

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

1.1. El Problema

1.1.1. Planteamiento

Durante la época de invierno existe una ineficiencia en el fraguado y curado convencional del hormigón, donde influye de gran manera la variación de temperatura durante el día (por ejemplo la amplitud térmica que se presenta durante la época de invierno entre los meses de Junio – Agosto en la ciudad de Tarija), teniéndose temperaturas mínimas en las mañanas que ocasionan la paralización o el retraso del vaciado de distintas estructuras, lo que repercute en una posible ampliación del plazo de ejecución. Además, en caso que se hormigone bajo dichas temperaturas, se observa un incremento del tiempo de fraguado de la mezcla, que conlleva a la posibilidad de corrosión de las armaduras por el prolongado contacto con el agua. Otro inconveniente es la mayor presencia de fisuras por contracción plástica del hormigón como resultado del descenso brusco de temperatura.

1.1.2. Formulación

En el planteamiento de este trabajo surge la cuestión de cómo reducir los inconvenientes que se originan por el hormigonado en clima frío. Se propone mantener la temperatura del hormigón más elevada que la temperatura ambiente, de manera constante por un periodo de tiempo, para reducir la pérdida brusca del calor de hidratación del cemento y disminuir las fisuras por contracción plástica del hormigón.

1.1.3. Sistematización

Se identifican cuatro factores para elevar la temperatura del hormigón: los componentes de la mezcla de hormigón (agua, agregados pétreos), la mezcla de hormigón en sí o una sección delimitada del lugar de construcción.

La alternativa: calentar la masa de hormigón por medio de electrodos para aplicar el curado eléctrico directo del hormigón durante la época de invierno en Tarija (considerada entre los meses de Junio – Agosto), basándose en la consideración del hormigón fresco como un semiconductor (resistividad de $1 \Omega \cdot m$) (Structural Renovation in Concrete, 2009).

Cabe mencionar que se obvió plantear la incorporación de aditivos aceleradores de fraguado y endurecimiento y aditivos plastificantes al agua de mezcla como alternativa de solución puesto que no se considera un método para elevar la temperatura de la masa de hormigón, que es uno de los objetivos específicos del presente informe.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Aplicar el curado eléctrico en hormigón en masa para disminuir el daño ocasionado por la exposición a las bajas temperaturas durante la época de invierno.

1.2.2. Específicos

- Diseñar el sistema de Curado Eléctrico Directo para aplicar en el curado de una probeta cilíndrica en laboratorio.
- Contrastar la hipótesis entre los resultados de resistencia a compresión de probetas curadas eléctricamente con las curadas por simple inmersión en piscinas de agua.
- Enunciar diferencias físicas entre ambas muestras de hormigón para denotar diferencias en la cantidad de fisuras visibles y características físicas generales.

1.3. Justificación

1.3.1. Teórica

El trabajo de investigación pretende aportar, mediante la formulación de una hipótesis verificable en la época de invierno en la ciudad de Tarija, con una innovación para enriquecer el conocimiento sobre el desarrollo de uno de los métodos de curado de hormigón en clima frío. En el caso que llegara a comprobarse la falsedad de la hipótesis, servirá de base para consideraciones secundarias en investigaciones futuras.

1.3.2. Metodológica

Mediante ensayos experimentales se determinará la ganancia o pérdida temprana de resistencia de compresión en probetas de hormigón curadas eléctricamente con respecto a las curadas naturalmente. Además, se utilizará el método de observación para determinar a simple vista la variación en la cantidad de fisuras por contracción plástica en la superficie, para dar como resultado de la investigación la validez o el rechazo de la hipótesis.

1.3.3. Práctica

Aunque en Tarija no suelen registrarse temperaturas menores a 10°C durante la mitad del día como para definir técnicamente que se trata de una zona con “clima frío”, existe una gran amplitud térmica a lo largo del día con rangos que varían entre los 18 – 22°C durante la época de invierno comprendida entre los meses de Junio - Agosto, lo que afecta de forma directa al proceso de fraguado del hormigón, por lo que se deben limitar los cambios de temperaturas rápidos (considerando rápido el cambio de temperatura que ocurre entre madrugada - medio día y entre medio día – anochecer).

Por esta razón se pretende calentar la masa de hormigón a través de la colocación de electrodos en la superficie de las muestras, lo que permitirá elevar la temperatura de la masa de forma controlada para mantenerla en un estado isotérmico hasta que se considere que adquiera la resistencia suficiente como para dejarla entrar en un periodo de enfriamiento natural y no se vea dañada por la exposición a las bajas temperaturas durante la época de invierno y satisfaga los requisitos de servicio a los que está destinada.

1.4. Hipótesis

Mediante el curado eléctrico del hormigón se adquiere una mayor resistencia a la compresión en edades tempranas y a los veintiocho días la resistencia a compresión obtenida satisface las condiciones de diseño.

1.5. Alcance del Estudio

El campo de investigación del proyecto está delimitado a describir la relación entre la resistencia a compresión y la edad del hormigón curado eléctricamente y a la observación de la presencia de fisuras por contracción plástica en la superficie de la probeta, en base a un hormigón cuya dosificación será calculada para alcanzar una resistencia a compresión de 210 kg/cm^2 , con una relación agua/cemento fija. Se utilizarán dos valores de voltaje para la experimentación.

Se realizarán sobre los agregados los ensayos de Granulometría, Peso específico y absorción, Peso unitario; y sobre las probetas de hormigón el Ensayo Estándar de Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón como lo establece la Norma ASTM C39-04^a a 1, 3, 7, 14 y 28 días de la edad del hormigón. Con los datos obtenidos del ensayo a compresión, se realizará una tabulación y una gráfica comparativa de Resistencia a Compresión Vs Edad del hormigón entre las probetas curadas eléctricamente y las que no, a fin de observar la posible diferencia entre ambos valores. Se verificará el aumento o disminución de fisuras por contracción plástica en la superficie de la probeta solamente por observación, para el registro en el informe correspondiente.

El estudio se limitará a comprobar la validez o falsedad de la hipótesis planteada utilizando el método de observación, de acuerdo a los pasos mencionados anteriormente. No se realizará un análisis a profundidad de los mismos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

Las pruebas de laboratorio en hormigón suelen ejecutarse a una temperatura controlada, normalmente constante. Puesto que las pruebas se hacían principalmente en climas templados, la temperatura normalizada escogida estaba generalmente en la región de 18 a 21°C, de modo que mucha de la información básica respecto a las propiedades del hormigón, tanto fresco como endurecido, se basa sobre el comportamiento del material a estas temperaturas. En la práctica, sin embargo, el hormigón se mezcla a una amplia gama de temperaturas y también permanece en servicio a diferentes temperaturas.

En realidad, el rango actual de temperaturas se ha ampliado considerablemente con la gran cantidad de construcción moderna que está teniendo lugar en países de clima cálido, así como en regiones muy frías.

En consecuencia, es de gran importancia el conocimiento de los efectos de la temperatura en el hormigón.

2.1. 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. 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 hidratado llega a establecerse muy pronto.

Las pruebas de Klieger indican que hay una temperatura óptima durante la vida temprana del hormigón que conducirá a la resistencia más alta a una edad deseada. Sin embargo, no se debe olvidar que, más allá del período inicial de fraguado y endurecimiento, la influencia de la temperatura (dentro de ciertos límites) concuerda con la regla de madurez: una temperatura más alta acelera el desarrollo de resistencia.

Se debe recordar también que la calidad de hormigón depende de su temperatura y no de la temperatura del ambiente que lo rodea, así que el tamaño del miembro también entra en el cuadro porque afecta la elevación de temperatura causada por la hidratación del cemento.

2.2. Propiedades eléctricas y térmicas del hormigón

Los hormigones, al igual que el resto de materiales, poseen propiedades que los identifican. Son de particular interés para el desarrollo de este proyecto las propiedades eléctricas que los caracterizan, específicamente lo relacionado a la resistividad eléctrica.

Con CED, el hormigón en el producto recién vaciado actúa como el resistor de calentamiento. Las *propiedades eléctricas* de la mezcla son determinadas por aquellos de sus componentes y sus proporciones.

a. LOS AGREGADOS

Los agregados normalmente usados para el hormigón y constituyendo la mayor parte de él, tienen una conductividad eléctrica despreciable en estado seco. Aunque esto varía sobre un rango considerable según la composición, pueden ser considerados seguramente en este contexto como aisladores.

b. CEMENTO

Cuando se combina con agua, el cemento forma un electrolito. La conductividad eléctrica de esta pasta de cemento es influenciada por la composición química del cemento. Variaciones de conductividad en la relación 4:1 fueron observadas en cementos Portland de diferente marca. La teoría generalmente aceptada detrás del fenómeno es que la conductividad eléctrica incrementa con el incremento de la concentración álcali de la pasta ($K_2O + Na_2O$). Mezclas conteniendo cementos de alcalinidad más alta son mejores conductores eléctricos.

c. AGUA

El agua de grifo es por sí misma un conductor eléctrico bastante bueno, sin embargo, una relación agua/cemento más alta en realidad disminuye la conductividad del electrolito, debido a una reducción de la concentración de iones alcalinos. Por otro lado, el agua excedente incrementa el volumen de la porción conductora total del hormigón relativa a los ingredientes no-conductores.

En resumen: al incrementar el contenido de agua total de una mezcla, la conductividad se incrementa. El efecto se mejora considerablemente manteniendo simultáneamente una baja relación A/C, es decir, usando una mezcla completamente más rica.

Los hormigones pobres y secos tienen una mayor resistividad eléctrica.

d. AIRE ATRAPADO

Como todos los gases a presión atmosférica, el aire es un conductor pobre. Una mezcla bien compactada, con una baja proporción de burbujas de aire, es un mejor conductor eléctrico. Las propiedades eléctricas de una mezcla de hormigón en su conjunto son más influenciadas por su temperatura y velocidad de ganancia de madurez.

Con la temperatura en aumento, el movimiento iónico en un electrolito se incrementa y la conductividad asciende. La pasta agua-cemento es eléctricamente activa y forma un electrolito, así mientras está en la etapa fluido-plástica, la temperatura en aumento baja la resistividad. Con el comienzo de la hidratación y la transformación gradual de la pasta agua-cemento en una estructura cristalina no-conductora, la tendencia es revertida y la resistividad empieza a ascender. Mientras más baja el contenido de agua inicial, más pronunciado será el incremento.

Con mezclas húmedas y ciclos cortos de curado, estas variaciones son moderadas y el calentamiento puede ser usualmente completado a un voltaje constante. Con cementos secos y ciclos más largos, el equipo de curado tiene que compensar la resistividad creciente.

El agua es un conductor pobre, y su presencia en exceso tiende a reducir la conductividad térmica total de la mezcla. Es frecuentemente necesario al calcular tales factores, considerar la masa del molde de acero – o parte de él. Lo mismo se aplica al refuerzo denso de sección transversal pesada. El último tiene un efecto beneficioso en la distribución de temperatura en el hormigón, porque el acero dulce tiene una conductividad térmica más alta que los agregados.

2.2.1. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad única para cada material, y es el recíproco de su conductividad.

Como indica la Ley de Ohm, la resistividad es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas:

$$R = \frac{U}{I} = r * \frac{l}{A}$$

Donde: R = resistencia eléctrica [Ω]

V = voltaje [V]

I = corriente [A]

r = resistencia específica [Ω *cm]

l = distancia entre placas [cm]

A = área transversal de paso de la corriente [cm²]

La unidad de medida empleada es el k Ω - cm u Ω - m. Esta propiedad depende principalmente del grado de saturación de los poros del hormigón, y de la hidratación de la pasta; y, se ve afectada por el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otros.

Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del hormigón y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Además si el hormigón no está saturado de agua la resistividad crece, por lo que es un indicador de su grado de saturación. Por tanto, la resistividad es un indicador de la calidad del hormigón al indicar su porosidad, y es un indicador de su grado de saturación y por tanto puede servir para el control del grado de curado.

2.3. Curado Eléctrico Directo

En climas más fríos se ha tenido como práctica estándar el detener la mayoría de los trabajos de construcción durante los meses de invierno. Sin embargo, con tiempo limitado y consideraciones económicas, esto llevó a la implementación del curado eléctrico directo, que fue introducido por primera vez en la industria de la traviesa de ferrocarril (Bedankamp et al 1993), utilizando moldes de células individuales. Estas técnicas han sido ampliamente superadas por los moldes de multiceldas en líneas de producción altamente automatizados.

Se tienen varios métodos de curado eléctrico. En uno, la corriente eléctrica pasa a través del hormigón fresco entre electrodos externos. La corriente debe ser alterna, pues la corriente directa conduciría a hidrólisis de la pasta de cemento. En otro método, una corriente grande a bajo voltaje pasa a través del acero de refuerzo del miembro de hormigón. En un tercer método, se emplean grandes mantas eléctricas para calentar la superficie de las losas.

Otro método más utiliza alambres de resistencia aislados embebidos en el miembro de hormigón, después del curado, se cortan y se dejan en el hormigón.

