reside en una buena distribución granulométrica y correcta técnica de consolidación y vaciado del hormigón (Rojas, 1975).

**Durabilidad:** la durabilidad es la resistencia que los materiales y las estructuras oponen a las cargas, desplazamientos y agresividad del medio durante todo el tiempo de su uso normal y regular, es decir durante un largo periodo. No basta definir la capacidad soportante en el día de entrega a servicio, debe procurarse una duración a largo plazo (Rojas, 1975).

Durante toda su vida útil, el hormigón está permanentemente expuesto a las acciones provenientes de agentes externos e internos, que pueden afectar su durabilidad si no se les tiene debidamente en cuenta.

Zabaleta (1992) señala que estas acciones pueden ser producidas por agentes físicos o químicos, como los que a grandes rasgos se analizan a continuación:

- ☑ **Ciclos de hielo-deshielo:** un ciclo hielo-deshielo es un evento de congelamiento y posterior deshielo del agua contenida en el hormigón endurecido en un período de tiempo determinado. Los ciclos hielo-deshielo son un fenómeno común en la naturaleza, debido al cambio propio en la temperatura ambiente en zonas que registran un clima frío. Dependiendo del rango de variación de estos ciclos, principalmente de las temperaturas bajo 0°C, y del estado de saturación del hormigón, el agua contenida en sus poros puede congelarse, produciéndose un proceso expansivo de gran magnitud que puede causar una desintegración paulatina del hormigón.

Para contrarrestar dichas consecuencias es conveniente tomar precauciones en caso de preverse posibles efectos. Para ello, el recurso de mayor eficacia es el empleo de aire incorporado en el hormigón, mediante el uso de un aditivo apropiado. Las burbujas de aire así introducidas en forma controlada, operan como cámaras de expansión, impidiendo que los efectos expansivos del agua congelada se transmitan al hormigón y evitando en consecuencia su acción destructiva.

- ☑ **Abrasión:** la abrasión se produce por el desplazamiento de materiales sólidos sobre la superficie de un elemento de hormigón. Estos materiales pueden ser cuerpos móviles, como vehículos u otros similares, o bien, como sucede en las obras hidráulicas, materiales granulares arrastrados por el agua. Una forma para atenuar los daños causados por este proceso es aumentar la dureza superficial, empleando por ejemplo hormigones de alta resistencia en la superficie del hormigón.
- ☑ **Materia orgánica:** la presencia de materia orgánica, aportada por los áridos, es de especial importancia en esta memoria puesto que afecta el proceso de fraguado del hormigón. La magnitud de este efecto depende, por esta razón, de la cantidad y del origen de la materia orgánica presente y su acción se manifiesta en general tanto sobre un retardo del fraguado de la pasta de cemento, como sobre una disminución de las resistencias iniciales del hormigón. Por este motivo, es necesario precisar la existencia de productos nocivos de este tipo, para lo cual debe efectuarse el ensayo colorimétrico descrito anteriormente en 1.3.2.1.

## **CAPÍTULO II. FRAGUADO DEL HORMIGÓN**

### **2.1 GENERALIDADES**

La consistencia inicial de una mezcla de cemento y agua es más o menos blanda o plástica. En un tiempo, que es propio de cada cemento y está normalizado, la rigidez aumenta bruscamente con un notorio desprendimiento de calor. Esta y otras manifestaciones externas permiten fijar puntos típicos del proceso químico interno, que llamamos *fraguado*. Se habla de puntos convencionales que son el *fraguado inicial*, que es un estado dentro del proceso general de endurecimiento en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar, y el *fraguado final*, el cual hace alusión a una rigidez significativa. El espacio de tiempo entre estos dos puntos es el *tiempo de fraguado* y, después del fraguado final, viene el *endurecimiento* (Rojas, 1975).

Eventualmente, el cemento puede experimentar un endurecimiento prematuro al ser mezclado con agua para constituir la pasta de cemento, este fenómeno es conocido como *falso fraguado del hormigón*. Ocurre cuando reacciona rápidamente el cemento y agua, con lo cual el hormigón se puede volver espeso al cabo de unos minutos y perder completamente su trabajabilidad debido al calor emitido (Guichapai, 2008). Según Zabaleta (1992), este proceso parece provenir de un comportamiento anómalo del yeso adicionado al cemento en la etapa de molienda del clínquer como regulador de su fraguado, el cual debido a las altas temperaturas originadas durante la molienda, puede perder parte del agua de cristalización. El agua perdida es recuperada, extrayéndola del agua de amasado del hormigón, con lo cual el yeso cristaliza, lo que produce una rigidización del hormigón aun en estado fresco en los primeros minutos posteriores a la adición del agua de amasado, provocando de este modo gran dificultad en su manipulación en los procesos de transporte, colocación y compactación.

Para evitar estos efectos desfavorables, un procedimiento efectivo consiste en aumentar el tiempo de amasado, lo que permite romper la cristalización producida y devolver al hormigón la plasticidad perdida sin necesidad de adición de agua.

### **2.2 IMPORTANCIA DEL TIEMPO DE FRAGUADO**

Saber el tiempo de fraguado del hormigón es una propiedad física muy importante, el objetivo de las pruebas del tiempo de fraguado es determinar el lapso desde que el cemento entra en contacto con el agua hasta que el hormigón deja de ser fluido y plástico (fraguado inicial) y el tiempo requerido por el hormigón para adquirir cierto grado de dureza (fraguado final).

El fraguado inicial indica el momento en el cual la masa ya no puede ser vibrada debido a que ha adquirido la resistencia suficiente en la cual puede dañar la estructura interna

(Gabalec, 2008), por lo que es deseable que no ocurra muy pronto para dar tiempo al transporte y colocación del hormigón.

Sin embargo, una vez que el hormigón ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido.

La determinación del fraguado inicial y final es muy poco precisa, Gabalec (2008) señala que normalmente el fraguado inicial ocurre entre 2 y 4 horas después de realizada la mezcla y el fraguado final ocurre entre 4 y 8 horas.

Es importante aclarar, que el tiempo de fraguado del hormigón no tiene relación directa con el tiempo de fraguado de la pasta de cemento, debido a la pérdida de agua, la presencia de áridos, y por los cambios de temperatura que el hormigón sufre en el ambiente al que está expuesto.

## 2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN TIEMPO DE FRAGUADO

Son muchos los factores que influyen en el tiempo de fraguado del hormigón, de estos los más importantes son:

### 2.3.1 Temperatura ambiente

Uno de los principales factores que determinan el tiempo de fraguado es la temperatura. La elevación de la temperatura, en la masa del hormigón fresco, conduce a una mayor velocidad de hidratación del cemento, lo que implica mayores resistencias a corto plazo (Solas *et al.*, 2010). Así, en condiciones más elevadas de temperatura el proceso de fraguado se acelera, mientras que lo opuesto ocurre en ambientes más fríos. La siguiente gráfica muestra los tiempos inicial y final de fraguado para tres mezclas de hormigón curadas a temperaturas diferentes.

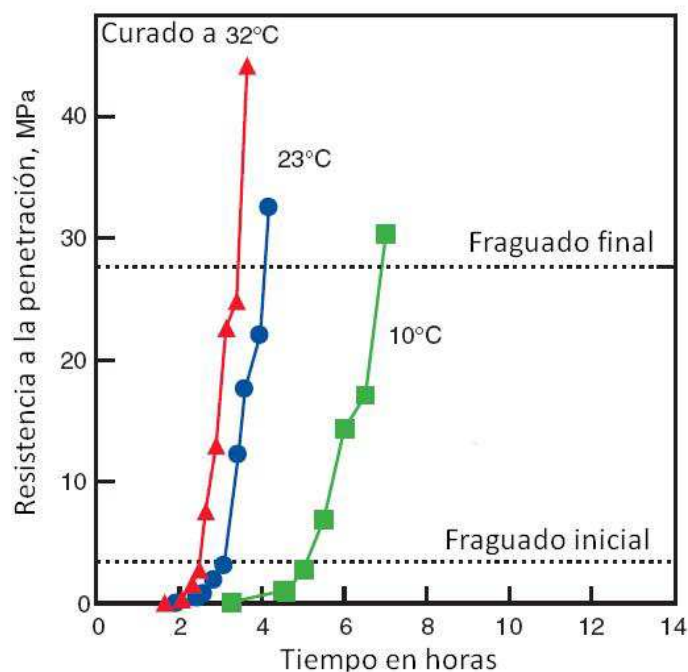


Gráfico 5: Influencia de la temperatura sobre el tiempo de fraguado (Kosmatka *et al.*, 2003).

### 2.3.2 Grado del cemento

El cemento grado corriente producido en Chile, a diferencia del cemento grado alta resistencia, requiere de más tiempo para hidratarse, lo que produce un efecto que retarda el fraguado del hormigón. Esto se debe en gran parte a que el cemento grado corriente posee mayor cantidad de adiciones en forma de escoria o puzolana, mientras que la composición del cemento grado alta resistencia es principalmente clínquer, de este modo y como señalan Solas y Giani (2010), el uso de cementos de alta resistencia permite obtener, para una misma relación agua/cemento y dosis de cemento, resistencias a corto plazo, 7 y 28 días, mayores a las obtenidas con cemento grado corriente, lo que incide directamente en el tiempo de fraguado del hormigón.

La incorporación de escorias en el cemento, normalmente se traduce en un aumento en el tiempo de fraguado del hormigón. El fraguado final podría verse retrasado varias horas dependiendo de la temperatura ambiente, temperatura del hormigón y las proporciones de la mezcla. A temperaturas inferiores a 23°C, se puede esperar un retraso en el tiempo de fraguado del hormigón al utilizar cemento con agregados de escorias, lo que puede traer consecuencias importantes al hormigonar en tiempo frío. A temperaturas más altas (> 30°C), el tiempo de fraguado del hormigón no sufre mayores cambios (Malhotra, 2008).

Tabla 13: Tiempo de fraguado mínimo y máximo según clasificación del cemento (Norma NCh 148.Of68).

Grado del cemento	Tiempo de fraguado	
	Inicial mínimo min	Final máximo h
Corriente	60	12
Alta Resistencia	45	10

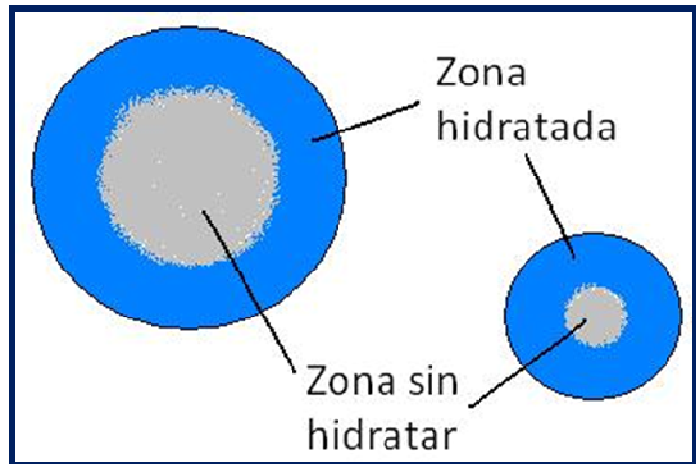
### 2.3.3 Finura del cemento

El tamaño de los granos de cemento está comprendido entre 2 y 100 micrones. Estos son más activos cuando su tamaño está comprendido entre 3 y 30 micrones. Los granos menores a 3 micrones se hidratan casi instantáneamente al entrar en contacto con el agua, mientras que los superiores a 60 micrones son prácticamente inertes, ya que su hidratación es extremadamente lenta

Por este motivo, este factor influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento solo se hidratan en una profundidad de 0,01 mm, por lo que si dichos granos fueran muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo

prácticamente inerte, como ilustra la figura 4. Por lo tanto, cuanto mayor sea la finura del cemento, menor será el tiempo de fraguado.

Figura 4: Hidratación de los granos de cemento (Elaboración propia).



#### 2.3.4 Razón agua/cemento

La razón agua/cemento expresa la relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Una relación agua/cemento baja, conduce a un hormigón de mayor resistencia que una relación agua/cemento alta. Pero entre más alta es esta relación, el hormigón se vuelve más trabajable.

Además de influir en la resistencia y docilidad del hormigón, la razón agua/cemento afecta al tiempo de fraguado, ya que un mayor contenido de agua (relación agua/cemento alta) necesita de más tiempo para lograr su evaporación, produciendo un fraguado más lento del hormigón.

#### 2.3.5 Humedad ambiente

Solas y Giani (2010) señalan que una baja humedad relativa del aire incrementa la velocidad de evaporación del hormigón, ocasionando pérdidas de docilidad y acelerando el tiempo de fraguado.

#### 2.3.6 Materia orgánica

Como ya se dijo en el capítulo 1.3.2.1, la presencia de impurezas orgánicas principalmente en la arena puede modificar las reacciones químicas del cemento con el agua, alterando el correcto fraguado y endurecimiento. Normalmente la materia orgánica provoca un efecto retardador del fraguado.

### 2.3.7 Mezclado

Realizar un procedimiento adecuado en el mezclado del hormigón, se traduce en una mejor hidratación del cemento, mejorando de este modo la homogeneidad y dispersión de los reactivos y, así, también acelera el fraguado (Gabalec, 2008).

## 2.4 ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL TIEMPO DE FRAGUADO

Un estudio norteamericano publicado por Kosmatka *et al.* (2003), muestra los efectos de las cenizas volantes (puzolanas artificiales) en el tiempo de fraguado del hormigón. Para este estudio se utilizó un contenido de cemento de  $307 \text{ kg/m}^3$ , del cual un 25% correspondía a cenizas volantes, la temperatura del ambiente utilizada en los ensayos fue de  $23^\circ\text{C}$  y una razón agua/cemento entre 0,40 y 0,45.

En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados de dicho estudio, en el que se emplearon dos clases de cenizas volantes utilizadas comúnmente en Norteamérica. Se observa que el inicio de fraguado ocurre después de las 4 horas en todos los casos, lo que con normalidad sucede entre 2 y 4 horas.

Tabla 14: Efecto de las cenizas volantes en el tiempo de fraguado del hormigón (Kosmatka *et al.*, 2003).

Mezclas de prueba con cenizas volantes		Tiempo de fraguado (h:min)	
Identificación	Ceniza volante clase	Inicial	Final
A	C	4:30	5:35
B	F	4:40	6:15
C	F	4:25	6:15
D	F	5:05	7:15
E	F	4:25	5:50
F	C	4:25	6:00
G	C	4:55	6:30
H	F	5:10	7:10
I	C	5:00	6:50
J	F	5:10	7:40

Otro estudio más cercano a nuestro país, es el realizado por Gabalec (2008) en ciudad de La Plata, Buenos Aires, quien trabajó con cemento puzolánico y árido chancado de origen argentino. En la Tabla 16 se observa que el fraguado inicial no supera las 3 horas 30 minutos en ninguno de los ensayos. Además, en el ensayo 3 el tiempo de fraguado inicial y final ocurre

más tarde que en los otros ensayos, esto probablemente se deba a una temperatura ambiente más baja en el ensayo, porque si consideramos la razón agua/cemento debería ocurrir lo contrario, o sea, alcanzar los tiempos de fraguado inicial y final antes que los demás ensayos.

Tabla 15: Dosificaciones utilizadas en los ensayos por Gabalec (2008).

Materiales	Dosificación (1 m <sup>3</sup> )		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Cemento (kg)	422	422	450
Agua (lt)	186	190	195
Agregado fino (kg)	779	764	749
Agregado grueso (kg)	960	967	960

Tabla 16: Resultados obtenidos por Gabalec (2008).

	Resultados		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Razón agua/cemento	0,44	0,45	0,43
Asentamiento, cm	6,0	6,0	6,0
Temperatura ambiente, °C	27	27	25
Tiempo de <b>fraguado inicial</b> , (h:min)	2:31	2:55	3:29
Tiempo de <b>fraguado final</b> , (h:min)	4:34	4:11	5:08

Como es posible apreciar en ambos estudios expuestos las variables a tener en cuenta al realizar un estudio de este tipo son muy amplias, desde factores climáticos como la temperatura y la humedad, hasta factores relacionados con los materiales utilizados en la elaboración de las mezclas de hormigón, como lo son los áridos (granulometría, densidad, contenido de impurezas orgánicas, etc.) y el cemento (grado del cemento, finura, clase, etc.).

## 2.5 NORMATIVA

El procedimiento para determinar los tiempos de fraguado del hormigón está normalizado, la norma que se encarga de ello es la norma NCh 2183.Of92. Consiste básicamente en realizar penetraciones en muestras de mortero obtenidas del hormigón, para esto se utiliza un equipo especialmente diseñado con este fin llamado penetrómetro, el cual dispone de agujas removibles de diferentes áreas de apoyo (figuras 5 y 6). Según la resistencia a la penetración que oponga el mortero de hormigón se establecen los tiempos de fraguado, entendiéndose por resistencia a la penetración (en **MPa**) como la fuerza requerida, **N**, para obtener una penetración de 25 mm dividida por el área de carga de la aguja, mm<sup>2</sup>.

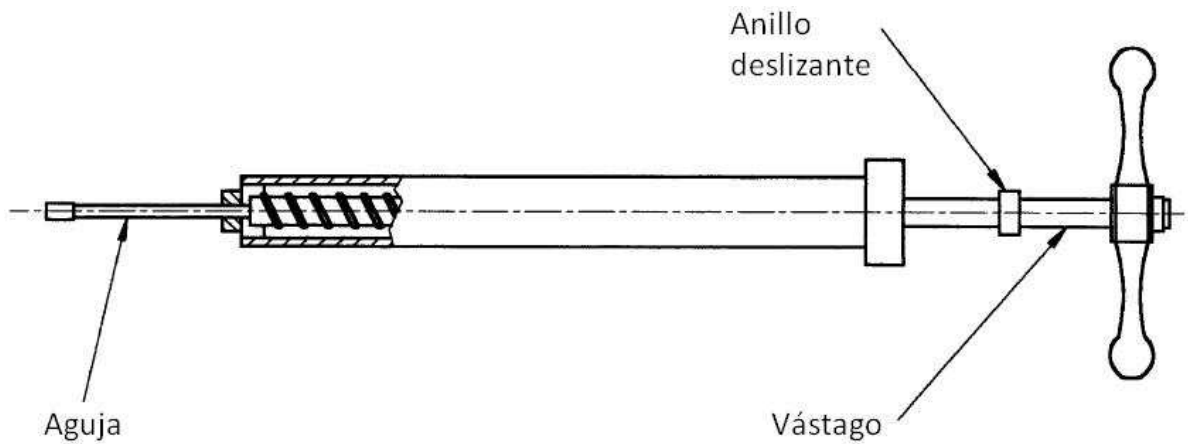


Figura 5: Penetrómetro (Norma NCh 2183.Of92).

Esta norma define los tiempos de fraguado inicial y final de la siguiente manera:

Fraguado inicial: tiempo transcurrido desde el instante en que el cemento entra en contacto con el agua y el momento en que el hormigón presenta una resistencia a la penetración de 3,5 MPa.

Fraguado final: tiempo transcurrido desde el instante en que el cemento entra en contacto con el agua y el momento en que el hormigón presenta una resistencia a la penetración de 28 MPa.

### 2.5.1 Aparatos y equipos

La norma NCh 2183 establece los siguientes equipos necesarios para realizar los ensayos:

Penetrómetro: ya descrito anteriormente, este sistema tiene un indicador de fuerzas, en N, y dispone de un set de agujas removibles con las siguientes áreas de apoyo: 645, 323, 161, 65, 32 y 16 mm<sup>2</sup>. El vástago de cada aguja está marcado periféricamente a una distancia de 25 mm sobre el área de apoyo, esta marca indica el punto máximo de penetración.

Tamiz de 5 mm de abertura: con el que se separará el mortero contenido en el hormigón.

Recipientes: los que serán llenados con mortero del hormigón. Deben ser rígidos, estancos, no absorbentes, de sección circular o rectangular y sus dimensiones deben ser, al menos, de 150 mm de profundidad y 150 mm la menor dimensión de su sección. Deben permitir, a lo menos, la ejecución de 10 medidas de penetración.

Pisón: para compactar la mezcla en los recipientes.

Pipeta: utilizada para retirar el agua de exudación de los recipientes.



Figura 6: Instrumento para medir el tiempo de fraguado de hormigones ([Aimil](#), 2013).

### 2.5.2 Procedimiento de ensayo

- ☑ Se registra como  $t_0$ , la hora en que el cemento entra en contacto con el agua.
- ☑ Se debe extraer un volumen representativo del hormigón de la amasada, de acuerdo a NCh 171, de al menos 3 veces el volumen que es necesario para llenar, a lo menos, tres recipientes.
- ☑ Separar el mortero del hormigón, tamizándolo por la malla de 5 mm de abertura sobre una superficie no absorbente.
- ☑ Volver a mezclar el mortero y con él llenar los recipientes en una sola capa, compactándolo con el pisón a razón de 8 golpes por cada 100 cm<sup>2</sup>, en forma uniforme en la sección. La superficie superior del mortero debe quedar, a lo menos, 10 mm más baja que el borde del recipiente.
- ☑ Completar el llenado con los recipientes antes de que transcurran 15 min desde el término del amasado del hormigón.

- ☑ Cubrir los recipientes a fin de evitar la evaporación excesiva de agua.
- ☑ Utilizando la pipeta, retirar el agua de exudación inmediatamente antes de efectuar una medida de penetración. Para facilitar la extracción del agua exudada, se recomienda inclinar cuidadosamente el recipiente, colocando para ello algún elemento bajo uno de sus lados, uno o dos minutos antes de proceder a la remoción del agua de exudación.
- ☑ Comenzar las penetraciones cuando se haya retirado el agua de exudación.
- ☑ Mantener la temperatura en el laboratorio durante el ensayo, a  $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Debe registrarse la temperatura mínima y máxima durante el desarrollo del ensayo.
- ☑ Iniciar las medidas de penetración con la aguja de  $645 \text{ mm}^2$  de sección. Dependiendo del estado de endurecimiento, colocar la aguja apropiada en el aparato de penetración. Efectuar los cambios de aguja considerando que las lecturas queden entre 89 y 334 N.
- ☑ Poner la aguja en contacto con la superficie del mortero, manteniéndola normal. Luego, aplicar una fuerza vertical uniforme hasta que la aguja penetre 25 mm. El tiempo requerido para alcanzar dicha profundidad debe ser aproximadamente 10 segundos.
- ☑ Se debe considerar que entre el borde del recipiente y las penetraciones, así como entre penetraciones, debe haber, a lo menos, una distancia de 20 mm.
- ☑ Anotar la fuerza requerida y la hora de aplicación. Se recomienda realizar medidas cada hora como máximo, hasta una penetración de 1 MPa y, a continuación, cada cuarto de hora hasta la resistencia a la penetración de 28 MPa (ver Anexo).

### 2.5.3 Expresión de resultados

#### 2.5.3.1 Tiempo de fraguado inicial de la probeta

El fraguado inicial,  $h_i$ , de la probeta se determina por interpolación de los tiempos registrados para lecturas de penetración cercanas a 3,5 MPa, se expresa en horas y minutos y debe aproximarse al minuto.

El tiempo de fraguado inicial,  $t_{fi}$ , se calcula:

$$t_{fi} = h_i - h_0$$

#### 2.5.3.2 Tiempo de fraguado final de la probeta

El fraguado final,  $h_f$ , de la probeta se obtiene por interpolación de los tiempos registrados para lecturas de penetración cercanas a 28 MPa, se expresa en horas y minutos y debe aproximarse al minuto.

El tiempo de fraguado final,  $t_{ff}$ , se calcula:

$$t_{ff} = h_f - h_0$$

### **2.5.3.3 *Tiempo de fraguado inicial y final del hormigón***

El tiempo de fraguado del hormigón, inicial o final, es el promedio de los tiempos determinados para cada una de las tres probetas, aproximando a los 5 minutos.

### **2.5.4 Informe**

El informe debe incluir la siguiente información sobre el ensayo:

- Dosificación del hormigón.
- Marca, tipo y cantidad de aditivo usado, si corresponde.
- Docilidad, determinado por el método del Cono de Abrams según norma NCh 1019.
- Temperatura del mortero después del tamizado.
- Temperatura del ambiente durante el ensayo.
- El promedio de los tiempos de fraguado inicial, y final si ha sido requerido, en horas y minutos aproximando a los 5 minutos.
- Referencia a esta norma.


## CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DE LA INVESTIGACIÓN

Para esta investigación se trabajó mediante la norma NCh 2183 en la cual se utilizaron los siguientes materiales para la confección de las mezclas de hormigón:

Cemento: se utilizó cemento de origen nacional grado corriente y alta resistencia con las características siguientes:

Tabla 17: Cemento utilizado para la elaboración de los hormigones (Elaboración propia).

Marca	Clasificación		Formato
	Según composición	Según resistencia	
	Siderúrgico	Corriente	Saco: 42,5 kg
	Portland Siderúrgico	Alta Resistencia	

El cemento siderúrgico, se fabrica a partir de la molienda conjunta del clínquer, escoria básica granulada de alto horno y yeso.

La escoria básica granulada de alto horno es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento del mineral de hierro en un alto horno. Esta escoria tiene propiedades conglomerantes por sí sola, es decir, que finalmente molida reacciona como un verdadero cemento, pero con la particularidad de ser un cemento lento. Para transformarla en un cemento adecuado a los procesos constructivos actuales, se le agrega clínquer, el cual acelera su hidratación.



Figura 7: Cemento grado alta resistencia y corriente utilizados para elaborar las mezclas de hormigón (Elaboración propia).

Agua: se empleó agua potable de la red de acuerdo a la norma NCh 1498.

Áridos: los áridos utilizados (grava, gravilla y arena) son de origen regional y se adquirieron en empresas Valdicor Limitada. Son de canto rodado y extraídos del fondo del río Valdivia.



Figura 8: Planta Chumpullo áridos Valdicor (Elaboración propia).

### 3.1.1 Especificación e identificación de hormigones

Se utilizaron las mismas especificaciones para cada diseño.

- Tamaño máximo del árido 40 mm
- Desviación estándar ( $\sigma$ ) 47,6 Kg/cm<sup>2</sup>
- Nivel de confianza 80%
- Docilidad 6-9 cm

Se diseñaron tres hormigones: H20, H25 y H30, cada uno elaborado con cemento grado corriente y alta resistencia, lo que hace un total de seis mezclas, como se ve en la siguiente tabla.

Tabla 18: Hormigones diseñados en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

Mezcla	Grado del hormigón	Grado del cemento utilizado
1	H20	Corriente
2	H25	
3	H30	
4	H20	Alta Resistencia
5	H25	
6	H30	

Para lograr resultados confiables, cada mezcla se repitió tres veces, las que se llamaron *mezclas gemelas*.

Se asignó un *código de identificación* a cada amasada donde se indica el grado del hormigón (H20, H25 o H30), el grado del cemento (corriente ó alta resistencia) y el N° de mezcla gemela (1, 2 ó 3).



Figura 9: Descripción del código de identificación utilizado en las amasadas (Elaboración propia).

Tabla 19: Identificación de hormigones (Elaboración propia).

Mezcla	Grado del cemento utilizado	Grado del hormigón	N° mezcla gemela	Código de identificación
1	Corriente	H20	1	H20/C/1
		H20	2	H20/C/2
		H20	3	H20/C/3
2		H25	1	H25/C/1
		H25	2	H25/C/2
		H25	3	H25/C/3
3		H30	1	H30/C/1
		H30	2	H30/C/2
		H30	3	H30/C/3
4	Alta Resistencia	H20	1	H20/AR/1
		H20	2	H20/AR/2
		H20	3	H20/AR/3
5		H25	1	H25/AR/1
		H25	2	H25/AR/2
		H25	3	H25/AR/3
6		H30	1	H30/AR/1
		H30	2	H30/AR/2
		H30	3	H30/AR/3

En total se confeccionaron 18 amasadas, donde se eligió una distribución tal, que las mezclas gemelas sean ejecutadas en días distintos.

Se comenzó por la mezcla gemela N°1, correspondiente al hormigón H20 en base a cemento grado corriente (H20/C/1), en la segunda y tercera amasada se varió el grado del hormigón de H20 a H25 y H30 respectivamente. En las tres amasadas siguientes se siguió la misma secuencia (H20, H25 y H30), esta vez utilizando cemento de alta resistencia. Así se completaron las 6 amasadas correspondientes a la mezcla gemela N°1. Luego se repitió el mismo orden para las mezclas gemelas N°2 y N°3 de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 20: Programación de amasadas (Elaboración propia).

<b>Amasada</b>	<b>Hormigón</b>
1	H20/C/1
2	H25/C/1
3	H30/C/1
4	H20/AR/1
5	H25/AR/1
6	H30/AR/1
7	H20/C/2
8	H25/C/2
9	H30/C/2
10	H20/AR/2
11	H25/AR/2
12	H30/AR/2
13	H20/C/3
14	H25/C/3
15	H30/C/3
16	H20/AR/3
17	H25/AR/3
18	H30/AR/3

### 3.1.2 Volumen de hormigón a utilizar en cada amasada

El volumen necesario en cada amasada se determinó a partir de la norma NCh 2183, la que indica que para determinar el tiempo de fraguado del hormigón se debe utilizar un volumen mínimo de hormigón de tres veces el volumen que es necesario para llenar tres recipientes, considerando que los recipientes utilizados son cúbicos de **15 cm** de arista (ver figura 10), el volumen a emplear para este efecto es de **28,35 lt**. Además se debe contemplar

un volumen de **5,5 lt** para la determinación de la docilidad (asentamiento del cono de Abrams) y **6,75 lt** para dos probetas de **15x15x15 cm** que se ensayarán a compresión a los 28 días.

