

## ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VIGUETAS PRETENSADAS SOMETIDAS A ENSAYOS DE ALTA TEMPERATURA

### PARAMETRIC STUDY OF THE INFLUENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON PRE-STRESSED BEAMS SUBJECTED TO HIGH-TEMPERATURE

Gonzalo Ruano<sup>a,c</sup>, Marcelo Piovan<sup>b</sup>

<sup>a</sup>INIQUI (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia 5159, 4400 Salta, Argentina.

<sup>b</sup>Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, UTN Fac. Reg. Bahía Blanca, 11 de abril 461, B8000LMI, Bahía Blanca, Argentina.

<sup>c</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Salta, Campus Castañares, 4400 Salta, Argentina.

**Palabras clave:** Incertidumbre, Propiedades Mecánicas, Estudio Paramétrico.

**Resumen.** Las condiciones de manufactura de los productos llevan a que estos no sean estrictamente homogéneos y las propiedades mecánicas y térmicas tengan una distribución de probabilidades. En este trabajo se estudia, de manera paramétrica, la influencia que tiene la incertidumbre de las propiedades mecánicas en la respuesta frente a altas temperaturas de elementos esbeltos de hormigón pre-comprimido. Las propiedades mecánicas del hormigón y las del acero son abordadas mediante este enfoque. Además, se tiene particular interés en evaluar la influencia de la carga de pretensado por cable y en el coeficiente de dilatación térmica del hormigón. Para evaluar la respuesta estocástica y cuantificar la incertidumbre provocada por el conjunto de parámetros inciertos se emplea el enfoque probabilístico paramétrico sobre un modelo de estructura discretizada en elementos finitos y considerada como respuesta media o expectativa del problema aleatorio. Además, se aplica el principio de entropía máxima para deducir las funciones de distribución de los parámetros considerados como variables aleatorias y aquellos sujetos a la información disponible. Finalmente se comparan los resultados de las simulaciones con ensayos disponibles en la bibliografía.

**Keywords:** Uncertainty, Mechanical Properties, Parametric Study.

**Abstract.** The manufacturing conditions of products lead to non-uniform homogeneity, resulting in probability distributions for mechanical and thermal properties. This study parametrically investigates the influence of uncertainty in mechanical properties on the high-temperature response of slender pre-compressed concrete elements. Uncertainties in both concrete and steel mechanical properties are addressed. Additionally, special attention is given to evaluating the impact of cable pre-tensioning and the thermal expansion coefficient of concrete. To assess stochastic responses and quantify uncertainty arising from a set of uncertain parameters, a parametric probabilistic approach is employed on a discretized finite element structural model, treating it as the expected response of the random problem. Moreover, the maximum entropy principle is applied to derive probability distribution functions for the considered random variables and those with available information. Finally, the simulation results are compared with tests documented in the literature.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles pueden tener varias fuentes de incertidumbre debidas a que no es posible un control total del proceso de manufactura (Tomar *et al.*, 2018). Habitualmente se diseñan estructuras compuestas usando valores característicos y la significación de la incertidumbre en el análisis estructural es una extensión importante para los modelos actuales (Tomar *et al.*, 2018).

Al presente, el análisis y diseño computacional puede abordar sistemas ingenieriles más grandes, más complejos y realistas desde una óptica que considera la incertidumbre (Stefanou, 2009). Para resolver problemas del mundo real es necesario combinar los métodos numéricos con un ambiente estocástico (Tomar *et al.*, 2018). Esta incertidumbre no solo está presente en las cargas sino también en las propiedades materiales y en la geometría (Stefanou, 2009).

El presente trabajo busca considerar la incertidumbre de algunas propiedades mecánicas de viguetas pretensadas de hormigón en la respuesta estructural de estos elementos sometidos a acciones termo mecánicas.

