



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

Informe Final de Pràcticas

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE

Tutor: Ilaria Iaconeta, Antonia Larese de Tetto

Por: Alba Navarro Casanova

Máster Métodos Numéricos en Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos -  
Barcelona Tech

## Agradecimientos

Antes que nada, quiero agradecer a todos los trabajadores de CIMNE que me han ayudado, especialmente a Antonia Larese de Tetto e Ilaria laconeta por toda la ayuda y el apoyo que me han brindado durante esta estancia en las prácticas externas. Gracias a ellas creo que ha sido una experiencia muy agradable, mediante la que he adquirido múltiples conocimientos y habilidades que me serán muy útiles en el futuro laboral y profesional.

## 1. Introducción

Para poner en situación antes de comenzar el Industrial Training en CIMNE, estaba en el segundo año del Máster en Métodos Numéricos en Ingeniería, en el segundo cuatrimestre, aunque la mayor parte de las prácticas las realicé en verano tras finalizar ese cuatrimestre. Había cursado todas las asignaturas del Máster (correspondientes a 75 ECTS) y me faltaban por hacer las prácticas o Industrial Training (15 ECTS) y el Proyecto Final o TFM (30 ECTS) para terminar la titulación.

Conseguí las prácticas en CIMNE gracias a la profesora Antonia Larese de Tetto, puesto que mi situación académica era un poco compleja al estar cursando dos másteres a la vez (Máster de Métodos Numéricos en Ingeniería y Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos), necesitaba asistir a clases porque estaba haciendo las asignaturas del primer año del Máster de Ing. Caminos. Le comenté a Antonia que me gustaría hacer el industrial training en la misma universidad para poder compaginarlo y además porque considero que CIMNE es un referente en mecánica computacional.

Creo que estas prácticas me han ayudado a aplicar conceptos adquiridos en las asignaturas del máster, así como a familiarizarme mejor con el entorno de trabajo que puedo tener en el futuro.

## 2. El entorno de trabajo

Como sabemos, el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) fue fundado en 1987 en el Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña bajo los auspicios de la UNESCO. Este centro es un centro autónomo de investigación y desarrollo que actualmente cuenta con más de 200 investigadores de más de 50 países en todo el mundo y organiza cursos anuales, congresos, conferencias y seminarios que nos mantienen presentes en muchas ciudades del mundo. Además, el centro se mantiene en contacto con investigadores de todo el mundo para permitir un intercambio constante de conocimientos.

Mi entorno de trabajo fue en una oficina donde trabajan varios estudiantes de doctorado, cada uno de los cuales está dedicado a diferentes programas y aplicaciones dentro de la mecánica computacional y el cálculo de estructuras. El desarrollo de códigos aplicados al mundo de la ingeniería, especialmente la ingeniería civil.

En este ambiente de trabajo, trabajé con Iliaria Iaconeta, ella fue la que me ayudó y me enseñó cómo era el código y el método que utilizábamos: Método de punto de material (MPM). Iliaria siempre estuvo muy atenta y ha sido muy amable conmigo, así que le agradezco mucho el trato que recibí, su ayuda y todo el conocimiento que me ha enseñado. Además de Iliaria, Antonia Larese supervisaba nuestro trabajo y nos ayudaba a analizar los resultados, también nos aportaba ideas para posibles mejoras del código.

Mi trabajo durante el entrenamiento industrial fue utilizar el Método de punto de material para realizar diversos análisis que ya conocemos, como el análisis de una probeta de hormigón a compresión, análisis brasileño, análisis a cortante, etc. Después de realizar los análisis, mi trabajo era observar los resultados: ver cómo se producía la ruptura de la muestra, si era la esperada, si sucedía para la tensión que debía ser, si los gráficos de tensión-deformación eran correctos, etc... Todos los análisis los comparaba con los resultados de laboratorio y con los de DEM.

En definitiva, mi trabajo fue aprender a usar y aplicar el código sobre una estructura, aprender de qué forma estaba estructurado dicho código, ser capaz de entender e interpretar los resultados, aprender retocar el código en función del interés, conocer los diferentes archivos y saber dónde está todo y así poder ir modificando el código adaptándolo a cada caso. Al final del análisis de los resultados la finalidad era observar si estos eran los esperados, y por lo tanto validar el código.

El código MPM es un código en lenguaje C ++, por lo que el sistema operativo utilizado fue Linux. Esta aplicación de Mecánica de Partículas está dentro de Kratos, así que, además de conocer el método de punto material, también me he familiarizado con el programa Kratos en general, que considero que es muy importante de cara a un futuro. Por otro lado, destaco también la mejora de conocimientos en lo que se refiere a la mecánica de medios continuos puesto que todos los análisis se realizaban usando modelos de daño y por tanto observando en el resultado final el daño sobre la estructura (probeta).

