

I

EL OBJETO DE CONOCIMIENTO

1.1. El problema

1.1.1. Antecedentes

El hormigón es y continuará siendo el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo debido a la facilidad de su fabricación, la gran variedad de formas y tamaños que puede adoptar, su durabilidad potencial, y el relativo bajo costo que supone.

El estudio del comportamiento a temprana edad es de vital importancia para los procesos constructivos en el hormigón. Tener un buen control de la compactación del hormigón, poder estimar la resistencia a compresión de una mezcla, entre otras propiedades, pueden determinar no sólo un buen comportamiento a temprana edad, sino también la durabilidad a futuro, optimización del tiempo, costo y calidad de la construcción de una obra de hormigón.

La necesidad de una trabajabilidad adecuada para facilitar la puesta en obra y consolidación del hormigón, necesita el uso de cantidades de agua en la mezcla mayores a las necesarias para el proceso de hidratación. La pérdida de parte de ese exceso de agua de la matriz del hormigón una vez ya endurecido, provoca su reducción de volumen. A este fenómeno se le conoce como retracción por secado.

1.1.2. Planteamiento

El término curado del hormigón significa todos aquellos procedimientos dedicados a facilitar la hidratación del cemento. Los condicionantes básicos son el control del tiempo de curado, la temperatura y las condiciones de humedad inmediatamente después de la fabricación de la mezcla de hormigón.

Uno de los métodos más eficaces para el curado del hormigón es el empleo de vapor, que acelera considerablemente el endurecimiento. Por su propia naturaleza, el curado al vapor se utiliza casi exclusivamente en prefabricación.

El objetivo primordial del curado con vapor de agua es obtener una resistencia temprana suficientemente alta para que los productos de hormigón se puedan manejar pronto, antes que en el caso del curado ordinario de humedad, y que requiera menos espacio de almacenaje para el curado, todo esto significa una ventaja económica.

La retracción es la deformación del hormigón en estado fresco o endurecido, la cual no depende de la carga externa aplicada y se manifiesta mediante la disminución del volumen

del hormigón durante el proceso de fraguado en sus primeras horas, o cuando se encuentra ya endurecido días o meses después y se produce por un hecho muy sencillo que es la simple pérdida de agua.

Para una evaluación detallada en el valor de la retracción hay que tomar en cuenta las diversas variables que influyen en este fenómeno, en especial: el grado de humedad del medio ambiente, el espesor y dimensión de la pieza, composición del hormigón, cantidad de armaduras y tiempo transcurrido desde la ejecución, que marca el inicio del fenómeno.

Factores relacionados con el método de ejecución se tiene: el periodo de curado, tipo de curado, tamaño y forma del elemento.

1.1.3. Formulación

En el planteamiento de este trabajo surge la siguiente pregunta como punto de partida de la investigación:

¿Con una buena dosificación es posible reducir la fisuración por retracción a edades tempranas del hormigón?

No, porque en la elaboración del hormigón casi siempre existe error en la cuantificación de la dosificación.

¿Con un curado a vapor de agua es posible reducir la fisuración por retracción a edades tempranas del hormigón y también poder obtener una resistencia mayor en menor tiempo?

Con el curado a vapor se evita la pérdida de humedad y controlar la temperatura del hormigón durante el periodo de tiempo necesario para alcanzar los niveles deseados de resistencia. De esta manera aseguramos una baja permeabilidad que permite no sólo mejorar la resistencia a compresión, a flexión, reducir la porosidad y la fisuración por retracción, o mejorar la calidad de la zona más superficial para proteger frente a la corrosión, sino también aumentar considerablemente la durabilidad de la estructura de hormigón.

1.1.4. Sistematización

¿En qué consiste el ciclo del curado a vapor?

El ciclo de curado por vapor consiste en un intervalo inicial de espera, previo a la acción del vapor: un período de incremento de temperatura; un período en que se mantiene la temperatura constante, y un período de disminución de temperatura.

¿Cuál es la temperatura máxima que se podrá realizar el curado a vapor?

Deberán evitarse temperaturas máximas del vapor por encima de la temperatura de ebullición del agua en Tarija que es 94° C; ellas son antieconómicas y pueden conducir a una inaceptable reducción de la resistencia final.

1.2. Objetivos

Los objetivos del trabajo de investigación son los siguientes:

1.2.1. Objetivo General

- Realizar el análisis técnico del curado del hormigón de f_{ck} de 210 kg/cm², con vapor de agua vs curado convencional para la aplicación a elementos estructurales prefabricados.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar y determinar las características físicas mecánicas de los agregados (grava, arena).
- Evaluar y determinar las características del cemento para su aplicación como material aglomerante en la mezcla de hormigón.
- determinar una dosificación adecuada aplicando el método ACI.
- Diseñar el equipo de curado acelerado con vapor de agua.
- Establecer el procedimiento para la realización del curado de los especímenes de hormigón con vapor de agua.
- Realizar una propuesta de metodología para el ensayo de curado con vapor de agua en el laboratorio (aporte académico).
- Determinar la característica mecánica (resistencia a la compresión) de los Bloques de hormigón con curado de vapor de agua y curado convencional.
- Determinar y analizar los resultados del curado del hormigón con el curado con vapor de agua vs curado convencional, para validar la hipótesis planteada con la relación de resistencias a compresión y flexión.

1.3. Justificación

1.3.1. Teórica

La presente investigación pretende, comparar y verificar la validez de modelos teóricos, además de la introducción de conceptos conocidos pero no aplicados en el control del hormigón para elementos estructurales, buscar respuestas respecto a la aplicación de nuevas alternativas en construcción.

1.3.2. Metodológica

Para poder cumplir los objetivos, se ve necesario realizar un análisis comparativo en base la información recopilada, de manera que sea posible determinar la hipótesis de estudio, para luego contrastar en el desarrollo de la investigación, las propiedades físico – mecánicas de los hormigones con curado convencionales y el curado a vapor para poder determinando similitudes, diferencias, ventajas y desventajas de los materiales estudiados con el curado convencional.

1.3.3. Práctica

La investigación propuesta permitirá en primera instancia definir una alternativa viable al problema, que cumpla con los objetivos, en lo que se refiere a la posibilidad de obtención, aplicación e introducción del curado a vapor en la construcción local, para su aplicación en elementos estructurales prefabricados, a fin de comparar técnicas actuales con otras diferentes que cumplan con los requerimientos mínimos de calidad, resistencia y otras propiedades elementales que sean exigidas, permitiendo la explicación y validación de conocimientos teóricos.

1.4. Marco de referencia

1.4.1. Espacial

La investigación se realizara en el laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S., ubicada en la zona de El Tejar en la ciudad de Tarija y en la casa de la estudiante.

1.4.2. Temporal

El periodo al cual corresponde la información que servirá para el análisis en la construcción del conocimiento, el artículo universidad de chile “Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas” del Departamento de Ingeniería Civil por la ing. María Fernanda Figueroa Fagandini con el título “Uso de un Sistema de Curado Intermedio en Hormigón Fresco” que data de hace 7 años.

La presente investigación tendrá un periodo de validez aproximadamente de 4 años.

1.5. Alcance del estudio

1.5.1. Tipo de estudio

El estudio se regirá en el diseño de un hormigón convencional para uso estructural, basado en los ensayos de A.S.T.M. para una mezcla de hormigón con resistencia de f_{ck} de 210 kg/cm². Mismo quedara delimitado en una línea de investigación experimental cuasi empírica, ya que se tiene como propósito realizar el curado a vapor de agua tratando de obtener una mayor resistencia mecánica la compresión y flexotraccion en menor tiempo aplicado en elementos estructurales prefabricados.

El curado con vapor de agua se lo realizara en forma intercalada un día se curaran los especímenes para la ruptura de 14 días y al otro los de 7, al concluir estos se curaran los de 4 días. Por la mañana se curaran las probetas, bloques de hormigón y por la tarde las vigas, eso por la falta de tiempo y capacidad de la cámara. Dicho tiempo de curado será de 6 horas donde 1.5 horas serán para el ascenso de temperatura, 3 horas para mantener la temperatura máxima y 1,5 horas para el descenso de temperatura.

1.5.2. Hipótesis

Como parte del método de este trabajo, se planteara la siguiente hipótesis para poder responder las preguntas de investigación:

- *El curado del hormigón a vapor de agua permitirá obtener mayores valores de resistencia a compresión y flexión en un menor tiempo que el curado convencional.*

1.5.3. Restricciones o limitaciones

En la presente investigación por falta de equipos en el laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S. no se realizarán los ensayos de acústica, térmica, resistencia a la helada, resistencia a la erosión.

1.5.4. Aporte académico

PROPUESTA DE MANUAL PARA EL ENSAYO DE CURADO CON VAPOR DE AGUA

OBJETO.- Aquí se describe la manera de realizar el curado con vapor de agua a los distintos especímenes de hormigón en laboratorio.

EQUIPO.-

1. Máquina de curado acelerado que consta de una cámara de vapor, cocinilla a gas y una hornilla.
2. Embudo.
3. Guantes.
4. Termómetro.

NUMERO DE ESPECIMENES.- Dependerán de la capacidad de la cámara de vapor pero por lo general se preparan por lo menos tres especímenes para cada variable que se requiera determinar.

CONSIDERACIONES.-

- Para mantener la temperatura y la humedad dentro de las cámaras de curado se utiliza vapor saturado de presión menor a la atmosférica.
- El vapor de agua tiene que rodear los especímenes de hormigón y nunca incidirá directamente sobre ellos.
- Las cámaras o recintos donde se realiza el curado, deben permitir la libre circulación del vapor entre los especímenes de hormigón y estarán construidas de forma tal que las pérdidas de humedad y de temperatura sean mínimas.

- El ciclo térmico a aplicar al hormigón para su curado a vapor, debe ser estudiado experimentalmente para demostrar que con los materiales elegidos, las proporciones calculadas para la mezcla, el hormigón alcanzara la resistencia de rotura (compresión o flexión) especificada. Dicho ciclo debe cumplir con las siguientes condiciones mínimas:
 - Antes de iniciar el curado a vapor, los especímenes de hormigón se dejaron estacionar al aire a una temperatura entre 10°C Y 30°C, durante un periodo mínimo de 3 horas.
 - El calentamiento y posterior enfriamiento de los especímenes de hormigón será gradual, y con una velocidad de aumento y disminución de la temperatura en la atmosfera de la cámara entre 33°C y 44°C por hora.
 - La temperatura máxima para el curado a vapor de agua será entre 70°C y 80°C, se mantendrá constante durante el tiempo necesario para alcanzar la resistencia de rotura requerida.
 - Una vez finalizado el ciclo de curado de vapor de agua, los especímenes de hormigón no se someterán a cambios bruscos de temperatura.

PROCEDIMIENTO.-

- ~ Se vacía el agua en la caldera, luego se cierra la válvula.
- ~ Se prende de la cocinilla a gas para que hierva el agua.
- ~ Se coloca los especímenes de hormigón en la cámara de vapor.
- ~ Cuando ya salga el vapor, se abre la válvula para que el vapor pase a la cámara de vapor.
- ~ Se cierra de la puerta de la cámara de vapor.
- ~ Se va controlando del aumento de la temperatura dentro de la cámara de vapor.
- ~ Una vez terminado el ciclo de curado de vapor se apaga la cocinilla.
- ~ Con la ayuda de los guantes se saca con cuidado los especímenes de hormigón de la cámara de vapor.

CONTROL Y RIESGOS DE OPERACIÓN

Siguiendo referencias sobre seguridad industrial se recomienda:

- Que el operador tenga cuidado al utilizar la cámara de vapor, cuando se abra la puerta de la cámara debe hacerlo de costado con el fin de evitar que todo el vapor le llegue al cuerpo, también la utilización de guantes para evitar quemaduras al maniobrar los especímenes de hormigón.

METODOLOGIA DE REGISTRO DE DATOS Y OBTENCION DE RESULTADOS

Para tener un mejor control en el proceso del curado con vapor de agua se recomienda utilizar las siguientes planillas:

PLANILLAS CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO DE CURADO DE VAPOR DE AGUA.

Incremento de temperatura= 33 - 44 ° C

Fecha=

Espécimen:

Hora	Temp. ° C

Espécimen:

Hora	Temp. ° C

PLANILLAS PARA LA RUPTURAS DE LOS ESPECIMENES

FLEXION

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	CARGA MAX. KN	FLEXION Kg/cm2
C.V. - 1		Curado a vapor		
C.V. - 2		Curado a vapor		
C.V. - 3		Curado a vapor		
C.C. - 1		Curado convencional		
C.C. - 2		Curado convencional		
C.C. - 3		Curado convencional		

PROMEDIO		Curado a vapor		
		Curado convencional		

COMPRESION

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. - 1		Curado a vapor		
C.V. - 2		Curado a vapor		
C.V. - 3		Curado a vapor		
C.C. - 1		Curado convencional		
C.C. - 2		Curado convencional		
C.C. - 3		Curado convencional		

PROMEDIO		Curado a vapor		
		Curado convencional		

NOTA.- En el ANEXO A-11 se muestra fotográficamente todo el proceso del curado con vapor de agua.

II

MARCO TEORICO

2.1. Hormigón

El hormigón es sin lugar a dudas uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo. Se define hormigón como: “Material que resulta de la mezcla de cemento , grava, arena, agua, eventualmente aditivos y adiciones en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia”.

Al unirse el cemento con el agua, se inicia un proceso químico denominado hidratación, del cual resulta el endurecimiento gradual del hormigón. Es importante destacar que este endurecimiento puede continuar indefinidamente en el tiempo bajo condiciones favorables tanto de humedad como de temperatura, lo cual se traduce en un aumento de la capacidad resistente del hormigón. Una de las propiedades más notables y por supuesto la más importantes de las muchas que tiene el hormigón es su resistencia, la que puede ser predeterminada y está directamente relacionada con la características de sus materiales componentes. Si se mezclan los materiales en las proporciones adecuadas, el hormigón puede soportar fuerzas de compresión elevadas. Su resistencia longitudinal es baja, pero reforzándolo con acero y a través de un diseño adecuado se puede hacer que la estructura sea tan resistente a las fuerzas longitudinales como a la compresión.

Otras de las características que han hecho del hormigón un material ampliamente utilizado en la construcción de diversas obras de ingeniería son:

- Facilidad de producción utilizando materiales de amplia difusión en cualquier país del mundo.
- Facilidad para conferir cualquier forma, gracias a la plasticidad que posee este en su etapa inicial.
- Posibilidad de prever y adaptar sus características a cualquier tipo de exigencia.
- Posibilidad de construcción utilizando recursos simples o complejos según la naturaleza de la obra.
- Buena durabilidad y resistencia a la corrosión, a condiciones ambientales desfavorables y al fuego.

2.1.1. Materiales componentes del hormigón

Los materiales componentes del hormigón son

a) Cemento

El cemento es un polvo finísimo de color gris que al ser mezclado con agua endurece tanto bajo el agua como al aire, por la cualidad de endurecer bajo el agua es definido como un conglomerante hidráulico, su velocidad de endurecimiento depende de la temperatura a la cual se esté trabajando.

b) Áridos.

Los áridos se pueden definir como el material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaños estables, ocupan entre el 65 y el 75% de volumen total de hormigón. Es de gran importancia su elección y control ya que de sus características dependerá la docilidad del hormigón fresco y la posterior resistencia que alcance una vez endurecido, también de sus condiciones dependerá la durabilidad de las estructuras y la economía de sus mezclas, en conclusión de sus características dependerá la calidad final del hormigón.

c) Agua.

La presencia del agua es imprescindible en la confección de los hormigones, ya que tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de mezclas, otorgándole trabajabilidad al hormigón fresco y como medio de curado en las estructuras recién construidas, proceso que consiste en lograr que el material disponga del agua que necesita el cemento para hidratarse y mantenerse en condiciones moderadas de temperatura. Como componente del hormigón convencional el agua representa aproximadamente entre el 10 y el 25% del volumen del hormigón recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice y de la docilidad que se requiera.

2.1.2. Propiedades del hormigón fresco

Si bien el hormigón fresco tiene solamente interés pasajero, debemos notar que el grado de compactación afecta, y seriamente, la resistencia del hormigón de proporciones de mezclas dadas. Por lo tanto, es vital que la consistencia de la mezcla, sea tal que el hormigón se pueda transportar, colocar, compactar y acabar con suficiente facilidad y sin segregación.

Entre las propiedades del hormigón fresco tenemos:

2.1.2.1. Consistencia

La consistencia es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse, varía por diversos factores entre ellos la cantidad de agua, tamaño máximo del agregado, granulometría y la forma del agregado. Existen varios procedimientos para su determinación entre los cuales tenemos: el cono de “Cono de Abrams”, “Mesa vibratoria”, etc.

De acuerdo a su consistencia los hormigones se clasifican en secos, plásticos, blandos, fluidos y líquidos.

Tabla N° 1.- Clasificación del hormigón según su Consistencia

Consistencia	Asentamiento con Cono de Abrams
Seca	0 – 2 cm
Plástica	3 – 5 cm
Blanda	6 – 9 cm
Fluida	10 – 15 cm
Líquida	≥ 16 cm

2.1.2.2. Docilidad

La docilidad puede considerarse como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación de que se dispone. Esta trabajabilidad está relacionada con la consistencia y la homogeneidad. La docilidad depende también de otros factores:

- La cantidad de agua de amasado, cuanto mayor sea este mayor será la docilidad.
- La granulometría, siendo más dóciles los hormigones cuyo contenido en arena es mayor. Por otra parte a más cantidad de arena fina corresponde más agua de amasado.
- La forma de los agregados, la docilidad en el hormigón es mayor con agregado redondeados que con agregados triturados.
- La docilidad aumenta con el contenido de cemento y con la finura de este.

2.1.2.3. Homogeneidad

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen distribuidos uniformemente en toda la masa. La homogeneidad puede perderse por segregación.

Entre los factores que hacen variar la homogeneidad del hormigón tenemos:

- Cantidad de agua de amasado.
- Tamaño máximo del árido grueso.
- Con las vibraciones o sacudidas durante el transporte del hormigón.

2.1.2.4. Peso específico

Es una propiedad de gran interés como índice de la uniformidad del hormigón fresco en el transcurso de ejecución de una obra, ya sea compactado o sin compactar. La variación de ambos repercute en la consistencia; indica una variación en la granulometría de los áridos, del contenido del cemento o del agua de amasado, por lo que debe dar lugar a correcciones oportunas.

2.1.3. Propiedades del hormigón endurecido

El hormigón experimenta un proceso de endurecimiento progresivo que lo transforma de un material plástico en un sólido, producido por un proceso físico – químico complejo de larga duración.

En esta etapa, las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los materiales componentes y de las condiciones ambientales a que estará expuesto durante su vida útil.

2.1.3.1. Peso específico

El peso específico del hormigón endurecido depende de muchos factores principalmente la naturaleza de los agregados, granulometría y método de compactación empleado.

El peso específico del hormigón será tanto mayor sea el de los agregados utilizados y mayor cantidad de agregado grueso contenga, bien clasificado y tanto mayor cuanto mejor compactado este. De todas formas las variaciones de peso específico del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos de $2,3 \text{ Tn/m}^3$ para hormigón armado.

2.1.3.2. Compacidad

La compacidad está íntimamente ligada al peso específico depende sobre todo del método de consolidación empleado. Estos métodos de consolidación tienen por objeto introducir en un volumen determinado la mayor cantidad de árido y al mismo tiempo

que los huecos dejados por estos se rellenen con la pasta de cemento eliminado por completo las burbujas de aire.

Una buena compacidad no solo proporciona una mayor resistencia mecánica (impactos desgaste, etc.) sino también una mayor resistencia física (helada) y química frente a los agentes exteriores.

2.1.3.3. Permeabilidad

El hormigón es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exteriormente, se produce escurrimiento a través de su masa.

Las medidas que pueden esbozarse para lograr un mayor grado de impermeabilidad son:

- Utilizar la razón agua/cemento más baja posible, compatible con la obtención de una trabajabilidad adecuada para el uso en obra del hormigón.
- Utilizar la dosis de cemento más baja posible, compatible con la resistencia y otras condiciones que establezcan las especificaciones del proyecto.

2.1.3.4. Resistencia

La resistencia del hormigón es el factor que se emplea habitualmente para definir su calidad. El hormigón, como material constituyente de un elemento estructural, queda sometido a las tensiones derivadas de las sollicitaciones que actúan sobre éste. Si sobrepasan su capacidad resistente se producirán fracturas, primero de origen local y posteriormente generalizadas, que podrán afectar la seguridad de la estructura.

Por este motivo, los elementos estructurales deben ser dimensionados de manera que las tensiones producidas no sobrepasen la capacidad resistente del material constituyente, lo cual muestra la importancia de conocer esta característica.

La resistencia se puede medir mediante ensayos a compresión, tracción directa, flexión y tracción indirecta. Aunque por lo general se emplea ensayos de ruptura a la compresión.

Algunos de los factores que influyen en la resistencia del hormigón son.

- La calidad del cemento.
- La calidad del agua.
- La calidad de los áridos.
- El uso de aditivos.
- El tiempo de amasado.
- La relación agua/cemento.

- Edad de ensayo.