## 2 CASO DE ESTUDIO

Se simula un ensayo realizado sobre viguetas de hormigón pretensado sometidas a alta temperatura. Se modela la etapa de puesta en tensión de los materiales acero y hormigón. Luego esta estructura es sometida a una carga mecánica estática y finalmente ensayada mediante la aplicación de una carga térmica que evoluciona en el tiempo. La Figura 1(a) muestra las dimensiones transversales de la vigueta y la disposición del acero de pretensado; en (b) se representa la fuerza que se imprime en los cables de pre tensado previo al colado del hormigón; (c) corresponde a la situación en la que habiendo sido colado el hormigón se transmite la carga desde los cables hacia la matriz cementicia; finalmente en (d) se muestra la configuración final en equilibrio de ambos materiales. La Figura 1(e) esquematiza las cargas mecánica estática uniforme y la carga térmica uniforme que evoluciona en el tiempo.

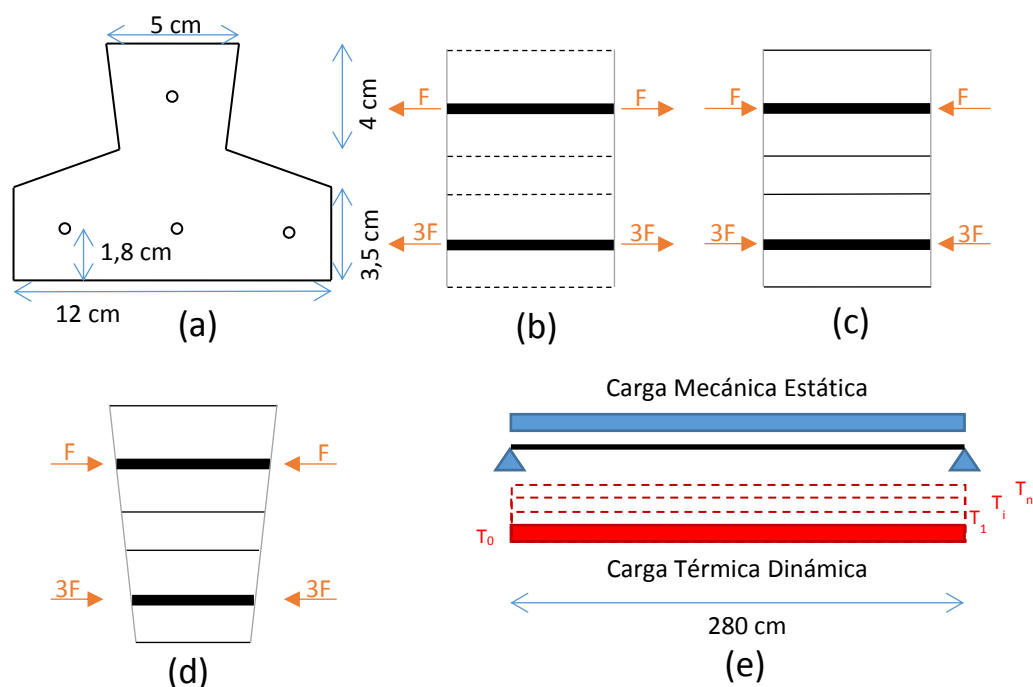


Figura 1. (a) Sección transversal. (b) (c) y (d) Proceso de Pretensado de materiales. (e) Cargas.

### 3 PROPIEDADES MECÁNICAS Y TERMO MECÁNICAS ANALIZADAS

Se tuvo en cuenta lo que sucede con la carga de pretensado y con varias de las propiedades mecánicas y termo termo-mecánicas, la Figura 2 muestra las propiedades que se tuvieron en cuenta para el estudio y su evolución con la temperatura.

**Carga de Pretensado:** Es la carga de tracción que se les da a la armadura inferior y superior de las viguetas Figura 1(b). Para este análisis se propuso que los 4 cordones tienen idéntica variación (Distribución Uniforme).

**Módulo de elasticidad del Acero de pretensado:** Esta es una propiedad que se consideró la misma para toda la estructura. Pero se tuvo la salvedad de considerar que la temperatura sí influye en la evolución de esta propiedad (Distribución LogNormal).

**Módulo de elasticidad del Hormigón:** Ídem al acero, también se tuvo en cuenta que esta propiedad cambia para diferentes temperaturas (Distribución LogNormal).

