



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Facultat de Geologia



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Treball Fi de Carrera

Modalitat

**Tesina**

Títol

**“Estudio Microestructural del Rock Sanding”**

Autor/a

**Daniel Garolera Vinent**

Tutor/a

**Prof. Ignasi Carol, Dr. Carlos M. López, Prof. Panos Papanastasiou**

Intensificació

Data

**Enero 2003**

*Als meus pares,  
i en especial per la Glòria*

## AGRAÏMENTS

---

Realitzar els agraïments, en el meu cas, es un moment de doble satisfacció, d'entrada vol dir que s'ha arribat al final d'un llarg procés, del qual moltes vegades no es veu una clara sortida. El segon motiu es el d'agrair l'ajuda de totes aquelles persones que l'han fet possible.

D'entrada voldria agrair al professor Ignasi Carol l'oportunitat que m'ha donat a l'hora de realitzar aquesta tesina, així com el temps que m'ha dedicat, sobretot en aquells moments d'incertesa. Una altra de les persones sense les quals tampoc s'hauria fet aquest treball és el Dr. Carlos M. López. Voldria agrair-li el bon nombre d'hores que hi ha dedicat, i la paciència que ha tingut amb mi. També voldria citar l'ajuda de l'Olga Roa, per l'adaptació del seu treball amb el mallador d'ossos, i sobretot pels seus consells.

En segon lloc voldria fer un reconeixement a tots aquells companys del departament que han fet de la meva estada més agradable. Sobretot, voldria donar les gràcies a en Lakshmi Kantha.

Com he dit anteriorment, aquest treball es el fruit d'un llarg procés, el qual ha sigut possible de superar gràcies a l'ajuda d'aquells companys del dia a dia. És per a ells que voldria també dedicar una petita part del treball: l'Alberto Sánchez, en Daniel Montobbio, la Isaura Oliver, en Jordi Barrachina, la Montse Jorba i en Ricard Rúbies.

La meva família també ha sigut fonamental durant aquest temps. Al pare, en Miquel, a la mare, la Margarita, i als meus germans, l'Albert i l'Ignasi, gràcies per fer-me costat durant aquests anys. Sense el seu suport segurament no hauria arribat fins aquí.

Finalment voldria reconèixer a la persona que ja farà un temps comparteix la meva vida, la Glòria. Voldria agrair-li la seva paciència y el seu suport incondicional.

## RESUMEN

---

El estudio de la producción de arena (rock sanding) en pozos petrolíferos ha sido objeto importante de investigación durante los últimos años debido al auge de las nuevas técnicas de producción: perforación con cañones (perforating guns).

La producción de arena es un fenómeno de disgregación del medio que se genera en formaciones débilmente cohesionadas, como arenas poco cementadas. Este fenómeno está gobernado por varios factores, de los que destacan dos principalmente: el estado tensional del medio y la presión del flujo de extracción. Los estudios realizados hasta el momento han puesto de manifiesto que el primer factor es el responsable de la fisuración del medio, y el segundo el responsable del transporte.

El objeto de esta tesina ha sido el de iniciar el estudio de dicha problemática desde un punto de vista numérico microestructural, utilizando el método de los elementos finitos con elementos junta. Para ello se ha discretizado una sección transversal de una perforación generada mediante cañones de perforación. Estas excavaciones se caracterizan por su pequeño diámetro, 2 cm, y por no estar revestidas.

La discretización (bidimensional) del medio rocoso se ha llevado a cabo mediante dos zonas bien diferenciadas:

1. una corona circular que rodea el hueco de perforación, en la que se representan explícitamente granos de arena distribuidos de forma aleatoria mediante elementos finitos triangulares de comportamiento elástico lineal. El contacto entre granos se simula mediante elementos junta sin espesor, cuya ley constitutiva es no lineal con reblandecimiento por trabajo de fractura, formulada en términos de tensiones y desplazamientos relativos.
2. Una malla de elementos continuos, que rodea la zona anterior, con una extensión suficiente como para garantizar la transmisión de las tensiones de confinamiento, a la vez que permite disminuir el número de elementos de la discretización.

La simulación numérica ha consistido en imponer inicialmente la presión de confinamiento en los bordes de la malla y posteriormente disminuir gradualmente la presión en el interior de la perforación. La disgregación del medio, objeto de la modelización de “rock sanding”, ha sido reducida a una extracción de las partículas de arena (granos), cuando los elementos junta que las mantienen en contacto con otros granos, alcanzan un grado elevado de deterioro.

A fin de poner de manifiesto la potencialidad del procedimiento se han realizado tres tipos de análisis. Los principales resultados obtenidos son:

1. Estudio de la producción de arena. Se han obtenido interesantes resultados cualitativos de la evolución de la fisuración alrededor de los granos cercanos al hueco de la perforación. Este hecho ha servido de referencia para los posteriores casos. La curva presión-producción de arena aún no ha sido posible de obtener debido al alto coste computacional del caso de estudio.
2. Estudio del efecto de tamaño. Se ha realizado un estudio comparativo del mismo problema utilizando diferente tamaño de perforación. Los resultados obtenidos han permitido capturar el efecto de tamaño: las perforaciones más pequeñas resultan menos dañadas a igual condición.
3. Estudio de un estado no hidrostático de tensiones iniciales. Se ha aplicado un estado inicial de carga con diferentes valores de las componentes horizontal y vertical de tensiones. El resultado obtenido durante la descarga ha evidenciado el hecho comprobado experimentalmente de que se produce una rotura preferencial en las direcciones perpendiculares a la tensión máxima aplicada.

Los resultados preliminares obtenidos hasta el momento permiten reproducir de forma cualitativa algunos aspectos importantes del comportamiento real observado, lo cual pone de manifiesto la potencialidad de esta metodología microestructural para profundizar en la investigación futura de “rock sanding”.

## ABSTRACT

---

The study of sand production in oilfield wells has been an important investigation subject during the last few years, since new drilling techniques, like perforating guns, have been in use.

Sand production is a disintegration phenomenon which takes place in weak rocks like unconsolidated sandstones. This process is governed by several factors, in which the stress level and the drawdown pressure are the most important. The former controls fracture of the media and the latter is the responsible for transportation of the fractured material.

The aim of this thesis is to initiate the study of rock sanding by a microstructural analysis using a finite element code with interface elements. For this reason, a modelling of a cross section of a perforation gun has been done. This kind of excavation has smaller diameter (2 cm) and is not cased.

The discretization (2-D) of rock medium has been carried on using two discretization zones:

1. A circular ring around the hole where the grains are explicitly represented by a random distribution of finite triangular elements with linear elastic behaviour. The contact between grains is modelled by means of zero-thickness interface elements with non linear constitutive law and softening controlled by the fracture energy and formulated in terms of stress and relative displacement.
2. A continuum mesh is generated around the previous mesh with interface elements, which assures the confining stress transmission. This continuum mesh allows in reducing the number of elements required for the model.

The numerical simulation consists of imposing, first the confining stress on the external boundaries, and then decreasing gradually the stress inside the hole. The disintegration is simulated by removing grains when the interface elements -which are placed between grains- are degraded up to certain energy level.

In this study three examples are provided to demonstrate the validity of this methodology. The main results are:

1. Rock sanding production. Interesting results in terms of qualitative behavior are obtained. It has been observed a right evolution of the fracturation of the media. The main consequence is that it allows to continue with another studies based on this methodology. The drawdown pressure vs. sand production curve hasn't been possible to obtain due to the high computation cost of the analysis.
2. Size effect study. A comparative analysis of the same problem using different well diameter have been carried on. The results captured the size effect entirely: smaller diameter wells are less damaged than bigger ones, in the same condition.
3. Non hydrostatic initial stress. A non-symmetric stress distribution has been applied in the first stage, which consists of introducing a different value of horizontal and vertical stresses. The result in the downloading stage has demonstrated the efficiency of this method, because the simulation predicts a more damaged zone at  $90^\circ$  of the maximum stress direction.

The preliminary results allow reproducing the qualitative behavior of the real material. Therefore, we can assume that the finite element method with interface elements is able to develop to further steps of the future study of rock sanding.

# Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Presentación.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Método .....	3
1.4	Organización del contenido .....	4
2	Antecedentes .....	5
2.1	Resultados experimentales.....	5
2.1.1	Tipos de ensayos .....	5
2.1.2	Conclusiones.....	12
2.2	Resultados numéricos.....	13
2.2.1	Modelos de continuo .....	13
2.2.2	Modelos de fisuración discreta.....	17
2.3	Modelos de predicción actual.....	20
3	Microestructura .....	21
3.1	Modelo de discontinuidades.....	21
3.1.1	Introducción al MEF con juntas.....	21
3.1.2	Modelo constitutivo de junta.....	24
3.2	Modelización microestructural.....	25
3.2.1	¿Qué es una microestructura?.....	25
3.2.2	Comparación respecto a otros métodos .....	27
3.2.3	Justificación de la elección del método .....	28
3.3	Generación de la malla.....	29
3.3.1	Generación de la malla inicial.....	30
3.3.2	Elaboración del recorte .....	30
3.3.3	Elaboración de la extensión.....	31
3.3.4	Ensamblado de las mallas .....	32
4	Simulaciones numéricas .....	34
4.1	Introducción .....	34
4.1.1	Hipótesis de cálculo .....	35
4.1.2	Etapas de cálculo .....	36
4.2	Estudio de la producción de arena.....	39
4.2.1	Modelización del caso.....	39
4.2.2	Resultados .....	40

---

4.3	Estudio del efecto de escala .....	46
4.3.1	Modelización.....	46
4.3.2	Resultados .....	46
4.4	Estudio para un estado no hidrostático de tensiones iniciales.....	49
4.4.1	Modelización del caso.....	49
4.4.2	Resultados .....	50
5	Conclusiones.....	53
5.1	Problemas y limitaciones actuales .....	54
5.1.1	Análisis en tensiones totales .....	54
5.1.2	Tamaño de grano .....	54
5.2	Perspectivas de trabajo futuro.....	55
6	Referencias .....	56
7	Bibliografía complementaria .....	59
1	Anexos.....	A-1
1.1	Diagrama de flujo del proceso de elaboración de la malla.....	A-1
1.2	Técnicas de perforación.....	A-2
1.3	Fotografías de secciones transversales de ensayos.....	A-3
1.4	Glosario específico .....	A-4

# 1 Introducción

## 1.1 Presentación

**La producción de arena (rock sanding) es un fenómeno que tiene lugar en los pozos petrolíferos cuando la roca almacén no es capaz de resistir la tensión impuesta durante la extracción, produciéndose una disgregación del medio.** Según la *Society of Petroleum Engineer (SPE)* este problema afecta el setenta por ciento de las reservas de gas y petróleo, dado que estas se encuentran en materiales arenosos, los cuales presentan generalmente esta problemática [1].

El fenómeno es causado por la fracturación del medio debido a la liberación de tensiones que tiene lugar durante la excavación, así como al gradiente de presiones impuesto en la extracción del petróleo. Esta fracturación lleva consigo, una pérdida de cohesión de los granos y, consecuentemente, la producción de residuos impregnados de óleo. El resultado final de este proceso puede variar desde la simple erosión de la pared de la perforación hasta el colapso de la cavidad [1].

A partir de los estudios realizados se ha determinado que los factores que influyen en este problema son:

- El estado tensional del medio, el cual provoca un gradiente de presiones alrededor de la perforación.
- El tipo de perforación y la puesta en obra.
- El flujo de extracción, el cual actúa de dos maneras, por una parte impone un gradiente de presión de fluido, que provoca a su vez una disminución de las tensiones efectivas, lo cual aumenta el estado tensional de la matriz de la roca. Por otra parte las partículas arrastradas que facilitan el proceso.
- La naturaleza de la roca, propiedades resistentes y plásticas del material.

Tradicionalmente esta problemática se ha solventado con la utilización de sondeos revestidos y filtros. No obstante, se ha constatado una pérdida de productividad debido al uso de dichas técnicas, cosa que ha impulsado el estudio de la producción de arena, con objeto de mejorar los rendimientos. Cabe anotar que en la actualidad, y utilizando técnicas



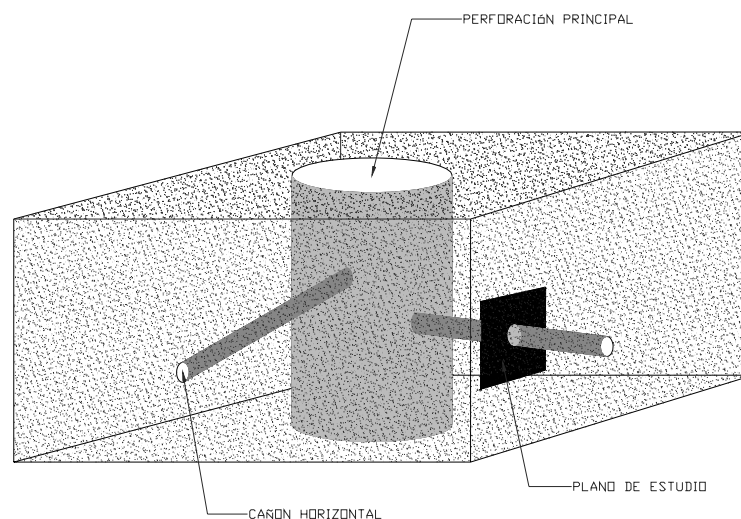
avanzadas, solamente el 40 % del volumen total de petróleo puede ser extraído del reservorio.

Con el estudio de esta problemática, se pretende hallar un equilibrio entre la producción de arena y producción de petróleo, donde los problemas asociados a una sobreproducción de arena son:

- Bloqueo de la perforación. Consecuentemente, la pérdida de producción de crudo.
- Aumento en los costes de explotación, debido a la corrosión de los equipos.
- Problemas medioambientales con los residuos impregnados de petróleo.

Actualmente el estudio de este proceso se ha centrado en el análisis de las perforaciones laterales realizadas mediante la utilización de explosivos (ver anexo 1.2). Este tipo de orificios, de poco diámetro (2 cm.) y realizados transversalmente a la perforación principal, tienen como objetivo aumentar la capacidad de drenaje del pozo. En este caso específico, debido a la técnica utilizada, el estudio de producción de arena es básico para conocer la viabilidad de la técnica, puesto que las técnicas de revestimiento no son factibles.

El trabajo que se realizará en el marco de esta tesina consistirá en el análisis de una sección tipo de estas perforaciones laterales. En la figura 1 se puede observar un esquema tipo de la perforación descrita, así como el plano de estudio utilizado.



*figura 1 - Esquema de una perforación petrolífera utilizando la técnica de perforación con cañones. En negro, detalle de la modelización a realizar.*

## 1.2 Objetivos

El objetivo de esta tesina ha sido iniciar el estudio de la producción de arena (rock sanding) desde un punto de vista microestructural, analizando el problema como un medio discreto. Para llevar a cabo esta tarea se ha utilizado el método de los elementos finitos con juntas, con el que se pretenderá realizar una simulación de la disgregación de granos en función de la descarga aplicada en el interior de la perforación (*drawdown*).

Las tareas llevadas a cabo han sido varias. En primer lugar se ha realizado una síntesis bibliográfica del trabajo realizado hasta momento. En segundo lugar, se ha creado una metodología de estudio, automatizando los procesos de elaboración de las mallas a usar en los cálculos por elementos finitos. Seguidamente se ha corroborado la idoneidad del método escogido para simulación del mecanismo. Este paso será importante para conocer los posibles problemas y limitaciones del estudio. Para tal fin se han resuelto algunos casos tipo, con el objetivo de apreciar el comportamiento. Este proceso se analizará de manera cualitativa.

## 1.3 Método

Para la realización de la tesina se han utilizado diferentes códigos numéricos, unos adaptados, y otros creados para la ocasión. Dentro de los códigos, diferenciaremos aquellos utilizados para la creación de la malla de los utilizados en la fase de obtención de resultados.

En el primer grupo, se ha trabajado con el mallador de tejidos óseos modificado por *Roa et al.* [2], el mallador *GID* [3] y se han elaborado dos códigos propios, *perfora.for* y *ensambla.for*. Un diagrama de flujo de la utilización de estos códigos ha sido incluido en Anexo 1.1.

El segundo grupo se compone de dos programas, el código de resolución por elementos finitos *DRAC* (V2.13)

[4] y un código propio creado para facilitar la extracción de los granos, *contagra.for*. Cabe destacar que los resultados han podido ser obtenidos gracias al uso de las tres estaciones de cálculo científico a disposición del departamento: *Titani*, *Borax* (ETSECCPB) y *Karnak* (CESCA-CEPBA).

## 1.4 Organización del contenido

La presente tesina se ha subdividido en cuatro capítulos, en los que se detallará la investigación realizada así como los pasos más importantes.

### Antecedentes

En primer lugar se realizará una exposición de las investigaciones realizadas hasta el momento. Por un lado se mostrará, los resultados de la experimentación empírica, y por el otro los resultados de las simulaciones numéricas realizadas hasta el momento.

### Microestructura

Dentro de este apartado se hará hincapié en las bases del estudio numérico realizado en este trabajo. En primer término se enumerarán las principales diferencias del método utilizado respecto a los métodos tradicionales de estudio. Finalmente se detallará el método escogido para la generación automática de geometrías malladas.

### Simulación numérica

El objeto de este capítulo será la exposición de resultados. Previamente, se especificarán los apartados técnicos comunes considerados en los diferentes casos de estudio. A continuación, los tres casos de estudio serán presentados:

1. Estudio de la producción de arena (rock sanding production).
2. Estudio del efecto de escala.
3. Estudio para un estado no hidrostático de tensiones.

### Conclusiones

Finalmente, se concluirá con la presentación de las conclusiones. Éstas vendrán acompañadas con las recomendaciones a tener en cuenta para la continuación del trabajo.

## 2 Antecedentes

En este capítulo haremos una breve descripción de los diferentes métodos encontrados en la bibliografía. Para facilitar la descripción de la documentación se han separado entre resultados experimentales y resultados numéricos.

### 2.1 Resultados experimentales

Los resultados experimentales han sido hasta hace pocos años la única manera de estudiar el problema debido a la diversidad de factores a analizar. La experimentación llevada a cabo se ha agrupado en dos ramas, el análisis del problema *in-situ* y la experimentación en laboratorio.

El primer grupo, que no entrará en esta síntesis, hace referencia a las técnicas utilizadas en el estudio a partir de los datos de campo. Dentro de este conjunto de técnicas destacaremos, por un lado las técnicas de retro-análisis, que tienen por objetivo el estudio de las condiciones de rotura. Por el otro lado, las técnicas estadísticas, centradas en la obtención de correlaciones.

El segundo grupo hace referencia a la simulación mediante modelos reducidos del problema en laboratorio. Los principales ensayos llevados a cabo por los diferentes centros de investigación serán detallados en el próximo punto (§ 2.1.1). A continuación, una síntesis de los resultados será presentada (§ 2.1.2).

#### 2.1.1 Tipos de ensayos

A partir de la bibliografía disponible podemos estructurar el trabajo de ensayos reducidos según dos grupos de trabajo, uno dirigido en *Schlumberger Cambridge Research* (Cook Nicholson, Papanastasiou et al. [5], [6], [7] y [8] ) y el otro por *Sintef*, el Instituto Noruego del Petróleo, (Tronvoll, Papamichos, Vardoulakis et al. [1], [9], [10], [11] y [12] ). Esta síntesis bibliográfica se basará en el trabajo realizado por los primeros, aunque se efectuarán remarcas según el trabajo realizado por los segundos.

### 2.1.1.a Muestras artificiales

El trabajo con modelos reducidos se inició con el objeto de comprender los mecanismos que intervienen en la generación de arena. Los primeros ensayos se realizaron con materiales artificiales (Cook *et al.*, 1994) [5]. El objeto era garantizar una reproducibilidad de las probetas a fin de diferenciar de manera más fiable los diferentes factores que gobiernan el problema. Esto se llevó a cabo con el uso de materiales compuestos (arena y resina), los cuales aseguraban la repetibilidad y permitían caracterizar adecuadamente las propiedades. Este primer estudio se centro en el análisis en un rango de materiales con de baja resistencia, aproximadamente 1-3 MPa de resistencia a compresión simple.

Se realizaron dos tipos de ensayos en este primer trabajo, un ensayo con una probeta sometida únicamente a deformación uniaxial (figura 2) y un segundo ensayo de tipo triaxial (axisimétrico) más sofisticado (figura 3). El objeto del primero fue la evaluación rápida de la metodología. El segundo pretendió un estudio más profundo de los mecanismos de fisuración, gracias a la inclusión de un dispositivo óptico (endoscopio) y de un sistema de medida de arena producida.

