

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE HORMIGONES REFORZADOS CON MATERIALES RECICLADOS MEDIANTE UN MODELO MESOSCÓPICO

Julián E. Jurado^a, Nahuel M. Zubiarrain^a, Edgardo I. Villa^a, Claudio G. Rocco^a y Matías Braun^b

^a Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.

^b INTEMA (Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales.), CONICET, Avda. Colón 10850, 7600 Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

email: julian.jurado@ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave: Modelo Mesoscópico, Hormigón, Mecánica de Fractura, MEF.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material compuesto constituido principalmente por agregado grueso, agregado fino, cemento y agua. Esta composición heterogénea genera un comportamiento estructural y un proceso de fisuración complejo en el material. Por lo tanto, los modelos numéricos que consideran el hormigón como un material homogéneo no es suficiente para establecer la relación precisa entre las características geométricas y las propiedades físicas con la respuesta macroscópica del material compuesto.

En este estudio, se ha desarrollado un modelo bidimensional a escala mesoscópica para estudiar el comportamiento de los hormigones reforzados con materiales reciclados. Se ha analizado en particular, el reemplazo de diferentes porcentajes de áridos gruesos por caucho. El modelo discretiza las tres fases: el agregado, el caucho, la matriz de mortero y sus correspondientes zonas de transición interfacial. Para la implementación del modelo, se ha creado un algoritmo en Python que permite generar una distribución aleatoria de agregados circulares a partir de una curva de distribución de tamaños. Se ha empleado un modelo de plasticidad con daño disponible en la librería del código de análisis por el método de elementos finitos Abaqus/Explicit.

Con el objetivo de analizar la variación de las propiedades mecánicas con la incorporación de caucho en el hormigón, se han simulado ensayos de compresión uniaxial. Los resultados obtenidos se han comparado con datos experimentales extraídos de la literatura.

2. MODELO MESOSCOPICO PROPUESTO

Se propuso un modelo mesoscópico para el hormigón en el cual las partículas de árido grueso, las partículas de caucho, la matriz de mortero y la zona de transición interfacial (ITZ) se representan como elementos bidimensionales de 4 nodos.

Para obtener la geometría y composición de la probeta de hormigón, se ha desarrollado un código utilizando el lenguaje de programación Python. El procedimiento seguido por este código consiste en colocar los áridos y el caucho de manera aleatoria teniendo en cuenta la distribución granulométrica, forma y propiedades establecidas. Las proporciones de áridos y caucho pueden ser controladas por una relación volumétrica entre estos.

La distribución de tamaños de las partículas de áridos gruesos y de las partículas de caucho puede verse en la Figura 1. En cuanto a la ubicación de éstas se realiza aleatoriamente

siguiendo un procedimiento de “take-and-place” [1], generando primero las partículas más grandes y terminando con las más pequeñas, cumpliendo con los requisitos de mínimo espaciado y no solapamiento.

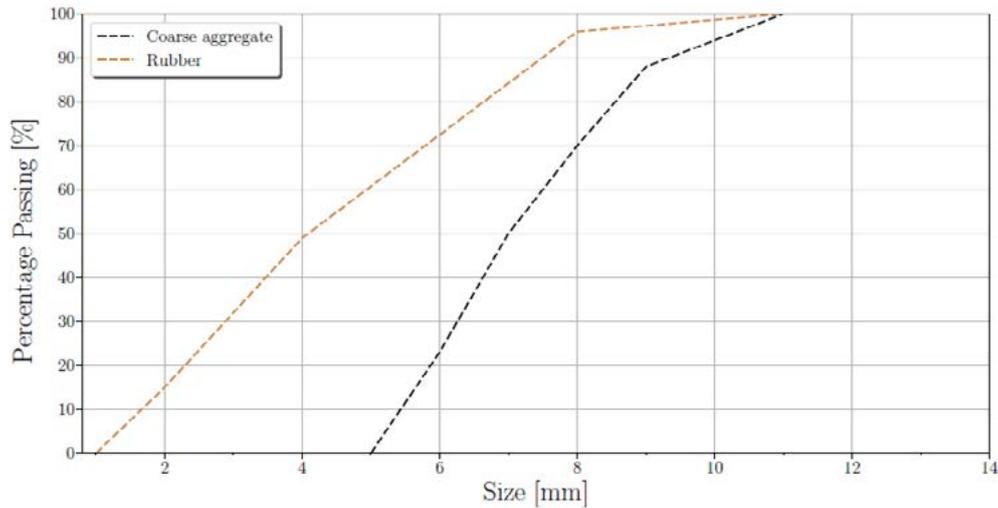


Figura 1: Distribución de tamaños del agregado grueso y del caucho incorporado.