**Tensión máxima acero:** Se consideró que esta propiedad también es función de la temperatura (Distribución LogNormal).

**Coefficiente de expansión térmica del hormigón:** esta propiedad relaciona los problemas térmicos con el mecánico. No es constante, sino que depende de la temperatura (Distribución LogNormal).

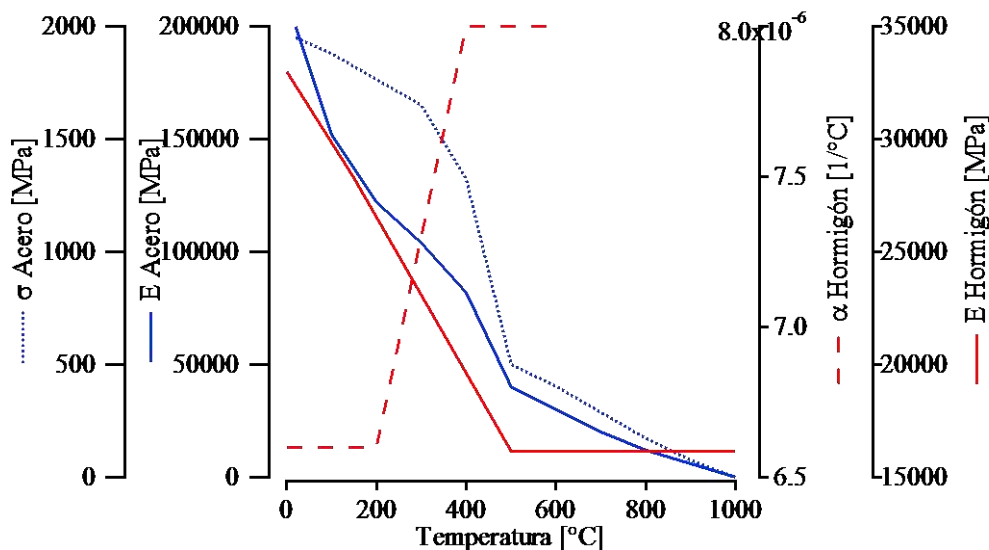


Figura 2. Propiedades Mecánicas y Termo mecánicas.

### 4 MODELO DETERMINISTA

Implícitamente se supone que los resultados de un análisis determinista son representativos de todos los escenarios posibles de un sistema (Stefanou, 2009). Se trabajó con el método de elementos finitos. Se utilizaron elementos rectangulares de 4 nodos con 4 puntos de Gauss en estado plano de tensiones. La malla utilizada corresponde a 4572 elementos agrupados en 9 fajas de materiales compuestos que tienen espesores variables para representar la sección transversal de la vigueta Figura 3(a y b). Los espesores mostrados en Figura 3(b) corresponden al promedio de la altura del elemento rectangular. Se trabaja con teoría de mezclas de sustancias (Truesdell, C.; Toupin, 1960), la cual considera que todos los materiales poseen la misma deformación específica. En el proceso constructivo de las viguetas, el acero es estirado, luego se vierte el hormigón y una vez endurecido se cortan los cables transmitiendo por adherencia la fuerza de tesado a la matriz. Esto provoca que el

material acero no posea la misma deformación del hormigón. Esta particularidad es tenida en cuenta mediante un esquema que preserva las deformaciones de la etapa de pretensado (Ruano, Nallim and Oller, 2018). La estructura modelada considera una carga mecánica correspondiente al peso propio y la sollicitación más importante es la debida a la carga térmica. Como se trabaja en estado plano de tensiones la carga térmica aplicada es la que corresponde al análisis mediante elementos finitos de la historia de temperaturas dentro de una sección transversal de las viguetas. Así se puede ver en Figura 3(b) las indicaciones de “T1”, “T2”, “T5” y “T6” que corresponden a la posición donde experimentalmente se encontraban termocuplas que midieron temperaturas que fueron aplicadas imponiendo temperatura que evoluciona en el tiempo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es decir se resuelve un problema no estacionario.

