

XVI JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGON

EVALUACION DEL GRADO DE MADUREZ CON CEMENTOS NACIONALES

THOMAS STANLEY HALL C.
JUAN PABLO GONZALEZ C.
NICOLAS MORENO S.



OCTUBRE 2003

INTRODUCCION

En los últimos años se ha producido un aumento en la velocidad de construcción lo cual conlleva a la rápida puesta en servicio de elementos de hormigón armado por lo que existe una necesidad para poder acelerar los procesos de construcción determinando las resistencias del hormigón a tempranas edades, por lo cual es necesario tener un modelo predictivo que nos entregue resultados de acuerdo a las situaciones reales en las que se encuentra sometido el hormigón, es decir, tipo de cemento, cambios climáticos y temperaturas a las que está expuesto el hormigón, los tipos de protección que tiene el hormigón durante el proceso de endurecimiento y cualquier otra situación a la que este elemento de hormigón este expuesto. Actualmente los métodos de predicción existentes no son tan confiables ya que existen métodos destructivos que no se pueden ocupar a tempranas edades y métodos no destructivos como la toma de muestras tomadas por un laboratorio que somete al hormigón a condiciones ideales, es decir a temperaturas que oscilan entre los 20° y 25 °C, una humedad del 100%, a causa de esto los valores de las resistencias en terreno varían bastante con relación a las resistencias obtenidas en un laboratorio. Por esta razón es necesario ocupar un método predictivo más eficiente, este método es el de la madurez.

El método de la madurez es una técnica que fue desarrollada a fines del año 1940 y principio del año 1950, esta técnica relaciona los efectos en la resistencia conjugando la temperatura y la edad del hormigón in-situ (Nurse 1949, Mc Intosh 1949, Saúl 1951). Saúl enuncia "Muestras de una misma mezcla de hormigón tendrán iguales resistencias si es que tienen iguales valores de madurez, aun que el historial de temperaturas varíe en el transcurso del tiempo".

Existen tres pasos para poder determinar las resistencias en terreno aplicando el método de madurez que son:

1. Establecer la relación resistencia versus madurez para la mezcla de hormigón en laboratorio.
2. Obtener los valores de madurez de acuerdo a los datos de temperatura tomados en terreno.

3. Comparar los valores de madurez obtenidos en terreno y en el laboratorio de acuerdo a los distintos historiales de temperatura en cada caso.

Se han desarrollado varias funciones de madurez pero la más utilizada es la función propuesta por Nurse-Saúl

$$M = \sum(T - T_0) \Delta t$$

El método de la madurez es un buen indicador para determinar el desarrollo de las resistencias en terreno desde que el hormigón se encuentra en su estado fresco hasta cuando este llega a endurecer.

El concepto esta basado en el hecho de que la temperatura es un actor crítico en el proceso de la hidratación del cemento y por ende en el desarrollo de las resistencias del hormigón, especialmente a tempranas edades. El concepto de la Madurez esta determinado por la multiplicación de intervalos de tiempo por la temperatura interna del hormigón en estudio, estos productos se va sumando en el tiempo dando como resultado que la madurez es la suma de la multiplicación tiempo - temperatura.

El método de la madurez logra así una relación directa entre los hormigones de prueba con los hormigones de terreno ya que ambos llevan un control a una misma temperatura dando así similares valores de madurez.

En esta investigación se realizaron varios ensayos a la compresión para determinar las resistencias a temperaturas de 10, 15, 20 y 25 °C con cementos chilenos puzolanicos especial y alta resistencia.

GENERALIDADES.

1. Recomendaciones para el curado y descimbre

La norma NCh 170 indica ciertas recomendaciones para el curado y descimbre de los elementos presentes en una faena de construcción, así como también las resistencias requeridas para acortar los plazos de descimbres.

El incremento de las resistencias mecánicas en el tiempo depende de diversos parámetros que el proyectista debe tomar en cuenta para el diseño del hormigón y así lograr que este cumpla con los requerimientos especificados. El incremento de resistencia depende del ambiente que rodea al material, específicamente de la temperatura y de la humedad que se encuentra expuesto.