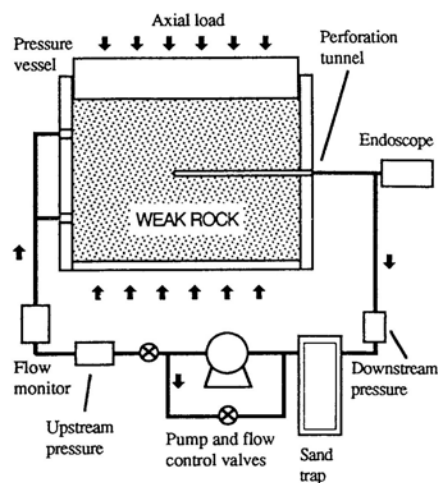


figura 2 – Experimentación inicial del problema de producción de arena. Ensayo a deformación uniaxial (Cook *et al.*, 1994) [5].

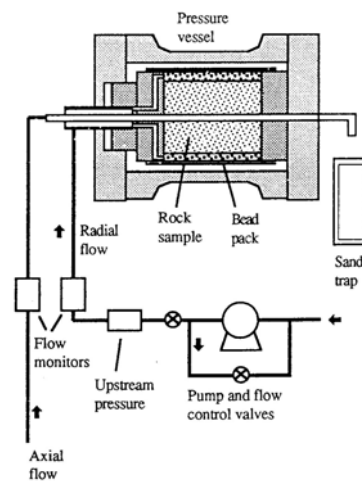


figura 3 – Configuración de un ensayo de producción de arena cilíndrico. Flujo y tensiones radiales y axiales independientes (Cook *et al.*, 1994) [5].

Los resultados obtenidos después de los ensayos, aunque limitados al material utilizado, hicieron constatables varios hechos. La experiencia se centró en el estudio del efecto que tenía el flujo sobre la muestra así como el efecto de la tensión aplicada.

### 2.1.1.a. Efecto del flujo

Debido a la característica del problema y con el ánimo de una más clara comprensión, se dividió el flujo en dos componentes: por un lado el efecto del flujo que desde dentro de la

muestra iba al centro de la perforación, flujo radial; y por el otro lado, en flujo paralelo a la perforación, flujo axial.

En el caso del fluido radial, a su vez se diferenció entre el efecto sobre el cambio en las tensiones efectivas, y el efecto de arrastre sobre las partículas. En este apartado se hará únicamente referencia a este segundo efecto.

En el trabajo realizado en [5] se corroboró el hecho de la poca influencia del flujo radial en la producción de arena. Este resultado, obtenido a partir de medidas indirectas, dada la imposibilidad de medir únicamente el flujo radial, fue posteriormente ratificado con otros estudios. Por consiguiente, se determinó que en el caso de materiales poco cohesionados, solamente la componente axial del flujo influencia en la producción de arena. Este resultado fue explicado a partir de dos factores: por un lado, el efecto de agente de transporte que el fluido axial ejercía; por el otro lado la erosión que producían los granos de arena transportados sobre la superficie libre (pared de la perforación).

En las probetas ensayadas se constató que para un incremento del flujo axial, la producción de arena se incrementaba ostensiblemente. Así mismo se obtuvo que para una velocidad inferior a 0,2 m/s no se producía transporte, dado que el flujo no tenía suficiente energía para el transporte.

No obstante, tres años más tarde, un estudio realizado por *Tronvoll et al.* (1997) [9] sobre muestras sintéticas de resistencia inferior (0-2 MPa), obtuvo resultados ligeramente diferentes. En el caso de muestras ultra-débiles, el flujo radial si influencia en la producción de arena. Este hecho se atribuyó a la erosión interna, a nivel microestructural, que ejercía el flujo. A partir de ensayos se obtuvo que este efecto aceleraba un 50% el inicio de la producción de arena.

#### 2.1.1.a. Efecto de las tensiones

Los ensayos [5] confirmaron que el principal agente productor de arena era el estado tensional del medio (compresión). Éste es gobernado tanto por la rotación de tensiones causada por la existencia de la perforación, como al incremento de tensiones debido al cambio de las tensiones efectivas. Las muestras ensayadas mostraron que éste es el agente desarrollador de la fisuración inicial, precursor de la disgregación del material.

Para el caso de los materiales artificiales se encontró que la producción de arena sólo se iniciaba a partir de un cierto valor de tensión, independiente del valor del flujo axial. Lo que confirmó el efecto de las tensiones sobre el inicio del proceso y su peso en éste (figura 4).

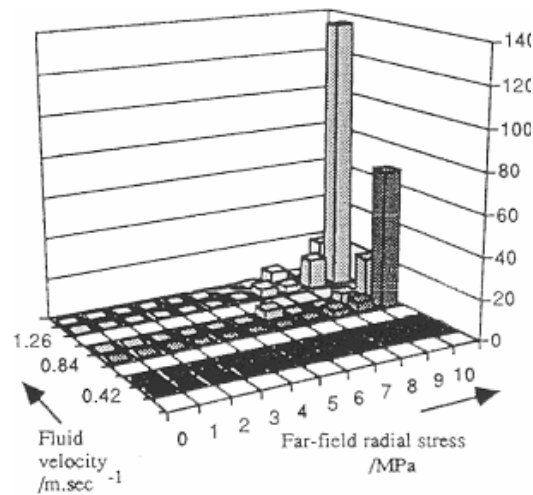


figura 4 – Producción de arena (eje vertical) versus tensión radial y flujo axial (paralelo a la perforación). En ella se observa como la producción de arena se inicia una vez se llega a un cierto valor de tensión. (Cook et al., 1994) [5].

Otro aspecto interesante del estudio fue la observación que la producción máxima de arena se producía en los lados opuestos de la perforación a  $90^\circ$  respecto al eje de máxima compresión. Este hecho ratificaba el ensayo, puesto que estas son las zonas con más tensión desviadora debido a la concentración de tensiones efecto de la perforación.

### 2.1.1.b Muestras de campo

Los estudios iniciados continuaron con el estudio de muestras con material de campo. Diferentes trabajos recogen el estudio llevado a cabo, *Nicholson et al.* (1998) [6] y *Papanastasiou et al.* (1998) [8].

Para el análisis se usaron tres tipos de materiales, todos ellos dentro la escala de areniscas débilmente cohesionadas<sup>1</sup> y con alta permeabilidad. El tipo de ensayo utilizado fue parecido al presentado en el capítulo precedente (figura 5).

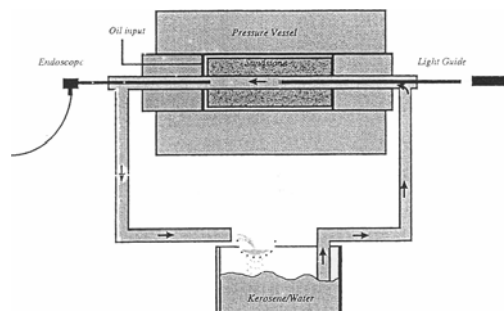


Fig 1. The Sanding Rig

figura 5 – Célula de carga para el estudio del rock sanding (*Nicholson et al.*, 1998) [6]

<sup>1</sup> Resistencia a compresión simple de 2-25 MPa.

A partir de los resultados obtenidos se pudo contrastar los datos logrados con las muestras artificiales. En el caso del inicio de la producción de arena se observó que el valor de la carga aplicada para iniciar el proceso, se aproximaba al valor resistente del material obtenido mediante ensayos a compresión simple [6]. Esto puede verse reflejado en la tabla 1, donde la segunda columna presenta los valores de resistencia y la tercera la presión a la que se inicia la producción de arena. Este resultado confirmó la importancia de las tensiones aplicadas en el proceso de producción de arena.

tabla 1– Tabla comparativa de la presión de inicio de producción de arena a una tensión de confinamiento de 0,54 MPa.

(Nicholson et al., 1998 [6])

Sample		Triaxial Test Strength at 0,54 MPa Pressure	Sanding Pressure
		MPa	MPa
Jurassic	G6	5,2	
	I2	7,0	
	2		5,5
	1		5,3
	I		4,9
	3		5,0
Saltwash South	N1	25,25	
	A		19,9
	B		19,0
	C		19,7
	D		19,5
	E		6,6
	F		28
	G		19,9
	H		15,
	J		27
Red Wildmoor	R12	30,1	
	A		33,2
	B		32
	C		33,1

Otro aspecto remarcable observado fue el modo de fallo de los diferentes materiales así como la influencia del efecto de escala:

- Las muestras con material más cementado, respondieron con un comportamiento cuasi-frágil. Se observó roturas tangenciales (*breakout*) alrededor de la perforación, que tendían a agrandar la perforación. Aunque por el efecto de la compactación, el diámetro de la perforación no variaba ostensiblemente. Por otro lado, uno de las observaciones más importantes fue la constatación de la influencia del efecto de tamaño en este tipo de muestras. Según el estudio [8], para este tipo de material, las perforaciones de mayor diámetro eran menos estables que las de mayor.
- Las muestras más débiles, respondieron con un comportamiento colapsable. Las muestras durante la disgregación se compactaban y se descohesionaban hasta hacer desaparecer la perforación. En los experimentos se observó, además, la aparición de fracturas en espiral alrededor de la perforación (figura 6). En lo que confiere al efecto de escala, no se observó diferencias significativas entre las roturas producidas [8].



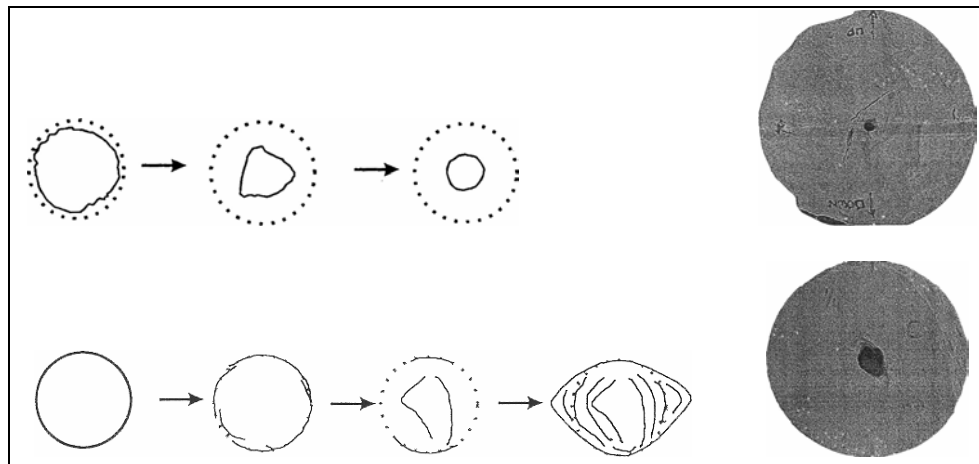


figura 6 – Arriba; esquema del cambio en el diámetro de la perforación en una muestra débilmente cementada y una foto<sup>2</sup> de una sección. Abajo; esquema del cambio de diámetro y aparición de fracturas circunferenciales en una muestra ligeramente cementada y foto de una sección. (Nicholson et al., 1998 [6])

Este mismo fenómeno fue también expuesto por otros autores, un ejemplo de ello es el trabajo de P.J. Van den Hoek et al. [12]. En este caso se observó cómo el tipo de rotura en perforaciones de diámetro grande era siempre por compresión-corte, mientras que en las de pequeño diámetro podía ser también por tracción. Esta diferencia podría explicarse a partir de la interacción de los micro-defectos en la estabilidad de la perforación, cuyo hecho era más probable en cuanto la perforación aumentaba de diámetro.

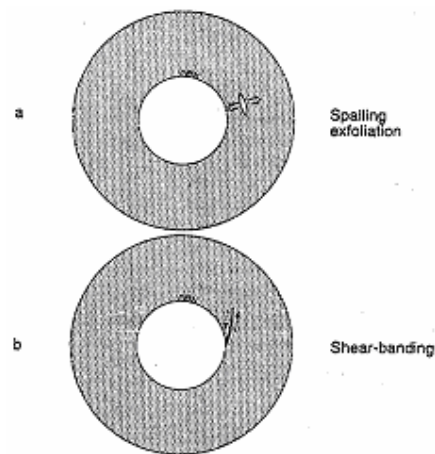


figura 7 – Modo de fallo en la perforaciones: a) tracción b) compresión. (P.J. Van den Hoek et al., 2000 [12]).

En lo que hace referencia a la mecánica del proceso se determinó que era debida a la acción de dos procesos:

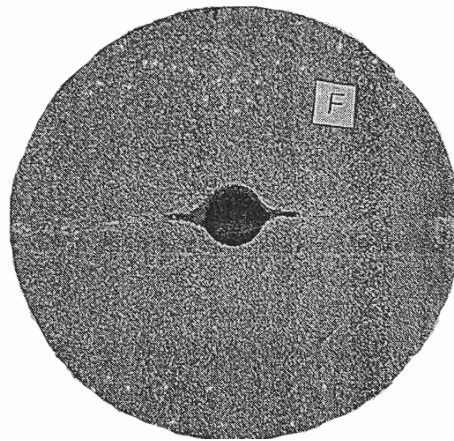
- a) Tensión. La roca, cuya cohesión inicial era debida a la cementación y las fuerzas capilares, era dañada mecánicamente por la aplicación de las tensiones. Este daño se

<sup>2</sup> Fotos en aumentadas pueden encontrarse en el anexo 1.3.

focaliza en las uniones intra-granulares, y por lo tanto la cohesión de la roca pasa a estar gobernada por las tensiones capilares.

- b) Fluido. Una vez aplicado el flujo, las uniones capilares, que eran las únicas existentes, son destruidas y consecuentemente los granos liberados. Entonces es así como se inicia el proceso de producción de arena.

En términos de deformación se observó como esta aumentaba una vez se sobrepasaba el inicio de producción de arena. A su vez se evidenció como la anisotropía del material modificaba la geometría de la rotura, ya que esta tendía a evolucionar siguiendo los planos más débiles, de estratificación o de fracturas.



*figura 8 – Fotografía de una sección transversal donde la fractura se ha propagado siguiendo el plano de estratificación.*

*(Nicholson et al., 1998 [6])*

Finalmente se apreció la independencia respecto el tiempo del proceso en el caso de tensiones bajas aplicadas. No obstante, una vez llegada a la tensión de primera rotura se observó que esta variable era importante, pues se producían constantes roturas a igual tensión, debido al efecto del flujo.

## 2.1.2 Conclusiones

En lo que respecta a las causas y factores ligados a la producción de arena, los ensayos en laboratorio, en materiales débilmente cohesionados, han determinado que la producción de arena está extremadamente ligada a la variación de las tensiones. Efecto causado, ya sea por la liberación de tensiones debido a la excavación, o bien la variación de presiones efectivas causado por la variación de presiones intersticiales en la perforación. En la figura 4 se puede observar como varía la producción de arena en función de la tensión mecánica y la presión del fluido causado por el arrastre.

Otro factor importante ha sido el efecto del fluido axial. Éste actúa como agente transportador una vez iniciada la fisuración en el caso de materiales poco cohesionados. Este comportamiento va cambiando en tanto se reduce la resistencia, hasta convertirse en un agente principal, conjuntamente con el fluido radial, en rocas sin cohesión debido a la erosión que produce.

Por último, destacar la importancia de la microestructura en el caso de rocas ultra-débilmente cohesionadas, dado que se ha observado efecto de tamaño en las muestras

Las conclusiones expuestas en los párrafos anteriores justificarán luego la elección del método utilizado en el estudio.

## 2.2 Resultados numéricos

Numéricamente, el problema de la fisuración en rocas ha sido abordado desde diferentes metodologías. Estas pueden ser diferenciadas en dos grupos principales, los modelos de continuo y los modelos de discreto.

### 2.2.1 Modelos de continuo

Pertenece a modelo de continuo toda aquella familia de métodos que se acercan al problema de la producción de arena considerando un medio continuo, es decir, sin considerar explícitamente la geometría microestructural de la roca. Esta metodología considera el medio desde un punto de vista macroscópico, definiéndolo a partir de variables globales, y considera las deformaciones y los efectos de endurecimiento y/o reblandecimiento como variables continuas, variables de estado. La forma más habitual de abordar este tipo de estudios es la técnica de los elementos finitos (MEF).

Dentro de los estudios con el método de los elementos finitos, se han desarrollado varias metodologías, unas centradas en la obtención de las condiciones límites de estabilidad de las perforaciones (inicio de producción de arena), y las otras en la evaluación de la producción de arena por unidad de tiempo. Ejemplos de dichas metodologías serán presentados a continuación según el anterior orden de aparición.

#### 2.2.1.a Modelo de inicio de producción de arena

Tradicionalmente los estudios numéricos de producción de arena se han centrado en la evaluación de las condiciones de inicio, así como la determinación de la configuración de resistencia última de la perforación. Para llevar a cabo tal propósito se ha venido usando análisis de resistencia con infinidad de variaciones en función del modelo utilizado.

Un ejemplo de este tipo, es el trabajo de *Y. Wang* (2001) [13] donde se realiza un análisis del problema con un modelo hidro-mecánico totalmente acoplado. El autor determina el momento de inicio de la producción de arena con un criterio doble, o por un valor crítico en la deformación plástica efectiva o por un valor nulo en la tensión radial efectiva.

El modelo consiste en un análisis bidimensional considerando el medio como multi-fásico, dividiéndolo en una fase gaseosa, líquida y sólida. Este hecho es justificado por el autor dado que según él, los factores que determinan de manera crítica la producción de arena son (1) el comportamiento solución-gas, (2) la rigidez del sistema y (3) la cohesión residual.

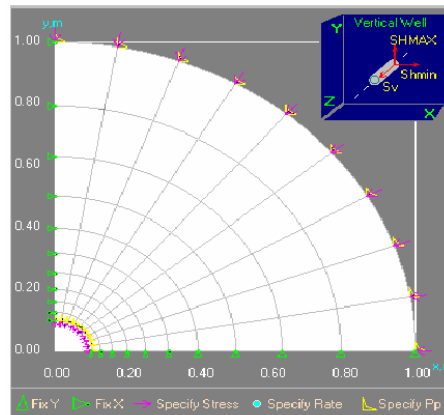


figura 9 – Geometría y condiciones de contorno utilizadas en el estudio elaborado por Y. Wang (2001) [13].

Los resultados del trabajo son la obtención de un método numérico basado en un criterio de deformación plástica el cual puede ser calibrado con datos de campo. No obstante, tiene como limitación el uso de cierto número de parámetros de difícil definición.

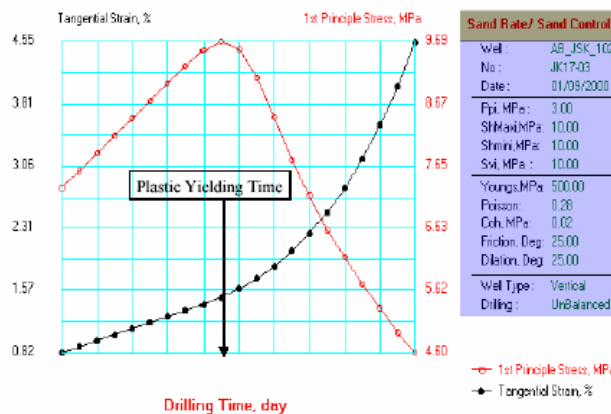


figura 10 – Variación de los tensores principales durante la simulación de extracción de óleo. Y. Wang (2001) [13].

### 2.2.1.b Modelo de producción de arena

En la bibliografía analizada destacaremos el trabajo de *Stavropoulou, Vardoulakis y Papanastasiou* [15] [14], en el cual se realiza un estudio del problema utilizando un análisis hidro-mecánico acoplado el daño mecánico con la erosión.

Concretamente, los autores efectúan el estudio de una sección transversal de una perforación situada en profundidad (figura 11). El análisis es realizado considerando simetría radial y considerando un medio trifásico (esqueleto sólido, fluido y sólido fluidificado). La resolución se lleva a cabo, por un lado resolviendo las ecuaciones que definen el problema mecánico (equilibrio de tensiones), las cuales resultan relacionadas con

el esqueleto sólido. Por el otro lado resolviendo el problema de transporte, asociado a los términos hidráulicos (flujo) y a los términos que definen la erosión (sólido fluidificado).

