

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Uso de impresoras 3D para generar medios permeables.

CI5803 - Trabajo dirigido en ingeniería Civil.

Diego Soto Rodriguez

Profesor curso:
Ruben Boroschek

Profesor guia:
Paulo Herrera Ricci

23 de enero de 2015

1. Introducción.

Puede parecer a primera vista un poco extraño querer imprimir medios permeables, pero una vez comenzado el análisis, inmediatamente la pregunta es, cuál es el rol de los medios permeables en el desarrollo humano, la respuesta es múltiple sin duda. Lo primero y más primordial es siempre tener presente que en los medios permeables se encuentra la reserva de agua dulce más importante después de los glaciares y aunque la humanidad en estos tiempos ha olvidado que el agua es un elemento vital para nuestra existencia e incluso valora más la acumulación de dinero, esta no dejará de ser una necesidad humana.

Pero no solo acuíferos y reservas de agua están relacionadas con los medios permeables, también existe almacenamiento de CO₂, extracciones de petróleo y gas natural, dos importantes fuentes de energía en las matrices productivas hegemónicas y que sustentan por ejemplo la industria automotriz, la generación de electricidad (termoeléctricas en Chile), como también en generación alternativa de energía como lo son las fuel cells. Los medios porosos en general poseen una multiplicidad de usos que escapan del área de la ingeniería hidráulica como son reactores, mezcladores, filtros y otras como estructuras sostenedoras de tejido celular.

La siguiente pregunta que viene de forma evidente es, por qué imprimir medios permeables, la respuesta se sustenta en lo anterior y tiene que ver con la posibilidad de comparar resultados de modelos numéricos por un lado y por otro la versatilidad de generar medios permeables con distintas características o cualidades a las que poseen en su estado natural, por ejemplo la posibilidad de medios translúcidos, con distintas densidades, durezas, aspereza, etc. También se debe tener en cuenta la capacidad de generar el medio permeable y su contenedor dentro del diseño logrando que la impresión de ambos ocurra de una sola vez.

Por qué impresoras 3D, a pesar de que esta tecnología data de la década de los 70' del siglo XX, su auge y popularidad se ha dado en la última década. Un sin fin de usos se les ha dado, como estudios científicos, impresión de piezas de soporte, prótesis, órganos humanos, modelos biológicos, entre otros. Un creciente aumento en su precisión y en la diversidad de los materiales en los que se puede imprimir. Todos estos factores sumados a la disminución de los costos de imprimir, hacen de la impresora 3D un método interesante para realizar la impresión de los medios porosos.

El último elemento que se expone y no menos importante, es que la impresión de medios permeables con impresoras 3D ya es un hecho, existen pruebas de microcanales ordenados de formas arbitrarias para estudiar la diferencia entre el tiempo de residencia real y el teórico (Fee at all 2014) , por lo que se revisará la factibilidad de realizarlo en la universidad de Chile. Para materializar esto se escoge el uso de *YADE* para generar los medios permeables, que es el interés de este estudio, lo interesante es que existe la posibilidad de generar medios permeables con una estructura definida, es decir, manejar el ordenamiento de las esferas de suelo, para luego experimentar con ellas.

YADE es un software de código abierto basado en el método de elementos discretos, bastante versátil y que permite diseñar medios permeables, con la ventaja de que mediante el DEM (método de elementos discretos, por su sigla en inglés) simula el comportamiento de esferas de suelos granulares sometidas a la gravedad o ensayos que se realizan en laboratorios de suelos.

2. Sobre los medios permeables.

2.1. Acuíferos

Para el caso específico de la ingeniería hidráulica, es importante manejar el concepto de acuífero. Los acuíferos corresponden a formaciones geológicas las cuales permiten almacenar y circular el agua subterránea a través de sus poros o grietas. Dentro de estas formaciones se puede encontrar gravas de río, limo, calizas, areniscas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósito de dunas y algunos tipos de arcillas.

2.2. Medios porosos

Entrando al área de los medios porosos propiamente tal, existen varias definiciones de los medios porosos. Un medio poroso es en palabras simples "un sólido con hoyos" sometido a ciertas restricciones. Un medio poroso es un

Permeabilidad relativa	Permeabilidad			Semi-Permeable				Muy poco permeable						
Arena o grava no consolidada	Grava continua (o redondeada)	Arena continua o mixta			Arena fina, cieno, Loess, Loam									
Arcilla no consolidada y materia orgánica				Turba	Estrato arcilloso			Arcilla expansiva						
Roca consolidada	Rocas muy fracturadas			Roca petrolífera	Piedra arenisca			Roca sedimentaria, dolomita	Granito					
κ (cm ²)	0.001	0.0001	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁵	
κ (miliDarcys)	10 ⁺⁸	10 ⁺⁷	10 ⁺⁶	10 ⁺⁵	10,000	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001	

Figura 1: Tabla de clasificación de medios porosos según su permeabilidad. Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad>

sólido por el que atraviesa un flujo. Una buena definición dentro de las que existen es: un medio con al menos varios caminos continuos que van desde un extremo del medio para el otro sujeto a dos condiciones de importancia, la primera es que la matriz, es decir, el sólido, utiliza una gran cantidad de espacio con respecto a los vacíos y la segunda es que las aberturas que comprenden el espacio vacío son por lo general estrechas (Jacob Bear, 1972).

