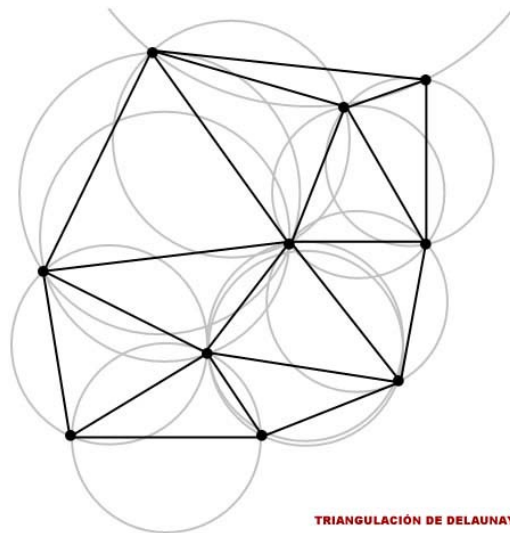


# Modelo micro-mecánico de concreto bajo carga estática

*Triangulación de Delaunay. Referencia. Introducción. Hipótesis del modelo. Generación de la fase de agregado. Generación de la malla. Relaciones constitutivas para las diferentes fases. Conclusiones.*

## Triangulación de Delaunay

También conocida por su pronunciación como *triangulación de Deloné*, es un arreglo de triángulos contiguos que conforman una malla o red. Se emplea en la preparación de modelos discretos.



La condición del arreglo es que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la malla no debe contener ningún otro juego de vértices de otro triángulo. En MATLAB puede encontrarse el algoritmo de generación.

## Referencia

El trabajo que se presenta ha sido elaborado en la Universidad de Michigan, Ann Arbor, USA, y corresponde a la tesis doctoral de un profesor de la Universidad de Alejandría, Egipto.

Ashraf Ragab Mohamed and Will Hansen. *Micromechanical Modeling of Concrete Response under Static Loading - Part 1: Model Development and Validation*. ACI Materials Journal, Vol 96, N° 2, March - April 1999. USA.

El micro-modelo desarrollado considera el agrietamiento por tensión como el único criterio de fractura a nivel micro. Utiliza el método de elementos finitos como una herramienta numérica con un elemento reticulado como básico en la red de elementos finitos. La estructura interna del concreto es modelada en tres fases: *matriz*, *agregado* e *interfaces* entre ambos. Se considera la aleatoriedad en el agregado, y es posible incluir la naturaleza probabilística de las tres fases. Las relaciones constitutivas de los elementos están descritas de acuerdo al concepto de esparcimiento de grietas basado en un modelo ficticio de agrietamiento.

El modelo propuesto permite predecir la respuesta del concreto bajo carga mono tónica: las formas de las grietas asociadas a diferentes estadios de las cargas, la localización de la deformación, y el efecto del tamaño en la resistencia nominal. Las predicciones del modelo están de acuerdo con el trabajo experimental documentado. El estudio incluye pruebas, resultados y comparaciones.

## Introducción

El comportamiento mecánico de materiales casi frágiles como el concreto está caracterizado por deformación inelástica antes de alcanzar la *carga pico* seguido por un ablandamiento y deformaciones en la etapa *post-pico*. Los modelos mecánicos no lineales de fractura y modelos continuos no locales pueden llegar a una mejor descripción. Una simulación directa de la micro estructura aleatoria del concreto es útil como modelo de predicción.

En este estudio se considera solamente el agrietamiento por tensión en el nivel micro como criterio de falla. Se considera sólo la interacción axial entre puntos vecinos. Sólo es considerado un análisis bidimensional y comportamiento por tensión.

El nuevo modelo considera las propiedades básicas del material y permite predecir la respuesta del concreto bajo cargas estáticas. Puede evaluar el efecto de factores externos como las condiciones de frontera. También permite identificar las relaciones constitutivas de los materiales del concreto.

## Hipótesis del modelo

Basado en experiencia experimental se postula que la falla de los materiales del concreto está relacionada con el inicio y propagación de grietas al nivel micro. Los otros fenómenos observados, como el agrietamiento de bandas de corte en pruebas de compresión son consecuencia de factores externos asociados con las técnicas de prueba. Se ignora la deformación por corte y sólo se considera la deformación axial entre puntos vecinos. De esta manera el modelo micro estructural es un arreglo de elementos axiales (como un reticulado) conectando los puntos vecinos.

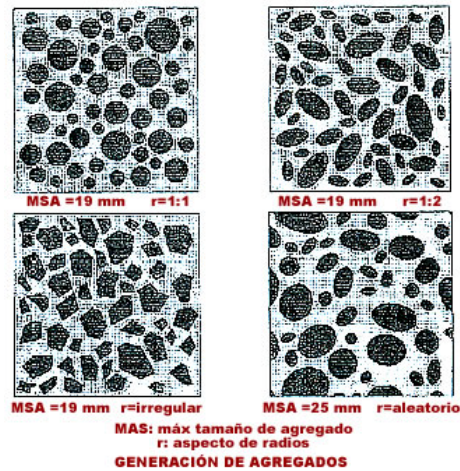
La heterogeneidad del concreto a nivel micro se simula en dos hipótesis: (1) el concreto está compuesto de tres fases: matriz, agregados, e interfaces matriz-agregados, (2) las propiedades de los materiales en cada fase varían de una localización a otra. El agregado es generado en forma aleatoria según la distribución de los granos. Las propiedades de los materiales pueden ser asignadas a cada elemento de acuerdo a una distribución estocástica.