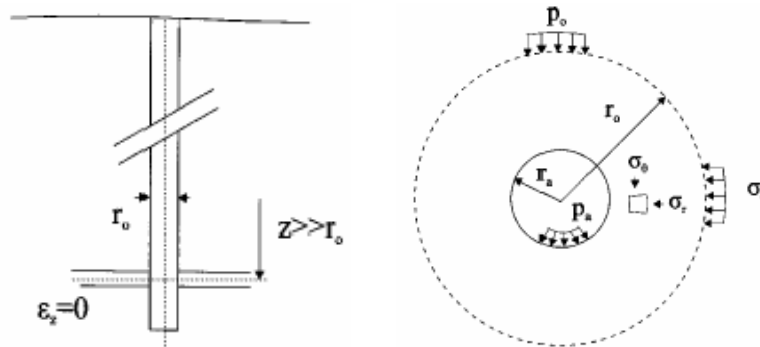


figura 11 – Configuración inicial del problema. a) Localización de la sección de estudio; b) Sección de estudio. (Stavropoulou et al., 1998 [15]).

Para acoplar los dos bloques presentados se utiliza como variable común la porosidad, dado que según los autores, la erosión es un aumento de la porosidad. Luego, deformaciones en el esqueleto sólido inducen deformaciones, que a su vez se traducen en cambios de porosidad. Este cambio de porosidad influye en un aumento de la permeabilidad, consecuentemente cambios de flujo. A su vez, los cambios de porosidad modifican los parámetros resistentes del macizo. Estos cambios de resistencia provocan reajustes en las condiciones de equilibrio e igualmente cambios de la porosidad. Finalmente se obtiene un sistema dependiente del tiempo, que es introducido por el término de la velocidad del flujo.

Para la resolución numérica de las ecuaciones de balance y equilibrio (dominio espacial) se utiliza la técnica de residuos ponderados de *Galerkin*. La discretización temporal, introducida por el término del flujo radial, es resuelta con el uso de diferencias finitas.

Los principales resultados obtenidos por el equipo de trabajo [15] fueron:

- La erosión se concentra alrededor de la perforación y decae fuertemente con el radio. Lo mismo ocurre con la permeabilidad debido a que ésta está ligada a la porosidad, que en este caso se relaciona con la erosión.
- Puede determinarse el tiempo de inicio de producción de arena dado que se produce una reducción drástica de la resistencia de la roca, puesto que esta está ligada a la porosidad.

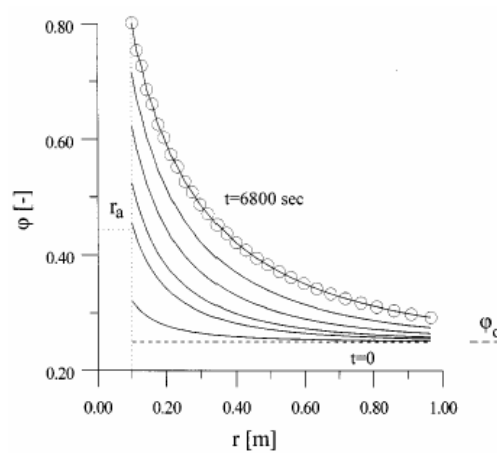


figura 12 – Perfiles de porosidad según distancia al centro de la perforación y en función del tiempo. (Stavropoulou et al., 1998 [15])

Posteriormente, el trabajo realizado por los primeros autores fue desarrollado por diferentes grupos, en este caso mostraremos los resultados obtenidos por R.G. Wan y J. Wang (2002) [16] los cuales utilizan tal técnica para el estudio bidimensional de una perforación.

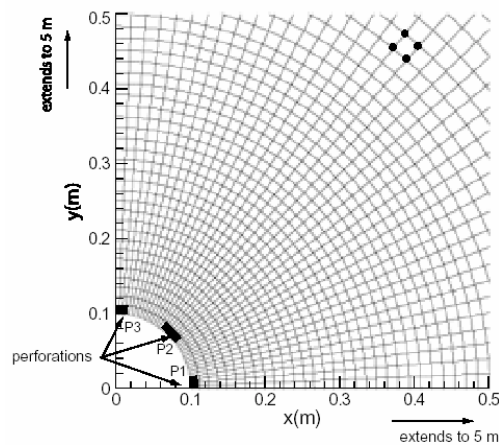


figura 13 – Detalle de la discretización realizada alrededor de la perforación. En este caso se estudia un perforación revestida de tubo ranurado. R.G. Wan y J. Wang (2002) [16].

Un ejemplo de resultado obtenido puede ser el mostrado en la figura 14. Esta gráfica nos ilustra como la disgregación (erosión) se centra alrededor de la perforación, tal y como precedían los primeros estudios.

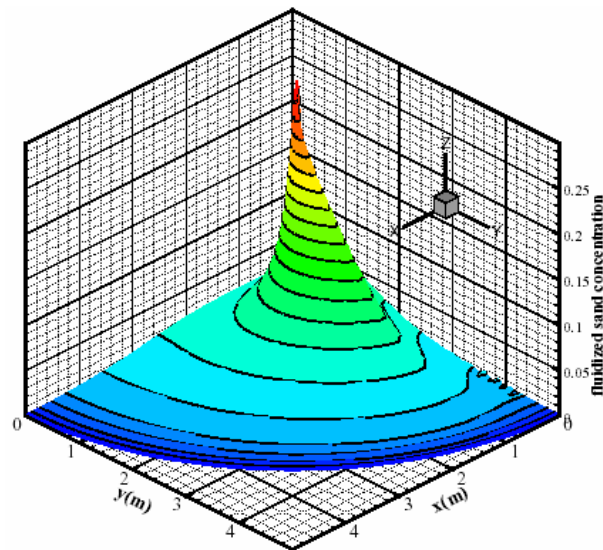


figura 14 – Concentración de arena fluidificada al cabo de 3 días. R.G. Wan y J. Wang (2002) [16].

### 2.2.2 Modelos de fisuración discreta

Este tipo de modelos numéricos se aproximan al problema mediante la discretización del medio, considerándolo como un conjunto de subdominios, cada uno con comportamiento independiente. Dentro de esta familia de métodos destacaríamos el método de los elementos discretos o “Distinct Element Method (DEM)” creado desarrollado por *Cundall* en 1971.

El método de los elementos discretos aborda el problema desde la microestructura, caracterizando cada grano como una partícula independiente a modelar. Luego, la idea es la de analizar el problema como si de un sistema dinámico se tratase, estudiando el equilibrio cinemático a partir de la integración de las aceleraciones del conjunto.

La discretización de cada partícula es realizada a partir de una geometría definida (elipses, rectángulos, ...) Los contactos entre partículas son interpretados como un sistema de resorte elástico y de elemento friccional (figura 15), los cuales son evaluados a partir de la distancia entre centros de partículas (solapamiento).



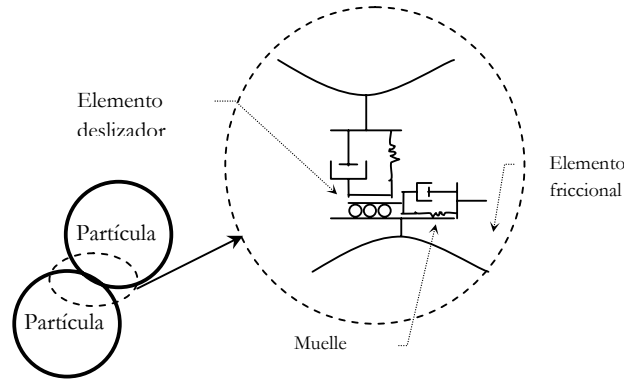


figura 15 – Contacto idealizado entre dos partículas de DEM. (Jensen et al., 2001 [17])

La resolución está subdividida en incrementos de tiempo introducidos de manera explícita en los términos del movimiento. Para cada paso de tiempo se calcula el equilibrio de fuerzas. Para ello, primeramente, se calculan las fuerzas asociadas a los contactos entre bloques a partir de los desplazamientos impuestos en el paso de tiempo anterior. Una vez conocidas las fuerzas, se calcula, con la segunda ley de Newton (ecuación 1), las aceleraciones de cada partícula. Luego se determinan los desplazamientos mediante sucesivas integraciones (ecuaciones del movimiento). Entonces, el caso de partículas deformables, se calcula la deformación, la cual se introduce nuevamente al sistema. Finalmente, las fuerzas son almacenadas y comparadas con las de los elementos contiguos. En caso de compatibilidad de fuerzas entre partículas (equilibrio de fuerzas), los desplazamientos de las partículas son transferidos para un sucesivo paso de tiempo, sino un nuevo bucle de equilibrio es realizado.

$$\ddot{u}_i + \alpha \cdot \dot{u}_i = \frac{F_i}{m_a} + g_i$$

ecuación 1

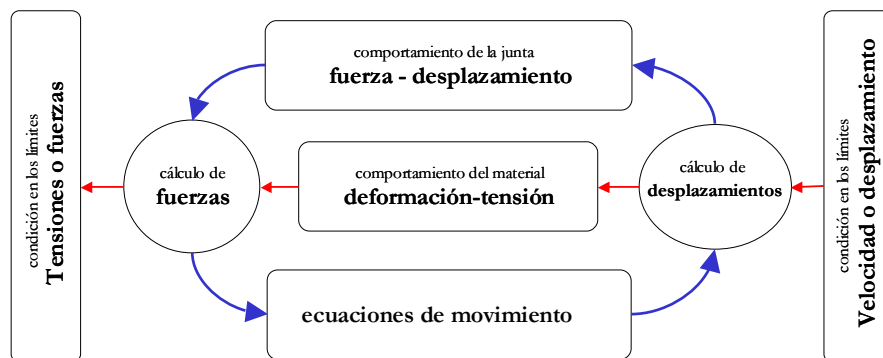


figura 16 – Proceso resolutorio del DEM a nivel de partícula. Obtención de la nueva distribución de fuerzas. (T. Verdel, 1999 [19])

En lo que concierne a la modelización de la producción de arena varios artículos han sido publicados por *Jensen et al.* [17] y [18]. Este grupo de trabajo ha modelizado el problema añadiendo además el efecto acoplado del flujo, gracias a la inclusión de una malla elementos finitos para resolver la ecuación del flujo (Laplace). Además han discretizado el problema con elementos cuadráticos<sup>3</sup> de diferente forma, con el fin de evitar los problemas numéricos asociados. La perforación ha sido modelada como un elemento especial que tiene como propiedad eliminar los elementos que entren en contacto con él.

Los resultados logrados por los autores han consistido en un análisis comparativo de tres casos, en los que se difiere en el parámetro resistente de los contactos. El resultado obtenido ha sido el esperado a priori, dado que a menos cohesión se ha observado mayor degradación, incluso llegando al colapso. Consecuentemente, se ha demostrado la potencialidad del procedimiento. No obstante, el método aún comporta importantes restricciones debido al alto coste computacional. Es por ello que el número de partículas no es el suficiente para aproximar al de la realidad. También han observado deficiencias en el uso de la ley de Darcy, posiblemente causadas por limitaciones debido al uso combinado de elementos discretos y mallado continuo en la ley de flujo. Destacaremos que la apertura de las juntas es interpretada como un cambio de la permeabilidad mediante una ley exponencial (ecuación 2), donde  $k$  (permeabilidad) es función de una constante  $C$  y  $e$  es la porosidad del medio [17].

$$k = C \frac{e^3}{1+e}$$

ecuación 2

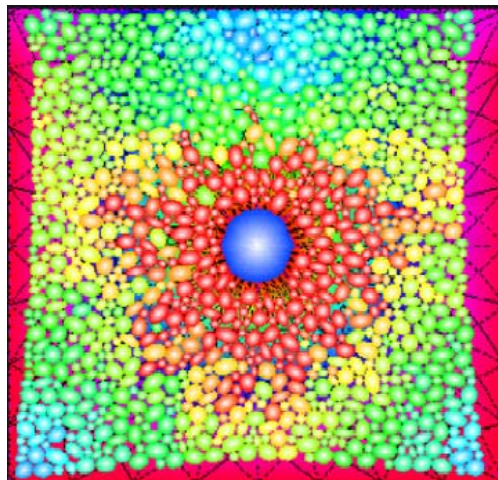


figura 17 – Simulación con DEM de una sección transversal de una perforación petrolífera.. (*Jensen et al., 2001*[17])

<sup>3</sup> Partículas cuya forma es definida por una función cuadrática.

## 2.3 Modelos de predicción actual

Los apartados anteriormente expuestos hablan del conocimiento del proceso de producción de arena en el ámbito de investigación. No obstante, estos resultados, no son enteramente aplicados en las técnicas actuales de explotación. Actualmente la tecnología usada para la determinación de la producción de arena se basa en tres técnicas:

### 2.3.1.a. Formulaciones empíricas

Estos modelos se basan en el conocimiento empírico del problema y la relación de éste con ciertas propiedades del material. Dentro de esta familia de métodos podemos encontrar formulaciones que relacionaran la producción con propiedades resistentes del material. También se relaciona con propiedades acústicas provenientes de “logs” geofísicos (testificaciones geofísicas).

### 2.3.1.a. Análisis estadísticos

Este método consiste en el análisis estadístico de todos los factores relacionados con el problema (los parámetros constitutivos del material y las características de la perforación). El resultado de esta técnica es la obtención de una correlación, válida para el caso de estudio concreto.

### 2.3.1.a. Métodos numéricos

Esta familia de métodos hace referencia a los métodos expuestos en § 2.2 , aunque solamente los modelos de predicción de inicio de producción de arena han sido usados.

## 3 Microestructura

### 3.1 Modelo de discontinuidades

Dentro de los métodos que permiten una aproximación discreta al problema, se ha utilizado el método de los elementos finitos con la inserción de elementos junta. Estos elementos especiales, que serán descritos en § 3.1.1, permiten el salto de desplazamientos y tensiones en el medio continuo, pudiendo así analizar el grupo de elementos aislados por discontinuidades como elementos discretos.

Otro aspecto importante a desarrollar en el presente capítulo es la presentación de las leyes constitutivas utilizadas para los elementos junta.

#### 3.1.1 Introducción al MEF con juntas

El método de los elementos finitos es una de las técnicas numéricas con más expansión actualmente. Este fenómeno tiene lugar gracias a su gran adaptabilidad para la resolución de problemas hasta ahora no resolubles con métodos tradicionales.

El método consiste en la resolución de una serie de ecuaciones que gobiernan el problema (ecuaciones de balance, compatibilidad, constitutivas, etc.) de un dominio conocido. En particular la solución se obtiene integrando las soluciones obtenidas de los diferentes subdominios en los que se subdivide la geometría inicial. Estos subdominios son elaborados con formas simples, y reciben el nombre de elementos.

No obstante, este método tal y como se planteó en su origen, no es apto para simular todo tipo de comportamiento. Ejemplo de ello es la simulación de fracturas, que implican deformaciones muy localizadas.

El problema anterior ha sido subsanado con diferentes técnicas, unas basadas en una aproximación de medio continuo (daño continuo), y otras utilizando una aproximación discreta, introducción de elementos especiales. Dentro de este último capítulo, una de las técnicas que destacaremos es la implementada en el código DRAC, los elementos junta o interfase (zero-thickness interface elements)

].

### 3.1.1.a Elementos junta

Los elementos junta, son un tipo especial de elemento finito que se caracteriza por tener un espesor nulo, y unas leyes de comportamiento que dependen de los desplazamientos relativos (en lugar de las deformaciones, como en los elementos finitos habituales). En su versión más simple tiene por cuatro nodos (caso lineal bidimensional), donde las coordenadas coinciden dos a dos (figura 18). Los elementos colapsan en una sola línea, la cual actúa como contacto entre el costado común de dos elementos continuos<sup>4</sup>. Luego, los elementos continuos separados por un elemento junta, compartirán coordenadas de un lado, pero serán formulados con nodos diferentes.

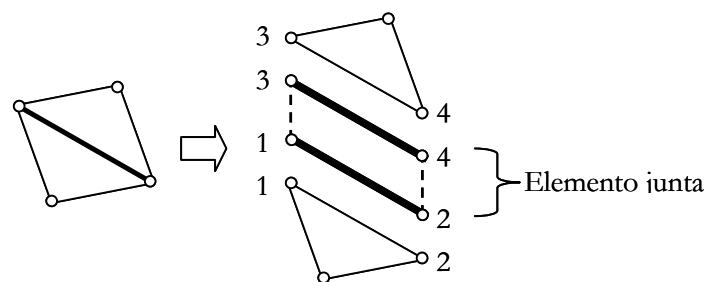


figura 18 – Implementación de un elemento junta entre dos elementos continuos. En negrita, el elemento junta. Los números corresponden a los nodos, que en este caso están numerados según la numeración local.

### 3.1.1.b Control de convergencia

Debido a la introducción de leyes de comportamiento no lineales, en este caso constituidas por el modelo constitutivo presentado en el siguiente apartado, el análisis adquiere un carácter no-lineal. Con el objetivo de resolver este tipo de problema, diferentes técnicas iterativas pueden ser usadas, Newton-Raphson, Arc-length, Quasi-Newton, etc.

En el caso que nos confiere, la técnica a utilizar será la de Newton-Raphson. Este procedimiento de resolución de problemas no-lineales realiza un control sobre las tensiones el cual consiste en:

1. Se realiza un primer cálculo aplicando el incremento de tensión deseado ( $\mathbf{F}$ ). Para dicha resolución se utiliza como matriz de rigidez el valor tangente a la curva tensión deformación ( $\sigma-\epsilon$ ). Luego, a partir de la deformación obtenida, se obtiene el estado tensional perteneciente a la curva ( $\sigma-\epsilon$ ).
2. La diferencia entre el incremento de tensión aplicada y la tensión obtenida en el cálculo precedente ( $\Delta\mathbf{f}$ ) es introducida de nuevo en el sistema. Éste nuevo sistema proporciona el valor de la deformación del residuo anterior ( $\Delta\mathbf{u}$ ).

<sup>4</sup> Nota: el término continuo se utilizará a lo largo del presente trabajo para diferenciar los elementos clásicos de los elementos junta.

3. A continuación, obtenida la deformación se obtiene la tensión ( $f_i$ ) y se compara con la tensión aplicada. Si ambas tensiones se aproximan a un mismo valor ( $\Delta f_i \leq \text{tol}$ ), el proceso se detiene, dado que se alcanza la solución buscada. Sin embargo si la diferencia entre los dos valores supera un valor establecido, el proceso se repite de nuevo, hasta alcanzar el valor deseado.

En las figuras (figura 19 y figura 20) se muestran el diagrama de flujo del proceso de resolución iterativa y una representación gráfica de la solución del sistema.

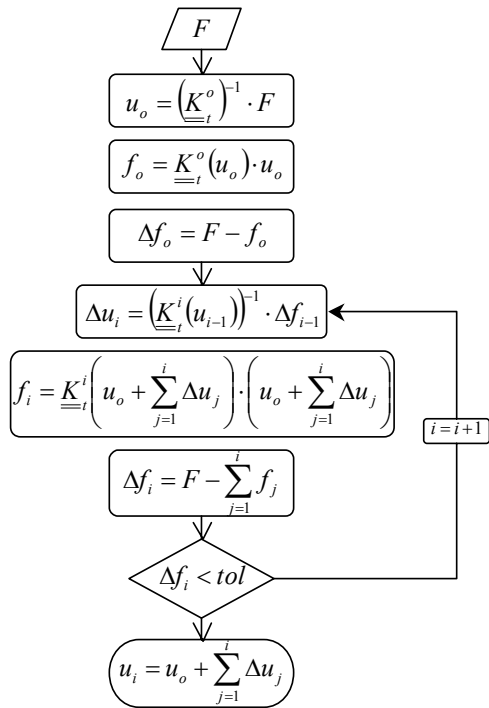


figura 19 – Resolución de un sistema no-lineal con la técnica de Newton Raphson.

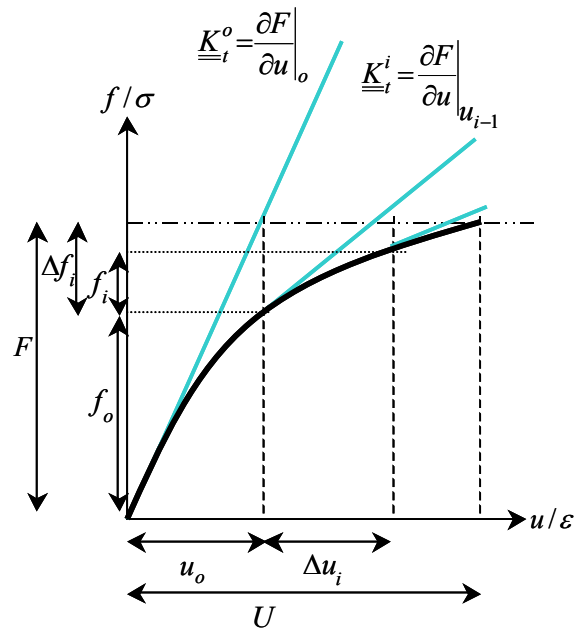


figura 20 – Esquema gráfico del proceso de convergencia.