Ejemplos de medios porosos hay muchos desde suelos rocas porosas o fisuradas, cerámicas, filtros de papel, filtros de arena entre otros. La característica que va a diferenciar estos medios es la permeabilidad. La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. En la Figura 1 se puede observar la diferenciación de los medios porosos según su permeabilidad.

Los materiales a los que se les dará importancia es a los suelos no cohesivos, debido a que el software con el que se realizará el modelo y el método de elementos discretos definido desprecia el efecto de las fuerzas de van der waals. Los materiales a simular son arenas y microesferas de vidrio, ya que con estos materiales se han realizado un par de experimentos en el laboratorio de hidráulica de la FCFM.

3. Descripción de Yade.

El método de elementos discretos se ha utilizado con éxito para modelar la interacción entre flujo y partículas, en algunos casos acoplado con el método de Lattice Boltzman (Feng et al 2007), para estudiar la erosión por contacto (Galindo et al 2013) o para estudiar la erosión debido al piping (Lominé et al 2011). El año 2010 se publica el software *YADE*, el cual se expone en detalle en la publicación “Yade Reference Documentation” (Šmilauer et al 2010), el cual ya ha sido utilizado en modelos a escala de poros de interacción entre flujo y partículas (Catalano et al 2011 y 2013).

YADE es un software de código abierto y extensible que está programado en C++, además de tener licencia gratuita, se posee acceso al código fuente y existe la posibilidad de modificarlo según sean las características y complejidad del problema a abordar. Es posible acoplarlo con otros paquetes sin problema, para solucionar el problema del flujo obteniendo resultados del cambio de posición y rotación de las partículas debido al efecto del flujo y debido a la interacción entre partículas, mientras a su vez se obtienen los efectos en el flujo debido al movimiento de las partículas.

Dentro de las versatilidades de *YADE* es importante mencionar que además de poder generar granulometrías uniformemente distribuidas dentro de un rango, a las cuales se les pueden realizar ensayos triaxiales simples y cohesivos, ensayos de corte simple, realizar ordenamiento por efecto de caídas por gravedad. Es posible generar también procesos de generación periódica de esferas entre otras herramientas que están siendo actualmente

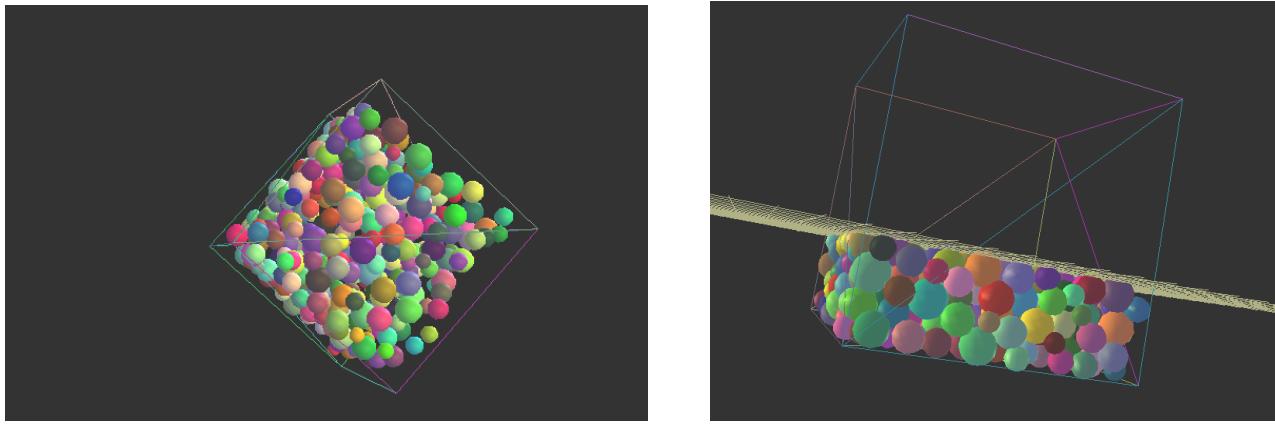


Figura 2: Posibilidades de visualización gráfica en *YADE*.

desarrolladas. Volver a recalcar su característica de código abierto y gratuito, no porque sea una ventaja por definición, sino que por un lado permite el acceso a cualquiera que desee realizar simulaciones de alta calidad como lo permite este código, sino porque al tener acceso al código fuente (Trunk) es posible realizar modificaciones pertinentes a las necesidades del usuario.