2.1.4. Características mecánicas del hormigón

2.1.4.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi).

El ensayo universalmente conocido para determinar la resistencia a la compresión, es el ensayo sobre probetas cilíndricas elaboradas en moldes especiales que tienen 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se puede diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad, que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura.

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras.

2.1.4.2. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del hormigón. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de hormigón no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 x 6" de sección transversal y con una luz de como mínimo de tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa como el Modulo de Rotura (R) en libras por pulgada cuadrada (MPa) y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 carga en los puntos tercios.

El módulo de rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales dados y el diseño de la mezcla.

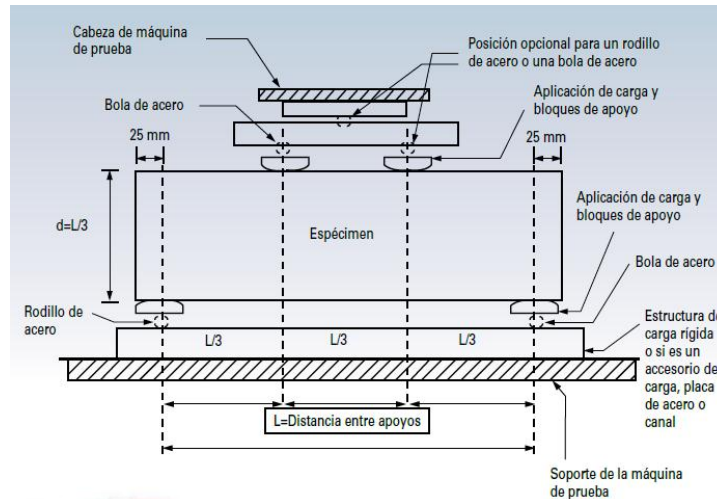


Figura N° 1: Aparato para la prueba de resistencia a la flexión con carga en los tercios del claro

2.1.5. Ensayos estándar en hormigón

2.1.5.1. Determinación de la consistencia del hormigón

Procedimiento.-

- ~ Se coloca el molde sobre una superficie plana no absorbente.
- ~ Se llena el molde en tres capas. Cada capa se apisona con 25 golpes de la varilla distribuidos uniformemente. Para la última capa se apisona y luego se empareja.
- ~ Después de llenar el molde con la mezcla se retira este con un movimiento vertical inmediatamente después se determina el asentamiento de la muestra con una regla en relación a la altura inicial.

2.1.5.2. Preparación y curado de especímenes en el laboratorio para los ensayos de Compresión y de Flexión.

Procedimiento.-

- ~ Los materiales se pueden mezclar ya sea manualmente o por medio de una mezcladora; la cantidad de hormigón que se prepare debe ser tal que sobre aproximadamente en 10% después de llenar los moldes.
- ~ La mezcla se hace en un recipiente de metal que no deje escapar el agua valiéndose de una pala.
- ~ Se mezcla el agregado fino con el cemento. Luego se agrega el agregado grueso y se mezclan estos materiales completamente.

- ~ Por último se agrega el agua y se mezcla los materiales hasta tener una mezcla homogénea de la consistencia deseada.

Preparación de especímenes para el ensayo de compresión

La superficie de los moldes y de la base metálica que entran en contacto con la muestra mientras fragua, deben ser ligeramente aceitadas.

El material se coloca dentro del molde en tres capas, cada una de las cuales debe tener 4" de espesor. Cada capa se apisona con 25 golpes de la varilla repartidos uniformemente.

Preparación de especímenes a flexión

La superficie de los moldes se aceita ligeramente, después de lo cual se deben colocar los moldes en una posición tal que sus ejes longitudinales queden en posición horizontal.

El hormigón se coloca dentro del molde con capas de 3" los cuales se deben compactar por medio de 50 golpes de varilla por pies cuadrado.

Curado del espécimen

Al cabo de 24 horas se sacan los especímenes de los moldes y se colocan en un cuarto en donde se dejan generalmente de 7 a 28 días.

2.1.5.3. Determinación de la Resistencia a la Compresión de cilindro de hormigón.

Procedimiento.-

- ~ Se coloca el cilindro en la máquina y se centra con relación a la placa superior, se pone la placa superior con el espécimen.
- ~ Se aplica la carga a un aumento constante y uniforme más o menos de 20 a 50 libras por pulgada por segundo.
- ~ Se aumenta la carga hasta que el espécimen falle. Se debe anotar esta carga máxima aplicada, lo mismo que el tipo de fractura del cilindro.

2.1.5.4. Determinación de la Resistencia del hormigón a la Flexión.

Procedimiento.-

- ~ Se coloca el espécimen en la maquina en posición horizontal, luego se baja la parte superior de la maquina hasta hacer contacto con el espécimen. Si el contacto entre los bloques de la máquina y espécimen son deficientes, se deben emparejar la viga hasta remediar esta situación. Se puede usar pasta de cemento y agua con este fin.

Cálculos.-

Cuando la ruptura ocurre en el tercio del medio de la luz del espécimen, el módulo de ruptura se calcula de acuerdo con las siguientes formula:

$$R = \frac{P * l}{b * d^2}$$

Siendo:

R= Modulo de ruptura.

P= Carga máxima aplicada en el ensayo.

l= Luz libre del espécimen.

b= espesor promedio del espécimen.

d= Altura promedio del espécimen.

Si la ruptura ocurre fuera del tercio central de la luz del espécimen y la distancia de la ruptura al tercio central no es más del 5% de la luz libre de la viga, el módulo de ruptura se calcula de acuerdo a la siguiente formula.

$$R = \frac{3 * P * a}{b * d^2}$$

Siendo:

a= la diferencia entre el sitio de la factura y el soporte más cercano, medida a lo largo de la línea del centro de la superficie inferior del espécimen

Si la ruptura ocurre fuera del tercio central y la distancia de ruptura al tercio central es más del 5% de la luz de la viga, los resultados deberán ser despreciados.

2.2. Estudio del cemento

Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedra, arena, ladrillo, bloques de construcción, etc. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer bajo o sumergidos en agua, en virtud de que experimentan una reacción química con esta y por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos.

2.2.1. Hidratación del cemento

Los cementos fraguan y endurecen al ser mezclados con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua. La hidratación del cemento es una reacción altamente exotérmica.

2.2.1.1. Calor de hidratación

En el curso de la reacción del cemento con el agua, o hidratación del cemento, se produce desprendimiento de calor porque se trata de una reacción de carácter exotérmico. Si el calor que se genera en el seno de la masa de concreto no se disipa con la misma rapidez con que se produce, queda un remanente que al acumularse incrementa la temperatura de la masa.

El calentamiento del concreto lo expande, de manera que posteriormente al enfriarse sufre una contracción, normalmente restringida, que genera esfuerzos de tensión capaces de agrietarlo. La posibilidad de que esto ocurra tiende a ser mayor a medida que aumenta la cantidad y velocidad de generación de calor y que disminuyen las facilidades para su pronta disipación.

2.2.2. Características Físicas y Mecánicas

2.2.2.1. Fraguado y proceso de endurecimiento

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

2.2.2.2. Determinación de la Finura

Referida al grado de molienda del polvo, se expresa por la superficie específica en m^2/kg , o por el residuo máximo en % retenido en el tamiz N° 200.

El porcentaje de molienda debe ser menor a 15% según la norma española RC-75 si no se cumple este porcentaje, el fraguado y el primer endurecimiento es más largo.

2.2.2.3. Peso específico

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa en esa masa.

El peso específico varía muy poco de un tipo de cemento a otro siendo su rango: $3\text{--}3,15 \text{ gr/cm}^3$.

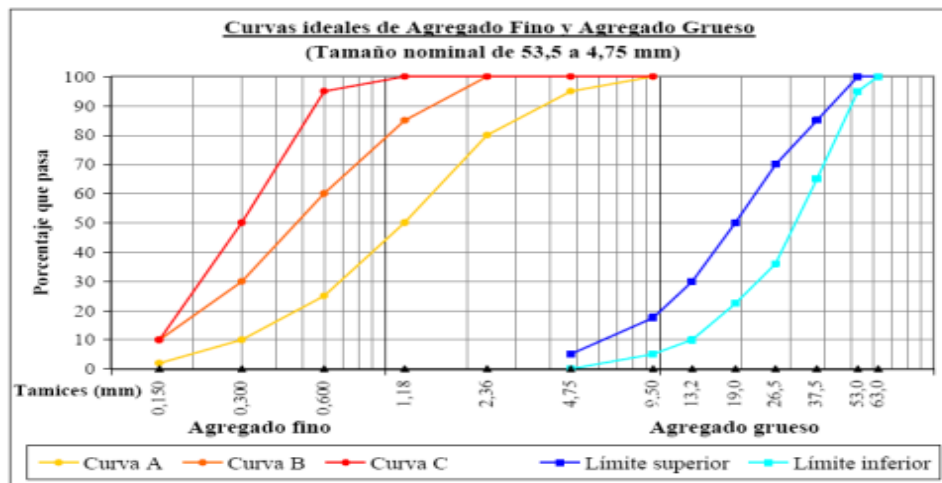
2.3. Estudio de los agregados

Porque al menos tres cuartas partes del volumen del hormigón están ocupados por agregados, no es de extrañar que la calidad de este sea de suma importancia. Los agregados no solo pueden limitar la resistencia del hormigón, puesto que agregados débiles no pueden constituir un hormigón resistente, sino además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento del hormigón.

2.3.1. Propiedades físicas de los agregados

2.3.1.1. Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado. Se determina por análisis de tamices, el tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre aberturas cuadradas.



Grafica N° 1: Zonas granulométrica IRAM – CIRSOC.

La granulometría de los agregados influye sobre:

- Trabajabilidad de la mezcla fresca.
- Resistencia mecánica.

- Resistencia a los agentes químicos.
- Economía.

De allí la importancia de lograr esqueletos granulares compactos. En general podemos afirmar que para cada tipo de obra existe una granulometría característica u óptima.

Granulometría del agregado grueso

El agregado grueso tendrá una granulometría continua y comprendida dentro de los límites que se establecen en la tabla 2. El agregado que no cumpla lo dispuesto anteriormente será rechazado.

Tabla N° 2.- Granulometría del agregado grueso.

Tamaño nominal (mm)	Porcentaje en masa, acumulado, que pasan por los tamices IRAM de mallas cuadradas									
	63,0mm	53,0mm	37,5mm	26,5mm	19,0mm	13,2mm	9,5mm	4,75mm	2,36mm	1,18mm
53 a 4,75	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
37,5 a 4,75	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
26,5 a 4,75	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
19,0 a 4,75	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
13,2 a 4,75	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
53 a 26,5	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
37,5 a 19,0	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
9,5 a 2,36	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Granulometría del agregado fino

El agregado fino tendrá una curva granulométrica continua, comprendida dentro de los límites que determinan las curvas A y B. El agregado fino de la granulometría especificada podrá obtenerse por mezcla de dos o más arenas de distintas granulometrías. Los porcentajes de la curva A indicados para los tamices 300 m y 150m, pueden reducirse a 5% y 0%, respectivamente.

La suma de las diez unidades puede comprender un solo tamiz o formarse por suma de unidades que exceden los límites de más de uno de los tres tamices mencionados. En obras de tipo corriente donde se realice control de calidad de hormigones en obra, podrán aceptarse arenas naturales que excedan la granulometría B, pero sin superar la granulometría C.

Tabla N° 3.- Granulometría del agregado fino.

Tamices	Porcentaje máximo que pasa, acumulado, en masa		
	Curva A	Curva B	Curva C
9,5 mm (3/8")	100	100	100
4,75 mm (N° 4)	95	100	100
2,36 mm (N°8)	80	100	100
1,18 mm (N° 16)	50	85	100
600 μm (N° 30)	25	60	95
300 μm (N° 50)	10	30	50
150 μm (N° 100)	2	10	10

Análisis Granulométrico de los agregados grueso y fino

a) Análisis sin lavado:

- ~ Se pone a secar la muestra en el horno a 105 °C, durante al menos 12 horas. se deja enfriar a temperatura ambiente y se pasa la cantidad requerida para la prueba.
- ~ Se coloca el juego de tamices desde el tamaño correspondiente al tamaño máximo hasta el tamiz 200 y al final la base.
- ~ Se agita el juego de mallas, horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes de vez en cuando. El tiempo de agitado depende de la cantidad de finos en la muestra, pero por lo general debe ser mayor a 15 minutos.
- ~ Se quita la tapa y se separa la malla, vaciando la fracción de suelo que haya sido retenida en ella, a las partículas que han quedado trancada entre los hilos de la malla no hay forzarlos a pasar, inviértase el tamiz y con ayuda de una brocha y se agrega a las anteriores.
- ~ Se pesa cuidadosamente la fracción de la muestra obtenida anteriormente, se pone en una capsula.
- ~ Se hacen las pesadas de las fracciones retenidas en cada malla y en la base del fondo, procediendo en la forma indicada. Todos los pesos retenidos se anotan en el registro.

b) Análisis con lavado:

~ Se vacía la muestra sobre el tamiz N° 200, con la ayuda del agua se lava lo mejor posible, para que las partículas finas pasen por la malla. Cuando el agua ya no sale sucia sino clara se coloca lo que se quedó retenido en el tamiz N°200 en un recipiente para llevarlo al horno para su secado. Después de 24 horas se pesa la muestra seca.

2.3.1.2. Peso específico y Absorción de agua

Debido a que el agregado suele tener poros permeables e impermeables como se muestra en la figura 2, será necesario definir con cuidado el significado de peso específico, ya que existen diversos tipos de pesos específicos.

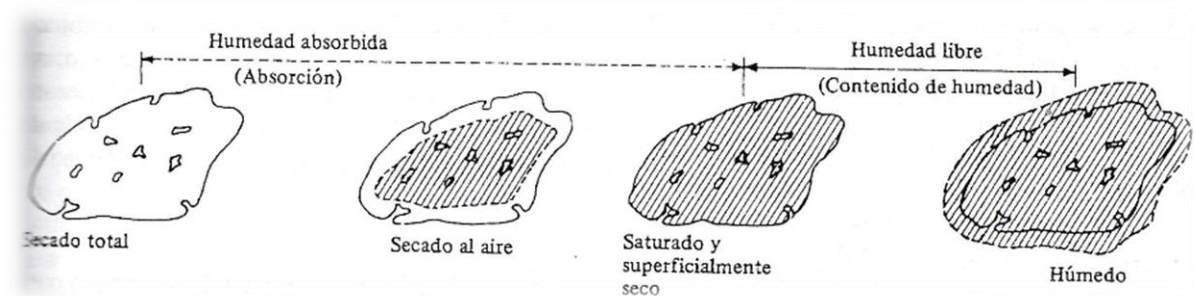


Figura N° 2: Representación diagramática de la humedad en el agregado.

Peso específico absoluto

Se refiere al volumen del material sólido que excluye todos los poros. Se define como la relación de la masa del sólido respecto de la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gases, tomadas ambas a una misma temperatura. Este valor no se lo requiere en trabajos de tecnología del hormigón.

Peso específico bruto en base a muestra Saturada y superficialmente seco

Esta referido al peso de una muestra S.S.S. dividida entre el volumen de la misma contemplando los poros.

Este es el peso específico que se determina con más frecuencia y que es necesario para calcular la cantidad de agregado que se requiere para producir un determinado volumen de hormigón; ya que el agua que contienen todos los poros no toma parte en la reacción química del cemento.

Peso específico bruto en base a muestra seca

Esta referido al peso de una muestra seca dividida entre el volumen de la misma contemplando los poros (permeables e impermeables).

Peso específico aparente

Si se considera que el volumen del solido debe incluir los poros impermeables, la palabra aparente califica el peso específico resultante; entonces este resulta: Peso seco/volumen partículas sólidas (incluyendo los poros impermeables).

Porosidad y absorción

La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro liquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad (permeabilidad) y su volumen total. En la práctica, lo que se mide para cuantificar la influencia de la porosidad dentro del agregado, su capacidad de absorción, ya que las partículas de los agregados pueden pasar por cuatro etapas como se ve en la figura 3.

La porosidad, es muy importante porque una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta o maciza, lo cual afecta no solo las propiedades mecánicas como la adherencia y la resistencia a compresión y flexión sino también propiedades de durabilidad.

Determinación de peso específico y absorción del agregado grueso

- ~ Se lava el material a fin de remover el polvo o cualquier impureza, luego se sumerge la muestra con agua por un periodo de 24 horas.
- ~ Se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie. Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.
- ~ Se obtiene después el peso de la muestra con sus partículas saturadas.
- ~ La muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina el peso de la muestra así sumergida.
- ~ Se seca la muestra en un horno a temperatura constante y luego se deja enfriar y se pasa.

Cálculos.-

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico en condiciones saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Siendo:

A= Peso de la muestra secada en horno, en gr.

B= Peso de la muestra saturada pero con superficie seca, en gr.

C= Peso de la muestra saturada dentro del agua, en gr.

Determinación de peso específico y absorción del agregado Fino

- ~ Se saca la muestra del recipiente y se seca de manera uniforme.
- ~ Con el fin de inspeccionar que tan seca esta la muestra se coloca en el molde cónico y luego se retira este. Si la muestra tiene todavía alguna humedad de la superficie ha sido eliminada, la arena redara libremente cuando se levanta el cono.
- ~ Por lo general si la arena rueda libremente la primera vez que se coloca el cono, esto es indicación de que la muestra ha sido secada más de lo necesario y que ha perdido su condición de saturada; por consiguiente se deberá rociar con agua y dejarla reposar por 30 minutos antes de volver a colocar en el cono.
- ~ Se colocan 500 gr. De la muestra en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope. Con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre sí mismo y luego se obtiene el peso del matraz lleno.
- ~ Se vacía el contenido del matraz en un recipiente y se pone a secar en el horno de temperatura constante y se pesa.

Cálculos.-

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{Peso específico en condiciones saturado y superficie seca} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

Siendo:

A= Peso en el aire de la muestra secada al horno, en gr.

V= Volumen del frasco, en ml.

W= Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco.

2.3.1.3. Peso unitario

Si el peso de una muestra de agregado, compuesta por varias partículas, se divide por el volumen que ocupa esas partículas agrupadas dentro de un recipiente unitario, se obtiene lo que se denomina como peso unitario del agregado o peso volumétrico.

$$PU = \frac{P}{V}$$

Dónde:

P= Peso seco del material

V= Volumen del recipiente

Peso unitario suelto (PUS)

El concepto de PUS es importante cuando se trata del manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que estos se hacen en estado suelto.

Peso unitario compactado (PUC)

El PUC es importante desde el punto de vista de diseño de mezclas ya que con el se determina el volumen absoluto de los agregados por cuanto estos van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del concreto.

Determinación del peso unitario de los agregados

Peso Unitario Compactado:

- ~ Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos. Luego por medio de la varilla se apisona uniformemente esta capa 25 veces. No debe golpear el fondo del molde.
- ~ Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde. Las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla teniendo en cuenta como guía el borde del molde.
- ~ Se pesa el molde junto con el agregado

Peso Unitario Suelto:

- ~ Se llena el recipiente de agregado hasta desbordar, dejando caer el agregado desde una altura no mayor de 5 cm. por encima del borde superior del recipiente. Se elimina el excedente del agregado con una regla. Luego pesamos del agregado en el recipiente.

2.3.2. Funciones de los agregados

El agregado dentro del hormigón cumple principalmente las siguientes funciones:

- ~ Como esqueleto o relleno adecuado para la pasta (cemento y agua) reduciendo el contenido de pasta en el metro cubico.
- ~ Proporciona una masa de partículas capaz de resistir las acciones mecánicas de desgaste que puedan actuar sobre el hormigón.
- ~ Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento, de humedecimiento y secado o calentamiento de las pasta.

2.4. Dosificación del hormigón

La dosificación de un hormigón tiene por objeto determinar las proporciones en que hay que mezclar los distintos componentes del mismo para obtener masas de hormigones que reúnan las características y propiedades exigidas en el proyecto.

Al dosificar un hormigón se tienen que tener en cuenta tres factores fundamentales: la resistencia, la consistencia y el tamaño máximo de los áridos. Estos factores están

relacionados con una variable que prácticamente determina las características finales de un hormigón; esta variable es la relación agua/cemento.

Existen varios métodos y reglas para determinar teóricamente las cantidades a mezclar de los componentes del hormigón, los cuales son orientativos, pues se basan en pruebas de laboratorio y de campo. Es por ello que las proporciones de mezclado definitivas se deben encontrar en base a ensayos de laboratorio, introduciendo luego en obra las correcciones necesarias.

Antes de dosificar una mezcla, se debe tener conocimiento de la siguiente información:

- ~ Los materiales.
- ~ El elemento a vaciar, tamaño y forma de las estructuras.
- ~ Resistencia a la compresión requerida.
- ~ Condiciones ambientales durante el vaciado.
- ~ Condiciones a la que estará expuesta la estructura

Método del A.C.I.

