



XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: fuente para el desarrollo e integración de América y el mundo

ID: XXXVIIIJSIE-07-153

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UNA MUESTRA DE HORMIGÓN DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN

THERMAL CHARACTERIZATION OF A CONCRET SAMPLE DURING HYDRATION PROCESS

Fernando Díaz (1); Sebastián Fariña (2); María A. Arévalos Burró (P) (3); Antonio Aquino (4); Rubén López (5)

- (1) Ing. Civil, ex alumno, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
 - (2) Ing. Civil, ex alumno, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
 - (3) M.Sc., docente investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
 - (4) Dr. Prof., Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería, Paraguay.
 - (5) Dr. Prof., Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería, Paraguay.
- Dirección para correspondencia: aliarevalos@gmail.com; (P) Presentador

Área Temática: Investigaciones teóricas y computacionales.

Resumen

En el proceso de fraguado del hormigón se da una reacción química exotérmica, existe un aumento de temperatura y liberación del calor. Los efectos asociados a este fenómeno pueden generar fisuras en la masa debido al gradiente térmico que experimenta la misma. Esto puede llevar a la pérdida de integridad estructural y disminución de la vida útil de las estructuras, especialmente para masas de gran volumen como cabezales de pilotes, presas, vigas anchas y pilas de puentes. Mediante la determinación de los parámetros térmicos es posible caracterizar el hormigón a utilizar y predecir su comportamiento. En este contexto, en el presente trabajo se realizó un análisis térmico del proceso de hidratación de una muestra de hormigón. La muestra es caracterizada mediante la obtención de dos parámetros térmicos: calor específico y conductividad térmica. El problema directo es aquel donde son conocidas las causas (o parámetros de entrada) de un fenómeno y los efectos son las incógnitas (o parámetros de salida). En este trabajo, sin embargo, se resolvió el problema inverso asociado (también llamado mal condicionado). Este método es utilizado mediante la determinación de parámetros térmicos (causas) a partir de valores de los efectos que son conocidos. Para ello se desarrollaron y aplicaron algoritmos computacionales con la elaboración de un método implícito de resolución de la ecuación de calor.

Palabras-clave: hormigón; análisis térmico; problema inverso; método implícito

Abstract

An exothermic chemical reaction occurs through the concrete setting process. Such phenomenon involves temperature rises, heat release, significant tensile stresses and in some cases cracking of the concrete due to temperature gradient. Posterior loss of structural integrity or shortening of service life of structures may appear, especially for massive constructions such as raft foundations, dams, thick beams and bridge piles. Mass concrete are known for having large enough volume of concrete so that controlled actions should be taken to minimize cracking. Thermal parameters can characterize the mass concrete and predict its behavior in order to prevent cracking either for the initial state of the setting process or the posterior curing period. In this context, a thermal analysis of the hydration process of a concrete sample was developed, aiming to characterize such sample by obtaining two thermal parameters: specific heat and thermal conductivity. The direct problem identifies the effects (or output parameters) from known causes. In the present work however, the problem is handle by means of the resolution of the associated inverse problem. Basically, the inverse problem is concerned with determining causes for an observed effect (input parameters). Computational algorithms were developed and applied through the elaboration of an implicit method to solve the heat equation.

Keywords: concrete; thermal analysis; inverse problem; implicit method



XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: fuente para el desarrollo e integración de América y el mundo

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de fraguado del hormigón se da una reacción química exotérmica, existe un aumento de temperatura y una liberación del calor. En climas cálidos como el del Paraguay, el estudio del desarrollo de las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón en sus primeras edades se torna de suma importancia, ya que la liberación de calor durante el proceso de hidratación y los efectos asociados a este fenómeno pueden generar fisuras en la masa debido al gradiente térmico que experimenta la misma (Quintana, 2013).

Por otra parte, debido a los diferentes tipos de cemento de distinta procedencia comercializados en el mercado, se tiene una dispersión en las características de dichos cementos y por ende una dispersión en las características de los hormigones realizados con ellos. Esto imposibilita predecir la distribución de temperatura a través del tiempo y de esa forma impide tener la información necesaria para realizar acciones preventivas que aseguren la integridad de la pieza y seguridad de la estructura.