También ha sido notado que el CED debería tener las siguientes sugerencias como guía cuando se utiliza in situ:

- Antes de que empiece el calentamiento, un periodo de 3 a 5 horas después de añadir el agua es requerido para permitir al hormigón ganar resistencia suficiente para soportar las fuerzas térmicas aplicadas.
- Es esencial que el hormigón sea adecuadamente vibrado cuando sea colocado y que la relación mínima agua/cemento sea usada.
- Se debe realizar todo el esfuerzo posible para evitar la evaporación de agua de la superficie con el uso de una cubierta apropiada.

2.3.1. Principios Subyacentes

Masa del producto

Éste es el factor principal que determina los requerimientos de energía (energy and power) en un conjunto de condiciones. En general, cuando se compara con otros métodos de calentamiento de superficie, CED es más adecuado para productos con una gran masa, dentro de los límites. El producto $M * c$, es decir, masa por calor específico, es la medida de la capacidad calorífica del cuerpo, la cantidad de calor que puede absorber y almacenar a una cierta temperatura.

Módulo de superficie

El módulo de superficie equivale a la relación superficie-volumen. Es el cociente entre el área superficial de un objeto y el volumen de dicho objeto. Para una dada forma, el módulo de superficie es inversamente proporcional a su tamaño. La relación superficie-volumen se expresa en unidades de la inversa de la unidad de distancia.

$$\gamma = A/V$$

Donde: γ = módulo de superficie [m^{-1}]

A = área [m^2]

V = volumen [m^3]

Por su propia naturaleza, un incremento en tamaño implica una reducción de esa fracción denotada como módulo de superficie. Cuando las dimensiones lineares de un cuerpo cambian, su superficie cambia en proporción a la segunda, pero su volumen en proporción a la tercera potencia. En consecuencia, el módulo de superficie de un producto pequeño es alto, el de un grande es bajo sin importar su forma. Por ejemplo, γ para un cubo con lados de 0,5 [m] de largo es 12 [m^{-1}] y para un cubo con lados de 1 [m] de largo, 6 [m^{-1}].

Por otro lado, con un tamaño dado determinado por la masa, la forma es obviamente de importancia. Una placa delgada, por ejemplo, tendrá un módulo de superficie considerablemente mucho más alto que un cubo de la misma masa. La superficie de un producto – su límite – determina principalmente la velocidad de la disipación de calor.

Configuración del refuerzo

Los electrodos de una instalación CED son, ya sea, el molde o parte de él, el refuerzo o parte de él, o una combinación de ambos. La mayoría de casos caen en la última categoría. La elección depende en la construcción del molde, y el posicionamiento relativo y la sección transversal de las barras individuales, hilos o alambres que componen el refuerzo.

Pérdidas de calor

La elevación de la temperatura del cuerpo es una función de la velocidad a la que el calor es impartido a o desarrollado dentro de su masa y disponibilidad para aceptar calor (calor específico), y la velocidad a la que el cuerpo pierde calor a los alrededores. La velocidad de disipación de calor es afectada por la cantidad de conducción, convección y radiación sobre sus límites. Cuando el aire – o cualquier otro gas – es el medio circundante, la pérdida por conducción es insignificante y puede ser despreciada.

Las pérdidas por convección son determinadas esencialmente por el tamaño del área expuesta, la cantidad de aire que pasa sobre ella por unidad de tiempo y la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio de refrigeración. Las pérdidas por radiación son la función de área de superficie, textura, color y temperatura; esta última en realidad en proporción a la cuarta potencia (Ley de Stefan-Boltzmann).

Sin embargo, los dos factores de pérdida, es decir aquéllos por convección y radiación pueden ser reemplazados por el único coeficiente λ . Este es la suma de las pérdidas de convección y radiación. Para un producto bien cubierto en una sala de producción cerrada $\lambda = 7 - 9 * 10^{-3} kW / \text{°C} * m^2$, y a campo abierto $\lambda = 12 - 16 * 10^{-3} kW / \text{°C} * m^2$, dependiendo de las condiciones climáticas.

Elevación de la temperatura del sistema

La ecuación respectiva (idealmente para un cuerpo homogéneo, con un desarrollo uniforme del calor) expresando la elevación de temperatura de un sistema, es:

$$\theta = \theta_m * (1 - \varepsilon^{-\frac{T}{\tau}})$$

Donde: θ = elevación de temperatura del sistema [°C]

θ_m = incremento máximo de temperatura que un cuerpo puede alcanzar dentro de un cierto conjunto de condiciones [°C]

T = tiempo [h]

τ = constante temperatura-tiempo [h]

Este incremento máximo de temperatura es determinado solamente por la velocidad de ganancia de calor ($\frac{dQ}{dT}$), y la velocidad de pérdida de calor

El primero es realmente la energía P suministrada a o desarrollada dentro del cuerpo, así:

$$\theta_m = \frac{P}{A\lambda} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Donde: θ_m = incremento máximo de temperatura que un cuerpo puede alcanzar [°C]

P = Energía suministrada o desarrollada dentro del cuerpo [W]

$A\lambda$ = velocidad de pérdida de calor [W/°C]

La constante “temperatura-tiempo”, denota el tiempo requerido por el cuerpo para alcanzar $0,632 * \theta_m$ (Kostenko) y es una expresión de la relación entre la capacidad calorífica del sistema y la disipación del calor:

$$\tau = \frac{c * M_1}{A\lambda * 860} \quad [h]$$

Donde: τ = constante “temperatura-tiempo” [h]

c = capacidad calorífica del hormigón [cal/kg]

M_1 = masa de hormigón [kg]

$A\lambda$ = velocidad de pérdida de calor [W/° C]

Para moldes pesados, la capacidad calorífica del acero por unidad de longitud debería ser también considerada. Sin embargo, el acero es comparativamente un conductor pobre de calor y por lo tanto la estructura de soporte del molde actual puede ser ignorada en este cálculo.

La elevación final de temperatura es la temperatura final de curado menos la temperatura ambiente:

$$\theta_f = t_f - t_0$$

Donde: θ_f = elevación final de temperatura

t_f = temperatura final de curado

t_0 = temperatura ambiente

Esta elevación es determinada por:

- a. La madurez requerida
- b. La longitud total del tiempo de curado disponible
- c. Los parámetros del producto y la pérdidas de calor esperadas
- d. La temperatura ambiente mínima a tener en cuenta

Eficiencia del método de calentamiento

Durante el calentamiento de un cuerpo, parte de la energía suministrada incrementa la temperatura del cuerpo, el resto se pierde en los alrededores. La eficiencia de un método de calentamiento – como el de cualquier otra conversión de energía – está expresada como la relación de la energía útil entre la energía total suministrada:

$$\eta = \frac{E_W}{E_T} * 100\%$$

Donde

$$E_W = E_T - E_L$$

Y $E_W =$ energía útil [kWh]

$E_L =$ pérdidas [kWh]

$E_T =$ energía total [kWh]

$\eta =$ eficiencia del método de calentamiento

Esta eficiencia es la relación estimada del calor de hidratación liberado durante el tiempo total del ciclo (T_t) y el contenido de calor de tres días total. Es una figura empírica, siendo sus valores para: $T_t = 10$ horas, $\eta \simeq 0,60$

Y $T_t = 16$ horas, $\eta \simeq 0,75$

Y $T_t = 20$ horas, $\eta \simeq 0,80$

Energía de hidratación

Para el hormigón, la energía desarrollada dentro del cuerpo (P) está formada por dos componentes: la energía suministrada desde una fuente externa – que en el caso de CED es la red eléctrica – y la energía suministrada por el proceso de hidratación. La última varía con el tiempo y temperatura.

Así, aunque el calor de hidratación total del cemento, sobre un periodo de tiempo, usualmente puede ser averiguado de tablas o determinarse experimentalmente, la energía de hidratación usada en cálculos es una cantidad promedio artificial:

$$P_{hy} = \frac{Q_{hy} * \eta}{T_t}$$

Donde: $P_{hy} =$ energía de hidratación [kW]

$Q_{hy} =$ calor de hidratación [kWh]

$\eta =$ eficiencia del método de calentamiento

$T_t =$ tiempo actual de curado [h]

La máxima elevación de temperatura, debida solamente al calor de hidratación, puede ser bastante considerable. Su magnitud depende del contenido de calor del cemento usado y su cantidad por unidad de producto. El calor de hidratación será:

$$Q_{hy} = \frac{q * 10^3 * w * V}{860} [kWh]$$

Donde q = contenido de calor del cemento [cal/g]

w = contenido de cemento de la mezcla [Kg/m³]

V = volumen del producto por unidad de longitud [m³]

Q_{hy} = calor de hidratación [kWh]

Finalmente, el incremento promedio de la temperatura del producto por encima de la ambiental debido a la hidratación de la mezcla es:

$$\theta_{mhy} = \frac{P_{hy}}{A * \lambda}$$

Donde P_{hy} = energía de hidratación [kW]

$A\lambda$ = velocidad de pérdida de calor [W/° C]

θ_{mhy} = incremento promedio de la temperatura del producto por encima de la ambiental debido a la hidratación de la mezcla [°C]

2.3.2. El Proceso de Curado

El curado del hormigón consiste en dos etapas: los procesos de fraguado y endurecimiento. Durante el fraguado, el hormigón pierde su fluidez pero gana muy poca resistencia. La ruptura del hormigón fraguado, o parcialmente fraguado, digamos, por vibración no tiene un efecto adverso en el desarrollo posterior de la resistencia. El desarrollo de la resistencia tiene lugar durante la segunda etapa: el endurecimiento o proceso de maduración. La velocidad de la ganancia de madurez de un producto de hormigón es una función tanto del tiempo de curado como de la temperatura.

En la práctica, el valor de madurez (M) está usualmente conformado por dos a cuatro componentes, obtenidos durante el ciclo total de curado, que comprende los siguientes periodos:

- a) El periodo de almacenamiento previo al calor (curado natural).
- b) El periodo de calentamiento.
- c) El periodo de calor constante (isotérmico).
- d) El periodo de enfriamiento.

2.4.2.1. El periodo de almacenamiento previo al calor (curado natural)

Con todos los métodos de calentamiento convencionales – a excepción de la inyección de vapor – se ha comprobado que es necesario observar un tiempo de curado natural substancial antes de la aplicación de calor. El tiempo natural de curado permite al hormigón ganar suficiente resistencia para soportar las fuerzas disruptivas creadas por la aplicación de calor.

El hormigón fresco es una masa heterogénea que contiene, en adición a los agregados, cemento y agua, una buena cantidad de agua excedente y aire atrapado. Los coeficientes de expansión térmica para agregados y cemento son del mismo orden de magnitud, pero para agua es aproximadamente 15 veces, y para aire es 200 veces más alto. Una vez que el hormigón calentado comienza a ganar resistencia, pero no la suficiente para contrarrestar las fuerzas de su expansión diferencial, se forman vacíos permanentes desde dentro, resultando en la resistencia posterior reducida.

Con CED, el hormigón puede actualmente ser calentado durante el vaciado sin calentar indebidamente el molde. Esto causa que la expansión diferencial tome lugar predominantemente durante la etapa fluido-plástico, permitiendo que el aire atrapado escape sin ningún efecto residual, y conduce el agua excedente hacia la superficie. Sin embargo, con mezclas muy secas, la longitud del tiempo de vaciado debe ser considerada cuidadosamente. En adición, la aplicación tardía de calor usualmente permite un mejor esquema de explotación de energía, difiriendo los picos de energía de calefacción a períodos de menor demanda en la fábrica.

Por lo tanto, si el periodo de almacenamiento previo al calor debe omitirse o no, debe considerarse en función de sus méritos en cada caso.

2.4.2.2. El periodo de calentamiento

Esta es una etapa esencial para cualquier proceso de curado acelerado. El tiempo de calentamiento debe ser minimizado para conservar energía y hacer el proceso más económico. Sin embargo, esta tentativa se ve frenada por las siguientes consideraciones:

a. Velocidad de calentamiento admisible

Una vez que el proceso de endurecimiento ha comenzado, el flujo de calor administrado debe ser mantenido a un nivel donde las fuerzas de expansión se desarrollan a una velocidad más lenta que la ganancia en resistencia. Esto es bastante difícil para calcular y principalmente se basa en la experiencia. Depende en gran medida del método de calentamiento y las propiedades térmicas de la mezcla.

Donde el calor es llevado a la superficie del molde y/o del producto, éste se propaga a las partes interiores por conducción. Una indebida velocidad de calentamiento alta puede crear gradientes de temperatura pronunciados dentro del producto, causando, en adición a la porosidad, un desarrollo no uniforme de la estructura.