El método del American Concrete Institute (ACI) consta sintéticamente de los siguientes pasos:

- a) Selección de la resistencia requerida
- b) Selección del tamaño máximo y el tamaño máximo nominal de nuestro agregado
- c) Selección del asentamiento teórico.
- d) Selección del contenido de aire atrapado.
- e) Estimación del agua de mezclado, la cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón, requerida para producir un asentamiento dado depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y de la granulometría de los áridos, así como de la cantidad de aire incluido.
- f) Elección de la relación agua/cemento, sea por resistencia a compresión o por durabilidad. Los requerimientos de la relación agua/cemento se determinan no solo por los requerimientos de resistencia sino también por factores tales como la durabilidad y propiedades del acabado. Ya que los diferentes agregados producen resistencias distintas con la misma relación agua/cemento, es altamente

recomendable desarrollar las relaciones de resistencia versus relación agua/cemento para los materiales a usarse.

- g) Cálculo de la cantidad de cemento que se obtiene a partir de la relación agua/cemento y el contenido de agua. Si no obstante la especificación incluye por separado un límite mínimo de cemento además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en aquel criterio que conduzca a la mayor cantidad de cemento.
- h) Estimación de la cantidad de agregado grueso, los áridos esencialmente similares en granulometría y en tamaño máximo producirán un hormigón de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplee un volumen determinado de árido grueso y seco, compactado con varilla, por volumen unitario de hormigón.
- i) Calcular la suma de los volúmenes absolutos de todos los materiales sin considerar el agregado fino.
- j) Cálculo del volumen del agregado fino, este método se basa en el uso de los volúmenes de los componentes. En este caso, el volumen total de los componentes conocidos (agua, aire, cemento y árido grueso) se resta el volumen unitario de hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen que cualquier componente ocupa en el hormigón es igual a su peso dividido entre el peso específico de este material (siendo este último producto del peso unitario del agua y la densidad del material).
- k) Cálculo del peso en estado seco del agregado fino, conociendo el volumen y el peso específico del agregado fino se procede al cálculo del peso seco del mismo (no se considera la humedad que este contiene).
- l) Una vez obtenidos los pesos y volúmenes correspondientes a todos los componentes del concreto se hace dicha presentación tomando en cuenta que los pesos de los agregados son pesos sin agua, es decir sin tomar en cuenta que el agregado en su estado natural contiene cierta cantidad de humedad dentro de sus partículas.
- m) Después conocidos los porcentajes de humedad y de absorción que son datos conocidos de los agregados determinados mediante laboratorio, se procede a realizar las respectivas correcciones a los agregados tomando en cuenta la humedad

que estos contienen, y por último se hace la corrección de la cantidad de agua donde se toma en cuenta el porcentaje de humedad y absorción.

- n) Para después terminar con la presentación de los datos corregidos por el contenido de agua que contienen.

2.5. Curado del hormigón

El término curado del hormigón significa todos aquellos procedimientos dedicados a facilitar la hidratación del cemento. Los condicionantes básicos son el control del tiempo de curado, la temperatura y las condiciones de humedad inmediatamente después de la fabricación de la mezcla de hormigón.

Las especificaciones ASTM exigen que la probeta se deje en el molde durante las primeras 16 horas hasta un máximo de tres días, protegidos contra choques, vibraciones y deshidratación a temperaturas entre 16 °C y 27 °C.

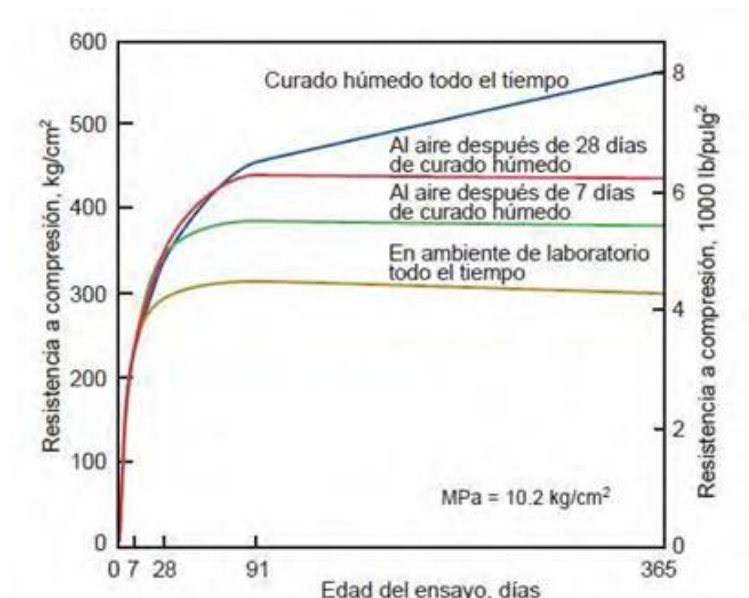
Las propiedades del hormigón, tales como la durabilidad frente a los ciclos de congelación y deshielo, resistencia mecánica, impermeabilidad, estabilidad volumétrica y resistencia al desgaste, mejoran con la edad mientras existan condiciones favorables para la continuidad del proceso de hidratación del cemento. Este mejoramiento crece rápidamente a edades tempranas y continúa, más lentamente, por un lapso indefinido, como muestra la gráfica N° 2, para la resistencia a la compresión. Dos condiciones se requieren para que tengan lugar tales mejoras: la presencia de humedad y una temperatura adecuada.

Cuando se interrumpe el curado húmedo, el aumento de resistencia prosigue por un corto período y luego se detiene, pero si el curado se reinicia la resistencia vuelve a incrementarse. Si bien esto puede realizarse en el laboratorio es difícil, en la generalidad de los casos, volver a saturar el hormigón en la obra. Los mejores resultados se obtienen mediante el curado húmedo continuo del hormigón desde el momento en que es colocado hasta que ha adquirido la calidad deseada.

Una evaporación excesiva de agua en el hormigón recién colocado puede retardar apreciablemente el proceso de hidratación del cemento a edad temprana. La pérdida de agua también provoca la retracción del hormigón, generando tensiones de tracción en la

superficie expuesta. Si estas tensiones se desarrollan antes que el hormigón haya alcanzado suficiente resistencia, pueden aparecer fisuras superficiales. Todas las superficies expuestas, incluyendo las de bordes y juntas, deben ser protegidas contra la evaporación.

La hidratación progresa muy lentamente cuando la temperatura del hormigón es baja. Temperaturas por debajo de los 10° C son desfavorables para el desarrollo de resistencias a edad temprana; debajo de los 4,5° C el aumento de resistencia a edades tempranas se retarda considerablemente y en las proximidades o debajo del punto de congelación hay muy poco o ningún aumento de la resistencia. De aquí se deduce que el hormigón debe ser protegido para mantenerlo a una temperatura adecuada para la hidratación del cemento y para evitar pérdidas de humedad durante el período inicial de endurecimiento.

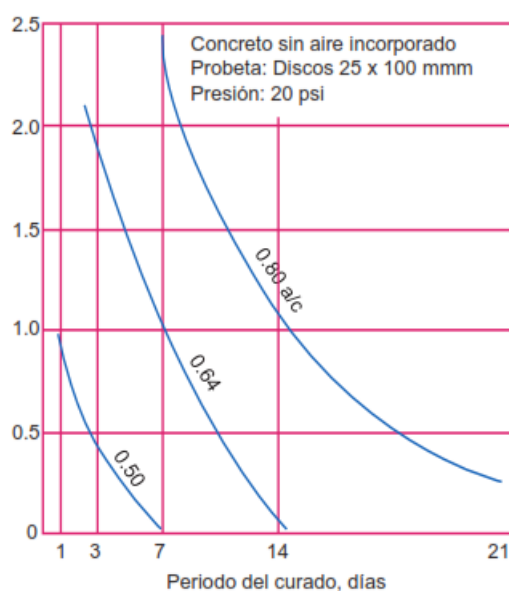


Grafica N° 2: Efecto de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto (Ginnerman y Shuman 1928).

Como se observa en la gráfica N° 2, el concreto cuando es sometido a un curado estándar, mediante inmersión completa y permanente en agua (línea azul). La resistencia aumenta considerablemente solo durante 28 días, a partir del día 28 el ritmo de aumento de resistencia es lineal y con una pendiente muy suave, es por esta razón que tradicionalmente se toma como resistencia máxima a la compresión f'_{ck} de las probetas de concreto a 28 días. Es importante recordar que el período de curado igual a 3 días permite únicamente

alcanzar el 75 – 80 % de la resistencia potencial a 28 días que se podría alcanzar con un curado húmedo continuo.

La grafica N° 3, muestra el comportamiento micro de morteros con respecto a una variable muy importante como es la permeabilidad, propiedad directamente relacionada con la durabilidad y resistencia a un ambiente agresivo, en función del tiempo de curado.



Grafica N° 3: Influencia del curado en la permeabilidad de probetas de mortero.

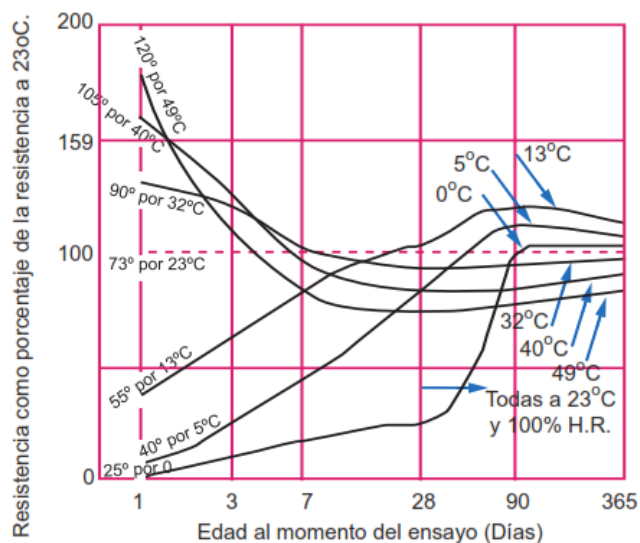
Nótese, en la gráfica N° 3, que entre mayor sea la relación agua/cemento mayor tiempo de curado es necesario para lograr el mismo nivel de permeabilidad.

Esto permite concluir que el nivel de llenado de los poros con productos de hidratación depende no sólo del grado de hidratación del cemento sino del volumen inicial de poros en la pasta. Así un concreto con baja relación agua/cemento requerirá un menor grado de hidratación para conseguir cierto nivel de porosidad deseado.

Para lograr la hidratación del cemento y que el concreto fragüe y endurezca, es necesario que la temperatura de la mezcla supere los 5°C, requerimiento que no es difícil de lograr en nuestro medio, pero que puede constituirse en todo un reto en ciertas aplicaciones (reparaciones de losas en cuartos fríos, colocación de concreto en alta montaña o en ciudades donde se presenten heladas) y, por supuesto, en países con estaciones.

Así como con bajas temperaturas los procesos de hidratación, endurecimiento y ganancia de resistencia se ven retardados, en climas cálidos estos procesos se aceleran. Mientras una mezcla curada a bajas temperaturas puede alcanzar a los 28 días una resistencia igual o mayor que la de diseño, en climas cálidos se genera un rápido desarrollo de resistencia inicial pero, si el proceso de curado es inadecuado o insuficiente, es factible que no se alcance la resistencia potencial del concreto.

La grafica N° 4 resume gráficamente lo expuesto anteriormente sobre la influencia del clima cálido y del clima frío en el desarrollo de la resistencia potencial de una mezcla de concreto.



Gráfica N° 4: Efecto de las condiciones de temperatura en el desarrollo de resistencia del hormigón.

La importancia de la humedad

Garantizar un contenido mínimo de humedad en el hormigón durante el período de curado es fundamental en el desarrollo de su estructura. Algunas investigaciones han comprobado que, por ejemplo, la resistencia se ve seriamente comprometida cuando la humedad relativa del hormigón es inferior a 80%. Por ello, el curado debe prevenir durante las primeras edades la evaporación del agua superficial, manteniendo el hormigón en una condición saturada o cercana a ella.

Sin embargo, en ciertos casos mantener el contenido de humedad en el hormigón no es suficiente. Se ha comprobado que en hormigones de baja relación agua-cemento (menor a

0.40) no sólo se debe evitar la evaporación de agua superficial, sino se requiere además proveer cantidades adicionales de agua de modo de asegurar la hidratación del cemento.

Es fundamental tener presente que el curado afectará especialmente la primera capa del elemento, probablemente los primeros centímetros de profundidad. Su importancia radica en que justamente esta parte del elemento es la expuesta a evaporación y cambios de humedad, fisuración por retracción plástica, acción de la intemperie, abrasión (desgaste), ataque de químicos y carbonatación, y a su vez esta misma zona es la que debe proveer de impermeabilidad al hormigón y protección a sus armaduras.

Razones para curar el hormigón

En sentido práctico curar el hormigón es garantizar las condiciones óptimas de humedad y temperatura necesarias para que el concreto desarrolle su resistencia potencial (compresión y flexión), se reduzca la porosidad de la pasta, en especial en el recubrimiento de concreto sobre las armaduras, haciendo que el ingreso de humedad y agresivos hacia el interior del elemento de concreto endurecido se vea disminuido garantizando, así, que la estructura cumpla con la vida útil de diseño requerida por el propietario.

Un adecuado y oportuno método de curado trae tantos y tan variados beneficios a una estructura de concreto, y puede ser tan sencillo de implementar, que no hacerlo es simplemente desperdiciar sus bondades.

El curado no sólo influye en la resistencia final del concreto, sino que disminuye la permeabilidad y mejora la resistencia de la piel de concreto al ingreso de gases (CO₂, Oxígeno), elementos necesarios, unos para despasivar el refuerzo y los otros para causar corrosión. Un buen y oportuno curado aumenta la resistencia a la abrasión de pisos de concreto, vías y obras hidráulicas, reduce la posibilidad de aparición de grietas por contracción plástica, y, aunque no la puede evitar, retarda la contracción de secado haciendo que se desarrolle a una edad de la estructura tal que la resistencia mecánica, especialmente a tensión, haya alcanzado un nivel suficientemente alto para que pueda contribuir, en unión con la armadura, a controlar el agrietamiento.

Métodos de curado.

Inicialmente, los compuestos de curado surgieron por la necesidad de reemplazar la práctica de mojar la superficie con agua, en zonas donde el agua era escasa y por lo tanto, cara. La característica más importante de un compuesto de curado es su capacidad para proteger el contenido de humedad dentro de la mezcla, pero existen otras propiedades, tales como aporte a la resistencia al desgaste de la superficie, adherencia a recubrimientos, dureza, aunque éstas pueden ser difícilmente identificables dado que dependen mayormente de otras propiedades del hormigón. En general, el mejor compuesto de curado será aquel que retenga mejor la humedad.

Existen tres tipos de curado

- Los que mantienen la presencia de humedad, como es el curado con agua.
- Los que aceleran el desarrollo de resistencia, proporcionando calor y humedad, como es la aplicación de vapor.(los cuales forman parte de esta investigación)
- Los que previenen la pérdida de humedad, como las membranas de curado y los retardadores de evaporación.

2.5.1. Tiempo de curado

Siempre habrá discusión sobre qué tanto debe prolongarse el curado de una estructura. No existe una única respuesta para este interrogante. Los materiales ligantes han cambiado en los últimos años de una manera dramática, el uso extensivo de adiciones al cemento y al concreto se ha vuelto común, la finura de los cemento se ha incrementado para recuperar parte de la resistencia inicial que se pierde por el empleo de una gran cuantía de adición puzolánica. La fisuración del concreto ha aumentado también en la actualidad, probablemente por deficiencias en el curado, por la implementación de sistemas constructivos industrializados con muros muy esbeltos y sensibles a la evaporación del agua, así que la lucha para conseguir un concreto con un desarrollo de resistencia “normal” ha hecho que se mire de nuevo hacia el curado adecuado del concreto y se insista en las obras de que un buen concreto puede echarse a perder, definitivamente, debido a malas prácticas de curado.

Desde hace ya varias décadas se aconsejaba que a un concreto de resistencia normal (21 a 35 MPa a 28 días) se le diera un tiempo mínimo de curado 7 días. En cierta forma esto coincide con la especificación actual que dice que un concreto de resistencia normal debe curarse hasta que complete el 70% de la resistencia a compresión especificada. Sin embargo estas especificaciones parten de la convicción de que, en las condiciones de obra, la estructura curada como se especifica completará la hidratación del cemento y se alcanzará la resistencia especificada a los 28 días.

Secuencia del curado y duración de las diferentes etapas

El ACI 308 R hace referencia a que, debido a las fases por las cuales atraviesa el concreto desde su confección hasta que la estructura alcanza las propiedades de diseño, deben diferenciarse tres tipos diferentes de acciones de curado en el tiempo. Las cuales se aplicarán en conjunto o selectivamente a una estructura dependiendo de las condiciones específicas del trabajo.

Estas tres acciones de curado son:

Curado inicial: procedimiento implementado una vez el afinado o acabado del elemento se ha terminado y que tiene por finalidad evitar la pérdida de humedad de la superficie.

El curado inicial es aplicable a mezclas con muy poca exudación o que no exuden, o en el caso de ambientes que promuevan una gran evaporación del agua de la superficie del concreto, o cuando se da una combinación de estas dos circunstancias, el secado de la superficie (apariencia mate) puede empezar antes de que el concreto presente fraguado inicial y antes de que el afinado se haya completado. Se hace necesario entonces impedir aquí la pérdida de humedad del concreto mediante la aplicación de una niebla húmeda (aumenta la humedad relativa y disminuye la tasa de evaporación), la aplicación de retardadores de evaporación y el uso de elementos que modifiquen las condiciones climáticas en el sitio, tales como: sombra, barreras de viento y cerramientos.

Curado intermedio: procedimiento de curado a implementar cuando el afinado del concreto se termina pero aún no se ha presentado fraguado final. Durante este período puede ser necesario disminuir la evaporación, pero el concreto no está aún en condiciones de recibir la aplicación directa de agua, ni de soportar el daño mecánico producido durante la instalación de cubiertas plásticas, lonas, papel impermeable o algún otro material de

protección. En estas condiciones la aplicación de membranas de curado, rociando un compuesto curador con fumigadora, es de gran utilidad para impedir la evaporación, mientras el concreto fragua y permite realizar medidas de curado complementarias.

Curado final: Medidas de curado que se llevan a cabo concluido el afinado del concreto, una vez éste ya ha presentado fraguado final y ha comenzado el desarrollo de resistencia. El curado final debe empezar a aplicarse a medida que se va afinando cierta área de una losa, por ejemplo, ya que terminar de afinar para empezar a curar puede constituir una demora injustificada que se puede traducir en gran pérdida de agua del concreto en aquellas zonas afinadas más temprano.

2.5.2. El curado del concreto y su influencia en la contracción plástica

La contracción plástica del concreto es la causa más frecuente de fisuración por mapeo de losas de concreto de piso y pavimentos. Afecta principalmente a los elementos laminares, donde hay una gran área expuesta. Se origina este fenómeno por la desecación superficial del concreto cuando la evaporación de agua es mayor que el aporte que hace la exudación a la superficie del concreto.

El fenómeno puede tener mayor probabilidad de ocurrencia en concretos con baja relación agua/cemento ($a/c < 0,45$), ya que mezclas con relaciones altas exudan mucho “protegiendo” el concreto. Uno se sentiría tentado entonces a usar, para elaborar pavimentos, mezclas con alta relación agua/cemento, pero esto no es una solución pues aunque pueda controlar la contracción plástica, genera muchos e importantes inconvenientes: son mezclas muy porosas, desarrollan baja resistencia mecánica, serán permeables, poco resistentes a la abrasión y poco durables.

Más bien, cuando se tenga mezclas de baja relación agua/cemento se debe estar muy atentos a ellas desde el comienzo y diseñar una buena estrategia de curado húmedo, seguido de alguna protección superficial (curadores de membrana, telas húmedas o una combinación de estos dos).

En concreto con muy baja relación agua/cemento y de muy baja exudación (ausencia de capilares y por ende de agua capilar que ascienda a la superficie) se puede presentar una resequedad superficial muy grande, debe entonces aportarse agua desde el exterior, que recupere el nivel de humedad de la superficie, refrigere y evite el agrietamiento. La

aplicación de un curado inicial húmedo dará como recompensa una superficie resistente, sin grietas. El uso de retardadores de evaporación es también recomendado y se complementa con la aplicación de compuestos curadores, que se encargarán del curado posterior. La aplicación posterior de agua es recomendada para mantener baja temperatura en el concreto y alta humedad en el ambiente.

2.5.3. Efectos de un mal curado

Agrietamiento superficial

Los efectos que tiene una evaporación excesiva de agua son negativos para los resultados futuros del hormigón. El ejemplo más claro son las grietas visibles en hormigones adultos. A pesar de que la pérdida de agua no es la principal razón de esta falla, no es tampoco la menos importante.

Debido a las tensiones que provoca la evaporación, originadas por las capas con mayor contenido de agua y aquellas con menor contenido, existe la posibilidad que la superficie de hormigón se agriete. Mientras más rápida sea la evaporación, mayores serán las tensiones, y por lo tanto, las grietas. En el futuro, las grietas darán pie a otras fallas funcionales tales como baches, fisuras que atraviesan la losa, etc.

Permeabilidad superficial y absorción

La porosidad de un hormigón se debe a los capilares que se forman durante el proceso de hidratación. En el inicio, la porosidad alcanza su valor más alto y va disminuyendo a medida que el hormigón se endurece. Los dos factores que más influyen en la porosidad son la relación A/C y la cantidad de cemento hidratado. Mientras mejor sea el curado del hormigón, la hidratación del cemento será mayor.