En el caso de estudio, con objeto de disminuir las posibles fluctuaciones debido a cambios locales de la pendiente de la curva ( $\sigma-\epsilon$ ), se ha optado por una actualización de la matriz de rigidez teniendo en cuenta el término anterior. Luego el valor final ha sido una ponderación entre el valor de la tangente en el punto de cálculo y el punto precedente. (ecuación 3)

$$\underline{K}_t = \frac{4}{5} \cdot \underline{K}_t^i + \frac{1}{5} \cdot \underline{K}_t^{i-1}$$

ecuación 3

### 3.1.2 Modelo constitutivo de junta

Una de los componentes más importantes de los elementos junta es la ley constitutiva que lleva asociada. En este caso se ha utilizado una ley formulada por *Carol, Prat y López* (1998) [20] que se basa en la elasto-plasticidad y en la que se introducen conceptos de la mecánica de fractura para modelizar el comportamiento.

Esta ley, descrita en términos de la componente normal y tangencial de la tensión en el plano del elemento junta, se describe a partir de:

- Criterio de fractura.
- Leyes de evolución de las variables de estado.

El criterio de fractura nos indica cuando el estado tensional es el suficiente para abandonar el comportamiento elástico e iniciar la plastificación. En este caso particular, este proceso es entendido como fracturación del material.

La superficie de fractura (superficie de fluencia) es definida por una hipérbola (ecuación 4, figura 21 a) ) calibrada a partir de tres parámetros:  $c$  (cohesión),  $\chi$  (resistencia a tracción pura) y  $\phi$  (ángulo de fricción).

$$F = \sigma_T^2 - (c - \sigma_N \tan \phi)^2 + (c - x \tan \phi)^2$$

ecuación 4

La evolución de los parámetros anteriores, y por lo tanto de la superficie de fractura, es función del trabajo disipado en el proceso de fractura ( $W^{cr}$ ). Este valor se calcula a partir del producto tensión ( $\sigma$ ) por el desplazamiento relativo ( $\delta u^{cr}$ ), corregido en el caso de fractura por compresión-corte (modo IIa), por el trabajo de la fricción y la dilatación (figura 21 (d) y (e)).

$$dW^{cr} = \sigma_N \cdot \delta u_N^{cr} + \sigma_T \cdot \delta u_T^{cr} \quad \text{si estamos en tracción } (\sigma_N \geq 0)$$

$$dW^{cr} = \left( \sigma_T \cdot \delta u_T^{cr} \right) \cdot \left( 1 - \left| \frac{\sigma_N \cdot \tan \phi}{\sigma_T} \right| \right) \quad \text{si estamos en compresión } (\sigma_N < 0)$$

ecuación 5

Luego la dinámica de la superficie de fluencia es la siguiente:

- Cuando se produce una fractura por tracción (modo I), la superficie de fluencia pierde la resistencia a tracción ( $\chi$ ), por lo que la superficie evoluciona a una hipérbola con origen en el centro de coordenadas (figura 21 e) (1) ).

- Si la fractura se produce por compresión corte (modo IIa), la evolución de la superficie de fractura tiende verso a un par de líneas con inclinación igual al rozamiento interno. En este caso se dirá que se ha alcanzado el estado de degradación máxima de la junta con la pérdida total de cohesión y de resistencia a tracción (figura 21 c) (2) ).

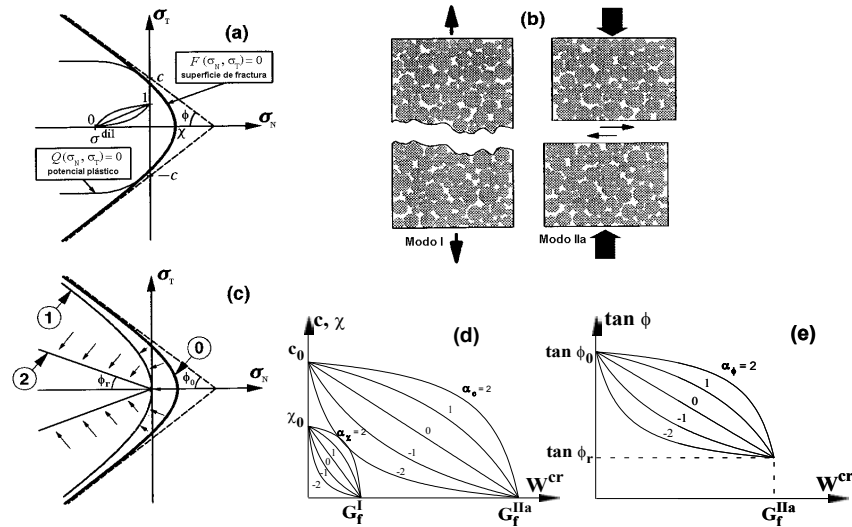


figura 21 – Modelo de junta: (a) superficie de fractura y potencial plástico, (b) modos básicos de fractura, (c) evolución de la superficie de fractura, y (d) leyes de reblandecimiento. (C.M.López, 1998) [20]

## 3.2 Modelización microestructural

El modelo anteriormente descrito se ha utilizado en la modelización numérica de microestructuras.

### 3.2.1 ¿Qué es una microestructura?

La escala en el estudio de los materiales es un factor determinante para la comprensión de los mecanismos físicos que ocurren. Generalmente, en el campo de la ingeniería se estudian los procesos considerando los materiales homogéneos, lo que pese a ser una simplificación en la mayoría de los casos no infiere un error importante. Sin embargo, en estudios avanzados de problemas complejos, la consideración explícita de la microestructura puede tener ventajas importantes, como es la representación de las variables de observación.

Por ejemplo, para el caso del hormigón se han propuesto tres niveles de estudio, el nivel macroscópico donde se considera el medio como un solo continuo; el nivel intermedio que



considera el hormigón como un medio heterogéneo compuesto por varias fases; y el medio microscópico, donde se analiza la estructura interna del material, la estructura cristalina.



nivel microscópico      nivel intermedio      nivel macroscópico

figura 22 – Niveles de análisis según la propuesta de Wittmann (1983). (C.M.López, 1998) [20]

En el caso del hormigón, para reproducir la mayoría de los aspectos del comportamiento mecánico es suficiente con el nivel intermedio, también llamado mesoestructural. Este nivel de análisis permite observar la interacción árido-matriz que es capaz de explicar el mecanismo de rotura así como el fenómeno del efecto de tamaño.

Según la propuesta de C.M. López *et al.* [20], el hormigón puede ser compuesto por dos fases, los áridos y la matriz, y por dos interfases, árido-matriz y matriz-matriz. Luego, utilizando un código de elementos finitos como el presentado en §3.1, las fases son discretizadas como elementos continuos (triángulos y cuadrados, en 2D), y las interfases como elementos junta. En la figura 23 puede observarse un ejemplo de malla utilizada para el estudio de propagación de fisuras en hormigón.

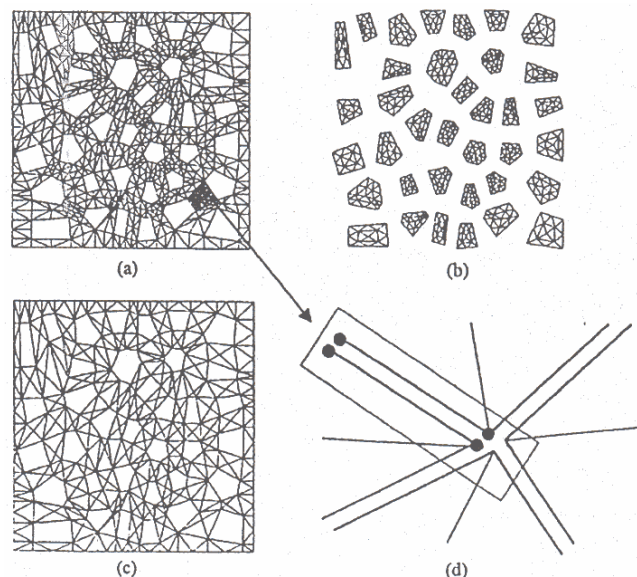


figura 23 – Malla microestructural utilizada en el estudio de propagación de fisuras en hormigón. a) Discretización de la matriz; b) Discretización de los áridos; c) Elementos junta utilizados; d) Detalle de un elemento junta. (C.M.López, 1999 [20]).

Este tipo de modelización de ahora en adelante será nombrada como modelización microestructural, aunque el nivel de estudio sea mesoestructural, dado que por deformación del lenguaje es conocido así.

### 3.2.2 Comparación respecto a otros métodos

A diferencia de otros métodos propuestos para el estudio microestructural, el método mostrado utiliza un procedimiento que se aproxima al comportamiento real de los materiales. Este hecho se debe a que el medio es compartimentado por elementos junta, los cuales permiten saltos de desplazamientos y tensiones. Consecuentemente, el método analiza el problema como si de un conjunto de partículas discretas se tratase, lo que permite tener en cuenta efectos como el tamaño de grano.

Otro posible método de estudio a nivel de microestructura es el *Distinct Element Method (DEM)*. Este procedimiento, ha diferencia del método de los elementos finitos, no se basa en la resolución de unas ecuaciones de gobierno, sino que busca el equilibrio de fuerzas de un conjunto de partículas. El concepto de la técnica es buscar una configuración estable usando la segunda ley de Newton y considerando las interacciones entre partículas (§ 2.2.2).

Respecto al método utilizado, el DEM permite modelizar correctamente el comportamiento cinemático. Esto se asegura en cada paso buscando los contactos existentes entre partículas y calculando la estabilidad global mediante el equilibrio de fuerzas. Este hecho hace que el método no se restrinja a la teoría de pequeñas deformaciones.

No obstante, la ventaja presentada no hace que sea superior, ya que para poder calcular los contactos con más facilidad, se ha optado por una simplificación de estos. En la práctica los códigos basados en esta teoría utilizan partículas idealizadas a círculos o rectángulos<sup>5</sup>. Por lo que desde el punto de vista de representación de la microestructura, no es muy acertado.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el coste computacional. Ambos requieren un considerable tiempo de cálculo, en el caso de los elementos finitos con juntas, el tiempo se consume en la resolución de la no-linealidad introducida por las juntas. En el caso del DEM, el tiempo de cálculo se utiliza en la evaluación de los contactos y en la resolución del equilibrio del sistema.

---

<sup>5</sup> Existen actualmente métodos que basados en el DEM permiten el uso de partículas con discretización en su interior.

### 3.2.3 Justificación de la elección del método

Para el estudio del proceso de producción de arena se utilizará la misma técnica que la utilizada en el estudio de las probetas de hormigón presentado en § 3.2.1. La justificación de esta elección recae en la similitud estructural entre el hormigón y una roca. Ambos materiales están compuestos por fases similares, los áridos corresponden los granos de arena, y la matriz, el cemento entre partículas.

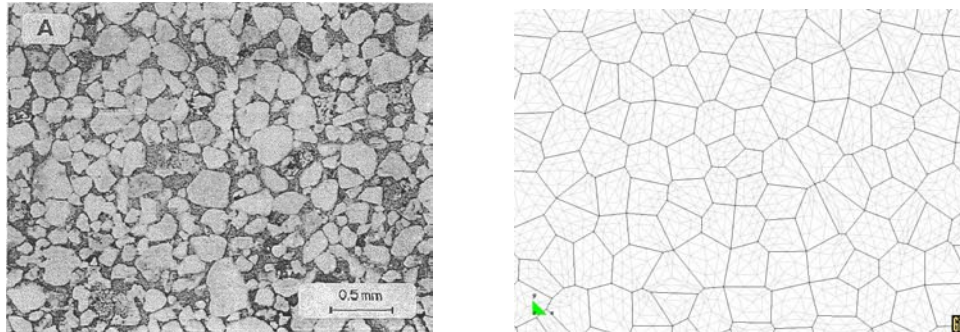


figura 24 - Comparativa entre una muestra real (Papanastasiou, 2001 [21]) y la modelización realizada.

En lo que a comportamiento se refiere, el análisis de la microestructura es apto para el estudio de todos los materiales con rotura cuasi-frágil. Ante un ensayo de tracción uniaxial, este comportamiento se caracteriza por un tramo inicial elástico. A continuación se produce un tramo con pérdida de la elasticidad debido al inicio de la microfisuración. El anterior tramo finaliza cuando se inicia la macrofisuración, este paso corresponde aproximadamente al punto de máxima resistencia del material. Este último tramo se caracteriza por una coalescencia de la microfisuración. El último tramo corresponde al momento cuando se alcanza el valor de la resistencia residual, en general nula en tracción o tracción sin confinamiento. Una curva cualitativa puede observarse en la figura 25.

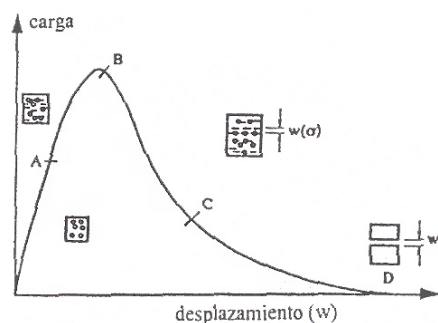


figura 25 – Curva de tensión deformación característica de un material cuasifrágil. (C.M López, 1999 [20]).

Conjuntamente con el análisis del comportamiento del hormigón, el uso de la técnica microestructural ha sido con éxito empleada en el estudio de tejidos óseos.

### 3.3 Generación de la malla

Un capítulo importante del trabajo realizado en la presente tesina ha sido la generación del mallado. El trabajo se ha centrado en la obtención de un procedimiento automatizado de generación de mallas. Esto ha sido posible gracias a la utilización de diferentes técnicas, que serán descritas a continuación.

Para poder generar la malla automáticamente se han aceptado las siguientes hipótesis:

- Granos de aproximadamente igual tamaño distribuidos de manera aleatoria.
- Fases intergranulares idealizadas como un contacto entre granos.

El proceso ha consistido en la introducción de un hueco de forma circular en el interior de una malla como la de la figura 24 (derecha). Esta malla inicial ha sido creada usando el generador de mallas de retículas óseas, el cual construye geometrías a partir de la teoría de *Delaunay* y *Voronoi* y usando funciones aleatorias con el fin de crear mallas irregulares. Esta técnica permite la construcción de geometrías granulares de forma automatizada y permite una fácil implementación de los elementos junta.

Con el objetivo de reducir el número de elementos de la discretización, la malla microestructural se ha restringido a una corona alrededor del hueco central. Ello ha requerido realizar una segunda eliminación de todos los elementos de la malla microestructural externos al perímetro exterior de la corona, y a la colocación de una “junta perimetral” para permitir su conectividad posterior. De esta manera se ha obtenido una corona circular de espesor constante. Asimismo, para poder garantizar la no interferencia de las tensiones de los bordes externos, se ha llevado a cabo una extensión de la malla mediante elementos de medio continuo convencionales, hasta los límites de un dominio suficientemente alejado del hueco. Esta extensión se ha realizado con el mallador GID. Finalmente la malla final ha sido la unión de ambas mallas.

En la figura 26 se puede observar las diferentes etapas constructivas del mallado final.

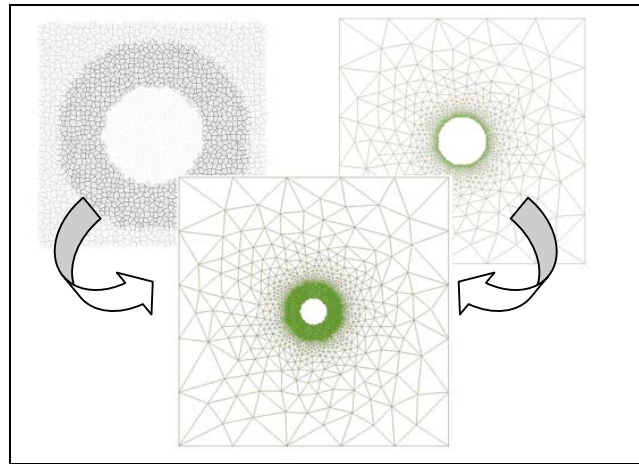


figura 26 - Proceso de construcción de la malla de estudio.

### 3.3.1 Generación de la malla inicial

Tal y como se ha descrito en el inicio del capítulo, la malla original es creada con el generador de mallas óseas elaborado en la tesis doctoral de O. Roa [2]. Este programa realiza una malla rectangular utilizando la teoría de Delaunay-Voronoi.

El proceso se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Primero se construye una retícula de puntos generada mediante funciones estadísticas (random).
2. A continuación, utilizando la triangulación de *Delaunay*, se obtiene de una red de triángulos, con vértices en los puntos generados en el primer paso.
3. Seguidamente se construyen polígonos de *Voronoi* utilizando las mediatrices de los lados de los triángulos generados en la etapa precedente.
4. Finalmente se completa el proceso subdividiendo con elementos triangulares el interior de cada polígono, y creando elementos junta en los contornos adyacentes a cada polígono.

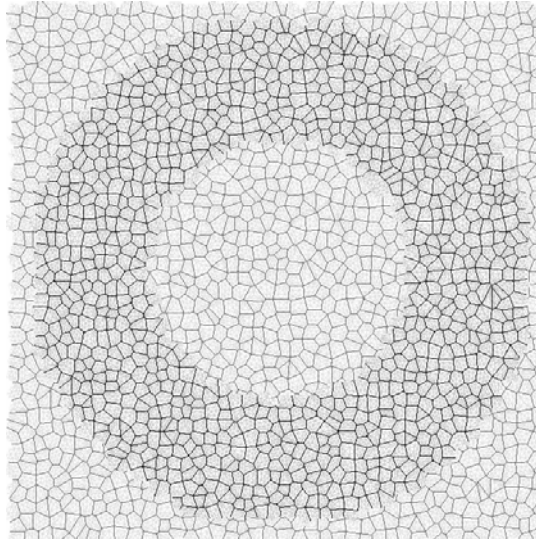
### 3.3.2 Elaboración del recorte

Una vez realizada la malla base se ha procedido al recorte de esta con el fin de reducir el número final de elementos de la malla final. El recorte se ha efectuado de manera circular, creando así una malla en forma de corona circular. En el caso estudiado se ha estimado que el espesor debía ser el suficiente para asegurar que los gradientes de tensiones de corte estuvieran localizados en esta zona. Es por esta razón que el espesor ha sido el equivalente aproximadamente el radio del hueco, o mínimo 10 granos de espesor.

Una vez realizada la extracción de los granos, mediante un criterio de distancia desde el centro, se ha procedido a la elaboración de juntas perimetrales en los contornos recortados. La junta perimetral es el elemento que asegura la transición entre el medio discreto (corona)

y el medio continuo, ya que no los elementos junta no pueden acabar interceptados en elementos continuos.

En esta etapa también se ha procedido a la elaboración de diferentes archivos de utilidad para generar tensiones distribuidas, etc...



*figura 27 – Recorte de la malla inicial, obtención de la corona interior.*

### **3.3.3 Elaboración de la extensión**

Como se ha dicho anteriormente se ha procedido a la generación de una malla de “relleno” para asegurar que se cumplen las tensiones iniciales en un contorno suficientemente alejado del hueco central. Este procedimiento se ha llevado a cabo con el preprocesado automático del programa GID.

El mallado ha sido formado tomando como límites, el contorno exterior de la corona como límite interior, y un rectángulo como límite exterior. Las dimensiones de este rectángulo han sido las equivalentes a 10 veces el radio de la perforación.

Cabe destacar que se ha utilizado una densidad progresiva hacia el centro de la malla con el fin de disminuir el número de elementos.