Con el calentamiento interno, el calentamiento es más uniforme y las diferencias de temperatura son más pequeñas. Sin embargo, el peligro de la formación de vacíos debe ser considerado. Otro factor que afecta la velocidad de calentamiento permisible es la construcción del molde. Moldes rígidos y profundos con pequeñas aberturas para el vaciado son capaces de soportar el efecto de velocidades de calentamiento más altas más fácilmente que los moldes débiles, superficiales y abiertos.

b. El tamaño y costo del equipo de curado

La energía térmica impartida al hormigón es el producto de la energía y tiempo de calentamiento. Mientras más corto sea este último, mayor será la primera. Cuando se escoge el tamaño correcto del equipo, los factores económicos juegan un papel importante además de las consideraciones prácticas de ingeniería. El balance entre el capital anual y los costos de energía deben ser considerados.

c. Requisitos de producción

Este aspecto está estrechamente relacionado al inciso b. si la programación de producción prevista es un solo turno o la operación del cambio de un solo molde, el equipo de curado sea utilizado solo por pocas horas en un periodo de 24 horas. Consecuentemente, el costo anual de capital (por unidad procesada) será más alto que aquel cuando el equipo es utilizado dos o tres veces diariamente. La energía ahorrada por un tiempo de calentamiento menor sería compensada en gran magnitud por el incremento de costo de capital.

Otro factor a ser considerado es que equipo más largo requiere más espacio y más ventilación.

2.4.2.3. El periodo de calor constante (isotérmico)

Es el periodo durante el cual el cuerpo de hormigón se encuentra a temperatura constante. Con los métodos convencionales de calentamiento indirecto, el periodo isotérmico fue la etapa más larga y esencial del curado, sin embargo, con CED, es realmente necesario solo con productos de baja capacidad calorífica y alta velocidad de disipación: en pocas palabras, productos con un alto módulo de superficie. Placas delgadas, dinteles, postes para cercas se calientan rápidamente y pierden calor así de fácil. La energía térmica necesaria en esta etapa debe ser la suficiente como para cubrir las pérdidas de calor a la temperatura de curado particular.

Esto no se aplica a configuraciones masivas. Durante el periodo de calentamiento más largo, una considerable cantidad de energía térmica es almacenada en el hormigón. Esto es posteriormente incrementado por el inicio de la hidratación. El efecto es una elevación continua de temperatura después de que el calentamiento ha sido cortado y una velocidad de enfriamiento muy reducida.

2.4.2.4. El periodo de enfriamiento

Con productos ligeros, el periodo de enfriamiento es corto y tiene un efecto poco práctico en la ganancia de madurez. Con un buen aislamiento térmico – esencial a cualquier velocidad para la conservación de energía – su duración puede ser algo extendida.

No obstante, la curva de enfriamiento es bastante empinada y sigue de cerca la ecuación:

$$\theta = \theta_f * e^{-\frac{T}{\tau}}$$

Donde: θ = elevación de temperatura del sistema [°C]

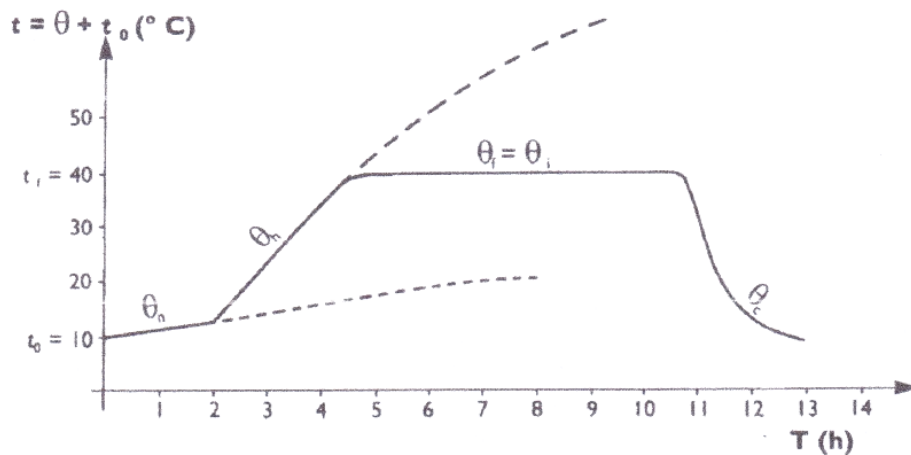
θ_f = temperatura del producto por encima de la ambiental al final del periodo isotérmico [°C]

T = tiempo [h]

τ = constante temperatura-tiempo [h]

Las curvas de calentamiento-enfriamiento respectivas se muestran en Figura 2.1.

Figura 2.1. Curvas de calentamiento y enfriamiento



Fuente: Direct Electrical Curing of Concrete: Basic Design, I.D. Kafry.

Para la Figura 2.1:

Periodo de curado natural:

$$\theta_{nav} \cong \theta_{mhy}$$

Donde: θ_{nav} = elevación de temperatura promedio del sistema en el periodo de curado natural [°C]

θ_{mhy} = incremento promedio de la temperatura del producto por encima de la ambiental debido a la hidratación de la mezcla [°C]

Periodo de calentamiento:

$$\theta_{hav} = \frac{1}{T_h} \left(\theta_m * \left[T_h + \tau * \left(\varepsilon^{-\frac{T_h}{\tau}} - 1 \right) \right] \right)$$

Donde: θ_{hav} = elevación de temperatura del sistema en el periodo de calentamiento [°C]

θ_m = incremento de temperatura del producto por encima de la ambiental al final del periodo de curado natural [°C]

T_h = duración del periodo de calentamiento [h]

τ = constante temperatura-tiempo [h]

Periodo isotérmico:

$$\theta_i = \theta_f = \text{constante}$$

Donde: θ_i = temperatura del sistema en el periodo de isotérmico [°C]

θ_f = incremento de temperatura del producto por encima de la ambiental al final del periodo de calentamiento [°C]

Periodo de enfriamiento:

$$\theta_{cav} = \frac{1}{T_c} \left(\tau * \theta_f * \left(1 - \varepsilon^{-\frac{T_c}{\tau}} \right) + \theta_{mhy} * \left[T_c + \tau * \left(\varepsilon^{-\frac{T_c}{\tau}} - 1 \right) \right] \right)$$

Donde: θ_{cav} = elevación de temperatura promedio del sistema en el periodo de enfriamiento [°C]

θ_f = incremento de temperatura del producto por encima de la ambiental al final del periodo isotérmico [°C]

θ_{mhy} = incremento promedio de la temperatura del producto por encima de la ambiental debido a la hidratación de la mezcla [°C]

T_t = duración total del ciclo de curado [h]

T_c = duración del periodo de enfriamiento [h]

τ = constante temperatura-tiempo [h]

En el manejo de productos masivos, la buena práctica involucra prolongar el periodo de calentamiento hasta que el incremento de temperatura limitante θ_f algo más alto es alcanzado. Entonces, el calentamiento es detenido en su totalidad.

Por este tiempo, la hidratación ha comenzado y el incremento de temperatura continúa por un tiempo, debido al calor interno desarrollado por la reacción química, que continua afectando la curva de enfriamiento durante la mayor parte de su duración.

Como se indica previamente, la energía de hidratación (P_{hy}) y consecuentemente el incremento promedio de la temperatura del producto por encima de la ambiental debido a la hidratación de la mezcla (θ_{mhy}) son cantidades promedio artificiales, despreciando el hecho de que ambas son variables con el tiempo. Sin embargo, son herramientas útiles en los cálculos de madurez y proveen resultados realistas.

2.3.3. Consideraciones de diseño

Parámetros de producto

Los parámetros más importantes y relevantes para el diseño de un esquema particular incluyen la masa y forma del producto, la configuración de refuerzo y las propiedades térmicas y eléctricas del hormigón.

Requerimientos de curado

Largo del ciclo de curado

El tipo de producto y el procedimiento de producción total afectan el diseño de un ciclo de curado. Productos de alta calidad, especialmente unidades pretensadas que requieren una alta resistencia de desmolde también necesitan un tiempo de curado más largo. En muchos aspectos, lo mismo se aplica a un incremento en tamaño.

Con pequeños productos de módulo de superficie elevado, La mayor parte del ciclo es absorbida por el periodo isotérmico cuando la energía calorífica es suministrada constantemente para mantener la temperatura del producto. Si, por razones dictadas por la producción, el tiempo de curado es reducido, la parte isotérmica del ciclo sería más afectada.

La pérdida de tiempo podría ser compensada elevando la temperatura de curado y el gasto total de energía sería difícilmente afectado. Algún incremento en la potencia nominal del equipo de curado sería entonces esperado.

La resistencia de desmolde

Una de las principales razones para el curado acelerado de productos de hormigón prefabricado es la mayor explotación del equipo de producción y espacio disponible, es decir, un tiempo más corto de volcado de molde.

Este periodo de tiempo es la suma de los ciclos de trabajo y curado. El último es determinado por la resistencia mínima de desmolde o elevación requerida, es decir, la duración de tiempo necesaria para obtener la resistencia requerida. Como se estableció previamente, la ganancia de resistencia de un producto es una función de ambos tiempo y temperatura. Si el tiempo ha de ser acortado entonces la temperatura tendrá que ser incrementada. La posibilidad de incrementar la temperatura de curado, sin embargo, es limitada. La temperatura máxima del producto nunca debe alcanzar 100°C y, preferiblemente, ser mantenida debajo de los 90°C. Esto significa un rango superior para el punto de corte de calor (la temperatura “final”) de 70° - 80°C. Consideraciones económicas rara vez justificarían una temperatura pico más alta.

Calidad del producto

Los productos y estructuras de hormigón son diseñados usualmente para la resistencia desarrollada a los 28 días. Más allá de ese periodo una mayor ganancia de madurez es esperada, aunque a una velocidad gradualmente decreciente. Con el curado acelerado se debe tener cuidado que a pesar de la rápida ganancia de madurez inicial, el proceso de maduración posterior no sea perturbado. Es importante que se prevenga una pérdida indebida de humedad durante el curado, especialmente con mezclas secas. Esto se aplica a CED, y cualquier otro método de calentamiento en seco.

Una mezcla con insuficiente agua para la hidratación tiene prácticamente el mismo efecto que si el contenido de cemento se redujera. El producto final será de menor resistencia.

La pérdida de humedad puede ser prevenida cubriendo el producto con un material impermeable (tal como polietileno, caucho, etc.) inmediatamente después del vaciado, o rociando las superficies de hormigón expuestas con un compuesto sellador de agua. La otra causa principal de deficiencia de resistencia posterior puede ser el uso de una velocidad de calentamiento excesiva.

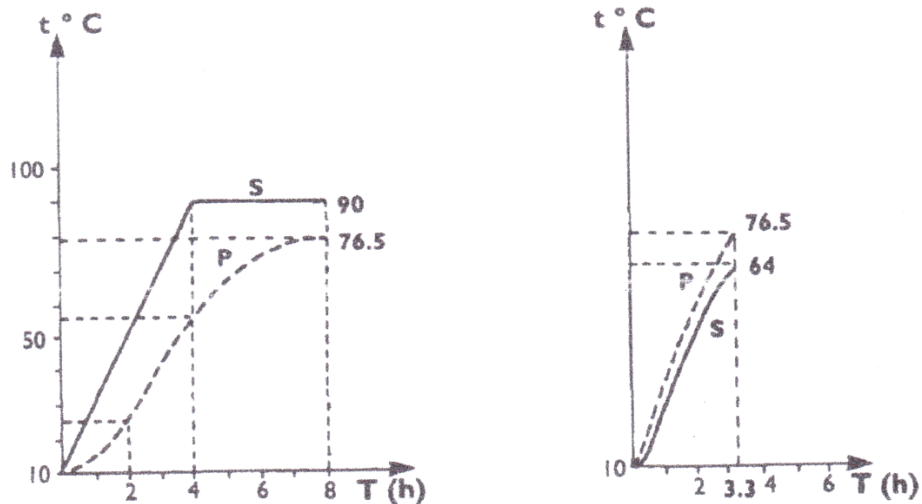
Aunque con CED una elevación de temperatura de 35 [°C/h] en la etapa fluido-plástica es bastante aceptable, debe ser mantenida debajo de los 20 [°C/h] durante la primer hora del periodo de fraguado-endurecimiento. Con el avance de la madurez, la velocidad de calentamiento puede ser incrementada gradualmente de nuevo.

El acabado de la superficie de un producto depende en gran medida de la mezcla. Sin embargo, aun con una mezcla rica, un tiempo suficiente a temperatura elevada debe ser permitido para que las partículas finas migren a la interfaz producto-molde.

El color del producto será más claro a una temperatura de superficie más alta, debido a la concentración de cal libre. Hormigones curados con CED tienden a mostrar un color más oscuro aun a madureces avanzadas lo cual es similar a los productos curados naturalmente esto se debe al gradiente de temperatura invertido desde el centro a la superficie. Por la misma razón, CED es menos probable de causar grietas térmicas que los métodos de calentamiento de superficie. Con el último, la superficie del producto experimenta los mayores cambios de temperatura, alcanzando la temperatura máxima y mínima del producto (Figura 2.2) por consiguiente, en el enfriamiento, el mayor esfuerzo de contracción aparece en esta capa superficial. Con CED, la superficie del producto *siempre* tiene la menor temperatura; en consecuencia, para la misma temperatura promedio del producto los cambios volumétricos son menores en esa capa vulnerable.

Sin considerar los cambios de temperatura de superficie más pequeños con CED, los productos de una forma más intrincada, donde la contracción diferencial puede ocurrir, pueden desarrollar grietas. En tales casos, la mejor solución es prolongar el ciclo de enfriamiento, posiblemente con la abertura gradual del molde.