Este trabajo tiene por finalidad el desarrollo y aplicación de algoritmos computacionales que permitan la obtención de parámetros térmicos del hormigón durante el proceso de hidratación del mismo. Esta caracterización adquiere mayor relevancia para estructuras masivas donde el gradiente de temperatura puede llegar a producir tensiones significativas que generen fisuras internas dentro de las mismas. Una de las dificultades encontradas en la misma, es la distribución de temperatura en el sólido, gobernada por la ecuación de calor con las condiciones de contorno apropiadas. En ese sentido, mediante la determinación de los parámetros térmicos es posible caracterizar el hormigón a utilizar y predecir su comportamiento de manera a tomar las precauciones pertinentes a la hora de la puesta en obra y posterior fraguado.

Los datos de entrada utilizados en este trabajo son las temperaturas de varios cuerpos de prueba obtenidas por Kirchhofer (2013) y Benítez Galván et al, (2011), por lo que los parámetros obtenidos serán representativos para los hormigones fabricados con los mismos materiales utilizados.

1.1. Definición del Problema

El problema por resolver es el de la distribución de temperatura en el sólido, gobernada por la ecuación de calor con las condiciones de contorno apropiadas.

2. PROBLEMA INVERSO

El problema inverso consiste en la determinación de ciertos parámetros (causas) a partir de ciertos valores conocidos (efectos), en otras palabras, podemos decir que teniendo una o más variables de salida deseamos obtener las correspondientes variables de entrada. Los problemas inversos para resolverlos se utilizan lo que se conoce como métodos de regularización. En este trabajo se utilizó el método del Gradiente Conjugado. Los parámetros $P_j(t)$ fueron determinados mediante la minimización por mínimos cuadrados:

$$S(P) = [Y - T(P)]^T [Y - T(P)] \quad (1)$$

A continuación, se dan los pasos que se siguen para la solución del problema.

Valores iniciales:

Temperaturas experimentales

$$Y = [Y_1, Y_1, \dots, Y_t]^T \quad (2)$$

Se introducen los parámetros iniciales de P para $k = 0$ ($k =$ número de iteración)



XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: fuente para el desarrollo e integración de América y el mundo

Paso 1: Se resuelve el problema directo con los parámetros iniciales P y se obtienen las temperaturas estimadas $T(P)$

$$T(P^k) = [T_1, T_2, \dots, T_l] \quad (3)$$

Paso 2: Se evalúa el criterio de parada, continuar en el caso de no satisfacer el criterio. Donde el criterio de parada es verificar si $S(P) < \varepsilon$, siendo ε un número positivo previamente definido, que depende del nivel de precisión requerido.

Paso 3: La matriz sensibilidad J se obtiene haciendo una aproximación de las derivadas parciales mediante el método de las diferencias finitas. Este método es adecuado debido a que se desconoce la función que determina la temperatura.

$$J_{ij} = \frac{T_i(P_1, \dots, P_j + \varepsilon, \dots, P_N) - T_i(P_1, \dots, P_j, \dots, P_N)}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$J_{ij} \approx \frac{\delta T_i}{\delta P_j} \quad (5)$$

Paso 4: Se calcula la dirección del gradiente y el coeficiente de conjugación Dirección del gradiente:

$$\nabla S(P^k) = -2(J^k)^T [Y - T(P^k)] \quad (6)$$

Coeficiente de conjugación:

$$\gamma^k = \frac{\sum_j^N [\nabla S(P^k)]_j^2}{\sum_j^N [\nabla S(P^{k+1})]_j^2} \quad (7)$$

Paso 5: Se calcula la dirección del descenso

$$d^k = \nabla S(P^k) + \gamma^k d^{k-1} \quad (8)$$

Paso 6: Se deduce el tamaño del paso β en el espacio de soluciones del problema.