Durabilidad del hormigón

Se entiende por durabilidad del hormigón la capacidad de protección en el tiempo frente a agresiones de tipo física o química, tanto de sí mismo como de estructuras que cubra, tales como armaduras. Específicamente, debe poder protegerse de las heladas y deshielos, ataque de cloruros y sulfatos, proteger las estructuras en su interior de la corrosión, etc.

El efecto del curado sobre la durabilidad se puede ver a través de la permeabilidad (capacidad de absorción), ya que mientras más permeable sea el hormigón, más expuesto estará a ataques físicos o químicos. Se ha demostrado que mientras más largo sea el

período de curado, el ingreso de sustancias dañinas para el acero, como cloruros o dióxido de carbono, comienza más tarde y por lo tanto, la corrosión de las barras que se encuentran en el interior de un hormigón armado demora más tiempo. Es decir, la protección que presenta el hormigón frente a ataques dañinos para el acero aumenta utilizando un curado que dure más tiempo, o un curado que sea más eficiente.

2.6. Curado por Inundación o Inmersión:

En superficies tales como las de los pavimentos, veredas y pisos, puede recurrirse al curado por inundación. Diques de tierra o arena dispuestos sobre el perímetro de la superficie a curar, retienen el agua dentro de ella, formando un estanque. Además de constituir un método eficiente para evitar pérdidas de humedad en el hormigón, el curado por inundación es también efectivo para mantener a aquél a una temperatura uniforme. Sin embargo la temperatura del agua de curado no deberá estar más de unos 11° C por debajo de la del hormigón para prevenir tensiones de origen térmico, que podrían fisurarlo. Como este método requiere considerable supervisión y mano de obra, frecuentemente no resulta práctico, excepto para pequeñas obras. El método de inundación no es recomendable cuando el hormigón fresco está expuesto a temperaturas de congelación.

El método de curado húmedo más efectivo, aunque raramente usado, consiste en la total inmersión en agua del elemento de hormigón terminado. Este método ha sido usado con cierta frecuencia en la industria de la prefabricación, pero su uso es más común para el curado de probetas de hormigón en laboratorio. Cuando es importante mantener la apariencia superficial, el agua a usar para el curado, por inundación o inmersión, deberá estar libre de sustancias que puedan manchar o decolorar el hormigón.

Los especímenes deben retirarse de los moldes, de preferencia a las 24 horas, pero se permite un margen entre las 20 y 48 horas después de elaborados.

Transcurriendo este tiempo procede a transportarlos al laboratorio a una condición húmeda hasta el momento del ensayo. La condición húmeda se refiere a contar con una humedad relativa entre el 95 y 100 %, con temperatura de 23 +/- 2 ° C.

2.7. Curado Acelerado

Actualmente en la construcción, se evidencia, que el ritmo de colocación de hormigón ha aumentado. Por ejemplo edificios que tiempo atrás, demoraban años en completarse ahora se realizan solo en cuestión de meses, esto genera que esperar roturas a los 28 días e incluso 7 días para evaluar si un determinado concreto cumple con los requerimientos exigidos en resistencia, es demasiado tiempo.

Por lo dicho anteriormente es necesario un método que permita de manera temprana, proyectar la resistencia a edades mayores. Es por esta razón que resulta útil someter el hormigón a un curado acelerado, ya que ayuda a la obtención de los valores de resistencia a la compresión del hormigón, en un menor tiempo, lo cual permite tomar acciones de corrección y control tempranas, permitiendo optimizar el tiempo de reacción para realizar correcciones en la dosificación o diseño de mezcla.

2.7.1. Ventajas y limitaciones

La ventaja principal del curado acelerado es básicamente la obtención de manera rápida y confiable de información para poder proyectar valores de resistencia a la compresión a 28 días, utilizando valores de resistencia a la edad de 1 día con una aceptable confiabilidad.

Los resultados obtenidos del aceleramiento de resistencia también pueden ser utilizados para conocer la variabilidad de la resistencia del concreto que está siendo colocado en obra (control de calidad), esto nos permite realizar las correcciones pertinentes en el diseño o dosificación del concreto. Los datos de resistencia obtenidos mediante la aplicación de este curado acelerado tiene la misma variabilidad que las resistencias obtenidas con el curado tradicional.

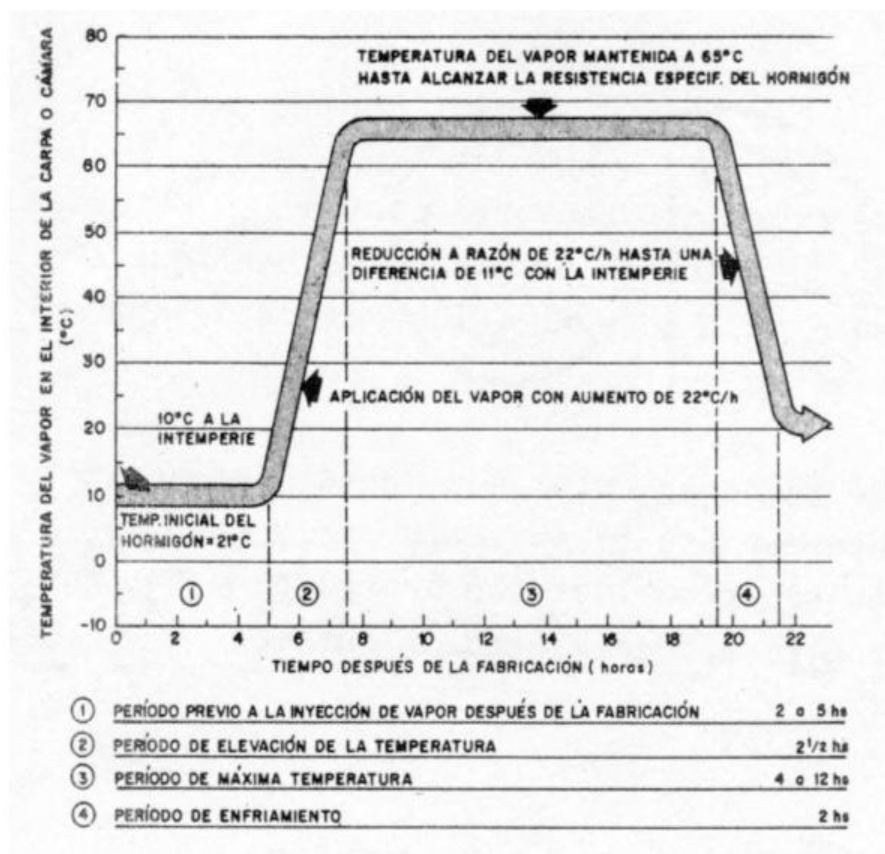
Además según investigaciones difundidas por el American Concrete Institute (ACI) es muy probable que en un futuro se utilicen los curados acelerados conocidos como “One Day Test” para la aprobación del concreto en obra y no esperar 28 días como sucede en la actualidad.

Otra ventaja que se puede considerar en el uso del curado acelerado es el ahorro de espacio en la poza de curado (método estándar), ya que cuando se trabajan con volúmenes considerables de concreto, el número de muestras (probetas) obtenido es considerable.

La limitación que podemos encontrar en la realización del curado acelerado, es que se requiere cierto nivel técnico del personal, además de la implementación o compra de una máquina de curado acelerado.

2.7.2. Curado con vapor de agua a presión atmosférica

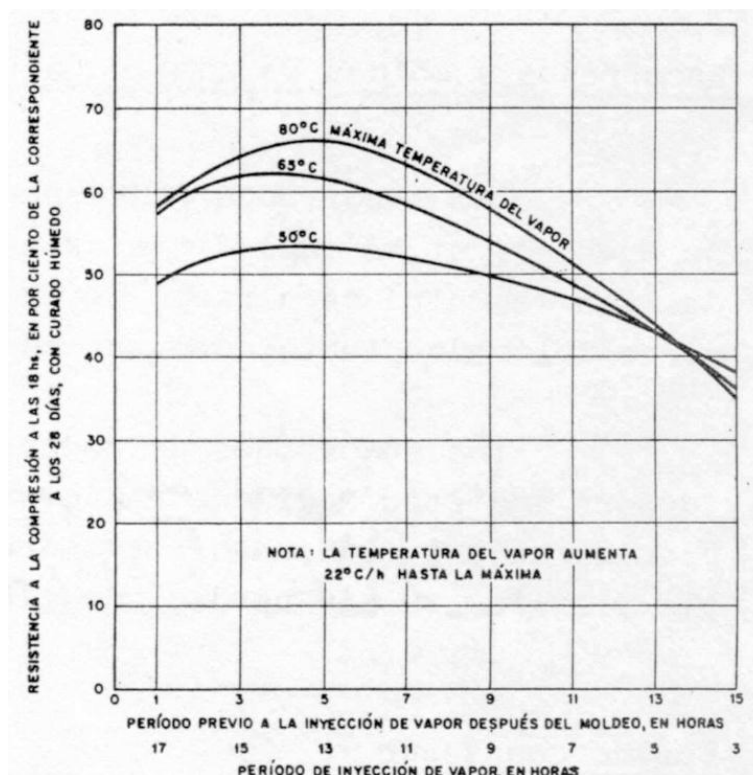
Debido a que un aumento en la temperatura de curado del hormigón aumenta su rapidez de desarrollo de resistencia, la ganancia de resistencia se puede acelerar mediante el curado del hormigón en vapor de agua. Cuando el vapor de agua está a presión atmosférica, es decir debajo de 100°C, el proceso se puede considerar como un caso especial de curado en el cual la atmosfera saturada de vapor asegura el abastecimiento de agua.



Grafica N° 5: Ejemplo de un ciclo típico de curado con vapor a presión atmosférica.

El objetivo primordial del curado con vapor de agua es obtener una resistencia temprana suficientemente alta para que los productos de hormigón se puedan manejar pronto, antes que en el caso del curado ordinario de humedad, y que requiera menos espacio de

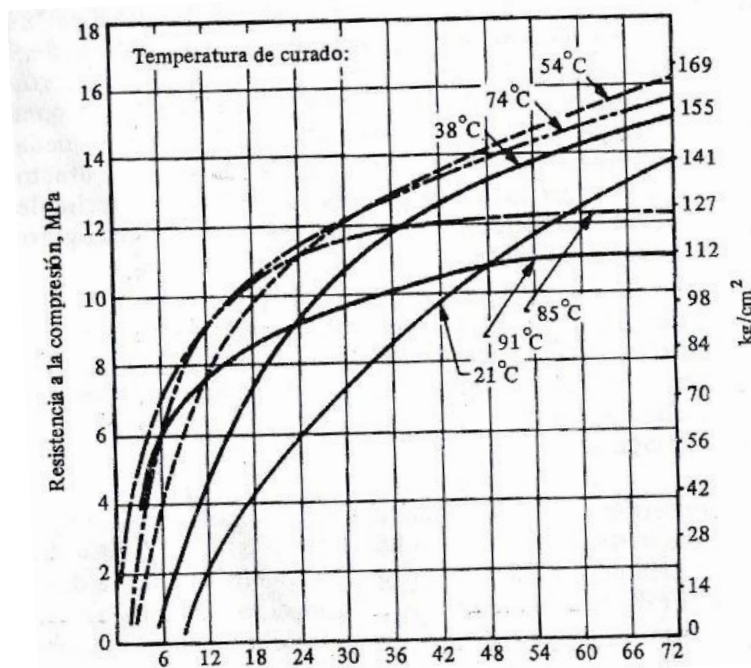
almacenaje para el curado, todo esto significa una ventaja económica. Para muchas aplicaciones, la resistencia del hormigón a largo plazo es de importancia menor.



Grafica N° 6: Relación entre la resistencia a 18 horas y el período previo a la introducción del vapor, para varias temperaturas de vapor. En cada caso dicho período más el suministro de vapor totaliza 18 hrs.

A causa de la naturaleza de las operaciones que comprenden el curado con vapor de agua, el proceso se utiliza principalmente en productos prefabricados.

A causa de la influencia de la temperatura durante las etapas tempranas de endurecimiento sobre la resistencia posterior, se tiene que llegar a un compromiso entre las temperaturas que dan una resistencia temprana alta y una resistencia posterior alta. La grafica 7 muestra valores típicos de resistencia de hormigón hecho con cemento modificado, el curado con vapor de agua se aplicó inmediatamente después de colar. Se observó regresión de resistencia a largo plazo.



Grafica N° 7: Resistencia del hormigón curado con vapor a diferentes temperaturas (relación agua/cemento = 0.50; curado con vapor aplicado inmediatamente después del colado del hormigón).

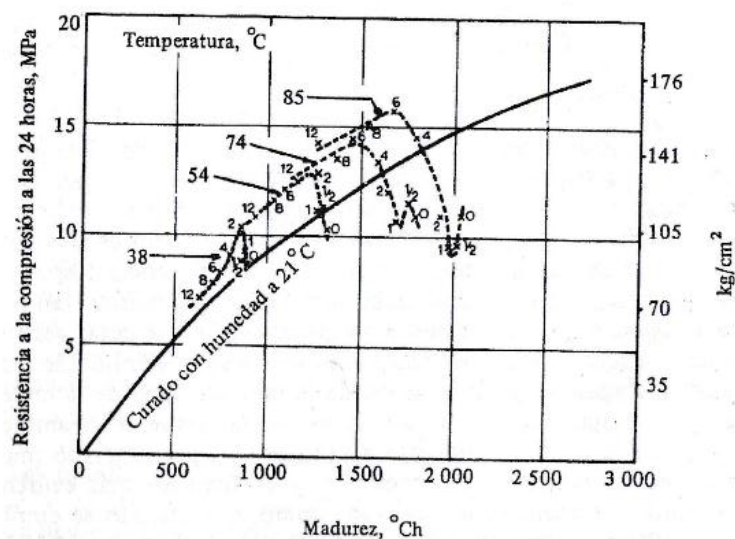
Una explicación probable, posiblemente parcial, de la reducción de la resistencia a largo plazo del hormigón curado con vapor de agua reside en la presencia de grietas muy finas causados por la expansión de burbujas de aire en la pasta de cemento; la expansión térmica del aire es la menos de dos órdenes de magnitud mayor que el material sólido que está a su alrededor. Estos esfuerzos pueden inducir grietas muy finas. Por lo tanto, no estamos tratando estrictamente con una pérdida de resistencia a largo plazo sino con una pérdida en todas las edades. Sin embargo, hasta la edad de 28 días, esta pérdida está enmascarada por los efectos benéficos que tiene sobre la resistencia una temperatura más alta durante el curado.

Los efectos destructores de la expansión de burbujas de aire se puede reducir con un periodo prolongado de retraso antes del curado (durante el cual aumenta la resistencia de tensión del concreto) o por una rapidez más baja de elevación de la temperatura (a medida que se iguala el aumento en la presión de aire con un aumento en la resistencia de la pasta de cemento que esta alrededor). En forma alterna, se puede usar calentamiento en cimbra cerrada o en cámaras de presión. Con periodos de curado de corto plazo (dos a cinco

horas) y temperaturas moderadas, hay probablemente poca regresión real de resistencia, y la aparente baja resistencia en edades posteriores se debe a la ausencia de curado húmedo prolongado.

Para reducir al mínimo la regresión a largo plazo de la resistencia, se deberán controlar dos aspectos de un ciclo de curado con vapor: el retraso del comienzo del calentamiento y la rapidez de elevación de la temperatura.

Puesto que es la temperatura en el momento del fraguado la que tiene mayor influencia sobre la resistencia en todas las edades, es ventajoso un retraso en la aplicación del curado con vapor. En la gráfica 8, graficada por Saul a partir de los datos de Shideler y Chamberlin, se pueden obtener alguna indicación respecto a la influencia de la demora en el calentamiento sobre la resistencia. La línea sólida muestra una ganancia de resistencia del hormigón curado con humedad a temperatura ambiente graficada contra la madurez. Las líneas punteadas se refieren a diferentes temperaturas de curado entre 38 y 85°C, y la cifra junto a cada punto denota la demora en horas antes de que la temperatura de curado más alta se aplique súbitamente.



Gráfica N° 8: Efecto del retraso en el curado con vapor sobre la adquisición temprana de resistencia debido a la madurez.

En la gráfica 8 se pueden ver, en cada temperatura de curado, una parte de la curva que muestra una rapidez normal de ganancia de resistencia con la madurez. En otras palabras, después de una demora suficiente, el calentamiento rápido no tiene efecto adverso. Este

retraso es de aproximadamente de 2, 3, 5, y 6 horas, respectivamente para 38, 54, 74 y 85°C. Sin embargo, si el hormigón se expone la temperatura más alta con un retraso menor, la resistencia es afectada adversamente, como se muestra por la proporción derecha de cada curva punteada; este efecto es tanto más serio cuanto más lenta es la temperatura de curado. Sin un periodo de retraso, la pérdida de resistencia de 28 días del concreto con una relación agua/cemento de 0.50, curado con vapor de agua a 75°C, puede ser hasta un 40%.

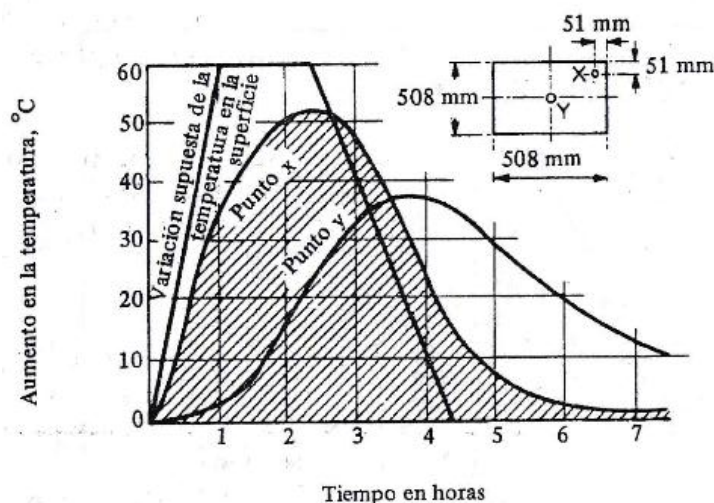
La longitud deseable del periodo de retraso (cuando la temperatura ambiente deberá igualar la del hormigón) depende del tamaño y de la forma de los elementos de hormigón que se están curando con vapor, del contenido de agua del hormigón y del tipo de cemento; cuando la rapidez de endurecimiento es lenta, el retraso deberá ser más grande. También se ha de controlar la rapidez subsecuente de elevación de temperatura, lo que depende de la naturaleza de las unidades de concreto, para evitar el desarrollo de altos gradientes de temperatura en el hormigón. Es necesaria una solución por ensayo y error. ACI 517.2R-87 recomienda que la rapidez varíe entre 33°C por hora para unidades pequeñas y 11°C por hora para unidades grandes. La rapidez de elevación de temperatura tiene poco efecto sobre la resistencia a largo plazo, pero la temperatura máxima es un factor importante: una temperatura de 70 a 80°C da por resultado una reducción en la resistencia de 28 días de casi 5%.

Al periodo de curado de vapor de agua a la temperatura máxima sigue el enfriamiento. Este puede ser rápido en el caso de unidades pequeñas, pero en unidades grandes, el enfriamiento rápido puede conducir al agrietamiento superficial. Un curado húmedo suplementario puede ser provechoso para impedir el secado rápido y mejorar el aumento subsecuente de la resistencia. El hormigón con una relación agua/cemento menor responde al curado con vapor de agua mucho mejor que una mezcla con una relación de agua/cemento mayor.

En resumen, un ciclo de curado está compuesto por un periodo de retraso, también conocido como periodo de pre fraguado, un periodo de elevación de temperatura y un periodo de enfriamiento, seguido posiblemente por un curado húmedo. Se escogen ciclos prácticos de curado como un compromiso entre los requerimientos de resistencia

tempranos y tardíos pero también están regidos por el tiempo disponible. Aunque los detalles de un ciclo óptimo de curado depende del tipo de producto de hormigón de que se trate, un ciclo satisfactorio típico estaría formado por lo que sigue: un periodo de retraso de dos a cinco horas, calentamiento a la razón de 22 a 44°C por hora hasta una temperatura máxima de 50 a 82°C, seguido de almacenaje a máxima temperatura, y, por último, un periodo de enfriamiento; el ciclo total excluido el periodo de retraso ocupa preferiblemente no más de 18 horas.

Los cambios de temperatura en el interior del hormigón sometido a curado no son los mismo que imperan en la superficie. El aumento de temperatura en el centro es más lento, pero lo mismo sucede con el enfriamiento. Así pues, el área que se localiza bajo la curva tiempo-temperatura es aproximadamente la misma para el interior que para los puntos cercanos a la superficie del bloque de hormigón, de tal manera que todas las partes del hormigón tienen la misma madurez. Ross demostró esto en la gráfica 9 muestra las curvas temperatura-tiempo calculadas para un bloque de hormigón sujeto a variaciones superficiales de temperatura, sin tomar en cuenta el efecto del calor de hidratación.



Grafica N° 9: Ejemplo de Ross del flujo en dos dimensiones del calor en hormigón con una difusividad de $0.0037 \text{ m}^2/\text{h}$.