Figura 2.2. Cambios de la superficie vs Temperatura promedio del producto en una losa. Velocidad del incremento de temperatura, 20 [°C/h]. S – superficie; P – producto.



Calentado de la superficie por ambos lados

CED

Fuente: Direct Electrical Curing of Concrete: Basic Design, I.D. Kafry.

Madurez

El hecho de que la resistencia del hormigón se incremente con el progreso de la hidratación del cemento, asociado con el hecho de que la rapidez de la hidratación aumenta con el incremento de temperatura, conduce a la proposición de que la resistencia puede expresarse como una función de la combinación tiempo-temperatura.

La ley de la madurez es generalmente aceptada como una forma de establecer una relación entre el tiempo, la temperatura de curado y la resistencia a compresión (Kirkbride 1971). El concepto es que la resistencia de cualquier hormigón puede estar relacionada a su madurez expresada como un producto de tiempo y temperatura de curado.

Esta ley proporciona una guía de diseño útil en el cálculo de un ciclo de curado a altas temperaturas. La relación formulada por Sadgrove y Pink es:

$$M = T * \left(\frac{t + 16}{36} \right)^2$$

Donde $M = \text{madurez } [^{\circ}\text{C} * \text{h}]$

$T = \text{tiempo } [\text{h}]$

$t = \text{temperatura de curado } [^{\circ}\text{C}]$

Y denota el desarrollo de resistencia relacionado a una mezcla de hormigón similar curada a 20°C (otros investigadores como Saul y Nurse, Mironov y Ganin, Nykänen, etc. llegaron a una fórmula algo diferente, pero la enunciada arriba parece tener una buena validez general para el rango de temperaturas de curado acelerado usado).

La temperatura promedio de curado puede ser calculada a partir de la resistencia de desmolde requerida y la longitud del ciclo de curado.

Luego de tener el tiempo requerido para ganar la resistencia específica a una temperatura de curado de 20° C, la madurez se refleja en la fórmula:

$$M = T_{20} * \left(\frac{t + 16}{36} \right)^2$$

Donde $M = \text{madurez } [^{\circ}\text{C} * \text{h}]$

$T_{20} = \text{tiempo requerido para ganar la resistencia específica a una temperatura de curado de } 20^{\circ} \text{ C } [\text{h}]$

$t = \text{temperatura de curado } [^{\circ}\text{C}]$

Reemplazando T_{20} por el tiempo de curado específico T_t , la temperatura de curado promedio será:

$$t_t = \left(\frac{M}{T_t} \right)^{\frac{1}{2}} * 36 - 16$$

Donde $M = \text{madurez } [^{\circ}\text{C} * \text{h}]$

$T_t = \text{tiempo total de ciclo } [\text{h}]$

$t_t = \text{temperatura de curado promedio } [^{\circ}\text{C}]$

Sin embargo, la madurez está compuesta por varios componentes, obtenidos durante el tiempo total de curado. Cuando se tiene un módulo de superficie alto ($\gamma > 20$), es importante considerar la etapa isotérmica también y se vuelve predominante. El tiempo de calentamiento es cortado al mínimo y la ganancia de madurez toma lugar principalmente en la etapa isotérmica.

Resumiendo lo precedente, la ganancia total de madurez de un producto, usando el curado acelerado, puede ser representado por la fórmula general:

$$M_t = M_n + M_h + M_i + M_c$$

Donde: M_t = ganancia de madurez total durante el ciclo de curado [$^{\circ}\text{C} * \text{h}$]

M_n = ganancia de madurez durante el periodo de curado natural [$^{\circ}\text{C} * \text{h}$]

M_h = ganancia de madurez durante el periodo de calentamiento [$^{\circ}\text{C} * \text{h}$]

M_i = ganancia de madurez durante el periodo isotérmico [$^{\circ}\text{C} * \text{h}$]

M_c = ganancia de madurez durante el periodo de enfriamiento [$^{\circ}\text{C} * \text{h}$]

Dentro de una longitud dada del ciclo total de curado, ellas son independientes y el lapso de tiempo asignado para cada una (o la omisión de alguna) se determinara por los factores siguientes:

- a) Longitud del ciclo total de curado
- b) La temperatura ambiente predominante
- c) Módulo de superficie del producto
- d) El requerimiento de resistencia para el desmolde.
- e) Procedimiento de producción
- f) Consideraciones económicas

La madurez ganada y la temperatura de la masa de hormigón durante las cuatro etapas será:

Periodo de curado natural:

Madurez:

$$M_n = T_n * \left(\frac{t_{nav} + 16}{36} \right)^2$$

Temperatura del periodo:

$$t_{nav} = \theta_{nav} + t_0$$

Donde M_n = madurez obtenida durante el periodo de curado natural [°C * h]

T_n = duración del periodo de curado natural [h]

t_{nav} = temperatura promedio durante el periodo de curado natural [°C]

t_0 = temperatura ambiente inicial [°C]

θ_{nav} = elevación de temperatura promedio del sistema en el periodo de curado natural [°C]

Periodo de calentamiento:

Madurez:

$$M_h = T_h * \left(\frac{t_{hav} + 16}{36} \right)^2$$

Temperatura del periodo:

$$t_{hav} = \theta_{hav} + t_0$$

Donde M_h = madurez obtenida durante el periodo de calentamiento [°C * h]

T_h = duración del periodo de calentamiento [h]

t_{hav} = temperatura promedio durante el periodo de calentamiento [°C]

t_0 = temperatura ambiente inicial [°C]

θ_{hav} = incremento promedio de temperatura que el cuerpo de hormigón puede alcanzar durante el periodo de calentamiento [°C]

Periodo isotérmico:

Madurez:

$$M_i = T_i * \left(\frac{t_i + 16}{36} \right)^2$$

Temperatura del periodo:

$$t_i = \theta_i + t_0$$

Además,

$$\theta_i = \text{constante} = \theta_f$$

Donde M_i = madurez obtenida durante el periodo isotérmico [°C * h]

T_i = duración del periodo isotérmico [h]

t_i = temperatura promedio durante el periodo isotérmico [°C]

t_0 = temperatura ambiente inicial [°C]

θ_f = incremento de temperatura del producto por encima de la ambiental al final del periodo de calentamiento [°C]

θ_i = elevación de temperatura durante el periodo isotérmico [°C]

Periodo de enfriamiento:

Madurez:

$$M_c = T_c * \left(\frac{t_{cav} + 16}{36} \right)^2$$

Temperatura del periodo:

$$t_{cav} = \theta_{cav} + t_0$$

Donde M_c = madurez obtenida durante el periodo de enfriamiento [°C * h]

T_c = duración del periodo de enfriamiento [h]

t_{cav} = temperatura promedio durante el periodo de enfriamiento [°C]

t_0 = temperatura ambiente inicial [°C]

θ_{cav} = incremento de temperatura promedio del producto durante el periodo de calentamiento [°C]

Potencia necesaria del sistema CED

La elevación de temperatura de un cuerpo homogéneo, como se mencionó en el punto 2.3.1, es la potencia suministrada y desarrollada en el cuerpo, dividida entre la pérdida de calor sobre su límite. Igualando las relaciones del incremento máximo de temperatura que un cuerpo puede alcanzar dentro de un cierto conjunto de condiciones, tenemos que:

$$\theta_m = \frac{\theta_f}{1 - e^{-\frac{T_h}{\tau}}} = \frac{P}{A * \lambda}$$

Despejando la potencia:

$$P = \frac{\theta_f * A * \lambda}{1 - e^{-\frac{T_h}{\tau}}}$$

Donde: θ = elevación de temperatura del sistema [°C]

θ_m = incremento máximo de temperatura que un cuerpo puede alcanzar dentro de un cierto conjunto de condiciones [°C]

T = tiempo [h]

τ = constante temperatura-tiempo [h]

P = Energía suministrada o desarrollada dentro del cuerpo [W]

$A\lambda$ = velocidad de pérdida de calor [W/°C]

Ésta es la potencia requerida para elevar la temperatura de una longitud de un metro de hormigón o molde de t_0 a t_f en un tiempo T_t y cubre las pérdidas de calor durante esta etapa.

En consecuencia, la potencia para elevar la temperatura del hormigón se deriva de dos fuentes, la fuente interna es de hidratación y la red eléctrica forma el suministro externo. El último es por lo tanto la diferencia ente la potencia total requerida y la potencia por hidratación:

$$P_{el\acute{e}ctrica} = P_t - P_{hy}$$

Donde: $P_{el\acute{e}ctrica}$ = potencia necesaria del sistema CED [kW]

P_t = potencia suministrada o desarrollada dentro del cuerpo [kW]

P_{hy} = potencia de hidratación [kW]

Voltaje de trabajo necesario del sistema CED

De acuerdo a la ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{R}$$

$$P = I * U = \frac{U^2}{R}$$

Donde I = Corriente [A]

P = Potencia [W]

U = Voltaje [V]

R = Resistencia [Ω]

Para poder calcular la tensión/voltaje necesario para obtener la potencia requerida, se debe conocer primero la carga resistiva:

$$p = \frac{U^2}{r}$$

$$U = (p * r)^{1/2}$$

Donde p = Potencia unitaria [W/cm²]

U = Voltaje [V]

r = Resistividad unitaria [Ω *cm²]

La configuración más simple es el caso de dos platos electrodos paralelos y equidistantes d dimensiones idénticas. En este caso el campo eléctrico es uniforme. El flujo de corriente y la distribución de calor resultante también son uniformes (Figura 2.3)

Figura 2.3. Campo eléctrico entre platos paralelos equidistantes



Fuente: Direct Electrical Curing of Concrete: Basic Design, I.D. Kafry.

Si F es el área promedio de electrodos en $[\text{cm}^2]$, d la distancia entre los electrodos en $[\text{cm}]$ y P_e la potencia total calculada del ciclo específico en $[\text{W}]$, entonces:

$$p = \frac{P_e}{F}$$

$$r = \rho * d$$

Donde: p = potencia disipada en 1 cm^2 de sección transversal de hormigón, paralelo a los electrodos $[\text{W}/\text{cm}^2]$

r = resistividad de 1 cm^2 de sección transversal $[\Omega * \text{cm}^2]$

ρ = resistividad específica, referida a 1 cm^3 de hormigón $[\Omega * \text{cm}]$

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Materiales constituyentes de la mezcla de hormigón

3.1.1. Agregado grueso

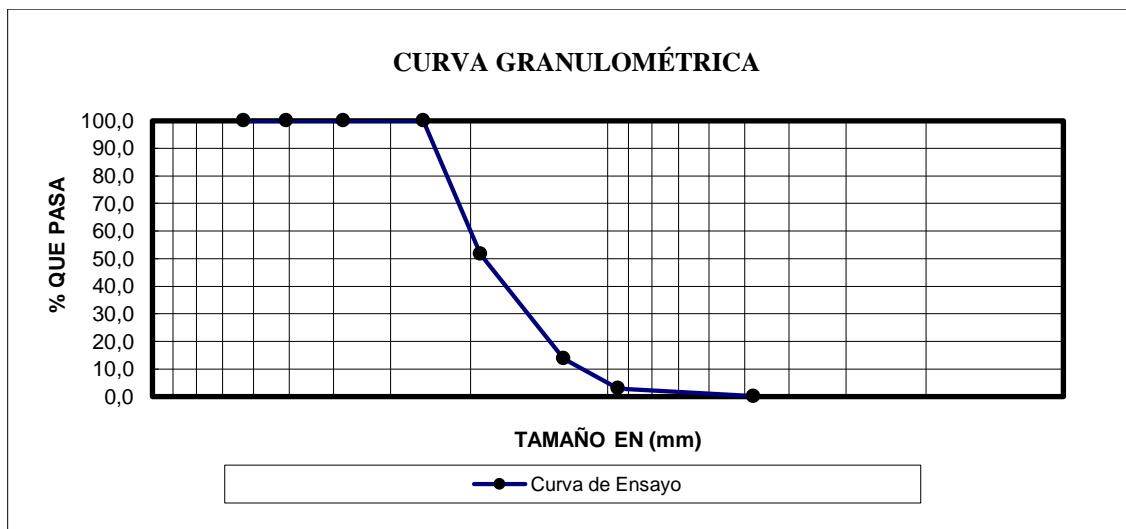
Se utiliza grava chancada de 25 mm de diámetro nominal. Los resultados de la caracterización se muestran a continuación en las Tablas 3.1-3.2 y Figura 3.1. El procedimiento es detallado en el anexo 1.