Por otro lado la norma de preparación de mezclas de prueba de hormigón en laboratorio (NCh 1018) establece un volumen de la amasada superior en un **20%** o más al volumen necesario para efectuar los ensayos, por lo tanto el volumen de cada mezcla es de **48,72 lt**. Para efectos prácticos se dosificó para mezclas de un volumen de **50 lt**.



Figura 10: Recipientes utilizados para determinación del tiempo de fraguado (Elaboración propia).

### 3.1.3 Preparación de mezclas de hormigón

El procedimiento para preparar las mezclas de hormigón fue el que establece la norma NCh 1018. Para esto se utilizó un mezclador mecánico (betonera) y para cada amasada se consideró un volumen mayor a 20% del volumen necesario para efectuar los ensayos.



Figura 11: Mezclador mecánico utilizado para elaborar los hormigones (Elaboración propia).

El día anterior a la elaboración de las mezclas de hormigón se mojaron los áridos de acuerdo a lo estipulado en la norma NCh 1018.

El día de la confección de las mezclas se determinó el contenido de humedad de los áridos, luego se realizó la corrección por humedad como se indica en el capítulo 3.1.5 *Registro de datos e interpretación de resultados*.

Una vez hecha la corrección por humedad, se midieron los materiales (en peso), de acuerdo a la cantidad corregida.



Figura 12: Operación de pesado del cemento para una amasada (Elaboración propia).

Con los materiales pesados se procedió a realizar la mezcla. Para esto se humedeció el mezclador y la carretilla, esta última empleada como recipiente de muestreo.

Se introdujo la arena y el cemento, los que se mezclaron hasta obtener una masa homogénea.

Se añadió la gravilla y se mezcló hasta lograr una distribución uniforme en la masa.

Se repitió el paso anterior, ahora con la grava.

Se agregó el agua y se revolvió hasta que el hormigón alcanzó una apariencia homogénea.

Se registró como  $t_0$  la hora en que el cemento entró en contacto con el agua.

Una vez lista la mezcla se extrajo la muestra en una carretilla según la norma NCh 171.

Se remezcló la muestra mediante pala en el recipiente de muestreo (carretilla).

Se determinó la docilidad del hormigón por el método del asentamiento del cono de Abrams (NCh 1019).

Se confeccionaron dos probetas para ensayos de compresión a 28 días, según la norma NCh 1017.

### 3.1.4 Determinación del tiempo de fraguado

Para determinar el tiempo de fraguado del hormigón se procedió de acuerdo a la norma NCh 2183.

Utilizando la malla #4 se separó el mortero del hormigón sobre una bandeja no absorbente.

Se mezcló el mortero y con él se llenaron los 3 recipientes en una sola capa, compactándolo con el pisón con 18 golpes distribuidos de manera uniforme en la sección del recipiente.



Figura 13: Operación de llenado de los recipientes con mortero de hormigón (Elaboración propia).

Se dejó una separación de al menos 10 mm entre el borde del recipiente y la superficie superior del mortero para que antes de realizar las medidas de penetración sea posible retirar el agua de exudación inclinando levemente los recipientes.



Figura 14: Recipientes llenos con mortero de hormigón (Elaboración propia).

Se cubrieron con los recipientes con una lámina de polietileno a fin de evitar la evaporación excesiva de agua.

Pasadas 2 horas desde que el cemento entró en contacto con el agua, se comenzaron a tomar mediciones de penetración. Mediante una pipeta se retiró el agua de exudación

inmediatamente antes de efectuar una medida, para esto se inclinó cuidadosamente el recipiente colocando un elemento unos dos minutos antes de extraer el agua de exudación.

Se registró la temperatura del ambiente al inicio de las medidas de penetración

Se iniciaron las medidas de penetración con la aguja de  $645 \text{ mm}^2$  de sección. Se puso la aguja en contacto con la superficie del mortero, manteniéndola normal. Luego se aplicó una fuerza vertical uniforme hasta que la aguja penetre 25 mm en un tiempo aproximado de 10 segundos.



Figura 15: Medición de penetración para determinación del tiempo de fraguado (Elaboración propia).

Dependiendo del estado de endurecimiento, se colocó la aguja apropiada en el aparato de penetración. Se efectuaron los cambios de aguja considerando que las lecturas queden entre 89 y 334 N, tal como recomienda la norma.

Se registró la fuerza requerida y la hora de aplicación.

Se realizaron medidas cada media hora, y cada 15 minutos cuando la resistencia a la penetración estaba cercana al tiempo de fraguado inicial o final.



Figura 16: Recipiente con mortero de hormigón después de realizadas las mediciones (Elaboración propia).

### 3.1.5 Registro de datos e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio fueron registrados y ordenados en tablas para el posterior análisis. En esta sección se indica cómo interpretar la información entregada en las tablas y gráficos que se presentan más adelante en el capítulo IV. *RESULTADOS Y ANÁLISIS*.

#### Información de mezclas de hormigón

Aquí se entrega información referente al hormigón señalado en el encabezado de la tabla, en este caso H25/C/2, en la zona izquierda se muestra la *Corrección por humedad* necesaria para confeccionar las mezclas de hormigón y en la parte derecha la *Información del ensayo*, esta última se detalla más adelante.

H25/C/2				Información del ensayo	
Corrección por humedad					
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida		
Cemento (kg)	17,0	-	17,0	Fecha ensayo	30/03/2013
Agua (lt)	8,5	-4,59	3,9	Grado cemento	Corriente
Grava (kg)	27,9	0,25	28,2	Razón A/C	0,50
Gravilla (kg)	23,3	0,37	23,7	Cono, cm	9,0
Arena (kg)	41,8	4,93	46,7	Temp. ambiente, °C	18,5
Agua abs (lt)	0,96	-	-	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	307
				Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2432

Materiales utilizados para la confección de la mezcla. La segunda columna indica la cantidad de material calculado para **50 lt** de hormigón

La columna *Dosificación corregida* indica la cantidad definitiva a utilizar en la mezcla de hormigón, una vez realizada la corrección por humedad

La columna *Aporte humedad* señala cuánta agua traen los áridos en su interior, por lo cual es necesario corregir la cantidad de agua a utilizar en la dosificación

En el lado derecho se indica la información más relevante referente a la mezcla, además se incluyen datos del hormigón a la edad de 28 días, como son la resistencia a compresión y la densidad aparente

Figura 17: Interpretación de información de mezclas de hormigón (Elaboración propia).

Fecha ensayo: corresponde a la fecha en que se elaboró la mezcla de hormigón y se realizó el ensayo para determinar el tiempo de fraguado.

Grado cemento: indica el grado de cemento utilizado en la mezcla de hormigón, puede ser cemento grado corriente o alta resistencia.

Razón A/C: razón agua/cemento se determinó en la dosificación de los hormigones, depende de la resistencia media requerida y del grado del cemento por lo que es diferente para cada mezcla.

Cono, cm: indica el valor del asentamiento registrado en la determinación de la docilidad por el método del cono de Abrams (norma NCh 1019), ensayo realizado inmediatamente después de confeccionada la mezcla.

Temp. Ambiente, °C: temperatura del ambiente durante el ensayo de determinación del tiempo de fraguado.

Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm<sup>2</sup>: corresponde al valor de resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 días, de acuerdo a ensayo realizado según la norma NCh 1037.

Densidad, kg/m<sup>3</sup>: es la densidad aparente del hormigón a la edad de 28 días, de acuerdo a ensayo realizado según la norma NCh 1017.

### **Información de medidas de penetración**

Los datos de las medidas de penetración se registraron en una misma tabla para las tres probetas ensayadas en cada mezcla de hormigón.

Aquí se puede apreciar la hora en que se registraron las medidas de penetración, la aguja utilizada, la carga aplicada a cada y la resistencia del mortero de hormigón de cada una de las tres probetas.

En el siguiente esquema se detalla esta información.

Hora real en que se realizaron las medidas de penetración

Tiempo transcurrido desde la elaboración de la mezcla de hormigón hasta que se realizó la medida de penetración

Área de la aguja utilizada para la medida de penetración

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
15:35	3:00	180	645	1100	1,7	1290	2,0	1080	1,7
15:50	3:15	195	645	1400	2,2	1980	3,1	1220	1,9
16:05	3:30	210	645	1250	1,9	1690	2,6	1430	2,2
16:20	3:45	225	645	3290	5,1	3680	5,7	3690	5,7
16:35	4:00	240	323	1700	5,3	2090	6,5	2480	7,7
17:05	4:30	270	323	2790	8,6	3300	10,2	2790	8,6
17:35	5:00	300	161	2020	12,5	2400	14,9	2450	15,2
18:05	5:30	330	161	3110	19,3	3410	21,2	3400	21,1
18:35	6:00	360	65	1890	29,1	2240	34,5	1900	29,2

Hora inicial de la amasada	12:35
Temperatura del mortero de hormigón, °C	18,0

Carga de penetración registrada en el penetrómetro y la resistencia a la penetración del mortero de hormigón obtenida del cociente entre la carga (*N*) y el área de la aguja (*mm<sup>2</sup>*)

La hora inicial de la amasada corresponde a la hora en que el cemento entra en contacto con el agua. La temperatura del mortero de hormigón se registró justo después del tamizado

Figura 18: Interpretación de información de medidas de penetración (Elaboración propia).

### Gráficos del tiempo de fraguado

Los gráficos se elaboraron utilizando el programa *Microsoft Excel*.

La información de las medidas de penetración mostradas en la tabla anterior, es traspasada a gráficos donde sobre el eje de abscisas se grafican los puntos con el tiempo transcurrido, en minutos, y sobre el eje de las ordenadas, se grafica la resistencia a la penetración, en mega pascales.

En el siguiente ejemplo se muestran las medidas de penetración obtenidas para la probeta 1 de la tabla anterior, en cada punto se indica el valor exacto de resistencia a la penetración.

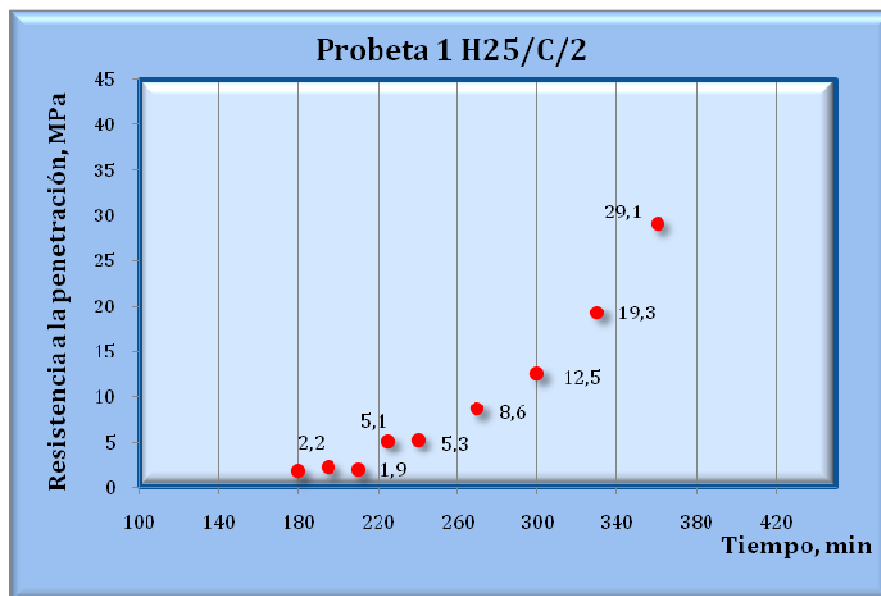


Gráfico 6: Medidas de penetración en forma gráfica (Elaboración propia).

Una vez ingresado los datos al gráfico se trazó una curva que represente de la mejor manera posible la tendencia de los puntos.

Se graficaron además las rectas en que la resistencia a la penetración toma los valores de **3,5** y **28 MPa**, que según la norma NCh 2183 corresponden al inicio y fin de fraguado respectivamente.

Finalmente a través de *Microsoft Excel* se obtiene la intersección entre estas dos rectas y la curva de tendencia, determinando así el valor del tiempo de fraguado inicial y final de la probeta en cuestión.

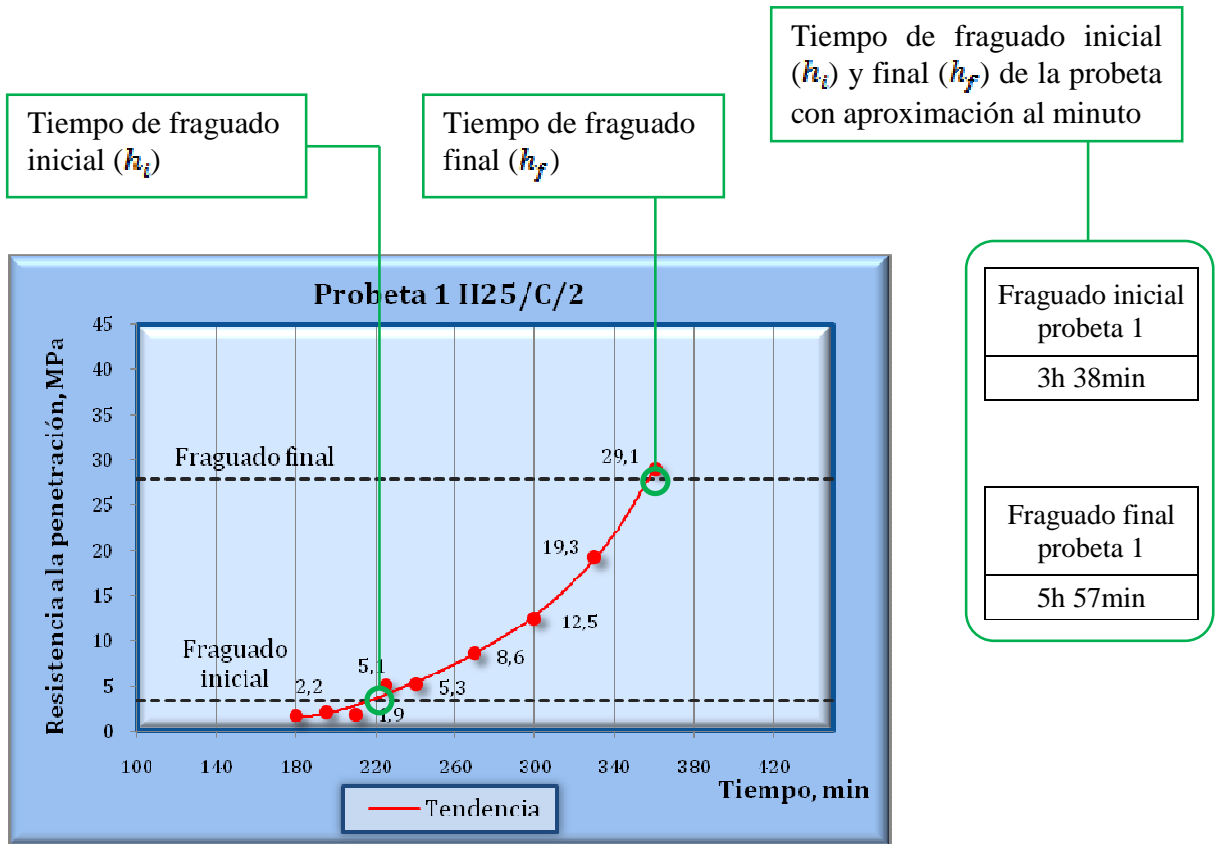


Figura 19: Ubicación gráfica del inicio y fin de fraguado de probetas (Elaboración propia).

De este modo se construyó un gráfico para cada una de las 3 probetas de una misma amasada, para obtener finalmente el tiempo de fraguado (inicial y final) de la mezcla gemela correspondiente, promediando los tiempos determinados para cada una de las tres probetas, aproximando a los 5 minutos:

Hormigón H25/C/2	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 35min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 55min</b>

Tiempo de fraguado inicial y final del hormigón H25/C/2, con aproximación a los 5 minutos

Figura 20: Tiempo de fraguado inicial y final de una mezcla de hormigón (Elaboración propia).

El resultado anterior se ingresa en la tabla que se muestra a continuación, donde además se aprecian los resultados de las otras mezclas gemelas, que se obtienen de la misma manera.

Hormigón H25 Cemento Grado Corriente				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	8,5	16,1	4:10	6:40
2	9,0	18,5	3:35	5:55
3	8,0	17,8	3:35	6:45
<b>Promedio</b>	<b>8,5</b>	<b>17,5</b>	<b>3:45</b>	<b>6:25</b>

Tiempo de fraguado inicial y final del hormigón H25/C/2 de la mezcla gemela N° 2

Figura 21: Resultados tiempo de fraguado para las tres mezclas gemelas de un hormigón (Elaboración propia).

Las columnas 2 y 3 indican el valor del asentamiento del cono de Abrams y la temperatura ambiente para cada una de las tres mezclas gemelas.

En la última fila se muestra el promedio de los valores obtenidos de las tres mezclas gemelas, en este caso para el hormigón H25 en base a cemento grado corriente.

### 3.2 ENSAYOS REALIZADOS A LOS ÁRIDOS PARA LA DOSIFICACIÓN

Previo a la dosificación de los hormigones, es necesario conocer las características de los áridos, pues como se dijo anteriormente, para que puedan ser utilizados en hormigones, es necesario verificar que cumplan con los requisitos de la norma NCh 163.Of79.

Los ensayos realizados a los áridos fueron descritos en el capítulo 1.3.2.2 y los resultados obtenidos se detallan a continuación:

#### 3.2.1 Determinación de la granulometría

Ensayo realizado según norma NCh 165.Of2009, los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 21: Resultados granulometría de los áridos (Elaboración propia).

<b>Granulometría</b>			
<b>Tamiz, ASTM</b>	<b>% que pasa</b>		
	<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>
2"	100	100	100
1½"	97	100	100
1"	38	100	100
¾"	9	100	100
½"	0	48	100
⅜"	0	12	100
#4	0	0	82
#8	0	0	70
#16	0	0	58
#30	0	0	31
#50	0	0	5
#100	0	0	1

### Fracciones de los áridos a utilizar en la mezcla

A partir de la granulometría obtenida para los tres tipos de áridos se determinan los porcentajes que mejor se adaptan a las bandas granulométricas indicadas en la norma NCh 163.

Tabla 22: Árido combinado en proporciones óptimas (Elaboración propia).

<b>Tamiz (ASTM)</b>	<b>% que pasa</b>			<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>	<b>Granulometría de la mezcla</b>	<b>Granulometría recomendada para Dn 40 mm (NCh 163)</b>	
	<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>					<b>30%</b>	<b>25%</b>
2"	100	100	100	30	25	45	100	-	-
1½"	97	100	100	29	25	45	99	100	100
1"	38	100	100	11	25	45	81	-	-
¾"	9	100	100	3	25	45	73	60	80
½"	0	48	100	0	12	45	57	-	-
⅜"	0	12	100	0	3	45	48	40	61
#4	0	0	82	0	0	37	37	24	48
#8	0	0	70	0	0	32	32	15	37
#16	0	0	58	0	0	26	26	10	28
#30	0	0	31	0	0	14	14	6	19
#50	0	0	5	0	0	2	2	3	11
#100	0	0	1	0	0	0	0	2	5

### 3.2.2 Determinación de impurezas orgánicas en las arenas

Ensayo realizado a la arena según norma ASTM C 40-2004 obteniéndose como resultado “Nivel 3”, por lo que el agregado fino es apto para ser utilizado en la elaboración de hormigones.



Figura 22: Resultado ensayo impurezas orgánicas en las arenas ([Elaboración propia](#)).

Tabla 23: Resultado ensayo impurezas orgánicas en las arenas (Norma ASTM C 40-2004).

Color Gardner N°	Disco orgánico N°
5	1
8	2
11	3
14	4
16	5

### 3.2.3 Determinación del material fino menor a 0,080 mm

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma NCh 1223.Of77 y los resultados obtenidos son los que se detallan a continuación:

Tabla 24: Resultados ensayo material fino menor a 0,080 mm (Elaboración propia).

% material fino		
Grava	Gravilla	Arena
0,1	0,0	0,8

### 3.2.4 Determinación de las densidades reales, densidades netas y absorción de agua

Ensayo realizado según norma NCh 1117 para el árido grueso y NCh 1239 para la arena. Los resultados son los siguientes:

Tabla 25: Resultados ensayo densidades real y neta, y absorción de agua de los áridos (Elaboración propia).

	Grava	Gravilla	Arena
Densidad real seca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2653	2652	2613
Absorción de agua (%)	0,75	0,97	1,26

### 3.3 DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

Para la dosificación de los hormigones de esta investigación se utilizó el Método LEMCO del Laboratorio de Ensayes de Materiales de Construcción de la Universidad Austral de Chile de Valdivia, basado en la norma NCh 170.Of85

#### 3.3.1 Dosificación hormigón H20 en base a cemento corriente

En la dosificación de este hormigón se explicará con detalle cada paso del procedimiento, esto con la finalidad de poder comprender cómo se llega a cada resultado, sin embargo en los hormigones restantes se mostrará solo el resumen de la dosificación.

##### 3.3.1.1 Resistencia media requerida $f_r$

La resistencia media del hormigón, tiene que ser mayor que la resistencia especificada ( $f_c$ ) para absorber la diferencia aleatoria que se origina en las variaciones propias del proceso de fabricación (equipos, materiales, etc.), del muestreo o de los ensayos.

La resistencia media requerida se calcula según la expresión:

$$f_r = f_c + s \cdot t \quad (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

$f_c$ : resistencia especificada del hormigón a 28 días ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$s$ : desviación estándar ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$t$ : factor estadístico que depende del nivel de confianza del hormigón. Se obtiene de la siguiente tabla:

Tabla 26: Factor estadístico  $t$  según nivel de confianza. (Norma NCh 170.Of85).

Nivel de confianza, %	$t$
95	1,645
90	1,282
85	1,036
80	0,842

En este caso se tiene:

$$f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$$

$$s = 47,6 \text{ kg/cm}^2$$

$$t = 0,842$$

De este modo la resistencia media requerida es la siguiente:

$$f_r = 200 \text{ kg/cm}^2 + 0,842 \cdot 47,6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\underline{f_r = 240 \text{ kg/cm}^2}$$

### 3.3.1.2 Determinación de la razón agua/cemento $A/C$

La razón agua/cemento se obtiene por condición de resistencia de acuerdo al procedimiento 3 de la norma NCh 170, basado en la resistencia media requerida ( $f_r$ ) y el grado del cemento a utilizar (tabla 3 NCh 170). Para la utilización de dicha tabla, el valor de  $f_r$  debe ingresarse en MPa (1  $MPa = 10 \text{ kg/cm}^2$ ). En caso de no estar el valor exacto de  $f_r$  se debe interpolar.

Tabla 27: Razón agua/cemento para resistencia media requerida,  $f_r$  (Norma NCh 170.Of85).

Razón agua/cemento en masa	Resistencia media requerida $f_r$ , $MPa$	
	Cemento grado corriente	Cemento grado alta resistencia
0,45	34	43
0,50	29	36
0,55	25	31
0,60	21	26
0,65	18	23
0,70	16	20
0,75	14	17
0,80	12	15
0,85	10	13

Como  $f_r = 240 \text{ kg/cm}^2$  equivale a  $24 \text{ MPa}$ , y como en esta dosificación utilizaremos cemento grado corriente, debemos interpolar entre 21 y 25, de este modo se obtiene:

$$\underline{A/C = 0,56}$$

### 3.3.1.3 Agua de amasado **A**

Con el tamaño máximo nominal del árido y la docilidad según descenso de cono, se estima la cantidad de agua de amasado con la siguiente tabla:

Tabla 28: Volumen estimado de agua de amasado en  $m^3$  (Norma NCh 170.Of85).

Tamaño máximo nominal, mm	Docilidad según descenso de cono, <i>cm</i>				
	0 - 2	3 - 5	6 - 9	10 - 15	16
63	0,135	0,145	0,155	0,165	0,170
50	0,145	0,155	0,165	0,175	0,180
40	0,150	0,160	0,170	0,180	0,185
25	0,170	0,180	0,190	0,200	0,205
20	0,175	0,185	0,195	0,205	0,210
12	0,185	0,200	0,210	0,220	0,230
10	0,190	0,205	0,215	0,230	0,240

Entonces  **$A = 0,170 m^3$**

**$A = 170 l$**

### 3.3.1.4 Cantidad de cemento **C**

Para determinar la dosis de cemento se utiliza la siguiente expresión ( $kg/m^3$ ):

$$C = \frac{A}{A/C}$$

**A**: agua de amasado en litros

**A/C**: razón agua/cemento

Luego:  **$C = 170 / 0,56$**

**$C = 304 kg$**

### 3.3.1.5 Volumen de áridos **V<sub>A</sub>**

El volumen de áridos se establece mediante la siguiente relación:

$$V_A = 1000 - [C/3 + A + Aire]$$

**C:** cantidad de cemento (*kg*)

**A:** agua de amasado en litros

**Aire:** cantidad promedio de aire atrapado. Se toma de los valores de la tabla que se muestra a continuación, ingresando con el tamaño máximo nominal del árido:

Tabla 29: Aire promedio atrapado  $m^3$  (Norma NCh 170.Of85).

Tamaño máximo nominal, mm	Volumen medio de aire atrapado, $m^3$
63	0,003
50	0,005
40	0,010
25	0,015
20	0,020
12	0,025
10	0,030

De este modo tenemos  $V_A = 1000 - [304/3 + 170 + 10]$

$$\underline{V_A = 718 \text{ l}}$$

### 3.3.1.6 Peso de los áridos $P_A$

Para determinar el peso total de los áridos se utiliza la siguiente expresión basada en el volumen  $V_A$ , en la densidad real  $D_r$  y en las fracciones de los áridos:

$$P_A = V_A \cdot \frac{D_{rR} \cdot D_{rg} \cdot D_{ra}}{\%RM \cdot D_{rg} \cdot D_{ra} + \%gM \cdot D_{rR} \cdot D_{ra} + \%aM \cdot D_{rR} \cdot D_{rg}}$$

$V_A$ : volumen de áridos

$D_{rR}$ : densidad real de la grava

$D_{rg}$ : densidad real de la gravilla

$D_{ra}$ : densidad real de la arena

$\%RM$ : porcentaje de grava de la mezcla

$\%gM$ : porcentaje de gravilla de la mezcla

$\%aM$ : porcentaje de arena de la mezcla

Utilizando los datos determinados en los ensayos realizados a los áridos en laboratorio se tiene:

$$P_A = 718 \cdot \frac{2,65 \cdot 2,65 \cdot 2,61}{0,30 \cdot 2,65 \cdot 2,61 + 0,25 \cdot 2,65 \cdot 2,61 + 0,45 \cdot 2,65 \cdot 2,65}$$

$$\underline{P_A = 1890 \text{ kg}}$$

### 3.3.1.7 Peso de las fracciones de áridos

Una vez determinado el peso total de los áridos se calcula el peso de las fracciones de áridos (grava, gravilla y arena). Para ello se utilizan los porcentajes de árido grueso y fino que mejor se adaptaron a las bandas granulométricas (ver tabla 19).

De esta manera el peso de las fracciones de áridos se obtiene como sigue:

$$P_G = P_A \cdot \%RM$$

$$P_g = P_A \cdot \%gM$$

$$P_a = P_A \cdot \%aM$$

$$P_G = 1890 \cdot 0,30$$

$$\underline{P_G = 567 \text{ kg}}$$

$$P_g = 1890 \cdot 0,25$$

$$\underline{P_g = 473 \text{ kg}}$$

Gravilla
----------

$$P_a = 1890 \cdot 0,45$$

$$\underline{P_a = 850 \text{ kg}}$$

Arena
-------

### 3.3.1.8 Resumen dosificación

Tabla 30: Resumen dosificación para  $1 \text{ m}^3$  de hormigón grado H20 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).

Hormigón grado	Cemento kg	Agua lt	Grava kg	Gravilla kg	Arena kg	Asent. de cono, cm	Observaciones
H20 (80)	304	170	567	473	850	6 – 9	$D_n = 1 1/2''$

### 3.3.2 Dosificación para las 6 mezclas de hormigón

El método desarrollado y explicado anteriormente para la dosificación del hormigón H20 en base a cemento grado corriente es similar para los demás hormigones a diseñar. A continuación se presentan los resultados de dosificación para las 6 mezclas.

Tabla 31: Resumen dosificaciones para  $1 \text{ m}^3$  (Elaboración propia).

<b>Cemento grado</b>	<b>Hormigón grado</b>	<b>Cemento <i>kg</i></b>	<b>Agua <i>lt</i></b>	<b>Grava <i>kg</i></b>	<b>Gravilla <i>kg</i></b>	<b>Arena <i>kg</i></b>	<b>Asent. de cono, <i>cm</i></b>
Corriente	H20	304	170	567	473	850	6-9
	H25	340	170	557	465	836	6-9
	H30	378	170	548	457	822	6-9
Alta Resistencia	H20	270	170	576	480	865	6-9
	H25	298	170	568	474	853	6-9
	H30	327	170	561	468	842	6-9

Tabla 32: Resumen dosificaciones para  $50 \text{ lt}$  (Elaboración propia).