### 3. Experiencia adquirida

#### 3.1. Experiencia de las prácticas

Gracias a la realización de estas prácticas he adquirido algunos conocimientos que antes no tenía y también he consolidado gran parte del conocimiento que ya conocía de las materias estudiadas en el máster. Estos conocimientos previos a las prácticas fueron mucho más teóricos y gracias a la realización de esta estancia en CIMNE he podido aplicarlos y, por lo tanto, ver la parte más práctica. Creo que las prácticas son una gran ayuda y una iniciativa muy interesante, así como un primer contacto con la vida profesional que ayuda a familiarizarse con el entorno de trabajo.

En mi lugar de trabajo como he comentado había muchos estudiantes de doctorado, con un alto nivel de programación y conceptos del mundo de la mecánica computacional. Soy consciente de que tengo mucho que aprender en este campo, en el campo de la programación y los métodos numéricos, gracias a mi estancia en CIMNE he podido observar los grandes caminos de investigación de esta entidad y el alto nivel de sus empleados, de los cuales me siento muy agradecida de haber podido aprender.

Como puntos a favor me gustaría destacar la aplicación práctica de los conceptos teóricos del máster, aunque también la aplicación de la física y de los conocimientos estructurales del grado para la resolución de los problemas (a la hora de la toma de iniciativa para que los resultados mejoren y sean los deseados). Como punto flojo tengo que destacar la programación en lenguaje C++, puesto que durante el máster tampoco tenía mucho nivel en este tipo de programación y al principio se me hizo un poco duro entender cómo funcionaba, aunque si se consigue es muy útil para nuevos proyectos.

#### 3.2. Formación

Durante las prácticas mi trabajo era la realización de diferentes simulaciones para aplicar y validar el Método del Punto Material (MPM) al cálculo de estructuras. El MPM es una técnica numérica utilizada para simular el comportamiento de sólidos, líquidos, gases y cualquier otro material continuo. Especialmente, es un método de discretización espacial robusto para simular interacciones de múltiples fases (fluido sólido-gas). En el MPM, un cuerpo continuo se describe mediante una serie de pequeños elementos lagrangianos denominados "puntos materiales". Estos puntos de material están

rodeados por una malla de fondo que se utiliza solo para calcular los términos de gradiente, como el gradiente de deformación. A diferencia de otros métodos basados en malla como el método de elementos finitos, el método de volúmenes finitos o el método de diferencias finitas, el MPM no es un método basado en malla y está categorizado como un método de partículas sin malla (meshfree, meshless) o continuo.

Durante el desarrollo de las prácticas mi objetivo fue ver si el método funciona para diferentes casos. Llevé a cabo diferentes análisis y obtuve diferentes resultados para pruebas en las que el mecanismo de rotura era conocido, teniendo como objetivo validar el método y el código, además de identificar los puntos flojos de este.

Para comprobar que el método funciona y que por tanto nuestra implementación en el código es correcta los diferentes resultados se han comparado con los resultados de DEM y análisis de laboratorio. Por lo general los resultados que hemos obtenido han sido óptimos, aunque hay ciertos aspectos que cabe mejorar como por ejemplo que las distribuciones de tensiones no son las más adecuadas, para ello sería necesario seguir investigando en el MPM y pensar en futuras y posibles mejoras.

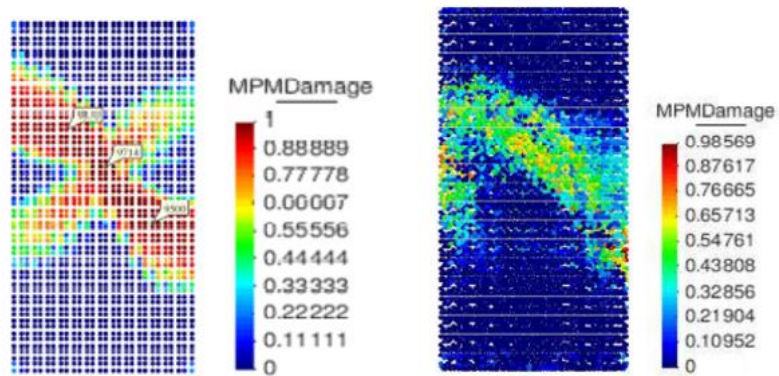
Algunos de los análisis que realicé son: ensayo a compresión, ensayo brasileño, ensayo por cortante..., además dichos análisis se realizaban en 2D y 3D. Se ha demostrado que el método funciona y el código se puede utilizar para diferentes aplicaciones.