Tabla 3.1 Análisis granulométrico del agregado grueso

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret,	Retenido Acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,0
2	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0
1	25,40	0,00	0,00	0,00	100,0
3/4	19,05	2415,60	2415,60	48,31	51,7
1/2	12,50	1896,12	4311,72	86,23	13,8
3/8	9,50	541,80	4853,52	97,07	2,9
Nº4	4,80	138,68	4992,20	99,84	0,2
BASE	0	7,80	5000,00	100,00	0,0

Fuente. Elaboración Propia

Figura 3.1 Curva granulométrica del agregado grueso



Fuente. Elaboración Propia

Tabla 3.2 Propiedades del agregado grueso

Peso específico	2,67 g/cm ³
Peso unitario	1,52 g/cm ³
Porcentaje de absorción	1,2 %
Porcentaje de humedad	2,88 %

Fuente. Elaboración Propia

3.1.2. Agregado fino

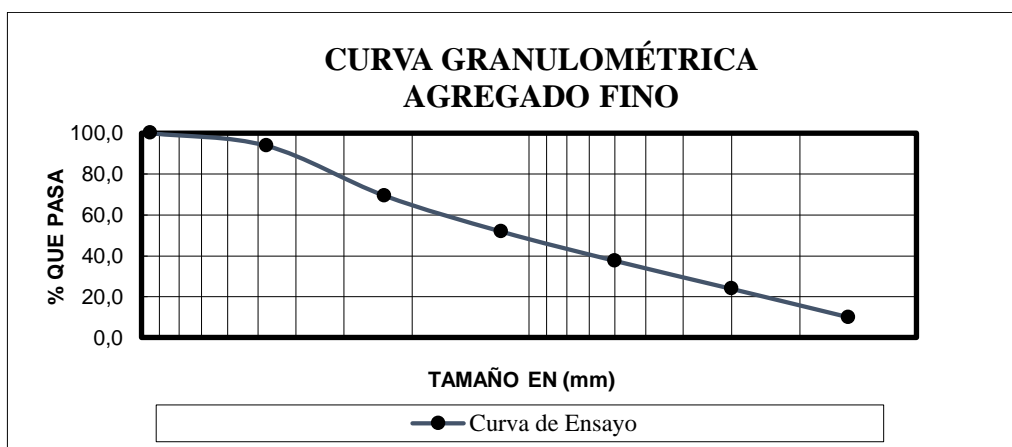
Es empleada arena con un módulo de finura de 3.14, junto a las siguientes características en Tablas 3.3-3.4 y Figura 3.1. El procedimiento es detallado en el anexo 1.

Tabla 3.3 Análisis granulométrico del agregado fino

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3/8	9.50	14.40	0.00	0.00	100.0
N°4	4.75	62.40	62.40	6.24	93.8
N°8	2.36	243.50	305.90	30.59	69.4
N°16	1.18	175.30	481.20	48.12	51.9
N°30	0.60	143.50	624.70	62.47	37.5
N°50	0.30	136.90	761.60	76.16	23.8
N°100	0.15	138.50	900.10	90.01	10.0
BASE		83.20	983.30	98.33	1.7

Fuente. Elaboración Propia

Figura 3.2 Curva granulométrica del agregado fino



Fuente. Elaboración Propia

Tabla 3.4 Propiedades del agregado fino

Peso específico	2,29 g/cm ³
Peso unitario	1,68 g/cm ³
Porcentaje de absorción	1,55 %
Porcentaje de humedad	6,10 %

Fuente. Elaboración Propia

3.1.3. Cemento

Se utiliza cemento tipo IP-30 (*ASTM C595*: Cemento Portland con adición de Puzolana. Categoría resistente media, con resistencia a la compresión de 30 [MPa] a 28 días en mortero normalizado de cemento), con un peso específico de 3,14 g/cm³.

3.2. Diseño de la mezcla de hormigón

La dosificación de la mezcla fue diseñada de acuerdo al código ACI 211.1 (2004). Las proporciones de la mezcla para 1 m³ de hormigón son mostradas en la Tabla 3.5. El procedimiento de diseño puede ser observado en el anexo 2.

Tabla 3.5 Proporciones de mezcla de hormigón

Relación a/c: 0,46		
Material	Proporción en peso	Masa [kg/m ³]
Cemento	1	409
Arena	1,8	717
Grava	2,4	985
Agua	0,46	188

Fuente. Elaboración Propia

3.3. Diseño del sistema de Curado Eléctrico Directo (CED)

3.3.1. Datos básicos requeridos

Tabla 3.6 Datos básicos requeridos

a) Cantidad de hormigón a ser curado en un turno de ocho horas.	
Diámetro de la probeta	0,15 m
Altura de la probeta	0,30 m
Volumen de la probeta	0,0053 m ³
Número de probetas	1
b) Número de turnos en 24 horas	
No relevante	
c) Número de líneas de producción previstas y diseño general del sitio de producción	
Uno	
d) Resistencia de desmolde requerida	
65% de f_{cK}	137 kg/cm ²
e) Propiedades de la mezcla	
Cantidad de cemento:	315 kg/m ³
Relación agua/cemento:	0,46
f) Parámetros del producto	
Diámetro de la probeta:	0,15 m
Altura de la probeta:	0,30 m
Superficie de la probeta:	0,177 m ²
g) Datos de refuerzo de acero	
No corresponde, se trabajará con hormigón en masa	
h) Datos del encofrado	
Encofrado metálico circulas con 15 cm de diámetro interno.	
i) Procedimiento de producción previsto	
Se prepara una probeta cubierta alrededor con poliestireno de 5 cm de espesor como aislante térmico.	

j) Condiciones del sitio	
Ciudad de Tarija.	
Temperatura mínima promedio en invierno	10° C
k) Naturaleza del local	
Ídem al anterior	
l) Suministro de energía eléctrica	
Disponible en el sitio de producción.	

Fuente. Elaboración propia

3.1.2. Diseño del ciclo de curado eléctrico

Tabla 3.7 Cálculos preliminares

	Magnitud
Contenido de cemento por m ³ de hormigón	408,70 kg
Volumen de hormigón por curado	0,0053 m ³
Masa de hormigón por curado	12,309 kg
Superficie de hormigón por curado	0,177 m ²
Módulo de superficie	33,3 /m
Pérdida de calor por convección	8 W/m ² °C
Pérdidas por convección + radiación	1,41 W/°C
Contenido de calor del hormigón	60 cal/g
Calor de hidratación	0,15 kWh
Tiempo total de curado	24 h
Fracción del calor de hidratación liberado durante ese tiempo	0,85
Potencia por hidratación disponible	0,005 kW
Incremento de temperatura	3,8° C
Temperatura ambiente mínima a ser considerada dentro del ambiente de vaciado	10° C
Madurez durante el curado natural	16,43
Calor específico del hormigón	0,2 Cal/kg
Constante de tiempo del sistema	2,30 h

Fuente. Elaboración propia

Determinación de los parámetros básicos del ciclo de curado:

Los tiempos y temperaturas asignados a los varios componentes del ciclo serán determinados por prueba y error.

La duración del periodo isotérmico del ciclo y la temperatura máxima a alcanzar serán estimados respecto a la madurez obtenida naturalmente a las 24 horas del vaciado.

Primero se estima la temperatura aproximada durante la cual se obtiene la misma madurez en un tiempo más corto.

Considerando un tiempo total de 8 horas para las primeras 3 etapas, donde 3 horas se dedican al fraguado natural inicial; 2 horas al periodo de calentamiento y 3 horas al periodo isotérmico, la temperatura de curado promedio será:

$$T_t = 3,5 \text{ h}$$

$$t_t = 62,00^\circ \text{ C}$$

Se asume: $t_f = 60^\circ \text{ C}$ (Caso 1)

Estimando la temperatura aproximada durante la cual se obtiene una madurez igual al doble que la obtenida previamente, alargando el periodo isotérmico dando y teniendo una duración de 11 horas para las primeras 3 etapas.

$$M_n'' = 32,86$$

$$T_t = 6,5 \text{ h}$$

$$t_t = 64,95^\circ \text{ C}$$

Se asume: $t_f = 60^\circ \text{ C}$ (Caso 2)

Estimando la temperatura aproximada durante la cual se obtiene una madurez con un incremento del 50% respecto a la obtenida previamente, durante el mismo tiempo que el primer caso.

$$M_n'' = 24,65$$

$$T_t = 3,5 \text{ h}$$

$$t_t = 79,53^\circ \text{ C}$$

Se asume: $t_f = 60^\circ \text{ C}$ (Caso 3)

Se plantean estos tres casos para el diseño del ciclo de curado eléctrico para poder realizar una comparación de los resultados obtenidos y hallar los valores óptimos de la temperatura máxima y duración del periodo isotérmico.

Diseño del ciclo de curado eléctrico:

1er Caso. Probetas curadas eléctricamente por un intervalo de 5 horas, alcanzando una temperatura máxima de 60° C .

Tabla 3.8 Diseño del ciclo de curado eléctrico: Caso 1

	Magnitud
Tiempo de curado natural	3 h
Duración de periodo de calentamiento	2 h
Duración de periodo isotérmico	3 h
Duración de periodo de enfriamiento	16 h
Temperatura ambiente inicial	10° C
Temperatura final	60° C
Incremento de temperatura	50° C
Incremento máximo de temperatura que puede alcanzar	$86,1^\circ \text{ C}$
Madurez durante el curado natural	2,05
Incremento de temperatura de calentamiento promedio	$28,6^\circ \text{ C}$
Temperatura de calentamiento promedio	$38,6^\circ \text{ C}$
Madurez durante el periodo de calentamiento	4,60
Temperatura de periodo isotérmico promedio	$60,0^\circ \text{ C}$
Madurez durante el periodo isotérmico	13,37
Incremento de temperatura de enfriamiento promedio	$10,4^\circ \text{ C}$
Temperatura de enfriamiento promedio	$20,4^\circ \text{ C}$

Madurez durante el enfriamiento	16,38
Madurez total resultante	36,41
Potencia total requerida por probeta	0,122 kW
Potencia eléctrica requerida por probeta	0,116 kW
Consumo esperado por probeta	0,27 kWh
Consumo esperado por m ³ de hormigón	50,5 kWh/m ³
Resistencia específica referida a 1 cm ³ de hormigón	210 Ω * cm
Distancia entre placas	30 cm
Resistividad unitaria	6300 Ω * cm ²
Área promedio de contacto	1767,1 cm ²
Potencia disipada	0,066 W/cm ²
Voltaje requerido	20,37 V

Fuente. Elaboración propia

2do Caso. Probetas curadas eléctricamente por un intervalo de 8 horas, alcanzando una temperatura máxima de 60° C.

Tabla 3.9 Diseño del ciclo de curado eléctrico: Caso 2

	Magnitud
Tiempo de curado natural	3 h
Duración de periodo de calentamiento	2 h
Duración de periodo isotérmico	6 h
Duración de periodo de enfriamiento	13 h
Temperatura ambiente inicial	10° C
Temperatura final	60° C
Incremento de temperatura	50° C
Incremento máximo de temperatura que puede alcanzar	86,1° C
Madurez durante el curado natural	2,05
Incremento de temperatura de calentamiento promedio	28,6° C
Temperatura de calentamiento promedio	38,6° C

Madurez durante el periodo de calentamiento	4,60
Temperatura de periodo isotérmico promedio	60,0° C
Madurez durante el periodo isotérmico	26,74
Incremento de temperatura de enfriamiento promedio	11,9° C
Temperatura de enfriamiento promedio	21,9° C
Madurez durante el enfriamiento	14,44
Madurez total resultante	47,83
Potencia total requerida por probeta	0,122 kW
Potencia eléctrica requerida por probeta	0,116 kW
Consumo esperado por probeta	0,30 kWh
Consumo esperado por m ³ de hormigón	57,0 kWh/m ³
Resistencia específica referida a 1 cm ³ de hormigón	210 Ω * cm
Distancia entre placas	30 cm
Resistividad unitaria	210 Ω * cm ²
Área promedio de contacto	1767,1 cm ²
Potencia disipada	0,066 W/cm ²
Voltaje requerido	20,37 V

Fuente. Elaboración propia

3er Caso. Probetas curadas eléctricamente por un intervalo de 8 horas, alcanzando una temperatura máxima de 60° C.

