



### **Taller 3 - Madurez, Presión de Moldajes y Métodos de Estimación de Resistencia 2do Semestre - 2025**

En este taller se revisan, a partir de ejercicios prácticos, algunos contenidos vistos en clases relacionados con el cálculo de la presión de moldajes y la estimación de resistencia del hormigón mediante el método de madurez, así como el análisis de la relación entre la edad del hormigón, la razón agua/cemento ( $w/c$ ) y su impacto en la resistencia del material, utilizando métodos empíricos como los de Bolomey y Venuat.

El objetivo es aplicar y comparar diferentes metodologías utilizadas en la estimación de la resistencia del hormigón, tanto en función de su historial térmico (método de madurez) como de sus parámetros de dosificación y tiempo de curado (Bolomey y Venuat), para comprender su influencia en las decisiones constructivas y en la optimización de los procesos en obra.

La entrega de la tarea se realizará en el módulo habilitado en Canvas, donde se deberá subir un breve informe con los resultados obtenidos. La tarea debe realizarse en grupos de **2 integrantes**. Cualquier tipo de copia será sancionada de acuerdo con el Reglamento del Alumno de Pregrado de la Universidad de los Andes y se informará al Comité de Ética.

El informe deberá cumplir con los siguientes requisitos en relación con su estructura y contenidos:

1. **Portada:** Debe incluir el logo de la universidad, los datos del curso, los nombres de los integrantes y la información necesaria para identificar la tarea.
2. **Introducción:** Explicar brevemente los temas importantes de la tarea, con los objetivos principales de los ejercicios desarrollados. Máximo 1 plana.
3. **Desarrollo:** El informe debe enumerar y detallar cada ejercicio realizado, incluyendo la metodología, los resultados y el análisis. Cualquier supuesto adicional debe ser explícito. Es crucial ser preciso con las unidades y la presentación de tablas y figuras. Además de los datos y resultados, el informe debe incluir los fundamentos conceptuales. Máximo 15 plana.
4. **Conclusiones:** Se deben identificar las principales conclusiones obtenidas a partir de la revisión de los temas desarrollados en la tarea. Máximo 1 plana.
5. **Bibliografía:** Incluir la bibliografía utilizada.

#### **Aspectos formales:**

El informe debe estar redactado en Times New Román, Arial, Aptos o Calibri, con un tamaño de fuente de 11, espaciamiento simple y texto justificado.

**Evaluación:** La clasificación del taller se distribuirá de la siguiente manera:

- Formato y presentación: 10%.
- Introducción y conclusión: 10%.
- Desarrollo de cálculos y resultados: 30%.
- Análisis y discusión de resultados: 50%.

Para que tengan habilitada su nota de este informe, deberán tener **el sello del centro de escritura**, de modo contrario tendrán nota mínima en este informe.

**Archivo de cálculos:** Se deberá entregar una planilla donde se pueda ver claramente el desarrollo de los cálculos y la formulación asociada a estos.



## Método de Madurez

La estimación de la resistencia del hormigón *in-situ* es fundamental para una planificación y desarrollo eficientes en obra, permitiendo optimizar operaciones como el retiro de moldajes y alzaprimas, así como el postensado de elementos estructurales. Contar con una estimación precisa y oportuna de la resistencia en terreno no solo facilita el proceso constructivo, sino que también optimiza el diseño de la mezcla.

En muchas obras, la resistencia del hormigón en terreno se evalúa a través de probetas que son curadas en la obra o en laboratorio. Sin embargo, las condiciones ambientales en laboratorio suelen ser más controladas que las del hormigón en obra, lo que puede llevar a estimaciones conservadoras o a la necesidad de más recursos. Entre los métodos alternativos para estimar la resistencia en terreno, con variable nivel de confiabilidad y precisión, se encuentra la sonda Windsor, el pullout test y el método de madurez.

El **método de madurez** permite correlacionar los registros del historial de temperatura interna con la resistencia del hormigón en tiempo real. Una vez que se ha desarrollado la curva de madurez en condiciones controladas, es posible estimar la resistencia *in-situ* de manera continua. Este método se basa en el principio de que una mezcla de hormigón específica, en un proyecto determinado, alcanzará la misma resistencia a la compresión cuando se haya logrado el mismo índice de madurez  $M$ . Esto permite calcular la "edad equivalente", es decir, el tiempo necesario bajo condiciones variables de temperatura para alcanzar una resistencia equivalente al mismo nivel de madurez. Este tiempo se denomina "tiempo equivalente"  $t_e$ .