Hoy en día la velocidad de ejecución de las obras de construcción forma parte de la eficiencia económica y obliga a acortar los plazos de descimbre de los elementos tanto en faena como en el taller de prefabricación. La Norma Chilena NCh 170 establece los plazos de descimbres de los moldajes sobre la base del tipo de cemento y de la estructura a la cual se le retiraran dichos elementos. Es así como podemos observar en la tabla N°1 los plazos mínimos de descimbres, sin embargo la norma NCh 170 en la tabla N°2 indica los retiro de las protecciones del elemento hormigonado en función de la temperatura ambiente, no obstante los plazos de descimbres entregados en la tabla N°1 deberían comenzar a regir al termino de los plazos de protección del hormigón.

Tabla N°1 Plazos mínimos para el desmolde y descimbre en casos corrientes.

MOLDAJES	CEMENTO GRADO	
	CORRIENTE <i>Días</i>	ALTA RESISTENCIA <i>días</i>
Costados de muros, vigas o elementos no solicitados	2	1
Costados de pilares o elementos solicitados por peso propio o cargas externas	5	3
Fondos, cimbras, puntales y arriostramientos de vigas y losas siempre que no estén cargados	16	10

Tabla N°2 Resistencia mínima para finalizar los plazos de protección.

Temperatura media diaria del ambiente prevista para el periodo de curado °C	% de la resistencia especificada
Sobre 0	50
De 0 a -4	65
De -5 a -9	85
Menor de -9	95

2. Calor de Hidratación.

Es natural que la hidratación del cemento vaya acompañada de un desarrollo de calor, como término medio puede calcularse que la hidratación total de un cemento Portland produce unas 120 cal/gramo. Este calor de hidratación, verdaderamente considerable en el cemento Portland, se desarrolla mucho más lentamente que en el caso de la cal viva y en general se dispone de tiempo suficiente para que se disipe por radiación. En obras masivas, como represas, la generación térmica sí constituye un serio problema, pues por una parte la dilatación no puede efectuarse libremente y por otra los grandes volúmenes de hormigón dificultan la difusión del calor. En estas condiciones se presentan aumentos de temperatura y dilataciones inconvenientes que inicialmente producen esfuerzos de compresión, bajos los cuales y por efecto de la fluencia, el hormigón cede. Posteriormente – aun en las construcciones más masivas – el hormigón se va enfriando y se producen así contracciones y esfuerzos de tracción a los cuales poca es la resistencia que el hormigón puede oponer y este se agrieta.

Desde el punto de vista químico puede disminuirse el calor de hidratación del cemento, para lo cual se aprovecha la circunstancia de que sus distintos componentes presentan diferentes calores de hidratación. En efecto, en algunas obras civiles de importancia se han producido cementos especiales, con el fin de minimizar el calor de hidratación.

Calores de Hidratación Completa de los Componentes del Cemento a 28 días.	
<i>Silicato tricálcico</i>	90 ± 7 cal/gramo
<i>Silicato bicálcico</i>	25 ± 4 cal/gramo
<i>Aluminato tricálcico</i>	329 ± 23 cal/gramo
<i>Ferroaluminato tetracálcico</i>	118 ± 22 cal/gramo

Estas cifras nos proporcionan puntos de referencia a partir de los cuales pueden estimarse las cantidades de calor producidas por el conjunto que integra el cemento. Los factores indicados correspondientes a un completo desarrollo del proceso de hidratación

solo pueden aplicarse en relación con una edad avanzada, varios meses o años. Una determinante del aumento de temperatura en las construcciones – además de las dimensiones de la estructura – es naturalmente el desarrollo de calor por unidad de tiempo y a través de las primeras edades. De acuerdo con la composición química de los cementos pueden prever los siguientes valores.

<i>Edad en días</i>	<i>Cal/gr. Min. Max.</i>
3	41 – 75
7	61 – 92
28	66 – 101
90	75 – 107

EL CONCEPTO DE MADUREZ

1. El método de madurez.

El método de madurez es una técnica que considera los efectos combinados de tiempo y temperatura que afectan el desarrollo de la resistencia en el hormigón. El método proporciona un acercamiento relativamente simple y confiable para las estimaciones de resistencias tempranas en el hormigón.

El origen del método data del año 1940 año en el cual se decidió estudiar el efecto del curado a vapor en el hormigón y luego se extendió su uso a otros métodos de curado. En la actualidad este método es muy utilizado en el Departamento de Carreteras Federales de los E.E.U.U.