Tabla 3.10 Diseño del ciclo de curado eléctrico: Caso 3

	Magnitud
Tiempo de curado natural	3 h
Duración de periodo de calentamiento	2 h
Duración de periodo isotérmico	3 h
Duración de periodo de enfriamiento	16 h
Temperatura ambiente inicial	10° C
Temperatura final	80° C
Incremento de temperatura	70° C

Incremento máximo de temperatura que puede alcanzar	120,6° C
Madurez durante el curado natural	2,05
Incremento de temperatura de calentamiento promedio	40,0° C
Temperatura de calentamiento promedio	50,0° C
Madurez durante el periodo de calentamiento	6,72
Temperatura de periodo isotérmico promedio	80,0° C
Madurez durante el periodo isotérmico	21,33
Incremento de temperatura de enfriamiento promedio	58,6° C
Temperatura de enfriamiento promedio	68,6° C
Madurez durante el enfriamiento	88,26
Madurez total resultante	118,37
Potencia total requerida por probeta	0,170 kW
Potencia eléctrica requerida por probeta	0,165 kW
Consumo esperado por probeta	0,38 kWh
Consumo esperado por m ³ de hormigón	71,7 kWh/m ³
Resistencia específica referida a 1 cm ³ de hormigón	210 Ω * cm
Distancia entre placas	30 cm
Resistividad unitaria	6300 Ω * cm ²
Área promedio de contacto	1767,1 cm ²
Potencia disipada	0,093 W/cm ²
Voltaje requerido	24,26 V

Fuente. Elaboración propia

Resultando en:

Tabla 3.11. Características de los ciclos de curado eléctrico

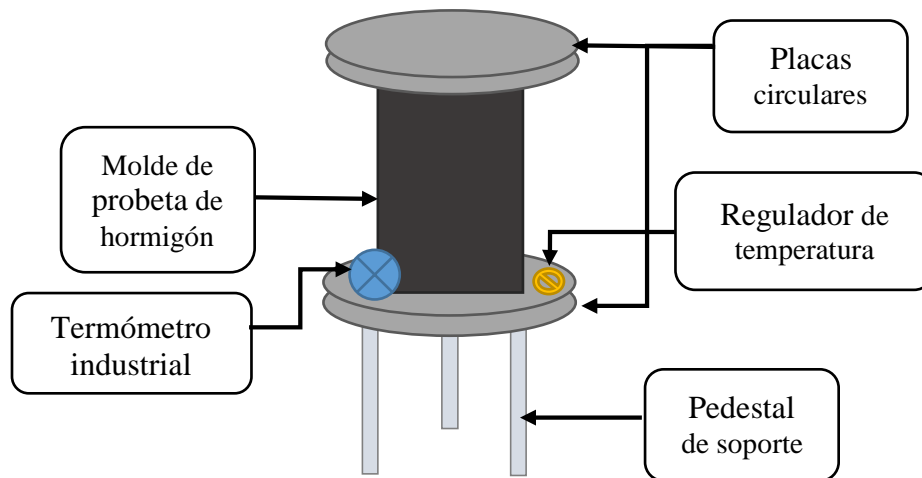
	1er caso	2do caso	3er caso
Tiempo total de ciclo	24 h	24 h	24 h
<i>Periodo inicial de fraguado natural</i>	3 h	3 h	3 h
<i>Periodo de calentamiento</i>	2 h	2 h	2 h
<i>Periodo isotérmico</i>	3 h	6 h	3 h
<i>Periodo de enfriamiento</i>	16 h	13 h	16 h
Temperatura máxima de calentamiento	60° C	60° C	80° C
Consumo esperado	0,267 kWh	0,302 kWh	0,380 kWh
Potencia requerida	116,41 W	116,41 W	165,12 W
Voltaje requerido	20,37 V	20,37 V	24,26 V

Fuente. Elaboración propia

3.2. Esquema del sistema de Curado Eléctrico Directo (CED)

Se utiliza la configuración más simple para el sistema: dos placas circulares de aluminio (calentadores con resistencia eléctrica) ubicadas superior e inferiormente, que transmiten calor en forma longitudinal a la probeta de hormigón (Figura 3.3).

Figura 3.3. Esquema del sistema CED



Fuente. Elaboración Propia

Estos platos tienen una potencia nominal de 200 W y una tensión nominal de 24 V, junto a un regulador de temperatura que permite ajustar la temperatura máxima a la requerida por cada caso planteado para el ciclo de curado.

Para controlar la temperatura, se emplea un termómetro industrial con aguja de superficie ubicado en el platillo inferior.

Para reducir la disipación de calor al medio ambiente, se cubre el equipo con poliestireno expandido de 50 mm de espesor.

3.3. Pruebas Aplicadas

3.3.1. Resistencia a compresión

La magnitud de la resistencia a compresión del hormigón es calculada para varias probetas de hormigón curado tanto normalmente como eléctricamente a distintas edades en base a las especificaciones de ASTM C39-04a: Ensayo Estándar de Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón.

Este ensayo consiste en aplicar una fuerza axial de compresión a probetas cilíndricas a una velocidad dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a compresión del espécimen es calculada dividiendo la máxima carga obtenida durante el ensayo entre el área de la sección transversal de la probeta.

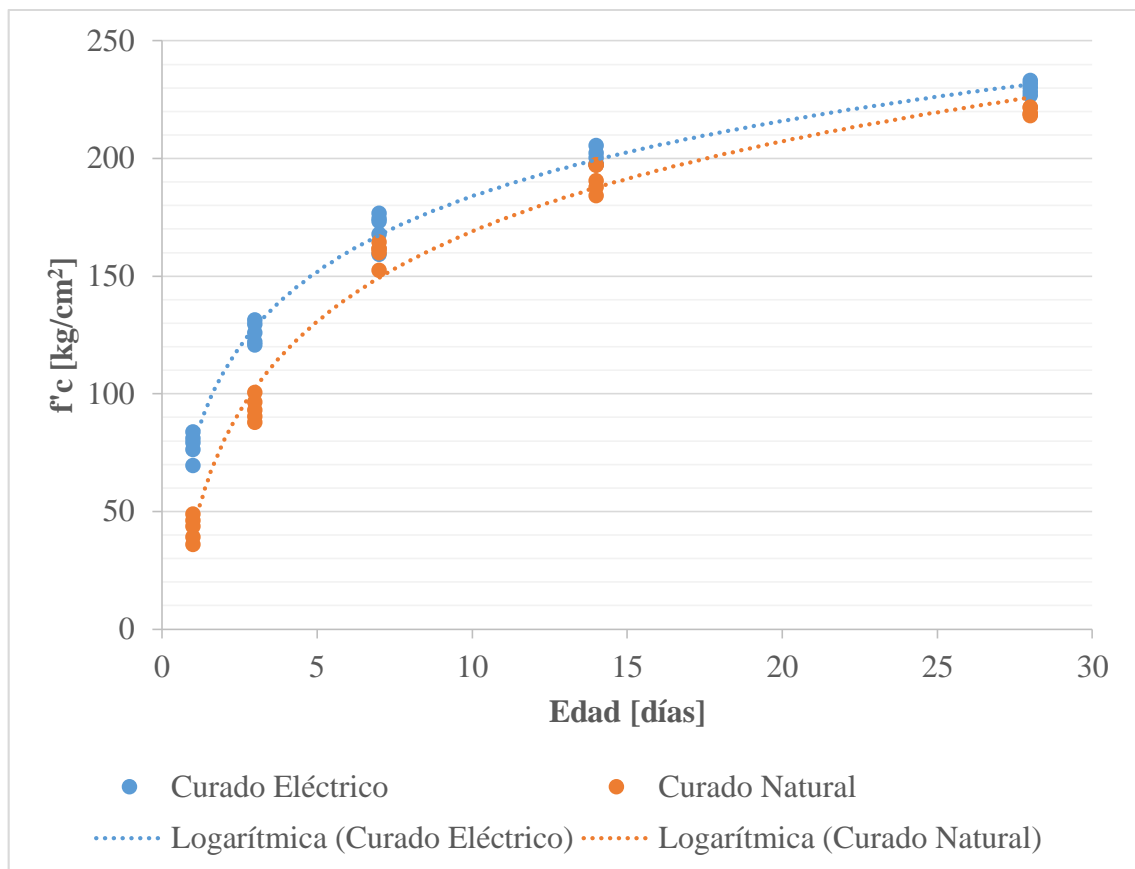
CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caso 1. Probetas curadas eléctricamente por un intervalo de 5 horas, alcanzando una temperatura máxima de 60° C.

Aplicando el Ensayo Estándar de Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón (detalle en anexo 3), se obtienen los siguientes resultados:

Figura 4.1. Resistencia vs Tiempo (60° C, 5 h)



Fuente. Elaboración Propia

Se realizó la rotura de probetas a 1, 3, 7, 14 y 28 días después del vaciado de las muestras. A lo largo de este intervalo de tiempo se tiene una resistencia más alta en los especímenes curados eléctricamente en comparación con los curados convencionalmente (Figura 4.1), notándose un mayor incremento el primer día y uno mínimo a los 28 días (Figura 4.2).

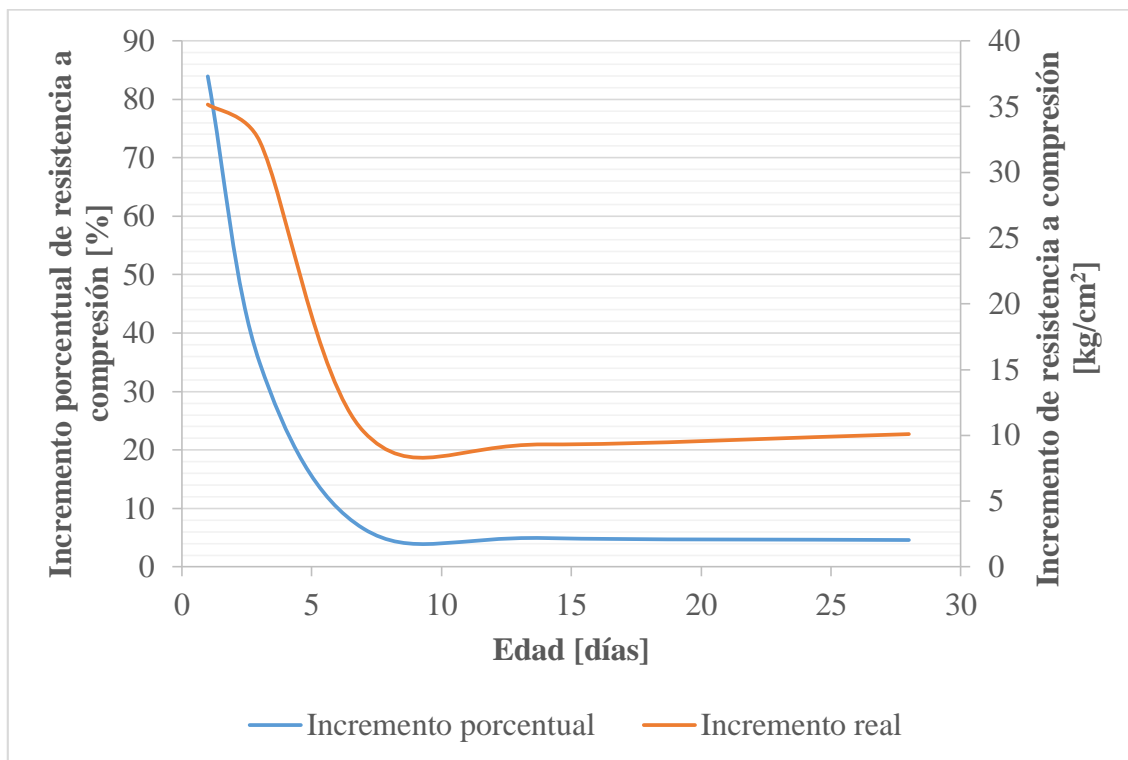
De los datos obtenidos experimentalmente, se obtiene la Tabla 4.1 de incremento promedio real y porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente, a distintas edades del hormigón.

Tabla 4.1 Incremento promedio real y porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente. Caso 1.

Edad [días]	Incremento promedio de resistencia a compresión	
	Real [kg/cm ²]	Porcentual [%]
1	35,2	83,9
3	32,4	34,9
7	10,3	6,5
14	9,3	4,9
28	10,1	4,6

Fuente. Elaboración Propia

Figura 4.2. Incremento promedio de resistencia a compresión vs Edad (60° C, 5 h)