Es importante destacar que la madurez no es una propiedad inherente del hormigón, sino un concepto que, según la norma **NCh 170**, refleja que la resistencia mecánica del material en una edad determinada está influenciada por su historial de temperaturas. El método de madurez, descrito en la norma **ASTM C1074**, es ampliamente utilizado a nivel mundial y tradicionalmente considera dos métodos para calcular el *índice de madurez*  $M$  y el tiempo equivalente  $t_e$ : (1) el método de *Nurse-Saul*, y (2) el método de Arrhenius (*Freieslaben, Hansen y Pedersen*). Aunque el modelo de Arrhenius es más preciso desde un punto de vista científico, el método de Nurse-Saul es más utilizado debido a su simplicidad y a la precisión suficiente que ofrece para la mayoría de las aplicaciones.

En Chile, el método de madurez es recomendado por la norma NCh 170 para la estimación de la resistencia del hormigón y está regulado en la norma NCh 3565, la cual se basa en estándares internacionales como ASTM C1074, ASTM C918, ACI 318-6.2, ACI 228-2.7 y ACI 306-6.4.



## Presión de Moldajes

En cualquier proceso de construcción con hormigón, los moldajes juegan un papel crucial en dar forma y soporte al material fresco. Sin embargo, al vaciar el hormigón, este ejerce una presión significativa sobre los moldajes debido a su peso y consistencia. Esta presión puede ser considerable en los primeros momentos del colado, antes de que el hormigón comience a ganar resistencia. Por lo tanto, la correcta evaluación de esta presión es fundamental para evitar deformaciones, fallas o incluso colapsos en el sistema de encofrado, lo que puede comprometer tanto la calidad del elemento estructural como la seguridad en obra.

La presión de moldajes está influenciada por diversos factores como la altura de hormigonado, la velocidad de vaciado, el diseño de la mezcla, y la temperatura de curado. Dado que la presión disminuye a medida que el hormigón adquiere resistencia, el momento adecuado para retirar los moldajes es crítico. Aquí es donde el método de madurez entra en juego. Al proporcionar una estimación precisa y en tiempo real de la resistencia del hormigón, este método permite determinar con mayor exactitud cuándo se puede proceder al desmoldado sin comprometer la estructura o la seguridad del proceso.

Además, la **Guía de Moldajes para Hormigón (ACI 347)** establece directrices para el cálculo de las presiones máximas que los moldajes deben soportar en diferentes condiciones. Esto incluye considerar la resistencia alcanzada por el hormigón y los tiempos equivalentes calculados a partir del método de madurez. Así, la combinación de ambos conceptos—madurez y presión de moldajes—permite no solo optimizar los tiempos de construcción, sino también garantizar la integridad del encofrado y la seguridad en obra.

## Relación Resistencia - Razón w/c

Una mayor relación agua/cemento (w/c) genera una mayor porosidad en el hormigón, lo que, bajo condiciones iguales de curado, mezclado y dosificación, implica una menor resistencia debido a la menor cantidad de cemento por unidad de volumen de agua. Bajo esta premisa, desde hace más de un siglo se han desarrollado relaciones entre la w/c y la resistencia, permitiendo la estimación esta propiedad. Una de ellas es la relación propuesta por J. Bolomey quien, en 1936, formuló la relación mostrada en la Ec. 1 para estimar la resistencia del hormigón, para una misma edad, a partir de su dosificación.

$$f'_c = a \cdot \left( \frac{c}{w} - b \right) \quad (1)$$

Donde  $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón,  $c/w$  es la relación cemento/agua en masa, y  $a$  y  $b$  son constantes que dependen del tipo de cemento, la edad del hormigón, tipo y tiempo de curado y de las características de los agregados.

Al comparar dos hormigones de razones w/c distintas, es posible ajustar las constantes  $a$  y  $b$  para obtener la relación de Bolomey para una misma edad. De esta manera, se puede estimar la resistencia del hormigón cuando se modifica la relación w/c.