Como información adicional podemos observar que, cuando se cura hormigón a altas temperaturas, el calor de hidratación evoluciona con rapidez, de manera que la temperatura aumenta aunque se trate de especímenes pequeños. Por otra parte, cuando se

cura a temperatura normal, el calor de hidratación es significativo únicamente en estructuras de gran tamaño.

2.7.3. Cámaras de curado a vapor

La empresa CCI viene desarrollando desde 1967, bajo la certificación AENOR, cámaras de simulación climática, entre las que se encuentran las cámaras de ensayos de materiales de construcción y de curado de probetas de hormigón. A este respecto es de destacar que CCI ha desarrollado este tipo de cámaras para el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), laboratorios de calidad de la edificación, etc., entre otras entidades relevantes y empresas diversas.



Fotografía N° 1: Cámara del vapor.

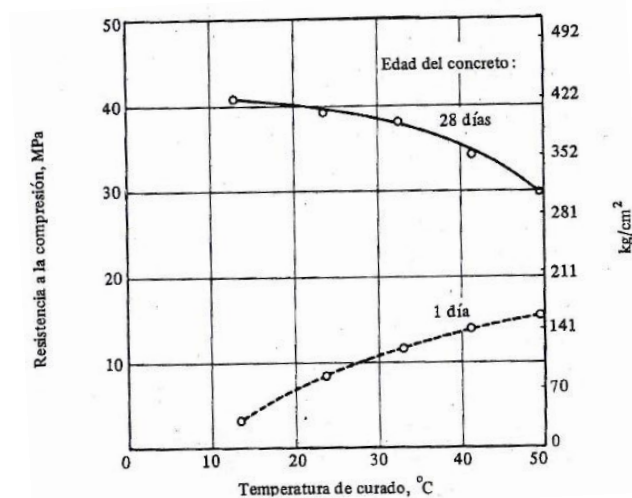
2.8. Influencia de la temperatura temprana sobre la resistencia del hormigón

Una elevación de la temperatura de curado acelera las reacciones químicas de hidratación y afecta así en forma benéfica la resistencia temprana del hormigón sin ningún efecto negativo sobre la resistencia posterior. La alta temperatura durante el contacto inicial y la que sigue después entre el cemento y el agua reduce la longitud del periodo latente, de modo que la estructura global de la pasta de cemento hidráulico llega a establecerse muy temprano.

Aunque una temperatura elevada durante la colocación y el fraguado aumenta la resistencia muy temprano, puede afectar adversamente la resistencia desde alrededor de los 7 días en adelante. La explicación es que una rápida hidratación inicial parece formar

productos de una estructura física más pobre, probablemente más porosa, de modo que una proporción de los poros siempre permanecerá sin llenar.

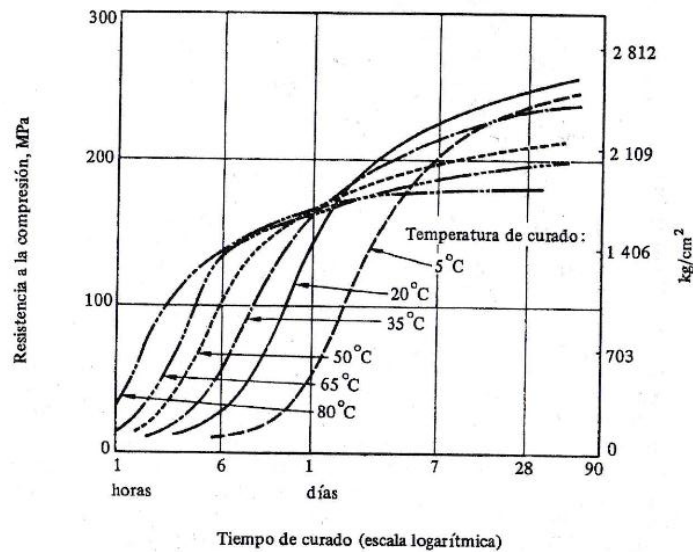
Esta explicación de los efectos adversos de una alta temperatura temprana sobre la resistencia posterior ha sido ampliada por Verbeck y Helmut, quienes sugieren que la velocidad inicial de hidratación a temperaturas superiores retarda la hidratación subsecuente y produce una distribución no uniforme de los productos de hidratación dentro de la pasta. La razón de esto es que, al producirse la alta rapidez inicial de hidratación, no se tiene tiempo disponible suficiente para la difusión de los productos de hidratación alejados de la partícula de cemento y para una precipitación uniforme en el espacio intersticial. Como resultado, se da una alta concentración de productos de hidratación en las cercanías de los granos de hidratación, lo cual retrasa la hidratación subsecuente y afecta en forma adversa a la resistencia a largo plazo.



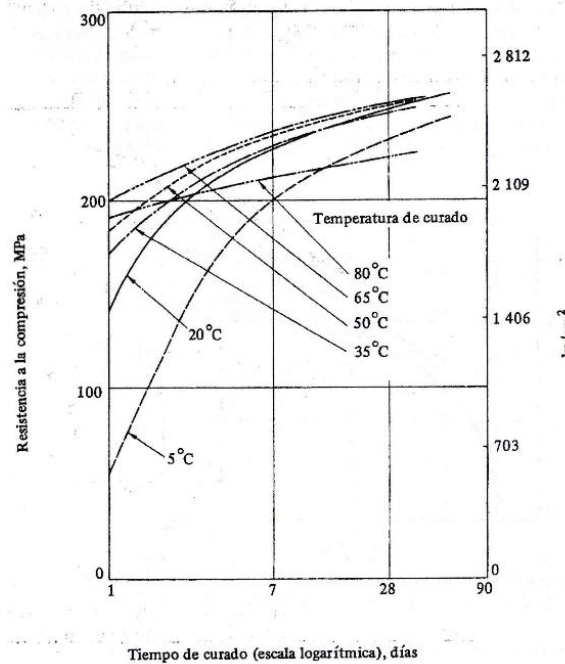
Gráfica 10: Influencia de la temperatura de curado en la resistencia a la compresión a 1 y 28 días.

La influencia de la temperatura de curado sobre la resistencia del hormigón a uno y 28 días se muestra en la gráfica 10. Sin embargo, la temperatura en el momento de las pruebas también parece ser un factor de importancia, al menos en el caso de las briquetas de pasta de cemento puro. La temperatura se conservó constante desde el inicio de la hidratación. Cuando se probaron los especímenes a la temperatura de curado (a los 64 y 128 días) presentaban una resistencia menor cuando la temperatura era más alta (gráfica 11) pero, si

se enfriaban a 20 °C durante un periodo de dos horas antes de la prueba, solo temperaturas superiores a los 65 °C surtían un efecto deletéreo (grafica 12).



Grafica 11: Relación entre la resistencia a la compresión y el tiempo de curado de los compactos de la pasta de cemento puro a diferentes temperaturas de curado.



Grafica 12: Relación entre la resistencia a la compresión y el tiempo de curado de los compactos de la pasta de cemento puro a diferentes temperaturas de curado. La temperatura de los especímenes fue moderada a 20 °C, a una velocidad constante (cemento tipo I).

También se han llevado a cabo pruebas con hormigón almacenado en agua a diferentes temperaturas durante un periodo de 28 días y, de ese momento en adelante a 23°C. Se describió que una temperatura más alta producirá una mayor resistencia durante los

primeros días posteriores al colado, pero después de una a cuatro semanas de edad, la situación cambia radicalmente. Todos los especímenes curados a temperaturas entre 4 y 23°C mostraron, hasta la edad de 28 días, una resistencia mayor que aquellos curados de 32 a 49°C.

En miembros de concreto con un contenido alto de cemento, como es el caso del hormigón de alto desempeño, hay una elevación considerable de temperatura hasta en elementos estructurales ordinarios tales como vigas y columnas. La resistencia a siete días es tanto más alta cuanto mayor es la elevación de la temperatura, por ejemplo, cuando la temperatura era de 20°C, la resistencia fue de 96 MPa; pero, cuando la temperatura máxima era de 75°C, la resistencia fue de 115 MPa. Sin embargo a 28 días, hubo una inversión de valores de resistencia, la baja temperatura condujo a una resistencia de 122 MPa, mientras que la temperatura alta condujo a una resistencia de 112 MPa.

Las temperaturas máximas entre 45 y 65 °C condujeron a un aumento ligero de resistencia entre edades de siete y 28 días.

Las pruebas descritas hasta aquí se hicieron en laboratorio o en condiciones conocidas, pero el comportamiento en obra en un clima cálido puede no ser igual.

2.8.1. Propiedades térmicas del hormigón

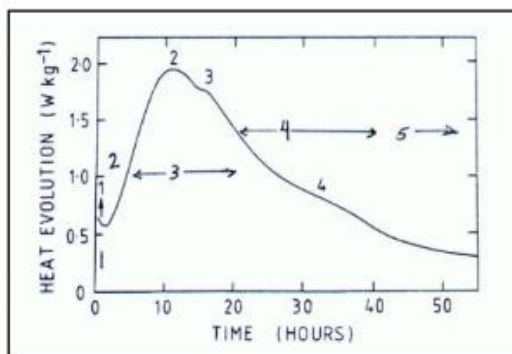
Calor de Hidratación

La hidratación de los compuestos del cemento involucra reacciones exotérmicas, es decir, son reacciones que generan calor y aumento de temperatura de un elemento de hormigón. El calor causa expansión y bajo condiciones de restricción pueden causar aumento de la tensión interna de la estructura, lo que aumenta el riesgo de agrietamiento térmico.

Durante todo este proceso de liberación de calor es cuando el hormigón fragua (empieza la rigidización de la pasta) y comienza a ganar resistencia. Si las condiciones de disipación son adiabáticas, el calor y *peak* de temperatura podría extenderse por varios días. Esta liberación de calor depende fuertemente del tipo y cantidad de materiales cementicios y de los aditivos que se utilicen en la mezcla.

Algunas investigaciones dividen en cinco etapas la hidratación de los compuestos del cemento Portland. Esta división se puede observar en la gráfica N° 13 y se caracteriza por

distintas fases de liberación de calor en el tiempo por unidad de masa de material cementicio.



Gráfica 13: Tasa de evolución de liberación de calor vs tiempo para cemento portland.

Etapa 1 - Reacción Inicial: Se caracteriza por tener una tasa alta de liberación de calor causada por la disolución inicial de productos. En esta etapa, la reacción de C_3A , H y CSH puede generar etringita, compuesto cristalino que con el paso del tiempo se deshace en la mezcla.

Etapa 2 - Período de Inducción: Después de la disolución inicial, la tasa de cambios químicos en el sistema se desacelera. La formación rápida de etringita disminuye a medida que la velocidad de reacción entre C_3A y CSH disminuye debido a una capa de etringita en las partículas de C_3A .

Etapa 3 - Aceleración: La tasa de liberación de energía comienza a aumentar durante esta etapa. La reacción principal que ocurre es la hidratación de C_3S para formar CSH y CH.

Etapa 4 - Desaceleración: La hidratación del C_3S disminuye considerablemente, y domina la de C_3A .

Etapa 5 - Reacción Lenta: Comienza a disminuir la hidratación de C_3A , pero es un proceso que continúa lentamente, incluso por años.

Calor Especifico “Ce”

Se define calor específico Ce como la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de hormigón para que eleve su temperatura en un grado centígrado. En el caso particular del agua Ce vale $1 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$ ó $4186 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$.

La unidad de calor específico que más se usa es cal/(g °C) sin embargo, debemos de ir acostumbrándonos a usar el Sistema Internacional de Unidades de Medida, y expresar el calor específico en J/(kg·K). El factor de conversión es 4186.

La cantidad de calor recibido o cedido por el hormigón se calcula mediante la siguiente fórmula

$$Q = m \cdot c \cdot (T_f - T_i)$$

Donde m es la masa, c es el calor específico, T_i es la temperatura inicial y T_f la temperatura final

- Si $T_i > T_f$ el cuerpo cede calor $Q < 0$
- Si $T_i < T_f$ el cuerpo recibe calor $Q > 0$

Uno de los métodos para determinar el calor específico de un cuerpo, es el método de las mezclas. Para ello pondremos dos cuerpos A y B en contacto térmico en el interior de un calorímetro aislado térmicamente del medio exterior.

Al no existir, o ser muy pequeño el intercambio de calor con el medio exterior a través de las paredes del calorímetro, la cantidad de calor cedida por el cuerpo más caliente será igual a la absorbida por el cuerpo de menor temperatura.

La ecuación correspondiente será:

$$Q_1 + Q_2 = 0 \quad Q_1 = - Q_2$$

En donde se han tenido en cuenta el signo de las cantidades de calor, positivas cuando son absorbidas y negativas cuando son cedidas por un cuerpo.

Se despeja Ce de la anterior ecuación..

$$Ce_2 = \frac{Ce_1 * m_1 * (t_f - t_1)}{m_2 * (t_2 - t_f)}$$

2.9. Elementos prefabricados

La prefabricación es un método industrial de producción de elementos o partes de una construcción en planta o fábrica y su posterior instalación o montaje en la obra. Esta técnica, que ha tenido un enorme desarrollo a nivel mundial, presenta claras ventajas cuando se requiere utilizar elementos repetitivos e industrializar las faenas de construcción y mejorar su productividad. Entre ellas se destacan las siguientes:

- Mayor facilidad para un adecuado control de calidad.
- Menor formación de juntas de hormigonado.
- Uso múltiple y repetitivo de encofrados o moldajes.
- Posibilidad de aplicar técnicas de pretensado, curado acelerado, etc.

La prefabricación puede llegar a ser aplicada a elementos de hormigón simple, como soleras, tubos, bloques, ladrillos, etc.; a elementos sencillos de hormigón armado como postes, y a sistemas más sofisticados como losas, vigas y columnas. Las ventajas del prefabricado son:

- La mano de obra que trabajaría en estas cadenas de montaje no necesitaría una formación especializada.
- La rapidez de montaje.
- Ahorro de materiales utilizados en obra.
- Reducción de los residuos de la construcción.
- También poseerían una mayor fortaleza para resistir durante el transporte y montaje.

2.9.1. Bloques de hormigón prefabricados

Los bloques son piezas de hormigón simple en forma de ladrillo hueco, con dos orificios en su sección, que permiten el fácil manipuleo de estas piezas y garantizan la rigidez y aislamiento térmico al interior de las edificaciones.

Existen dos clases de bloques:

- Bloques de cerramiento
- Bloque estructural

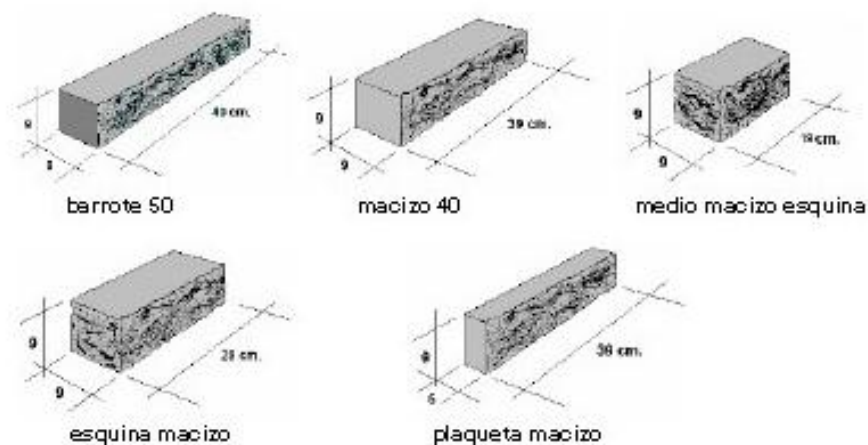
Uso y aplicación

Pueden ser utilizados simplemente como tabiquería de cerramiento o de forma estructural en muros portantes de mayor espesor. Los Bloques de hormigón vibro compactados son aptos para todo tipo de mampostería, este producto ha alcanzado un alto desarrollo a nivel mundial, justificado por sus ventajas constructivas y su gran versatilidad de usos en viviendas, edificios, diversidad de muros, cierres de tinglados industriales y otros, esto debido a su capacidad portante, evitando en algunos casos el uso de columnas estructurales.

Ventajas de Uso

- Rapidez y alto rendimiento en muros.
- Facilidad de colocado.
- Ahorro de la mano de obra.
- Mejor apariencia estética.
- Ahorro en materiales de colocado.
- Ahorro en revoques.
- Mayor economía por m² de muro.
- Alta resistencia y durabilidad a los cambios climáticos.

Macizos split



producto	Medidas modulares	Peso kg Unid.	Peso kg. palet	Unid. M2	Unid. Palet
MACIZO 40	10 x 10 x 40	7.5	1.800	25	240
MEDIO	10 x 10 x 20	3.3	1.650	50	500
ESQUINA	10 x 10 x 30	6	1.980	10	330
PLAQUETA	6 x 10 x 40	4	-	25	-

Figura 3: Dimensiones comerciales de los bloques de hormigón.

2.9.2. Curado de elementos estructurales prefabricados

La fabricación de elementos prefabricados de concreto normalmente se lleva a cabo en plantas fijas de producción, las cuales cuentan con el equipo y personal especializado para elaborar, bajo estrictas normas de calidad, diferentes productos solicitados por la industria de la construcción. También se pueden prefabricar elementos a pie de obra, que por su peso, tamaño o condiciones propias de la obra requieren que sean fabricados en sitio.

Una de las principales ventajas de la prefabricación es la rapidez con la que se ejecutan las obras. Esto se debe en gran medida a la velocidad con la que se hacen los ciclos de colado de los elementos prefabricados. Para ello se requiere que el método de curado del concreto acelere las reacciones químicas que producen un concreto resistente y durable. El método de curado más utilizado en elementos prefabricados y especialmente en los pretensados es el curado a vapor. Con la aplicación de este método es posible la producción de elementos presforzados en forma económica y rápida al permitir la utilización diaria de los moldes.

El empleo de vapor de agua es el más utilizado en la industria de los prefabricados. El vapor de agua no sólo es una fuente de calor efectiva, sino que pone a disposición la humedad necesaria para la hidratación. Antes de comenzar a aplicar vapor de agua debe tener lugar la fase de asentamiento, ya que con una aplicación demasiado temprana de calor se puede echar a perder el desarrollo de la resistencia. Durante el proceso de curado las piezas de concreto se colocan en una cámara en la que se introduce vapor de agua a presión atmosférica. Con el fin de conseguir temperaturas de curados mayores, el vapor de agua se puede introducir a presión en cámaras selladas. Este tipo de cámaras se denominan autoclaves. Cuando la aplicación de calor procede de un solo lado, en la pieza se pueden generar gradientes de temperatura que favorezcan la formación de fisuras microscópicas.

III

MARCO PRÁCTICO

3.1. Fabricación del equipo de curado acelerado

El diseño del equipo de curado acelerado fue elaborado con el asesoramiento técnico de la M.Sc. Ing. Miriam Barrero y el Ing. Fernando Mur tomando en cuenta el siguiente criterio de diseño:

- Distribución uniforme del vapor sobre los especímenes.
- Disposición de las probetas, bloques de hormigón y vigas.
- Control de la cantidad de vapor (manómetro).
- Control de la temperatura (termómetro).
- Dimensión considerado el tamaño y cantidad de los especímenes.

También se tomó en cuenta; la distancia entre probetas que deben ser curadas como mínimo de 10 cm y la distancia entre la pared interna de la cámara de curado y la probeta debe ser como mínimo de 5cm.

El equipo de curado acelerado consiste en tres partes: la primera es caldera donde se calentara el agua para producir el vapor con la ayuda de una hornilla a gas, la segunda es un conducto por la cual se va pasar el vapor, la tercera que es la cámara de curado a vapor de agua sobre un armazón, donde albergara en su interior a 3- 6 probetas aproximadamente. Para la fabricación del equipo de curado acelerado se elaboró unos planos preliminares que se muestra en el anexo A-1 para tener una idea de cómo se vería el equipo terminado.

Con las recomendaciones descritas, se procedió a la fabricación del equipo de curado acelerado, este proceso tomo aproximadamente un mes, durante este tiempo se confeccionaron las distintas piezas que forman parte del equipo.

El equipo de curado acelerado fue construido por señor Roger Arana quien tiene experiencia en la construcción de equipos parecidos para trabajos de investigación.



Fotografía N° 2: Equipo de curado acelerado.

La cámara de vapor de agua permite albergar en su interior a 3-6 probetas de tamaño estándar 12"x 6" y 3 vigas de tamaño estándar 6"x6"x23", las cuales son sometidas a una temperatura controlada de 70 – 80 °C. Las dimensiones interiores de la cámara de curado de vapor de agua son 0.85m x 0.75m x 0.55m (largo, ancho, alto). Las dimensiones exteriores de la cámara de curado de vapor de agua son 1.30 m x 1.10 m x 0.90 m (largo, ancho, alto).

La cámara de vapor; consta de una caja de plancha negra con un interior de acero inoxidable, interiormente esta cámara estará provista de una parrilla de fierro, con dimensiones 53cm x75cm x15cm (ancho, largo, altura). Esta cámara tiene un cerrado hermético consta de un termómetro para poder saber cuál es la temperatura dentro de la misma, una válvula nos permite estabilizar la temperatura y poder liberar el vapor sobrante, y una tubería de vapor con el cual se garantiza una buena distribución del vapor dentro de la cámara.