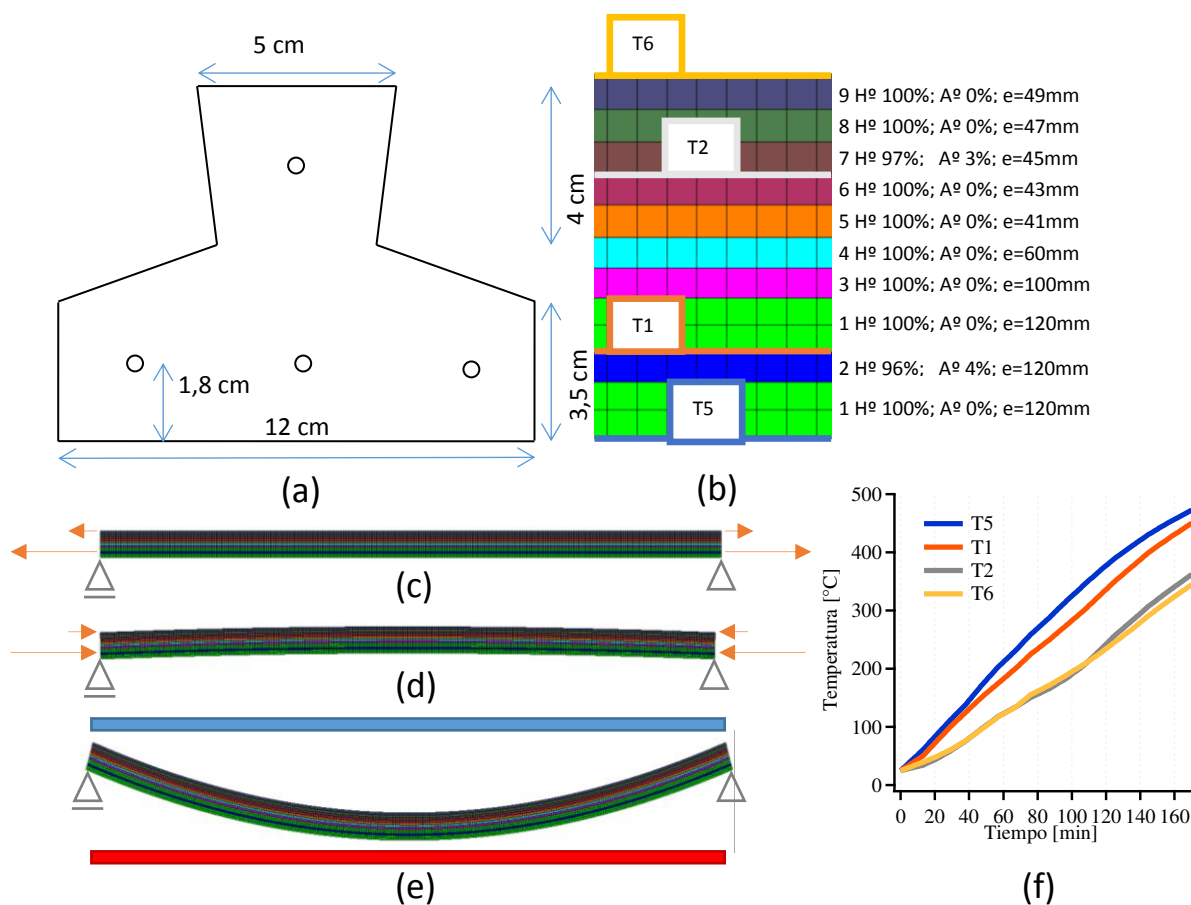


Figura 3. Malla de Elementos Finitos. (a) Sección transversal. (b) Materiales Compuestos. (c) Condiciones de Borde y Carga de Tensión. (d) Puesta en tensión de matriz de Hormigón, Contraflecha. (e) Estructura Deformada por acción Térmica. (f) Historia de Carga Térmica

## 5 MODELO ESTOCÁSTICO

Las variables aleatorias se representan mediante funciones de distribución de probabilidades que se obtienen haciendo uso del Principio de Máxima Entropía (PME) (Jaynes, 1957) y la información disponible (Giorgio and Piovan, 2019) o restricciones impuestas (Martín *et al.*, 2021). Particularmente en este trabajo se estudian los efectos de la incertidumbre de la carga de pretensado, las propiedades mecánicas de los componentes y el coeficiente de dilatación térmica del hormigón. Se asume que las variables consideradas son independientes entre ellas y el estudio paramétrico se realiza de a una variable por vez,

mientras las otras quedan fijas en los valores deterministas. La construcción del modelo estocástico es la descrita en (Sampaio, Rubens; Lima, 2003).