Además posee una potente interfaz gráfica tal como se puede observar en la Figura 2 y la posibilidad de post-proceso de imágenes, ya que entrega un set de datos con posiciones, radios, velocidades, fuerzas normales y tangenciales de contacto, entre otras. Los archivos de salida se encuentran en formato VTU y VTK, ambos pueden ser visualizados en softwares dedicados a la interpretación de datos, en esta ocasión en particular se trabajará con el software Paraview.

4. Impresoras 3D.

4.1. Evolución de las impresoras 3D

Antes de hablar de la evolución de las impresoras 3D, se realizará un breve viaje a través de su historia. La tecnología 3D nace en el año 1976 con la invención de las impresoras de inyección de tinta, la cual luego de algunos avances da origen a la inyección de materiales en 1984. En el año 1988 Charles Hull, cofundador de 3D system, inventa la estereolitografía (SLA sigla en inglés) la que consiste a grandes rasgos permite la impresión de un objeto 3D a partir de un set de datos digitales. En la década del 90 dos hitos importantes ocurren, el primero en el año 1992 con la creación de un prototipo de impresión capa por capa, que consiste en un láser UV que solidifica un polímero, el segundo en 1999 que se relaciona con la medicina y es la primera vejiga utilizando recubrimiento sintético con las propias células del paciente. El año 2005 Open source colabora con la impresión 3D el doctor Adrian Bowyer funda RepRap, un proyecto de código abierto para construir impresoras 3D que fueran capaces de imprimir la mayoría de sus propios componentes. En 2006 la empresa Object crea la primera máquina con tecnología SLS, consiste en una máquina que es capaz de imprimir con múltiples materiales, entre ellos polímeros y elastómeros, logrando piezas con partes de distinta densidad y propiedades. A 3 años de haberse fundado el proyecto RepRap, en 2008 aparece Darwin, la primera impresora 3D con capacidad de auto replicarse. En 2009 ocurre el ultimo salto importante entra al mercado Makerbot, compañía de hardware de código abierto y comienza la venta de kits de montaje, los que permiten a los compradores armar sus propias impresoras 3D.

Luego de esta breve revisión histórica, se entrega de forma breve las fases de evolución de las impresoras 3D. La primera fase tiene que ver con la elaboración de prototipos y diseños, en sus inicios las impresoras 3D se utilizaron principalmente para esta función debido a 3 factores, el primero la facilidad de duplicar productos, segundo el bajo costo que implica producir objetos distintos, esto debido a la ausencia de necesidad de una matriz o moldes y tercero por la seguridad y privacidad que implica la creación de piezas sin depender de otros lugares o de transporte. Esto se respalda con el testimonio de un diseñador senior de zapatos de la empresa New Balance que menciona que cada máquina puede producir 100 modelos mensuales (Pullin 2009). Otro testimonio que respalda el argumento del uso de prototipos y sus ventajas es un gerente de tecnología de black and decker

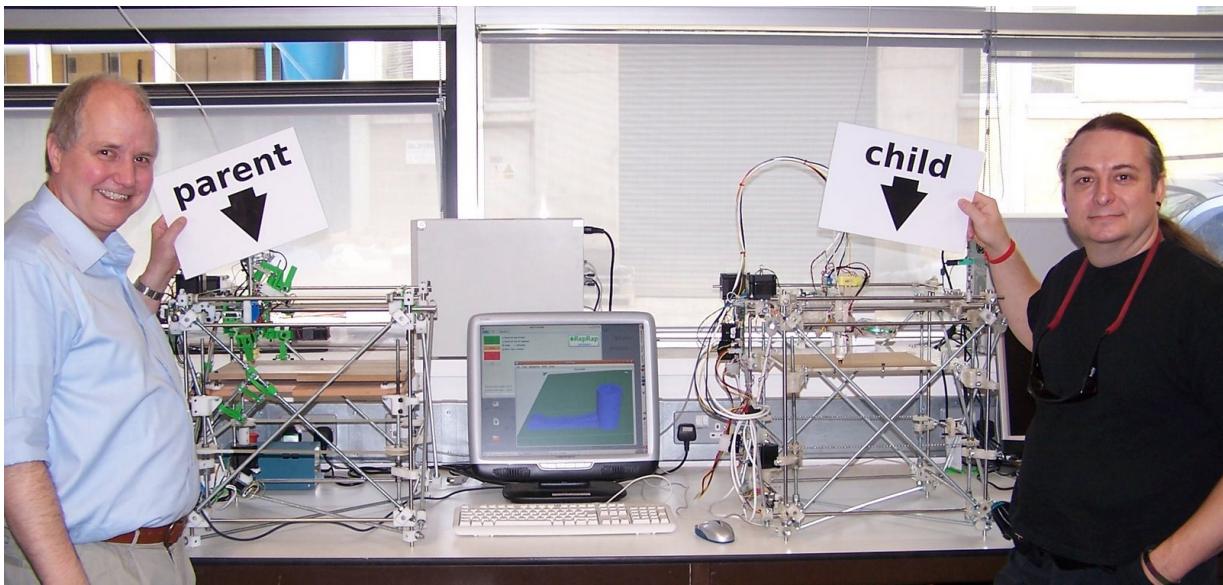


Figura 3: Primera réplica de Darwin, todas las piezas plásticas de la impresora de la derecha fueron construidas con la impresora de la izquierda. A la izquierda Adrian Bowyer y a la derecha Vik Olliver. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_RepRap

quien menciona la demora de 3 a 5 días en obtener un prototipo desde la oficina de servicios, mientras con la impresora in-situ el tiempo que demora el prototipo disminuye a unas pocas horas ("Simplifying" 2010).