En este modelo, la zona de transición interfacial (ITZ) entre los áridos y la matriz de mortero se modela como una fase más con sus propiedades definidas. Esto se debe a que esta zona de transición se considera importante en la iniciación del daño y su propagación en el material [2]. Se decidió utilizar un espesor de 0,1 mm para esta capa (ver Figura 2).

Se utilizan diferentes propiedades y modelos de comportamiento para cada una de las fases. Dado que los áridos son más resistentes que la matriz de mortero, y considerando que el inicio del daño se produce en la ITZ, se decidió modelar esta fase como un material elástico lineal. Las propiedades adoptadas para cada fase se muestran en la Tabla 1.

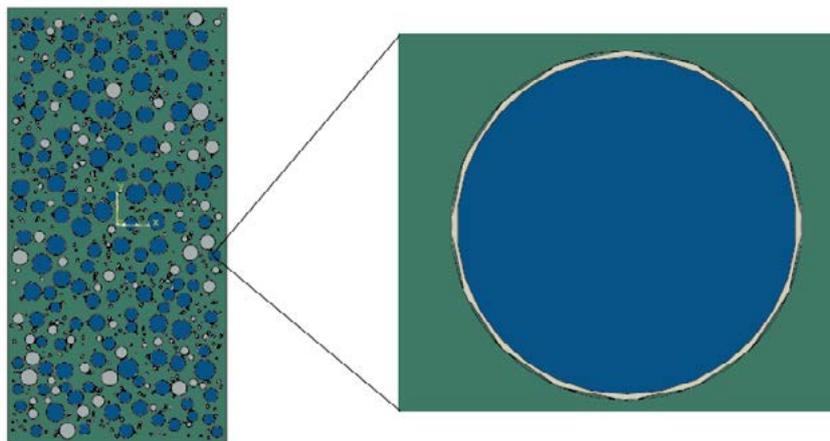


Figura 2: Representación de la fase ITZ con un espesor de 0,1 mm.

La matriz de mortero y la ITZ se modelan mediante un modelo de daño (Concrete Damage Plasticity) [3] en el que se tiene en cuenta los parámetros de plasticidad, así como el desarrollo de daño en el material. Dado que la ITZ tiene una resistencia inferior a la de la pasta de cemento, se consideró razonable asignar a esta última una resistencia de aproximadamente el 70% de la resistencia de la matriz de cemento.

Materials	Elastic modulus	Poisson's ratio	Density	Tensile strength
Coarse aggregate	70.00 Gpa	0.2	2.65 gr/cm^3	-
Mortar matrix	33.70 Gpa	0.2	3.15 gr/cm^3	17.00 Mpa
ITZ	23.59 Gpa	0.2	3.15 gr/cm^3	11.90 Mpa
Rubber	50.00 Mpa	0.5	1.30 gr/cm^3	-

Tabla 1: Propiedades adoptadas para cada fase.

Se utilizó Abaqus/Explicit [4] para determinar la respuesta completa tensión-deformación. Este método de análisis tiene en cuenta un estado de equilibrio dinámico y las fuerzas de inercia se vuelven más importantes, a la vez que los tiempos de análisis computacional son mucho mayores. Esto requiere aumentar artificialmente la velocidad del proceso en la simulación para obtener una solución económica, pero asegurándose que las fuerzas de inercias continúen despreciables.

3. PROBLEMA ANALIZADO

El análisis parte de una mezcla de hormigón normal de referencia, que presenta un porcentaje de árido grueso del 36,8% respecto al volumen total de la muestra. Luego se analizan varios modelos numéricos de probetas en 2D con las siguientes dimensiones: 100mm x 200mm, sometidas a una carga de compresión uniaxial.