La caldera consta de un nivel de agua para poder saber hasta que altura se encuentra, un manómetro para saber la presión, un grifo con el cual sabíamos cuando ya había hervido el agua ya que por ahí salía el vapor, dos válvulas, una para poder sacar todo el agua que sobra y la otra para poder colocar el agua, una salida para conectar el conducto de vapor. La caldera funciona a través de una cocinilla a gas para poder tener un mejor control de la temperatura con la cual se calienta el agua.

El costo de la fabricación de la máquina de curado acelerado fue de 7000 Bs que fue financiado por la estudiante.

Fotografía N° 3: Proforma de la fabricación de Máquina de curado acelerado.

Se intentó pedir una beca Académica con recursos para el I.D.H. para que así la máquina de curado acelerado se quedara en propiedad del laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S. para que sea utilizado por los demás alumnos de la carrera de Ingeniería Civil y poder realizar otras prácticas, pero después de cumplir todos los requisitos necesarios se nos negó la otorgación de esta beca.

3.2. Información generada

3.2.1. Análisis del cemento

El cemento utilizado en la investigación fue el que se utiliza más en la región, cemento el puente.

3.2.1.1. Determinación de la Finura

Datos de la Práctica

Muestra	Peso retenido en el tamiz N° 40 gr.	Peso retenido en el tamiz N° 200 gr.	Peso retenido en la Base gr.
Muestra N° 1	43,8	5,3	0,9
Muestra N° 2	44,3	4,9	0,8
Muestra N°3	45,5	4	0,5

Calculando Peso promedio del Residuo “Pr “

$$Pr = \frac{5,3 + 4,9 + 4}{3} = 4,73 \text{ gr.}$$

Calculando la Finura del Cemento “ F “ (con las 3 muestras)

$$F = \frac{4,73}{50} \times 100 \quad \quad \quad \mathbf{F = 9,5 \%}$$

3.2.1.2. Peso específico

Datos de la Práctica

Peso del cemento = 64gr.

$$P.E. = \frac{64}{20,4} \rightarrow P.E. = 3,14 \text{ gr/cm}^3$$

Volumen inicial = 300 ml

Volumen desplazado 1 = 20,5 ml

Volumen desplazado 2 = 20,3 ml

Volumen promedio = 20,4 ml

3.2.2. Análisis de los agregados

Los agregados tanto como grueso y fino son provenientes de la separadora de áridos ubicada en San Blas.

Se realizó dos estudios del agregado grueso porque no se trajo mucho material, solo alcanzo para la primera dosificación (especímenes de 28 días), motivo por el cual se tuvo que traer más para las demás dosificaciones faltantes (especímenes de 3, 7, 14 días).



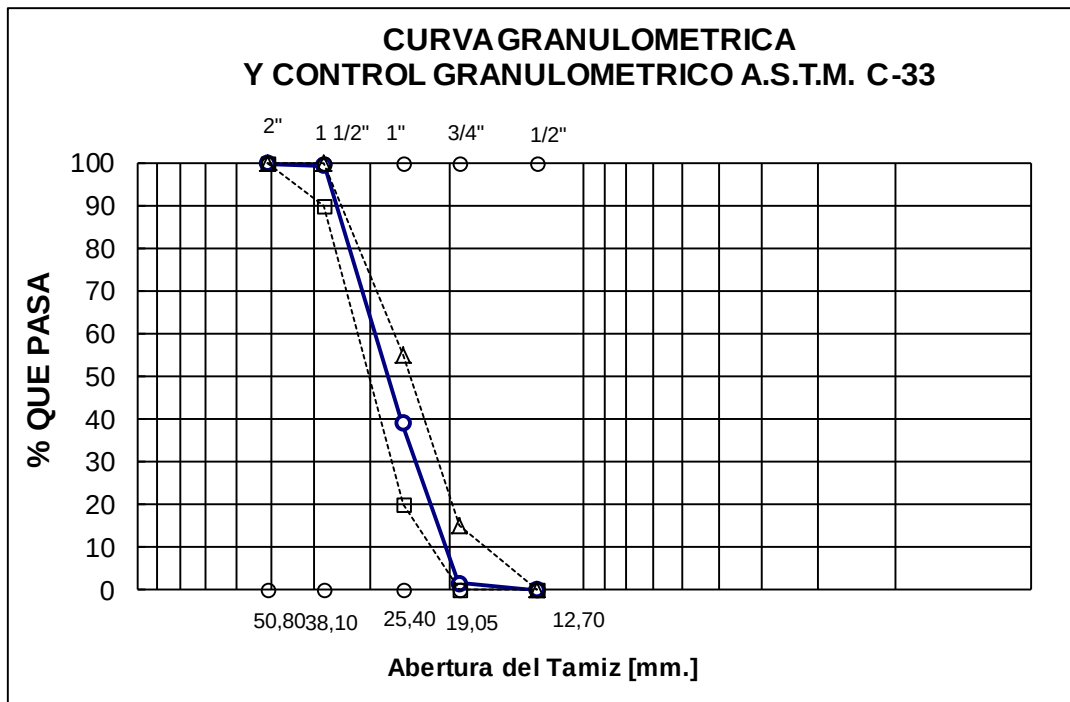
Fotografía N° 4: Separadora de áridos de San Blas.

3.2.2.1. Granulometría

GRANULOMETRIA - AGREGADO GRUESO 1

Peso Total (gr.)		20.000,00		Tamaño max. 2"			
Tamices	Abertura (mm)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. acumulado		% que pasa del total	% Que Pasa s/g Espec. ASTM	
			(gr)	(%)			
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	38,10	95,70	95,70	0,48	99,52	90	100
1"	25,40	12.105,90	12.201,60	61,01	38,99	20	55
3/4"	19,05	7.472,20	19.673,80	98,37	1,63	0	15
1/2"	12,70	324,90	19.998,70	99,99	0,01	-	-
3/8"	9,52	0,00	19.998,70	99,99	0,01	0	5
Nº4	4,75	0,00	19.998,70	99,99	0,01	0	0
Base		0,00	19.998,70	99,99			
SUMAS		19.998,70					
PERDIDAS		1,30					

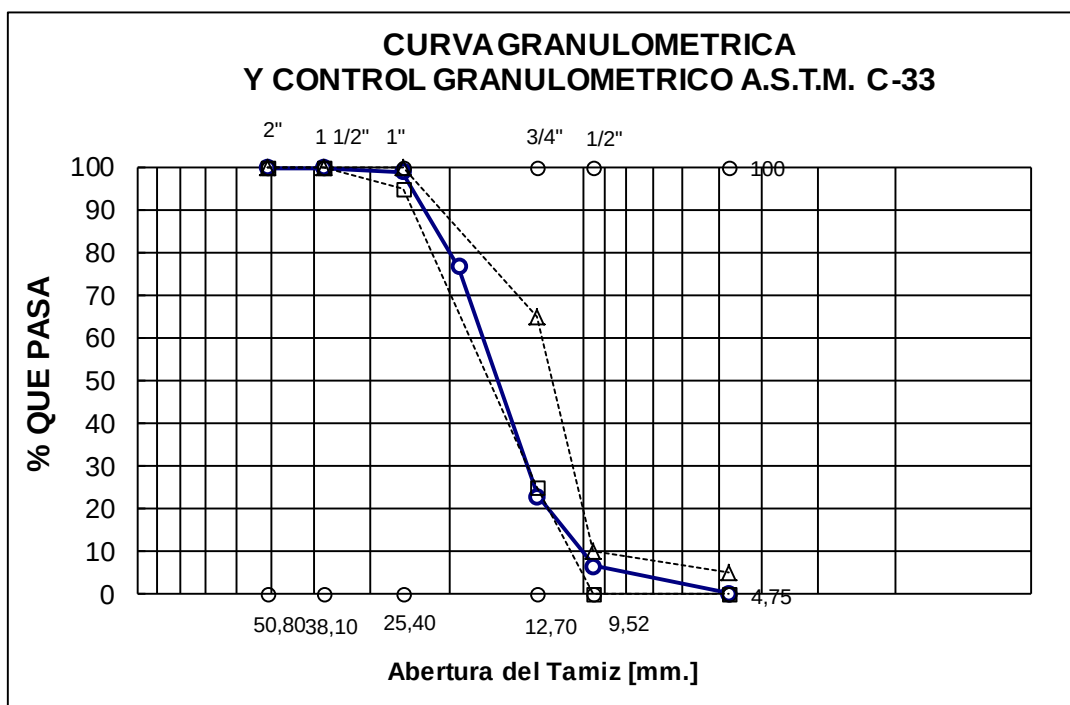
Modulo de Finura MF = 7,99



GRANULOMETRIA - AGREGADO GRUESO 2

Peso Total (gr.)			15.000,00		Tamaño max. 2"		
Tamices	Abertura (mm)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. acumulado		% que pasa del total	% Que Pasa s/g Espec. ASTM	
			(gr)	(%)			
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1"	25,40	156,20	156,20	1,04	98,96	95	100
3/4"	19,05	3.320,60	3.476,80	23,18	76,82	-	-
1/2"	12,70	8.077,30	11.554,10	77,03	22,97	25	65
3/8"	9,52	2.436,60	13.990,70	93,27	6,73	0	10
Nº4	4,75	976,90	14.967,60	99,78	0,22	0	5
Base		0,00	14.967,60	99,78			
SUMAS		14.967,60					
PERDIDAS		32,40					

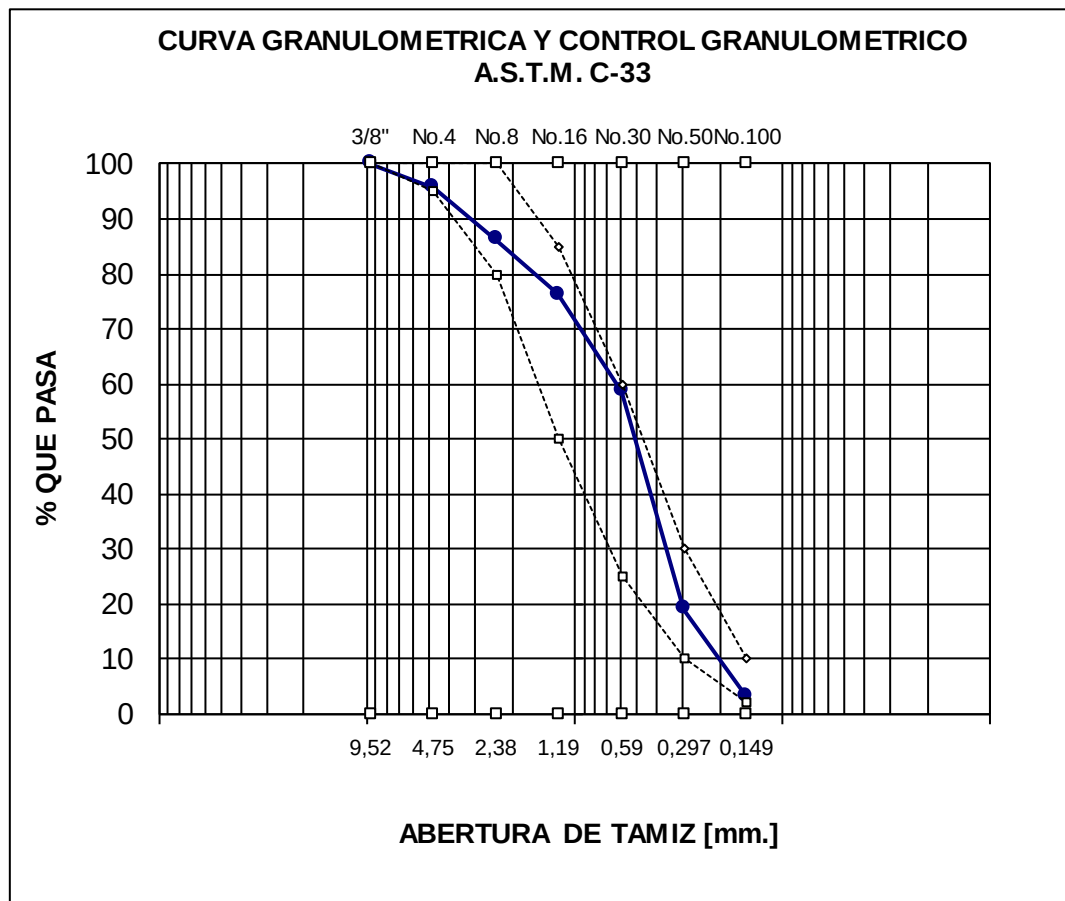
Modulo de Finura MF = 7,16



GRANULOMETRIA - AGREGADO FINO

Peso Total (gr.)		500,00				
Tamices	Abertura (mm)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. acumulado		% que pasa del total	% Que Pasa Espec. ASTM
			(gr)	(%)		
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00	100
Nº 4	4,75	21,30	21,30	4,26	95,74	95 - 100
Nº 8	2,38	47,70	69,00	13,80	86,20	80 - 100
Nº 16	1,19	49,60	118,60	23,72	76,28	50 - 85
Nº 30	0,59	88,10	206,70	41,34	58,66	25 - 60
Nº 50	0,297	197,70	404,40	80,88	19,12	10 - 30
Nº 100	0,149	79,40	483,80	96,76	3,24	2 - 10
base	0,074	16,20	500,00	100,00	0,00	
SUMAS		500,00				
PERDIDAS		0,00				

Modulo de Finura MF = 2,61



3.2.2.2. Peso específico

PESO ESPECÍFICO - AGREGADO GRUESO 1

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	4940,40	5000,00	3093,00	2,59	2,62	2,67	1,21

PESO ESPECÍFICO - AGREGADO GRUESO 2

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	4904,00	5000,00	3073,00	2,54	2,59	2,68	1,96

PESO ESPECÍFICO - AGREGADO FINO

MUESTRA N°	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm3)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	P. E. APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	500	185,2	906,7	200,00	490,20	400,00	2,45	2,50	2,58	1,96

3.2.2.3. Peso unitario

PESO UNITARIO - AGREGADO GRUESO 1

PESO UNITARIO SUELTO

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	8290,00	13805,00	28130,00	19998,00	1,449
2	8290,00	13805,00	28265,00	19994,00	1,448
3	8290,00	13805,00	28190,00	20025,00	1,451
PROMEDIO					1,45

PESO UNITARIO COMPACTADO

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMP (gr)	PESO MUESTRA COMP (gr)	PESO UNITARIO COMP (gr/cm3)
1	8290,00	13805,00	29390,00	21875,00	1,585
2	8290,00	13805,00	29400,00	21685,00	1,571
3	8290,00	13805,00	29140,00	21360,00	1,547
PROMEDIO					1,6

PESO UNITARIO - AGREGADO GRUESO 2

PESO UNITARIO SUELTO

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5655,00	9615,00	19270,00	13615,00	1,416
2	5655,00	9615,00	19220,00	13565,00	1,411
3	5655,00	9615,00	19220,00	13565,00	1,411
PROMEDIO					1,41

PESO UNITARIO COMPACTADO

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMP (gr)	PESO MUESTRA COMP (gr)	PESO UNITARIO COMP (gr/cm3)
1	5655,00	9615,00	20220,00	14565,00	1,515
2	5655,00	9615,00	20250,00	14595,00	1,518
3	5655,00	9615,00	20190,00	14535,00	1,512
PROMEDIO					1,5

PESO UNITARIO - AGREGADO FINO

PESO UNITARIO SUELTO

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2682,80	3029,90	7231,70	4548,90	1,501
2	2682,80	3029,90	7232,70	4549,90	1,502
3	2682,80	3029,90	7233,50	4550,70	1,502
PROMEDIO					1,502

PESO UNITARIO COMPACTADO

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2682,80	3029,90	7636,20	4953,40	1,635
2	2682,80	3029,90	7639,50	4956,70	1,636
3	2682,80	3029,90	7643,50	4960,70	1,637
PROMEDIO					1,636

3.2.3. Dosificación de las probetas, vigas y bloques de hormigón

El método seleccionado para la dosificación es el de la ACI, a continuación se detallan las tablas utilizadas.

Tabla N° 4.- Relación entre la razón Agua /cemento y la resistencia promedio a compresión del hormigón (ACI 211,1-Rev.85)			
Resistencia promedio a compresión a 28 días		Razón agua/cemento (en masa)	
MPa	Kg/cm2	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
45	450	0,38	-
42	420	0,41	-
40	400	0,43	-
35	350	0,48	0,4
30	300	0,55	0,46
28	280	0,57	0,48
25	250	0,62	0,53
21	210	0,68	0,59
20	200	0,7	0,61
15	150	0,8	0,71
14	140	0,82	0,74

Tabla N° 5.- Máxima razón Agua /cemento permitida para hormigón en exposición severa (basada en ACI 201,2R)		
Tipo de estructura	Estructura frecuente o continuamente húmeda y expuesta a congelamiento y deshielo.	Estructura expuesta a aguas de mar o sulfatos.
Secciones delgadas (barandas, rejas, soleras y trabajo ornamental) y secciones con menos que 5 cm de recubrimiento sobre el acero.	0,45	0,4
Otro tipo de estructuras.	0,5	0,45

Tabla N° 6.- Asentamientos de cono recomendado para diferentes tipos de construcción (ACI 211,1-Rev.85)	
Tipo de construcción	Rango de asentamiento de cono (cm)
Fundaciones armadas y bases	2--8
Fundaciones y muros de sub-estructura simple	2--8
Vigas y muros armados	2--10
Columnas de edificios	2--10
Pavimentos y losas	2--8
Hormigón masivo	2--8

Tabla N° 7.- Requerimientos aproximados para dosis de agua (kg/m³) y contenido de aire (%) para diferentes trabajabilidad y tamaños máximos nominales de áridos (ACI 211,1-Rev.85)								
Trabajabilidad (cm)	Tamaño máximo nominal del árido (mm)							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
Hormigón sin aire incorporado								
3--5	205	200	185	180	160	155	145	125
8--10	225	215	200	195	175	170	160	140
15--18	240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad de aire atrapado aproximado (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Hormigón con aire incorporado								
3--5	180	175	165	160	145	140	135	120
8--10	200	190	180	175	160	155	150	135
15--18	215	205	190	185	170	165	160	-

Tabla N° 8.- Volumen aparente de árido grueso seco por metro cubico de hormigón (1/m³) (ACI 211,1-Rev.85)				
Tamaño máximo nominal del árido (mm)	Volumen aparente seco compactado de árido grueso para distintos Módulos de finura de la arena.			
	2,4	2,6	2,8	3
10	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,6
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,8	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Se hicieron 2 dosificaciones, la primera nos salió una relación muy dispereja de 1:2,55:4,48 en el cual se veía mucha grava así q se tuvo que corregir lo que se hizo fue basándose en la teoría que a menor relación agua/cemento el curado de vapor es mejor, así que se rebajó dicha relación a 0.50 donde nos salió una mejor relación de 1:2:3,16 se utilizó dicha dosificación para la primera grava. Para la segunda grava se la calculo con una relación agua/cemento de 0,50 con la cual nos salio 1:1,99:2,87.

Primera dosificación 1:2,55:4,18

Relación agua/cemento de 0,64

	6 Probetas	6 Vigas	6 Bloques
Arena	23,42 kg.	50,256 kg.	6,67 kg.
Grava	37,89 kg.	84,71 kg.	10,93 kg.
Agua	5,79 kg.	13,36 kg.	2,61 kg.
Cemento	9,05 kg.	20,23 kg.	1,72 kg.

Primera dosificación corregida 1:2:3,16

Relación agua/cemento de 0,50

	6 Probetas	6 Vigas	6 Bloques
Arena	23,11 kg.	51,69 kg.	6,67 kg.
Grava	36,70 kg.	82,06 kg.	10,59 kg.
Agua	5,97 kg.	13,36 kg.	1,72 kg.
Cemento	11 58 kg.	25.90 kg.	3,34 kg.

Segunda dosificación 1:1,99:2,87

Relación agua/cemento de 0,50

	6 Probetas	6 Vigas	6 Bloques
Arena	29,29 kg.	56,65 kg.	7,30 kg.
Grava	42,73 kg.	82,63 kg.	10,66 kg.
Agua	8,16 kg.	15,18 kg.	2,03 kg.
Cemento	15,68 kg.	30,37 kg.	3,92 kg.

Ya que con las primeras dosificaciones no se pudo lograr a una resistencia mínima de 210 Kg/cm² realizamos una corrección en la dosificación, hasta lograr una en la cual obtengamos una resistencia igual o mayor a la requerida.

DOSIFICACION METODO ACI.