El 2 de marzo de 1973, un edificio en construcción ubicado en el condado de Fairfax en los E.E.U.U, sufrió un colapso progresivo, en el cual murieron 14 trabajadores y 34 quedaron heridos. Esto motivó que la *Safety and Health Administration* (OSHA) encargara a la *National Bureau of Standards* (NBS) el estudio para determinar las causas técnicas del colapso de la estructura. El informe de la (NBS) concluyó que las causas más probables del colapso de la estructura fueron el prematuro descimbre de los moldajes y el exceder la capacidad de carga de este hormigón que era relativamente joven. Además los investigadores del (NBS) pudieron constatar que la temperatura media en los días previos al accidente era de 7 °C aproximadamente, dato que fue corroborado en un aeropuerto cercano al lugar de la tragedia. Los investigadores de la (NBS) encontraron dificultades para poder obtener el desarrollo de la resistencia del hormigón bajo las condiciones de curado sobre la base de temperatura constante que fueran representativos del hormigón que sufrió el colapso.

Esto activó el interés en un método relativamente nuevo de predicción de resistencia denominado método de madurez el cual permite estimar las resistencias de un hormigón bajo condiciones de temperatura variable. El método de método de madurez utiliza el historial térmico del hormigón para poder estimar el desarrollo de resistencia durante el periodo de curado.

La historia térmica del hormigón se utiliza para calcular el llamado índice de madurez. Para cada mezcla de hormigón la relación entre la resistencia y el índice de madurez se debe establecer de antemano.

En un estudio posterior de la NBS sobre la aplicación del método de madurez bajo condiciones simuladas fue realizada por el investigador Carino en el año 1983. Se utilizaron tres mezclas distintas de hormigón y colocados sobre probetas cilíndricas [ASTM C 873] estos moldes se colocaron en una cámara de curado húmeda, además otras tres mezclas fueron curadas al aire libre (durante la primavera) el objetivo era determinar si la resistencia - madurez de las probetas en la cámara de curado eran iguales a las probetas que se encontraban al aire libre. Los resultados de este estudio dejaron perplejo a los investigadores debido que para un tipo de muestra se obtuvieron la misma resistencia y madurez entre las probetas en la cámara de curado y las probetas al aire libre. Para las otras dos mezclas había diferencias significantes.

El examen de las historias de temperaturas de todos los especímenes, revelaron que para las dos mezclas que tuvieron diferencias, las probetas que se encontraban al aire libre experimentaron resistencias a edades tempranas a diferencia de los especímenes ubicados en la cámara de curado.

Los orígenes del Método de Madurez se remontan a una serie de estudios realizados en Inglaterra sobre los métodos de curado acelerado [McInstosh, 1949,; Alimento; 1949; Saul, 1951] lo que llevó a la necesidad de crear un procedimiento que considerara los efectos combinados de tiempo y temperatura en el desarrollo de la resistencia, Estas ideas llevaron a la famosa ecuación de madurez propuesta por Nurse-Saul 1951

El método de madurez, se basa, en que la resistencia de un hormigón, con una dosificación determinada, esta en función de su temperatura y del tiempo en el que se encuentra a dicha temperatura.

La ecuación de la madurez propuesta por Nurse-Saul se expresa de la siguiente forma.

(1)

Donde:

M = madurez del hormigón específico a un cierto tiempo t

t^a = temperatura promedio del hormigón en el intervalo de tiempo Δt

Δt = intervalo de tiempo elegido

T_0 = temperatura bajo la cual no hay ganancia de resistencia (Temperatura Dato $-10\text{ }^\circ\text{C}$).

El principio de madurez establece que si distintas amasadas de un hormigón con una dosificación común tendrán la misma madurez y por ende adquirirán la misma resistencia.

Para la temperatura dato T_0 se han propuesto varios valores. Saul y posteriormente Bergtrom usaron en sus investigaciones una T_0 igual a $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente Plowman determino que esta temperatura de referencia era de $-11.7\text{ }^\circ\text{C}$. En cualquier caso, la base de referencia de la temperatura dato equivale a un punto bajo el cual no hay ganancia de resistencia en el hormigón, es decir no fragua.

El valor obtenido por la ecuación (1) se llama Madurez, sin embargo, según la terminología actual se le denomina Factor de Temperatura - Tiempo [ASTM C 1074]

La figura muestra el historial de temperatura de un hormigón, en barras se observa el Factor de Temperatura – Tiempo obtenido a partir de la ecuación (1) que es igual al área bajo la curva de temperatura y la temperatura dato. El valor tradicional que se utiliza para la temperatura dato es de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Saul [1951] presento el siguiente principio que se conoce como la Regla de Madurez; “Hormigones de una misma dosificación poseen la misma madurez y por ende poseen aproximadamente las mismas resistencias”

La ecuación (1) se basa en que la proporción inicial de ganancia de resistencia durante el periodo de aceleración, que es cuando el agua se mezcla con el cemento y se produce un tiempo en el cual no hay ganancia de resistencia, este periodo de tiempo se conoce como inducción. Una vez concluido el periodo de inducción ocurre un rápido desarrollo de resistencia, este periodo es llamado tiempo de aceleración.