Los análisis se realizan en condiciones de tensión plana con un espesor fuera del plano de 100 mm. Esto busca representar una probeta cilíndrica de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. La alteración en los resultados de esta aproximación se analizó siguiendo el enfoque descrito por Nielsen y Hoang [5].

El modelo mesoscópico propuesto para el hormigón con incorporación de caucho se aplica con relaciones de sustitución volumétricas que varían en el rango de $\rho_{vr} = 0 - 0.6$ (ver Figura 3). Este valor (ρ_{vr}) se define como la relación entre el volumen de áridos gruesos sustituido en la probeta de hormigón con caucho y el volumen total de áridos gruesos de la mezcla normal de referencia. Para estudiar los efectos de la fracción volumétrica de caucho incorporada en la respuesta del material, se han realizado varios análisis numéricos de compresión uniaxial para determinar las curvas tensión-deformación.

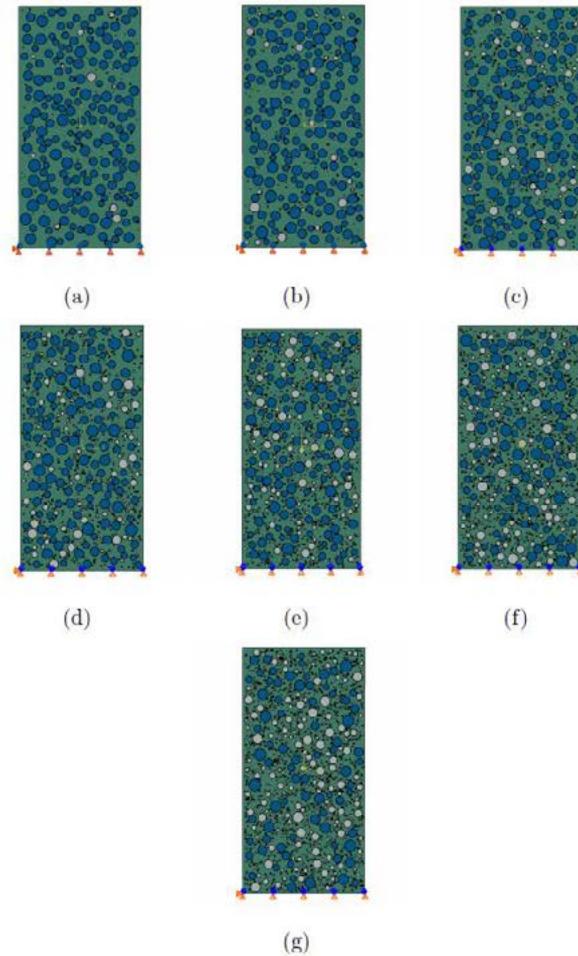


Figura 3: Distribución aleatoria de áridos y caucho para diferentes valores de reemplazo volumétrico (ρ_{vr}). (a) $\rho_{vr} = 0.05$, (b) $\rho_{vr} = 0.10$, (c) $\rho_{vr} = 0.20$, (d) $\rho_{vr} = 0.30$, (e) $\rho_{vr} = 0.40$, (f) $\rho_{vr} = 0.50$, (g) $\rho_{vr} = 0.60$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la validación del modelo mesoscópico, se realizaron 4 simulaciones para cada porcentaje de caucho. Para cada una de estas simulaciones se obtuvo el módulo de elasticidad y la tensión máxima a partir de las curvas de tensión-deformación generadas. Estos resultados se contrastaron con los datos experimentales extraídos de la literatura [6].

Bomba *et al.* [6] propusieron ecuaciones de predicción de las propiedades mecánicas del hormigón con caucho a partir de un ajuste basado en 238 resultados experimentales. La ecuación (1) permite predecir la degradación de la resistencia a la compresión:

$$f_{cr} = \frac{1}{1 + 2\left(\frac{3\lambda\rho_{vr}}{2}\right)^{3/2}} f_{c0} \quad (1)$$

Esta ecuación relaciona dos variables: la relación entre el volumen de áridos gruesos sustituido en el hormigón con caucho y el volumen total de áridos gruesos en la mezcla normal de referencia (ρ_{vr}), y la relación entre la resistencia de una muestra de hormigón con un determinado porcentaje de caucho y la de la mezcla de hormigón de referencia (f_{cr}/f_{c0}). Mientras que el factor λ tiene en cuenta la gama de tamaños del árido mineral sustituido, que puede ser árido fino (FA), árido grueso (CA), o árido grueso y fino (FA + CA).

