Capítulo 3

3 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO A GRANDES DESLIZAMIENTOS

3.1 Introducción al procedimiento

El empleo de la técnica de análisis numérico conocida como *El Método de los Elementos Finitos* (MEF) se ha ido extendiendo en las últimas décadas al mismo ritmo que se imponía el uso de los ordenadores, gracias a su creciente capacidad y velocidad de cálculo.

Dicha técnica nos permite resolver problemas comunes en la ingeniería como son los problemas mecánicos, térmicos, etc. Éstos acarrean la integración de complejos sistemas de ecuaciones en derivadas parciales (EDP's), los cuales hasta entonces eran inabordables, salvo en casos muy simplificados y, en la mayoría de casos, poco representativos de la realidad.

A grandes rasgos, el MEF consigue convertir dicho sistema de EDP's en otro sistema de ecuaciones algebraicas lineales (o no), cuya resolución en ordenadores, o incluso a mano si son pocas, es relativamente sencilla. Como era de esperar, este cambio conlleva un error, el cual deberemos siempre asumir.

El procedimiento a llevar a cabo consiste, inicialmente, en sustituir un dominio formado por un número infinito de puntos, por un número finito que el usuario considere suficiente bajo sus criterios. A este proceso se le denomina discretización, que da lugar a una malla formada por nodos y elementos.

Sobre dicho dominio, existen unas ecuaciones de gobierno que describen el comportamiento del fenómeno físico en cuestión (equilibrio mecánico, transmisión de calor, flujo de agua, etc.). Tal y

como ocurre en la resolución analítica, para que exista solución y ésta sea única, debemos imponer unas condiciones de contorno.

La función incógnita (desplazamientos, temperatura, altura piezométrica, etc.) puede ser interpolada mediante los puntos obtenidos en la discretización en los cuales se apoyan unas funciones elementales, denominadas funciones de forma. Dichas funciones pueden ser lineales, parabólicas, etc.

La forma débil o variacional de las ecuaciones de gobierno nos permite obtener el antes citado sistema de ecuaciones que deberemos resolver una vez impuestas las condiciones de contorno correspondientes, lo que nos permitirá invertir la matriz del sistema.

Todo esto se realiza en un primer paso en cada elemento para posteriormente pasar a describir el comportamiento global gracias a un proceso denominado ensamblado.

En los problemas mecánicos, entre ellos el problema que abordamos en la presente Tesina, la incógnita fundamental son los desplazamientos. La forma débil de las ecuaciones de gobierno (la ecuación de equilibrio interno) es el denominado Principio de los Trabajos Virtuales que además de involucrar a las deformaciones (fácilmente deducibles de los desplazamientos), depende también de las tensiones. He aquí donde aparece la ecuación constitutiva del medio en el que nos encontramos. Dicha ecuación relaciona de manera lineal o no, las tensiones con las deformaciones. Así, una vez aplicada dicha ley, estamos en condiciones de formular el problema exclusivamente en términos de los desplazamientos. Posteriormente, a partir de los desplazamientos, podemos obtener las deformaciones y las tensiones en el medio.

3.2 Particularidades de los problemas geotécnicos

Los grandes deslizamientos son un caso más dentro de toda la gama de problemas a los que se enfrenta la Mecánica de Rocas o la Geotecnia.

Tradicionalmente, el MEF ha sido utilizado dentro del ámbito de la Ingeniería Civil para el Cálculo de Estructuras, ya que sus características permiten aplicar dicho método con gran facilidad. No ha sido hasta los últimos años que el empleo de esta metodología se ha extendido a otros campos de la Ingeniería, entre los cuales se encuentra la Mecánica de Rocas, y la Geotecnia en general.

Las razones por la cuales el uso del MEF ha tardado más en generalizarse en la Geotecnia son varias, entre las cuales hemos destacado las que se presentan a continuación.