<b>Mezcla</b>	<b>Cemento grado</b>	<b>Hormigón grado</b>	<b>Cemento <i>kg</i></b>	<b>Agua <i>lt</i></b>	<b>Grava <i>kg</i></b>	<b>Gravilla <i>kg</i></b>	<b>Arena <i>kg</i></b>	<b>Volumen mezcla <i>lt</i></b>
1	Corriente	H20	15,2	8,50	28,4	23,7	42,5	50
2		H25	17,0	8,50	27,9	23,3	41,8	50
3		H30	18,9	8,50	27,4	22,9	41,1	50
4	Alta Resistencia	H20	13,5	8,50	28,8	24,0	43,3	50
5		H25	14,9	8,50	28,4	23,7	42,7	50
6		H30	16,4	8,50	28,1	23,4	42,1	50

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 RESULTADOS DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO

Los resultados obtenidos para el tiempo de fraguado inicial y final de las 6 mezclas y sus respectivas mezclas gemelas se expresan de acuerdo al capítulo 2.5.3 *Expresión de resultados* de esta memoria.

#### 4.1.1 Hormigón H20 en base a cemento grado corriente

##### *Mezcla gemela 1*

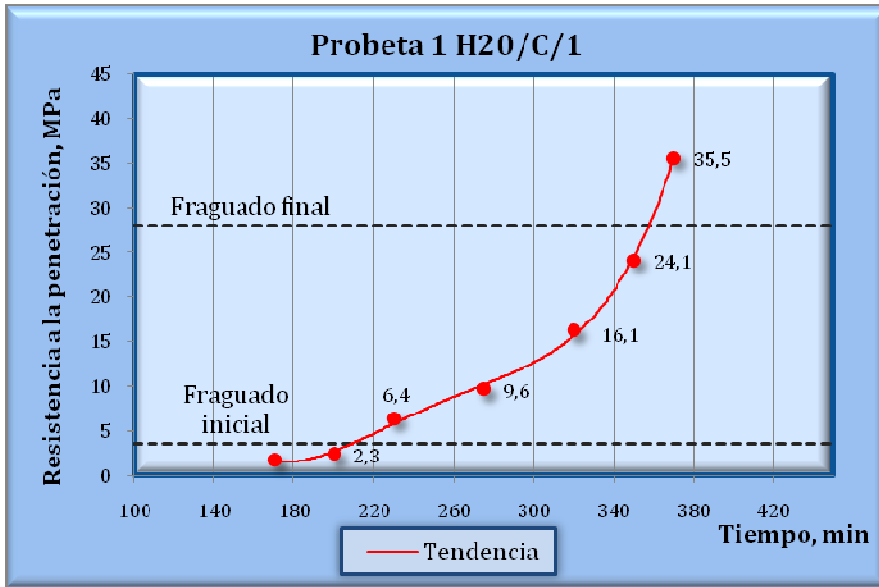
Tabla 33: Información de hormigón H20/C/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

<b>H20/C/1</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	24/03/2013
Cemento (kg)	15,2	-	15,2	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-2,90	5,6	Razón A/C	0,56
Grava (kg)	28,4	0,33	28,7	Cono, cm	7,5
Gravilla (kg)	23,7	0,45	24,2	Temp. ambiente, °C	17,5
Arena (kg)	42,5	3,10	45,6	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	279
Agua abs (lt)	0,98	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2443

Tabla 34: Resistencia a la penetración hormigón H20/C/1 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
16:00	2:50	170	645	1100	1,7	900	1,4	950	1,5
16:30	3:20	200	645	1500	2,3	1650	2,6	1780	2,8
17:00	3:50	230	645	4100	6,4	4300	6,7	4000	6,2
17:45	4:35	275	323	3100	9,6	3400	10,5	3000	9,3
18:30	2:20	320	161	2600	16,1	2620	16,3	2710	16,8
19:00	5:50	350	161	3880	24,1	3950	24,5	4300	26,7
19:20	6:10	370	65	2310	35,5	2400	36,9	2150	33,1
Hora inicial de la amasada			13:10						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			17,8						

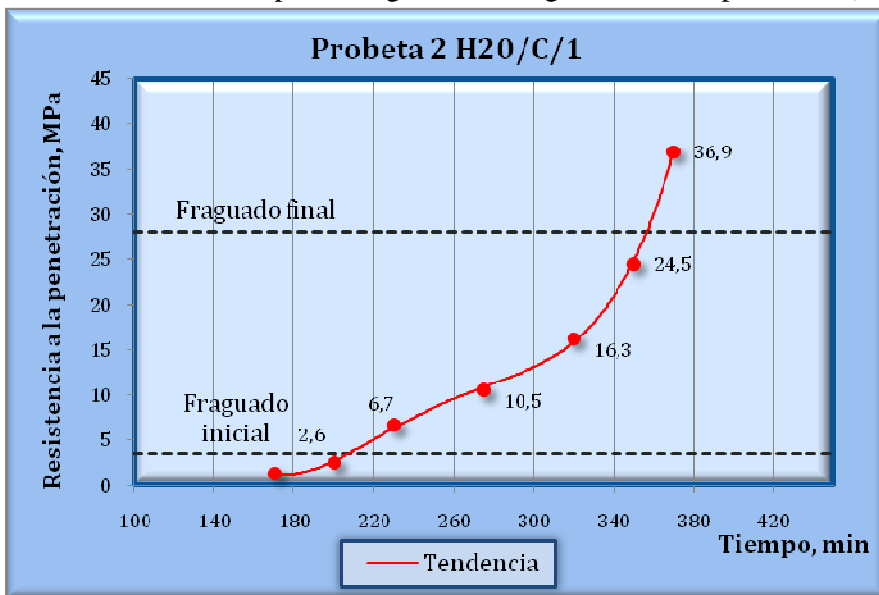
Gráfico 7: Tiempo de fraguado hormigón H2O/C/1, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 28min

Fraguado final probeta 1
5h 56min

Gráfico 8: Tiempo de fraguado hormigón H2O/C/1, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 28min

Fraguado final probeta 2
5h 56min

Gráfico 9: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/1, probeta 3 (Elaboración propia).

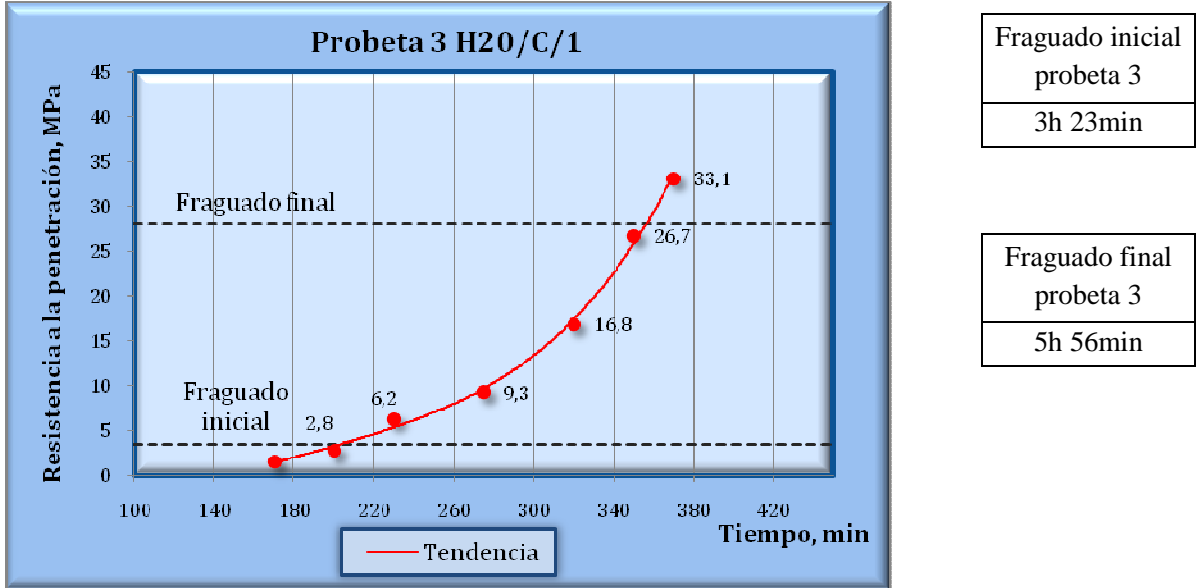


Tabla 35: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

Hormigón H20/C/1	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 25min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 55min</b>

**Mezcla gemela 2**

Tabla 36: Información de hormigón H20/C/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

H20/C/2			
Corrección por humedad			Información del ensayo
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida
Cemento (kg)	15,2	-	15,2
Agua (lt)	8,5	-3,06	5,4
Grava (kg)	28,4	0,26	28,7
Gravilla (kg)	23,7	0,41	24,1
Arena (kg)	42,5	3,37	45,9
Agua abs (lt)	0,98	-	-
			Fecha ensayo 28/03/2013
			Grado cemento Corriente
			Razón A/C 0,56
			Cono, cm 6,0
			Temp. ambiente, °C 20,1
			Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup> 288
			Densidad, kg/m <sup>3</sup> 2442

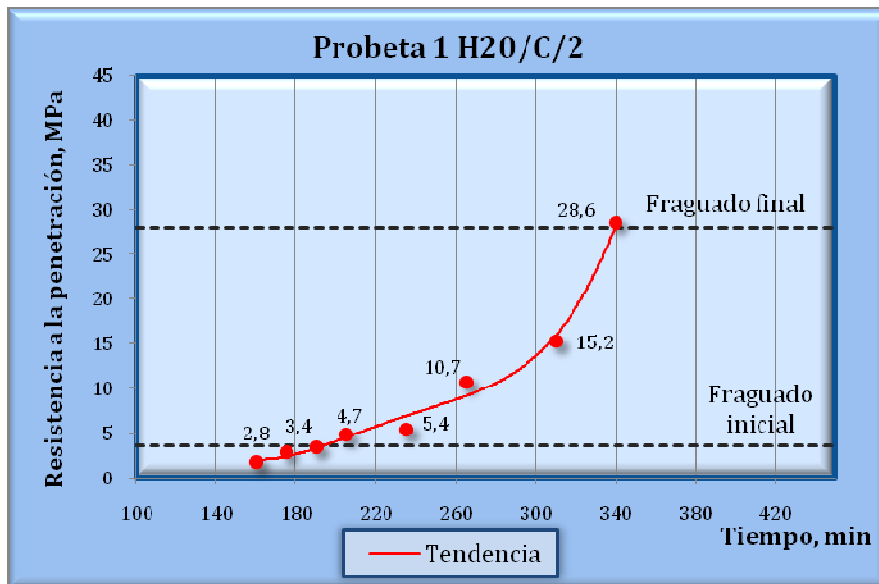
Tabla 37: Resistencia a la penetración hormigón H20/C/2 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
16:00	2:40	160	645	1100	1,7	1100	1,7	1000	1,6
16:15	2:55	175	645	1800	2,8	1600	2,5	2080	3,2
16:30	3:10	190	645	2190	3,4	2480	3,8	1950	3,0
16:45	3:25	205	645	3050	4,7	2330	3,6	2450	3,8
17:15	3:55	235	323	1730	5,4	1600	5,0	1750	5,4
17:45	4:25	265	323	3450	10,7	3090	9,6	3000	9,3
18:30	5:10	310	161	2450	15,2	2350	14,6	2000	12,4
19:00	5:40	340	161	4600	28,6	4550	28,3	4030	25,0
19:15	5:55	355	65	-	-	-	-	1920	29,5

Hora inicial de la amasada	13:20
----------------------------	-------

Temperatura del mortero de hormigón, °C	18,1
---	------

Gráfico 10: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, probeta 1 (Elaboración propia).



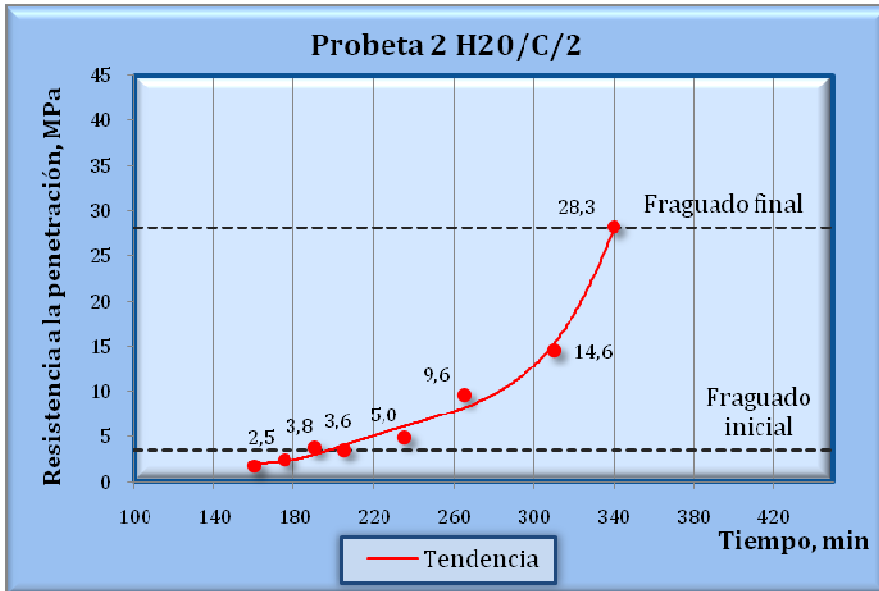
Fraguado inicial probeta 1
----------------------------

3h 11min
----------

Fraguado final probeta 1
--------------------------

5h 40min
----------

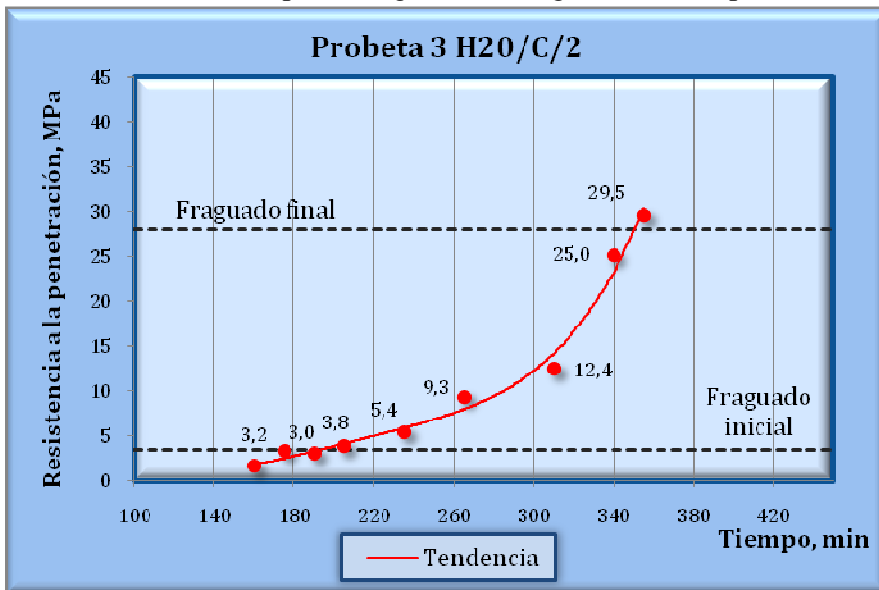
Gráfico 11: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 16min

Fraguado final probeta 2
5h 40min

Gráfico 12: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
3h 13min

Fraguado final probeta 3
5h 51min

Tabla 38: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

Hormigón H20/C/2	Tiempo de fraguado inicial	3h 15min
	Tiempo de fraguado final	5h 45min

**Mezcla gemela 3**

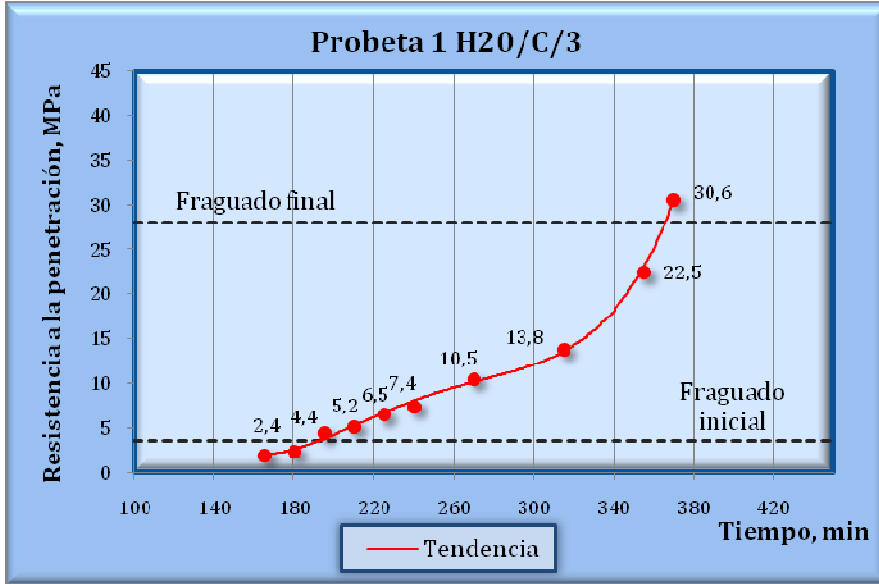
Tabla 39: Información de hormigón H20/C/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

<b>H20/C/3</b>					
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>		
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	01/04/2013
Cemento (kg)	15,2	-	15,2	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-4,35	4,2	Razón A/C	0,56
Grava (kg)	28,4	0,31	28,7	Cono, cm	6,5
Gravilla (kg)	23,7	0,46	24,2	Temp. ambiente, °C	19,9
Arena (kg)	42,5	4,56	47,1	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	257
Agua abs (lt)	0,98	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2437

Tabla 40: Resistencia a la penetración hormigón H20/C/3 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
16:15	2:45	165	645	1250	1,9	1090	1,7	1480	2,3
16:30	3:00	180	645	1560	2,4	1200	1,9	1680	2,6
16:45	3:15	195	645	2860	4,4	2020	3,1	2350	3,6
17:00	3:30	210	645	3350	5,2	3350	5,2	3690	5,7
17:15	3:45	225	323	2100	6,5	1800	5,6	1890	5,9
17:30	4:00	240	323	2400	7,4	1810	5,6	2000	6,2
18:00	4:30	270	161	1690	10,5	1200	7,5	1420	8,8
18:45	5:15	315	65	900	13,8	850	13,1	1170	18,0
19:25	5:55	355	65	1460	22,5	1900	29,2	2010	30,9
19:40	6:10	370	65	1990	30,6	-	-	-	-
Hora inicial de la amasada			13:30						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,1						

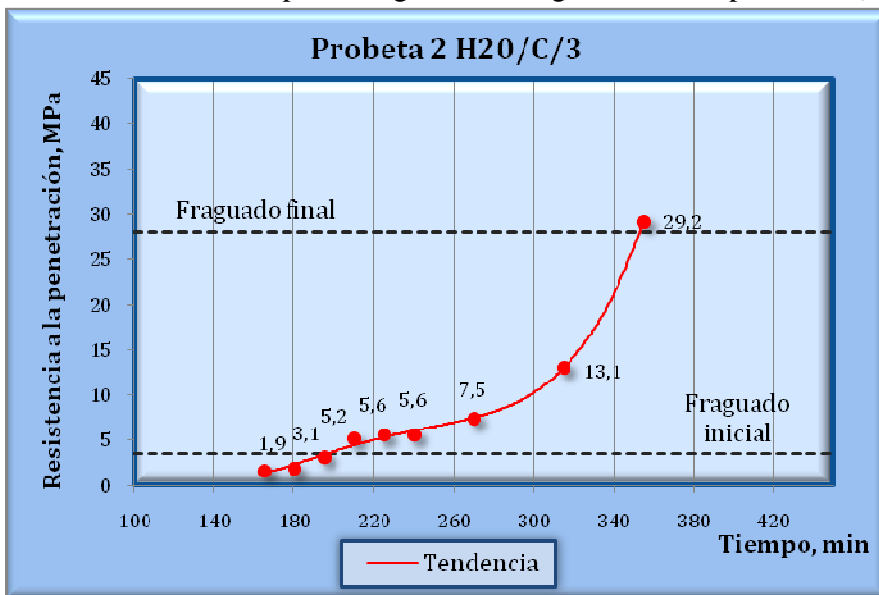
Gráfico 13: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 12min

Fraguado final probeta 1
6h 05min

Gráfico 14: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 16min

Fraguado final probeta 2
5h 53min

Gráfico 15: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, probeta 3 (Elaboración propia).

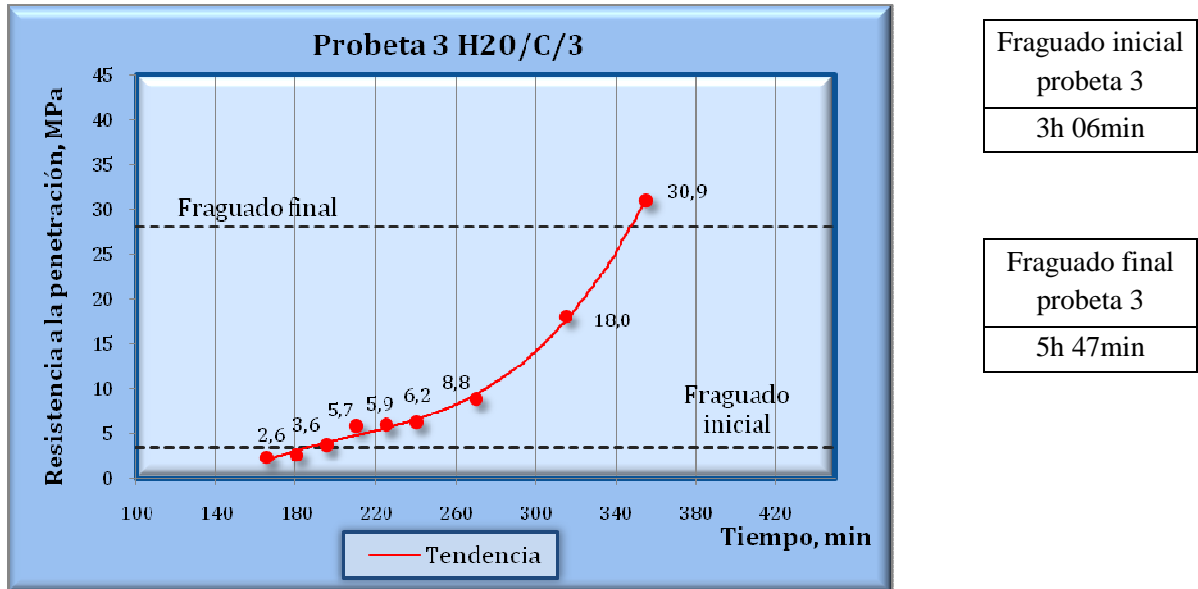


Tabla 41: Tiempo de fraguado hormigón H20/C/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

Hormigón H20/C/3	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 10min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 55min</b>

### *Resultado tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente*

Tabla 42: Resumen tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).

Hormigón H20 Cemento Grado Corriente				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	7,5	17,5	3:25	5:55
2	6,0	20,1	3:15	5:45
3	6,5	19,9	3:10	5:55
<b>Promedio</b>	<b>6,5</b>	<b>19,2</b>	<b>3:15</b>	<b>5:50</b>

#### 4.1.2 Hormigón H25 en base a cemento grado corriente

##### Mezcla gemela 1

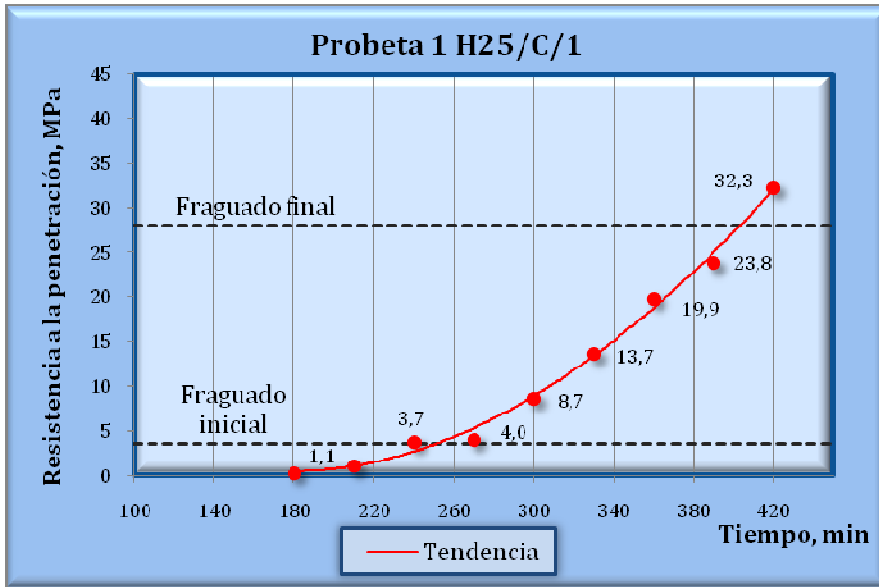
Tabla 43: Información de hormigón H25/C/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

<b>H25/C/1</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	26/03/2013
Cemento (kg)	17,0	-	17,0	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-1,39	7,1	Razón A/C	0,50
Grava (kg)	27,9	0,25	28,2	Cono, cm	8,5
Gravilla (kg)	23,3	0,51	23,8	Temp. ambiente, °C	16,1
Arena (kg)	41,8	1,59	43,4	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	308
Agua abs (lt)	0,96	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2438

Tabla 44: Resistencia a la penetración hormigón H25/C/1 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
13:35	3:00	180	645	200	0,3	330	0,5	360	0,6
14:05	3:30	210	645	700	1,1	1200	1,9	550	0,9
14:35	4:00	240	645	2400	3,7	1300	2,0	900	1,4
15:05	4:30	270	645	2600	4,0	2300	3,6	2250	3,5
15:35	5:00	300	323	2800	8,7	2820	8,7	2770	8,6
16:05	5:30	330	161	2200	13,7	2890	18,0	1790	11,1
16:35	6:00	360	161	3200	19,9	3500	21,7	2880	17,9
17:05	6:30	390	65	1550	23,8	1720	26,5	1350	20,8
17:35	7:00	420	65	2100	32,3	2290	35,2	2090	32,2
Hora inicial de la amasada			10:35						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			15,4						

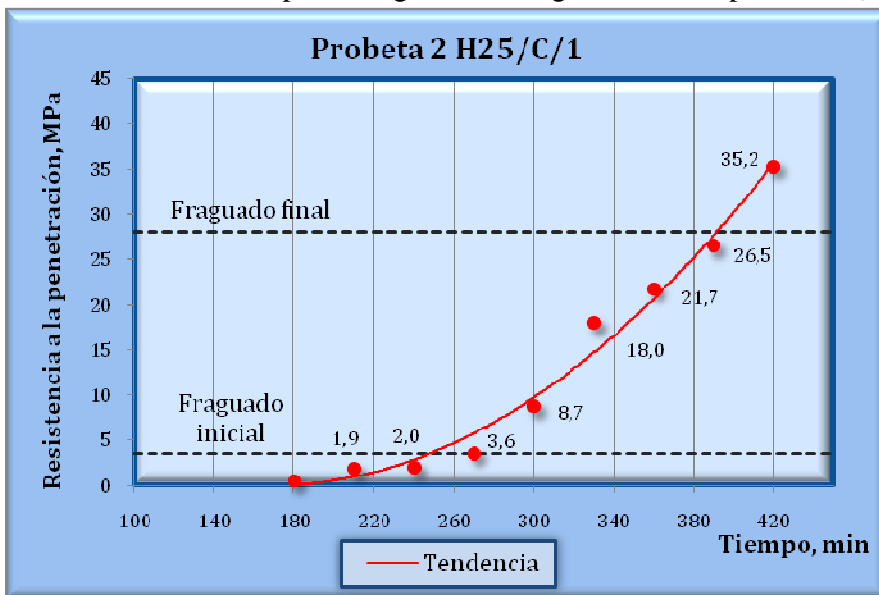
Gráfico 16: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
4h 09min

Fraguado final probeta 1
6h 43min

Gráfico 17: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
4h 06min

Fraguado final probeta 2
6h 31min

Gráfico 18: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, probeta 3 (Elaboración propia).