A partir de la Ec. (2) es posible predecir el módulo de elasticidad del hormigón con caucho en función de la resistencia a la compresión del hormigón con caucho calculada mediante la Ec. (1).

$$E_{cr} = 12 \left(\frac{f_{cr}}{10} \right)^{2/3} \quad (2)$$

Las curvas mostradas en la Fig. 4 representan las respuestas tensión-deformación para diferentes porcentajes de caucho obtenidas con el modelo. También se muestra la curva correspondiente a la mezcla de hormigón de referencia sin caucho. Se observa una disminución en la tensión máxima alcanzada y en los valores del módulo de elasticidad a medida que aumenta la cantidad de caucho en la mezcla.

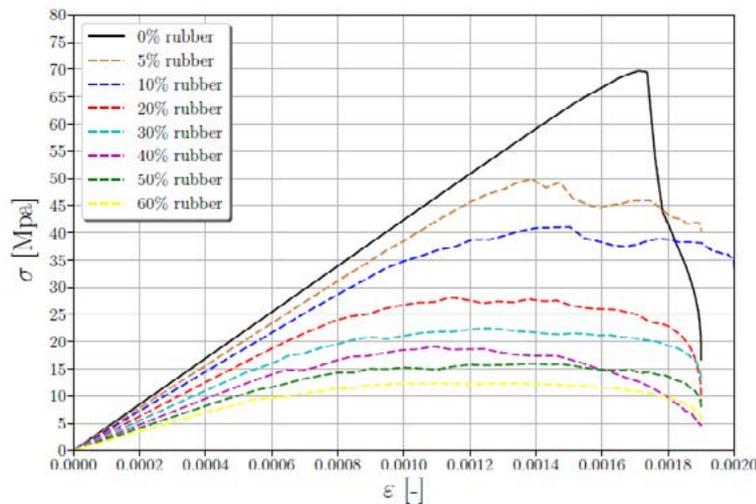


Figura 4: Curvas tensión-deformación para diferentes valores de ρ_{vr} .

En la Figura 5 se presenta la resistencia a compresión normalizada en función del porcentaje de caucho reemplazado. En esta gráfica se comparan los resultados obtenidos con el modelo propuesto, los resultados experimentales [6] y la Ec. (1) [6]. Como puede observarse, los resultados numéricos se encuentran dentro de la dispersión de resultados experimentales. A su vez el modelo propuesto, al igual que los datos experimentales, presentan una dispersión de resultados menor, en la medida en que aumenta el porcentaje de caucho agregado. A su vez, puede observarse que el modelo numérico arroja valores más conservadores respecto a los valores del ajuste de la Ec. (1)

Del mismo modo, los resultados del módulo de elasticidad con análisis mesoscópicos son representados en la Figura 6, con los datos experimentales y la Ec. (2). Estos resultados muestran que el modelo numérico es capaz de predecir correctamente la degradación de la rigidez del hormigón al aumentar el porcentaje de caucho. La predicción del modelo numérico se encuentra dentro de la dispersión de resultados de la campaña experimental.