Estas prácticas han reforzado mis conocimientos en áreas que tienen más que ver con asignaturas como estructuras, materiales, también física y matemáticas por el uso de formulación matemática... Pero sobre todo mecánica de medios continuos puesto que hemos usado modelos de daño por tanto sin una base sólida de esta asignatura es muy difícil entender los modelos y los resultados que se obtienen.

Como en este informe no puedo aportar todos los resultados y los datos de los diferentes análisis solo mostraré una pequeña parte en la hoja que se sigue con algunos de los resultados de los análisis comentados, aunque tengo un informe más extenso se muestran más resultados y se explicado cómo se han obtenido.

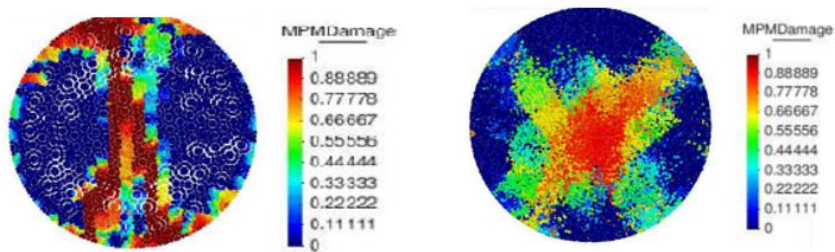
A continuación, muestro algunos de los resultados obtenidos:

### Ensayo a Compresión



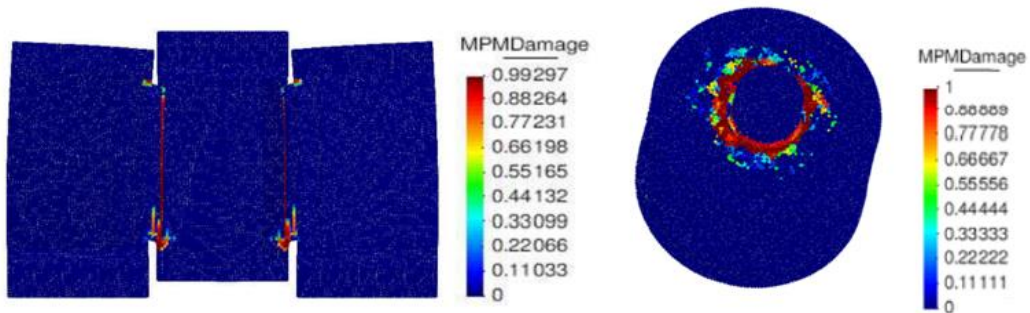
Imágen 1: Distribución del daño ensayo a compresión con el Método del Punto Material, 2D y 3D respectivamente.

### Ensayo Brasileño



Imágen 2: Distribución del daño ensayo brasileño con el Método del Punto Material, 2D y 3D respectivamente.

### Ensayo por Cortante



Imágen 3: Distribución del daño ensayo cortante con el Método del Punto Material, 2D y 3D respectivamente.

#### 4. Conclusiones

Como conclusión creo que la realización de las prácticas en empresa ha sido muy provechoso, por varios de los puntos comentados anteriormente. Dicha estancia en una empresa te enseña el tipo de trabajo que puedes realizar en un futuro, te enseña a aplicar los conocimientos teóricos a la parte práctica, por otro lado, considero que aprender a trabajar en un grupo de trabajo donde puedas consultar tus dudas e inquietudes con más compañeros también es un punto muy importante y favorable ya que aprendes de los demás.

Creo que he cumplido con los objetivos iniciales que se me plantearon, ahora conozco mucho mejor el código y los diferentes archivos, se como modificarlos para adaptarlos a los diferentes modelos y gracias a los ensayos realizados el Método del Punto Material puede ser validado positivamente.

Resultaría muy interesante seguir investigando en las posibles aplicaciones y mejoras de este método. Como futuro trabajo me gustaría comentar que podría implementarse una formulación UP para mejorar el cálculo de las tensiones, es decir una formulación que tenga en cuenta tanto los desplazamientos como las presiones. También podría ser interesante usar el IMPM (Improved Material Point Method) aunque este caso tiene limitaciones en cuanto a las condiciones de contorno podría investigarse como mejorar dicha aplicación en las condiciones frontera. Por otro lado, y ya intentando buscar más líneas de investigación futuras el uso de Submerged Boundary Method también podría ser de utilidad o usar un orden arbitrario del IMPM para combinar métodos de partículas meshfree con elementos finitos.

Por tanto, como conclusión estoy muy contenta y agradecida con todo el trabajo realizado y con todo lo aprendido y me gustaría continuar en un futuro trabajando en esta línea.