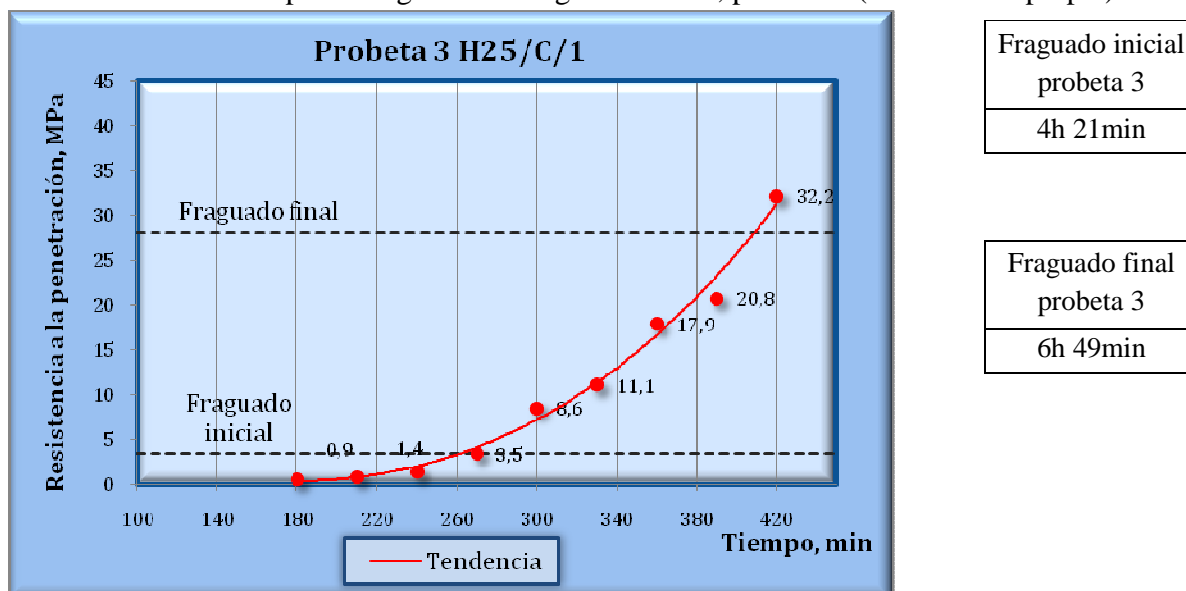


Tabla 45: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

Hormigón H25/C/1	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>4h 10min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>6h 40min</b>

**Mezcla gemela 2**

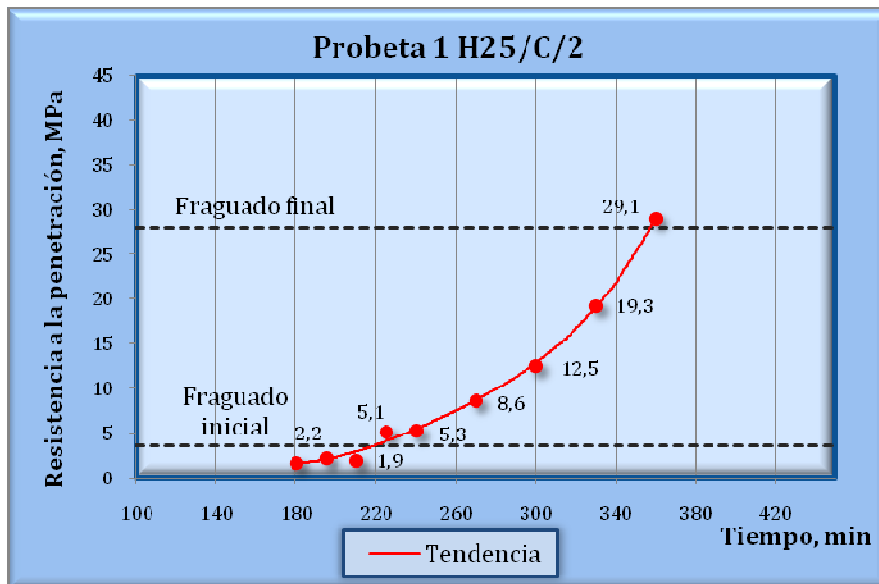
Tabla 46: Información de hormigón H25/C/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

<b>H25/C/2</b>					
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>		
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	30/03/2013
Cemento (kg)	17,0	-	17,0	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-4,59	3,9	Razón A/C	0,50
Grava (kg)	27,9	0,25	28,2	Cono, cm	9,0
Gravilla (kg)	23,3	0,37	23,7	Temp. ambiente, °C	18,5
Arena (kg)	41,8	4,93	46,7	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	307
Agua abs (lt)	0,96	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2432

Tabla 47: Resistencia a la penetración hormigón H25/C/2 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
15:35	3:00	180	645	1100	1,7	1290	2,0	1080	1,7
15:50	3:15	195	645	1400	2,2	1980	3,1	1220	1,9
16:05	3:30	210	645	1250	1,9	1690	2,6	1430	2,2
16:20	3:45	225	645	3290	5,1	3680	5,7	3690	5,7
16:35	4:00	240	323	1700	5,3	2090	6,5	2480	7,7
17:05	4:30	270	323	2790	8,6	3300	10,2	2790	8,6
17:35	5:00	300	161	2020	12,5	2400	14,9	2450	15,2
18:05	5:30	330	161	3110	19,3	3410	21,2	3400	21,1
18:35	6:00	360	65	1890	29,1	2240	34,5	1900	29,2
Hora inicial de la amasada			12:35						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,0						

Gráfico 19: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, probeta 1 (Elaboración propia).

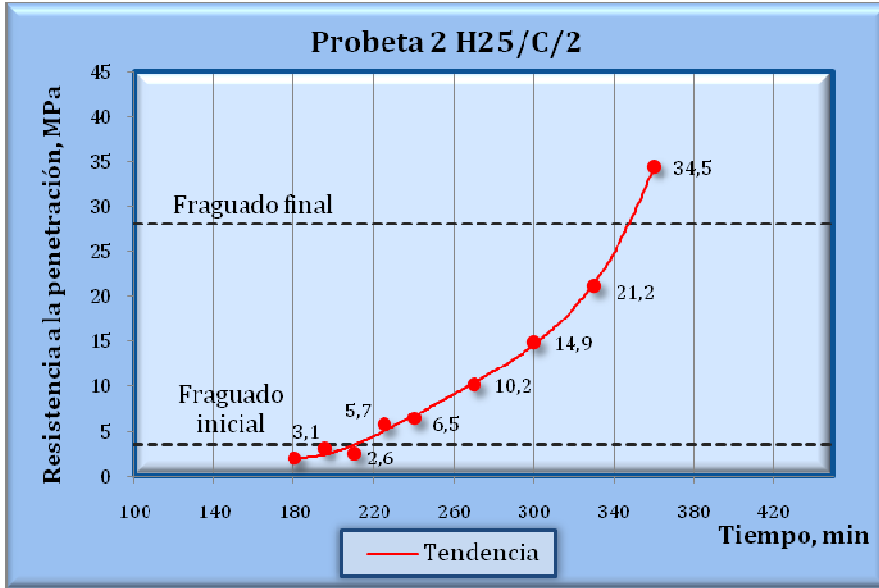
Fraguado inicial  
probeta 1

3h 38min

Fraguado final  
probeta 1

5h 57min

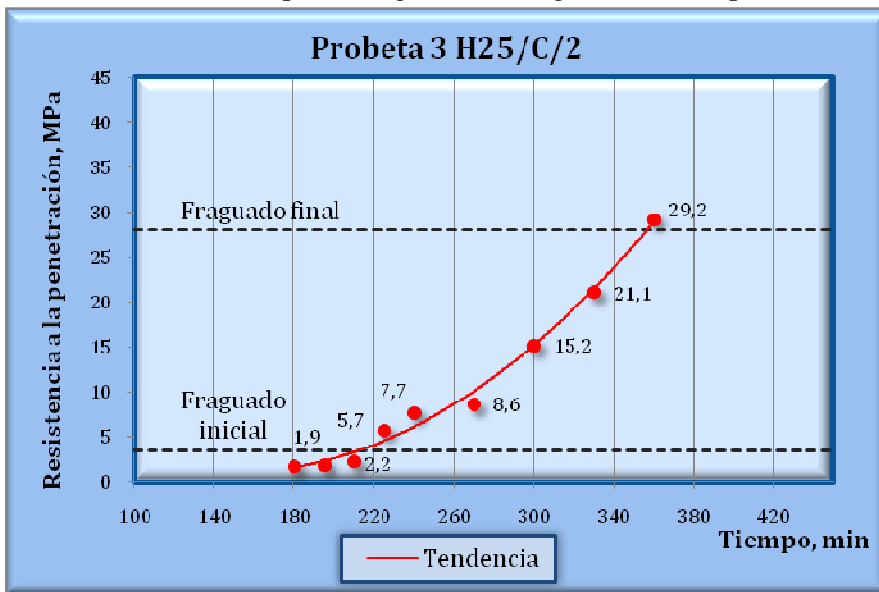
Gráfico 20: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 29min

Fraguado final probeta 2
5h 48min

Gráfico 21: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
3h 33min

Fraguado final probeta 3
5h 57min

Tabla 48: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

Hormigón H25/C/2	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 35min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 55min</b>

**Mezcla gemela 3**

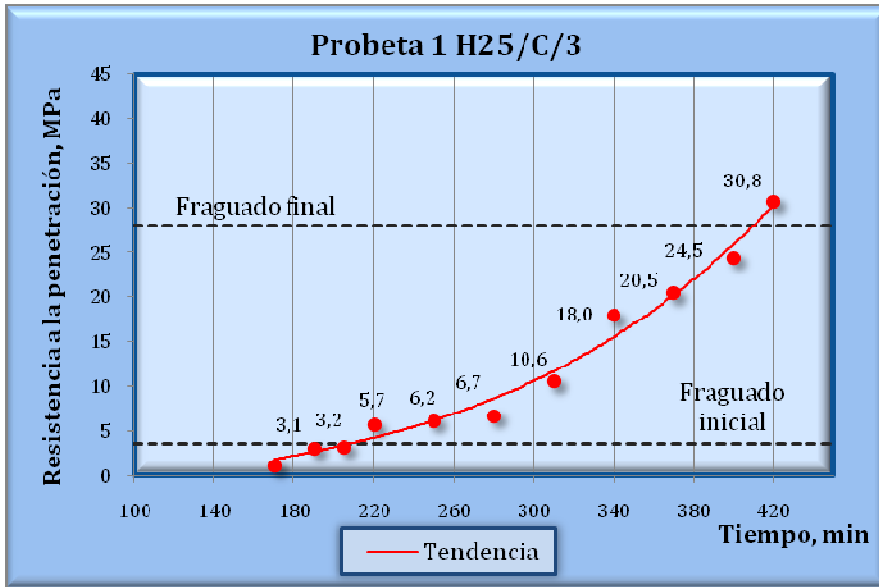
Tabla 49: Información de hormigón H25/C/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

<b>H25/C/3</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	02/04/2013
Cemento (kg)	17,0	-	17,0	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-4,23	4,3	Razón A/C	0,50
Grava (kg)	27,9	0,26	28,2	Cono, cm	8,0
Gravilla (kg)	23,3	0,47	23,8	Temp. ambiente, °C	17,8
Arena (kg)	41,8	4,46	46,3	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	286
Agua abs (lt)	0,96	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2444

Tabla 50: Resistencia a la penetración hormigón H25/C/3 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm</i> <sup>2</sup>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
16:02	2:50	170	645	740	1,1	700	1,1	680	1,1
16:22	3:10	190	645	1990	3,1	1550	2,4	1340	2,1
16:37	3:25	205	645	2090	3,2	1700	2,6	1880	2,9
16:52	3:40	220	645	3680	5,7	3100	4,8	2840	4,4
17:22	4:10	250	323	2000	6,2	2000	6,2	1650	5,1
17:52	4:40	280	323	2180	6,7	2150	6,7	1810	5,6
18:22	5:10	310	161	1700	10,6	1650	10,2	1590	9,9
18:52	5:40	340	161	2890	18,0	2680	16,6	2250	14,0
19:22	6:10	370	65	1330	20,5	1530	23,5	1200	18,5
19:52	6:40	400	65	1590	24,5	2010	30,9	1500	23,1
20:12	7:00	420	65	2000	30,8	-	-	1900	29,2
Hora inicial de la amasada			13:12						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			17,6						

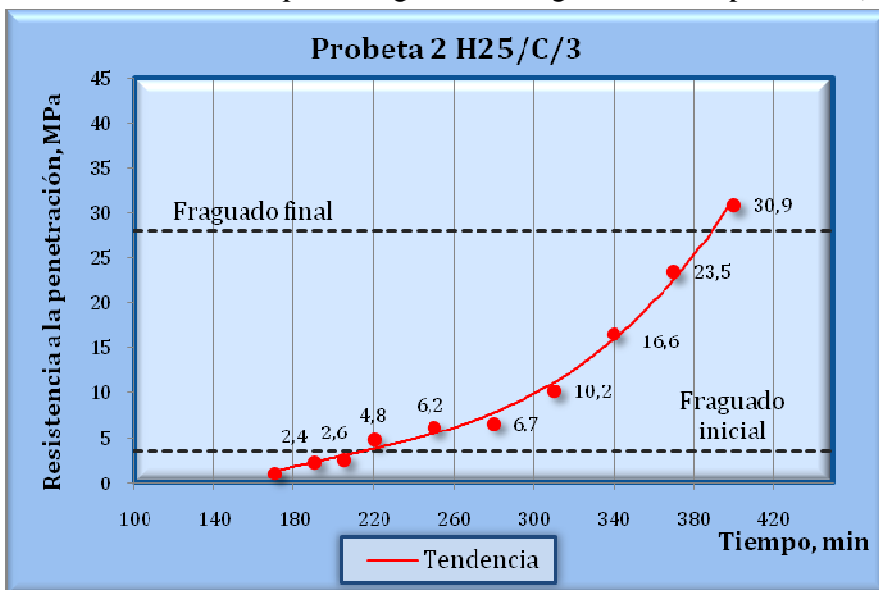
Gráfico 22: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 28min

Fraguado final probeta 1
6h 50min

Gráfico 23: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 35min

Fraguado final probeta 2
6h 30min

Gráfico 24: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, probeta 3 (Elaboración propia).

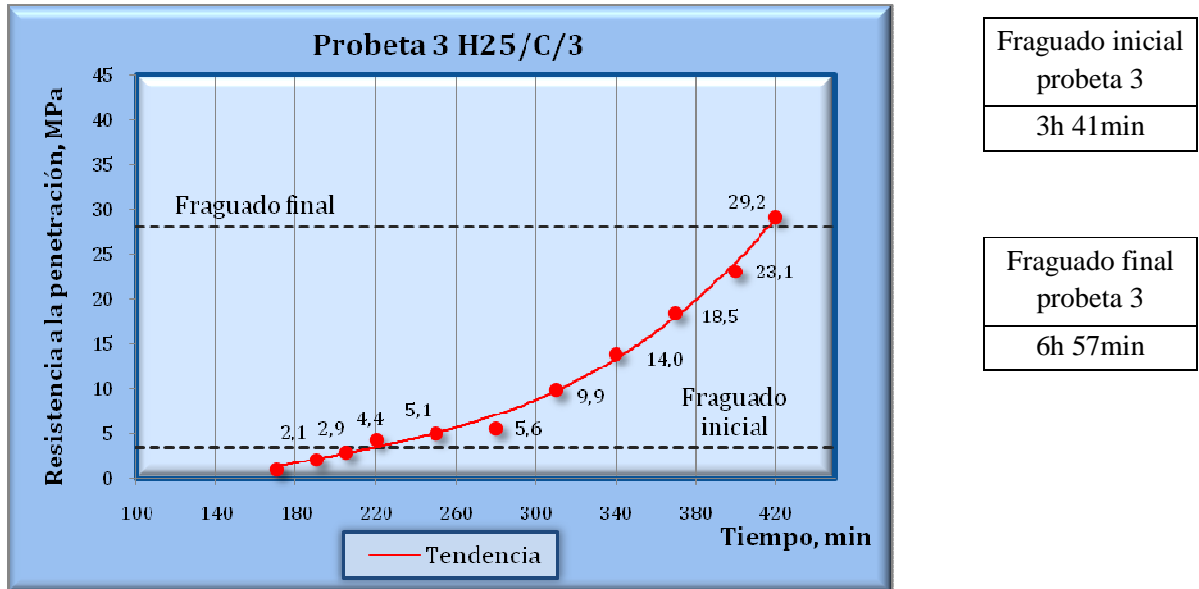


Tabla 51: Tiempo de fraguado hormigón H25/C/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

Hormigón H25/C/3	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 35min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>6h 45min</b>

### *Resultado tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente*

Tabla 52: Resumen tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).

Hormigón H25 Cemento Grado Corriente				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	8,5	16,1	4:10	6:40
2	9,0	18,5	3:35	5:55
3	8,0	17,8	3:35	6:45
<b>Promedio</b>	<b>8,5</b>	<b>17,5</b>	<b>3:45</b>	<b>6:25</b>

#### 4.1.3 Hormigón H30 en base a cemento grado corriente

##### Mezcla gemela 1

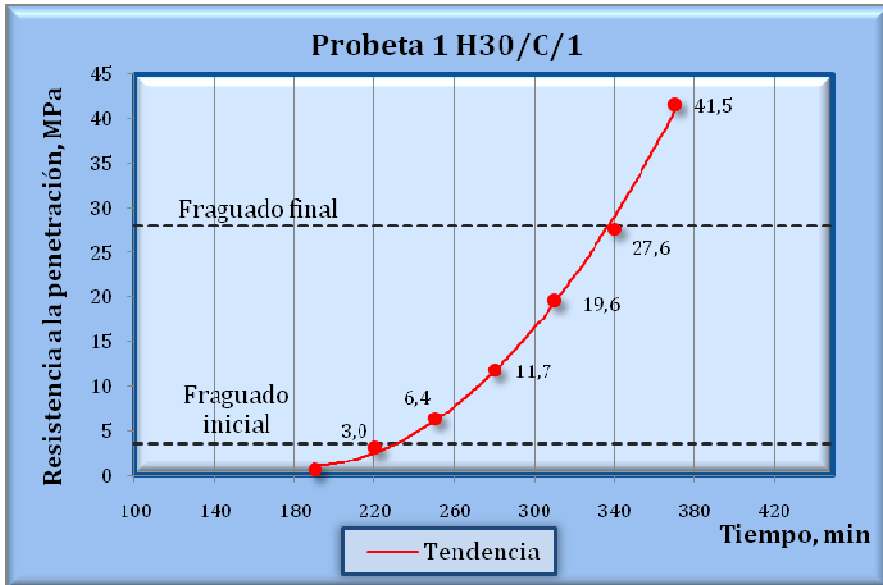
Tabla 53: Información de hormigón H30/C/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

<b>H30/C/1</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	26/03/2013
Cemento (kg)	18,9	-	18,9	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-1,36	7,1	Razón A/C	0,45
Grava (kg)	27,4	0,25	27,7	Cono, cm	9,0
Gravilla (kg)	22,9	0,50	23,4	Temp. ambiente, °C	19,0
Arena (kg)	41,1	1,56	42,7	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	333
Agua abs (lt)	0,95	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2423

Tabla 54: Resistencia a la penetración hormigón H30/C/1 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
17:00	3:10	190	645	350	0,5	380	0,6	355	0,6
17:30	3:40	220	645	1950	3,0	1500	2,3	1250	1,9
18:00	4:10	250	645	4100	6,4	3120	4,8	3200	5,0
18:30	4:40	280	323	3780	11,7	3500	10,8	4700	14,6
19:00	5:10	310	161	3150	19,6	2560	15,9	2690	16,7
19:30	5:40	340	161	4440	27,6	4550	28,3	4650	28,9
20:00	6:10	370	65	2700	41,5	2590	39,8	2550	39,2
Hora inicial de la amasada			13:50						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,0						

Gráfico 25: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, probeta 1 (Elaboración propia).

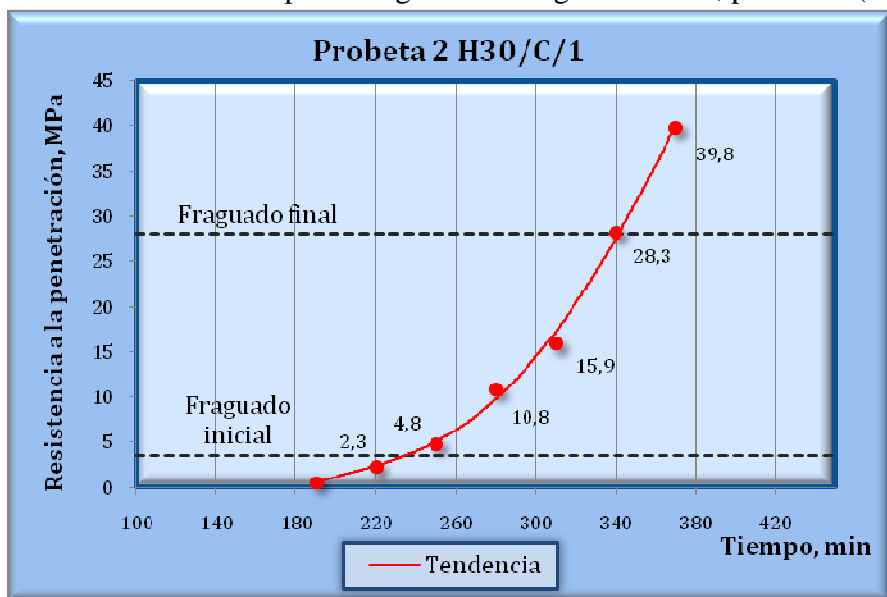
Fraguado inicial  
probeta 1

3h 50min

Fraguado final  
probeta 1

5h 38min

Gráfico 26: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, probeta 2 (Elaboración propia).

Fraguado inicial  
probeta 2

3h 54min

Fraguado final  
probeta 2

5h 42min

Gráfico 27: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, probeta 3 (Elaboración propia).

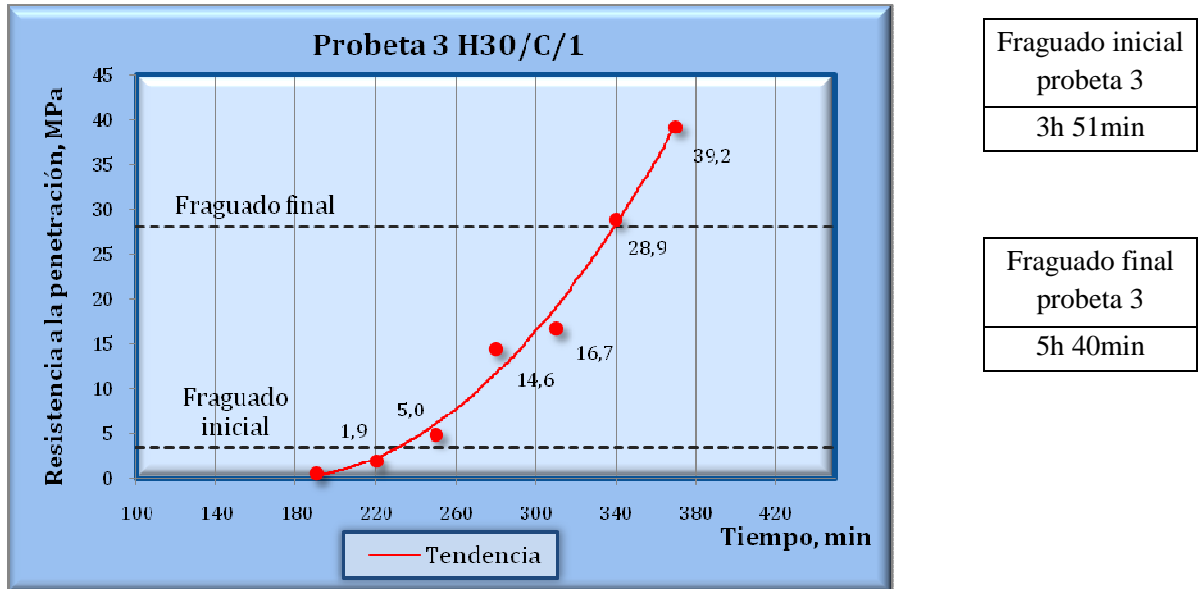


Tabla 55: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

Hormigón H30/C/1	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 50min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 40min</b>

**Mezcla gemela 2**

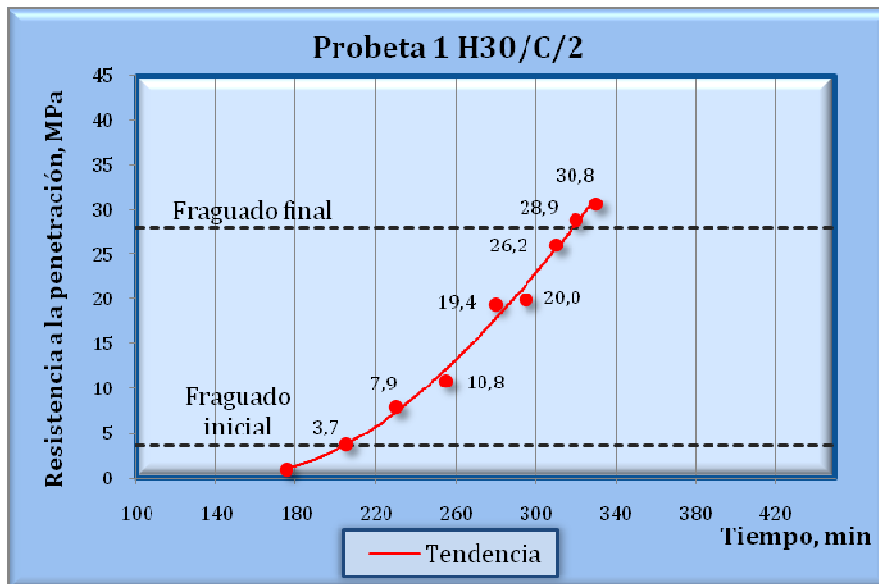
Tabla 56: Información de hormigón H30/C/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

<b>H30/C/2</b>					
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>		
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	30/03/2013
Cemento (kg)	18,9	-	18,9	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-4,51	4,0	Razón A/C	0,45
Grava (kg)	27,4	0,25	27,7	Cono, cm	8,0
Gravilla (kg)	22,9	0,36	23,3	Temp. ambiente, °C	19,5
Arena (kg)	41,1	4,85	46,0	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	334
Agua abs (lt)	0,95	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2457

Tabla 57: Resistencia a la penetración hormigón H30/C/2 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
17:30	2:55	175	645	600	0,9	800	1,2	500	0,8
18:00	3:25	205	645	2400	3,7	2800	4,3	2300	3,6
18:25	3:50	230	645	5100	7,9	5300	8,2	5020	7,8
18:50	4:15	255	323	3500	10,8	4200	13,0	4550	14,1
19:15	4:40	280	161	3130	19,4	2410	15,0	2400	14,9
19:30	4:55	295	161	3220	20,0	3820	23,7	3560	22,1
19:45	5:10	310	65	1700	26,2	2070	31,8	1590	24,5
19:55	5:20	320	65	1880	28,9	-	-	1720	26,5
20:05	5:30	330	65	2000	30,8	-	-	1990	30,6
Hora inicial de la amasada			14:35						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,4						

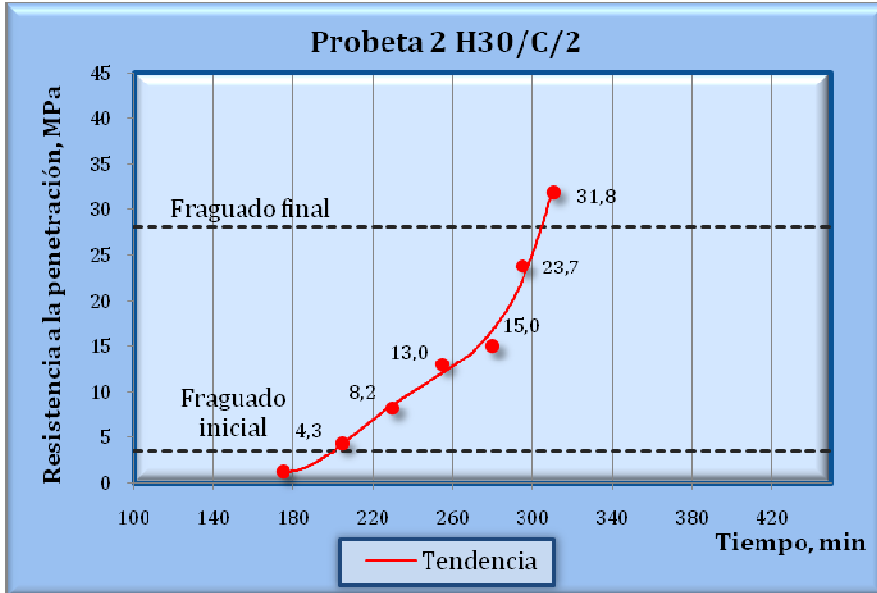
Gráfico 28: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 24min

Fraguado final probeta 1
5h 18min

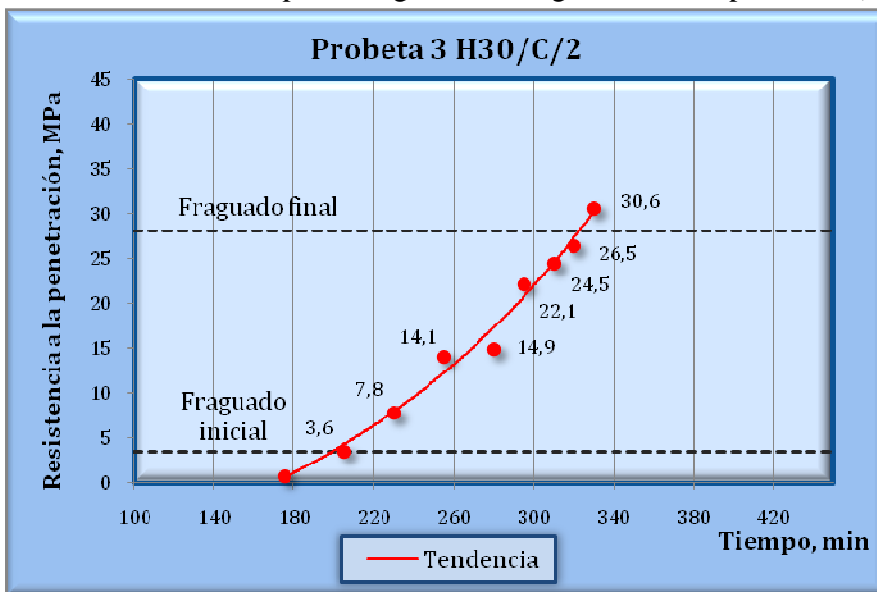
Gráfico 29: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 21min

Fraguado final probeta 2
5h 05min

Gráfico 30: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
3h 19min

Fraguado final probeta 3
5h 22min

Tabla 58: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

Hormigón H30/C/2	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 20min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 15min</b>