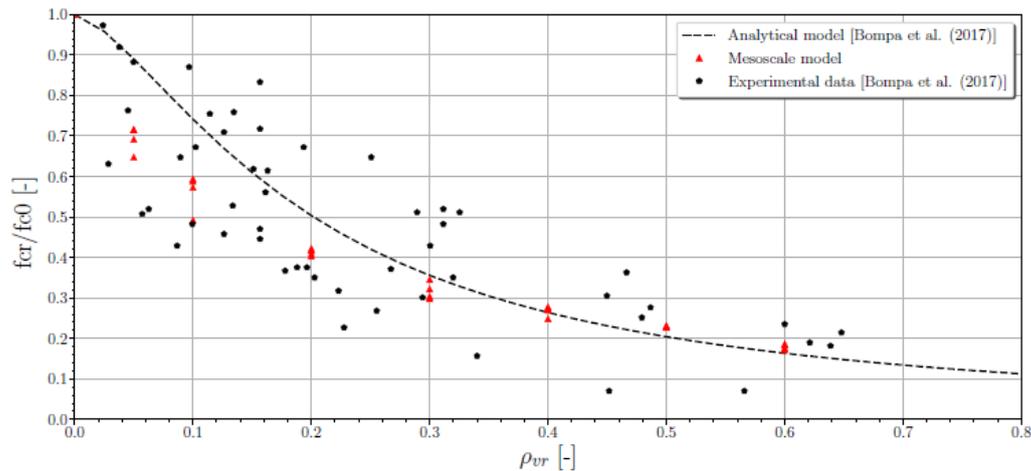


Figura 5: Degradación de la resistencia a compresión en función de la incorporación de caucho (ρ_{vr}).

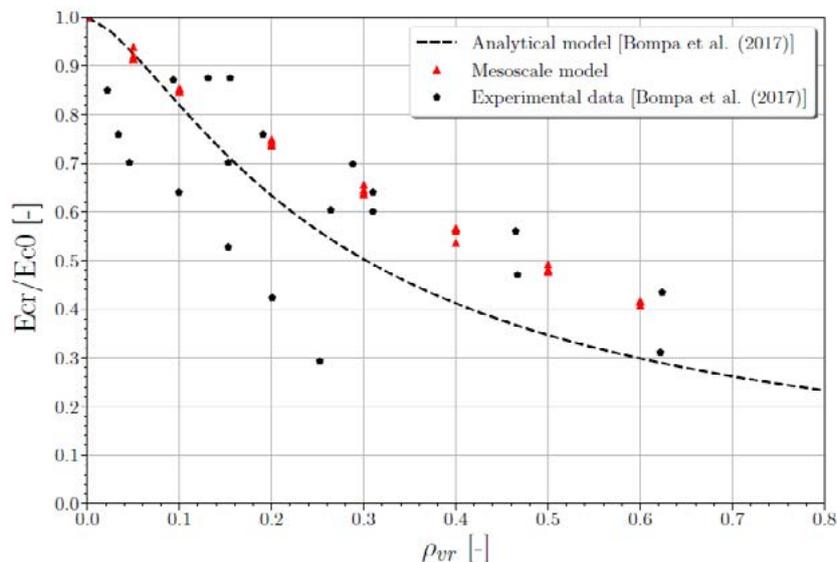


Figura 6: Degradación del módulo de elasticidad en función de la incorporación de caucho (ρ_{vr}).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos desarrollado un código utilizando el lenguaje de programación Python que nos permite modelar, a escala mesoscópica, probetas de hormigón con incorporación de caucho en reemplazo de parte del agregado grueso. Se han simulado ensayos de compresión uniaxial, considerando distintos porcentajes de caucho, obteniendo para cada caso la tensión de rotura y el módulo de elasticidad. Los resultados obtenidos se han comparado con datos experimentales extraídos de la literatura.

A partir de los resultados de las simulaciones realizadas se pudo ver que existe una buena relación entre los resultados obtenidos con el modelo propuesto y los valores experimentales, tanto para la rigidez como para la resistencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. Wang, A. Kwan, H. Chan, Mesoscopic study of concrete i: generation of random aggregate structure and finite element mesh, *Computers & structures* 70 (5) (1999) 533–544.
- [2] Y. Li, X. Zhang, R. Wang, Y. Lei, Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review. *Construction and Building Materials* 227 (2019) 116691.
- [3] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume III: Materials. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.
- [4] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume II: Analysis. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.
- [5] M. P. Nielsen, L. C. Hoang, *Limit analysis and concrete plasticity*, CRC press, 2016.
- [6] D. Bompá, A. Elghazouli, B. Xu, P. Stafford, A. Ruiz-Teran, Experimental assessment and constitutive modelling of rubberised concrete materials, *Construction and Building Materials* 137 (2017) 246–260.