La segunda fase tiene que ver con el siguiente salto en masividad de producción, ya la producción no se reduce a prototipos sino que se extiende a productos terminados. Se utiliza la fabricación digital directa y se producen bienes para utilizarlos en pruebas de marketing. La posibilidad de hacer esto tiene que ver con la versatilidad y capacidad de cambiar tamaños formas colores e incluso materiales mediante la impresión.

La ultima fase es la que aún no se concreta, corresponde a que el usuario posea una impresora 3D de igual manera como se masificó la impresora, el fax o el teléfono. Se espera que el consumidor final pueda realizar la fabricación digital directa, imprimir sus propios prototipos, repuestos, piezas de ajedrez, figuras de acción, etc (Berman, 2012).

Existen múltiples tipos de impresoras 3D, como también materiales en los que estas imprimen. Los materiales en los que es posible imprimir en 3 dimensiones son PLA, ABS, elastómeros, resina, poliamida, plástico transparente, nylon-endure material digital, oro, acero, aluminio, titanio, cobalto, cerámica, cera, arena, concreto (aún en desarrollo al igual que el cristal) incluso chocolate, entre otros. "Las principales tecnologías utilizadas en la impresión 3D del metal son el sinterizado láser usando metal en polvo y la tecnología por haz de electrones desarrollada por la empresa Arcam", por otro lado "la impresión 3D de arena se logra utilizando catalizadores a base de agentes aglutinantes que se unen a los granos de arena creando capas que se utilizan para hacer el objeto requerido" (<https://es.3dilla.com/materiales/>).

4.2. Impresoras disponibles en Fab Lab de la FCFM

En este estudio el enfoque es en las impresoras que imprimen en polímeros, ya que son las impresoras que se encuentran disponibles y en las que se realizarán las pruebas de factibilidad. A continuación se presentan las unidades disponibles en el Fab Lab de la FCFM y sus principales características:

Impresora Makerbot Replicator.

- 1 unidad disponible.
- Funciona con polímeros PLA y ABS.
- Su volumen de trabajo es de 285 x 153 x 155 mm.
- Posee una resolución de 0.1 mm.
- Optimizadas para el uso de PLA.



Figura 4: A la izquierda Impresora makerbot Replicator 2, en la imagen de la derecha Impresora Fab Home, primera impresora 3D personal construida en Chile. Fuente: <http://fablab.uchile.cl/equipment/3d-printers/>

Impresora Makerbot Replicator 2.

- 6 unidades disponibles.
- Funciona con polímeros PLA y ABS.
- Su volumen de trabajo es de 225 x 145 x 150 mm.
- Posee una resolución de 0.2 mm.
- Las nuevas versiones poseen un volumen de 252 x 199 x 150 mm.
- La nueva versión se especializa en PLA, el valor comercial del PLA es \$ 32.000 1 kg.
- El valor comercial de la impresora es de U\$ 3.000.

Impresora FabHome.

- 1 unidad disponible.
- Funciona con cualquier material capaz de fluir a través de una jeringa.
- Su volumen de trabajo es de 200 x 200 x 200 mm.
- Posee una resolución de 0.025 mm.
- Es resultado del proyecto RepRap.

Impresora Bits from Bytes 3D Touch dual (BFB 3D).

- 1 unidad disponible.
- Funciona con polímeros PLA y ABS (deposición de material fundido).
- Su volumen de trabajo es de 185 x 273 x 200 mm.
- Posee una resolución de 0.1 mm.

Impresora 3D System Projet 1500.

- 1 unidad disponible.
- Funciona con polímeros PLA, ABS y visijet.
- Su volumen de trabajo es de 171 x 228 x 203 mm.
- Posee una resolución de 0.1 mm.



Figura 5: A la izquierda Impresora Stratasys uPrint SE plus, en la imagen de la derecha Impresora Objet30 Scholar.

Impresora Stratasys uPrint SE Plus.

- 1 unidad disponible.
- Funciona con polímeros PLA, ABS y visijet.
- Utiliza tecnología FDM (fused deposition modeling).
- Su volumen de trabajo es de 203 x 152 x 152 mm.
- Posee una resolución de 0.25 mm.

Impresora Stratasys Objet30 Scholar.