### 5.1 Distribución de probabilidad para la carga de pretensado

Esta carga se aplica durante el proceso de construcción de las viguetas, generalmente mediante tracción de la armadura mediante gatos hidráulicos en cada uno de los cables. Se asume que todos los valores del intervalo tienen la misma probabilidad de ocurrir por lo que se tomó una distribución uniforme para todos los cables.

### 5.2 Distribución de probabilidad para las propiedades mecánicas y temo mecánica

Estas propiedades son estrictamente positivas (Möller, 2019), por lo que se utilizó una distribución log normal. Para todas las propiedades se consideró un coeficiente de variación de 0,1.

## 6 RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados numéricos alcanzados.

En Figura 4 se puede ver que la carga de Pretensado tiene poca influencia en la respuesta. Esto se debe a que las viguetas se diseñan para que se aproveche al máximo los materiales acero y hormigón. Así entonces una carga de pretensado que sea mayor a la que resiste el acero no podrá ser soportada por el material y para este parámetro analizado se tuvo que muchas de las simulaciones no pasaban del instante en que se aplica la carga de pretensado. Además, la Figura 4 muestra con indicaciones los instantes de tiempo en que se aplica la carga de Pretensado en el acero, el momento en que se transmite carga al hormigón, el lapso en el que se aplica la carga estática y el tiempo en que se inicia el ensayo aplicando carga térmica. Estos momentos característicos pueden identificarse en el resto de los gráficos. Además, cada gráfico muestra el número de realizaciones  $n$ , siendo 1065 para la Figura 4.

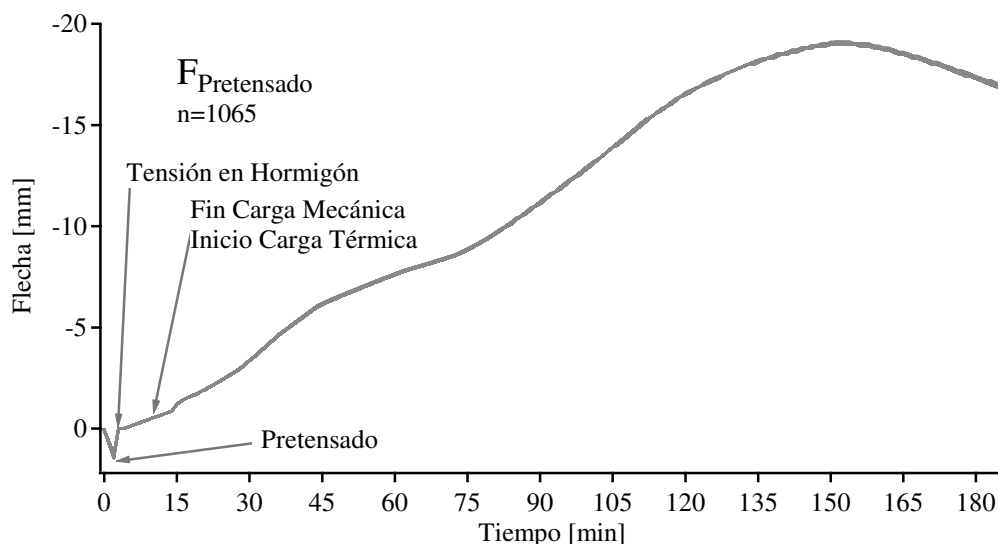


Figura 4. Influencia de la carga de Pretensado.

La Figura 5 muestra que diferentes valores del Módulo de elasticidad del Acero provocan que la flecha no sea la misma en la etapa de pretensión del acero y luego un abanico de respuestas tanto cuando se aplica la carga mecánica como durante el ensayo con temperatura.