**Mezcla gemela 3**

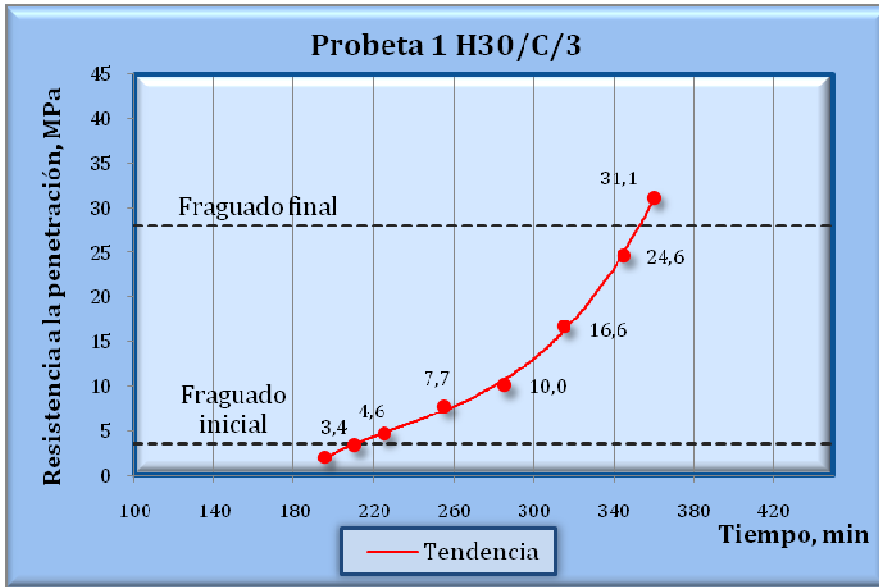
Tabla 59: Información de hormigón H30/C/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

<b>H30/C/3</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	03/04/2013
Cemento (kg)	18,9	-	18,9	Grado cemento	Corriente
Agua (lt)	8,5	-3,69	4,8	Razón A/C	0,45
Grava (kg)	27,4	0,28	27,7	Cono, cm	8,5
Gravilla (kg)	22,9	0,37	23,3	Temp. ambiente, °C	18,5
Arena (kg)	41,1	3,99	45,1	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	326
Agua abs (lt)	0,95	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2447

Tabla 60: Resistencia a la penetración hormigón H30/C/3 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
16:05	3:15	195	645	1300	2,0	1500	2,3	1450	2,2
16:20	3:30	210	645	2190	3,4	2290	3,6	2480	3,8
16:35	3:45	225	645	2980	4,6	2900	4,5	2550	4,0
17:05	4:15	255	323	2500	7,7	2900	9,0	2980	9,2
17:35	4:45	285	323	3240	10,0	4150	12,8	3620	11,2
18:05	5:15	315	161	2680	16,6	2800	17,4	3160	19,6
18:35	5:45	345	65	1600	24,6	1530	23,5	1500	23,1
18:50	6:00	360	65	2020	31,1	2000	30,8	1930	29,7
19:00	6:10	370	65	2200	33,8	2110	32,5	-	-
Hora inicial de la amasada			12:50						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			17,6						

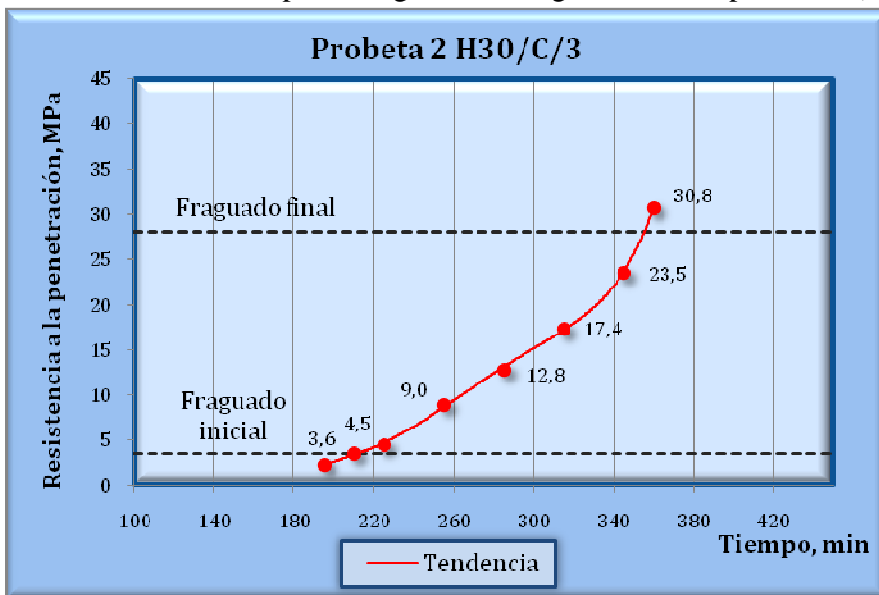
Gráfico 31: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 30min

Fraguado final probeta 1
5h 53min

Gráfico 32: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 30min

Fraguado final probeta 2
5h 55min

Gráfico 33: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, probeta 3 (Elaboración propia).

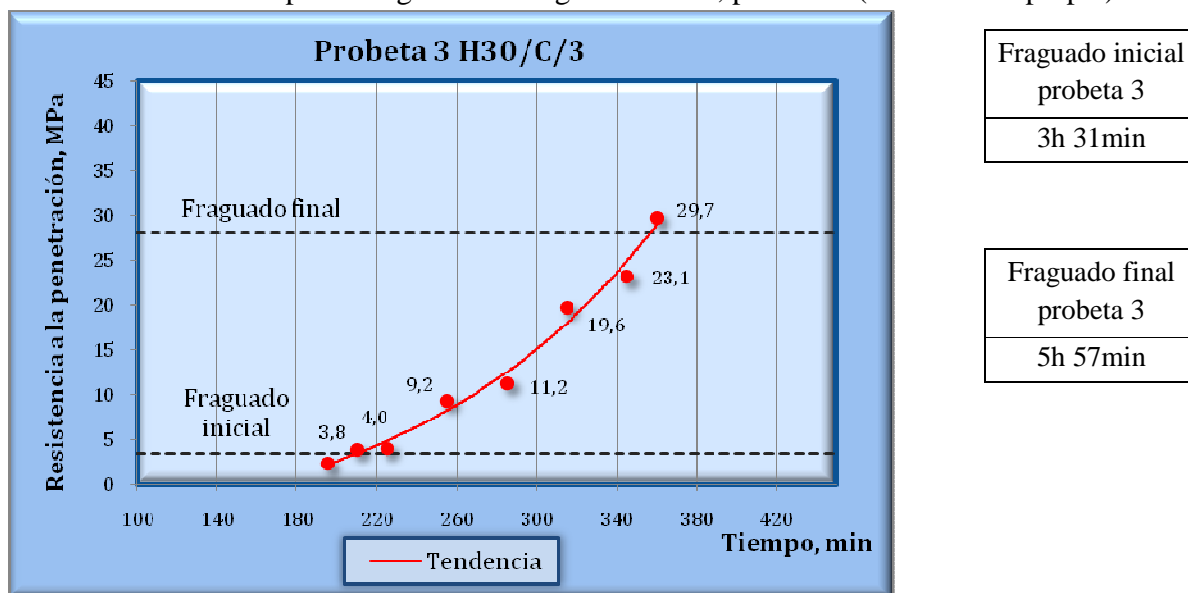


Tabla 61: Tiempo de fraguado hormigón H30/C/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

Hormigón H30/C/3	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 30min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 55min</b>

### *Resultado tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente*

Tabla 62: Resumen tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).

Hormigón H30 Cemento Grado Corriente				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	9,0	19,0	3:50	5:40
2	8,0	19,5	3:20	5:15
3	8,5	18,5	3:30	5:55
<b>Promedio</b>	<b>8,5</b>	<b>19,0</b>	<b>3:35</b>	<b>5:35</b>

#### 4.1.4 Hormigón H20 en base a cemento grado alta resistencia

##### Mezcla gemela 1

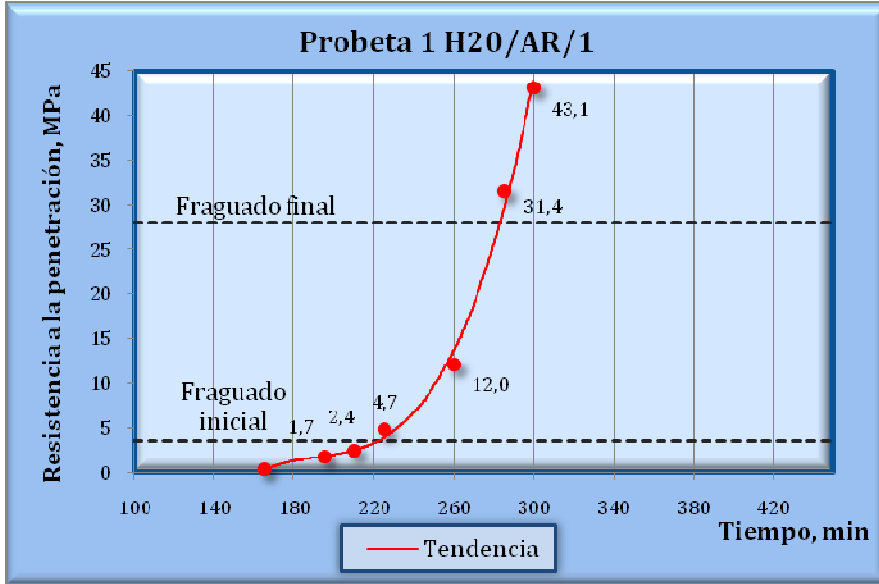
Tabla 63: Información de hormigón H20/AR/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

<b>H20/AR/1</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	27/03/2013
Cemento (kg)	13,5	-	13,5	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-2,00	6,5	Razón A/C	0,63
Grava (kg)	28,8	0,30	29,1	Cono, cm	9,0
Gravilla (kg)	24,0	0,52	24,5	Temp. ambiente, °C	18,5
Arena (kg)	43,3	2,17	45,5	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	297
Agua abs (lt)	0,99	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2404

Tabla 64: Resistencia a la penetración hormigón H20/AR/1 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
15:05	2:45	165	645	180	0,3	220	0,3	100	0,2
15:35	3:15	195	645	1100	1,7	1200	1,9	1000	1,6
15:50	3:30	210	645	1550	2,4	1880	2,9	2220	3,4
16:05	3:45	225	645	3050	4,7	2960	4,6	3210	5,0
16:40	4:20	260	323	3870	12,0	4220	13,1	4110	12,7
17:05	4:45	285	161	5050	31,4	4250	26,4	4280	26,6
17:20	5:00	300	65	2800	43,1	2430	37,4	2700	41,5
Hora inicial de la amasada			12:20						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			19,0						

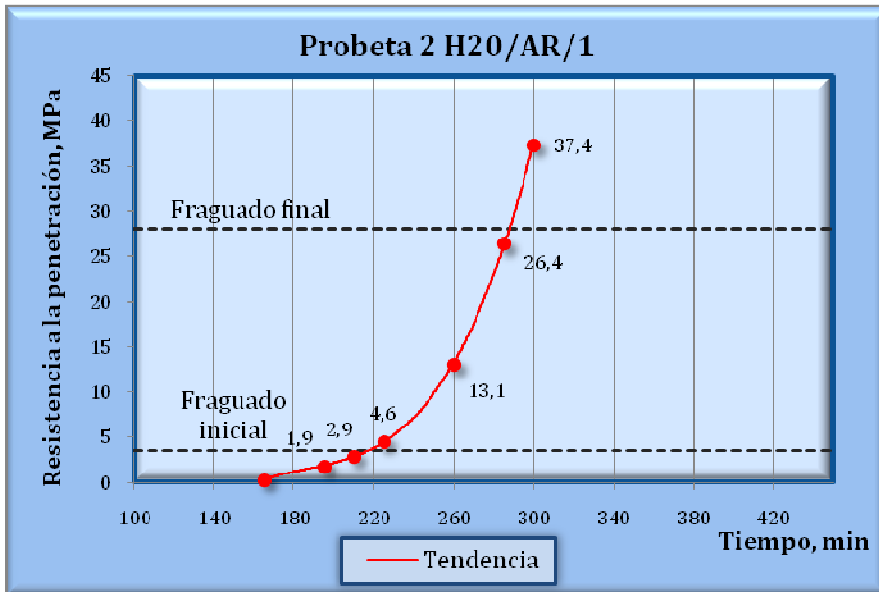
Gráfico 34: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/1, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 41min

Fraguado final probeta 1
4h 43min

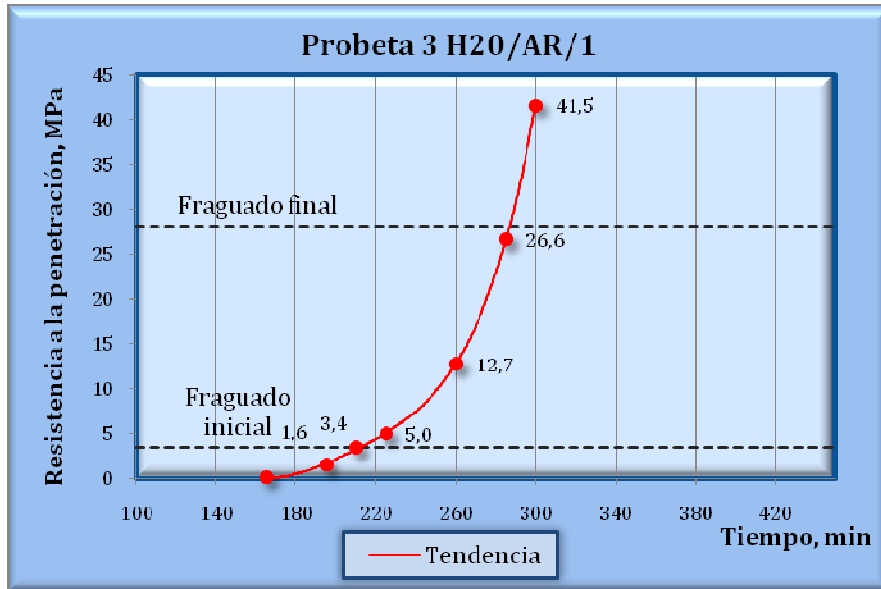
Gráfico 35: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/1, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 37min

Fraguado final probeta 2
4h 48min

Gráfico 36: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/1, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
3h 32min

Fraguado final probeta 3
4h 47min

Tabla 65: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

Hormigón H2O/AR/1	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 35min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 45min</b>

**Mezcla gemela 2**

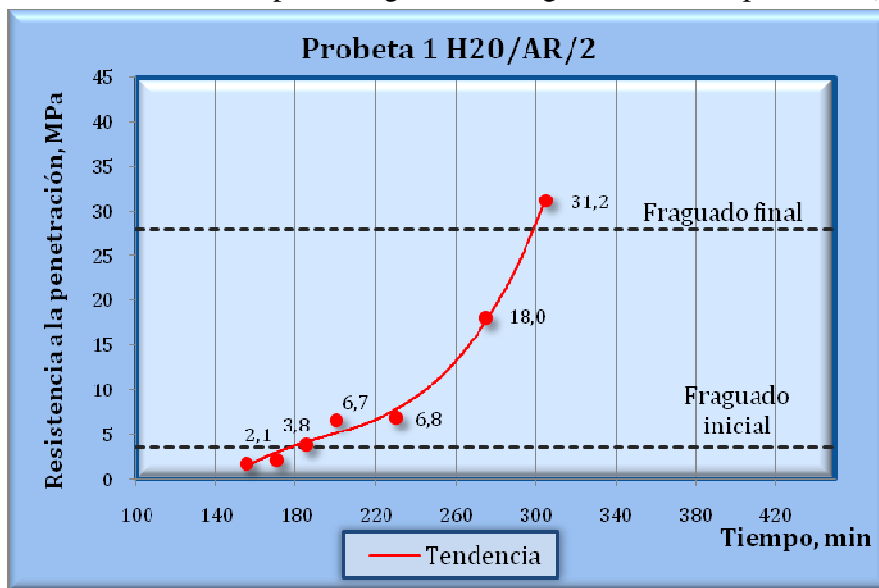
Tabla 66: Información de hormigón H2O/AR/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

<b>H2O/AR/2</b>			
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida
Cemento (kg)	13,5	-	13,5
Agua (lt)	8,5	-1,77	6,7
Grava (kg)	28,8	0,26	29,1
Gravilla (kg)	24,0	0,50	24,5
Arena (kg)	43,3	2,00	45,3
Agua abs (lt)	0,99	-	-
			Fecha ensayo 31/03/2013
			Grado cemento Alta Resist.
			Razón A/C 0,63
			Cono, cm 7,5
			Temp. ambiente, °C 20,0
			Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup> 338
			Densidad, kg/m <sup>3</sup> 2436

Tabla 67: Resistencia a la penetración hormigón H20/AR/2 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
15:30	2:35	155	645	1150	1,8	960	1,5	650	1,0
15:45	2:50	170	645	1380	2,1	1190	1,8	1110	1,7
16:00	3:05	185	645	2420	3,8	2000	3,1	2100	3,3
16:15	3:20	200	645	4300	6,7	2910	4,5	3800	5,9
16:45	3:50	230	323	2200	6,8	2200	6,8	2190	6,8
17:30	4:35	275	161	2900	18,0	2510	15,6	2700	16,8
18:00	5:05	305	65	2030	31,2	2000	30,8	1990	30,6
18:10	5:15	315	65	2240	34,5	2100	32,3	2100	32,3
Hora inicial de la amasada			12:55						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,0						

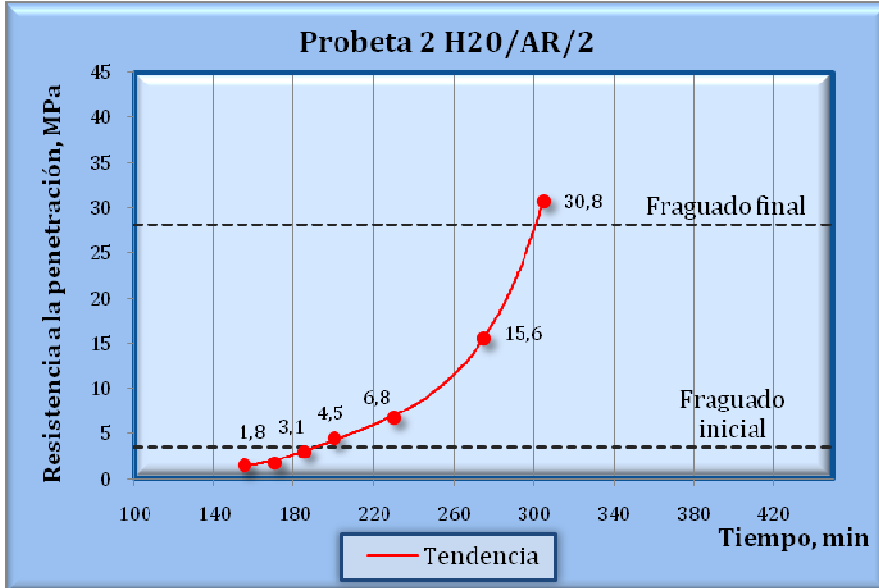
Gráfico 37: Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/2, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
2h 56min

Fraguado final probeta 1
4h 59min

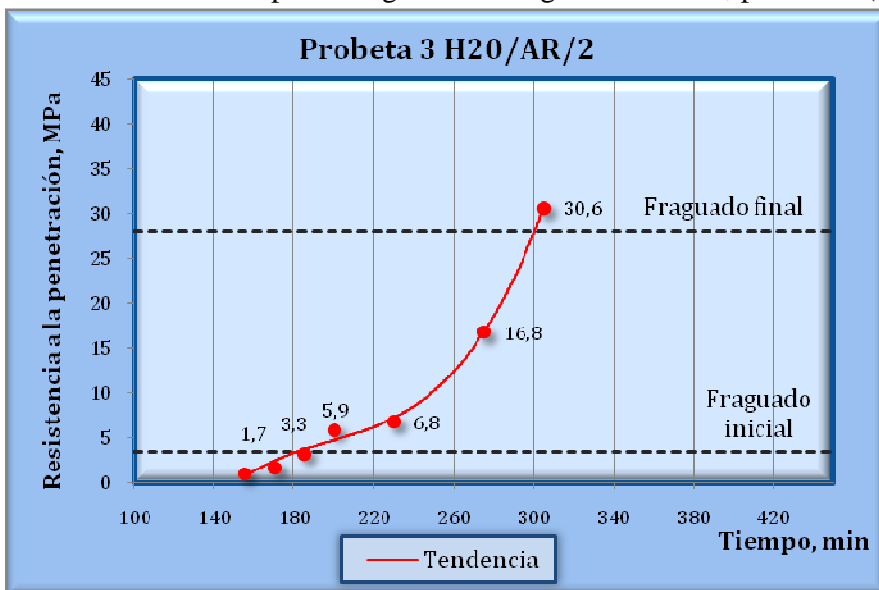
Gráfico 38: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/2, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 10min

Fraguado final probeta 2
5h 01min

Gráfico 39: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/2, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
3h 03min

Fraguado final probeta 3
5h 01min

Tabla 68: Tiempo de fraguado hormigón H2O/AR/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

Hormigón H2O/AR/2	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 05min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>5h 00min</b>

**Mezcla gemela 3**

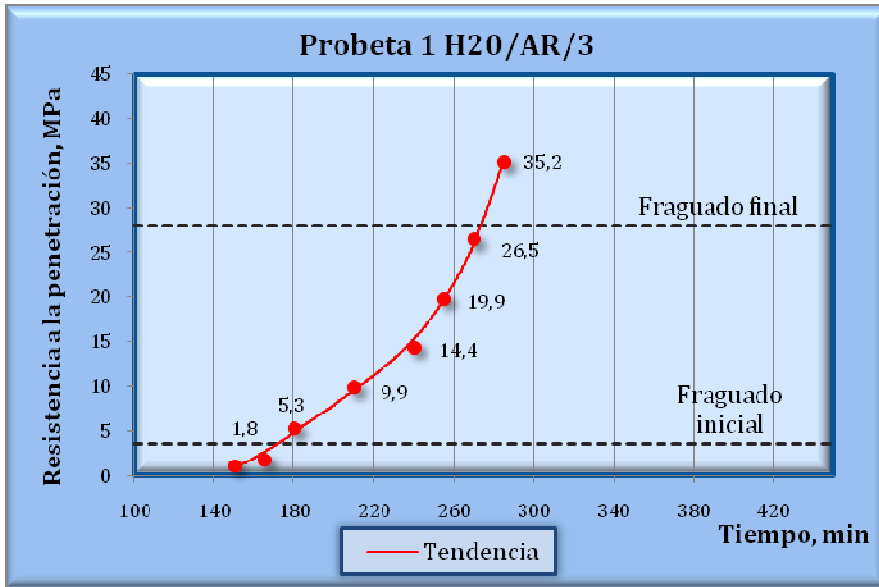
Tabla 69: Información de hormigón H20/AR/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

<b>H20/AR/3</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	03/04/2013
Cemento (kg)	13,5	-	13,5	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-3,90	4,6	Razón A/C	0,63
Grava (kg)	28,8	0,29	29,1	Cono, cm	6,0
Gravilla (kg)	24,0	0,39	24,4	Temp. ambiente, °C	20,4
Arena (kg)	43,3	4,21	47,5	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	350
Agua abs (lt)	0,99	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2446

Tabla 70: Resistencia a la penetración hormigón H20/AR/3 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
17:55	2:30	150	645	720	1,1	750	1,2	890	1,4
18:10	2:45	165	645	1180	1,8	1610	2,5	2080	3,2
18:25	3:00	180	645	3400	5,3	2800	4,3	3400	5,3
18:55	3:30	210	323	3200	9,9	3300	10,2	3510	10,9
19:25	4:00	240	161	2320	14,4	2100	13,0	2310	14,3
19:40	4:15	255	161	3200	19,9	3490	21,7	3100	19,3
19:55	4:30	270	65	1720	26,5	1700	26,2	1790	27,5
19:10	4:45	285	65	2290	35,2	2370	36,5	2300	35,4
Hora inicial de la amasada			15:25						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,7						

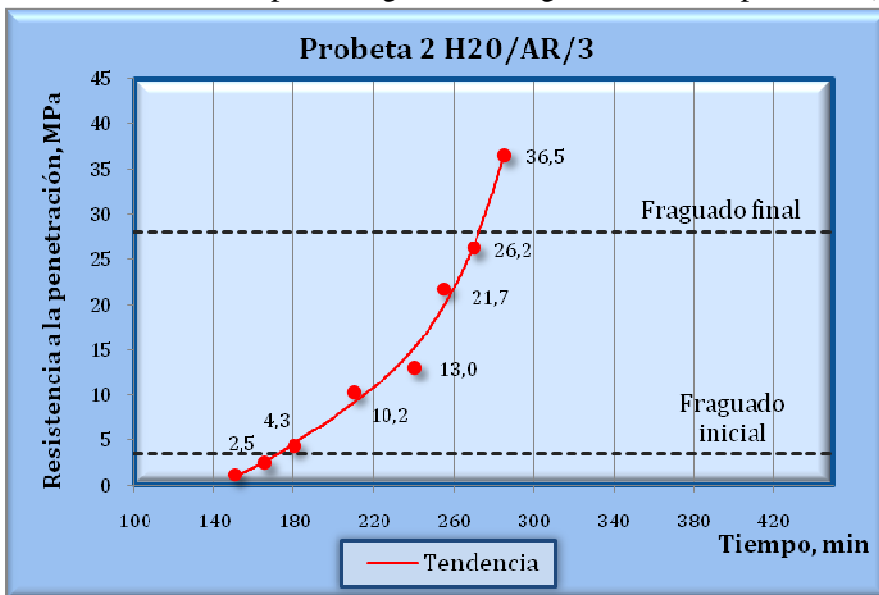
Gráfico 40: Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
2h 51min

Fraguado final probeta 1
4h 34min

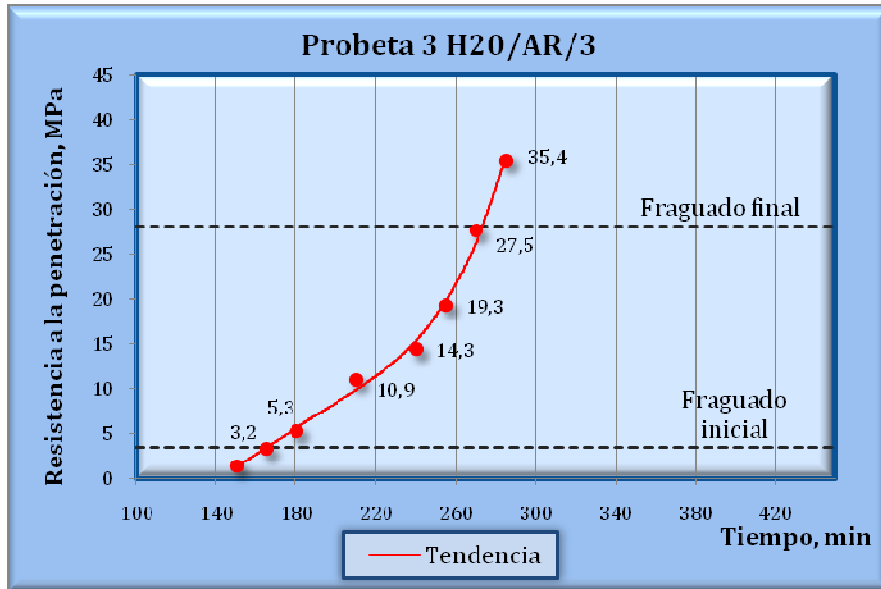
Gráfico 41: Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
2h 51min

Fraguado final probeta 2
4h 32min

Gráfico 42: Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
2h 45min

Fraguado final probeta 3
4h 33min

Tabla 71: Tiempo de fraguado hormigón H20/AR/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

Hormigón H20/AR/3	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>2h 50min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 35min</b>

### *Resultado tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado alta resistencia*

Tabla 72: Resumen tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado alta resistencia (Elaboración propia).