- 1 unidad disponible.
- Funciona con polímeros PLA y ABS.
- Tecnología polyjet.
- Su volumen de trabajo es de 294 x 192 x 148 mm₆

- Posee una resolución de 0.028 mm.
- Su valor comercial es de U\$ 50.376.
- Corresponde a la versión para estudiantes de la objet30 pro, por eso su menor resolución y menor posibilidad de materiales a imprimir, su uso va desde la creación de piezas, partes, moldes, hasta la impresión de modelos para arquitectos.

4.3. Impresoras sugeridas por sus cualidades.

Si bien las impresoras 3D que se encuentran en el Fab Lab de la FCFM poseen buena resolución, poseen algunas desventajas con respecto a otras que se encuentran actualmente en el mercado. Para las impresoras con tecnología FDM como la uPrint SE Plus, las principales desventajas con otros modelos de Stratasys son el volumen disponible de impresión y la resolución. Para las de tecnología Polyjet como la Objet30 Scholar, además de que todas las alternativas presentan una mejor resolución, existe la posibilidad de imprimir en materiales transparentes, resistentes a altas temperaturas, nylon-endure y materiales digitales.

En concordancia a lo anterior se presentan las siguientes alternativas a barajar, obviamente esto quedará sujeto a una evaluación precio versus mejora entregada, dado los altos costos de estas impresoras en la actualidad.



Figura 6: a la izquierda el nuevo prototipo Fortus 450c y a la derecha la Fortus 900c, ambas de stratasys.
Fuente: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/stratasys-printers/fortus-900mc/>

Impresora Stratasys Fortus 400c.

- Funciona con polímeros PLA y ABS.
- Su volumen de trabajo es de 355 x 254 x 254 mm.
- Posee una resolución de 0.12 mm.
- Se encuentra actualmente discontinuada y será reemplazada por la Fortus 450c, precio por confirmar.
- Al igual que la uPrint SE Plus, puede imprimir en color negro, blanco, amarillo, naranja, rojo, verde azul y gris.

Impresora Stratasys Fortus 900c.

- Funciona con polímeros PLA y ABS.
- Su volumen de trabajo es de 914 x 610 x 914 mm.
- Posee una resolución de 0.12 mm.
- Imprime en los mismos colores que la Fortus 400c.
- Tiene un volumen de impresión de casi 0.5 m³.

- Valor comercial U\$ 500.000 y su material U\$ 750 1,5 Kg.

Impresora Stratasys Objet30 Pro.

- Funciona con materiales rígidos opacos transparentes y resistentes a altas temperaturas.
- Su volumen de trabajo es de 300 x 200 x 150 mm.
- Posee una resolución de 0.016 mm.
- Su valor comercial es de U\$ 62.252 y su material U\$ 650 2 Kg.

Impresora Stratasys Objet Eden 260V.

- Funciona con materiales rígidos opacos, elastómeros, transparentes y resistentes a altas temperaturas, Nylon - Endure.
- Su volumen de trabajo es de 260 x 260 x 200 mm.
- Posee una resolución de 0.016 mm.
- su valor comercial es de U\$ 150.878.



Figura 7: A la izquierda impresora Objet 500 Connex3 y a la derecha la impresora Objet connex 260, ambas Stratasys.

Impresora Stratasys Objet Connex 260.

- Funciona con materiales rígidos opacos, elastómeros, transparentes, resistentes a altas temperaturas y material digital, Nylon - Endure.
- Capacidad de imprimir múltiples materiales en una misma pieza.
- Su volumen de trabajo es de 260 x 260 x 200 mm.
- Posee una resolución de 0.016 mm.
- Su valor comercial es de U\$ 242.459.

Impresora Stratasys Objet 500 Connex3.

- Funciona con materiales rígidos opacos, elastómeros, transparentes, resistentes a altas temperaturas, Nylon - Endure y material digital como ABS - like entre otros.
- Capacidad de imprimir múltiples materiales en una misma pieza, incluyendo combinación de colores.

- Su volumen de trabajo es de 260 x 260 x 200 mm.
- Posee una resolución de 0.016 mm.
- Su valor comercial es de U\$ 421.080.



Figura 8: En la figura se puede observar tres objetos distintos impresos con la Objet 500 Connex3, en donde se puede observar la mezcla de materiales y colores. Fuente: <https://www.pinterest.com/Kraftwurx/3d-printing-in-full-color/>

Impresora Formlabs Form 1+.

- Funciona con resinas denominadas MSDS, disponibles en color blanco, gris y transparente, además resina moldeable y resina flexible.
- Su volumen de trabajo es de 125 x 125 x 165 mm.
- Posee una resolución de 0.025 mm.
- Su valor comercial es de U\$ 3.299.

5. Factibilidad.

A continuación se presenta la metodología utilizada para la impresión de medios permeables en impresoras 3D. Se puede dividir en tres etapas principales, primero la simulación de una granulometría o una distribución de granos del tamaño adecuado y correspondiente a un medio permeable, segundo la compatibilidad de formatos de los archivos generados y los que recibe la impresora 3D y por último el tamaño del medio versus la precisión de impresión. Una vez realizados estos pasos ya es posible obtener la pieza impresa.