$$\beta^k = \frac{[J^k d^k]^T [T(P^k) - Y]}{[J^k d^k]^T [J^k d^k]} \quad (9)$$

Paso 7: Se halla el nuevo parámetro P_{k+1}

$$P_{k+1} = P^k - \beta^k d^k \quad (10)$$

Paso 8: Se reemplaza k por $k+1$ y se retorna al paso 1. Fin

3. INTERVALO DE ESTUDIO, COEFICIENTE DE CONVECCIÓN Y CONDICIONES INICIALES

Se eligió un intervalo donde la generación de calor no exista o pueda ser despreciable. El tiempo inicial para el algoritmo implícito (t_0) igual a 4500 min, ($3 \text{ días} = 3 \times 60 \times 24 = 4320$) de manera a asegurar que ya no se tiene generación de calor en el tramo estudiado.

Para la resolución de la ecuación de calor a lo largo de todo el tiempo del ensayo, se tienen parámetros que influyen en la evolución de la temperatura a través del tiempo. Estos son: curva de generación de calor, coeficiente de convección, calor específico, conductividad térmica.

Las curvas de generación de calor para cada tipo de hormigón fueron determinados utilizando un algoritmo explícito realizado por Kirchoffer (2012), a partir de los datos de



XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: fuente para el desarrollo e integración de América y el mundo

temperatura medidos en el sensor B. Los valores iniciales de los parámetros h , C y K que se utilizan son los valores típicos de la base de datos de ANSYS.

Este proceso para la obtención de las temperaturas iniciales para el algoritmo es necesario, ya que el tiempo inicial al aplicar el algoritmo inverso no es el tiempo inicial del ensayo experimental, por lo que al iniciar el análisis para la obtención de los parámetros no se tiene una distribución uniforme de temperatura en todo el cubo, sino que se tienen temperaturas mayores hacia el centro y disminuyendo a medida que se va acercando a las caras del cubo. Se podría suponer para t_0 una temperatura uniforme en todo el cubo, o bien una elegir una función de distribución de temperatura en función a la distancia de los nodos al centro, partiendo de las temperaturas registradas en los sensores, pero el método utilizado es más preciso, de menor tiempo de ejecución y el que más se ajusta al proceso físico en la realidad.

4. LECTURA DE DATOS

Se realizó un análisis de las temperaturas registradas por Benítez Galván et al., (2011), que sirvieron como datos de entrada para el algoritmo implícito realizado en el presente trabajo. Se cuentan con datos de temperaturas de 8 sensores ubicados en el cuerpo de prueba, siete de los cuales miden la temperatura en intervalos de 60 minutos durante 28 días mientras que uno de ellos (Sensor B) registra la temperatura cada 60 segundos durante 7 días. Este sensor se encuentra en el eje central del cuerpo de prueba 75 mm por encima del punto medio del cubo, por lo que recibe menor influencia de la radiación solar, esta causa variaciones o errores en las mediciones de los sensores situados simétricamente en las caras del cuerpo de prueba. Dichos puntos, en un caso ideal deberían tener valores de temperatura iguales, sin embargo, los tienen valores diferentes, y en el tiempo dichos valores describen curvas aparentemente paralelas por lo cual se descarta la posibilidad de que se deba a un error aleatorio (Correa, 2014). Se eligen las temperaturas del sensor B para los datos de entrada del problema inverso debido a que se tiene una mayor precisión en las lecturas (cada 60 segundos durante 7 días) y tiene menor influencia de la radiación solar. Se considera para el estudio el intervalo de 3 a 7 días, del minuto 4500 al minuto 10080 donde la generación de calor es despreciable y la temperatura varía de forma lineal. Con el fin de evitar errores debido a las limitaciones de precisión de los instrumentos de lectura de las temperaturas (Correa, 2014).

5. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

En primer lugar, se deben establecer las condiciones iniciales para lo que será la ejecución del algoritmo implícito, y posteriormente la implementación del algoritmo implícito en sí. Una vez definidas las condiciones iniciales y de contorno se pasa al desarrollo del algoritmo del problema inverso.