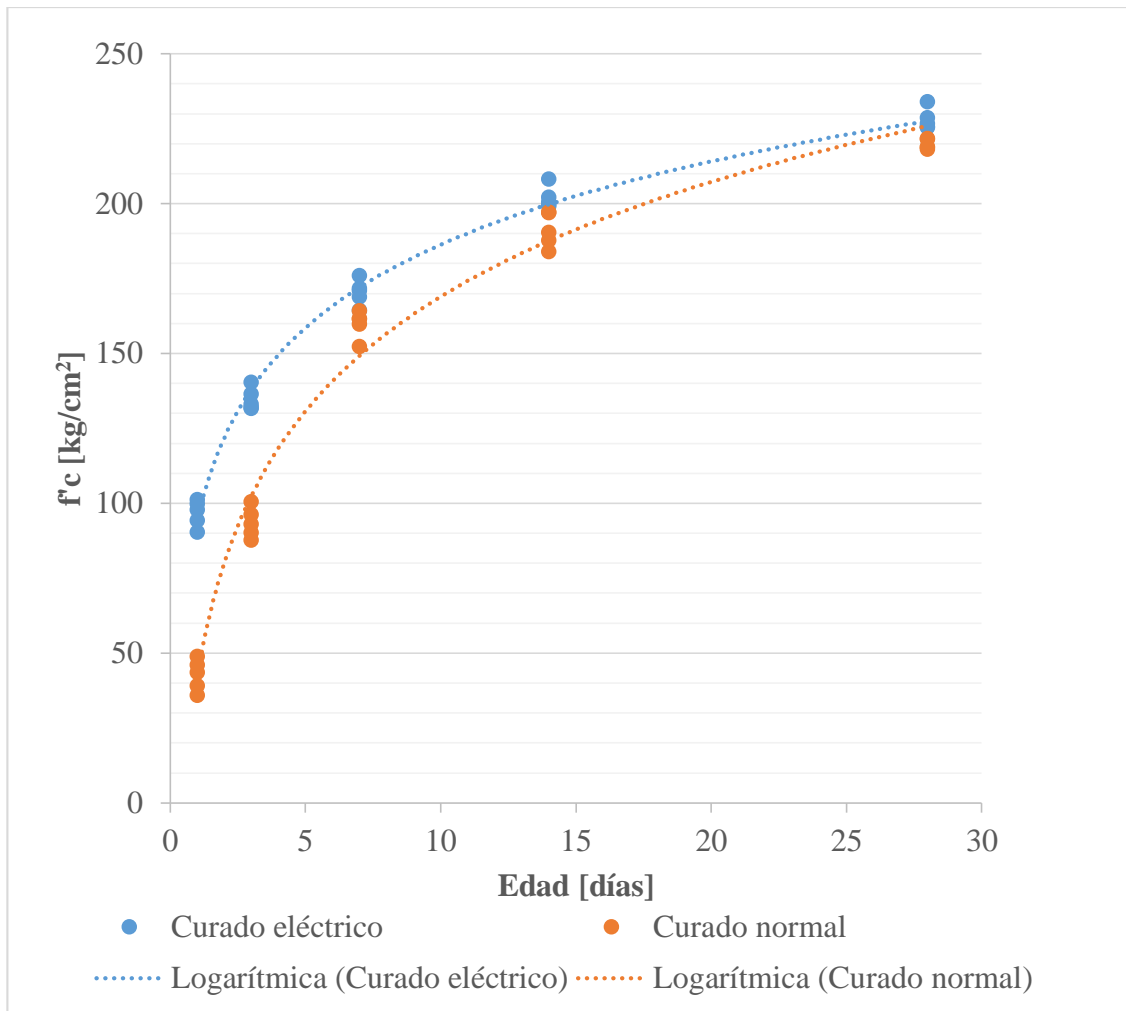
Fuente. Elaboración Propia

En la Figura 4.2 se observa el mayor incremento promedio de la resistencia a compresión al primer día de edad del hormigón, con 35 kg/cm^2 (correspondiente al 84% de la resistencia a compresión obtenida en las probetas bajo curado natural) en las probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas convencionalmente. A lo largo del intervalo de tiempo, se tiene que este incremento porcentual se reduce, obteniendo una resistencia casi igual entre las probetas de ambos métodos de curado. Esto se debe al incremento de la temperatura de la mezcla durante el primer día, donde a pesar de que se logra incrementar la velocidad de hidratación y por ende obtener una resistencia temprana más alta, se daña la microestructura de la mezcla debido a que durante el proceso de calentamiento, ésta no es lo suficientemente resistente para soportar la expansión de sus distintos componentes debido al incremento de temperatura y se presume que ocasionan microfracturas en la estructura de la mezcla debido a estos esfuerzos.

Caso 2. Probetas curadas eléctricamente por un intervalo de 8 horas, alcanzando una temperatura máxima de 60° C.

Aplicando el Ensayo Estándar de Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón, se obtienen los siguientes resultados:

Figura 4.3. Resistencia vs Tiempo (60° C, 8 h)



Fuente. Elaboración Propia

Al igual que las probetas del caso anterior, se realizó la rotura de probetas a 1, 3, 7, 14 y 28 días después del vaciado de las muestras. A lo largo de este intervalo de tiempo se tiene una resistencia más alta en los especímenes curados eléctricamente en comparación con los curados convencionalmente (Figura 4.3), notándose un mayor incremento el primer día y uno mínimo a los 28 días (Figura 4.4).

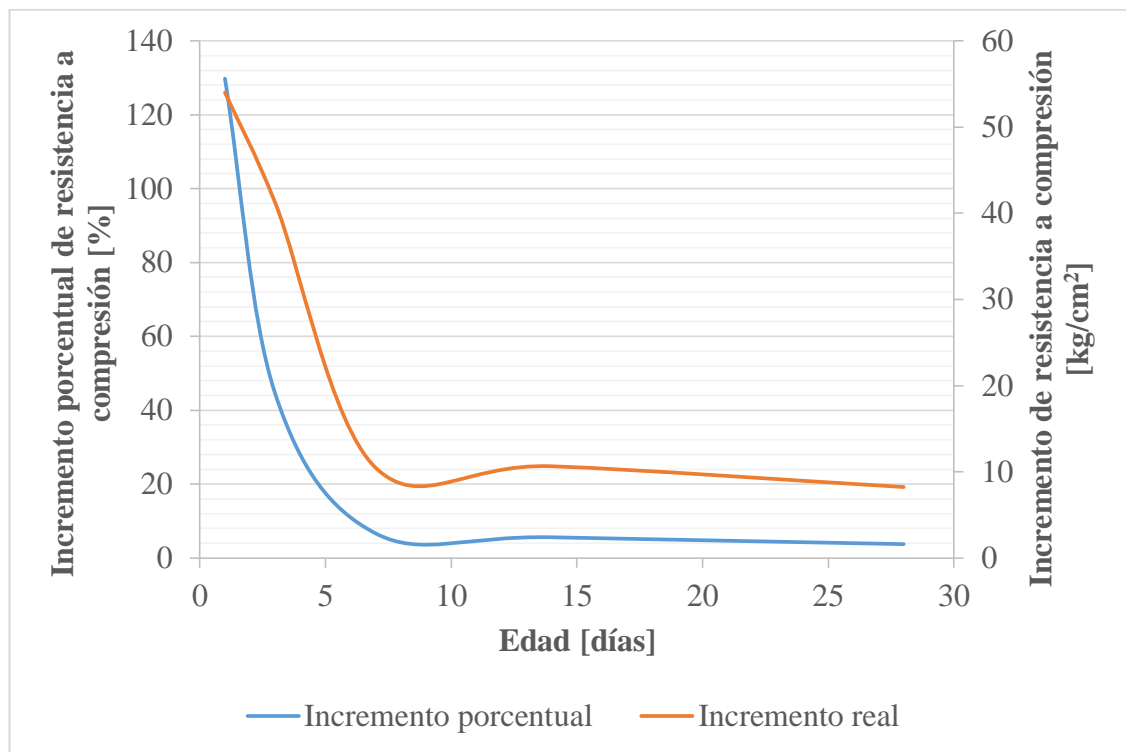
De los datos obtenidos experimentalmente, se obtiene la Tabla 4.2 de incremento promedio real y porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente, a distintas edades del hormigón.

Tabla 4.2 Incremento promedio real y porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente. Caso 2.

Edad [días]	Incremento promedio de resistencia a compresión	
	Real [kg/cm ²]	Porcentual [%]
1	54,0	129,8
3	41,2	44,4
7	10,5	6,6
14	10,6	5,6
28	8,2	3,7

Fuente. Elaboración Propia

Figura 4.4. Incremento promedio de resistencia a compresión vs Edad (60° C, 8 h)



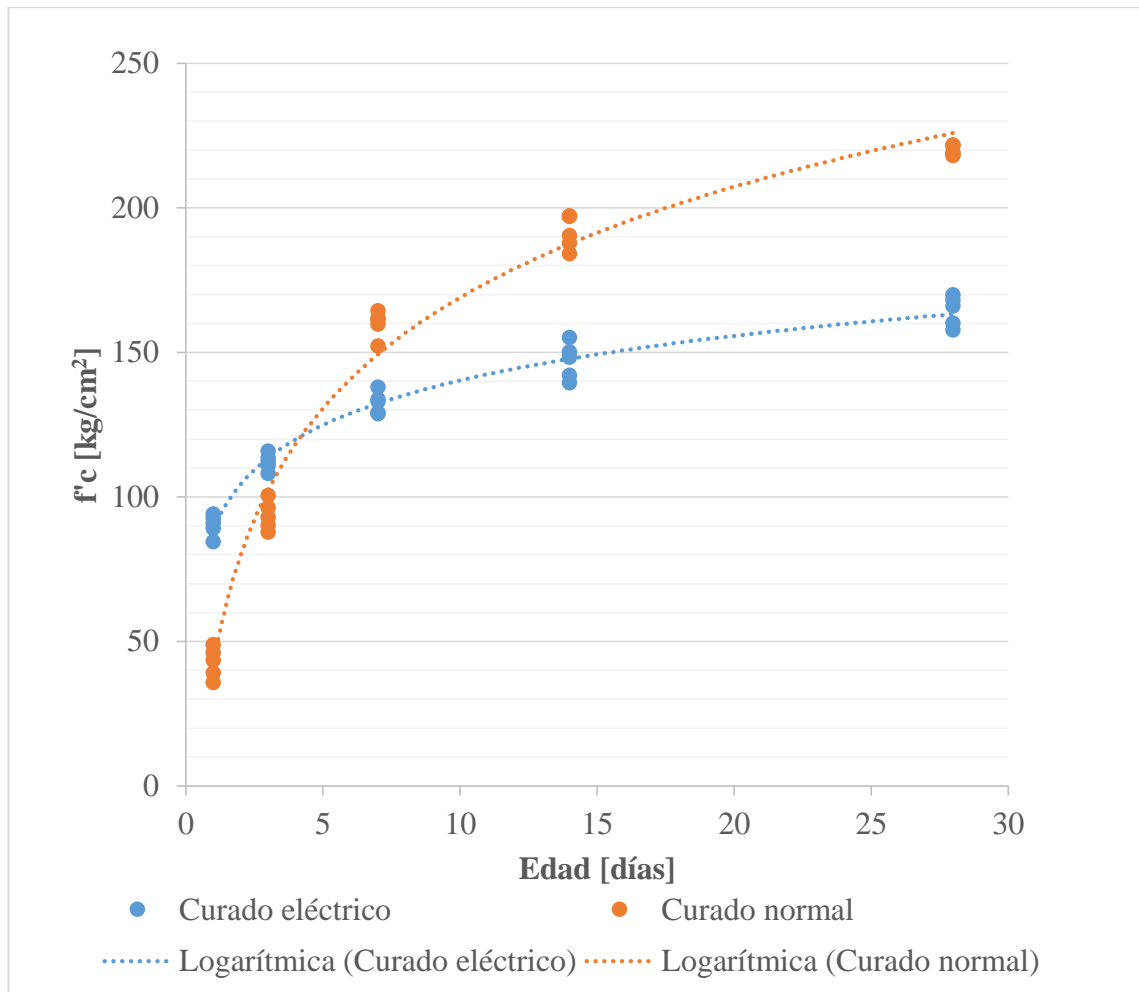
Fuente. Elaboración Propia

En la figura 4.4 se observa el mayor incremento promedio de la resistencia a compresión al primer día de edad del hormigón, con 54 kg/cm^2 (correspondiente al 130% de la resistencia a compresión obtenida en las probetas bajo curado natural) en las probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas convencionalmente. A lo largo del intervalo de tiempo, se tiene que este incremento porcentual se reduce, obteniendo una resistencia casi igual entre las probetas de ambos métodos de curado, debido a los esfuerzos termomecánicos a los que se someten los especímenes durante el primer día.

Caso 3. Probetas curadas eléctricamente por un intervalo de 5 horas, alcanzando una temperatura máxima de 80° C.

Aplicando el Ensayo Estándar de Resistencia a Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón, se obtienen los siguientes resultados:

Figura 4.5. Resistencia vs Tiempo (80° C, 5 h)



Fuente. Elaboración Propia

Al igual que las probetas de los casos anteriores, se realizó la rotura de probetas a 1, 3, 7, 14 y 28 días después del vaciado de las muestras. A lo largo de este intervalo de tiempo se tiene una resistencia más alta en los especímenes curados eléctricamente en comparación con los curados convencionalmente (Figura 4.5), sin embargo, a los 28 días se tiene una reducción considerable de la misma (Figura 4.6).