El estado plástico en que se encuentra el hormigón, desde la finalización de su mezclado hasta que se produce su rigidización, es decir, hasta que ha iniciado su proceso de fraguado, se denomina el periodo reológico, caracterizado porque en él, se produce un verdadero acomodamiento de las partículas que lo constituyen, en ese medio semilíquido, en que se están gestando las reacciones químicas por el proceso de hidratación. Un hormigón con la misma dosificación, con un periodo reológico más prolongado, tendrá mayor resistencia mecánica y en general mejores atributos de calidad.

Un tiempo después de que se diera a conocer la ecuación (1) se fue comprendiendo que esta aproximación lineal no podía ser valida cuando las temperaturas de curados variaban en una amplia gama de temperatura. Como resultado otros investigadores propusieron una serie de alternativas a la ecuación propuesta por Nurse – Saul [Malhotra, 1971,; Carino,1991]. Sin embargo ninguna de estas alternativas recibió una

aceptación adecuada y la ecuación de Nurse– Saúl siguió siendo utilizada mundialmente.

2. El efecto de la temperatura en la adquisición de resistencia.

En 1977, Freiesleben Hansen y Pedersen, propusieron una nueva ecuación para calcular el índice de madurez. Esta función esta basada en la ecuación de Arrhenius, la cual se utiliza para describir el efecto de la temperatura en la reacción química del hormigón. La nueva función permitió el cálculo de la edad equivalente del hormigón.

Para expresar el aumento de la resistencia en términos de la función tiempo temperatura, se utiliza la aproximación de tiempo equivalente. El tiempo equivalente puede ser definido como el tiempo de curado a una temperatura de referencia T_r que entrega la misma relación de aumento de resistencia, bajo las condiciones de curado real. El tiempo equivalente refleja el grado de endurecimiento y el avance de las reacciones de hidratación del cemento.

La ecuación de la edad equivalente es la siguiente:

(2)

Donde :

t_e = Edad equivalente

E = Energía de activación, J/mol

R = Constante universal de los gases, 8.314 J/mol-K

T = Promedio de la temperatura absoluta del hormigón durante el intervalo t en grados Kelvin.

T_r = Temperatura de referencia absoluta en grados Kelvin.

Utilizando la ecuación (2), se puede convertir la edad real del hormigón a su edad equivalente, en términos de la ganancia de resistencia a una temperatura de referencia. En la práctica los Europeos utilizan como valor de la temperatura de referencia 20 °C, y los Norteamericanos ocupan normalmente 23 °C.

La introducción de esta ecuación supero una de las grandes limitaciones de la ecuación de Nurse – Saul. El uso de la ecuación (2) elimino las diferencias entre las relaciones resistencia – madurez desarrolladas con distintas temperaturas de curado. La nueva función, sin embargo no es capaz de determinar los efectos de la temperatura en edad temprana con respecto a las resistencias finales que adquirirá el hormigón. El parámetro importante de la ecuación (2) es la “Energía de activación” que describe el efecto de la temperatura en el desarrollo de la resistencia.

El procedimiento para determinar la Energía de Activación es el siguiente:

- Curar especímenes de mortero a temperaturas constantes diferentes.
- Determinar la resistencia a compresión a distintas edades y a intervalos regulares.
- Determinar el valor de la proporción constante a cada temperatura de curado mediante una curva de resistencia- edad.
- Graficar los logaritmos naturales de las constantes de la proporción contra el inverso de la temperatura de curado.
- Utilizar la ecuación de Arrhenius para representar la variación de proporción constante con la temperatura.

Utilizando el procedimiento anterior Carino encontró que la energía de activación para una razón agua - cemento (A/C)=0.45 la energía de activación es de 30 a 64 kJ/mol, mientras para una (A/C)=0.60 fue de 31 a 56 kJ/mol, dependiendo del tipo de cemento y

mezclas de hormigón.