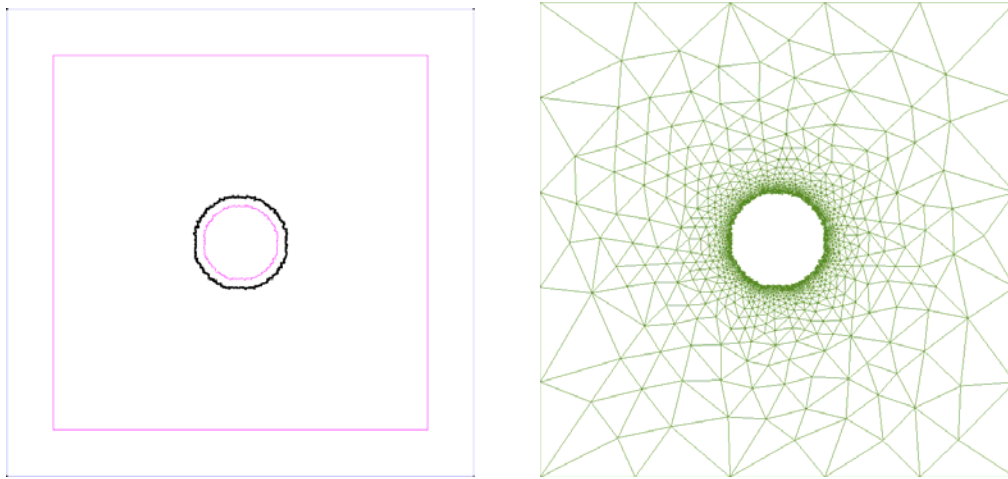


figura 28 – Ejecución del mallado exterior mediante el programa GID. Derecha, contornos de la malla a generar. Izquierda, malla generada con GID

### 3.3.4 Ensamblado de las mallas

El último paso en la elaboración del mallado ha sido el ensamblado de las diferentes partes que forman la malla final.

Con el fin de unir las mallas, previamente se han detectado los nodos comunes. A continuación, se han reenumerado los nodos y elementos de la malla procedentes de la extensión. La adición se ha producido después de manera simple.

Las figuras (figura 29, figura 30 y figura 31) muestran los detalles de la discretización final realizada.

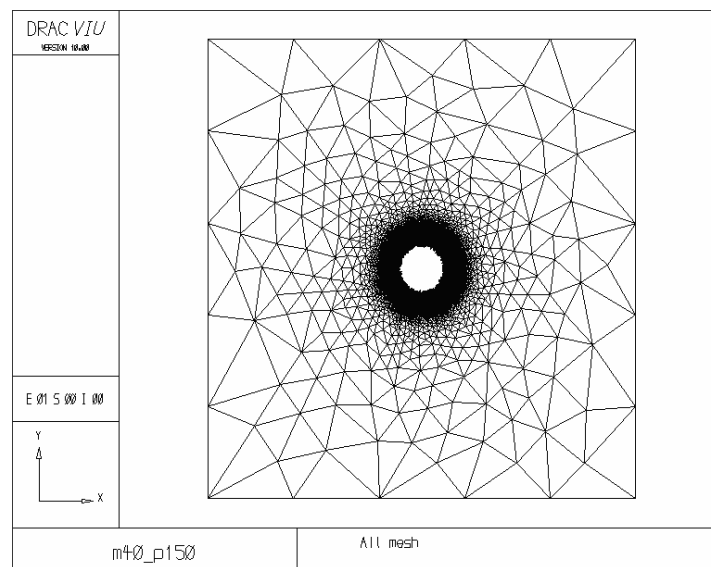


figura 29 – Malla obtenida tras el proceso final de ensamblado.

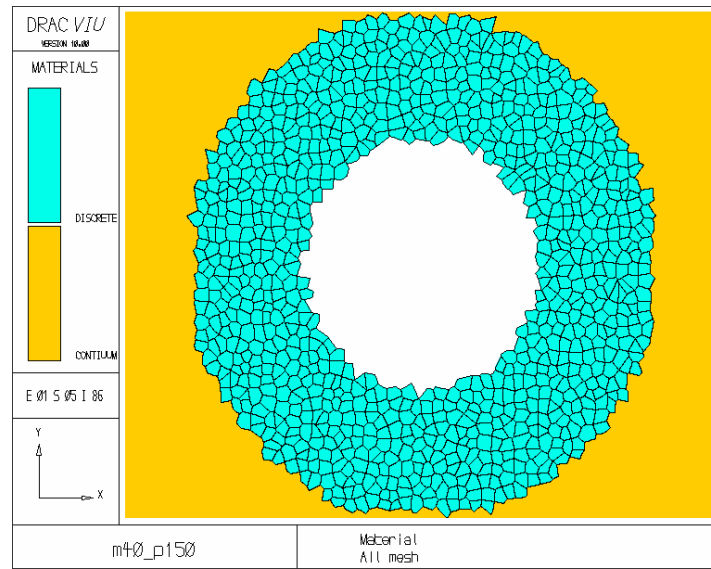


figura 30 – Vista en detalle del interior de la malla de estudio. Distribución de los granos, donde los contornos corresponden a los elementos junta.

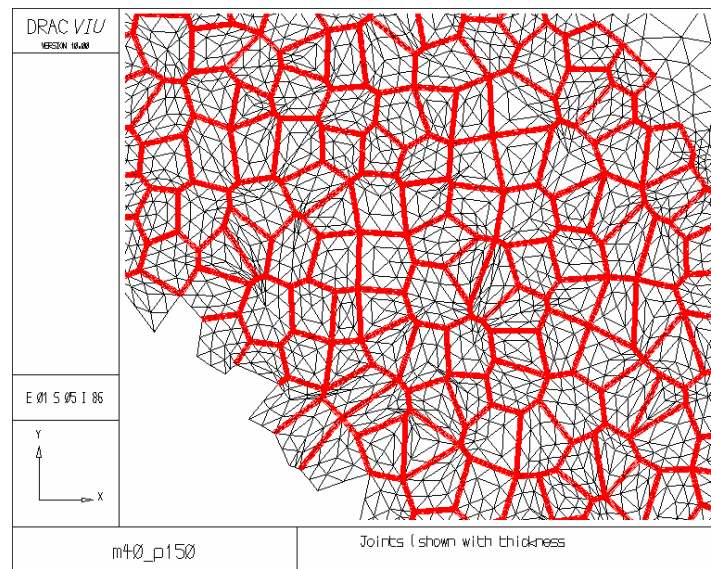


figura 31 – Vista de la discretización de los granos. En espesor, los elementos junta.



## 4 Simulaciones numéricas

### 4.1 Introducción

El principal objetivo de este trabajo ha sido el estudio numérico del fenómeno de rock sanding. Para llevar a cabo este estudio se han realizado diferentes simulaciones numéricas.

En todas ellas se han realizado la modelización utilizando parámetros del material estimados, debido a la falta de disposición de ensayos físicos específicos. No obstante el conjunto de propiedades propuestas han sido estimadas a partir de ciertos datos existentes. Cabe destacar que las características que definen las juntas necesitan de ensayos apropiados, de los que únicamente se disponen referencias en estudio de probetas de hormigón.

En la tabla 2 se puede observar los parámetros utilizados en los cálculos, y en la figura 32 una representación gráfica de la superficie de fractura de las juntas así como de sus leyes de evolución.

tabla 2 - Valores de los parámetros utilizados en el cálculo de los diferentes casos.

<b>Medio continuo</b>		
Peso específico ( $\rho$ )	0,0023	(Kgf/cm <sup>3</sup> )
Módulo de Young (E)	25000	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
Módulo de Poisson ( $\nu$ )	0,27	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>Medio discreto</b>		
Rigidez normal ( $K_n$ )	5.000.000	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
Rigidez tangencial ( $K_t$ )	5.000.000	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
Angulo de fricción ( $\varphi$ )	24	(°)
Resistencia a tracción pura ( $\chi_o$ )	0,10	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
Cohesión (C)	0,40	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
Energía de fractura modo I ( $G_I^c$ )	0,00001	(Kgf*cm)
Energía de fractura modo II ( $G_{II}^c$ )	0,0001	(Kgf*cm)
Tensión normal para el que la dilatación desaparece ( $\sigma^{dil}$ )	1,0	(Kgf/cm <sup>2</sup> )
Coefficiente de reblandecimiento para tensión normal ( $\alpha_\gamma$ )	0,0	(-)
Coefficiente de reblandecimiento para tensión de corte ( $\alpha_c$ )	0,0	(-)

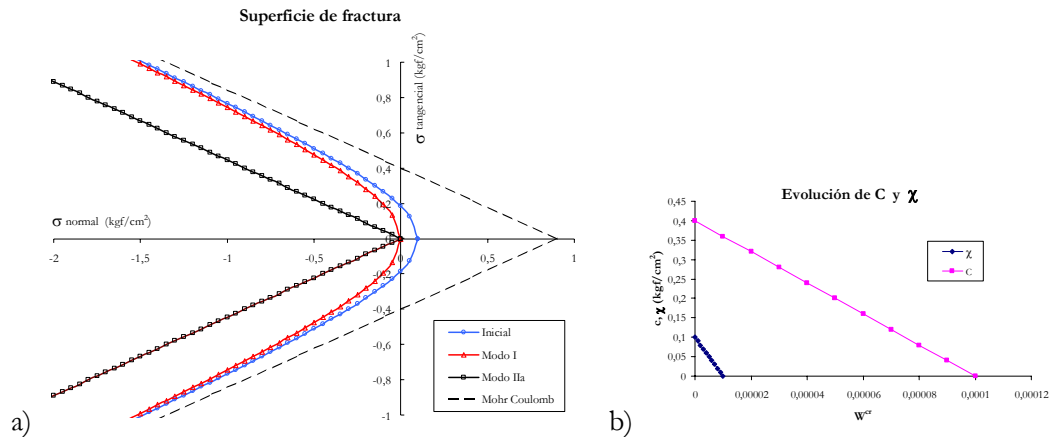


figura 32 – a) Evolución de la superficie de fractura de las juntas, utilizada en el cálculo, según el modo de rotura. b) Evolución de los valores de  $c$  (cohesión) y  $\chi$  (resistencia a tracción pura) para el caso estudiado.

De estos parámetros cabe destacar el uso de valores de rigidez de junta altos. El objeto de ello es el de no permitir la deformación elástica de la junta, y consecuentemente acentuar el carácter frágil del comportamiento del material global. También destacaremos los valores de energía de fractura bajos ( $G_I^f$ , para modo I; y  $G_{IIa}^f$ , para modo IIa), dado que el material modelado corresponde a un rango de resistencia muy bajo.

Las vías de estudio seguidas en el trabajo han sido tres, que serán presentadas a continuación:

1. Estudio de la producción de arena.
2. Estudio del efecto de escala
3. Estudio para un estado anisótropo de tensiones in-situ.

#### 4.1.1 Hipótesis de cálculo

En el trabajo realizado, por razones simplificadoras se han realizado ciertas hipótesis de cálculo:

1. La simulación se realiza en tensiones totales. Las presiones intersticiales no son tomadas en cuenta como un efecto sobre los contornos de los granos, sino que se considera que la presión aplicada en el interior de la corona interior es la única responsable. Esta simplificación, que se discutirá en mayor detalle, se considera aceptable para este estudio de carácter exploratorio del análisis microestructural con juntas al problema del “rock sanding”.
2. Debido a las limitaciones prácticas de memoria, el tamaño de grano ha sido entre 2 y 5 veces superior al real. Aún así, se considera que el número de granos utilizados es suficiente para obtener una visión realista del tipo de fenómeno que se puede representar con este planteamiento.
3. El cálculo se realiza con la teoría de pequeñas deformaciones, lo que debería ser suficiente para alcanzar las fases iniciales de producción de arena.

4. Debido a la discretización realizada, la fisuración y decohesión entre granos sólo será observable en las cercanías del hueco central. Lo que parece razonable al menos en una primera fase de estudio.
5. Los efectos del fluido axial no se consideran directamente dado que el estudio es bidimensional. Se considera que el agente que produce la extracción es el fluido axial, pero no es modelizado como tal, dado que el análisis se realiza en tensiones totales

## 4.1.2 Etapas de cálculo

En todas las fases se han contemplado los mismos estadios de modelización. En un primer estadio se ha procedido a la fase de compresión de la muestra, simulando así la introducción de las tensiones iniciales. Una vez acabada la fase se ha procedido a la disminución de tensión dentro de la perforación, simulando el proceso de extracción del petróleo. Durante este último proceso, y en función de la fracturación observada en cada junta, se ha llevado a cabo la sustracción de los granos que quedarán “suelos”.

En los siguientes apartados se detallarán los aspectos más relevantes de cada paso del cálculo.

### 4.1.2.a Compresión de la muestra

La compresión de las muestras se ha llevado a cabo de dos maneras.

- Compresión en un estado hidrostático de tensiones iniciales ( $K_0=1$ ).
- Compresión en un estado no hidrostático de tensiones iniciales ( $K_0 \neq 1$ ).

La compresión hidrostática ha consistido en la aplicación de una compresión normal distribuida de igual valor a lo largo de todos los contornos de la malla. La presión ha sido aplicada en el borde externo de la malla y en el interior de la corona. En este caso, y para simplificar los cálculos, se ha estimado que el proceso de excavación podía evitarse suponiendo que éste era equivalente a una decompresión progresiva de la corona interior. Este procedimiento solamente es posible para estados de tensiones hidrostáticos.

La compresión desviadora ha consistido en la aplicación de una carga de compresión normal distribuida de diferente valor en dirección horizontal que en dirección vertical. Esta carga ha sido únicamente aplicable al exterior de la malla, puesto que en este caso, debido a la asimetría radial. El interior de la corona ha sido rellenado por elementos de continuos que han sido extraídos posteriormente mediante la opción de “excavación” del programa DRAC.

En los diferentes casos estudiados se ha comprimido las muestras a valores de 150 kgf/cm<sup>2</sup>, lo cual podría corresponder a una muestra situada a una profundidad de 650 m (suponiendo sólo carga debido al peso). La compresión se ha aplicado de esta manera para el caso hidrostático. Para  $K_0 \neq 1$ , la carga vertical se ha supuesto de 75 kgf/cm<sup>2</sup> mientras la

horizontal de  $150 \text{ kgf/cm}^2$ , lo que corresponde por lo tanto un  $K_0=2$  y una profundidad del 325 m.

#### 4.1.2.b Disminución de tensión

Esta etapa ha consistido en la disminución de tensiones del interior de la corona. Este proceso se ha llevado a cabo aplicando distribuciones de tensiones de tracción normal a cada arista que conforma el contorno interior del hueco de la malla. Para minimizar los problemas numéricos, la carga ha sido aplicada en pequeños incrementos de tensión.

En el caso de compresión no hidrostática, previo a la disminución de tensiones se ha realizado una fase de excavación. Esta fase de excavación se ha subdividido así mismo en dos partes, actuando simultáneamente:

1. Una excavación de los elementos del interior de la perforación mediante el uso del modulo de excavación del código *DRAC*. Esta fase consiste en primer lugar en calcular las reacciones sobre los contornos nuevos debidas a los elementos a excavar. En segundo lugar, disminuir dichas tensiones hasta un valor nulo.
2. Una compresión del contorno nuevo causada por la presión que el fluido, en el interior de la perforación, ejerce sobre las paredes.

#### Extracción de granos

Uno de las definiciones más delicadas en el estudio de producción de arena ha sido el criterio de extracción de granos. La metodología usada se ha basado en:

- Definición de un criterio de rotura de juntas.
- Definición de un criterio de exclusión de granos

En primer lugar, para la determinación de la rotura de una junta se ha generado un criterio a partir de la energía de gastada en cada junta ( $W^{cr}$ ). Concretamente se ha utilizado un coeficiente obtenido a partir del cociente entre la energía gastada y la energía de fractura correspondiente al modo de rotura. Luego el criterio final es positivo si dicho coeficiente supera un valor de 0,80 , el cual es considerado como indicativo de la degradación total de la junta.

$$\left. \begin{array}{l} \text{modo I: } \text{coef} = \frac{W^{cr}}{G_f^I} \\ \text{modo IIa: } \text{coef} = \frac{W^{cr}}{G_f^{IIa}} \end{array} \right\} \text{rotura si coef} \geq 0,80$$

*ecuación 6*

En segundo lugar se ha definido un criterio de extracción de granos. Éste consiste en extraer los granos que queden separados del medio por un conjunto de juntas fracturadas. Gracias a este modo de operar se puede asegurar una sustracción con diferente número de granos, tal y como ocurre en la realidad.

En un principio, el conjunto de los dos criterios anteriores debía de haber formado un procedimiento automatizado, incluido en el código de cálculo, o bien en un programa a parte. No obstante, dificultades en la implementación del segundo criterio, han hecho que se haya utilizado un procedimiento visual para la observación de los granos separados. Para ello se ha examinado los coeficientes implementado la ecuación 6 en el código de cálculo (*DRAC*)

Finalmente, como resumen de la metodología utilizada se puede observar en la figura 33 un diagrama de los pasos seguidos.

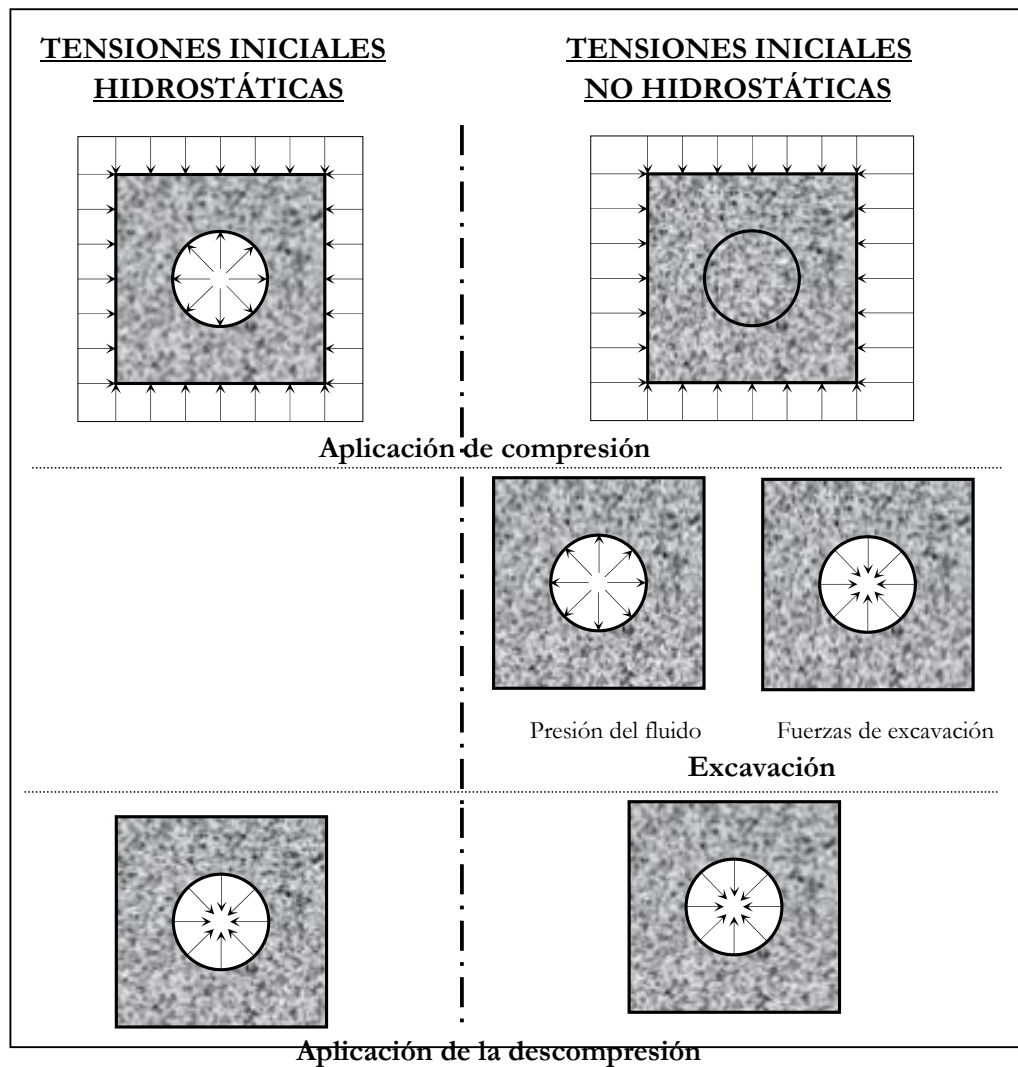


figura 33 – Esquema simplificado de la aplicación de tensiones.

## 4.2 Estudio de la producción de arena

El estudio de la producción de arena tiene como objetivo obtener una curva de relación la producción de arena con la presión en el interior de la corona circular.

### 4.2.1 Modelización del caso

En este caso se ha querido modelar el problema que se da en las perforaciones laterales (cañones) de los sondeos petroleros. Estas perforaciones laterales, excavadas mediante el uso de explosivos, se caracterizan por un diámetro pequeño (aprox. 2 cm) (§1.2).

Unos dibujos de la geometría modelada pueden verse en la figura 34.