Resistencia a compresión a los 28 días del hormigón (kg/cm ²)		210
DATOS DE LABORATORIO		
Peso específico del cemento		
Cemento Portland El Puente (gr/cm ³)=		3,11
Peso específico aparente		
Arena (gr/cm ³) =	2,58	TM (mm) = 38,1
Grava (gr/cm ³) =	2,68	TMN (mm) = 25,4
Peso Unitario compactado		Porcentaje de Absorción
Arena (gr/cm ³) =	1,64	% Absorción de Arena = 1,96
Grava (gr/cm ³) =	1,5	% Absorción de Grava = 1,96
Peso Unitario suelto		Contenido de Humedad de los agregados
Arena (gr/cm ³) =	1,5	% Humedad de Arena = 1
Grava (gr/cm ³) =	1,628	% Humedad de Grava = 1
Módulo de Finura		
Arena =	2,61	
Grava =	7,17	

CALCULO DE LA DOSIFICACION

Asentamiento (cm) =	10	Tabla N° 6
Tamaño máximo nominal (mm) =	25,4	
Contenido de aire (%) =	1,5	Tabla N° 7
Agua de mezclado (lt/m ³) =	195	Tabla N° 7

Resistencia de diseño

Debido a que no se tiene registro de datos disponibles para establecer la desviación estándar de la muestra, la NORMA ACI recomienda usar lo siguiente:

$f''c < 210 \text{ kg/cm}^2$	$f''cr = f''c + 70 =$	280
$210 \leq f''c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$	$f''cr = f''c + 85 =$	293
$f''c > 350 \text{ kg/cm}^2$	$f''cr = 1,10f''c + 50 =$	281

razón agua/cemento 0,56 (Tabla N° 4)

Contenido de cemento

Cemento (kg/m³) = 354,5

Volumen de agregado grueso por volumen Unitario de hormigón

Volumen de agregado grueso = 0,689 Tabla N° 8

Peso de agregado grueso (kg/m³) = 1033,5

Volumen de materiales si considerar agregado fino (m ³)			
Material	Peso seco	P.Especifico	Volumen
Agua (kg/m ³) =	195	1000	0,195
Cemento (kg/m ³) =	354,5	3110	0,114
Grava (kg/m ³) =	1033,5	2680	0,386
Aire (%) =	1,5	-	0,015
		V. total	0,71

Deter. del Volumen de agregado fino	
Vol. Agregado fino (m ³) =	0,290
Peso agregado fino (kg/m ³)=	749,1

DISEÑO EN ESTADO SECO	
Material	Peso seco
Agua (kg/m ³) =	195
Cemento (kg/m ³) =	354,5
Grava (kg/m ³) =	1033,5
Arena (kg/m ³) =	749,1
Aire (%) =	1,5

Cemento	Arena	Grava
1	2,1	2,9

Corrección por Humedad	
Para agregado fino (kg/m ³) =	756,6
Para agregado grueso (kg/m ³) =	1043,8
Agua en el agregado fino (lt/m ³) =	7,2
Agua en el agregado fino (lt/m ³) =	9,9

DISEÑO EN ESTADO HUMEDO	
Material	Peso húmedo
Agua (kg/m ³) =	212,1
Cemento (kg/m ³) =	354,5
Grava (kg/m ³) =	1043,8
Arena (kg/m ³) =	756,6
Aire (%) =	1,5

Volumen de 1 probeta de D=0,15m H=0,3m

$$V = 0,0053$$

Numero de probetas	6
Perdidas (%)	10

DISEÑO EN ESTADO HUMEDO	
Material	Peso húmedo
Agua (kg/m ³) =	7,4
Cemento (kg/m ³) =	12,4
Grava (kg/m ³) =	36,5
Arena (kg/m ³) =	26,5

3.2.4. Elaboración, curado y ruptura de los especímenes de hormigón.

3.2.4.1. Elaboración

Para la elaboración de los especímenes de hormigón, se pesan los componentes del mismo (agregado grueso, agregado fino, cemento y agua) de acuerdo a las proporciones indicadas en la dosificación.



Fotografía N° 5: Hormigonera lista para empezar el mezclado.

Se prepara la hormigonera junto a todas las herramientas para realizar el mezclado, antes de hormigonar se debe limpiar adecuadamente dichas herramientas, verificar que los agregados (grava y arena) se encuentren limpios de toda impureza y en estado completamente secos. Una vez realizado esto se enciende la hormigonera y se empieza a introducir los materiales del hormigón uno a uno y en pequeñas proporciones hasta terminar el total de los componentes del hormigón. Al momento del mezclado se debe golpear con el combo de goma en la hormigonera para obtener una mejor mezcla. En caso de que la mezcla quede muy seca se debe aumentar cierta cantidad de agua hasta que tome la consistencia adecuada teniendo en cuenta que sobrepase los límites del asentamiento escogido y anotar la cantidad de agua incrementada a la mezcla. El tiempo de mezclado fue aproximadamente de 2 – 3 minutos.

El vaciado se lo efectuó en un recipiente de una capacidad mayor al de la mezcla de hormigón, se voltea la hormigonera encendida golpeando de igual manera en los bordes, para el vaciado total de la mezcla sobre el recipiente.

Una vez ya hormigonado se procedió a realizar el control de la calidad del hormigón con el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams, para verificar que dichos asentamientos se encuentren entre los rangos con los que se elaboró la dosificación.



Fotografía N° 6: Prueba del cono de Abrams.

Luego se procedió al llenado de los moldes (probetas, vigas y bloques) que fueron previamente engrasados para evitar el pegado del hormigón al molde. El llenado de las probetas se lo realizó llenando en tres partes iguales, compactando con barrilla metálica cada parte con 25 golpes. El llenado de las vigas y bloques se lo realizó en dos partes iguales, compactando con una varilla metálica cada parte con 50 golpes y para todos los

especímenes enrasando en la superficie para obtener un buen acabado, también se realizó el golpeado leve por fuera de la probeta con el combo de goma para así eliminar las burbujas de aire contenidas en la misma mezcla de hormigón.



Fotografía N° 7: Colocado del hormigón en los moldes cilíndricos.

Se efectuaron tres veces el hormigonado para la elaboración de los especímenes de hormigón, para diferentes días de curado como ser especímenes de curado de 7, 14 y 28 días. Se elaboraron 6 probetas, 6 vigas y 6 bloques, tanto para 7, 14, 28 días, donde 3 fueron para el curado convencional y 3 para el curado a vapor de agua, en total se hicieron 54 especímenes y una más para la determinación de la temperatura en el centro y superficie del hormigón.

Como no se llegó a la resistencia mínima de 210 kg/cm² se realizó una nueva dosificación donde se elaboraron 6 probetas cilíndricas, donde 3 se curaron convencionalmente y las otras 3 curadas con vapor de agua, para 3, 7, 14 días respectivamente.

3.2.4.2. Curado

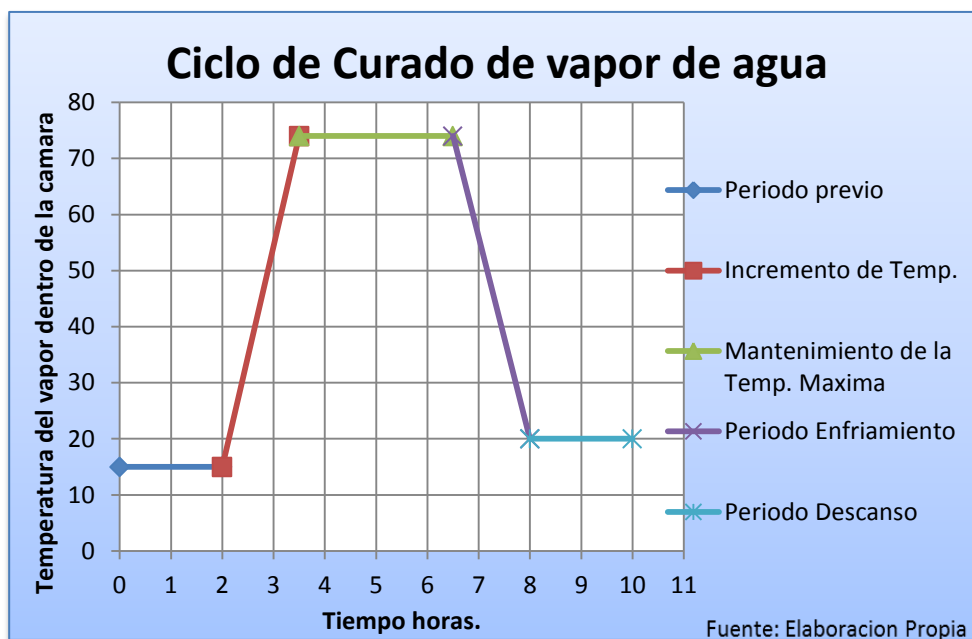
Luego de ser desmoldados los especímenes pasadas las 24 horas de su elaboración. La mitad de las probetas, vigas y bloques de cada dosificación fueron sometidas a un curado convencional, se las colocaron en una piscina que fue armada en un cuarto de la casa de la estudiante esto para poder tener un mejor control del curado, durante el tiempo requerido (7, 14, o 28 días).



Fotografía N° 8: Curado convencional.

La otra mitad de los especímenes fueron curados con vapor de agua donde por capacidad de la cámara se realizó un curado intercalado como se muestra en el cronograma de curado con vapor de agua en el anexo A-7.

El proceso de curado se realizaba desde tempranas horas del día donde en la mañana se curaban las probetas y bloques, por la tarde se curaban las vigas, el ciclo de curado de vapor de agua consistía primero en aproximadamente 1,5 horas para aumentar la temperatura con un intervalo de $33 - 44^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ hasta obtener la temperatura máxima que estaba entre 70 a 80°C , la cual se mantenía por aproximadamente 3 horas, después unas 1,5 horas para descender la temperatura con el mismo intervalo de temperatura. Teniendo como un total de 6 horas de curado a vapor de agua. También existían dos periodos adicionales uno previo ante de comenzar el ciclo de curado y el otro de descanso después de sacar los especímenes de la cámara donde la temperatura se encontraba constante. Se realizó un estricto control de la temperatura para evitar el incremento brusco de la temperatura, también para evitar q la temperatura máxima supere el rango establecido anteriormente, en el anexo A-8 se muestra las planillas de control del curado de vapor de agua de todos los especímenes.



Grafica N° 14: Ciclo de curado de vapor de agua utilizado.

El proceso de curado de vapor de agua comienza con el colocado de los distintos especímenes tratando de que estén bien distribuidos dentro de la cámara como se lo ve en el anexo A-5, luego se procede con el llenado de agua a la hornilla por la válvula superior se utilizó aproximadamente 15 litros para todo el ciclo, una vez cerrado dicha válvula se prende la hornilla a gas, cuando hervía el agua y salía el vapor por el grifo, se abre la válvula del conducto que conecta la hornilla con la cámara, para que el vapor pase hacia la cámara, luego se cierra el grifo para que pase todo el vapor, después se cierra la puerta y válvula de la cámara para q no escape vapor, se va controlando como va aumentando la temperatura y que no haya una elevación brusca de la temperatura, hasta estabilizar la cámara a la temperatura deseada abriendo un poco la válvula de la cámara para que se mantenga, una vez pasado las 3 horas se apaga la cocina y así se va disminuyendo la temperatura poco a poco . Por último se procede a sacar las probetas y bloques para poder colocar las vigas y se vuelve a realizar el mismo procedimiento ya señalado. Todo el proceso se muestra en el anexo A-6.

A las probetas cilíndricas con la corrección de la dosificación para alcanzar o superar una resistencia de 210 Kg/cm^2 , se realizó el mismo procedimiento tanto en el curado convencional como el curado con vapor de agua, la única diferencia es que el curado con

vapor de agua se lo realizo de una manera continua para 3, 7,14 días ya no se intercalo como los anteriores especímenes de hormigón.

3.2.4.3. Ruptura

La ruptura de todas las probetas, vigas y bloques, se realizó en el equipo que se encuentra en el laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S. Los especímenes que fueron curados convencionalmente se sacaron de la piscina un día antes de su ruptura, mientras que los especímenes de curado a vapor de agua ya estaban listas para llevarlas al laboratorio para su ruptura. La ruptura de realizo a compresión para las probetas y bloques de hormigón, a flexión para las vigas.



Fotografía N° 9: Equipo utilizado para realizar las rupturas.

3.2.5. Ensayos a los especímenes de hormigón

3.2.5.1.Capacidad calorífica del hormigón

Para determinar la capacidad calorífica de nuestros especímenes curados con vapor de agua se obtuvo un pedazo de muestra después de la ruptura de las mismas. La elaboración del calorímetro se utilizó una fuente de plastoformo donde se le acomodo esponja para poder colocar el vaso donde se colocara la muestra y también para evitar la pérdida de calor, en la parte de la tapa se perforó un hueco para que entre por ahí el termómetro, una vez construido el calorímetro pasamos a realizar la práctica. Lo primero q hicimos fue medir la temperatura de la muestra y pesarlo, después colocamos 100 ml de agua en el vaso y obtuvimos su peso, se calentó el agua hasta llegar a una temperatura

máxima, lo vertimos en el vaso que ya estaba en el calorímetro, después colocamos la muestra y lo tapamos, controlamos la temperatura hasta que llegue a la de equilibrio y posteriormente pasamos a realizar la misma practica tanto para las muestras de 7, 14, 28 días. Como se lo muestra en el anexo A-10.

Datos obtenidos.

$$C_{e1} = 1 \text{ cal/gr}^{\circ}\text{C}$$

$$m_1 = 97,4 \text{ gr.} \quad C_{e2} = \frac{C_{e1} * m_1 (t_f - t_1)}{m_2 (t_2 - t_f)}$$

Muestra 28 días

Nº	Peso (gr)	t ₁ ° C	t ₂ ° C	t _f ° C	C _{e1} (cal/gr*° C)
1	49	24	76	26	0,08
2	51,4	24	75	27	0,12
3	48,6	25	74	26	0,04
Promedio					0,08

Muestra 14 días

Nº	Peso (gr)	t ₁ ° C	t ₂ ° C	t _f ° C	C _{e1} (cal/gr*° C)
1	43,2	24	76	26	0,09
2	30	24	75	27	0,20
3	30,9	25	74	26	0,07
Promedio					0,12

Muestra 7 días

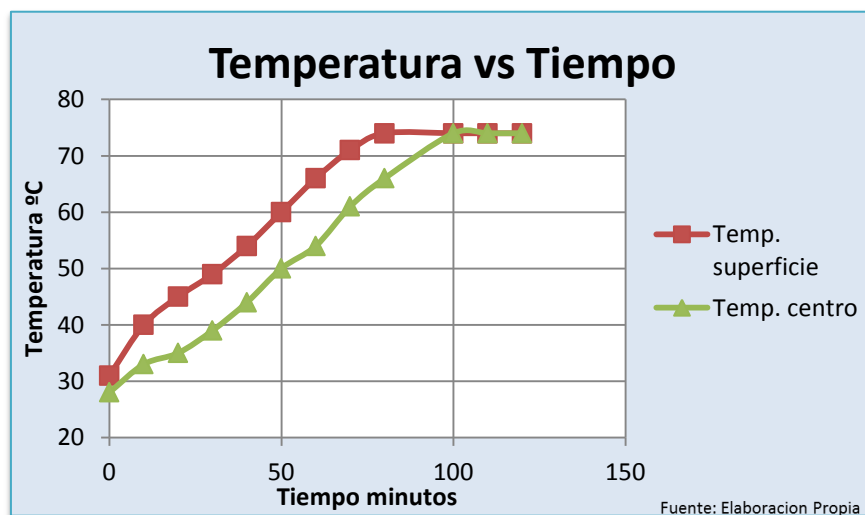
Nº	Peso (gr)	t ₁ ° C	t ₂ ° C	t _f ° C	C _{e1} (cal/gr*° C)
1	57,6	24	74	28	0,15
2	66,5	25	75	27	0,06
3	61,5	25	74	28	0,10
Promedio					0,10

3.2.5.2.Determinación de la temperatura en el centro y superficie de un elemento de hormigón.

Lo que se hizo fue elaborar una probeta con un hueco en el medio de ella para poder medir la temperatura en el centro de la misma. Se procedió al procedimiento normal de curado con la diferencia es que al paso de cada media hora se sacaba la probeta para poder medir la temperatura que tiene en el centro y así poder saber cuánto tarda el calor en llegar al centro.

Tabla 9.- Temperaturas obtenidas.

Tiempo min.	Temp. Superficie ° C	Temp. Centro ° C
0	31	28
10	40	33
20	45	35
30	49	39
40	54	44
50	60	50
60	66	54
70	71	61
80	74	66
100	74	74
110	74	74
120	74	74



Grafica N° 15: Registro de temperaturas en el centro y superficie de un elemento de hormigón masivo.

3.2.5.3. Ensayo de compresión (Probetas, Bloques de hormigón)

Para el ensayo a compresión se utilizó la máquina que se encuentra en el laboratorio de suelos, con el cual obtuvimos la resistencia a compresión de todos los especímenes.

Se colocó gomas entre los especímenes y la base de la máquina para garantizar la aplicación correcta de la fuerza.

Tabla 10.- Resultados obtenidos de la resistencia a compresión de las Probetas.

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 28 - Dias 1	14	Curado a vapor	10,54	107,48
C.V. 28 - Dias 2	14	Curado a vapor	11,34	115,64
C.V. 28 - Dias 3	14	Curado a vapor	10,34	105,44
C.C. 28 - Dias 1	28	curado convencional	14,40	146,85
C.C. 28 - Dias 2	28	curado convencional	15,51	158,17
C.C. 28 - Dias 3	28	curado convencional	12,92	131,75

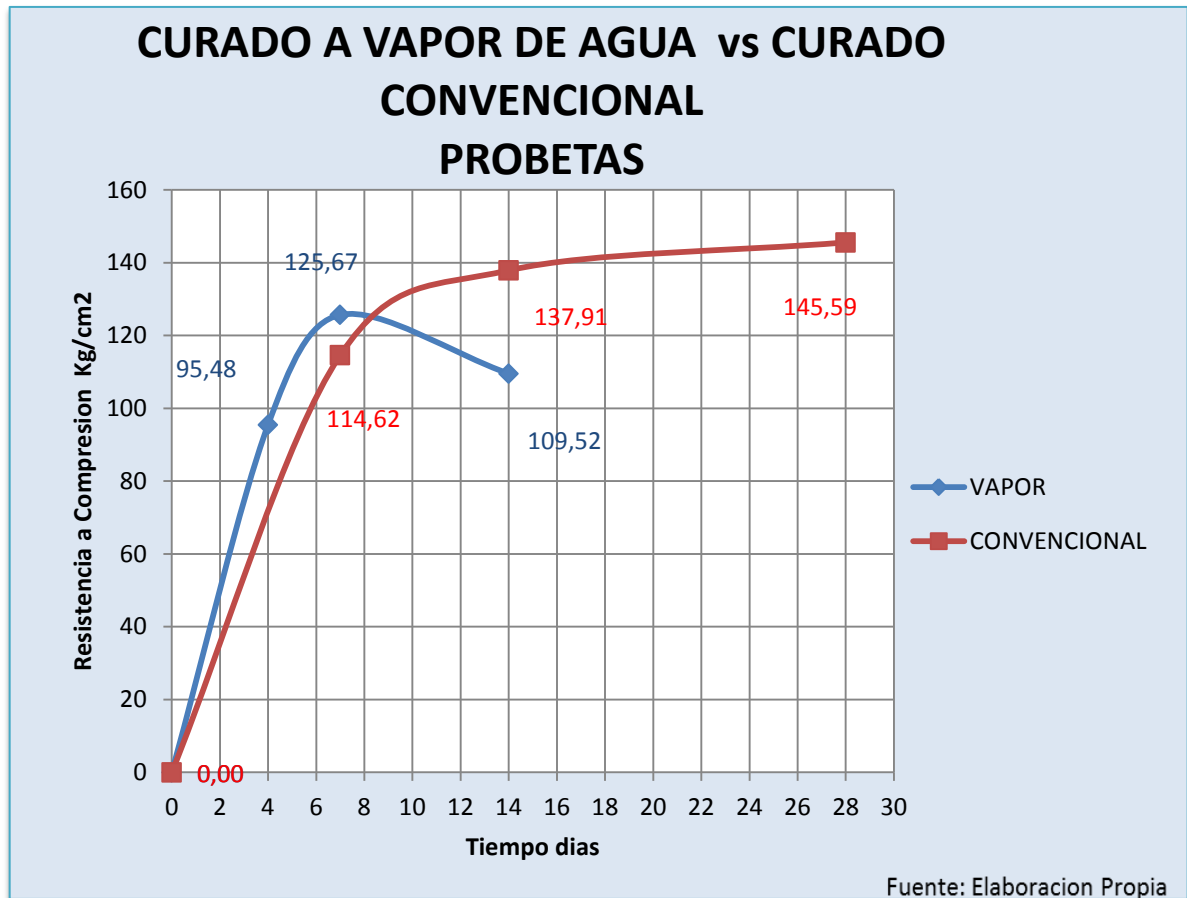
PROMEDIO	14	Curado a vapor	10,74	109,52
	28	curado convencional	14,28	145,59

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 14 - Dias 1	7	Curado a vapor	11,85	120,84
C.V. 14 - Dias 2	7	Curado a vapor	12,79	130,43
C.V. 14 - Dias 3	7	Curado a vapor	12,33	125,74
C.C. 14 - Dias 1	14	curado convencional	14,09	143,69
C.C. 14 - Dias 2	14	curado convencional	13,63	138,99
C.C. 14 - Dias 3	14	curado convencional	12,85	131,04

PROMEDIO	7	Curado a vapor	12,32	125,67
	14	curado convencional	13,52	137,91

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 7 - Dias 1	4	Curado a vapor	9,49	96,78
C.V. 7 - Dias 2	4	Curado a vapor	9,54	97,29
C.V. 7 - Dias 3	4	Curado a vapor	9,06	92,39
C.C. 7 - Dias 1	7	curado convencional	10,58	107,89
C.C. 7 - Dias 2	7	curado convencional	11,16	113,81
C.C. 7 - Dias 3	7	curado convencional	11,98	122,17

PROMEDIO	4	Curado a vapor	9,36	95,48
	7	curado convencional	11,24	114,62



Grafica N° 16: Grafica del curado de vapor de agua Vs el curado convencional de las probetas.