Los materiales que se emplean en la Geotecnia, al contrario que en el Cálculo de Estructuras donde fundamentalmente se trabaja con acero y hormigón, son de origen natural y por tanto muy heterogéneos. En un macizo rocoso los bloques rígidos de roca suelen estar rodeados por discontinuidades de propiedades muy difíciles de estimar. Además, su comportamiento es de compleja comprensión y por tanto no resulta sencillo establecer leyes constitutivas válidas en un amplio rango de casos. Así, la teoría de la Elasticidad Lineal, que como sabemos establece proporcionalidad directa entre las tensiones y las deformaciones con constante de proporcionalidad denominada módulo de elasticidad, constituye tan sólo una aproximación grosera al comportamiento real del medio a analizar.

Por otro lado, las condiciones geométricas de los dominios de cálculo no son simples figuras geométricas como pueden ser las vigas o los forjados, sino que se deben adaptar a la realidad topográfica y geológica de cada lugar.

Aunque en la presente Tesina no se ha tenido en cuenta su efecto, en muchos problemas geotécnicos, tanto en rocas como en suelos, el agua tiene un papel fundamental en los mecanismos que desencadenan los comportamientos observados. Esto obliga a introducir una ecuación de gobierno más, lo que nos lleva a un problema acoplado entre la deformación y el flujo que depende del tiempo, de resolución mucho más difícil, además de tener que tratar con tensiones efectivas y no totales.

Por otro lado, los problemas geotécnicos en general requieren considerar unas tensiones iniciales que actúan sobre el dominio de cálculo. Estas tensiones son de difícil determinación ya que son fruto de los distintos procesos de glaciación, erosión, tectónica, etc. que se han ido produciendo a lo largo de las distintas épocas geológicas.

Como consecuencia de los procesos erosivos, la excavación es otra característica fundamental de la Geotecnia. Tal y como hemos mencionado en el párrafo anterior, excavar (pero también erosionar) implica modificar la forma del dominio sobre el cual aplicamos las ecuaciones que queremos resolver. Pero el proceso inverso, la construcción, también es muy importante, ya que representa la aparición de un glaciar o bien modeliza la construcción de una presa por capas.

Finalmente, la teoría y experiencia acumuladas a lo largo del tiempo, demuestran que la captura de los fenómenos mecánicos de

interés con fidelidad requiere una malla más tupida con el consiguiente aumento de la dimensión del sistema de ecuaciones a resolver. Esto ligado a que los deslizamientos son de dimensiones enormes, que involucran incluso millones de m^3 de tierras, explica las descomunales dimensiones de los problemas a resolver, que requieren la utilización de ordenadores de gran capacidad tanto de cálculo como de almacenamiento.

Por todos estos motivos, podemos afirmar que el uso generalizado del Método de los Elementos Finitos en Geotecnia es muy reciente lo que explica la poca información disponible en la literatura.

3.3 El programa utilizado: DRAC

El paquete informático DRAC [3] es un potente sistema de análisis basado en un programa de elementos finitos especialmente diseñado para la Mecánica de Rocas y otros problemas geotécnicos. Satisface las particularidades de las aplicaciones geotécnicas descritas en el apartado anterior, en cuanto a tipos de condiciones de contorno, diferentes materiales, etc. A su vez, permite resolver problemas de dos y tres dimensiones, al igual que enfrentarse a problemas no lineales y dependientes del tiempo, cuya resolución requiere procedimientos iterativos. Incluye la posibilidad de introducir elementos junta y lineales (barras), además de los clásicos elementos de medio continuo.

La arquitectura del programa permite añadir módulos auxiliares que completan el paquete. Dentro de todos estos módulos destacamos DRACVIU que permite realizar las tareas de post-proceso, es decir, la visualización gráfica de los resultados obtenidos.

3.3.1 Modelo constitutivo de las juntas

El modelo constitutivo empleado para las juntas, responde a un modelo simple pero general de rotura normal y tangencial recientemente desarrollado en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC. A continuación presentamos una breve descripción del mismo, donde junta, discontinuidad e interfase se emplean indistintamente.