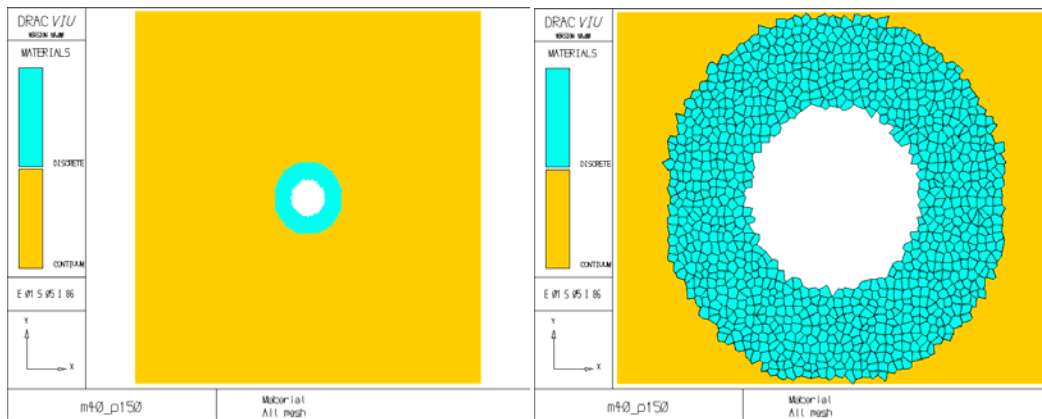


figura 34 - Izquierda; geometría de estudio donde en color oscuro se representa la parte discretizada con elementos junta y la parte clara, con elementos continuos. Derecha; detalle de la distribución de granos dentro de la malla.

Otras características del modelo geométrico utilizado se muestran en la tabla 3.

tabla 3 - Dimensiones del problema a resolver en el caso de la simulación de producción de arena.

Dimensiones generales		
Radio de la perforación	2	cm
Radio de la corona exterior	4	cm
Dimensiones del costado exterior	20	cm
Tamaño de grano	1	mm
Dimensiones de malla		
Número de nodos	20.036	(-)
Número de elementos continuos	26.896	(-)
Número de elementos junta	5.474	(-)

## 4.2.2 Resultados

### 4.2.2.a Etapas constructivas

- Compresión

Los resultados obtenidos dentro de este apartado han sido los esperados según el cálculo teórico. En este caso el resultado ha esperar era la compresión uniforme de toda la malla, debido a que todos los contornos de la malla han sido cargados con el mismo valor. Este resultado se ejemplifica en la figura 35, donde se puede observar igual magnitud en las tensiones principales de cada punto de Gauss.

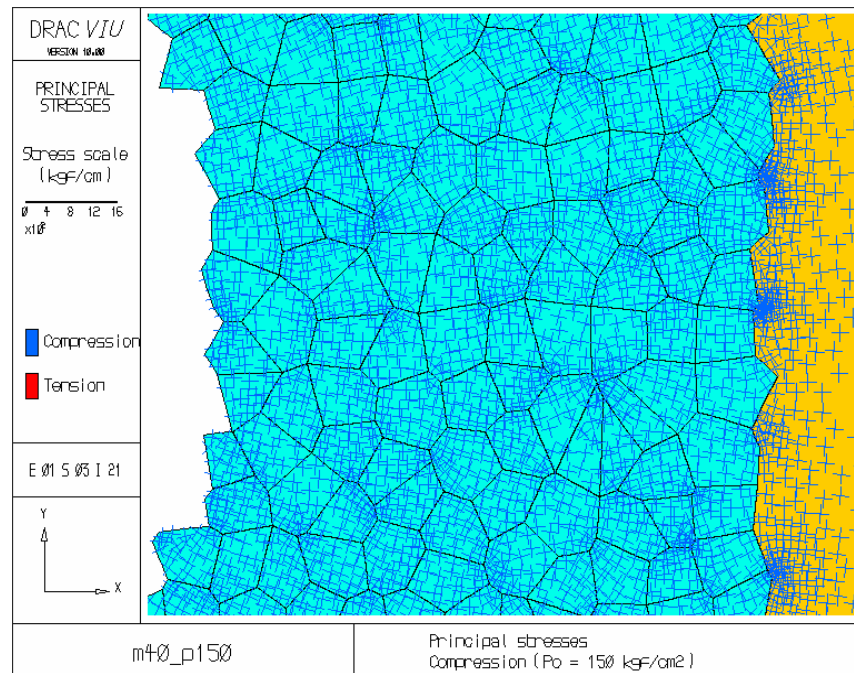


figura 35 – Tensiones principales al final de la etapa de generación de tensiones iniciales. Todas las tensiones son de compresión.

También los resultados en la deformación son los que cabría esperar, puesto que los nodos prescritos han sido los pertenecientes al extremo inferior izquierdo (figura 36).

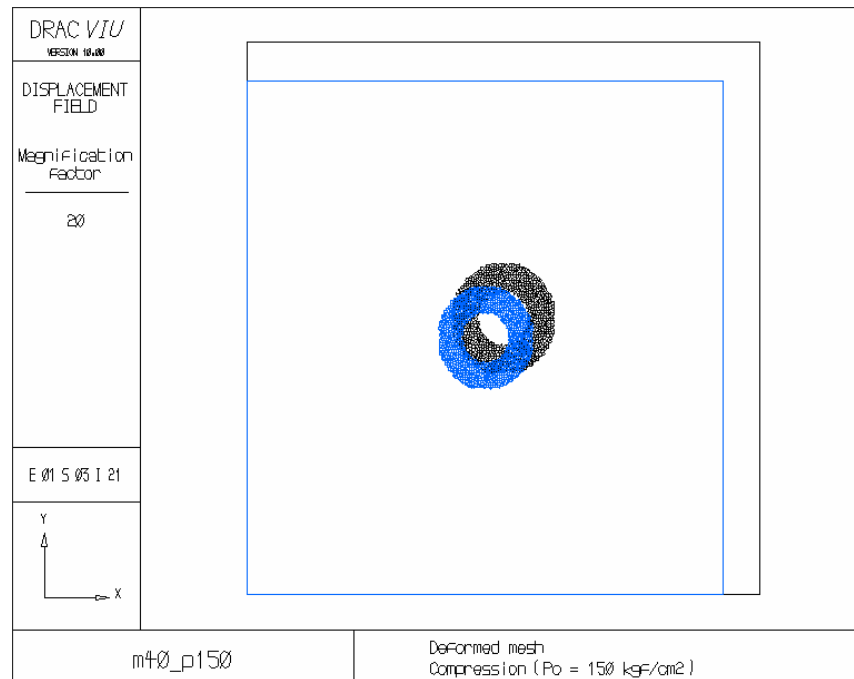


figura 36 – Deformada respecto la malla original.

No obstante cabe destacar que durante las primeras pruebas de compresión se observaron comportamientos anómalos en la junta perimetral, concretamente en los elementos junta de orientación más oblicua respecto la dirección circunferencial. Este efecto, ya observado en alguna ocasión (C. M. López [20]) ha sido llamado “efecto talón”.

El “efecto talón” ocurre cuando una junta, a causa de una geometría desfavorable (figura 37), resulta bloqueada. Ésta restricción en el movimiento provoca inestabilidades numéricas, no del todo conocidas, con tensiones que se alejan de las que le corresponderían según el estado de tensiones iniciales y la orientación de la junta, que provocan el inicio de fracturación.

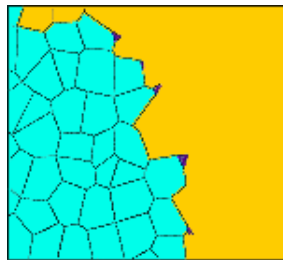


figura 37 - Detalle del efecto talón observado en el cálculo. En oscuro, medio discreto, y en claro medio continuo.

La solución adoptada en la resolución del problema ha sido la utilización de un modelo elástico lineal para los elementos junta pertenecientes al contacto medio discreto medio continuo. Aunque esta solución limita la propagación de la fracturación, puesto no permite la rotura, esta proposición resulta aceptable para las juntas del límite exterior del anillo de



granos, que se supone suficientemente alejado de la perforación, y por lo tanto no afectado por la posible fracturación.

- Descarga

La etapa de descarga de este caso de estudio ha consistido en la disminución progresiva de la carga interior desde su valor inicial de  $150 \text{ kgf/cm}^2$ . En los cálculos realizados esta disminución se ha podido llevar hasta los  $46,25 \text{ kgf/cm}^2$ . A continuación se detallarán los resultados principales.

Durante el proceso de descarga se produce una orientación de las tensiones principales debido a la disminución de presión en el interior de la perforación. Esta rotación tiende a disminuir la componente radial al mismo tiempo que aumenta la componente circunferencial de las tensiones principales, con un efecto más acusado cuanto más cerca de la perforación. Este hecho, bien conocido desde el punto de vista teórico, ha servido para contrastar la veracidad del método, puesto que se ha obtenido dicho comportamiento. Este resultado puede verse en la figura 38.

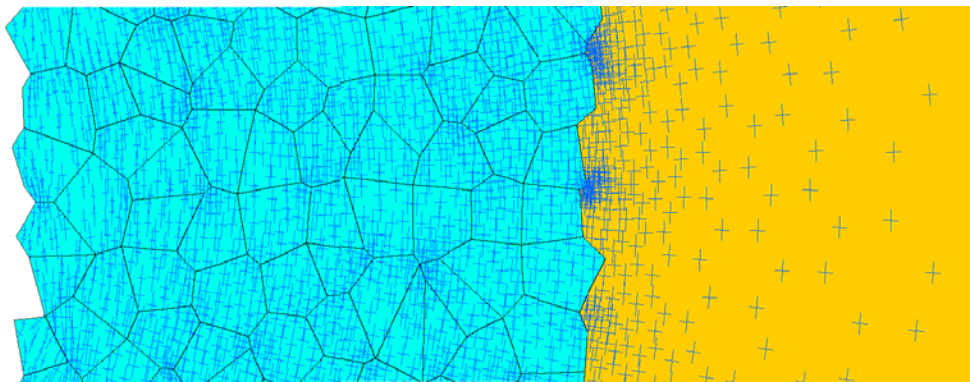


figura 38 – Tensiones principales durante el proceso de descarga. Disminución de la presión interior hasta  $46,25 \text{ kgf/cm}^2$ .

En cuanto a los incrementos de deformación durante el proceso de reducción de presión, los resultados obtenidos son los esperados. Los vectores de desplazamientos se dirigen verso al centro de la perforación. Este resultado puede verse en la figura 39.

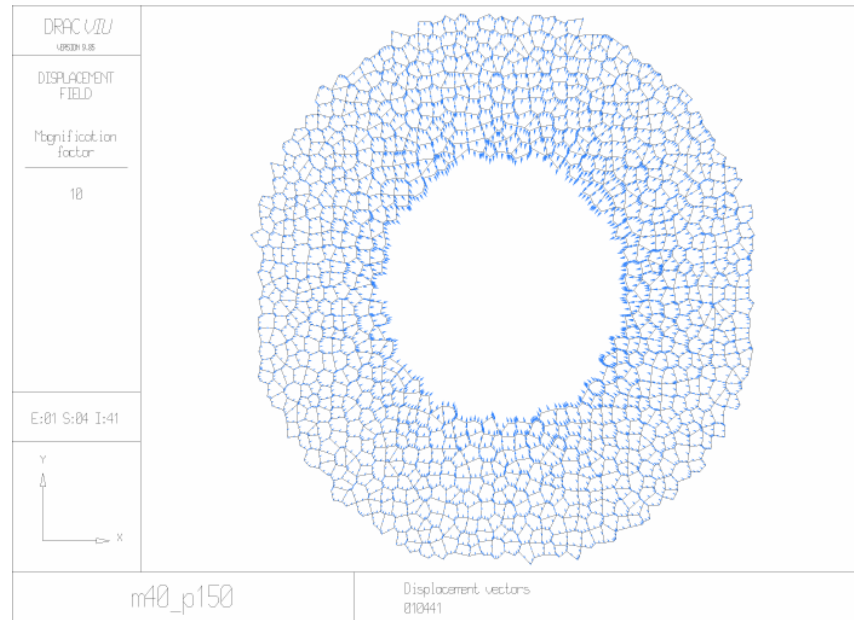


figura 39 –Incrementos de desplazamiento nodales durante el proceso de descarga.

En términos de cálculos, la fase de descarga puede ser dividida en varias partes. En una primera, la simulación no conlleva ninguna problemática, puesto que esta se realiza por la rama elástica, con lo que los cálculos son rápidos. Esta etapa tiene lugar, en el caso estudiado, mientras la presión interior no desciende de un valor aproximado de  $80 \text{ kgf/cm}^2$ . Este valor podría considerarse el valor por el cual se inicia la microfisuración, las juntas empiezan abrirse.

Una segunda fase tiene lugar cuando se inicia el proceso de fisuración. En este caso, los cálculos no se producen de manera tan rápida, puesto que para cada incremento se produce un proceso iterativo debido a la no-linealidad del comportamiento de las juntas. La buena marcha y la correcta convergencia de este proceso iterativo depende de varios factores, incluyendo el tamaño del incremento de carga. Ello ha exigido la subdivisión de los incrementos de carga en incrementos más y más pequeños a medida que las juntas entran en el proceso de fisuración.

Las figuras (figura 40, figura 41 y figura 42) ilustran el proceso de fisuración de la muestra modelada.

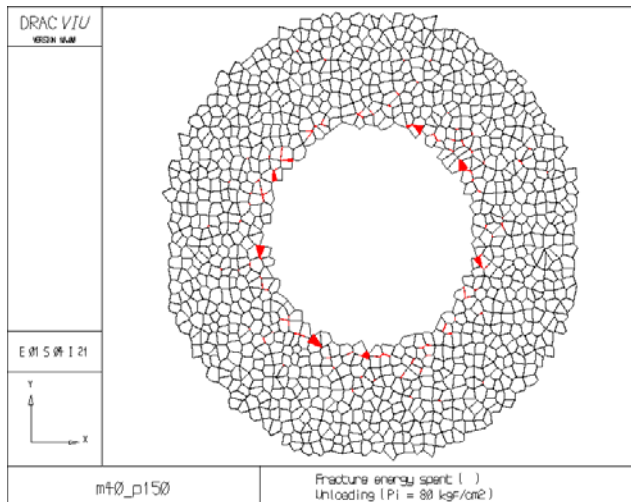


figura 40- Energía de fractura gastada durante el proceso de fisuración para un valor de presión interior de 80 kgf/cm<sup>2</sup>.

La fisuración se localiza en los contactos que forman ángulos cerrados, debido a la localización de tensiones que allí se producen.

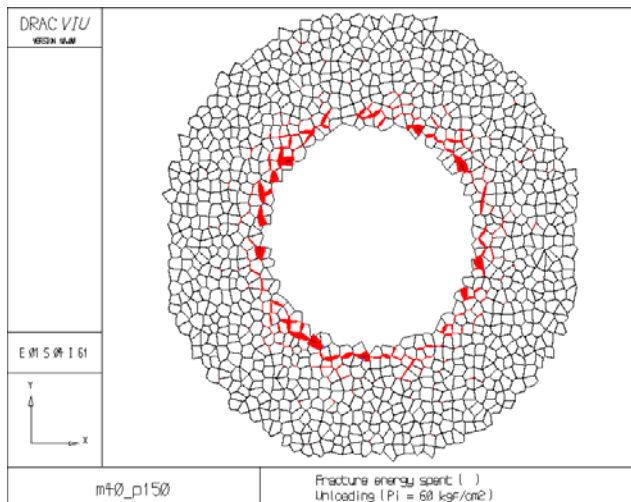


figura 41- Energía de fractura gastada durante el proceso de fisuración para un valor de presión interior de 60 kgf/cm<sup>2</sup>.

Nótese que en este estado la fisuración se ha propagado de manera general alrededor de la corona

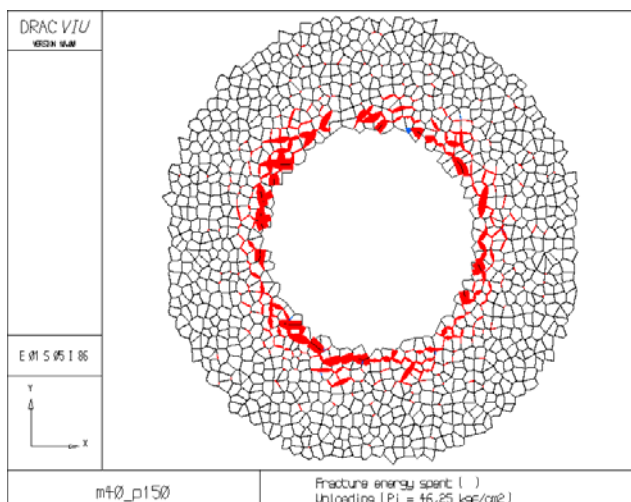


figura 42- Energía de fractura gastada durante el proceso de fisuración para un valor de presión interior de 46,25 kgf/cm<sup>2</sup>.

En este estado, la fisuración es ya generalizada alrededor de la corona, y la rotura de un buen número de juntas se ha producido. Puede también observarse la descarga de alguna junta (azul) debido a la reordenación de tensiones causado por el avanzado estado de fisuración.

#### 4.2.2.b Producción de arena

En el apartado (§4.1.2.b) se definía el criterio para decidir cuando un grano o conjunto de granos pueden considerarse disgregados del medio. De acuerdo con este criterio, no obstante, no ha podido obtenerse las condiciones para la sustracción de granos. En la figura 43 se observa en rojo las juntas que han llegado al estado de rotura última, como puede apreciarse ninguna de las fracturas desvincula granos del conjunto global. No obstante, si se compara con la figura 42 podría asegurarse de la inminencia de la rotura, ya que se puede observar el fuerte daño de algunas zonas, como podría ser el cuadrante superior-izquierdo.

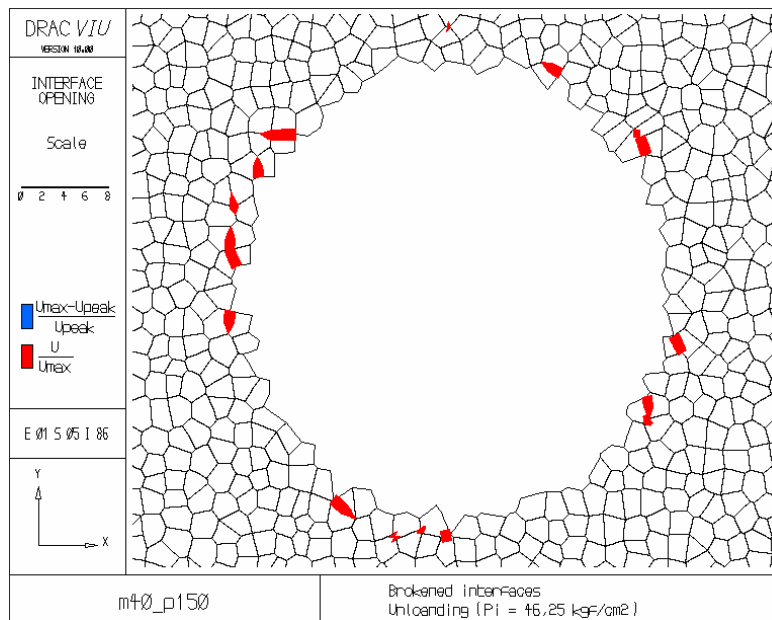


figura 43 – Elementos junta que cumplen el criterio de rotura establecido.

Aunque el criterio de evaluación de granos es teóricamente consistente, se ha observado alguna discrepancia debido a deficiencias en la implementación del método. Concretamente se ha detectado que las juntas fracturadas en modo I (tracción) no son después contabilizadas como agotadas. Esto ocurre ya que son nuevamente evaluadas con el criterio de modo IIa. No obstante este problema no modifica cuantitativamente el número final de juntas, dado que son solamente algunas juntas muy precisas las que se rompen según el modo I.

### 4.3 Estudio del efecto de escala

El objetivo de este caso es poner de manifiesto que mediante el método utilizado puede ser capturado el efecto escala. Este hecho será puesto de evidencia con el estudio del inicio de fractura de tres mallas de igual tamaño de grano pero con diferente radio de perforación.

#### 4.3.1 Modelización

Para el estudio del efecto escala se han considerando, además de la malla del apartado anterior (§ 4.2), otras mallas con diferente radio de perforación. La figura 44 muestra la discretización de las tres mallas utilizadas.