La clave para desarrollar la función de madurez mas apropiada para una mezcla de hormigón particular es determinar la variación de la constante con la temperatura de curado. Como ya se menciona, la constante esta relacionada a la razón de ganancia de resistencia a una temperatura constante, y puede obtenerse de una ecuación apropiada de ganancia de resistencia versus edad. Luego es necesario considerar algunas de las relaciones que han sido usadas para representar el desarrollo de resistencia del hormigón

La pregunta es la siguiente ¿ Cual modelo de desarrollo de resistencia debería usarse ?.

El método de madurez se usa típicamente para monitorear el desarrollo de resistencia durante la construcción. Por lo tanto, no es necesario modelar exactamente la ganancia de resistencia.

3. Relación madurez – resistencia.

Para desarrollar la relación madurez – resistencia, se preparan especímenes de hormigón usando las proporciones de la mezcla y los constituyentes del hormigón que se usa en construcción. Estos especímenes se preparan de acuerdo a los procedimientos usuales para fabricar y curar especímenes de prueba en el laboratorio.

Después que los cubos de hormigón se moldean, se insertan sensores de temperatura en los centros de a lo menos dos cubos. Los sensores se conectan a instrumentos que automáticamente computan la madurez o a instrumentos de registros de temperatura.

Los especímenes se curan en un baño de agua o en una habitación de curado húmedo. A las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días, pruebas de compresión son realizadas en a lo menos dos especímenes. Al tiempo de fraguado, el valor de la madurez promedio para los especímenes instrumentalizados se registra. Si los instrumentos de madurez son usados, el promedio de los valores mostrados es registrado. Si se usan registradores de temperatura, la madurez se evalúa de acuerdo a la ecuación (1) o a la (2). Un intervalo

de tiempo de registro de una hora y media o menos debería ser usado para las primeras 48 horas, e intervalos de tiempo más largo son permitidos para el resto del período de curado.

Un gráfico se obtiene de la resistencia a compresión promedio como una función del índice de madurez promedio. Una curva suave mejor ajustada se dibuja a través de la información, o puede usarse un análisis de regresión para determinar la curva mejor ajustada para una relación madurez – resistencia. La curva resultante sería usada para estimar la resistencia en terreno de aquella mezcla de hormigón.

Una de las relaciones más populares de madurez – resistencia es la ecuación logarítmica siguiente propuesta por Plowman (1956):

(3)

Donde:

a = Resistencia para el índice de madurez, $M = 1$

b = Pendiente de la recta

M = Índice de Madurez

La ecuación (3) es popular por su simplicidad. No provee una buena representación de la relación entre el índice de madurez y el de resistencia para valores bajos o altos del índice de madurez. Predice que la resistencia se mantiene en aumento con el índice de madurez, es decir, no hay resistencia límite.

La standard ASTM asume que la temperatura inicial del hormigón en terreno es aproximadamente la misma que la temperatura de laboratorio cuando estén preparados los cilindros. Si las temperaturas a temprana edad reales son significativamente mayores que las temperaturas de laboratorio, la resistencia in-situ límite se reduce. Luego la resistencia en terreno puede estar sobre estimada por la relación madurez - resistencia.

DEAROLLO EXPERIMENTAL

1. Procedimiento

El objetivo de esta investigación es determinar mediante procesos empíricos matemáticos la ganancia de resistencia del hormigón en el tiempo y a temperaturas constantes (10, 15, 20 y 25 °C), cuando este es sometido a esfuerzos de compresión.

Para cumplir con este objetivo se dividió el trabajo de investigación en dos etapas.

- Confección de cámara de curado
- Fabricación de hormigones con cementos nacionales

La primera etapa tuvo como objetivo la confección de una cámara de frío con capacidad de 45 probetas cubicas de acero de 15x15, y que sea capaz de mantener temperatura constantes entre los 0 y 15°C con una humedad relativa interna de 90 a un 95%, para ello se modifico una piscina de cuarado a la cual se le adapto un equipo de aire acondicionado con un termostato de variación de +/- 1°C, esta cámara fue aislada tanto interior como exteriormente con poliestireno expandido de 10 cm. de espesor en todo el perímetro interior y el exterior con poliestireno de 3 cm. de espesor, finalmente se coloco una tapa metálica aislada con poliestireno en espuma.



Figura 1.1. Cámara de frío con capacidad de 45 probetas de 15x15

La segunda etapa consiste en la fabricación de un hormigón H-25 con un 95% de confianza y con una dosificación para cementos de grado corriente y otra dosificación para cementos de grado alta resistencia.