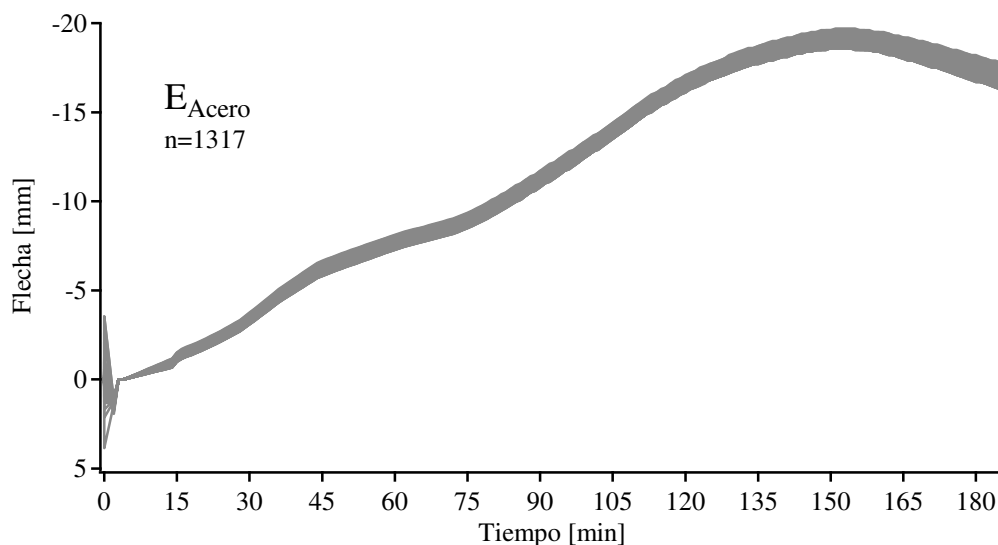


Figura 5. Influencia del Módulo de elasticidad del Acero.

La Figura 6 muestra que la tensión máxima que puede soportar el acero no tiene influencia en la respuesta. Esto se debe a que se obtiene respuesta de la estructura únicamente para la condición en la que el acero de pretensado soporta la carga mecánica. Para las otras situaciones la estructura no puede soportar la carga mecánica. Este parámetro tuvo una importante cantidad de casos de fracaso, es decir estructuras que no pasaban la etapa de pretensión. Todas las que superan esta etapa tienen la misma respuesta ya que cuando el acero comprime al hormigón el primero se descarga mientras que el segundo se comprime. Esta respuesta (Figura 6) coincide con la respuesta del caso determinista.

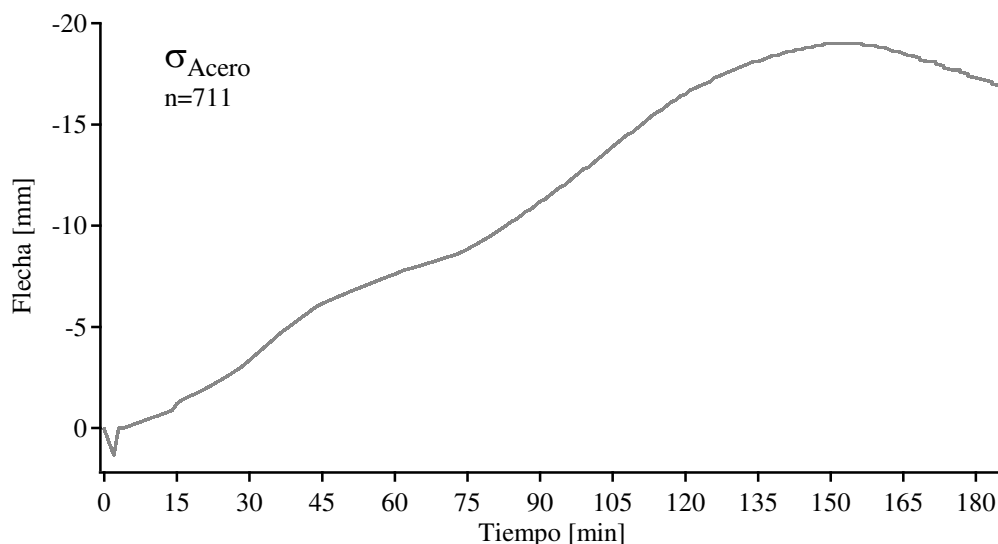


Figura 6. Influencia de la Tensión máxima del Acero.