La orientación de una junta puede ser caracterizada a través de un vector unitario ***n*** normal al plano medio de la interfase. Las dos variables mecánicas fundamentales de una discontinuidad son las

tensiones en el plano de rotura y el correspondiente desplazamiento relativo entre las dos caras de la junta, tanto en términos de apertura como de deslizamiento. Ambas variables tienen dos componentes, una normal y otra tangencial a dicho plano medio. Así, denominamos a las componentes normales σ_N y $\boldsymbol{u}_N^{cr}$ cuyos módulos son σ_N y u_N^{cr} y tienen la misma dirección que $\boldsymbol{n}$, mientras que las componentes tangenciales las definimos como σ_T y $\boldsymbol{u}_T^{cr}$, con módulos σ_T y u_T^{cr} y direcciones $\boldsymbol{t}_\sigma$ y $\boldsymbol{t}_u$, no necesariamente coincidentes, pero sí ortogonales a $\boldsymbol{n}$.

En dos dimensiones, que son las dimensiones del problema que analizamos en la presente Tesina, se pueden definir los vectores normales a $\boldsymbol{n}$ de forma única de manera que $\boldsymbol{t}_\sigma = \boldsymbol{t}_u = \boldsymbol{t}$. En consecuencia, las componentes normales y tangenciales de las tensiones y de los desplazamientos relativos se pueden caracterizar exclusivamente por sus módulos, incluido el signo, que expresará compresión o tracción en el caso de las tensiones normales o apertura o clausura de la junta en el caso de desplazamientos relativos normales.

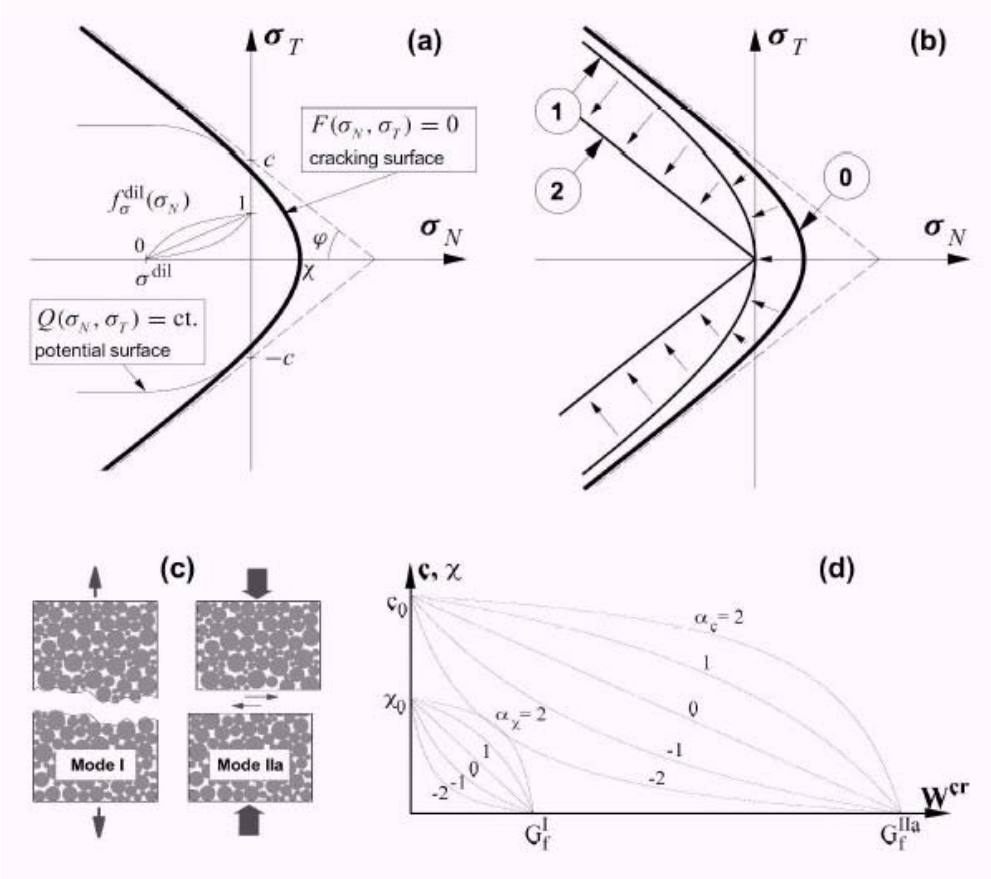

Figura 3-1: Superficie de rotura y su evolución

Suponemos que una discontinuidad llega a rotura en el plano de normal $\boldsymbol{n}$, cuando las tensiones en el espacio σ_N - σ_T alcanzan la