## Generación de la fase de agregado

Las formas que se consideran son: circular, elíptica con relación fija de radios, y elíptica con relación aleatoria de radios.

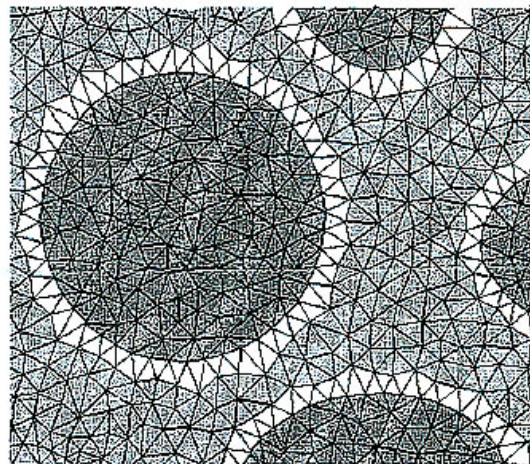
La distancia mínima entre las fronteras de partículas vecinas es asumida en 2 mm. La partícula más grande se coloca primero y se agregan progresivamente las otras. El centroide, la orientación y el aspecto de radio de cada partícula, se generan aleatoriamente.

Para simular un pequeño espécimen de concreto de 500 x 500 mm se van cortando especímenes menores con orientación y localización aleatoria.



## Generación de la malla

Se genera por triangulación de Delaunay por una simulación numérica. Los bordes de los elementos son generados por elementos finitos triangulares, y conforman los componentes de la estructura. Para forzar que la malla coincida con el agregado y las fronteras del espécimen se introducen puntos y segmentos de líneas en la generación de la malla. Estos puntos describen las fronteras (externas y de los agregados) resultando la conformación de la triangulación de Delaunay.



Colores: OSCURO: agregado  
CLARO: matriz BLANCO: interfase

MALLA Y PARTES

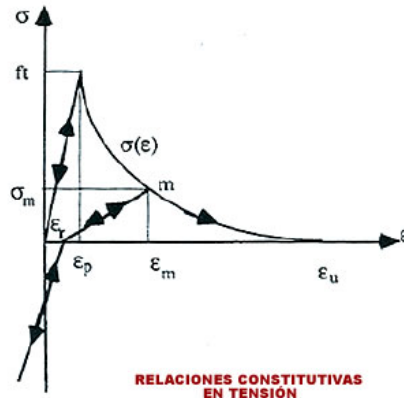
## Propiedades de los materiales

Se trata del módulo elástico  $E$ , de la resistencia a la tensión  $f_t$ , y de la energía de fractura  $G_F$ . Los tres parámetros son diferentes para las diferentes fases. Pueden asignarse en forma determinística o probabilística. En el caso del estudio, los valores promedio utilizados son los siguientes.

Fase	$f_t$ , MPa	$E$ , GPa	$G_F$ , N/mm
Agregado	10.0	65.0	0.060
Pasta de cemento (matriz)	3.0	20.0	0.050
Interface	2.0	18.0	0.035

## Relaciones constitutivas para las diferentes fases

Todos los elementos son asumidos a ser linealmente elásticos. Los elementos sometidos a tensión son lineales hasta alcanzar la resistencia a la tensión ( $E$  y  $f_t$ ). Le sigue un ablandamiento cuyo comportamiento se modela a través de un componente en la relación constitutiva hasta completar la relación constitutiva de la red. Los parámetros de esta segunda parte son la energía de fractura  $G_F$  y la forma de la curva esfuerzo - separación.



La figura muestra las relaciones constitutivas para un elemento en tensión

Si  $\epsilon \leq \epsilon_p$  entonces  $\sigma = E\epsilon$

Si  $\epsilon_u > \epsilon > \epsilon_p$  entonces  $\sigma = \sigma(\epsilon)$

Si  $\epsilon > \epsilon_u$  entonces  $\sigma = 0$ .

En donde:  $\epsilon_p$  es la deformación unitaria en el límite elástico Y  $\sigma(\epsilon)$  es la función para la declinación en la parte blanda, que a su vez puede ser:

Lineal:  $\sigma(\epsilon) = f_t [1 - (\epsilon - \epsilon_p) / (\epsilon_u - \epsilon_p)]$  o

Exponencial:  $\sigma(\epsilon) = f_t [\exp(-k(\epsilon - \epsilon_p) / (\epsilon_u - \epsilon_p))]$

Donde  $k$  depende de la relación  $f_t/G_F$  y en el estudio asume el valor de 5.14.

## Conclusiones

El modelo propuesto permite la predicción de la respuesta mecánica del concreto bajo tensión, incluyendo la respuesta de ablandamiento y el agrietamiento.

La respuesta de la predicción es independiente del tamaño de la malla, siempre que sea lo suficientemente fina para representar la heterogeneidad interna.

De acuerdo al patrón de agrietamiento, el modelo puede capturar la localización de la deformación.

El modelo permite predecir el comportamiento y resistencia límite a la fractura.

Las predicciones del modelo están conformes con el trabajo experimental.