2. Dosificación de los Hormigones

Los hormigones confeccionados fueron dos, uno con dosificación para cementos de grado corriente de 350 Kg/m^3 y otra dosificación para cementos alta resistencia con 300 Kg/m^3 .

Para tales efectos se utilizó el método de dosificación *Faury*. Este método se fundamenta en principios granulométricos para determinar las cantidades de los materiales que permiten otorgar a un determinado hormigón las características previstas. Además se ocupó este método por su flexibilidad ya que permite determinar con mayor precisión las condiciones previstas para el hormigón que se dosifica y a la posibilidad de emplear tantos áridos como se desee.

Antecedentes de los materiales utilizados:

- Densidad real de la arena 2.70 Kg/dm³
- Densidad real de la gravilla 2.67 Kg/dm³
- Absorción de la arena 1.97%
- Absorción de la gravilla 0.91%
- Tamaño máximo de la gravilla 20 mm.

La cantidad de agua se puede obtener según la tabla de dosificación de la ACI por lo que se eligió una Razón de 0.5 siendo "A" la cantidad de agua en Kilos y "C" la cantidad de cemento en Kilos.

Razón A/C = 0.5	Cemento Corriente	Cemento Alta Resistencia
Cantidad de Cemento	350	310
Cantidad de Agua	175	155

Finalmente las dosificaciones utilizadas en esta investigación se muestran en la tabla siguiente:

Materiales	Cementos corrientes	Cementos Alta resistencia
<i>Cemento Kg.</i>	350	310
<i>Arena Kg.</i>	922	942
<i>Gravilla Kg.</i>	919	919
<i>Agua Litros</i>	175	155

(Dosificación para 1 m³de Hormigón)

3. Confección de las probetas

Para esta investigación se confeccionaron 15 probetas de hormigón por muestra estos hormigones fueron confeccionados en probetas cubicas de acero de 15x15 cm.

4. Confección del hormigón

Se confeccionaron 55 litros de mezcla por cada tipo de cemento en una mezcladora eléctrica con capacidad para 85 litros.

5. Curado y desmolde

El curado de las probetas una vez llenados los moldes se realizo con una membrana de curado (Sika cure), posteriormente se ingresan las probetas en la cámara de curado.

El desmolde se realizo a las 24 horas después de haber sido confeccionado el hormigón, para lo cual se tomaron las precauciones de no someter las muestras a temperatura ambiente por mucho tiempo para no sufrir variaciones térmicas considerables.

6. Ensayo a la compresión

Previo al ensayo a la compresión las probetas se midieron y pesaron para posteriormente ser ensayadas a la compresión, los ensayos a la compresión fueron a 3,5,7,14 y 28 días.

RESULTADOS OBTENIDOS Y ANALISIS

1. Portland Puzolanico Grado Corriente.

Los resultados de la resistencia a la compresión son entregados en la siguiente tabla.

T° °C	Tiempo Días	Resistencia en Kg/cm ²
10	3	100
	5	125
	7	151
	14	207
	28	251
15	3	120
	5	148

	7	161
	14	203
	28	257
20	3	110
	5	147
	7	159
	14	212
	28	261
25	3	137
	5	183
	7	209
	14	251
	28	277

A partir del concepto de madurez antes definido la ecuación normalmente sugerida para predecir la resistencia de un hormigón para una madurez dada queda definida por medio de la siguiente relación:

$$R(M) = A \text{ Log}(M) + B$$

Para obtener las constantes A y B se debe graficar $\text{Log}(M)$ en °C hora vs Resistencia y a través de una regresión lineal se obtienen dichos parámetros.

Portland Puzolanico Grado Corriente.

Gráfico 1.1

Según el gráfico 1.1 la ecuación de predicción de resistencia para un hormigón H-25 fabricado con cemento Portland Puzolanico Grado Corriente queda expresada de la siguiente forma:

$$\mathbf{R = 145.87*Log(M) - 361.09}$$

Con las constantes A y B calculadas se puede entonces obtener una predicción de resistencias que se compara con las resistencias reales obtenidas en laboratorio en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Comparación de

resistencias Nurse-Saúl

Gráfico 2.1 Comparación resistencia obtenida en laboratorio con resistencia estimada a través del método de Nurse-Saúl.

2. Portland Puzolanico Grado Alta Resistencia.

Los resultados de la resistencia a la compresión son entregados en la siguiente tabla.