Hormigón H20 Cemento Grado Alta Resistencia				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	8,5	18,5	3:35	4:45
2	7,5	20,0	3:05	5:00
3	6,0	20,4	2:50	4:35
<b>Promedio</b>	<b>7,5</b>	<b>19,6</b>	<b>3:10</b>	<b>4:45</b>

#### 4.1.5 Hormigón H25 en base a cemento grado alta resistencia

##### Mezcla gemela 1

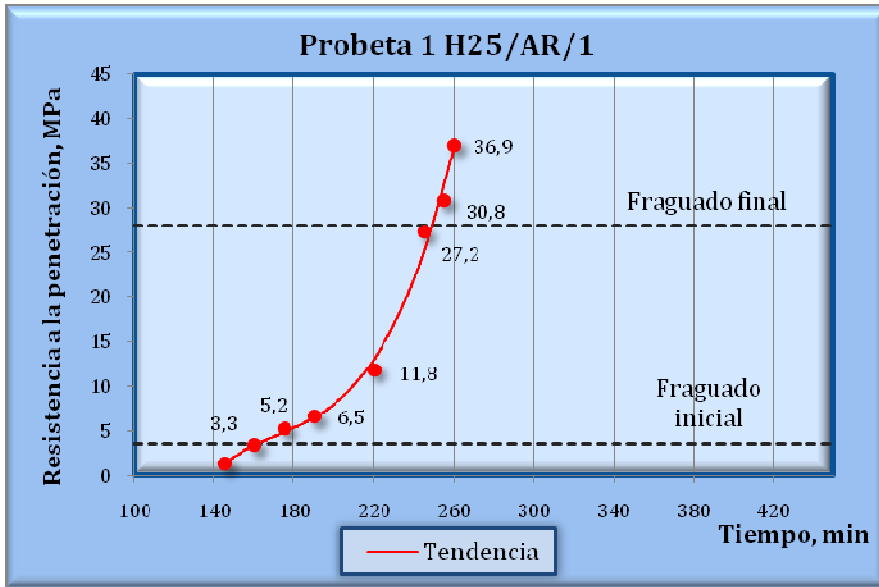
Tabla 73: Información de hormigón H25/AR/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

<b>H25/AR/1</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	27/03/2013
Cemento (kg)	14,9	-	14,9	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-1,97	6,5	Razón A/C	0,57
Grava (kg)	28,4	0,29	28,7	Cono, cm	7,5
Gravilla (kg)	23,7	0,52	24,2	Temp. ambiente, °C	18,8
Arena (kg)	42,7	2,14	44,8	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	390
Agua abs (lt)	0,98	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2427

Tabla 74: Resistencia a la penetración hormigón H25/AR/1 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
17:50	2:25	145	645	790	1,2	900	1,4	500	0,8
18:05	2:40	160	645	2130	3,3	2020	3,1	1300	2,0
18:20	2:55	175	645	3370	5,2	2950	4,6	2400	3,7
18:35	3:10	190	323	2110	6,5	1750	5,4	1250	3,9
19:05	3:40	220	161	1900	11,8	2890	18,0	1990	12,4
19:30	4:05	245	65	1770	27,2	1800	27,7	1350	20,8
19:40	4:15	255	65	2000	30,8	2100	32,3	2000	30,8
19:45	4:20	260	65	2400	36,9	2250	34,6	-	-
Hora inicial de la amasada			15:25						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,6						

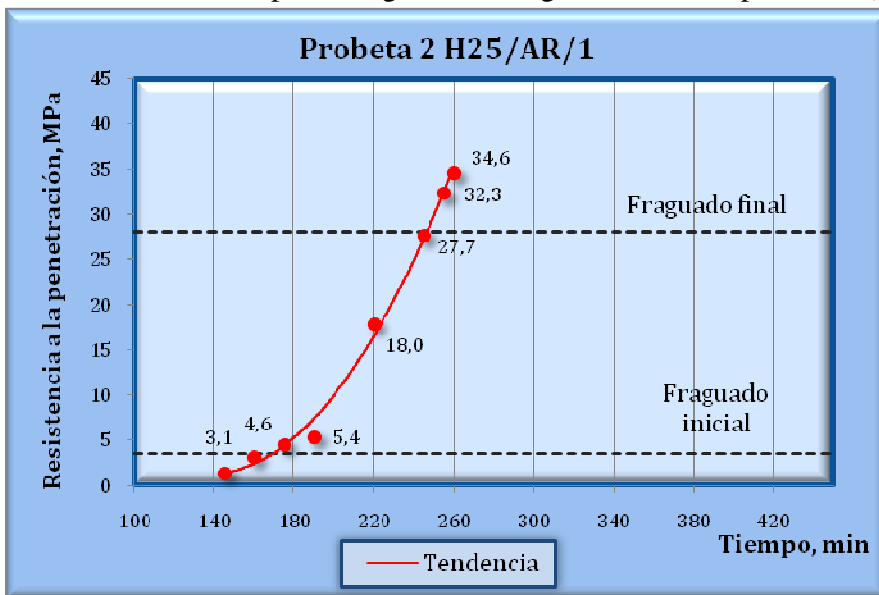
Gráfico 43: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
2h 41min

Fraguado final probeta 1
4h 10min

Gráfico 44: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
2h 49min

Fraguado final probeta 2
4h 06min

Gráfico 45: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, probeta 3 (Elaboración propia).

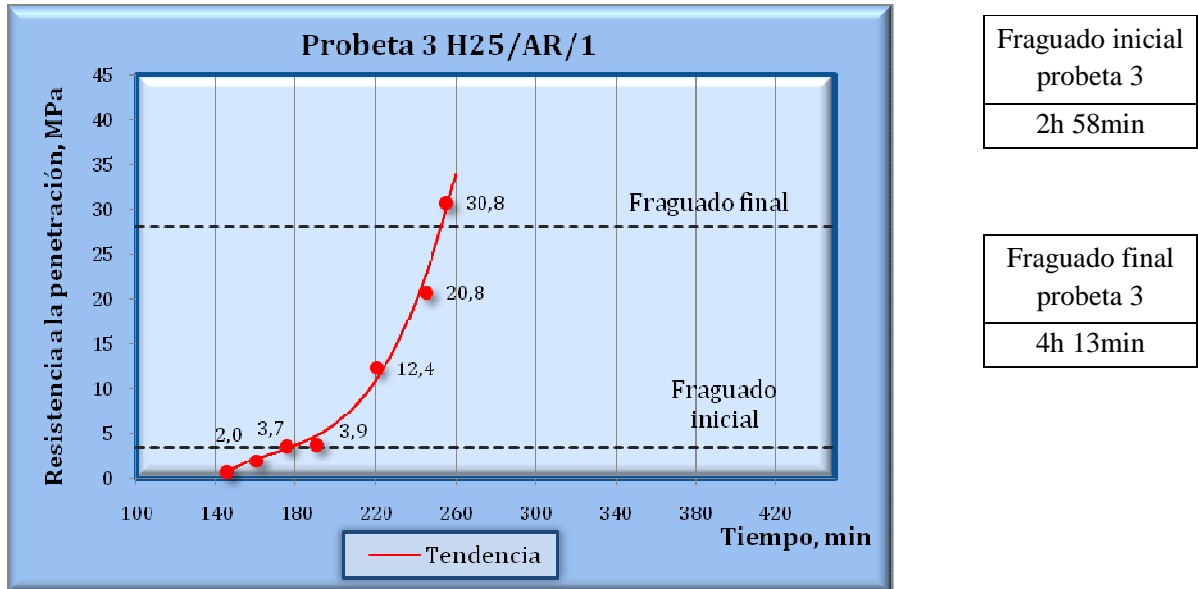


Tabla 75: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

Hormigón H25/AR/1	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>2h 50min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 10min</b>

**Mezcla gemela 2**

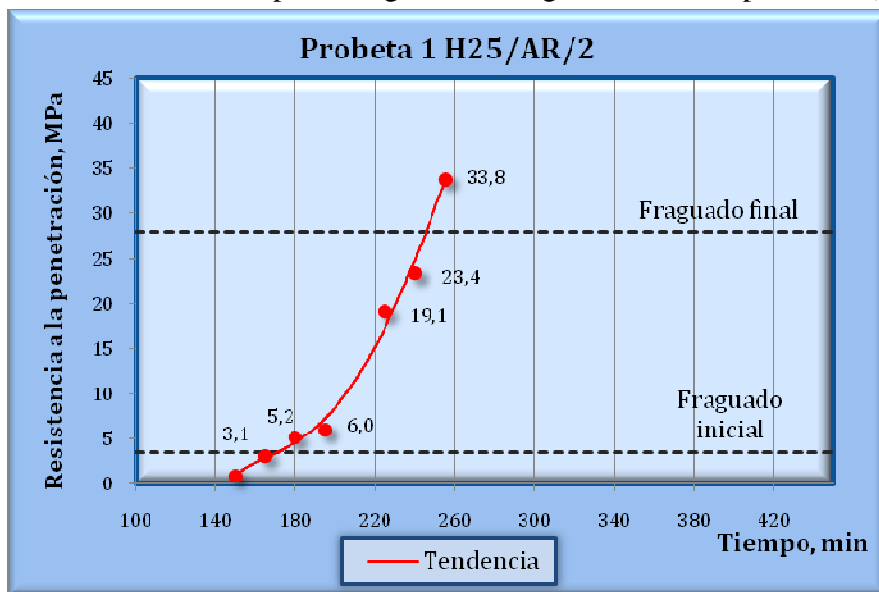
Tabla 76: Información de hormigón H25/AR/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

<b>H25/AR/2</b>					
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>		
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	31/03/2013
Cemento (kg)	14,9	-	14,9	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-1,74	6,8	Razón A/C	0,57
Grava (kg)	28,4	0,26	28,7	Cono, cm	7,0
Gravilla (kg)	23,7	0,49	24,2	Temp. ambiente, °C	21,0
Arena (kg)	42,7	1,97	44,7	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	355
Agua abs (lt)	0,98	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2446

Tabla 77: Resistencia a la penetración hormigón H25/AR/2 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
19:35	2:30	150	645	620	1,0	1100	1,7	800	1,2
19:50	2:45	165	645	2000	3,1	2080	3,2	1910	3,0
20:05	3:00	180	645	3350	5,2	3750	5,8	3480	5,4
20:20	3:15	195	323	1940	6,0	2210	6,8	2100	6,5
20:50	3:45	225	161	3080	19,1	3200	19,9	3010	18,7
21:05	4:00	240	65	1520	23,4	1580	24,3	1430	22,0
21:20	4:15	255	65	2200	33,8	1990	30,6	1780	27,4
21:30	4:25	265	65	2580	39,7	2870	44,2	2500	38,5
Hora inicial de la amasada			17:05						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			19,2						

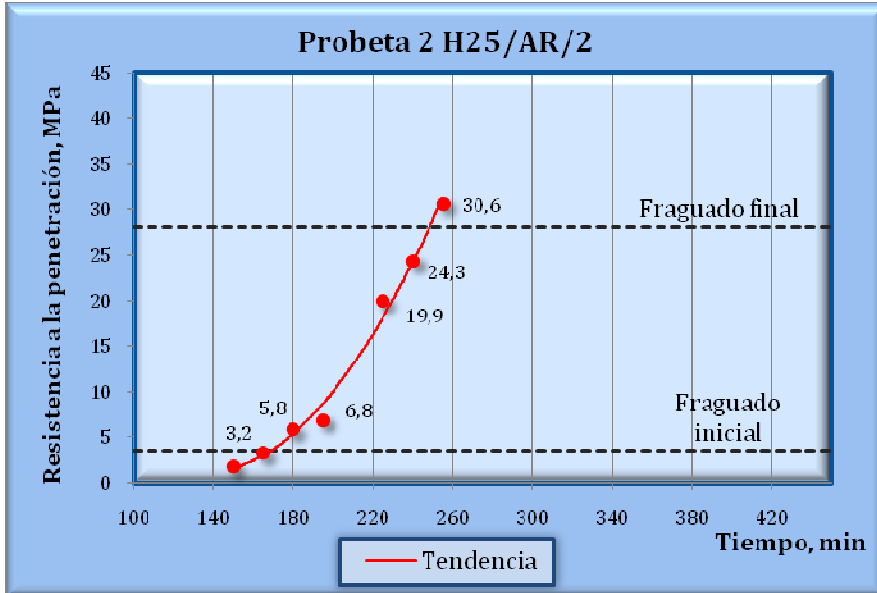
Gráfico 46: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
2h 50min

Fraguado final probeta 1
4h 06min

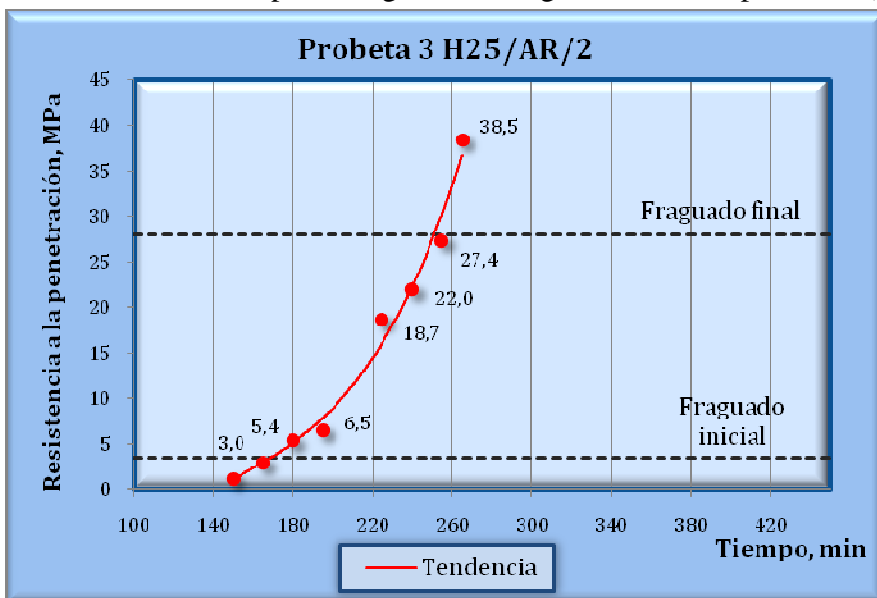
Gráfico 47: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
2h 49min

Fraguado final probeta 2
4h 09min

Gráfico 48: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
2h 48min

Fraguado final probeta 3
4h 11min

Tabla 78: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

Hormigón H25/AR/2	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>2h 50min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 10min</b>

**Mezcla gemela 3**

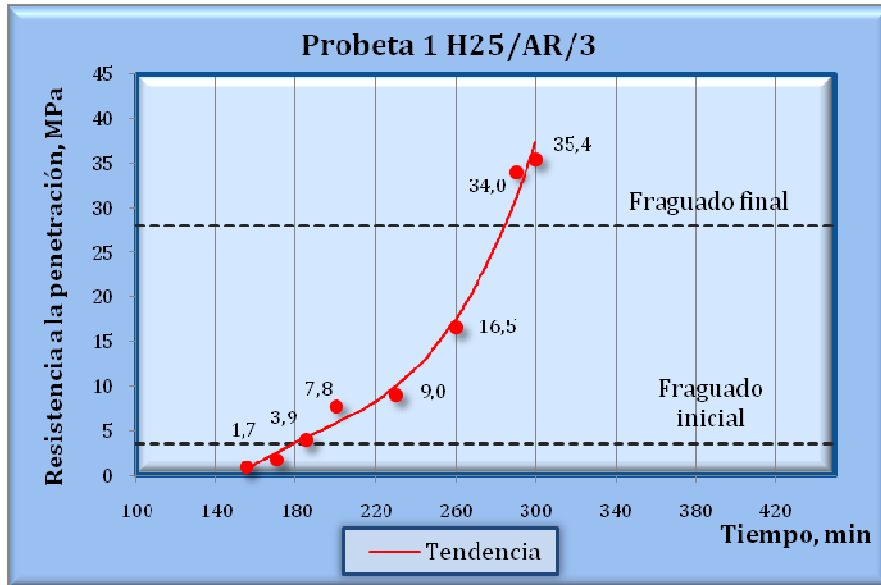
Tabla 79: Información de hormigón H25/AR/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

<b>H25/AR/3</b>					
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>		
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	04/04/2013
Cemento (kg)	14,9	-	14,9	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-4,36	4,1	Razón A/C	0,57
Grava (kg)	28,4	0,28	28,7	Cono, cm	6,5
Gravilla (kg)	23,7	0,48	24,2	Temp. ambiente, °C	18,1
Arena (kg)	42,7	4,58	47,3	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	366
Agua abs (lt)	0,98	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2431

Tabla 80: Resistencia a la penetración hormigón H25/AR/3 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
14:40	2:35	155	645	510	0,8	530	0,8	700	1,1
14:55	2:50	170	645	1100	1,7	1580	2,4	2050	3,2
15:10	3:05	185	645	2500	3,9	2480	3,8	2330	3,6
15:25	3:20	200	645	5000	7,8	4300	6,7	4540	7,0
15:55	3:50	230	323	2900	9,0	3530	10,9	3400	10,5
16:25	4:20	260	161	2650	16,5	2590	16,1	2660	16,5
16:55	4:50	290	65	2210	34,0	2250	34,6	2230	34,3
17:05	5:00	300	65	2300	35,4	2530	38,9	2510	38,6
Hora inicial de la amasada			12:05						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			17,6						

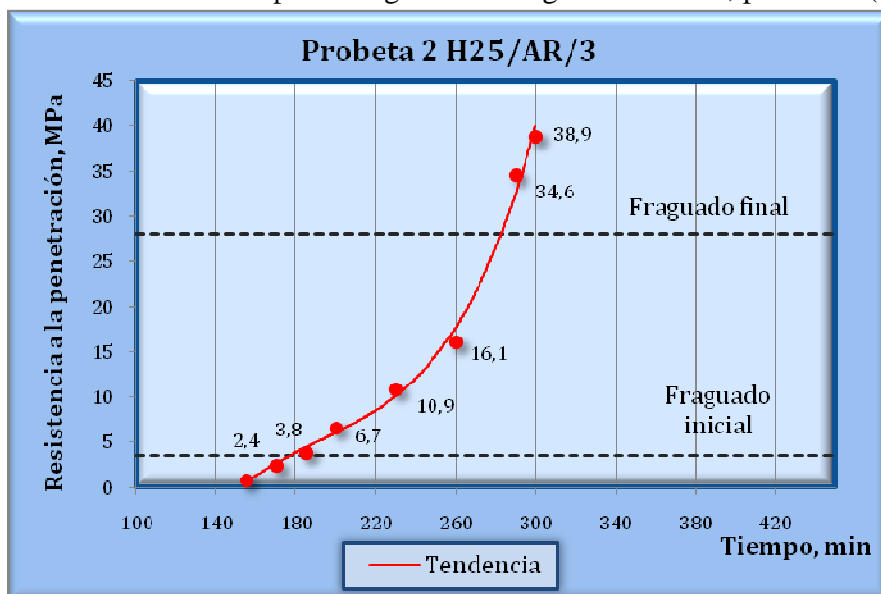
Gráfico 49: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
2h 58min

Fraguado final probeta 1
4h 45min

Gráfico 50: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
2h 57min

Fraguado final probeta 2
4h 43min

Gráfico 51: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, probeta 3 (Elaboración propia).

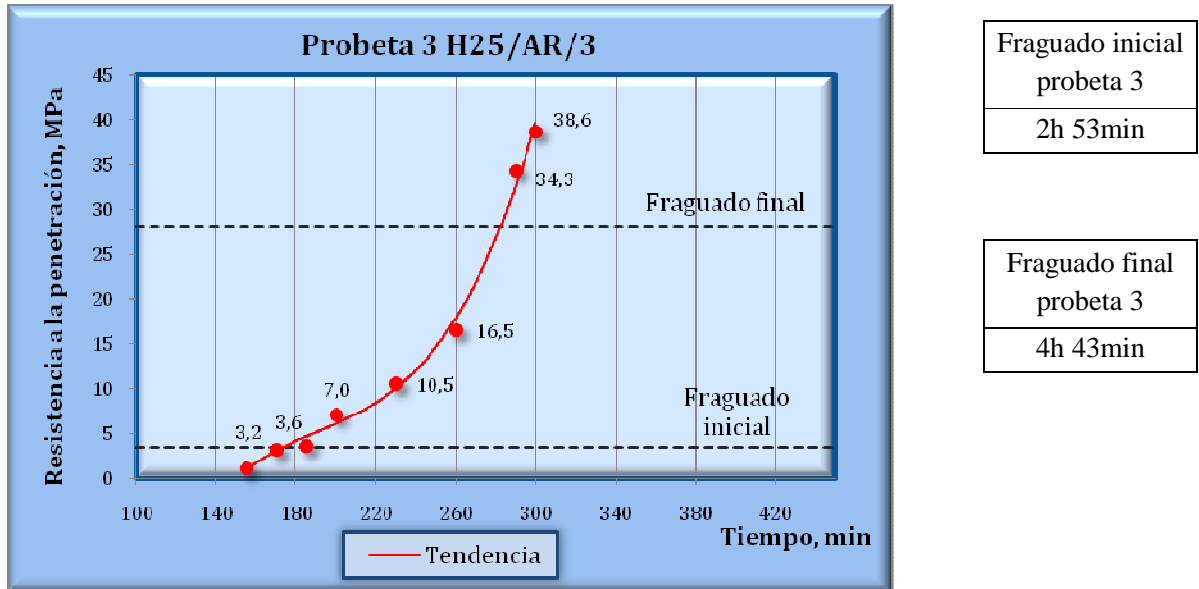


Tabla 81: Tiempo de fraguado hormigón H25/AR/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

Hormigón H25/AR/3	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>2h 55min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 45min</b>

### *Resultado tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado alta resistencia*

Tabla 82: Resumen tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado alta resistencia (Elaboración propia).

Hormigón H25 Cemento Grado Alta Resistencia				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	7,5	18,8	2:50	4:10
2	7,0	21,0	2:50	4:10
3	6,5	18,1	2:55	4:45
<b>Promedio</b>	<b>7,0</b>	<b>19,3</b>	<b>2:50</b>	<b>4:20</b>

#### 4.1.6 Hormigón H30 en base a cemento grado alta resistencia

##### Mezcla gemela 1

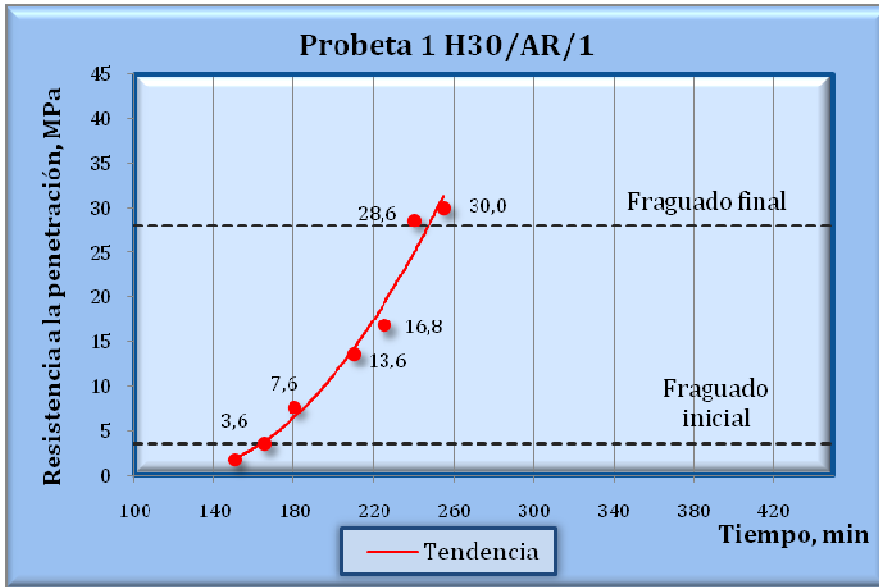
Tabla 83: Información de hormigón H30/AR/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

<b>H30/AR/1</b>					
<b>Corrección por humedad</b>				<b>Información del ensayo</b>	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	28/03/2013
Cemento (kg)	16,4	-	16,4	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-3,03	5,5	Razón A/C	0,52
Grava (kg)	28,1	0,26	28,4	Cono, cm	7,0
Gravilla (kg)	23,4	0,40	23,8	Temp. ambiente, °C	22,0
Arena (kg)	42,1	3,34	45,4	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	393
Agua abs (lt)	0,97	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2437

Tabla 84: Resistencia a la penetración hormigón H30/AR/1 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
20:10	2:30	150	645	1100	1,7	1430	2,2	800	1,2
20:25	2:45	165	645	2310	3,6	2980	4,6	2400	3,7
20:40	3:00	180	323	2450	7,6	2000	6,2	1980	6,1
21:10	3:30	210	323	4400	13,6	4200	13,0	3250	10,1
21:25	3:45	225	161	2700	16,8	2800	17,4	2800	17,4
21:40	4:00	240	161	4600	28,6	4300	26,7	4200	26,1
21:55	4:15	255	65	1950	30,0	2390	36,8	1970	30,3
Hora inicial de la amasada			17:40						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			21,0						

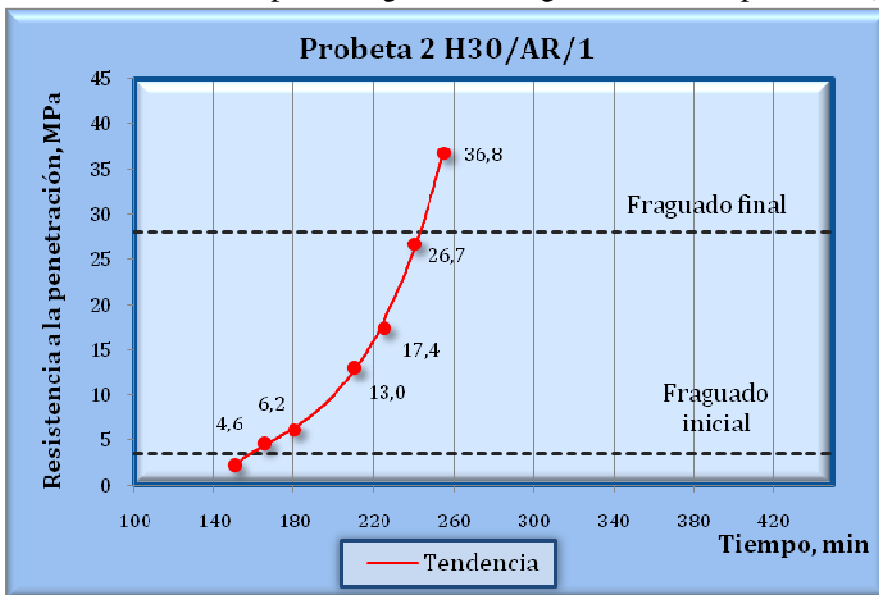
Gráfico 52: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
2h 42min

Fraguado final probeta 1
4h 07min

Gráfico 53: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
2h 39min

Fraguado final probeta 2
4h 03min

Gráfico 54: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, probeta 3 (Elaboración propia).

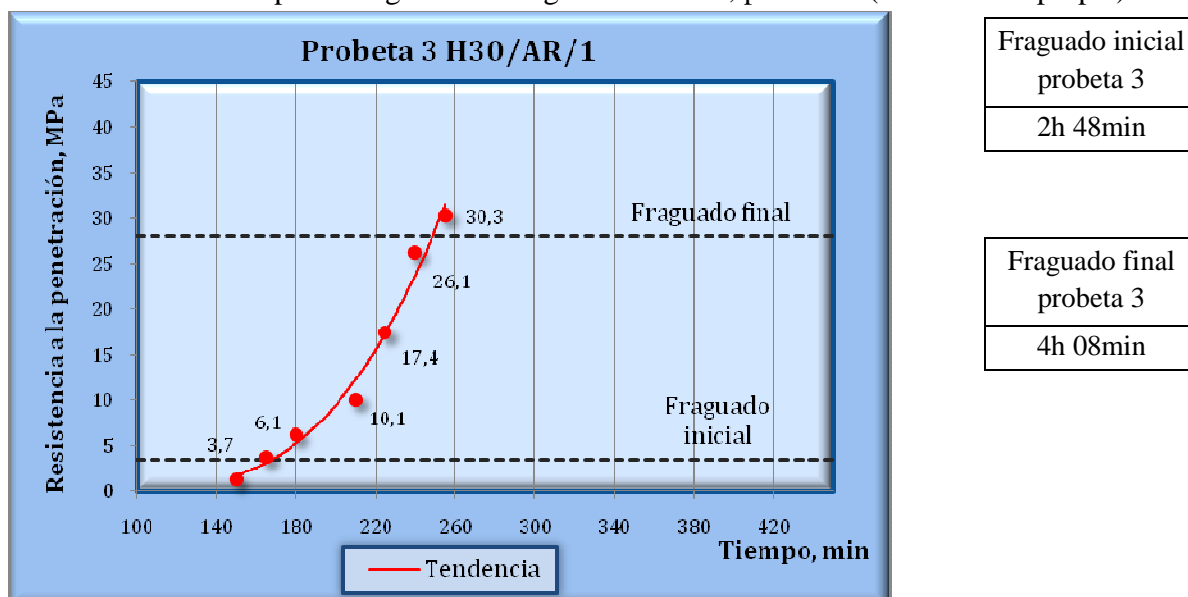


Tabla 85: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/1, mezcla gemela 1 (Elaboración propia).