Tabla 11.- Resultados obtenidos de la resistencia a compresión de las probetas con curado continuo.

NOMBRE	DIAS	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 14 - Dias 1	14	Curado a vapor	15,79	161,02
C.V. 14 - Dias 2	14	Curado a vapor	16,4	167,24
C.V. 14 - Dias 3	14	Curado a vapor	16,06	163,77
C.C. 14 - Dias 1	14	curado convencional	17,84	181,93
C.C. 14 - Dias 2	14	curado convencional	18,2	185,60
C.C. 14 - Dias 3	14	curado convencional	17,93	182,84

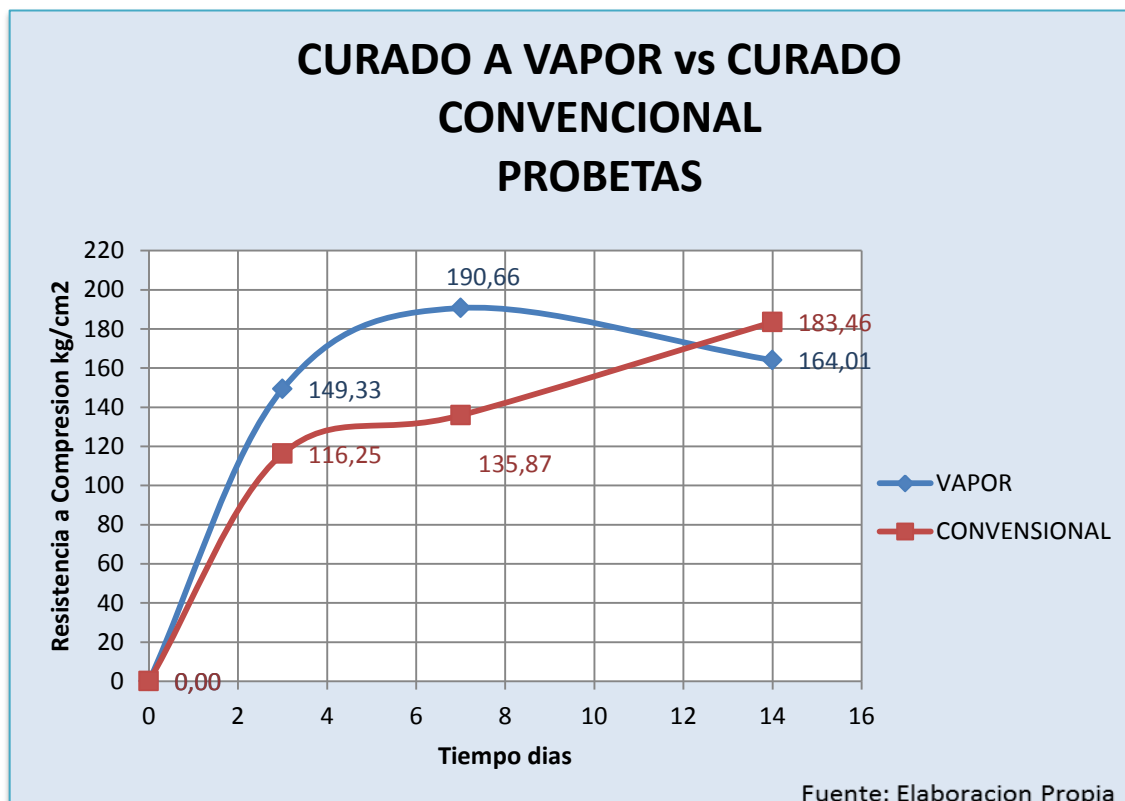
PROMEDIO	14	Curado a vapor	16,08	164,01
	14	curado convencional	17,99	183,46

NOMBRE	DIAS	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 7 - Dias 1	7	Curado a vapor	18,5	188,66
C.V. 7 - Dias 2	7	Curado a vapor	18,65	190,19
C.V. 7 - Dias 3	7	Curado a vapor	18,94	193,14
C.C. 7 - Dias 1	7	curado convencional	13,49	137,57
C.C. 7 - Dias 2	7	curado convencional	13,63	138,99
C.C. 7 - Dias 3	7	curado convencional	12,85	131,04

PROMEDIO	7	Curado a vapor	18,70	190,66
	7	curado convencional	13,32	135,87

NOMBRE	DIAS	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 3 - Dias 1	3	Curado a vapor	14,55	148,38
C.V. 3 - Dias 2	3	Curado a vapor	14,65	149,40
C.V. 3 - Dias 3	3	Curado a vapor	14,73	150,21
C.C. 3 - Dias 1	3	curado convencional	11,62	118,50
C.C. 3 - Dias 2	3	curado convencional	11,94	121,76
C.C. 3 - Dias 3	3	curado convencional	10,64	108,50

PROMEDIO	3	Curado a vapor	14,64	149,33
	3	curado convencional	11,40	116,25



Grafica N° 17: Grafica del curado de vapor de agua Vs el curado convencional de las probetas.

Nota.- En el anexo A-10 se muestra como se realizó el ensayo a compresión de las probetas y bloques de hormigón.

Tabla 12.- Resultados obtenidos de la resistencia a compresión de los bloques de hormigón.

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 14 - Dias 1	14	Curado a vapor	11,75	119,82
C.V. 14 - Dias 2	14	Curado a vapor	11,73	119,62
C.V. 14 - Dias 3	14	Curado a vapor	11,80	120,33
C.C. 28 - Dias 1	28	curado convencional	11,73	119,62
C.C. 28 - Dias 2	28	curado convencional	11,87	121,05
C.C. 28 - Dias 3	28	curado convencional	11,85	120,84

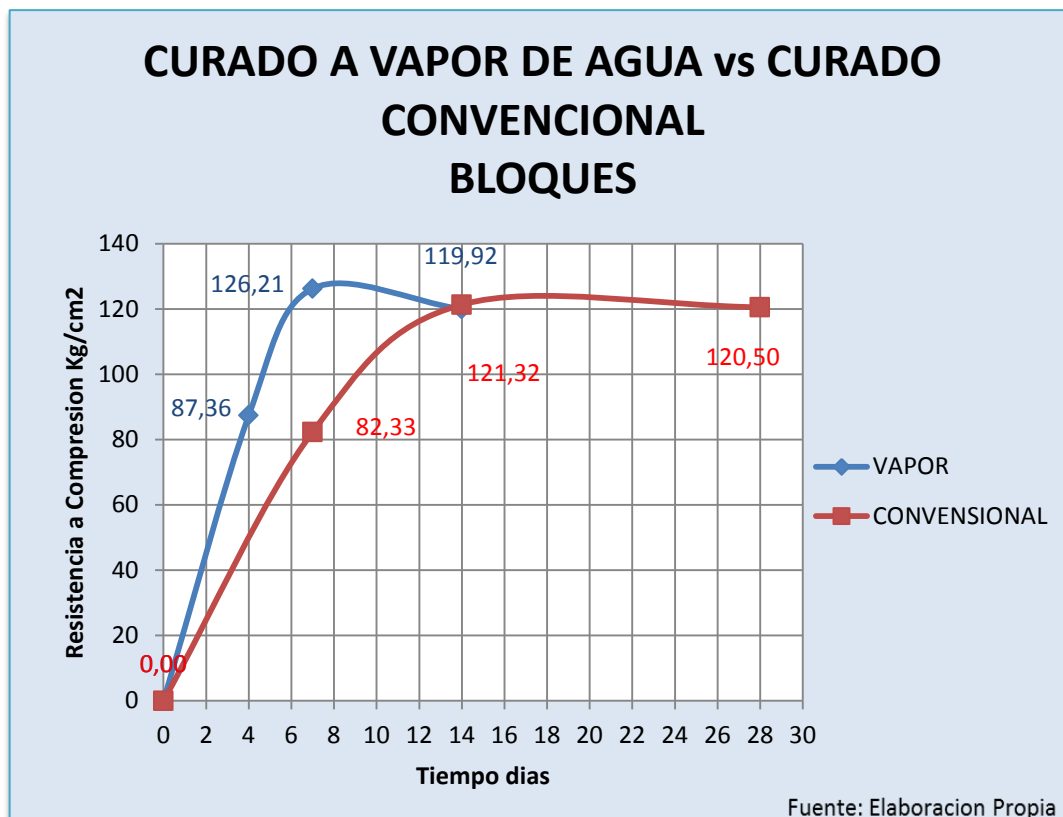
PROMEDIO	14	Curado a vapor	11,76	119,92
	28	curado convencional	11,82	120,50

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 7 - Dias 1	7	Curado a vapor	11,02	112,38
C.V. 7 - Dias 2	7	Curado a vapor	15,20	155,00
C.V. 7 - Dias 3	7	Curado a vapor	10,91	111,26
C.C. 14 - Dias 1	14	curado convencional	11,94	121,76
C.C. 14 - Dias 2	14	curado convencional	7,22	73,63
C.C. 14 - Dias 3	14	curado convencional	16,53	168,57

PROMEDIO	7	Curado a vapor	12,38	126,21
	14	curado convencional	11,90	121,32

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	COMPRESION MPa	COMPRESION Kg/cm2
C.V. 4 - Dias 1	4	Curado a vapor	8,96	91,37
C.V. 4 - Dias 2	4	Curado a vapor	7,38	75,26
C.V. 4 - Dias 3	4	Curado a vapor	9,36	95,45
C.C. 7 - Dias 1	7	curado convencional	10,39	105,95
C.C. 7 - Dias 2	7	curado convencional	9,34	95,25
C.C. 7 - Dias 3	7	curado convencional	4,49	45,79

PROMEDIO	4	Curado a vapor	8,57	87,36
	7	curado convencional	8,07	82,33



Grafica N° 17: Grafica del curado de vapor de agua Vs el curado convencional de los bloques de hormigón.

Nota.- En el anexo A-10 se muestra como se realizó el ensayo a compresión de las probetas y bloques de hormigón.

3.2.5.4. Ensayo a la flexión (Vigas)

El ensayo a la flexión se lo realizó en la misma equipo que el de compresión donde se le añadió un equipo para poder realizar correctamente el ensayo, teniendo en cuenta la ubicación de la viga sea la correcta.

Tabla 13.- Resultado obtenidos de la resistencia a flexión de las vigas

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	CARGA MAX. KN	FLEXION Kg/cm ²
C.V. 14 - Dias 1	14	Curado a vapor	11,40	18,26
C.V. 14 - Dias 2	14	Curado a vapor	16,90	27,06
C.V. 14 - Dias 3	14	Curado a vapor	17,60	28,18
C.C. 28 - Dias 1	28	curado convencional	20,00	32,03
C.C. 28 - Dias 2	28	curado convencional	22,00	35,23
C.C. 28 - Dias 3	28	curado convencional	19,10	30,59

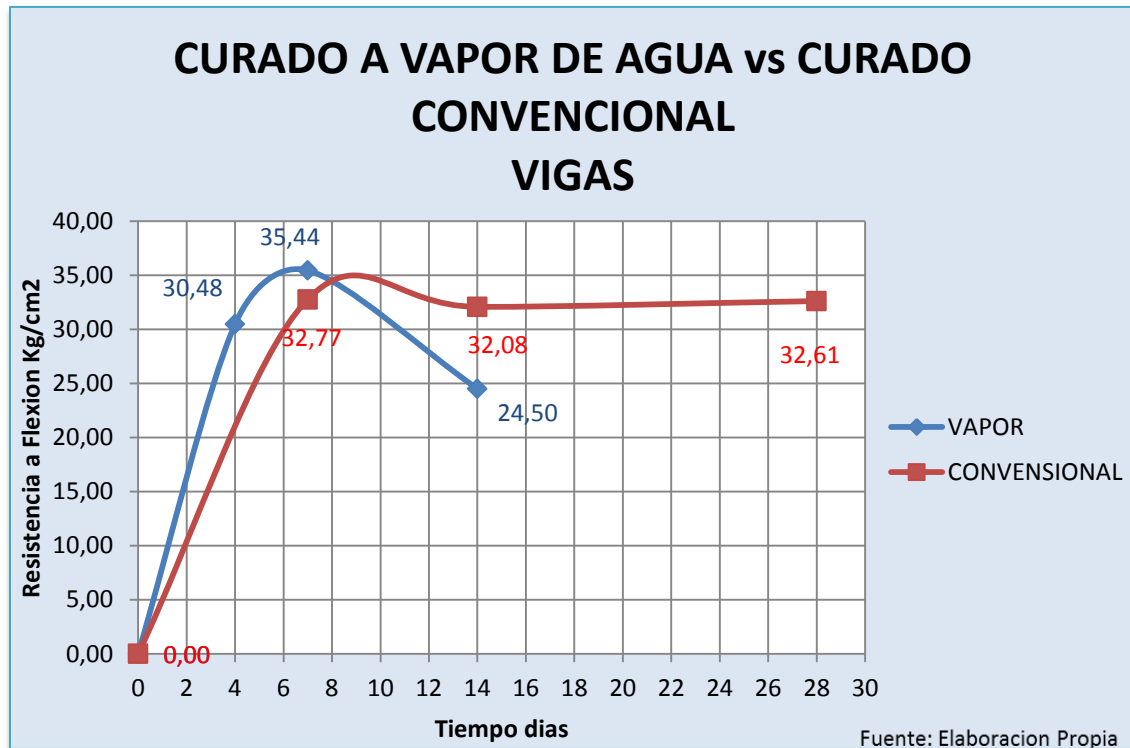
PROMEDIO	14	Curado a vapor	15,30	24,50
	28	curado convencional	20,37	32,61

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	CARGA MAX. KN	FLEXION Kg/cm ²
C.V. 7 - Dias 1	7	Curado a vapor	23,00	36,83
C.V. 7 - Dias 2	7	Curado a vapor	22,00	35,23
C.V. 7 - Dias 3	7	Curado a vapor	21,40	34,27
C.C. 14 - Dias 1	14	curado convencional	19,00	30,43
C.C. 14 - Dias 2	14	curado convencional	22,40	35,87
C.C. 14 - Dias 3	14	curado convencional	18,70	29,95

PROMEDIO	7	Curado a vapor	22,13	35,44
	14	curado convencional	20,03	32,08

NOMBRE	TIEMPO	TIPO DE CURADO	CARGA MAX. KN	FLEXION Kg/cm ²
C.V. 4 - Dias 1	4	Curado a vapor	17,60	28,18
C.V. 4 - Dias 2	4	Curado a vapor	17,40	27,86
C.V. 4 - Dias 3	4	Curado a vapor	22,10	35,39
C.C. 7 - Dias 1	7	curado convencional	17,50	28,02
C.C. 7 - Dias 2	7	curado convencional	22,10	35,39
C.C. 7 - Dias 3	7	curado convencional	21,80	34,91

PROMEDIO	4	Curado a vapor	19,03	30,48
	7	curado convencional	20,47	32,77



Grafica N° 18: Grafica del curado de vapor de agua Vs el curado convencional de las vigas.

Nota.- En el anexo A-10 se muestra como se realizó el ensayo de flexión de las vigas.

3.3. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos de las rupturas de los especímenes con curado a vapor de agua son los esperados esto se debe a que se realizó una dosificación adecuada, además que se realizó control en el curado con vapor de agua (temperatura y presión) además de tiempo de exposición del espécimen a estas condiciones.

Se identifica en las gráficas claramente como los especímenes sometidos al curado con vapor de agua obtienen mayor resistencia hasta un periodo de 7 días, después de dicho tiempo se registra un descenso de la resistencia.

Se comprueba que en el comienzo del curado con vapor de agua la temperatura en la superficie y en el centro de las probetas no son las mismas por cierto tiempo hasta que se encuentran una temperatura en equilibrio (comprobación de variación y equilibrio térmico).

Como se percibe en la gráfica N° 17, al tercer día de curado se pudo identificar un incremento de un 22,15 % de la resistencia a la compresión de las probetas curadas con vapor de agua con relación de las probetas curadas con el método convencional, para el séptimo día el incremento fue de 28,74 % de la resistencia, para el día catorce existe una reducción de un 10,60 % donde se verifico lo expuesto en la teoría que después del siete días de curado con vapor de agua la resistencia disminuye.

CONCLUSIONES

- Se verifico la hipótesis que el curando de especímenes de hormigón con vapor de agua se obtiene mayores valores de resistencia en menor tiempo, que con el curado convencional (inmersión en agua). Como se detalla en la tabla N° 10 ejemplo se obtuvo una resistencia a la compresión a los 7 días de $125,67 \text{ kg/cm}^2$ con curado a vapor de agua y $114,52 \text{ kg/cm}^2$ con curado convencional.
- Al comparar la resistencia de todos los especímenes de hormigón sometidos a curado con vapor de agua con aquellos curados convencionalmente, se observa que en prácticamente todos los casos existe un deterioro a largo plazo, como se identifica en la gráfica N° 16 existe una pérdida de resistencia si se sigue curando con vapor de agua. El curado con vapor de agua se lo debe realizar hasta los 7 días ya que obtiene una resistencia adecuada, si se sigue curando después de ese tiempo reduce la resistencia. En la gráfica 29 se percibe que a los 14 días se obtuvo una resistencia a la compresión de $119,92 \text{ kg/cm}^2$ con curado con vapor de agua y $121,32 \text{ kg/cm}^2$ con el curado convencional.
- La rapidez de elevación de temperatura tiene poco efecto sobre la resistencia a largo plazo, pero la temperatura máxima es un factor importante: una temperatura de 70 a 80°C da por resultado una reducción en la resistencia de 28 días de casi 5-10 % según los resultados obtenidos.
- Se logró fabricar el equipo de curado acelerado eficientemente, con todos los accesorios necesarios y en tiempo adecuado, con un costo de 7000 Bs. La cámara de vapor no sufrió ningún desperfecto al momento de su utilización debido al buen criterio con la que fue diseñada y construida.
- El tiempo de ciclo de curado de vapor de agua de 6 horas utilizado en esta investigación, es aceptable ya que se obtuvieron resultados coherentes de acuerdo lo previsto (Referencia grafica N° 14).
- El proceso de curado con vapor de agua debe ser estrictamente controlado para evitar el incremento brusco de la temperatura, siendo en tiempos controlados de 33-44 °C/hora por el operador hasta llegar a la temperatura máxima deseada. Después del periodo de enfriamiento se llega una temperatura de equilibrio donde ya no

desciende la temperatura y se mantiene prácticamente constante (Referencia grafica N° 14).

- Los cambios de temperatura en el interior del hormigón sometido a curado a vapor de agua no son los mismos que ocurren en la superficie durante un cierto lapso de tiempo hasta que alcance la temperatura de equilibrio en el centro de la probetas (especímenes). El aumento de temperatura en el centro es más lento, lo mismo sucede con el enfriamiento (Referencia grafica N° 15).
- Con la capacidad calorífica se puede estimar el tiempo para alcanzar la temperatura máxima deseada de acuerdo la cantidad de masa de hormigón que se requiera curar con vapor de agua.
- La aplicación de curado acelerado es muy útil y de fácil aplicación, ahorrando tiempo y costo para proveedores de elementos prefabricados, al poder obtener valores de resistencia casi inmediatamente. En la gráfica N° 17 se puede identificar que se obtuvo una resistencia a la compresión de $126,21 \text{ kg/cm}^2$ curado con vapor de agua y $82,33 \text{ kg/cm}^2$ con curado convencional a los 7 días, con lo que se demuestra la gran ventaja que se puede obtener con el curado a vapor de agua ya que esos bloques de hormigón se puede decir que ya están listos para su manipulación y posterior comercialización.
- El método de curado a vapor es uno de los más utilizado en elementos prefabricados y especialmente en los pretensados, tales como las viguetas, bloque de hormigón, adobes de hormigón, etc. (Referencia planta del alto)
- Se debe seguir el procedimiento establecido para el análisis de las características de los agregados y el cemento, para obtener una adecuada dosificación.

RECOMENDACIONES

Luego de realizar la investigación se recomienda:

- cumplir con las especificaciones de la teoría y otros detalles técnicos referenciados en este documento como por ejemplo el ciclo de curado no mayor a 18 horas.
- Control de materiales y dosificación para obtener los resultados esperados
- Un control adecuado a la calidad del hormigón por ejemplo en la consistencia (Cono de Abrams), para obtener una resistencia adecuada.
- El operador debe tener cuidado al utilizar la cámara de vapor, se debe abrir la puerta de costado para evitar que todo el vapor llegue al cuerpo, también la utilización de guantes para evitar quemaduras al maniobrar los especímenes de hormigón.(cumplir normas de seguridad industrial)
- Continuar con el proceso de investigación con otras características como de dilatación, retracción, etc.