La aplicación del algoritmo del problema inverso total controla la ejecución de todo el programa, recibe los datos de entrada, temperatura inicial, coeficiente de convección h_e , luego ejecuta el algoritmo del problema inverso por partes, primeramente, para el calor específico y luego para la conductividad térmica, evalúa el criterio de parada y si no se cumple vuelve a realizar todo el proceso hasta que ambos valores sean estables (Figura 1).

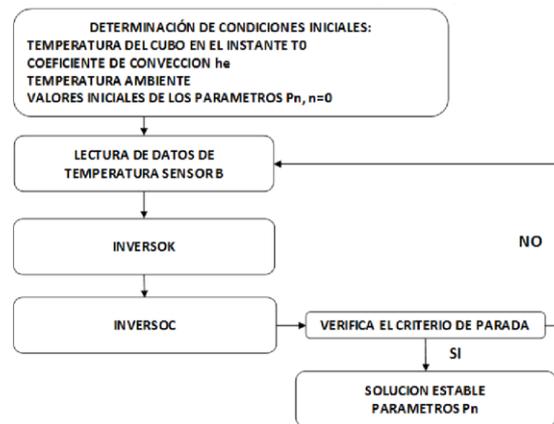


Figura 1. Flujograma del análisis inverso

El algoritmo total consta de tres partes principales:

- Algoritmo de resolución del problema directo: Determina las temperaturas en cada nodo del cubo para cada paso de tiempo considerado, mediante el algoritmo de Douglas Gunn.
- Algoritmo de resolución del problema inverso para la determinación de la conductividad térmica: Ejecuta el algoritmo del problema inverso haciendo variar el valor de la conductividad térmica en cada iteración, hasta que esta adquiera un valor estable y ya no varíe con las sucesivas iteraciones.
- Algoritmo de resolución del problema inverso para la determinación del calor específico: Ejecuta el algoritmo del problema inverso haciendo variar el valor del calor específico en cada iteración, hasta que esta adquiera un valor estable y ya no varíe con las sucesivas iteraciones.

La determinación de los coeficientes se realiza en dos pasos, se resuelven dos problemas inversos por cada iteración del programa total, mientras que dentro de cada ejecución de cada problema inverso se resuelve varias veces el problema directo.

6. ESQUEMA EXPERIMENTAL

Fueron realizados 8 cuerpos de prueba utilizando dos tipos de cemento, el cemento compuesto (CP-II) y el cemento puzolánico (CP-IV), con distintas resistencias características para cada cuerpo de prueba. Para la medición de las temperaturas se utilizaron unos cuerpos de prueba de hormigón moldeados con forma de cubos. Los mismos estaban compuestos con madera de pino reciclada de 115 cm de lado; el sistema de aislación consistió en la utilización de planchas de poliestireno expandido de 20 cm de espesor y densidad de 16 kg/m^3 ubicados en las 6 caras internas de la geometría, dichas caras fueron recubiertas con placas de madera de 12 mm de espesor a fin crear una barrera entre el material aislante y el hormigón teniendo en cuenta las elevadas temperaturas que alcanzaría el hormigón durante el proceso de hidratación. Para el registro de la evolución de la temperatura durante el proceso de hidratación fueron utilizados un total de ocho sensores térmicos; un sensor por cada cara del hexaedro y dos sensores ubicados en el centro de la masa. Los mismos fueron colocados a una distancia de setenta y cinco milímetros de la cara interior del cuerpo de prueba de manera que la ubicación de los mismos coincida con la distribución del mallado en el análisis numérico.

La siguiente Tabla 1, ilustra los tipos de cemento utilizados en los cuerpos de prueba, así como las resistencias características de dichos hormigones. En la Tabla 2, se indican las



temperaturas obtenidas en el sensor B en el instante inicial de estudio y las obtenidas mediante la simulación en ANSYS siguiendo el procedimiento explicado anteriormente para la obtención de las condiciones iniciales

Tabla 1. Descripción de los cuerpos de pruebas utilizados.

Denominación	Resistencia característica (MPa)	Tipos de cemento utilizados
H200COMP	200	Compuesto
H200PZ	200	Puzolánico
H600COMP	600	Compuesto
H600PZ	600	Puzolánico
H1000COMP	1000	Compuesto
H1000PZ	1000	Puzolánico

Tabla 2. Cuadro de Resultados.