Hormigón H30/AR/1	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>2h 45min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 05min</b>

**Mezcla gemela 2**

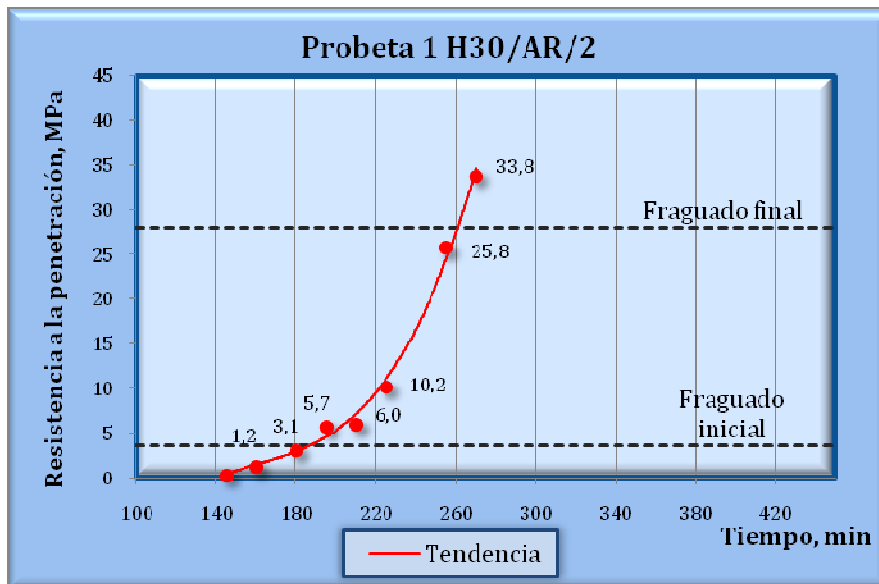
Tabla 86: Información de hormigón H30/AR/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

H30/AR/2				
Corrección por humedad			Información del ensayo	
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad		Dosificación corregida
Cemento (kg)	16,4	-	16,4	Fecha ensayo 01/04/2013
Agua (lt)	8,5	-4,32	4,18	Grado cemento Alta Resist.
Grava (kg)	28,1	0,31	28,4	Razón A/C 0,52
Gravilla (kg)	23,4	0,46	23,9	Cono, cm 9,0
Arena (kg)	42,1	4,52	46,6	Temp. ambiente, °C 21,0
Agua abs (lt)	0,97	-	-	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup> 380
				Densidad, kg/m <sup>3</sup> 2436

Tabla 87: Resistencia a la penetración hormigón H30/AR/2 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
19:00	2:25	145	645	220	0,3	180	0,3	260	0,4
19:15	2:40	160	645	800	1,2	550	0,9	890	1,4
19:35	3:00	180	645	2000	3,1	2200	3,4	2100	3,3
19:50	3:15	195	645	3700	5,7	3300	5,1	3790	5,9
20:05	3:30	210	323	1940	6,0	2010	6,2	1470	4,6
20:20	3:45	225	323	3300	10,2	3250	10,1	3480	10,8
20:50	4:15	255	161	4150	25,8	3050	18,9	4100	25,5
21:05	4:30	270	65	2200	33,8	1700	26,2	1960	30,2
21:15	4:40	280	65	2500	38,5	2180	33,5	2000	30,8
Hora inicial de la amasada			16:35						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			19,6						

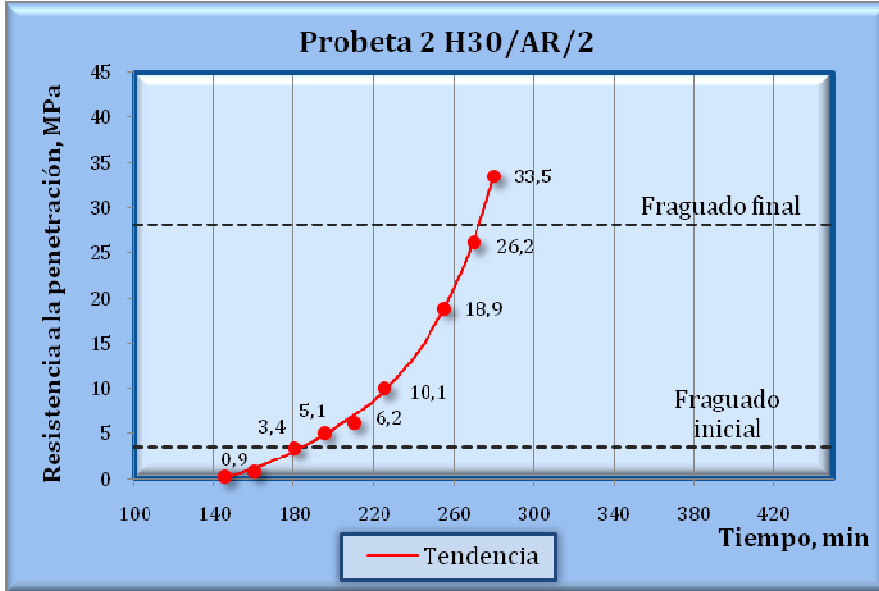
Gráfico 55: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 05min

Fraguado final probeta 1
4h 20min

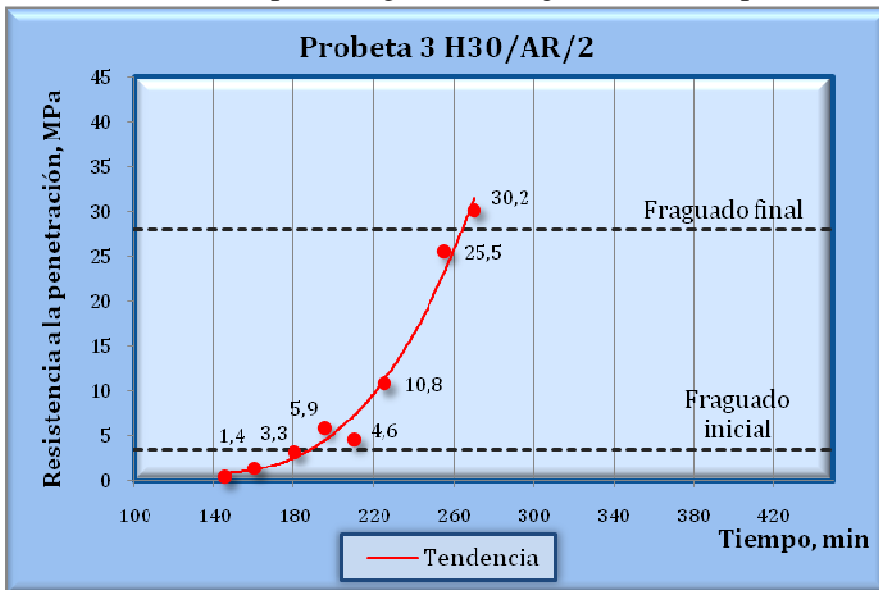
Gráfico 56: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 04min

Fraguado final probeta 2
4h 32min

Gráfico 57: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, probeta 3 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 3
3h 09min

Fraguado final probeta 3
4h 24min

Tabla 88: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/2, mezcla gemela 2 (Elaboración propia).

Hormigón H30/AR/2	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 05min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 25min</b>

**Mezcla gemela 3**

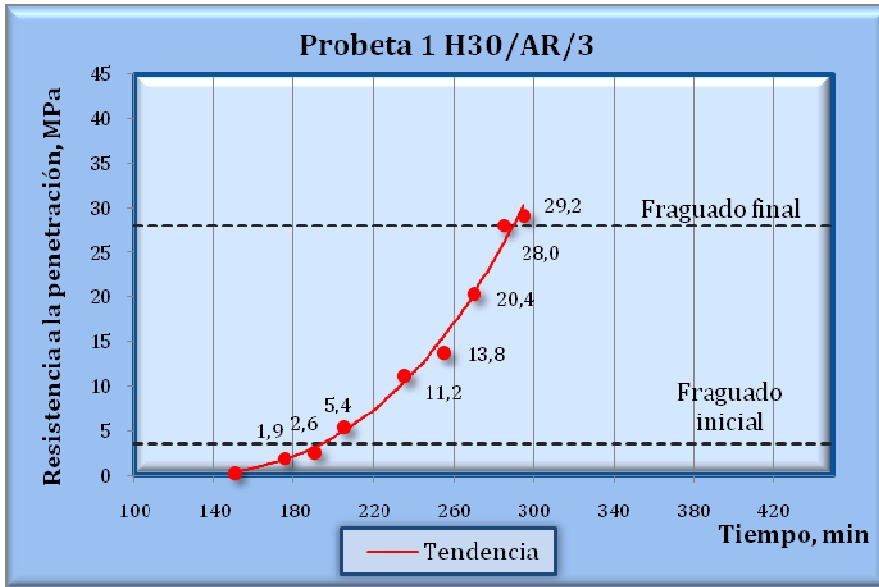
Tabla 89: Información de hormigón H30/AR/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

<b>H30/AR/3</b>					
<b>Corrección por humedad</b>			<b>Información del ensayo</b>		
Material	Dosificación (50 lt)	Aporte humedad	Dosificación corregida	Fecha ensayo	04/04/2013
Cemento (kg)	16,4	-	16,4	Grado cemento	Alta Resist.
Agua (lt)	8,5	-4,30	4,2	Razón A/C	0,52
Grava (kg)	28,1	0,28	28,4	Cono, cm	7,5
Gravilla (kg)	23,4	0,47	23,9	Temp. ambiente, °C	19,2
Arena (kg)	42,1	4,52	46,6	Resistencia a comp. a 28 días, kg/cm <sup>2</sup>	398
Agua abs (lt)	0,97	-	-	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	2429

Tabla 90: Resistencia a la penetración hormigón H30/AR/3 (Elaboración propia).

Hora	$\Delta$ Hora <i>hr</i>	$\Delta$ Hora <i>min</i>	Aguja <i>mm<sup>2</sup></i>	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
				Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>	Carga <i>N</i>	Resist. <i>MPa</i>
16:45	2:30	150	645	180	0,3	300	0,5	270	0,4
17:10	2:55	175	645	1230	1,9	800	1,2	1430	2,2
17:25	3:10	190	645	1700	2,6	2090	3,2	2250	3,5
17:40	3:25	205	645	3480	5,4	3820	5,9	4290	6,7
18:10	3:55	235	323	3610	11,2	3010	9,3	2400	7,4
18:30	4:15	255	161	2220	13,8	2100	13,0	2210	13,7
18:45	4:30	270	161	3290	20,4	2580	16,0	3290	20,4
19:00	4:45	285	65	1820	28,0	1610	24,8	1880	28,9
19:10	4:55	295	65	1900	29,2	2170	33,4	1930	29,7
Hora inicial de la amasada			14:15						
Temperatura del mortero de hormigón, °C			18,3						

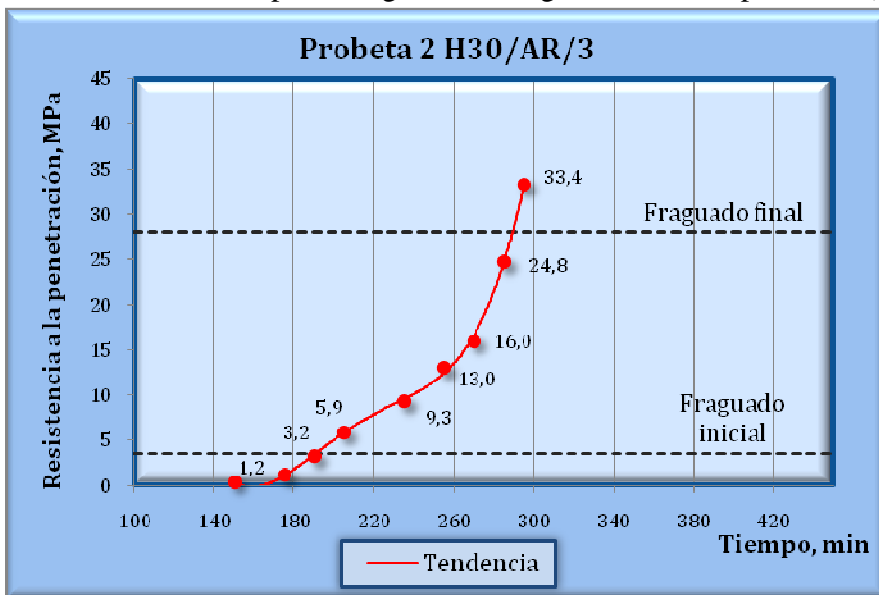
Gráfico 58: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, probeta 1 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 1
3h 13min

Fraguado final probeta 1
4h 49min

Gráfico 59: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, probeta 2 (Elaboración propia).



Fraguado inicial probeta 2
3h 11min

Fraguado final probeta 2
4h 50min

Gráfico 60: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, probeta 3 (Elaboración propia).

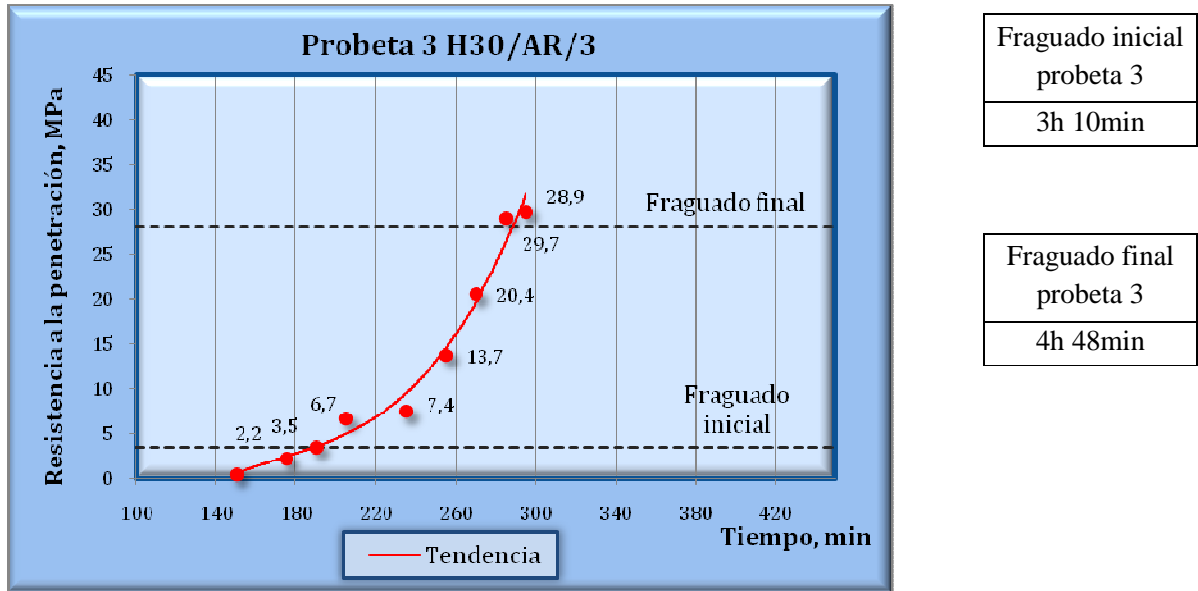


Tabla 91: Tiempo de fraguado hormigón H30/AR/3, mezcla gemela 3 (Elaboración propia).

Hormigón H30/AR/3	Tiempo de <b>fraguado inicial</b>	<b>3h 10min</b>
	Tiempo de <b>fraguado final</b>	<b>4h 50min</b>

**Resultado tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado alta resistencia**

Tabla 92: Resumen tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado alta resistencia (Elaboración propia).

Hormigón H30 Cemento Grado Alta Resistencia				
Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
1	7,0	22,0	2:45	4:05
2	9,0	21,0	3:05	4:25
3	7,5	19,2	3:10	4:50
<b>Promedio</b>	<b>8,0</b>	<b>20,7</b>	<b>3:00</b>	<b>4:25</b>

## 4.2 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE HORMIGONES H20, H25 Y H30

Los tiempos de fraguado de los 3 grados de hormigón que se analizan en esta investigación se presentan a continuación, en primer lugar se considera el hormigón en base a cemento grado corriente, y luego, el hormigón en base a cemento grado alta resistencia.

### 4.2.1 Hormigón en base a cemento grado corriente

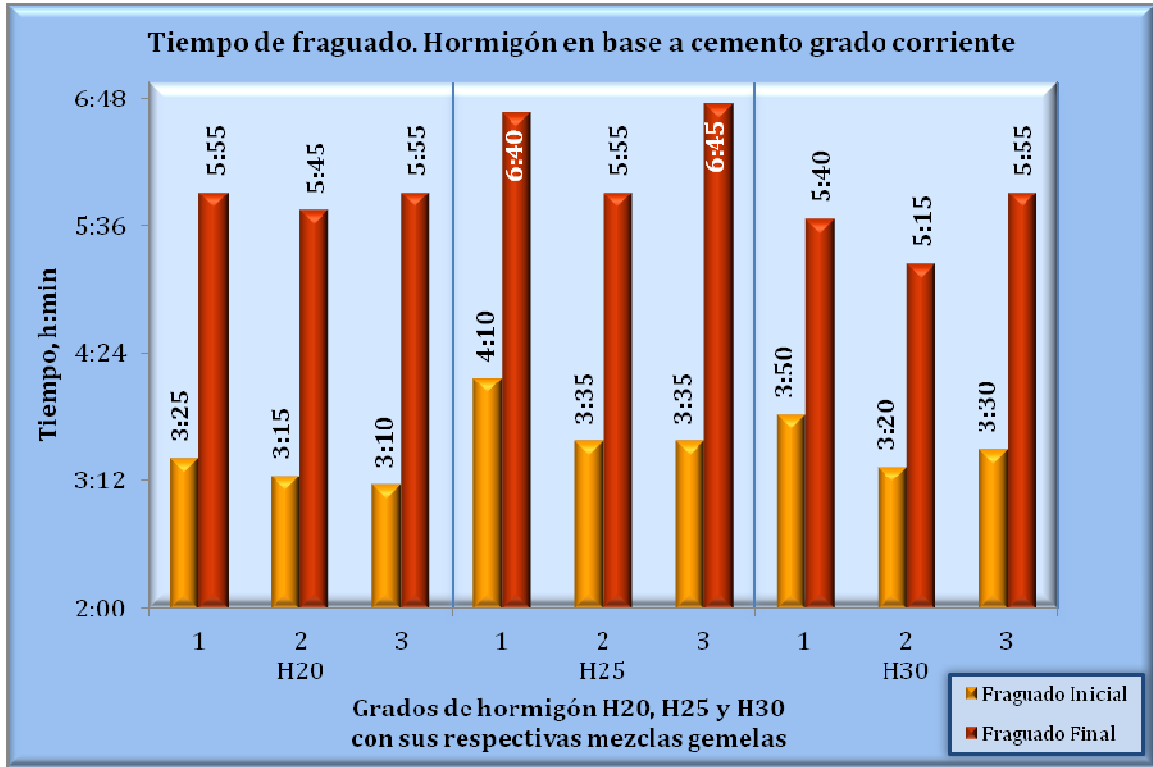
El resumen del tiempo de fraguado para los hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente se muestra en la tabla siguiente, además se puede apreciar el asentamiento de cono y la temperatura ambiente para cada mezcla gemela.

Esta información se puede visualizar mejor en la gráfica siguiente, donde se indica el fraguado inicial (barras amarillas) y el fraguado final (barras color marrón).

Tabla 93: Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente, incluye asentamiento de cono y temperatura ambiente (Elaboración propia).

Hormigón grado	Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
H20	1	7,5	17,5	3:25	5:55
	2	6,0	20,1	3:15	5:45
	3	6,5	19,9	3:10	5:55
H25	1	8,5	16,1	4:10	6:40
	2	9,0	18,5	3:35	5:55
	3	8,0	17,8	3:35	6:45
H30	1	9,0	19,0	3:50	5:40
	2	8,0	19,5	3:20	5:15
	3	8,5	18,5	3:30	5:55

Gráfico 61: Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).

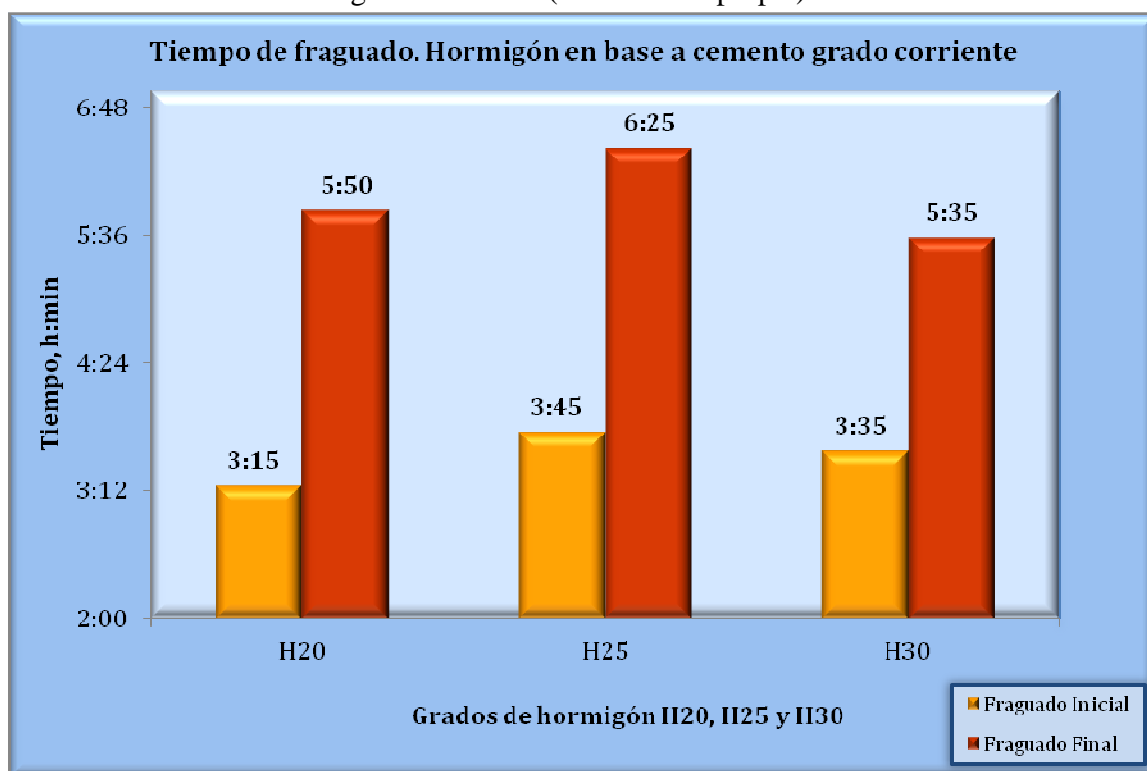


Si promediamos los resultados obtenidos del último gráfico se llega a los siguientes valores para el tiempo de fraguado inicial y final.

Tabla 94: Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).

Hormigón grado	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
H20	6,5	19,2	3:15	5:50
H25	8,5	17,5	3:45	6:25
H30	8,5	19,0	3:35	5:35

Gráfico 62: Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado corriente (Elaboración propia).



Si tomamos como referencia el tiempo de fraguado del hormigón H20, se observa que el hormigón grado H25 tarda 30 minutos más en alcanzar el fraguado inicial, mientras que el hormigón H30 demora 20 minutos más. O sea, el fraguado inicial del hormigón H25 demora 15% más que el H20, y el hormigón H30 demora 10% más que el H20.

En cuanto al fraguado final, el hormigón H25 demora 35 minutos más que el H20, por otro lado el hormigón H30 alcanza el fraguado final 15 minutos antes que el H20. De esta manera el hormigón H25 tarda un 10% más que el H20 en alcanzar el fraguado final, mientras que el hormigón H30 logra la misma condición en un tiempo 4% inferior que el H20.

#### 4.2.2 Hormigón en base a cemento grado alta resistencia

Para los hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia los resultados se muestran a continuación:

Tabla 95: Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia, incluye asentamiento de cono y temperatura ambiente (Elaboración propia).

Hormigón grado	Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial h:min	Fraguado final h:min
H20	1	8,5	18,5	3:35	4:45
	2	7,5	20,0	3:05	5:00
	3	6,0	20,4	2:50	4:35
H25	1	7,5	18,8	2:50	4:10
	2	7,0	21,0	2:50	4:10
	3	6,5	18,1	2:55	4:45
H30	1	7,0	22,0	2:45	4:05
	2	9,0	21,0	3:05	4:25
	3	7,5	19,2	3:10	4:50

Gráfico 63: Tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia (Elaboración propia).

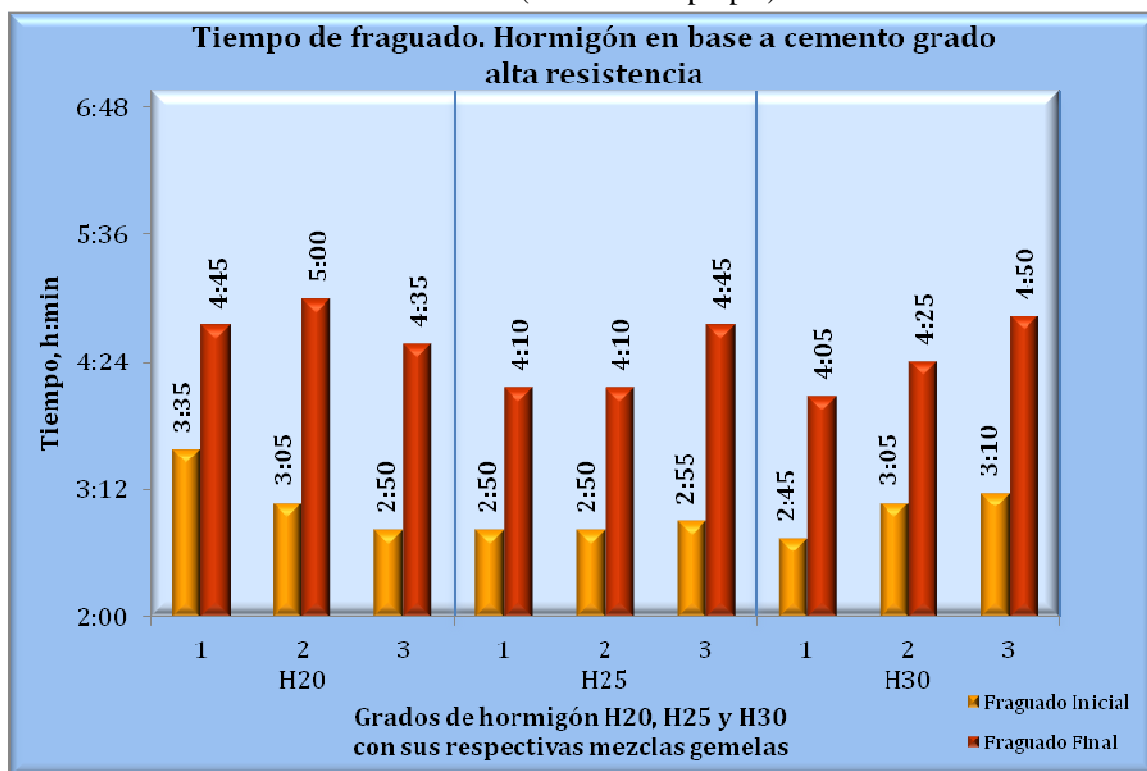
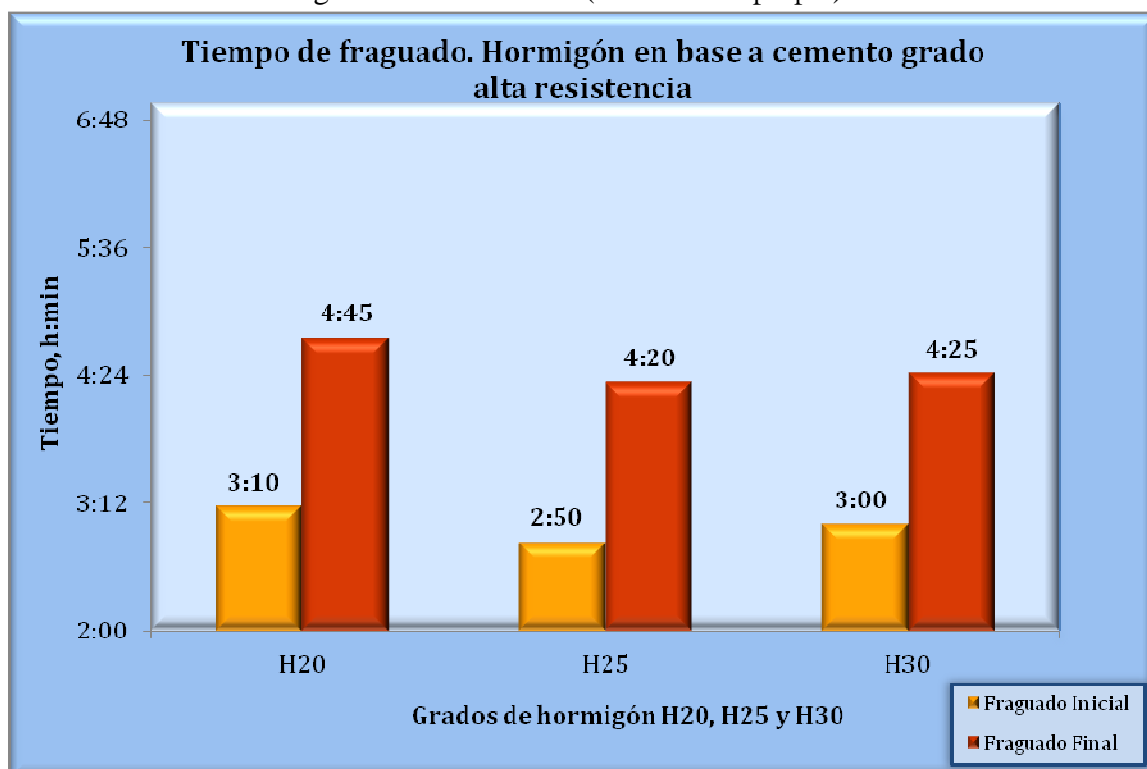


Tabla 96: Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia (Elaboración propia).

Hormigón	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
H20	7,5	19,6	3:10	4:45
H25	7,0	19,3	2:50	4:20
H30	8,0	20,7	3:00	4:25

Gráfico 64: Promedio tiempo de fraguado hormigones H20, H25 y H30 en base a cemento grado alta resistencia (Elaboración propia).



En el caso de los hormigones confeccionados con cemento grado alta resistencia se puede apreciar que tanto para el fraguado inicial como final, el hormigón H20 es el que demanda más tiempo en alcanzar esas condiciones. Por otro lado, es el hormigón H25 el que logra el fraguado inicial y final con mayor rapidez. El hormigón H25 alcanza el fraguado inicial en un tiempo 10% menor que el H20, situación similar ocurre para el fraguado final,

donde la diferencia es de un 9%. En cuanto al hormigón H30, este logra el fraguado inicial un 5% más rápido que el H20, y un 7% más rápido para el fraguado final.

### **4.3 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE FRAGUADO DE HORMIGONES ELABORADOS CON CEMENTO GRADO CORRIENTE VERSUS CEMENTO GRADO ALTA RESISTENCIA**

Ahora se entregan y analizan los resultados del tiempo de fraguado de hormigones de un mismo grado de resistencia a la compresión y elaborados en base a diferente grado de cemento (corriente y alta resistencia), esto para hormigones H20, H25 y H30.