## Relación Resistencia - Tiempo

Además de las ecuaciones que estiman la resistencia a partir de la dosificación, se han desarrollado relaciones para estimar el cambio de resistencia con el tiempo. Una de las más utilizadas por su simplicidad es la relación de Venuat:

$$f'_c = K_1 + K_2 \cdot \log(t) \quad (2)$$

Donde  $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón,  $t$  es el tiempo y,  $K_1$  y  $K_2$  son constantes que dependen del tipo de hormigón. Esta fórmula permite estimar la resistencia de un mismo hormigón a partir de dos ensayos realizados en diferentes edades. Una de las ventajas de este método es que permite calcular el tiempo en que el hormigón alcanzará la resistencia necesaria para cumplir con los requerimientos del proyecto.



## Actividad

### Parte 1: Método de Madurez

Su empresa ganó la licitación para la construcción de un piso industrial postensado. Como primera tarea, a usted se le pide estudiar el tiempo necesario para el postensado de una losa de hormigón armado. Debido a la necesidad de continuidad en el proceso constructivo, el hormigón debe ser tensionado cuando alcance el 85% de la resistencia especificada.

Durante la construcción, se mide la temperatura del hormigón mediante termocuplas embebidas, registrando la variación térmica de la sección de interés. El registro del historial térmico se encuentra en el archivo de datos adjunto. Basándose en esta información, realice lo siguiente:

- I. Según las resistencias obtenidas en el laboratorio y sus respectivas edades, determine la edad en la que se alcanzó una resistencia similar a la requerida para el postensado y la madurez asociada a esta.
- II. Tomando en cuenta el historial de variaciones térmicas del hormigón en obra y, que en el laboratorio las probetas fueron curadas a una temperatura constante de 25 °C, determine la edad a la que el hormigón puede ser tensionado en obra apoyándose del método de Plowman. Utilice tanto la metodología *Nurse-Saul* como la de *Freieslaben*, *Hansen* y *Pedersen* para calcular el tiempo equivalente ( $t_e$ ), considerando una temperatura datum de 0 °C.
- III. Comente las razones de las diferencias en los días de postensado estimados según cada método.

### Parte 2: Presión de Moldajes

Como segunda asignación, usted debe evaluar el hormigonado de un muro de hormigón armado, el cual se recomienda hormigonar en tramos de 10 metros de longitud. Para este tipo de elementos, su empresa suele utilizar sistemas de bombeo de hormigón alimentados por camiones mixer, con tuberías para la descarga del material.

La bomba de hormigón tiene una capacidad nominal máxima de 80 m<sup>3</sup>/h, mientras que el rendimiento de descarga y las dimensiones del muro son variables para cada grupo y se encuentran en la planilla adjunta. Considere que se está utilizando un cemento portland puzolánico de alta resistencia.

En base a lo anterior, se le solicita realizar lo siguiente:

- I. Calcule la tasa de hormigonado máximo para evitar el colapso del moldaje de muro para la presión máxima nominal del moldaje. Entregue un gráfico con la distribución de presiones en el momento de presiones máximas actuando sobre el moldaje.
- II. Su proveedor de moldajes recomienda no sobrepasar un 80% de la carga de presión máxima del sistema. Por esto, usted debe proponer un ajuste en el hormigón que asegure el cumplimiento de esta recomendación. Incluya un gráfico que muestre el nuevo diagrama de presiones máximas en comparación con el original.

Hint: Para esta parte, puede ser útil utilizar la calculadora de la empresa de Peri ([link](#)).



### Parte 3: Bolomey y Venuat

Suponga que usted es jefe de oficina técnica en un proyecto de edificación que está en la etapa de obra gruesa. En la siguiente etapa del proyecto se construirán columnas que deben soportar una losa de hormigón armado. Para optimizar el presupuesto en el arriendo de moldajes, es necesario determinar el **tiempo mínimo de desmolde**.

Usted está analizando el tipo de cemento en los costos de la operación. Un cemento de alta resistencia inicial tiene un costo mayor que un cemento corriente y aumenta los costos del proyecto. Sin embargo, su mayor resistencia inicial permite reducir tiempos de descimbre. Por lo tanto, debe analizar el escenario óptimo que minimice el costo del hormigonado de las columnas.