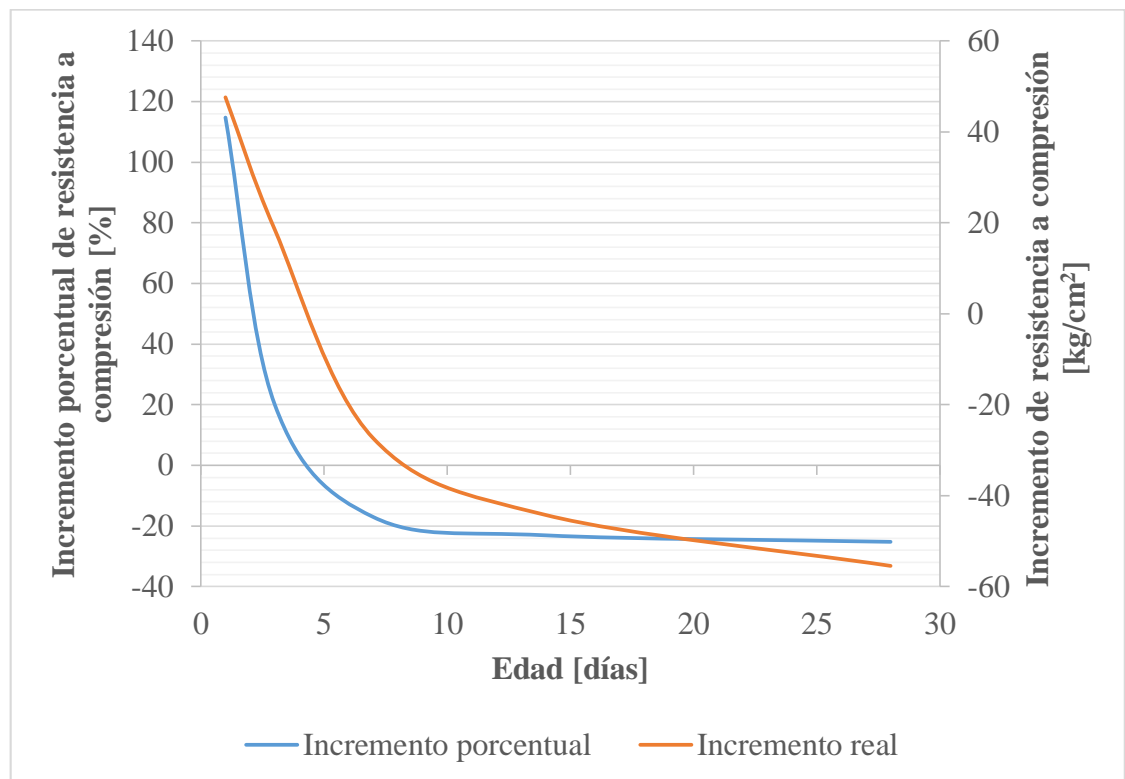
De los datos obtenidos experimentalmente, se obtiene la Tabla 4.3 de incremento promedio real y porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente, a distintas edades del hormigón.

Tabla 4.3 Incremento promedio real y porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente. Caso 3.

Edad [días]	Incremento promedio de resistencia a compresión	
	Real [kg/cm ²]	Porcentual [%]
1	47,6	114,7
3	18,5	20,1
7	-27,4	-17,0
14	-44,2	-23,1
28	-55,4	-25,2

Fuente. Elaboración Propia

Figura 4.6. Incremento promedio de resistencia a compresión vs Edad (80° C, 5 h)



Fuente. Elaboración Propia

En la figura 4.6 se observa el mayor incremento promedio de la resistencia a compresión al primer día de edad del hormigón, con 48 kg/cm^2 (correspondiente al 115% de la resistencia a compresión obtenida en las probetas bajo curado natural) en las probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas convencionalmente. A lo largo del intervalo de tiempo, se tiene que este incremento porcentual se reduce, obteniendo una resistencia menor en las probetas curadas eléctricamente a los 28 días, debido a los esfuerzos termomecánicos a los que se someten los especímenes durante el primer día, siendo esta disminución de resistencia en promedio de 55 kg/cm^2 , correspondiente al 25% en comparación con la resistencia tipo de las probetas curadas convencionalmente.

En la figura 4.7 se realiza la comparación del incremento promedio de la resistencia a compresión obtenida en los tres casos analizados, donde se observa que al primer día se obtiene una resistencia temprana mayor cuando el proceso de calentamiento dura 8 horas y se llega a 60° C , correspondiente al segundo caso, el cual tiene una etapa isotérmica de 3 horas más larga que el primero, obteniendo a los 28 días resistencias similares, cumpliendo la especificación de diseño de 210 kg/cm^2 .

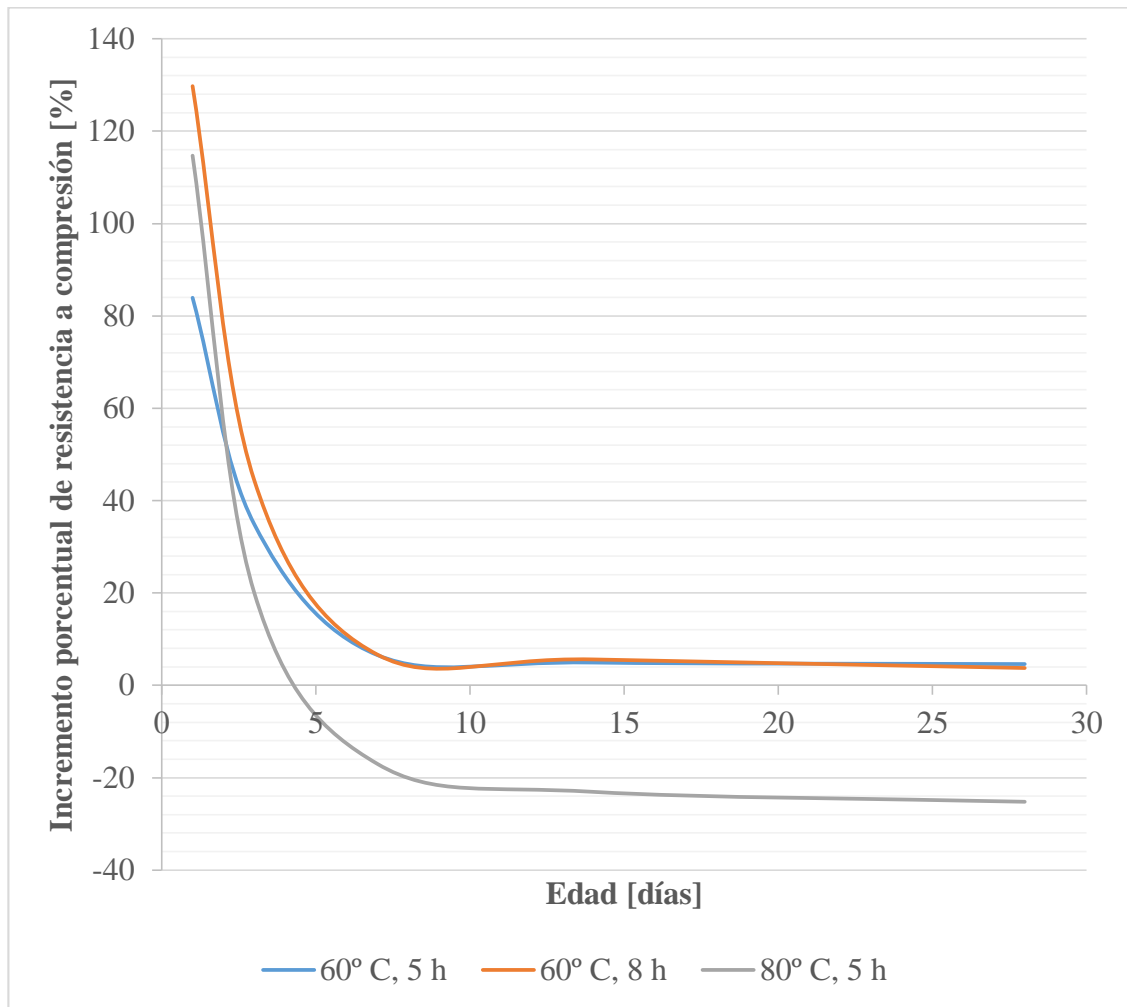
En la tabla 4.4 se muestra una comparación del incremento promedio porcentual de resistencia a compresión en los tres casos analizados.

Tabla 4.4. Comparación del incremento promedio porcentual de resistencia a compresión en probetas curadas eléctricamente respecto a las curadas naturalmente

Edad [días]	Incremento promedio porcentual de resistencia a compresión [%]		
	Caso 1 (60° C , 5 h)	Caso 2 (60° C , 8 h)	Caso 3 (80° C , 5 h)
1	83,9	129,8	114,7
3	34,9	44,4	20,1
7	6,5	6,6	-17,0
14	4,9	5,6	-23,1
28	4,6	3,7	-25,2

Fuente. Elaboración Propia

Figura 4.7. Comparación de Incremento promedio de resistencia a compresión vs Edad



Fuente. Elaboración Propia

En el tercer caso de la Figura 4.7 se observa que a pesar de obtener una resistencia temprana más alta que con el curado convencional, se sacrifica bastante en la resistencia a largo plazo (una cuarta parte aproximadamente), por lo que se considera una temperatura máxima de calentamiento de 60° C como óptima en base a la experimentación realizada, debido a que, a pesar que todas las muestras son sometidas a esfuerzos termomecánicos, a mayor temperatura el daño ocasionado es mayor puesto que la muestra no cuenta con la resistencia suficiente para soportar tales tensiones y no llega a cumplir con las especificaciones de diseño, como se mostró en el último caso.

La utilización de poliestireno de 50 mm de espesor como aislante de los especímenes durante el periodo total de calentamiento evita que el calor dentro de la mezcla se disipe rápidamente debido al gradiente térmico existente entre el centro de la mezcla y el exterior, facilitando que se alcance la temperatura deseada en el tiempo planificado. El caso contrario se evidenció al inicio de la experiencia, donde se perdía demasiado calor con el exterior ocasionando que la temperatura de la mezcla sea aproximadamente 20° C menor que la de diseño.

En el Anexo A.5 se presenta una Guía de Procedimientos y Precauciones para el Diseño de un Sistema de Curado Eléctrico Básico, consistente en una probeta cilíndrica con platos paralelos de acero inoxidable.

En el anexo A.6 se adjuntan los costos para implementar un sistema similar al mencionado anteriormente (probetas cilíndricas de acero con placas circulares colocadas paralelamente) para el curado de cuatro probetas a la vez, que en este caso ascienden a Bs. 10.914,76.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se adquiere una mayor resistencia a la compresión a edades tempranas. La resistencia de los especímenes curados eléctricamente registró valores más altos durante los primeros 5 días con respecto a los curados convencionalmente, sobre todo durante el primer día donde se evidenció un incremento promedio de hasta 130%, lo que verifica la primer hipótesis planteada.
- El valor óptimo para la temperatura máxima durante el curado es de 60^a C, pues se observa que a pesar de incrementar ésta en 20^a C, no se obtienen incrementos significativos en la resistencia a edad temprana de los especímenes analizados.
- Se alcanza un incremento del 50% extra de la resistencia a compresión durante el primer día si se amplía el tiempo de exposición al calor de las muestras, es decir, si el periodo de calentamiento e isotérmico son más largos, se obtiene 1,5 veces el incremento que si se trabaja con periodos más cortos.
- El aumento extra de la resistencia ocasiona que se incremente el gasto de energía en un 45% aproximadamente, por lo que se considera óptimo un tiempo de exposición medio, como es el planteado de 5 horas, puesto que aún se logra un incremento de la resistencia a compresión del 80% aproximadamente a un día del vaciado, que es mayor al valor requerido teóricamente para soportar las tensiones de expansión y contracción debido al clima frío.
- Se tiene que al incrementar la temperatura máxima de curado en 20° C con respecto a la considerada óptima en esta experiencia, se obtienen resistencias a compresión menores en comparación al curado convencional desde el quinto día después del vaciado, pues se presume que ésta ocasiona mayores tensiones en la masa de hormigón que con temperaturas medias debido a la expansión de sus componentes, considerando a esta expansión como brusca pues se incrementa la temperatura más de 60° C en menos de dos horas y el hormigón aún no cuenta con la resistencia suficiente como para soportar las mismas y pueden llegar a crearse microfracturas en su interior.

- Al trabajar con la temperatura máxima óptima para el curado eléctrico, se tiene que los valores obtenidos de resistencia a compresión a largo plazo (28 días) se aproximan a los obtenidos al trabajar con el curado convencional y llegan a satisfacer los requerimientos de diseño.
- A los veintiocho días después del vaciado, cuando se trabaja con una mayor temperatura que la considerada óptima, se registran valores menores de resistencia mecánica a compresión del hormigón respecto a los obtenidos con el curado convencional, es decir, la resistencia a compresión obtenida es menor que la resistencia requerida en el diseño, por lo que se rechaza parcialmente la segunda hipótesis, pues es preferible no trabajar con temperaturas entre 80° C o mayores porque se sacrifica el 25% aproximadamente de la resistencia a compresión a largo plazo.
- Se observan menor cantidad de fisuras en la superficie exterior de las probetas curadas eléctricamente durante el primer a tercer día después del vaciado cuando son sometidas a tensiones elevadas. Sin embargo, a mayores edades del hormigón, se tiene mayor cantidad de fisuras, siendo éstas más anchas, profundas y largas, que en las probetas curadas convencionalmente. Se presume que esta situación se debe a las microfracturas ocasionadas en el interior del hormigón debido a las tensiones termo mecánicas a las que es sometido durante el primer día, sobretodo durante el periodo de calentamiento.

5.2. Recomendaciones

- Se debe aislar el sistema de curado eléctrico para reducir la pérdida de calor ocasionada por la diferencia de temperatura entre el centro de la mezcla y el ambiente que la rodea que provoca este intercambio de energía. Además, este aislamiento con el exterior ayuda a prevenir la evaporación de agua de la mezcla de hormigón.
- Se recomienda realizar estudios complementarios a futuro, con el fin de poder obtener un rango óptimo de temperaturas máximas de calentamiento y además, verificar las causas que generan micro fracturas en la masa de las probetas curadas eléctricamente.
- Se sugiere utilizar otros métodos alternativos de curado para realizar una comparación, como por ejemplo el uso de vapor generado con petróleo.
- Se recomienda continuar con esta línea de investigación para que este método pueda ser implementado en forma industrial.