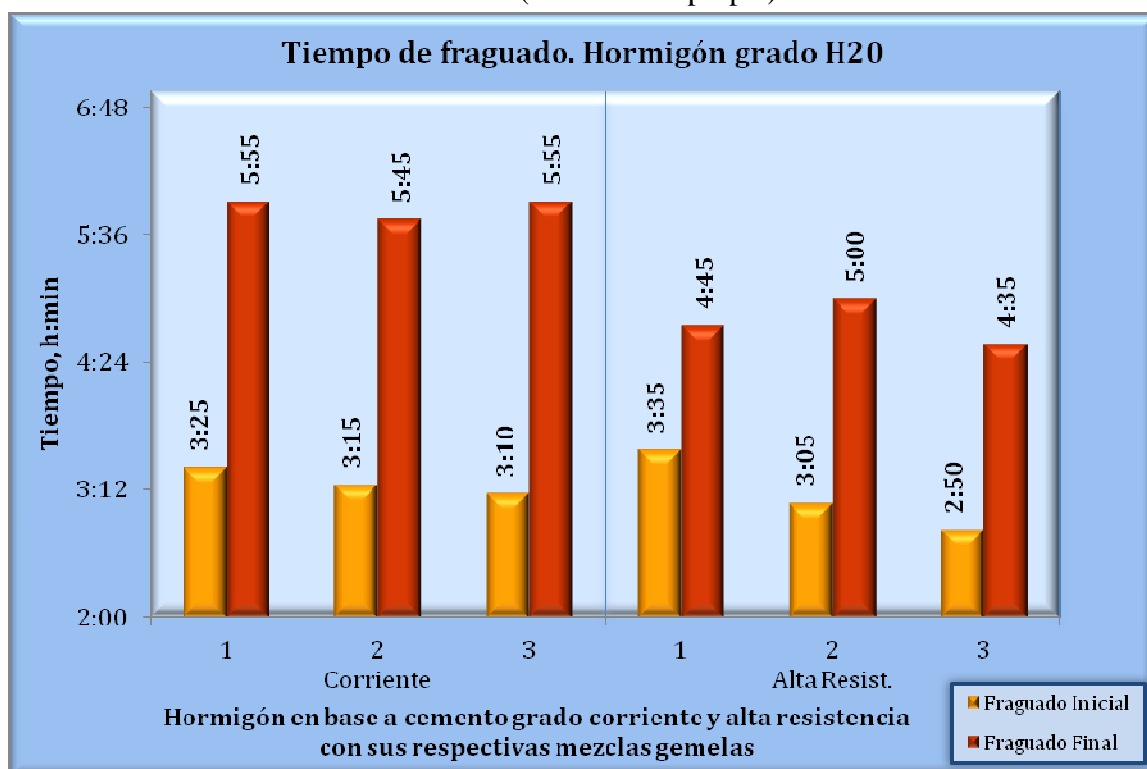
#### **4.3.1 Hormigón grado H20**

En la tabla siguiente se muestra el detalle de los resultados del tiempo de fraguado para las 3 muestras gemelas del hormigón grado H20, tanto en base a cemento grado corriente como alta resistencia. A continuación de la tabla se muestra un gráfico con estos resultados.

Tabla 97: Tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

<b>Grado del cemento</b>	<b>Mezcla gemela</b>	<b>Cono, cm</b>	<b>Temperatura ambiente, °C</b>	<b>Fraguado inicial, h:min</b>	<b>Fraguado final, h:min</b>
Corriente	1	7,5	17,5	3:25	5:55
	2	6,0	20,1	3:15	5:45
	3	6,5	19,9	3:10	5:55
Alta Resistencia	1	8,5	18,5	3:35	4:45
	2	7,5	20,0	3:05	5:00
	3	6,0	20,4	2:50	4:35

Gráfico 65: Tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

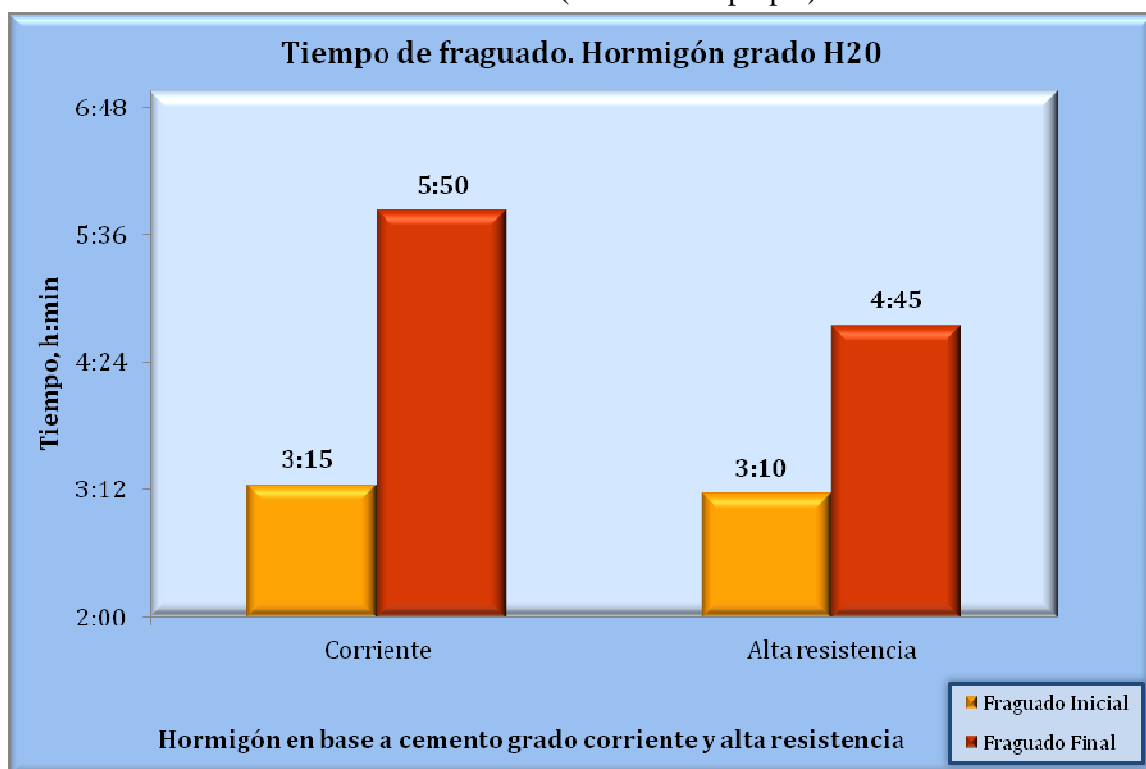


Luego el promedio de las 3 mezclas gemelas para cada grado de cemento se muestran en la tabla 98.

Tabla 98: Promedio tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

Grado del cemento	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
Corriente	6,5	19,2	3:15	5:50
Alta Resist.	7,5	19,6	3:10	4:45

Gráfico 66: Promedio tiempo de fraguado hormigón H20 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).



Se observa que para el fraguado inicial hay una leve diferencia, en este caso el hormigón en base a cemento grado alta resistencia logra el fraguado inicial 5 minutos antes, esto es un 3% más rápido que el hormigón en base a cemento grado corriente.

Para el fraguado final la diferencia es notoria, aquí el hormigón fabricado con cemento grado alta resistencia alcanza dicha condición con algo más de una hora de anterioridad respecto al hormigón en base a cemento grado corriente (19% más rápido).

### 4.3.2 Hormigón grado H25

Tabla 99: Tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

Grado del cemento	Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
Corriente	1	8,5	16,1	4:10	6:40
	2	9,0	18,5	3:35	5:55
	3	8,0	17,8	3:35	6:45
Alta Resistencia	1	7,5	18,8	2:50	4:10
	2	7,0	21,0	2:50	4:10
	3	6,5	18,1	2:55	4:45

Gráfico 67: Tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

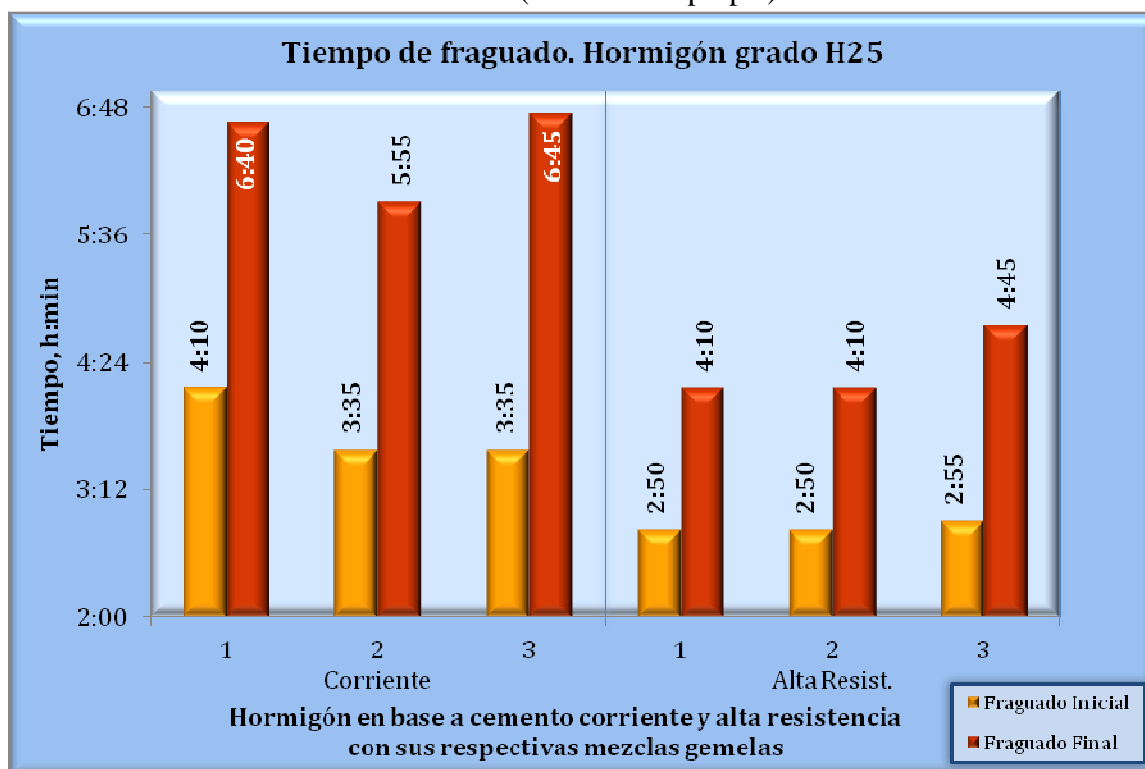
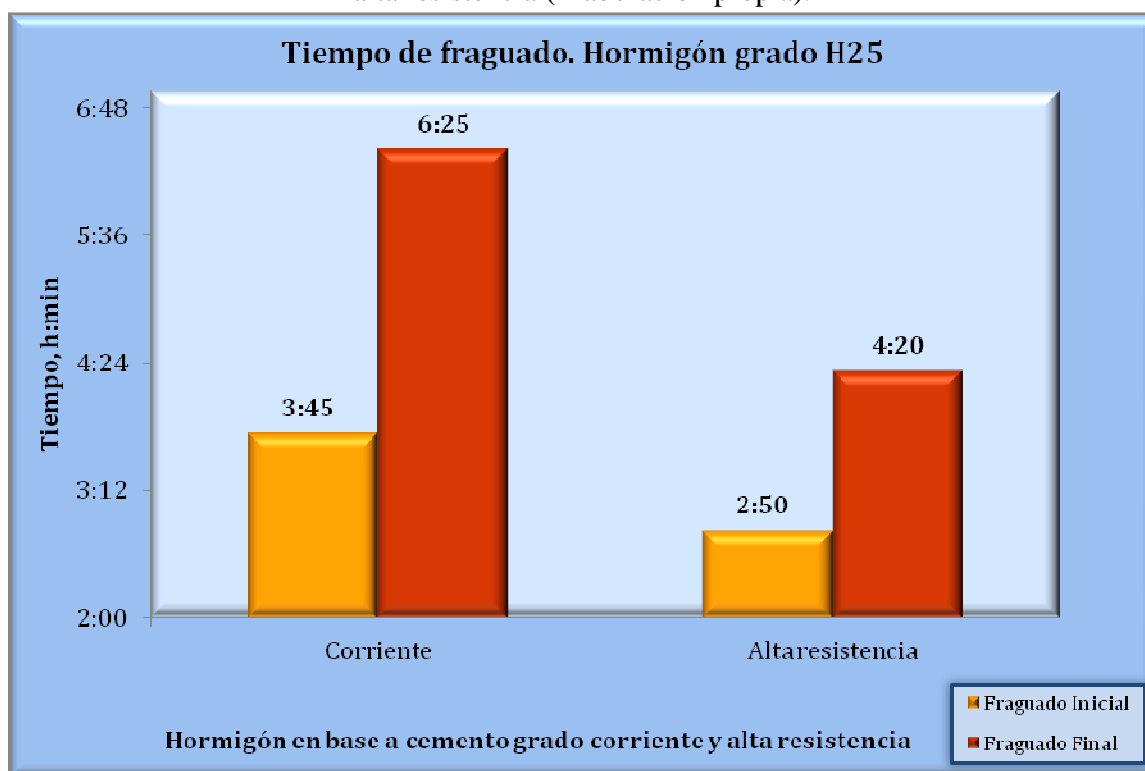


Tabla 100: Promedio tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

Grado del cemento	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
Corriente	8,5	17,5	3:45	6:25
Alta Resist.	7,0	19,3	2:50	4:20

Gráfico 68: Promedio tiempo de fraguado hormigón H25 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).



Es en este hormigón donde las diferencias son mayores, tanto para el fraguado inicial como para el fraguado final. El hormigón H25 confeccionado utilizando cemento grado corriente tarda cerca de una hora más en alcanzar el fraguado inicial que el hormigón con cemento grado alta resistencia, o sea toma un 24% más de tiempo.

En cuanto al fraguado final la diferencia es aún mayor, aquí el hormigón fabricado utilizando cemento grado alta resistencia alcanza dicha condición un 32% más rápido que con cemento grado corriente.

### 4.3.3 Hormigón grado H30

Tabla 101: Tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

Grado del cemento	Mezcla gemela	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
Corriente	1	9,0	19,0	3:50	5:40
	2	8,0	19,5	3:20	5:15
	3	8,5	18,5	3:30	5:55
Alta Resistencia	1	7,0	22,0	2:45	4:05
	2	9,0	21,0	3:05	4:25
	3	7,5	19,2	3:10	4:50

Gráfico 69: Tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

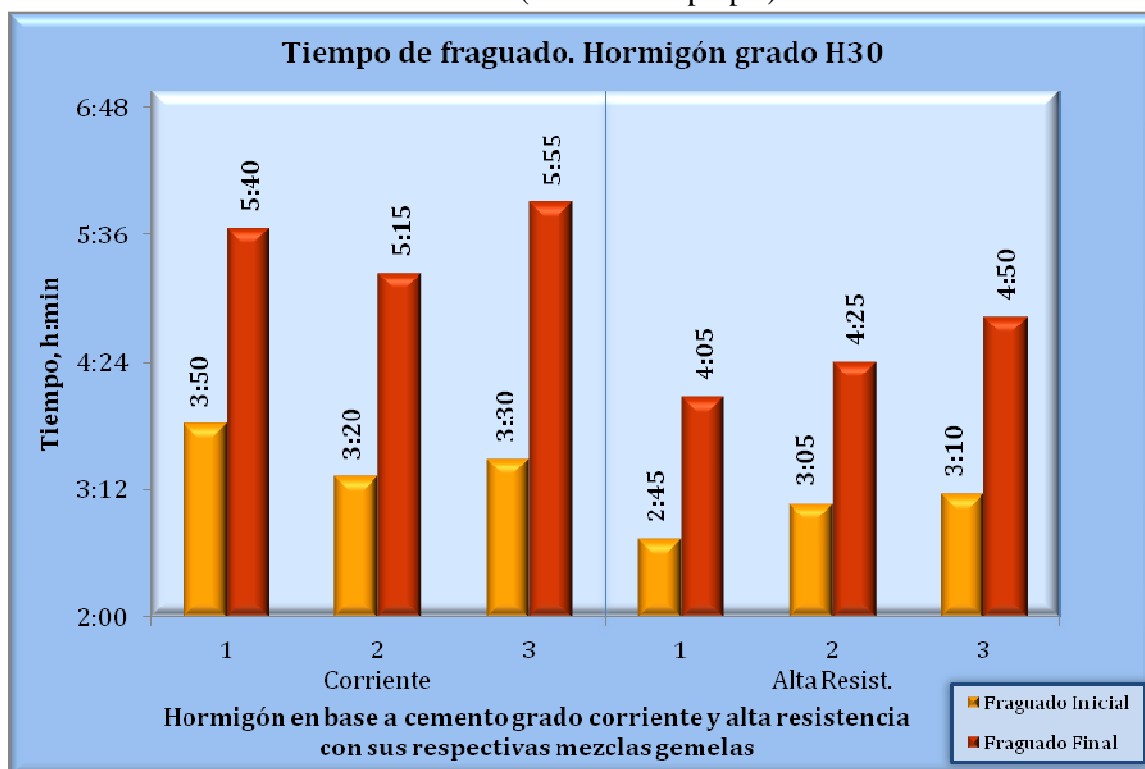
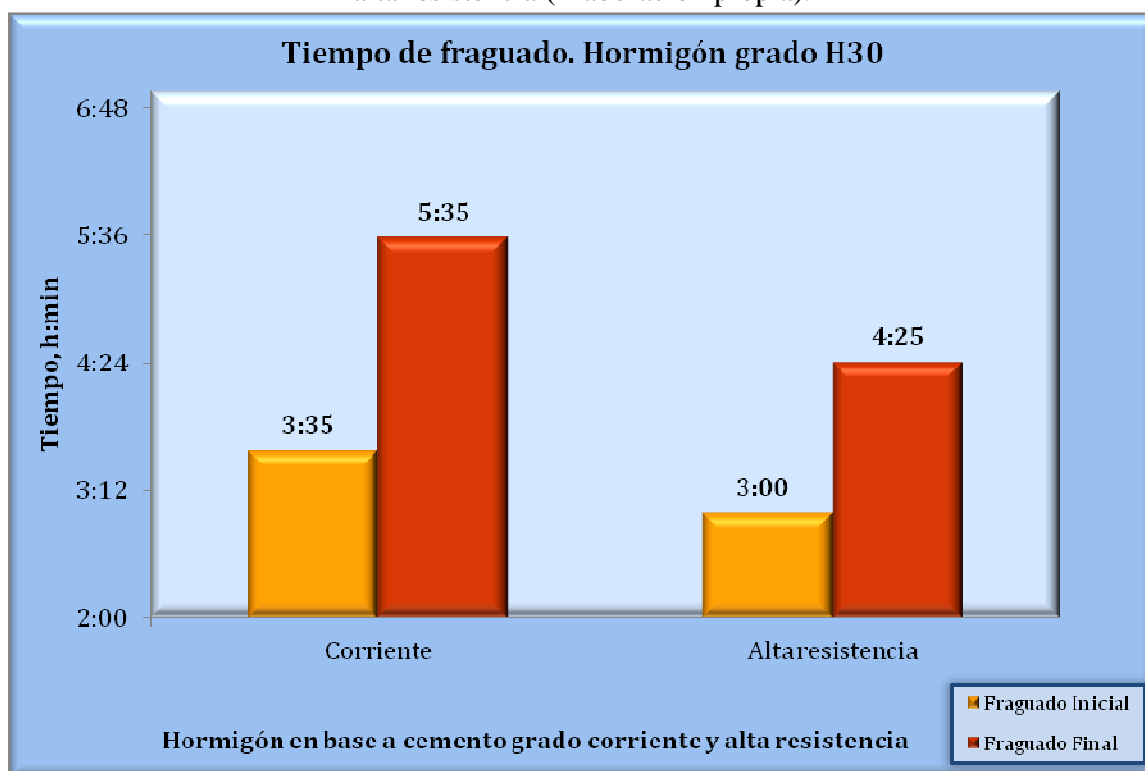


Tabla 102: Promedio tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).

Grado del cemento	Cono, cm	Temperatura ambiente, °C	Fraguado inicial, h:min	Fraguado final, h:min
Corriente	8,5	19,0	3:35	5:35
Alta Resist.	8,0	20,7	3:00	4:25

Gráfico 70: Promedio tiempo de fraguado hormigón H30 en base a cemento grado corriente y alta resistencia (Elaboración propia).



En el caso del hormigón H30 el fraguado inicial para el hormigón en base a cemento grado alta resistencia es alcanzado un 16% más rápido que el hormigón confeccionado con cemento grado corriente, y el fraguado final es alcanzado un 21% más rápido para el hormigón en base a cemento grado alta resistencia con respecto al confeccionado con cemento grado corriente.

## CONCLUSIONES

### *Limitaciones*

1. Las conclusiones obtenidas se limitan a los hormigones especificados en esta investigación. Es posible que se obtengan resultados diferentes si se cambian las condiciones de trabajo o se varían las características de los materiales.

### INICIO DE FRAGUADO

1. Para una mezcla de hormigón, las 3 probetas ensayadas alcanzan el inicio de fraguado en tiempos muy similares.
2. Por otro lado, se obtuvieron variaciones significativas en el inicio de fraguado para hormigones de iguales características confeccionados en días distintos, por lo que para estudios de este tipo, se recomienda efectuar un mínimo de tres mezclas si se quiere llegar a resultados más confiables y representativos.

### *Comparación entre hormigones grado H20, H25 y H30:*

3. La razón agua/cemento cambia según sea el grado del hormigón, lo que podría traducirse en un fraguado más rápido en hormigones de mayor resistencia, sin embargo, este factor no fue determinante en el inicio de fraguado, ya que según los resultados obtenidos, no hay una clara tendencia que confirme lo anterior.
4. Entre los hormigones grado H20, H25 y H30 estudiados, el inicio de fraguado se da en tiempos similares para los tres grados de hormigón, principalmente en los elaborados con cemento grado alta resistencia, donde esto ocurre con 20 minutos de diferencia máxima.
5. Los hormigones elaborados con cemento grado corriente alcanzan el fraguado inicial en un tiempo mayor que los fabricados con cemento grado alta resistencia. Esta es una característica a tener en cuenta, ya que siempre es deseable que el hormigón se demore en alcanzar el fraguado inicial para dar tiempo al transporte, colocación y acabado del hormigón.

### *Comparación entre hormigones de un mismo grado, elaborados con cemento grado corriente y alta resistencia:*

6. Para hormigones de un mismo grado de resistencia a la compresión, se concluye que en general hay una tendencia a alcanzar el fraguado inicial más rápido por parte del hormigón elaborado con cemento grado alta resistencia, lo que ocurrió con claridad en los hormigones H25 y H30, por su parte, en el hormigón H20 esta diferencia fue mínima.

### **FIN DE FRAGUADO**

1. Para una mezcla de hormigón, las 3 probetas ensayadas alcanzan el fin de fraguado en tiempos muy similares.
2. Por otro lado, se encontraron variaciones significativas en el fin de fraguado para hormigones de iguales características confeccionados en días distintos, por lo que para estudios de este tipo, se recomienda efectuar un mínimo de tres mezclas si se quiere llegar a resultados más confiables y representativos.

#### ***Comparación entre hormigones grado H20, H25 y H30:***

3. Al igual que el inicio de fraguado, el fin de fraguado no depende directamente del grado del hormigón que se está trabajando.
4. Entre los hormigones grado H20, H25 y H30 estudiados, los elaborados con cemento grado alta resistencia logran diferencias mínimas en alcanzar el fraguado final, por otro lado, en los hormigones elaborados con cemento grado corriente, el fin de fraguado es alcanzado con mayores diferencias de tiempo entre los hormigones analizados.
5. Los hormigones elaborados con cemento grado alta resistencia alcanzan el fraguado final en un tiempo menor que los fabricados con cemento grado corriente. Esto es importante, cuando se desea que el hormigón alcance el fraguado final con prontitud para dar pie a nuevos trabajos tanto en el mismo hormigón como en otras áreas de la obra.

#### ***Comparación entre hormigones de un mismo grado, elaborados con cemento grado corriente y alta resistencia:***

6. Para hormigones de un mismo grado de resistencia a la compresión, hay una clara tendencia a alcanzar el fraguado final más rápido por parte del hormigón elaborado con cemento grado alta resistencia, lo que ocurrió con claridad en los hormigones estudiados (H20, H25 y H30), con diferencias superiores a una hora en los tres casos.
7. Si bien la característica anterior habla bien del cemento grado alta resistencia, no podemos dejar de lado el factor costo. El cemento grado corriente es 40% más económico que el cemento grado alta resistencia.

### **TIEMPO DE FRAGUADO**

1. En líneas generales, los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con los resultados encontrados en la bibliografía, sin embargo, se pueden apreciar diferencias como que los hormigones fabricados con cementos con agregados de cenizas volantes presentados en el capítulo 2.4, tardan en promedio una hora más en lograr el inicio de fraguado que los hormigones confeccionados en esta tesis, que utilizan escorias como agregados del cemento.

2. Se pudo comprobar que la temperatura es un factor que influye de manera importante en el tiempo de fraguado del hormigón, donde variaciones no muy significativas de ésta controlan tanto el inicio como el fin de fraguado, dejando en un segundo plano el efecto que el grado del hormigón pueda tener en el tiempo de fraguado.
3. Resulta difícil mantener un control adecuado de la temperatura en la realización de los ensayos para determinar el tiempo de fraguado del hormigón, lo que interfiere en una óptima comparación en el tiempo de fraguado entre diferentes grados de hormigón.
4. En los tres grados de hormigón estudiados (H20, H25 y H30), los elaborados en base a cemento de alta resistencia alcanzan antes tanto el fraguado inicial como el fraguado final. Esto confirma la hipótesis de que un mayor contenido de adiciones en el cemento (como lo es en el caso del cemento grado corriente) retarda el inicio y fin de fraguado del hormigón.

#### *Comentarios referentes a los ensayos*

1. Para un mismo hormigón, se puede obtener una alta variación en el tiempo de fraguado, por lo que se recomienda que las mediciones sean realizadas cuidadosamente por un mismo operador.
2. Es recomendable que la operación de tamizado del hormigón sea realizada por al menos 2 personas, para obtener el mortero de hormigón en el menor tiempo posible. Además se recomienda la utilización de tamices de diámetro nominal mayor o igual a 40 cm.
3. Es aconsejable que los recipientes utilizados para las mediciones de penetración posean un área de 300 cm<sup>2</sup> (como mínimo), de este modo se podrá obtener un mayor número de mediciones y/o sustituir mediciones mal ejecutadas.
4. Se recomienda tomar 9 medidas de penetración como mínimo, las que deben estar bien distribuidas en el tiempo, para así lograr una curva representativa del tiempo de fraguado del hormigón.
5. Por último, señalar que para los ensayos realizados en esta investigación, en el laboratorio LEMCO de la Universidad Austral de Chile, se contó con las condiciones y los elementos apropiados para efectuar de manera correcta los ensayos.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- AIMIL. 2013. Instrumentation & Technologies (Disponible en: [http://www.aimil.com/Products.aspx?Product\\_Id=78](http://www.aimil.com/Products.aspx?Product_Id=78). Consultado el: 07 de junio 2013).
- AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). 2004. Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete. (ASTM C 40-2004). 5 p.
- GUICHAPAI, F. 2008. Comparación de tres métodos prácticos de curado de hormigón aplicados en obras menores frente a un patrón de hormigón sin curar. Tesis Ing. Constructor. Valdivia, Univ. Austral de Chile, Fac. Cien. Ing. 93 p.
- GABALEC, M. 2008. Tiempo de fraguado del hormigón. Tesis de Becarios de investigación. La Plata, Univ. Tecnológica Nacional, Fac. Regional La Plata. 28 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1977. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas. (Norma NCh 1239.Of77). 7 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 2010. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas. (Norma NCh 1117.Of10). 7 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1977. Áridos para morteros y hormigones - Determinación del material fino menor a 0,080 mm. (Norma NCh 1223.Of77). 4 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1979. Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales. (Norma NCh 163.Of79). 23 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 2009. Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría. (Norma NCh 165.Of09). 14 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 2009. Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams. (Norma NCh 1019.Of09). 6 p.

- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1968. Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales. (Norma NCh 148.Of68). 8 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 2009. Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso. (Norma NCh 1537.Of09). 30 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1975. Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. (Norma NCh 1017.EOf75). 11 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1985. Hormigón – Requisitos generales. (Norma NCh 170.Of85). 57 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN). 1982. Hormigón - Agua de amasado - Requisitos. (Norma NCh 1498.Of82). 12 p.
- KOSMATKA, S; B. KERKHOFF; W. PANARESE. 2003. Design and Control of Concrete Mixtures. 14 ed. Skokie, Illinois, USA, Portland Cement Association. 358 p.
- KOSMATKA, S. 2008. Properties and Performance of Normal-Strength and High-Strength Concrete. En: NAWY, E. Concrete Construction Engineering Handbook. 2 ed. New York, CRC Press. Cap. 5, 46 p.
- MALHOTRA, V. 2008. Mineral Admixtures. En: NAWY, E. Concrete Construction Engineering Handbook. 2 ed. New York, CRC Press. Cap. 2, 48 p.
- RIDDELL, R; P. HIDALGO. 2010. Diseño Estructural. 5 ed. Santiago de Chile, Ediciones UC. 543 p.
- ROJAS, S. 1975. Tecnología de los hormigones de cemento. Santiago de Chile, s.e. 213 p.
- SOLAS, A; R. GIANI. 2010. Tecnología del Hormigón Avanzada. 1 ed. Santiago de Chile, Ediciones UC. 775 p.
- ZABALETA, H. 1992. Compendio de tecnología del hormigón. 2 ed. Santiago de Chile, s.e. 144p.