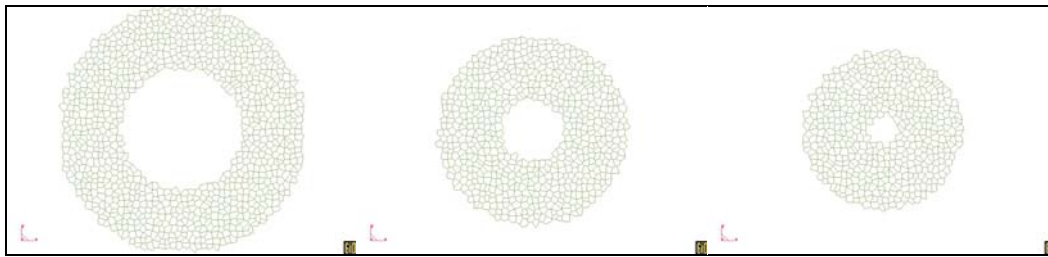


figura 44 - Mallas utilizadas en el análisis del efecto de tamaño. En esta figura se representa solamente el medio discreto

Otras características del modelo geométrico utilizado se muestran en la tabla 4.

tabla 4 - Dimensiones del problema a resolver en el caso de la simulación del efecto escala

Dimensiones generales				
	Pequeña	Mediana	Grande	
Radio de la perforación	0,250	0,50	1,00	cm
Radio de la corona exterior	1,250	1,50	2,00	cm
Dimensiones del costado exterior	20	20	20	cm
Tamaño de grano	1	1	1	mm
Dimensiones de malla				
Número de nodos	10.773	13.818	20.036	(-)
Número de elementos continuos	14.792	18.738	26.896	(-)
Número de elementos junta	2.840	3.716	5.474	(-)

#### 4.3.2 Resultados

Los resultados han puesto de manifiesto la posibilidad de capturar el efecto de escala. Concretamente se ha obtenido que para igual disminución de presión en el interior de la perforación, la fracturación se ordena de mayor a menor proporcionalmente al tamaño de perforación. Este importante resultado puede observarse en el conjunto de figuras (figura 45, figura 46 y figura 47) donde para igual presión interior (46,25 kgf/cm<sup>2</sup>), la fisuración de la malla con perforación de 2 cm es la más severa, siguiendo en importancia la malla con perforación de 1cm y finalmente la malla con 0,5 cm de diámetro.

Otro factor que evidencia el efecto de escala es el inicio de los cálculos con gran número de iteraciones, el cual se puede interpretar como el inicio de la microfisuración general. El valor de la presión interior para el cual se inicia este caso difiere en los tres casos: en la malla grande ( $P_{int\_plasti} = 80 \text{ kgf/cm}^2$ ); la malla mediana ( $P_{int\_plasti} = 52,5 \text{ kgf/cm}^2$ ); y la malla pequeña ( $P_{int\_plasti} = 42,5 \text{ kgf/cm}^2$ ).

*tabla 5 – Presión en el interior de la perforación en el inicio de la fisuración.*

<b>Resultados</b>				
	Grande	Mediana	Pequeña	
Inicio de la microfisuración	80	52,5	42,5	Kgf/cm <sup>2</sup>

A pesar de observar el efecto de tamaño, no ha podido ser observado el modo de rotura diferencial entre la perforación pequeña y la grande. Esto es debido al incipiente estudio de los casos, donde en ninguno de ellos se ha llegado a condiciones de rotura.

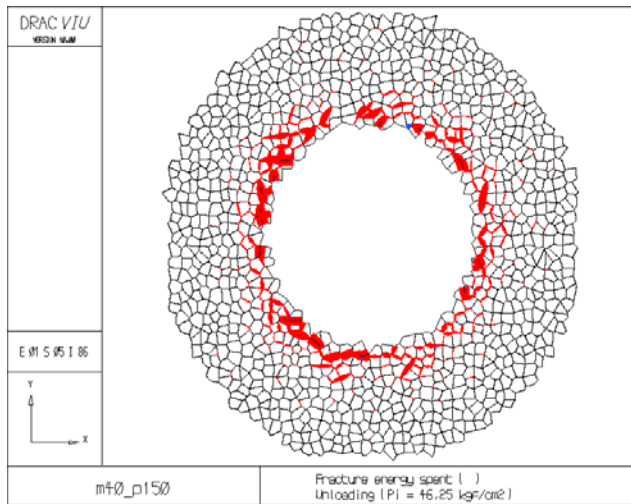


figura 45 - Gráficas de la cantidad de energía gastada en cada fractura para el caso de malla con perforación de 2 cm Ø. El grueso de la línea corresponde a la cantidad de esta utilizada en cada paso.

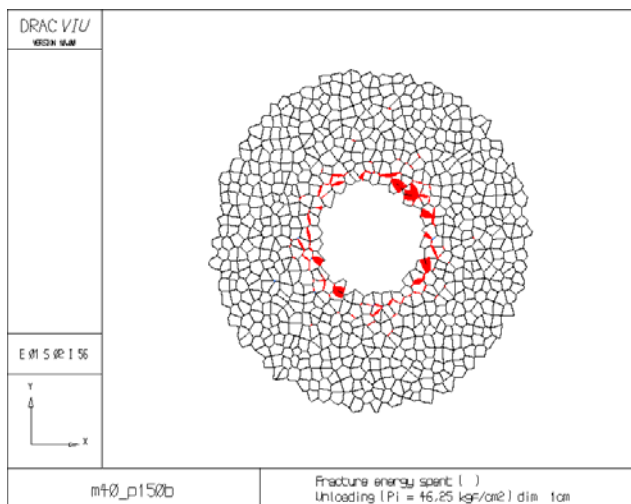


figura 46 - Gráficas de la cantidad de energía gastada en cada fractura para el caso de malla con perforación de 1 cm Ø. El grueso de la línea corresponde a la cantidad de esta utilizada en cada paso.

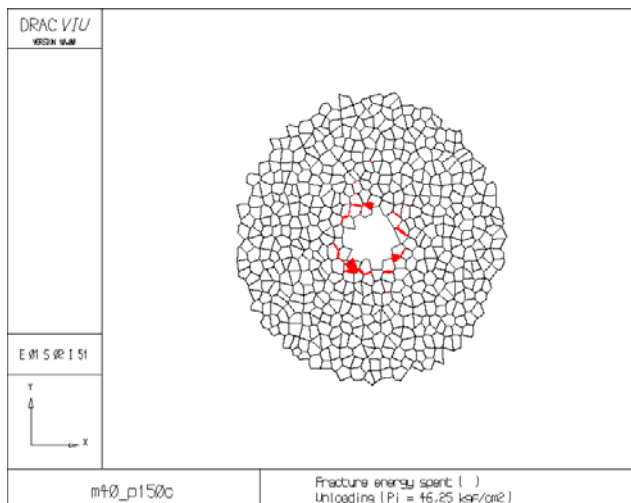


figura 47 - Gráficas de la cantidad de energía gastada en cada fractura para el caso de malla con perforación de 0,5 cm Ø. El grueso de la línea corresponde a la cantidad de esta utilizada en cada paso.

## 4.4 Estudio para un estado no hidrostático de tensiones iniciales.

El objetivo de este caso es el de analizar la viabilidad del método, a partir de un estudio en condiciones no hidrostáticas de tensiones. A diferencia de los casos anteriores, en este ejemplo, la propagación de la fisuración se dará en unas direcciones preferentes, perdiéndose la simetría aproximada alrededor de la perforación que existía en el casos hidrostáticos.

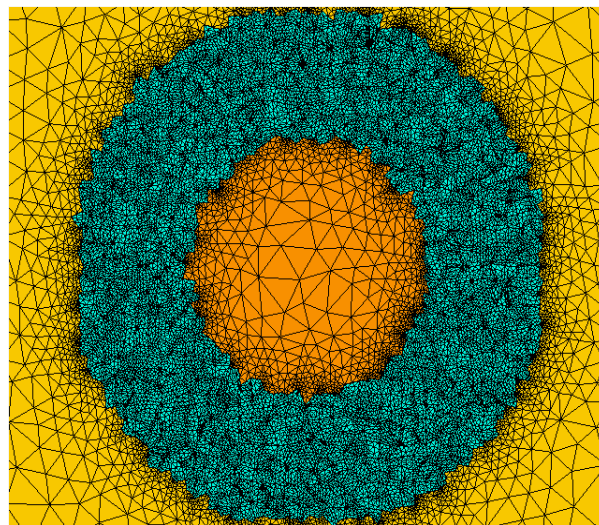
### 4.4.1 Modelización del caso

En este caso las características de la modelización han sido las en la tabla 6.

*tabla 6 - Dimensiones del problema a resolver en el caso de la simulación estado desviatorio de tensiones iniciales.*

Dimensiones generales		
Radio de la perforación	2	cm
Radio de la corona exterior	4	cm
Dimensiones del costado exterior	20	cm
Tamaño de grano	1	mm
Dimensiones de malla		
Número de nodos	21.170	(-)
Número de elementos continuos	28.916	(-)
Número de elementos junta	5.720	(-)

La diferencia más notable respecto los casos anteriores ha sido la necesidad de simular el proceso de excavación. Para ello ha sido necesario la inclusión de un tercer material. Este material que inicialmente ocupa el interior de la perforación (figura 48).



*figura 48 – Detalle de la discretización realizada en el interior de la perforación.*



Sobre esta malla sin hueco se aplican las tensiones verticales y horizontales iniciales sobre los lados correspondientes del perímetro exterior del dominio, garantizando así un estado uniforme.. Seguidamente se ha procedido a la excavación, extrayendo todos los elementos del interior del hueco así como la junta perimetral asociada. Como se ha explicado anteriormente, simultáneamente a la excavación del hueco, se ha aplicado una presión interior en el mismo para simular la presión del fluido.

#### 4.4.2 Resultados

A diferencia de los casos anteriores, donde la fase de excavación se omitía integrándola dentro de la fase de descompresión. En este caso si es necesaria debido que la distribución de tensiones en la corona excavada no es uniforme. Por lo tanto, previo a la etapa de descompresión se ha realizado una etapa de excavación, cosa que ha variado ostensiblemente los resultados obtenidos.

A continuación se detallaran los resultados más importantes de cada paso.

- Compresión

Los resultados obtenidos en la etapa de compresión han sido los esperados: tanto la componente horizontal de la tensión como la horizontal de la deformación, han sido superiores en todo punto que las respectivas componentes verticales.

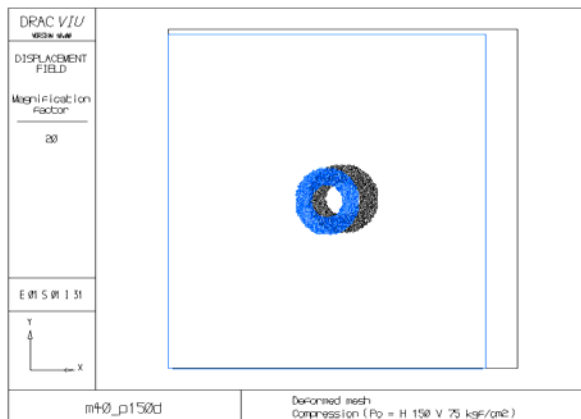


figura 49 - Malla deformada después de la aplicación de la tensión no hidrostática en la etapa de compresión.

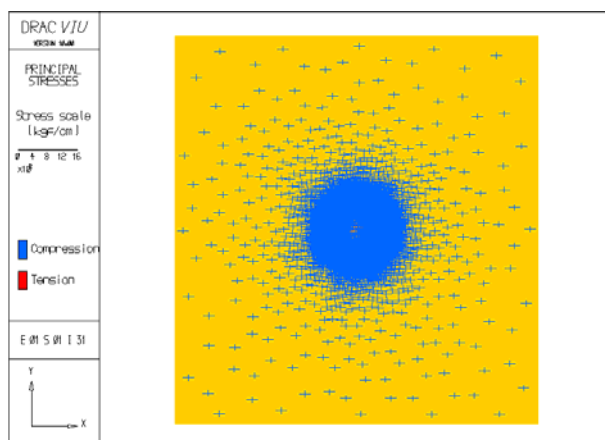


figura 50 -Tensiones principales después de aplicar la etapa de compresión..

En términos de fractura, cabe destacar el inicio muy débil de la fracturación de manera generalizada en todo el dominio discreto. Esta leve fisuración se ha centrado únicamente en las caras paralelas respecto al eje de máxima compresión (horizontal) (figura 51).

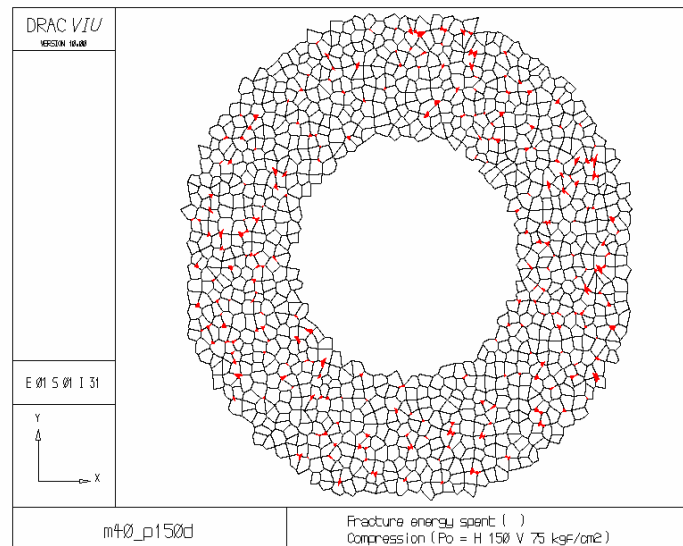


figura 51 – Estado de la fracturación después de aplicar las tensiones iniciales.

- Excavación

En esta etapa, tal y como se ha explicado en §4.1.2.b se han aplicado dos procesos simultáneos. Por un lado, se ha aplicado una disminución de tensiones generado por el proceso de excavación, y por el otro lado una compresión de los elementos de la corona, debido a la tensión de fluido aplicado. El valor final de la tensión en la superficie libre de la perforación ha sido de 50 kgf/cm<sup>2</sup>, valor correspondiente a la presión inicial supuesta del fluido sobre la pared de la perforación.

- Descompresión

La fase de descompresión ha empezado desde el valor de tensión de 50 kgf/cm<sup>2</sup>, correspondiente a la presión del fluido en el interior hasta un valor de 6 kgf/cm<sup>2</sup>. En este caso, la presión en el interior de la corona ha podido reducirse hasta un valor más bajo en comparación con los casos anteriores presentados. Sin embargo hay que destacar que resulta difícil realizar comparaciones, puesto que el procedimiento empleado es cualitativamente diferente.

En la figura 52 podemos observar como los extremos superior e inferior de la perforación son los más dañados, resultan ser las zonas con tensiones desviadoras más elevado (figura 52). Asimismo, este resultado también puede verse en la figura 53, donde las fracturas “activas” (aquellas que no se encuentran en descarga) se encuentran en las mismas zonas.

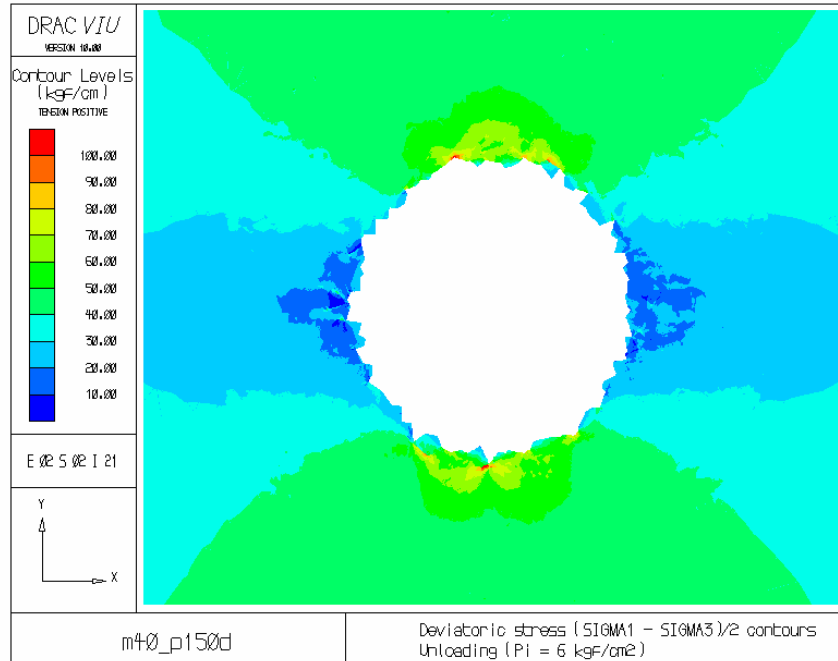


figura 52 – Tensión desviadora después para un valor de presión interior de 6 kgf/cm<sup>2</sup>.

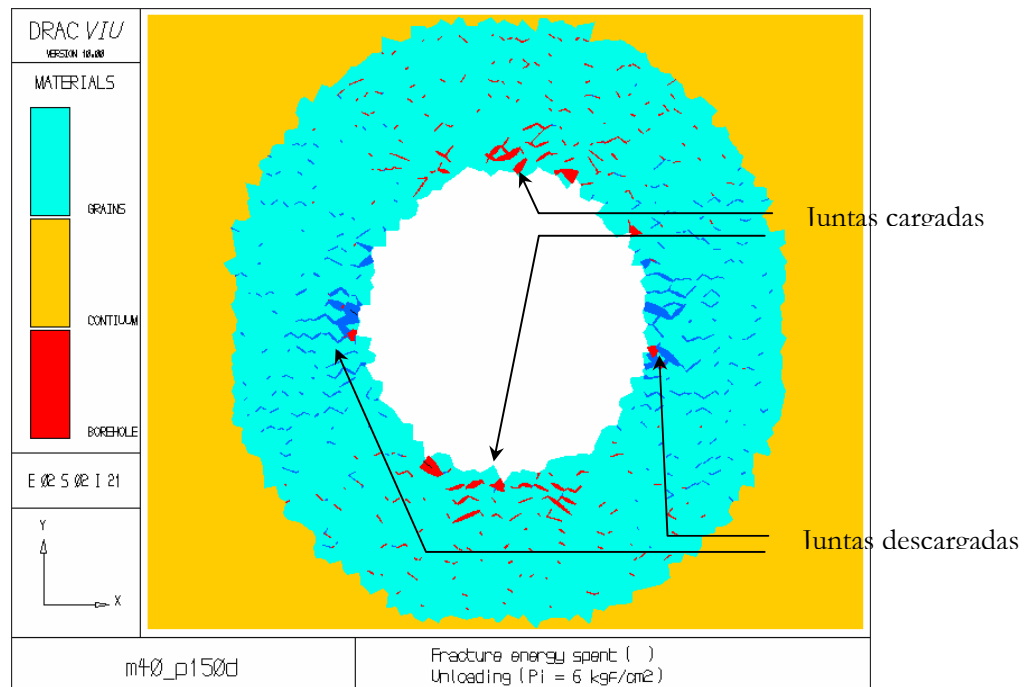


figura 53 – Vista aumentada de la fracturación observada después de aplicar la excavación de los elementos interiores. En rojo las juntas cargadas, y en azul las juntas descargadas.

Por consiguiente, los resultados concuerdan con la experimentación, dado que en los ensayos (§2.1.1.a) se observa que en los casos donde una de las tensiones principales es mayor, la producción máxima de arena se produce en los costados a 90° de la tensión principal mayor.

## 5 Conclusiones

En esta tesina se ha iniciado el estudio del fenómeno de producción de arena en perforaciones petrolíferas “rock sanding production”. Este efecto producido por cambios de presión en el medio ha podido ser modelizado mediante el uso del método de los elementos finitos utilizando elementos junta.

Aunque el estudio haya sido una primera aproximación al problema real, ya que se han utilizado simplificaciones importantes (cálculo en tensiones totales, etc...), se ha podido observar que el comportamiento obtenido de simulaciones se aproxima de manera razonable a la realidad conocido de este fenómeno. Este resultado es debido a la consistencia del método con elementos junta, el cual es capaz de describir el mecanismo de rotura de una forma realista. Este hecho abre las puertas a posteriores estudios más detallados del problema.

De la producción de arena *sensu estricto*, no ha sido posible obtener una curva completa de producción (volumen de arena vs. presión aplicada), debido a las dificultades numéricas encontradas y del tiempo y capacidad de ordenador necesario, que excedían ampliamente las posibilidades de una tesina de fin de carrera. Cabe destacar que el problema ha servido para evaluar las capacidades numéricas tanto del código, DRAC, cómo de los recursos informáticos, dado que hasta el momento no se había calculado un problema de igual tamaño.