Tipo	C (J/kg °C)	K (W/mm °C)	h (W/mm ² °C)	Temperatura experimento (°C) para t=4500 min	Temperatura simulación (°C) para t=4500 min
H200 COMP	732	5,00E-04	5,50E-07	51,99	51,49
H200 PZ	1290	5,63E-04	1,20E-06	49,18	49,34
H600 COMP	1495	7,45E-04	6,87E-07	58,58	58,9
H600 PZ	1685	8,05E-04	1,03E-06	56,57	56,97
H1000 COMP	296	4,80E-04	1,20E-07	64,08	63,62
H1000 PZ	1023	7,12E-04	7,30E-07	55,43	55,84

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos podrían ser más precisos si en un próximo ensayo experimental se pudiera obtener con mayor precisión el valor del coeficiente h . Además, otros errores presentes en las mediciones pueden ser debido a la influencia de la radiación solar en las muestras, y la variación de temperatura del medio exterior. Se podrían obtener resultados más precisos y confiables si se utilizaran equipos adiabáticos, donde se aísla totalmente al cuerpo asegurando que no haya transferencia de calor hacia el medio, con los cuales se podrán comprobar y comparar los parámetros térmicos obtenidos al ejecutar el algoritmo implementado con los nuevos resultados. El ensayo experimental el cual sirvió de base para el presente trabajo se considera como semi-adiabático ya que se tiene una tasa de transferencia de calor de la muestra hacia el medio. Analizando las mediciones de los sensores B en las distintas muestras y comparándolas entre si se tiene la siguiente Figura 2.

Comparando las curvas de temperatura de los hormigones de misma resistencia y distinto cemento utilizado entre si se esperaría que los hormigones con cemento compuesto desarrollen mayores temperaturas que los que fueron realizados con cemento puzolánico debido a su mayor contenido de *clinker* y una mayor homogeneidad en la formación de portlandita. Esta relación se cumple para los hormigones H200 y H1000 donde se nota una marcada diferencia entre las curvas de temperatura, mientras que para el H600 ambas curvas tienen comportamiento similar, e incluso la muestra de H600 puzolánico llega a desarrollar una temperatura mayor, siendo menores las temperaturas en edades posteriores. Los resultados obtenidos reflejan la importancia de la determinación con mayor precisión del coeficiente de convección h para todas las muestras,



XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: fuente para el desarrollo e integración de América y el mundo

ya que los resultados difieren de los que se esperaban a priori basados en la bibliografía existente de acuerdo a las relaciones entre resistencia, temperaturas máximas y coeficientes térmicos.

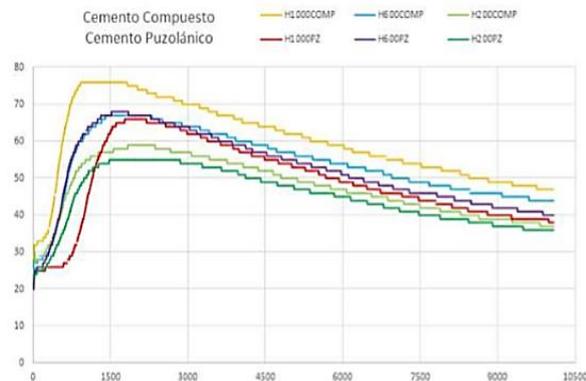


Figura 2. Curvas de temperatura de acuerdo con el tipo de hormigón.

8. CONCLUSIÓN

En la determinación de las constantes térmicas del hormigón, el proceso de hidratación resultó ser uno de los puntos centrales. Los procesos microscópicos que ocurren durante el mismo resultaron ser muy complejos, debido a su dificultad de comprender y por lo tanto requieren de un mejor estudio.

A partir del desarrollo de un método numérico para la resolución del problema inverso mediante un método implícito fue posible obtener: los resultados numéricos de los parámetros térmicos (calor específico y conductividad térmica) de diferentes tipos de hormigones de acuerdo con la resistencia de los mismos, así como también permite el estudio del comportamiento del hormigón en sus primeras edades.