T° Kg/cm2	Tiempo Días	Resistencia en Kg/cm2
10	3	181
	5	210
	7	288
	14	297
	28	368
15	3	200
	5	243
	7	264
	14	295
	28	345

20	3	181
	5	229
	7	241
	14	273
	28	340
25	3	197
	5	234
	7	277
	14	299
	28	383

G

ráfico 2.1

Según el gráfico 2.1 la ecuación de predicción de resistencia para el cemento Portland Puzolanico Grado Alta Resistencia queda expresada de la siguiente forma:

$$R = 156.02 * \text{Log}(M) - 315.19$$

Con las constantes A y B calculadas se puede entonces obtener una predicción de resistencias que se compara con las resistencias reales obtenidas en laboratorio en la

siguiente tabla.

Tabla 2.1 Comparación de resistencias Nurse-Saúl

Gráfico 2.2 Comparación resistencia obtenida en laboratorio con resistencia estimada a través del método de Nurse-Saúl.

MODELO PREDICTIVO PROPUESTO

En base al modelo matemático de Arrhenius, el cual es ocupado para predicciones de madurez, se obtuvo el siguiente modelo matemático:

Donde :

E =Energía de activación J/mol

R= constante de los gases 8.314 J/K mol

β =

t = tiempo en días

T = Temperatura °C

A y B =constantes que dependen del tipo de cemento y razón agua cemento

Determinación de los parámetros S_{∞}

Para determinar S_{∞} se aplico una regresión lineal sobre el gráfico 1/S vs 1/t, remplazando los valores en la ecuación

el valor de S_{∞} sale del mejor coeficiente de correlación en la regresión tomando los

mejores datos del grupo como se ve a continuación:

Portland Puzolanico Grado Corriente:

Portland Puzolanico Grado Alta Resistencia:

Determinación de los parámetros K_t y t_0

Para determinar los parámetros K_t y t_0 se procede de forma análoga al cálculo S_∞ esta vez se grafica de la forma $S/(S_\infty - S)$ vs t , y realizando una regresión lineal sobre la ecuación:

El valor de K_t y t_0 , queda definido por el grupo de datos que arroje la mejor correlación en la regresión realizada para el parámetro K_t a continuación se muestran los valores

obtenidos de esta regresión para cada cemento.

Portland Puzolanico Grado Corriente:

Temperatura	R	n	to	kt
10	0,9995	5	0,32390953	0,1238
15	0,9977	4	0,33230958	0,1628
20	0,9998	3	0,66255507	0,227
25	0,9984	4	0,17429719	0,249

Portland Puzolanico Grado Alta Resistencia:

Temperatura	R	n	to días	kt
10	0,9995	5	0,32390953	0,1238
15	0,9977	4	0,33230958	0,1628
20	0,9998	3	0,66255507	0,227
25	0,9984	4	0,17429719	0,249

Determinación de los parámetros E y T_0

Cuando los valores de K_t están determinados, es posible entonces graficar K_t vs T. Esta relación que representa la sensibilidad de la mezcla con respecto al temperatura, puede formularse mediante una relación lineal o bien por la ecuación de Arrhenius, dependiendo del tamaño del rango de temperatura considerado.

Estas ecuaciones consideran los parámetros E y T_0 y pueden calcularse graficando K_t vs T y aplicando regresiones lineales a las ecuaciones:

Las tablas siguientes muestran los valores determinados para las constantes E y T₀:

Portland Puzolanico Grado Corriente:

Ln beta	E/R	R	E	beta	Correlación
12,446	4106,3	8,31451	34141	254231	0,9635

Portland Puzolanico Grado Alta Resistencia:

Ln beta	E/R	R	E	Beta	Correlación
15,23	4036.8	8,31451	33564	4093865	0,365

Predicción de resistencias a través del modelo propuesto.

Portland Puzolanico Grado Corriente:

T° Kg/cm2	Tiempo Días	S Estimada Kg/ cm2	S Real Kg/cm2
10	3	117	100
	5	157	125
	7	184	151
	14	235	207
	28	272	251
15	3	113	120
	5	151	148
	7	177	161
	14	225	203
	28	261	257
20	3	110	110
	5	148	147
	7	173	159
	14	220	212
	28	255	261
25	3	117	137
	5	157	183
	7	185	209
	14	235	251
	28	272	277

Gráfico 5.4.1 Comparación resistencia obtenida en laboratorio con resistencia estimada a través del modelo predictivo.