En la Figura 7 se muestra la marcada influencia de la variación del módulo de elasticidad del Hormigón para todo el ensayo.

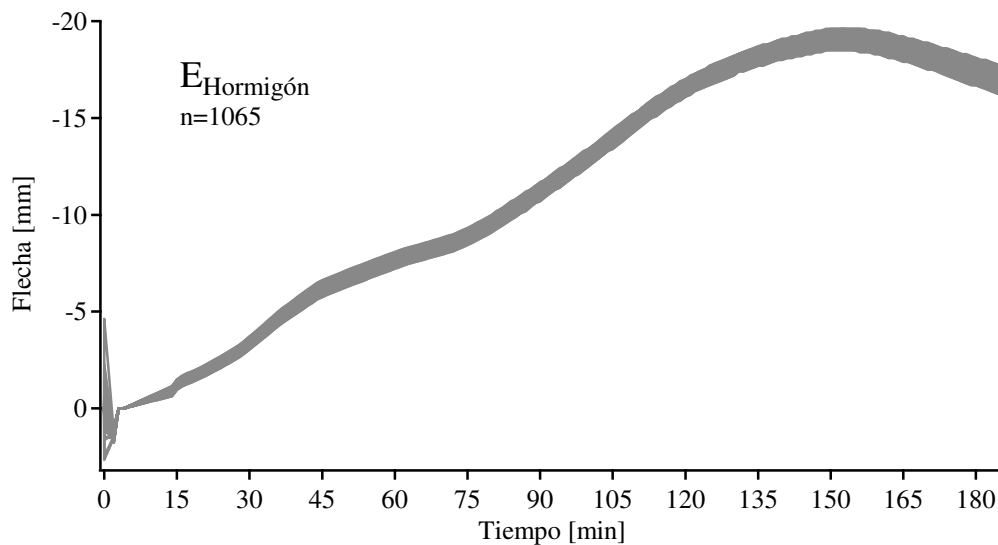


Figura 7. Influencia del Módulo de Elasticidad del Hormigón.

La Figura 8 muestra las respuestas que consideran incertidumbre en el coeficiente de dilatación térmica. Claramente no hay influencia para instantes anteriores al comienzo de la carga térmica. Para la parte de ensayo sometida a alta temperatura es muy notoria la influencia de esta propiedad ya que es el parámetro que muestra mayor amplitud de resultados. Estos ensayos numéricos son muy sensibles a ese parámetro y el rango de las respuestas crece a medida que se alcanzan las mayores temperaturas.