5.1. Modelo del medio permeable

Como se menciona en el título de este trabajo dirigido, la intención es realizar medios permeables con impresoras 3D y la herramienta para generarlos es el software de código abierto *YADE*, en este primer acercamiento se realizará un modelo de una granulometría esférica, uniformemente distribuida con un radio promedio y una desviación estándar dada, para obtener el intervalo de radios correspondientes.

Se realizan 3 modelos que consisten en ensayos triaxiales, todos sometidos a la misma presión de confinamiento, bajo el supuesto del mismo módulo de Young para las paredes de la caja y entre las esferas. La densidad de las esferas es de 2,6 [ton/m³]. El resto de los detalles se describen a continuación:

El primer modelo corresponde a una caja de 5 x 5 x 5 [cm³], con un radio promedio de 2 [mm], una desviación estándar de 0,3, por lo que el diámetro de las esferas fluctúa entre 1,4 y 2,6 [mm]. El número de esferas simuladas es de 15.600. El diámetro de 2 [mm] se selecciona dado que es la cota superior de los diámetros de arenas.

El segundo modelo corresponde a una caja de 0,9 x 0,9 x 0,9 [cm³], con un radio promedio de 0,2 [mm], una desviación estándar de 0,4, por lo que el diámetro de las esferas fluctúa entre 0,12 y 0,28 [mm]. La cantidad de esferas simuladas es de 91.100. El diámetro de 0,2 [mm] se selecciona por que es un orden de magnitud

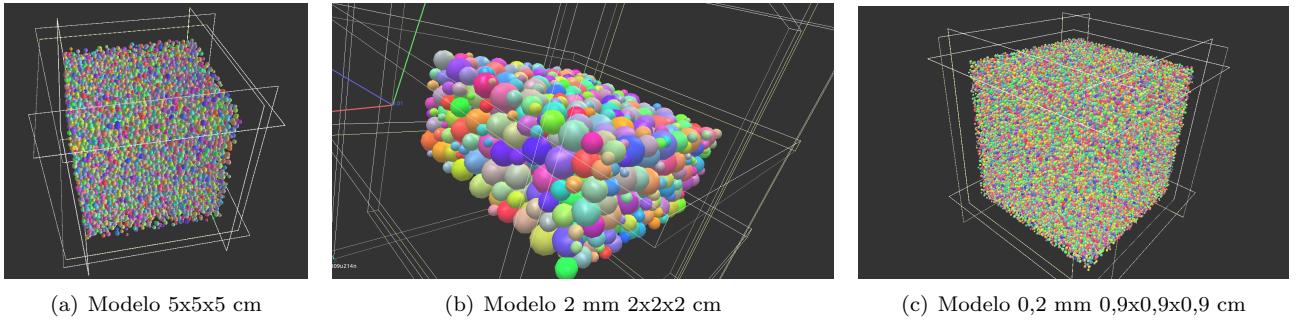


Figura 9: se puede observar los tres modelos realizados, (a) posee 15.600 partículas, (b) contiene 1000 esferas y (c) esta compuesto por 91.100 esferas.

menor al modelo anterior, porque se encuentra dentro del rango de tamaño de las micro esferas de vidrio utilizadas en el laboratorio de hidráulica de la FCFM en diversos experimentos relacionados con los medios permeables.

El tercer modelo corresponde a una caja de $2 \times 2 \times 2$ [cm³], con un radio promedio de 2 [mm], una desviación estándar de 0,6, por lo que el diámetro de las esferas fluctúa entre 0,8 y 3,2 [mm]. La cantidad de esferas simuladas es de 1000. Se realiza este tercer modelo para una prueba de impresión con granos un poco más grandes y menor volumen lo que implica menos gasto de material.

5.2. Compatibilidad de formato

Para que la impresora sea capaz de imprimir un objeto, el archivo que se le entrega debe encontrarse en formato stl (STereoLithography). Los archivos de salida que se pueden obtener con *YADE* son py, vtu y vtk. El formato py corresponde a lenguaje de python, lenguaje con el que trabaja la consola de *YADE*. El formato vtk (Visualization Toolkit) es un código abierto gratuito que consiste en un conjunto de bibliotecas en lenguaje c++ y otras que permite visualizar y procesar imágenes 3D. vtu (Visualization Toolkit Unstructured) es un formato asociado a las extensiones vtk.

Para transformar los formatos de vtu a stl es necesario un paso adicional, utilizar el software Paraview que permite por un lado la visualización de los archivos de extensión vtk y vtu y por otro lado permite en sus opciones de archivos de salida guardar los modelos en extensión stl. Como los datos extraídos del modelo *YADE* corresponden a coordenadas cartesianas y radios, es posible generar el modelo en 3D con ciertas características y ajustando la precisión (ajustando la resolución en θ y en ϕ según coordenadas esféricas) de acuerdo al tamaño de las partículas y la capacidad de cómputo del computador en uso.