Uno de los puntos más destacables del presente trabajo ha sido el poder observar el efecto de escala. Este fenómeno, que no se obtiene utilizando el método de elementos finitos clásicos aplicado a una escala macroscópica, ha podido ser evaluado mediante el estudio paralelo del inicio de fractura de mallas con diferente diámetro de perforación.. El resultado encontrado ha evidenciado que las mallas con perforaciones más pequeñas resultan menos dañadas, a igual tensión de fluido, que las más grandes.

No obstante, otros resultados experimentales como la rotura por tracción en perforaciones pequeñas no ha sido observado. Este hecho podría ser debido a deficiencias en la caracterización del material, o bien a errores debidos al tamaño de grano, un orden de magnitud superior al real.

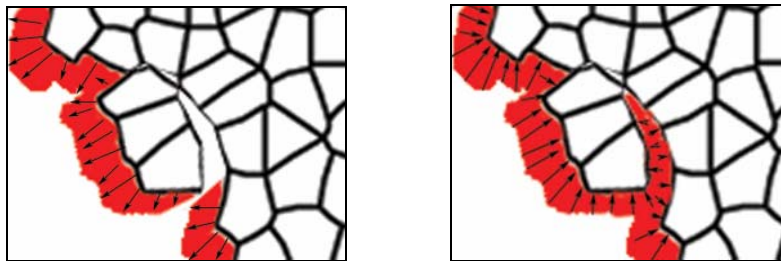
## 5.1 Problemas y limitaciones actuales

El análisis realizado cuenta con un cierto número de limitaciones las cuales han sido presentada en § 4.1.1. Sin embargo de ellas destacaremos, por su importancia las siguientes.

### 5.1.1 Análisis en tensiones totales

Una de las limitaciones, es el cálculo mediante presiones totales. En la presente simulación la disminución de presión de la perforación ha sido realizada mediante la aplicación de una carga distribuida normal de tracción a lo largo del contorno interior. Este hecho es alejado de la realidad, puesto que en esta modelización, las caras de los granos no resultan cargadas, hasta que no pertenecen al contorno de la perforación.

En realidad, el fenómeno que ocurre es que la presión actúa en todos los contornos de los granos. Entonces, cuando se aplica una extracción de fluido (drawdown), la presión de fluido va descendiendo paulatinamente desde el centro hacia el interior. Luego, debido al descenso de presión de fluido, las tensiones efectivas entre granos aumentan, lo que puede conllevar la rotura del grano.



*figura 54 - A la izquierda un análisis en tensiones totales, donde el descenso de presión se aplica como un incremento de tracción en el contorno de la perforación. A la derecha se encuentra el análisis en efectivas, donde el descenso de presión en la perforación es aplicado como un descenso en la compresión normal aplicada.*

### 5.1.2 Tamaño de grano

La segunda limitación importante es que el tamaño de grano utilizado en la simulación es diez veces superior al real. El tamaño utilizado es de 1 mm, en cambio el real, en las muestras facilitadas por *Schlumberger Cambridge Research* [21], es de 0,2 - 0,5 mm.

Tal y como se ha explicado en §4.1.1, la razón por la que se ha fijado el tamaño de 1 mm ha sido por limitaciones de número de elementos y tiempo de ordenador. En este sentido, podría mejorarse diversos aspectos, todos ellos encaminados a una mejor resolución.

En primer lugar sería conveniente una evaluación más precisa del valor aceptable para la convergencia sería requerida. Con este estudio se evitarían iteraciones innecesarias, donde el tiempo de cálculo añadido no justifica la mejora de la solución.

En segundo lugar, sería también conveniente la paralelización del código, empleando algoritmos de resolución de sistemas adaptados a la utilización de varios procesadores. Este hecho reduciría notablemente el tiempo de cálculo, y por lo tanto haría viable la reducción del tamaño de grano.

## 5.2 Perspectivas de trabajo futuro

Dentro de las posibles propuestas de continuidad del estudio iniciado se encuentran las soluciones propuestas en § 5.1, que pueden estar complementadas con el estudio de otros casos.

De entrada sería interesante automatizar el proceso de extracción de los granos, dado que actualmente obedece a un criterio arbitrario aplicado de forma manual. Debería crearse un algoritmo que discriminase la pertenencia o no de un grano o conjunto de granos en el medio.

En lo que confiere al cálculo propiamente dicho, una vía de estudio podría ser la continuación del estudio de producción de arena. Éste consistiría en la disminución la presión aplicada en el interior de la perforación, tal y como se ha procedido hasta el momento.

Otra vía de trabajo es el estudio del efecto de tamaño, ya empezado en el trabajo actual. Este efecto también podría estudiarse variando el tamaño de grano a igual tamaño de perforación. Mediante este ejemplo podría constatarse el importante efecto de la microestructura sobre la estabilidad de la pared de la perforación. Esta importancia también podría ser puesta de manifiesto utilizando granulometrías con distribución de tamaños, e incluso con anisotropía geométrica (granos alargados).

Finalmente, una vez mejorados los procedimientos de cálculo sería conveniente calibrar los resultados con los resultados de algún problema real, ya sea ensayos in-situ o de laboratorio.

## 6 Referencias

- [1] Papamichos, E., et al. “Sand production prediction and control”. [www.iku.sintef.no/Formfys/activities/sandproduction.htm](http://www.iku.sintef.no/Formfys/activities/sandproduction.htm). SINTEF, 2002.
- [2] Roa, O., López, C.M., Pisoni, P., Pini, M., Carol, I. and Contro, R. “Microstructural analysis of cancellous bone taking into account geometrically non-linear effects”. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering -ECCOMAS 2000-*, editores Oñate, E. et al. CIMNE (Barcelona). ISBN 84-89925-70-4 (in CD-ROM), 2000.
- [3] Ribó, R., et al. “GID 7.0”. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria – CIMNE, 2002. <http://gid.cimne.upc.es/>
- [4] Carol, I. and Prat, P. “DRAC, finite element system. Users’ manual”. Dept of Geotechnical Engineering, ETSECCPB-UPC. 2002.
- [5] Cook, J.M., Bradford, I.D. and Plumb, R.A. “A study of the physical mechanisms of sanding and application to sand production prediction”. Presentado en *European Petroleum Conference* en Londres, Inglaterra, octubre 1994. *SPE paper* no. 28852, 1994.
- [6] Nicholson, E.D., Goldsmith, G. and Cook, J.M. “Direct observation and modeling of sand production processes in weak sandstone”. Presentado en *SPE/ISRM Eurock '98* en Trondheim, Noruega, 8-10 julio 1998. *SPE paper* no. 47328, 1998.
- [7] Papanastasiou, P., Cook, J. and Durban, D. “Modes of fracture initiation in thick-wall cylinder experimnts”. *Rock Mech. for Industry*, editores Amadei, Kranz, Scott and Smeallie, p. 333-340. Balkema (Rotterdam). ISBN 90-5809-052-3, 1999.
- [8] Papanastasiou, P., Nicholson, E.D., Goldsmith, G. and Cook, J. “Sanding prediction: Experimental results and numerical modeling”. *Poromechanics*, editores Thimus et al., p 457-462. Balkema (Rotterdam). ISBN 90-5809-003-5, 1999.

- [9] Tronvoll, J, Skjærstein, A. and Papamichos, E. "Sand production: mechanical failure or hydrodynamic erosion?". *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol 34:3-4, Paper no. 291. Elsevier Science Ltd. 1997.
- [10] Papamichos, E., Vardoulakis, I., Tronvoll, J. and Skjaerstein, A. "Volumetric sand production model and experiment". *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol: 25, p. 789-808. John Wiley & Sons, Ltd. 2001.
- [11] Papamichos, E. "Sand production and well productivity in conventional reservoirs". *Rock Mech. for Industry*, editores Amadei, Kranz, Scott and Smeallie, p. 209-216. Balkema (Rotterdam). ISBN 90-5809-052-3, 1999.
- [12] Van den Hoek, P.J., Hertogh, G.M.M., Kooijman, A.P., de Bree, Ph., Kenter, C.J. and Papamichos, E. "A new concept of sand production prediction: theory and laboratory experiments". *SPE drill and completion*, Vol. 15 (4), p. 261-273, 2000.
- [13] Wang, Y. "A coupled reservoir-geomechanics model and applications to well bore stability and sand prediction". Presentado en *2001 SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium* en Margarita, Venezuela, March 2001. *SPE paper* no. 69718, 2001.
- [14] Vardoulakis, I., Stavropoulou, M. and Papanastasiou, P. "Hydromechanical aspects of sand production problem". *Transport in Porous Media*, Vol. 22, p. 225-244, 1996.
- [15] Stavropoulou, M., Papanastasiou, P. and Vardoulakis, I. "Coupled well bore erosion and stability analysis". *Int. J. for Numer. and Anal. Meth. Geomech*, Vol. 22, p.749-769, John Wiley & Sons, Ltd. 1998.
- [16] Wan, R.G., and Wang, J. "A coupled erosion-stress deformation model for sand production using streamline upwind finite elements". *Num. Models in Geomech*, editores Pande & Pietruszczak, p.301-308. Swets & Zeitlinger (Lisse). ISBN 90-5809-359-X, 2002.
- [17] Jensen, R.P., Preece, D.S., Cook, B.K. and Williams, J.R. "Modeling sand production with Darcy-Flow coupled with discrete elements". *Comp. Meth. And Adv. In Geomech*, editores Desai et al., p. 819-822. Balkema (Rotterdam). ISBN 90-5809-183-X, 2001.
- [18] Jensen, R.P., Preece, D.S., Perkins, E.D. and Williams, J.R. "Sand production modeling using superquadratic discrete elements and coupling of fluid flow and particle motion". *Rock Mech. for Industry*, editores Amadei, Kranz, Scott and Smeallie, p. 161-167. Balkema (Rotterdam). ISBN 90-5809-052-3, 1999.



- [19] Verdel, T. “Présentation de la méthode des éléments distincts”. <http://www.mines.u-nancy.fr/laego/Roches/roches.html>. LAEGO, 1999.
- [20] López, C. M. “Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones.”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya, 1999.
- [21] Papanastasiou, P. -Colección de microfotografías de las texturas de las rocas ensayadas en el estudio de producción de arena-. Documento interno de *Schlumberger Cambridge Research*, 2001.

## 7 Bibliografía complementaria

[22] Vardoulakis, I. and Sulem, J. “Bifurcation analysis in geomechanics”. Blachie Academic & Professional, 1995.

[23] Jun S. Lee, Choon-Suk Bang and Il-Yoon Choi. “Analysis of borehole instability due to grouting pressure”. *Rock Mech. for Industry*, editores Amadei, Kranz, Scott and Smeallie, p. 217-223. Balkema (Rotterdam). ISBN 90-5809-052-3, 1999.

[24] Han, G. “Sand production prediction ”. Presentación oral, 2000. [http://www.eng.uwaterloo.ca/~ghan/Gang\\_Han\\_sand\\_production\\_presentation\\_in\\_Schlumberger\\_Nov\\_2000.ppt](http://www.eng.uwaterloo.ca/~ghan/Gang_Han_sand_production_presentation_in_Schlumberger_Nov_2000.ppt)

[25] López, C.M., Carol, I. and Aguado, A. “Microstructural analysis of concrete fracture using interface elements”. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering -ECCOMAS 2000-*, editores Oñate, E. et al. CIMNE (Barcelona). ISBN 84-89925-70-4 (in CD-ROM), 2000.

# 1 Anexos

# 1.1 Diagrama de flujo del proceso de elaboración de la malla

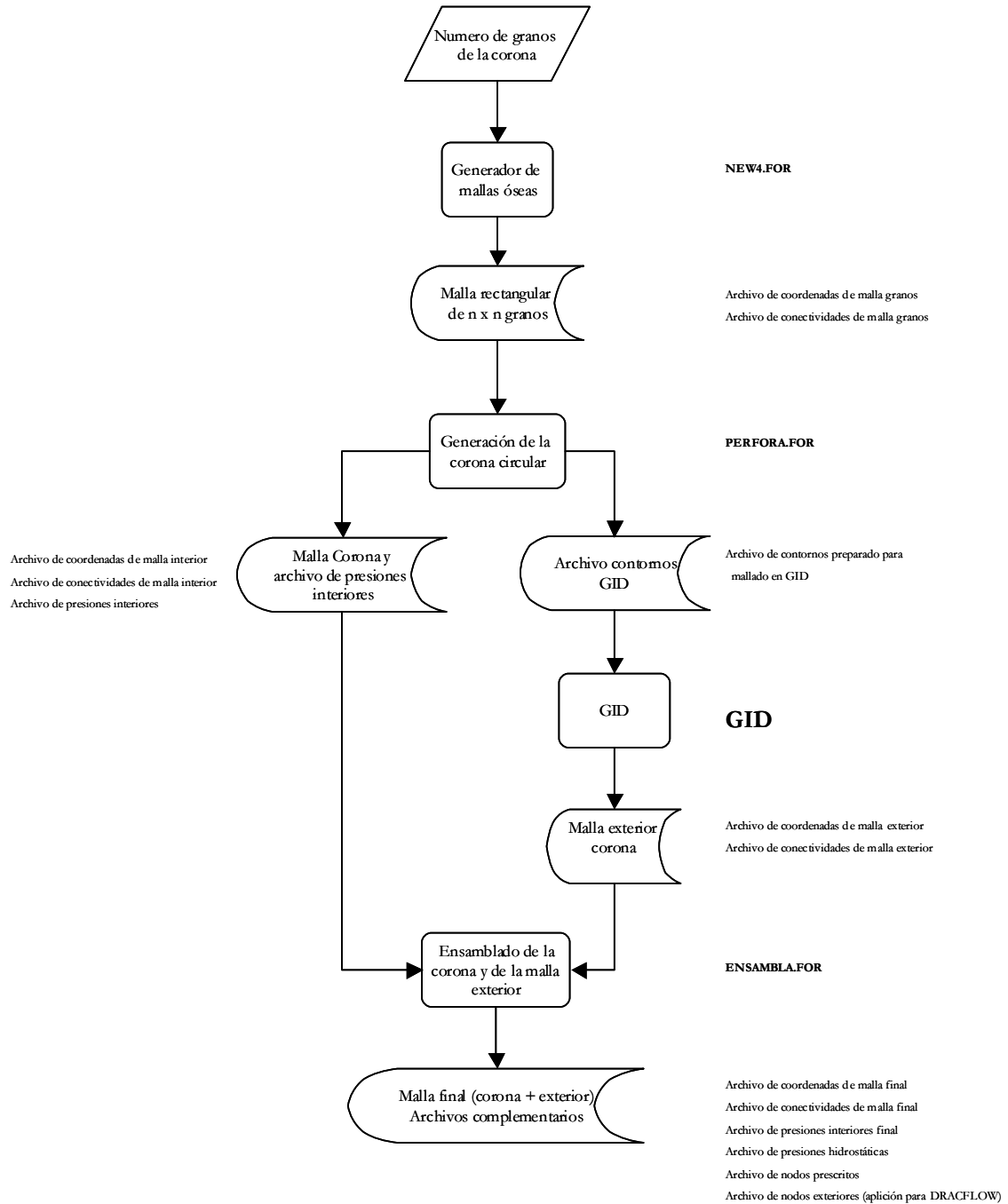


figura 55 - Diagrama de flujo del proceso de elaboración de la malla.

## 1.2 Técnicas de perforación

La técnica utilizada para la generación de pequeñas perforaciones laterales se basa en la utilización de “cañones” (*perforating gun*). Este tipo de utensilio, consta de un tubo ranurado con un cordón detonante en su interior (figura 56).

El funcionamiento es simple, se introduce dentro del sondeo y se hace detonar. Luego, la onda expansiva de la explosión pasa a través de los orificios y crea las pequeñas perforaciones laterales. En función de la carga aplicada y de la geometría de la posición de los orificios, las características y el número de perforaciones variará.

En las figuras siguientes (figura 56 y figura 57) se puede observar un esquema del artillugio y una fotografía de una detonación respectivamente.

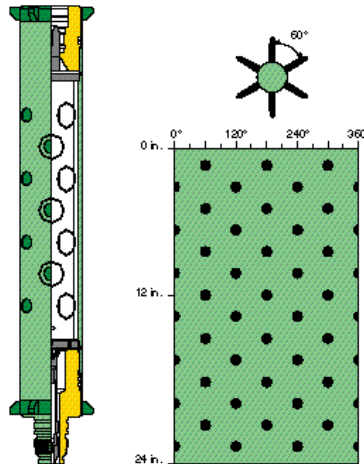
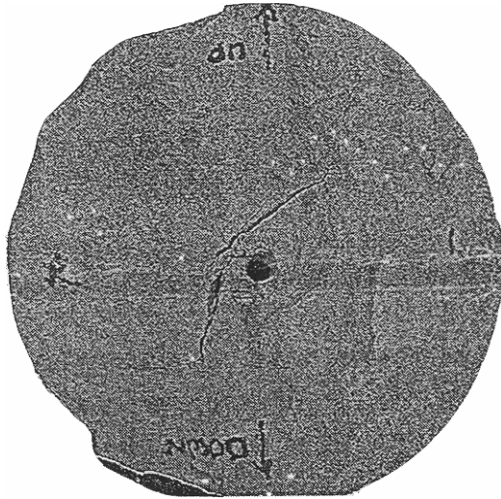


figura 56 – Cañón de perforación. Schlumberger, 2002.

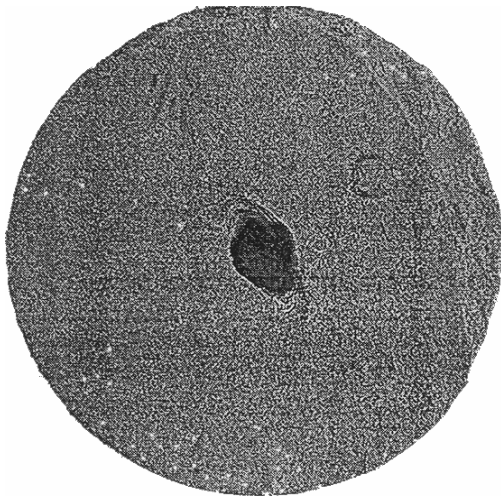


figura 57 – Detonación de un cañón de perforación. Schlumberger, 2002.

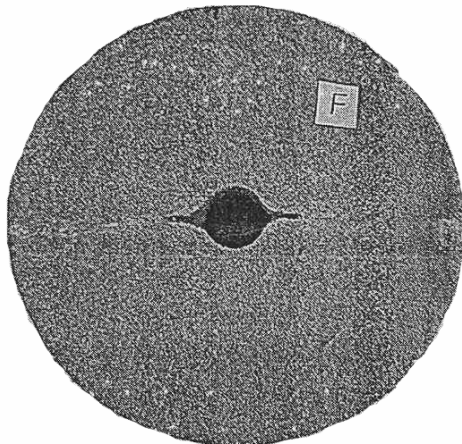
### 1.3 Fotografías de secciones transversales de ensayos



*figura 58 – Fotografía de la muestra Jurassic 3 (Nicholson et al., 1998 [6])*



*figura 59 – Fotografía de la muestra Red Wildmoor (Nicholson et al., 1998 [6])*



*figura 60 – Fotografía de la muestra Saltwash South (Nicholson et al., 1998 [6])*

## 1.4 Glosario específico

	<b>Definición</b>
<i>Borehole</i>	Sondeo
<i>Cased borehole</i>	Sondeo revestido
<i>Drawdown</i>	Técnica de extracción del petróleo que consiste en la disminución de la presión del fluido en el interior del sondeo. En perforaciones profundas, este fenómeno se controla mediante la presión de los lodos de excavación, proporcional a la densidad del fluido.
<i>Drilling</i>	Perforar. Realizar el sondeo.
<i>Gravel pack</i>	Filtro de arena, utilizado para minimizar el inicio y los efectos de la producción de arena. Éste consiste en la colocación de una granulometría intermedia entre la roca y la pared del sondeo.
<i>Log</i>	Testificación de los sondeos, que en el campo de la ingeniería del petróleo es de tipo geofísico. En los <i>logs</i> aparece la variación de las diferentes propiedades en función de la profundidad.
<i>Perforation guns</i>	Técnica usada en producción de petróleo para mejorar el rendimiento del pozo. Esta técnica consiste en la realización mediante explosivos de pequeñas perforaciones laterales, aumentando así el radio efectivo del pozo. Técnica usada en materiales granulares (§1.2)
<i>Sand production</i> <i>Sanding</i> <i>Rock sanding</i>	Nombre con el cual se designa la producción de arena.
<i>Well</i>	Pozo.