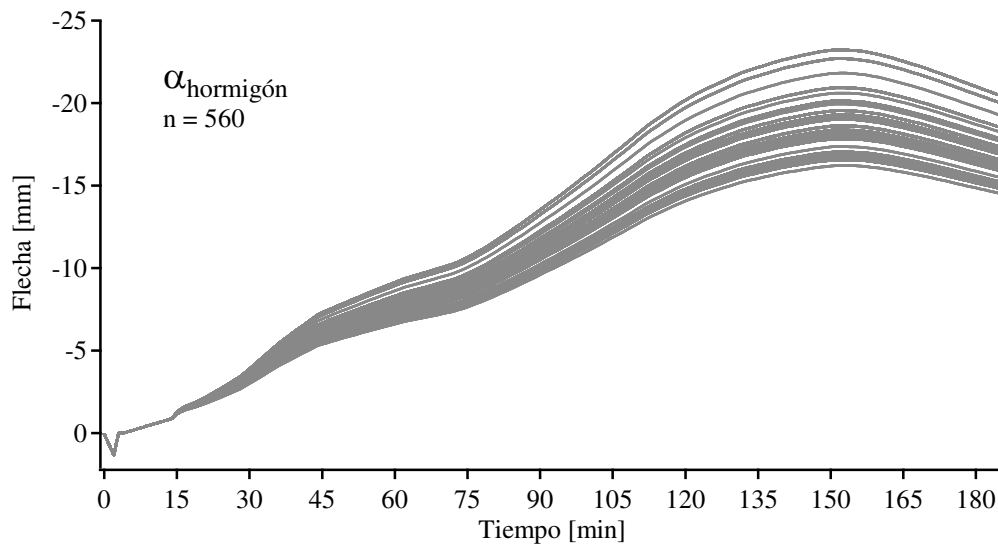


Figura 8. Influencia del Coeficiente de Dilatación Térmica del Hormigón.

## 7 CONCLUSIONES

Los resultados muestran que hay propiedades que influyen marcadamente en estas simulaciones mientras que hay otras que no lo hacen tanto.

La variación del módulo de elasticidad del Acero y del Hormigón evidencian respuestas variadas tanto durante la etapa de pretensión como durante el ensayo térmico. Sin embargo, durante el ensayo térmico el rango de las respuestas no es muy grande.

Respecto la carga de pretensión y la tensión máxima que puede soportar el acero las

respuestas numéricas son similares a la respuesta determinista. Esto debido a que para estas estructuras los proyectistas pretenden aprovechar al máximo las propiedades del acero y la incertidumbre provoca que haya estructuras que no pasan el proceso de pretensión. Las que sí lo pasan responden como el caso determinista.

El coeficiente de expansión térmica del hormigón debe tener un comportamiento dependiente de la temperatura, sin eso el resultado determinista no se aproxima al experimental. Este parámetro influencia marcadamente en las respuestas numéricas que se obtuvieron, para la etapa de calentamiento fue el que mayor rango de respuesta evidencia. En este tipo de estructuras con tensiones auto equilibradas el coeficiente de dilatación térmica es determinante en la respuesta.

## 8 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la generosidad de las facultades de ingeniería de la UCASAL y de la UNSa por permitir el uso intensivo de las salas de cómputo para realizar exitosamente las simulaciones presentadas en este trabajo. Además, agradecen el apoyo económico brindado mediante los proyectos UCASAL Res. Rec. N°1248/2.022 “Relevamiento de fibras naturales en hormigón para caracterización estocástica”, y PICT-2021-I-INVI-00172 “Diseño e implementación de métodos de medición para la caracterización de las propiedades térmicas de hormigón expuesto a altas temperaturas”.

## REFERENCIAS

- Giorgio, L.E. Di and Piovan, M.T. (2019) ‘Aspectos de incertidumbre en la dinámica de metaestructuras piezoeléctricas curvas’, *Mecánica Computacional*, XXXVII, pp. 629–637.
- Jaynes E. Information theory and statistical mechanics I and II. *The Physical Review* 106:1620-1630, 1957.
- Martín, H.D. *et al.* (2021) ‘MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA EL ESTUDIO DE VIBRACIONES LIBRES DE ENTRAMADOS PLANOS CON PARÁMETROS INCIERTOS’, *Mecánica Computacional*, XXXVIII, pp. 531–539.
- Möller, O. (2019) *Confiabilidad de estructuras*.
- Ruano, G., Nallim, L. and Oller, S. (2018) ‘Simulación Termo-Mecánica de Estructuras de Hormigón Pre-Comprimido con Armadura Pre-Tesa’, *Mecánica Computacional*, 36(30), pp. 1449–1463.
- Sampaio, Rubens; Lima, R. (2003) *MODELAGEM ESTOCÁSTICA E GERACÃO DE AMOSTRAS DE VARIÁVEIS E VETORES ALEATÓRIOS*, *Algoritmos Evolutivos*.
- Stefanou, G. (2009) ‘The stochastic finite element method: Past, present and future’, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(9–12), pp. 1031–1051. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.11.007>.
- Tomar, S.S. *et al.* (2018) ‘State of the art of composite structures in non-deterministic framework: A review’, *Thin-Walled Structures*, 132(July), pp. 700–716. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.016>.
- Truesdell, C.; Toupin, R. (1960) *The classical field theories. Handbuch der Physik*.