Por lo tanto, es factible obtener el formato stl, el paso siguiente es verificar el traspaso de estos modelos, ya en el formato correcto, al software de las impresoras disponibles en el Fab Lab de la FCFM.

5.3. Precisión de impresora versus el radio promedio del medio permeable

Una vez realizados los modelos y teniendo los archivos en el formato STL, se procede a imprimir una prueba, la cual corresponde al tercer modelo descrito más arriba. La impresora que se utilizó es la Objet30 Scholar. El tiempo de impresión fue de 1 hora y 20 minutos aproximadamente y el material consumido es de 3 gr en 319 capas de impresión. La opción de impresión que se utilizó posee la ventaja de utilizar material de soporte sólo en los lugares que la impresora identifica necesarios. Como se trataba de una prueba se escaló el modelo por un factor de 0,9 para ahorrar material. El resultado de la impresión se puede observar en la figura 11.

No se realizará un análisis de precisión muy profundo, ya que hay distintos factores que influyen en este análisis. Además del espesor de las capas de impresión, existe una restricción llamada resolución de la construcción que se mide en DPI (dots per inch, puntos por pulgada) que también afecta la precisión.

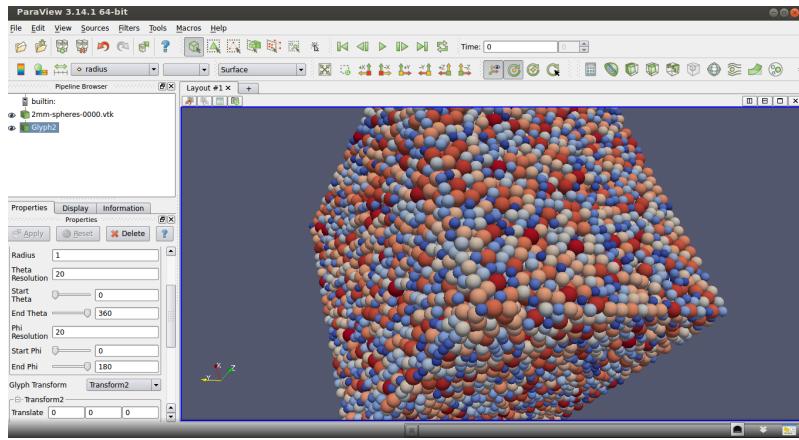


Figura 10: Visualización del modelo de granulometría 2 mm 5x5x5 cm en paraview, antes de ser exportado a stl.

Se tiene que el diámetro de las arenas fluctúa entre 0,63 a 2 [mm], mientras que las micro-esferas de vidrio HL varían entre los 0,063 y 0,85 [mm]. Por lo tanto, se tiene en los modelos dos tamaños medios de esferas y dos espesores de capa disponibles dependiendo la impresora (0,1 y 0,028 [mm]).

Para la granulometría de 2 mm, con las impresoras de 0,1 mm de resolución el error corresponde a un 5 %, mientras que con la impresora de 0,028 mm de resolución el error corresponde al 1,4 %. Para la granulometría de 0,2 mm, con las impresoras de 0,1 mm de resolución el error corresponde a un 50 %, mientras que con la impresora de 0,028 mm de resolución el error corresponde al 14 %. En general el error aceptado es menor al 5 %, pero para el caso de las impresiones debe calibrarse realizando pruebas, el principal motivo es que las capas producen superficies acanaladas, asimismo estas superficies generan planos preferenciales de ruptura, se desprende de forma casi obvia que la opción es imprimir granulometrías mas grandes por el momento (2 mm hacia arriba) e imprimir con la impresora Objet30 Scholar.

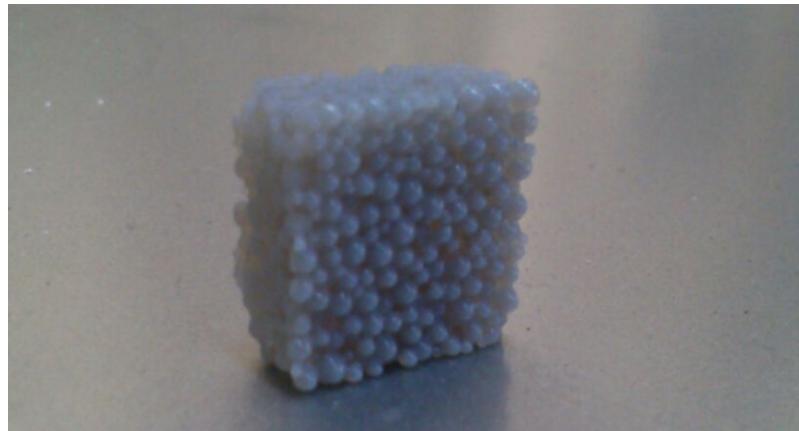


Figura 11: Modelo 2 mm 2x2x2 cm³ impreso por la impresora Objet30 Scholar.