El algoritmo computacional implementado para resolver el problema inverso reproduce con gran precisión el desarrollo del fenómeno, esto se hace visible en la gran correlación existente entre las curvas de temperatura medidas y las curvas de temperatura obtenidas mediante el algoritmo computacional.

Finalmente, los parámetros que definen la distribución de calor dentro de la masa de concreto, nos permitirán simular computacionalmente diferentes escenarios, y mediante esto predecir el comportamiento que tendrá el hormigón una vez que se produzca el fenómeno de hidratación, y otros factores de importancia, como por ejemplo: tiempo máximo de puesta en obra de modo a que no se produzcan tensiones térmicas internas que ocasionen fisuras superficiales o no perceptibles a la vista, tiempo mínimo de curado, tiempo mínimo de retiro de encofrados y por sobre todo garantizar la calidad del hormigón y que esta no se vea afectada por los problemas térmicos que siempre existen, donde se debe seguir profundizando en el estudio térmico, no solo del hormigón, sino de los diferentes materiales de la construcción que se utilizan cotidianamente en obras civiles

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud con el CONACYT, por su aporte y contribución a la Investigación, a la FIUNA por el uso de las infraestructuras.



XXXVIII

**Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural**

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: fuente para el desarrollo e integración de América y el mundo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee, (1991). 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- ACI. ACI Committee, (1994). 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete. ACI. ACI Committee, (2000). 116R: Cement and Concrete Terminology.
- ACI. ASSOCIATION, P. C. (1997). Portland Cement, Concrete and Heat of Hydration. Concrete Technology Today.
- Benitez, J., Benitez, M., y Martínez, D. (2010). Estudio del comportamiento térmico de hormigón. Computer and Structures, 1.
- Cervera, M. and Faria, R., Oliver, J., y Pratto, T. (2002). Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomenon. Computers and structures, 80.
- Chaves Mossi, A. (2007). Problema inverso combinado os mecanismos de transferencia de calor por radiação térmica e convecção turbulenta. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1.
- Correa, A. (2014). Implementación de un algoritmo implícito para la obtención de los parámetros térmicos del proceso de fraguado del hormigón mediante la solución del problema inverso asociado. Tesis Final de Grado. Carrera de Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción, 1.
- Gabalec, M. A. (2008). Tiempo de fraguado del hormigón. Tesis de Becarios de Investigación. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata., 1. KIRCHHOFER, S. (2013). Análisis térmico de un sólido reactivo mediante el retro-análisis. Tesis Final de Grado. Carrera de Ingeniería Electromecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción, 1. Kohlhaas, B. Labahn, O. (1985). Prontuario del cemento. Editorial Reverte.
- Menke, W. (1989). Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press. Mindess, S., Young, J., y Francis, D. D. (2003). Concrete Second Edition. Pearson.
- Moran, A. y Correa, A. (2009). Control en agregados y hormigón fresco para diseño de hormigón masivo, experiencia en obra con varias consistencias y resistencias. Escuela Superior Politécnica, 1.
- Neville, A. M. (1999). Tecnología del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1.
- Ozisik, M. and Orlande, H. (2000). Inverse Heat Transfer. Taylor and Francis.
- Ozorio, R. and Ruiz, R. (2013). Determinación numérica de parámetros termodinámicos del proceso de soldadura mediante el uso de la mecánica computacional. Tesis Final de Grado. Carrera de Ingeniería Electromecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción., 1.
- Peaceman, D. W. and Rachford, H. H. (1995). The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. J. Soc. Indust. Appl. Math.
- Quintana, O. (2013). Determinación de las propiedades térmicas del hormigón durante el proceso de hidratación mediante la solución del problema inverso. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción., 1.
- Yuan Wang, T., Min Lee, Y., and Ping Chen, C. C. (2013). 3d thermal – adi “an efficient chip-level transient thermal simulator. Proceedings of the 2003 international symposium on Physical design, 1.