Portland Puzolanico Grado Alta Resistencia:

T° Kg/cm2	Tiempo Días	S Estimada Kg/ cm2	S Real Kg/cm2
10	3	197	181
	5	250	210
	7	282	288
	14	337	297
	28	373	368
15	3	175	200
	5	222	243
	7	250	264
	14	299	295
	28	331	345
20	3	182	181
	5	231	229
	7	261	241
	14	311	273
	28	344	340
25	3	197	197

5	250	234
7	282	277
14	337	299
28	373	383

Gráfico 5.4.2 Comparación resistencia obtenida en laboratorio con resistencia estimada a través del modelo predictivo.

CONCLUSIONES.

Por los resultados obtenidos a través de los métodos predictivos de Nurse-Saúl y el modelo propuesto se puede decir, que es posible predecir resistencias del hormigón sin utilizar métodos destructivos o constante muestreo en terreno. Esta información es muy útil cuando se requiere determinar las resistencias del hormigón para un pronto descimbre. Como las especificaciones de calidad del hormigón se basan en términos de la resistencia característica y ensayos bajo condiciones de temperatura y humedad normalizados, se sabe que en obra estas condiciones no se dan por lo cual se debe considerar las variaciones de temperatura ambiente que puede llegar a afectar al

hormigón.

La función de madurez esta relacionada a la sensibilidad de desarrollo de temperatura inicial de la resistencia y no hay una función única de madurez para distintas mezclas de hormigón, por ende la función de madurez solo es aplicable para un solo tipo de hormigón, es decir cada hormigón tiene su propia función de madurez la cual debe ser previamente calculada.

Para que cualquiera de estos métodos presentados sea eficiente es necesario realizar un estudio previo y obtener las curvas de madurez para así poder predecir las resistencias a través del tiempo. Así también se sabe que en este método los parámetros utilizados que son el tipo de cemento, tipo de árido, temperatura a la que se cura la mezcla y la razón agua/cemento influyen en la predicción de resistencia.

El modelo propuesto puede trabajar con rangos de temperaturas entre 5°C y 30°C, si deseara utilizar este modelo con temperaturas fuera de este rango, seria necesario ampliar los ensayos con temperaturas mayores a la requerida para así lograr una exactitud del método. Así mismo se sugiere ampliar los ensayos con otras razones agua/cemento, utilizando aditivos y otros tipos de cementos nacionales.

Cuando se aplica este método en terreno es necesario tomar la precaución de utilizar los rangos de temperaturas más bajos a la cual fue sometido el hormigón para así considerar un índice de madurez menor lo que permitirá crear un factor de seguridad para poder aplicar el método de forma segura.

El modelo propuesto predice resistencias, en la mayoría de los casos por debajo de las resistencias obtenidas en laboratorio lo que a juicio de los autores es valido ya que se puede asegurar predicciones seguras y confiables.

La ventaja de este método es una herramienta muy útil cuando se desea saber la resistencia de cualquier hormigón tanto a edades tempranas como tardías. Otra ventaja es el no tener que extraer testigos de los elementos ya hormigonados, también se puede tener un historial de la evolución de la resistencia a través del tiempo sin tener que hacer un muestreo constante en terreno.

BIBLIOGRAFIA

1. NCH 170 Of. 85. "Hormigón Requisitos Generales"
2. **Neville A. M.** "Tecnología del concreto". Londres 1992
3. **VIDELA, C. Y PARADA, O.**, "Predicción de la Resistencia Potencial del Hormigón"
Revista de Ingeniería de Construcción, N°5, 1988.
4. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM C1074-87, Anual Book of ASTM standars, Vol. 04.02 Concrete and Aggregates, 1988.
5. ACI Manual of Concrete Practice 1992 Part I, Appendix 1, Materials and Generals Properties of Concrete.
6. **CARROZA J.M., VAGANAY D.M.**, "Predicción de la Resistencia a Compresión de Hormigones Fabricados con Cementos Chilenos, Utilizando el Método de Madurez."
Universidad de Santiago de Chile 1996
7. **Carino, N.J., H.S and Voltz, C.K.**, Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method, J. Amer. Concrete Inst., 80(2), 93, 192
8. **Carino, N.j., Tank, R.C.J.**, Amer. Concr. Inst. Title N°89-M21; March-April,1988
9. **Carino, N.J.**, The Maturity Method: Theory and Application, ASTM J, Cement, Concrete. Aggregates, 6(2), Winter 61, 1984