5.4. Remoción del material de soporte.

Como se mencionó anteriormente la impresora usa material de soporte para poder generar ciertas geometrias y aunque se seleccionó la opción en la cual la impresora utiliza el material de forma inteligente y sólo en los lugares que son estrictamente necesarios para el soporte de la estructura y obtener la forma y dimensiones diseñadas, la cantidad de material de soporte es bastante (mismo orden de magnitud que el material de impresión) y además se encuentra tapando los poros.

El lavado típico del material consiste en lanzar agua a presión con alta velocidad y la limpieza de superficies y de la base de la impresora se realiza con alcohol isopropílico. Para el medio permeable impreso ninguno de los dos métodos es idóneo, el primero porque por un lado con el agua a alta velocidad rompe la estructura y desarma el paquete de esferas, por otro lado por las características del flujo en medios porosos no es posible mantener la velocidad y presión generadas por la manguera de lavado a través del medio. Por su parte el alcohol isopropílico no es capaz de disolver el material de soporte.

Para sortear estas dificultades se solicita colaboración al Departamento de Ingeniería Química, en donde luego de presentar el problema al laboratorio de polímeros y una vez revisada la composición de ambos materiales, el de soporte y el polímero de impresión, se decide un plan de acción.

Se recibe nuevamente el apoyo del Departamento de Ingeniería Mecánica, para imprimir dos muestras más y someter estos prototípos a pruebas. A la fecha las muestras se encuentran en proceso de pruebas de degradación de masa, una en una solución de agua regia y la otra en una solución de ácido sulfúrico. Se proyecta también una prueba de degradación sometida a variación de temperatura.

6. Comentarios y conclusiones.

- Como primera conclusión referirse al título del trabajo, imprimir medios permeables con las impresoras 3D existentes en el Fab Lab utilizando *YADE* para generar el modelo es factible, el pequeño prototipo es muestra de ello. Sin embargo hay algunas consideraciones importantes que se deben tener en cuenta. En primer lugar existe un problema que hasta el momento no ha sido solucionado, este es el lavado del material de soporte, ya que queda en los poros del medio y se encuentra casi saturado con el material de soporte. Queda como desafío buscar la forma de limpiar los poros del material impreso o en su defecto diseñar un soporte que minimice el uso de material y que permita el lavado.
- La precisión de la impresora impone una limitación a los diámetros que se pueden imprimir, pero esa cota inferior se debe definir en la práctica, por los motivos ya señalados de superficies acanaladas y planos preferenciales de fractura.
- Se debe ser cuidadoso con el diseño de medios más grandes, dado que para impresiones de muy larga duración la impresora posee altas probabilidades de fallar, reiniciarse u otros.
- Es posible agregar muros e incluso diseñar un permeámetro alrededor del medio poroso. También es posible simular granulometrías que asemejen de mejor manera a la realidad y no solo someter a la muestra de suelo a un ensayo triaxial, sino que a caídas por gravedad y combinaciones de compactación, se puede calibrar o variar el Módulo de Young, la densidad, el factor de amortiguamiento entre otros parámetros.
- Agradecer al Departamento de Ingeniería Mecánica por facilitar las instalaciones del FabLab y el Laboratorio de Fluidodinámica y Procesos por imprimir los modelos de medio permeable y facilitar el material de impresión. Al Departamento de Ingeniería Química por la orientación de como disolver el material de soporte y por las pruebas que están realizando.

7. Bibliografía.

1. F. Lominé, L. Scholtés, L. Sibille 1 and P. Poullain (2013) Modeling of fluid–solid interaction in granular media with coupled lattice Boltzmann/discrete element methods: application to piping erosion. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2013; 37:577–596
2. S. Galindo-Torres A. Scheuermann H. Muhlhaus D. Williams (2013) A micro-mechanical approach for the study of contact erosion DOI 10.1007/s11440-013-0282-z
3. E. Catalano, B. Chareyre, A. Cortis and E. Barthelemy (2011) A pore-scale hydro-mechanical coupled model for geomaterials E. Onate and D.R.J. Owen (Eds)
4. E. Catalano, B. Chareyre and E. Barthélémy (2013) Pore-scale modeling of fluid-particles interaction and emerging poromechanical effects Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2014; 38:51–71
5. Fee, C., Nawada, S., Dimartino, S. (2014). 3D printed porous media columns with fine control of column packing morphology. Journal of Chromatography A, 1333, 18-24.
6. <http://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
7. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. Business horizons, 55(2), 155-162.
8. http://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D
9. <http://fablab.uchile.cl/equipment/3d-printers/>
10. <http://en.wikipedia.org/wiki/Fab@HomeReferences>
11. <http://www.fabathome.org/index.php?q=node/10>
12. http://www.olimex.cl/product_info.php?products_id=1362&product_name=1.75mm_PLA_%281kg%29_Red
13. <http://mac-more.com/apple-accessories/Objet%203D%20Printers>
14. <http://formlabs.com/en/products/form-1-plus/>