Debido a la imposibilidad de utilizar el método de madurez (no se colocaron termocuplas), se emplearán las relaciones de Bolomey y Venuat. Para definir los parámetros de estas relaciones, se utilizan los resultados del control de calidad de las zapatas de fundación y vigas, en las que se utilizaron mezclas distintas. En las fundaciones se utilizó cemento corriente, mientras que en las vigas se utilizó cemento de alta resistencia inicial.

Considerando esta información:

- 1) Determinar la resistencia a compresión que debe alcanzar el hormigón para asegurar que al menos el 90% de la resistencia especificada se alcanza en el momento del desmolde.
- 2) Calcular la dosis mínima de cemento para cumplir con la resistencia requerida utilizando cada tipo de cemento.
- 3) Determinar el tiempo de desmolde para cada alternativa de cemento, utilizando la dosificación seleccionada.
- 4) Analizar los resultados y determinar qué alternativa permite minimizar los costos del proyecto.

Los datos para el cálculo de costos se presentan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Datos para el cálculo de costos**

Cemento corriente [\$/kg]	100
Cemento de alta resistencia inicial [\$/kg]	130
Moldajes [\$/día]	400

**Importante:** Al escribir el informe, deben ser claros en cuanto al proceso seguido y los valores de las constantes de cada modelo utilizado para cada alternativa de cemento.



## Discusión

1. ¿Cómo influye la velocidad de colocación del hormigón en la distribución de la presión sobre los moldajes? Analice de qué manera distintos métodos de colocación pueden modificar los esfuerzos laterales.
2. Explique cómo la temperatura ambiente condiciona el tiempo de fraguado del hormigón y la magnitud de la presión lateral sobre los moldajes, considerando la influencia de factores climáticos y el efecto de temperaturas extremas en la cinética de hidratación del cemento.
3. Explique cómo la altura de colocación del hormigón influye en la presión ejercida sobre los moldajes. Mencione al menos dos aplicaciones en las que la consideración de dicha presión sea un factor crítico.
4. ¿Cuáles son las principales ventajas y limitaciones del método de madurez cuando se aplica en distintos elementos estructurales? Analice cómo la geometría, las condiciones de curado y la disipación de calor pueden influir en la precisión del método al estimar la resistencia en elementos como vigas, losas, fundaciones o muros, entre otros.
5. ¿Cómo influye el tipo de cemento en la estimación de la presión ejercida sobre los moldajes y en el índice de madurez? ¿Qué papel desempeñan los principales materiales cementicios suplementarios (mencione al menos tres y comente su reactividad en este contexto)? Complete su respuesta analizando la importancia de las características del cemento en el desarrollo de la resistencia del hormigón a edades tempranas.
6. En una obra, además del método de Bolomey, se emplea el método de madurez para estimar la resistencia del hormigón. ¿Cuáles son las principales ventajas y desventajas de cada uno? ¿En qué situaciones resulta más conveniente aplicar uno sobre el otro?
7. ¿Cómo incide la variación en las constantes  $a$  y  $b$  del método de Bolomey en la estimación de la resistencia del hormigón? En caso de un cambio en las características de los materiales (por ejemplo, tipo de cemento o naturaleza de los agregados), describa el procedimiento que aplicaría para ajustar el método y considerar dichas variaciones en la mezcla.
8. Si se reduce el costo de materiales disminuyendo en un 10% la cantidad de cemento respecto al diseño original, ¿cómo se verá afectada la resistencia del hormigón? Indique el porcentaje de variación respecto de la resistencia inicial.
9. Complemente la Actividad 1, parte II, determinando la edad a la que el hormigón puede ser tensionado en obra mediante el método de Venuat. Compare los resultados obtenidos con los previamente calculados mediante las metodologías de Nurse-Saul y de Freiesleben, Hansen y Pedersen. Analice las similitudes o diferencias encontradas. Finalmente, seleccione una de las tres metodologías según su criterio ingenieril y justifique su elección, mencionando ventajas y desventajas respecto de las alternativas descartadas.
10. Considere que los ensayos iniciales de resistencia presentan un error de  $\pm 5\%$ . Analice la propagación de ese error en la predicción de resistencia con el método de Venuat y proponga medidas de control para mitigar su impacto en obra.