superficie, denominada superficie de rotura, definida por la función $F(\sigma_N , \sigma_T)=0$. La expresión de dicha función, que ha sido representada de forma simbólica en la Figura 3-1 (a), donde los valores positivos corresponden a tracciones. En el paquete informático DRAC, se ha considerado una relación hiperbólica entre dichas variables, tal y como sigue:

$$F = \sigma_T^2 - \left[c - \sigma_N \tan\varphi\right]^2 + \left[c - \chi \tan\varphi\right]^2$$

Ecuación 3-1

donde *tan* φ, *c* y χ son parámetros correspondientes al ángulo de fricción, la cohesión y la resistencia a tracción uniaxial, respectivamente. En la Figura 3-1 (a), se pueden distinguir dos situaciones límite para el inicio de la rotura de la junta. La primera, denominada Modo I, se origina cuando la interfase está sometida exclusivamente a tracción pura y no recibe ninguna tensión tangencial, es decir, que se alcanza la superficie de rotura a lo largo del eje horizontal. El segundo tipo de rotura denominado Modo II asintótico o, abreviadamente, Modo IIa, aparece cuando se alcanza asintóticamente la superficie de rotura, es decir, cuando ésta se aproxima al criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Así, podemos ver que la hipérbola proporciona una transición suave entre estos dos tipo de estados límite.

A medida que la rotura progresa, las tensiones decrecen y la superficie de rotura se reduce de manera que el punto tensional actual permanece siempre sobre dicha superficie. La configuración inicial de la superficie de rotura está representada por la curva etiquetada con "0" en la Figura 3-1 (d), mientras que su forma final depende en el modo específico de rotura.

Bajo estado puro de tracción (Modo I), la rotura sigue normalmente las interfases más débiles entre las partículas y la matriz endurecida (Figura 3-1 (b)). Una vez la grieta está completamente formada, la única condición cinemática existente dicta que ambas caras de la junta rota pueden separarse la una de la otra pero salvando la considerable rugosidad presente sobre las mismas. En el presente modo de rotura, este estado corresponde a otra hipérbola que pasa por el origen de coordenadas (curva "1" en la Figura 3-1 (d)). En cambio, el Modo IIa de rotura sucederá sólo en el caso ideal de que exista desplazamiento relativo tangencial no nulo, pero no se considere ningún tipo de dilatancia. El único camino de rotura cinemáticamente compatible con ese estado de deformación sería la formación de una línea recta de rotura atravesando indistintamente partículas y matriz en la microestructura (Figura 3-1 (b)), cuya superficie correspondiente está definida por un par de

líneas rectas representando el comportamiento puramente friccional (curva "2" en la Figura 3-1 (d)).

La evolución de la superficie de rotura para ambos modos se considera como un proceso sencillo, en el que *tan* φ permanece constante y la evolución de *c* y χ está controlada por un solo parámetro. Dicho parámetro coincide con el trabajo consumido durante el proceso de formación de la rotura, W^{cr}, definido como sigue:

$$dW^{cr} = \sigma_N du_N^{cr} + \overrightarrow{\sigma_T}\,\overrightarrow{du_T^{cr}}$$

Ecuación 3-2: si tracción ($\sigma_N > 0$)

$$dW^{cr} = \overrightarrow{\sigma_T}\,\overrightarrow{du_T^{cr}}\left[1 - \left|\frac{\sigma_N \tan\varphi}{\sigma_T}\right|\right]$$

Ecuación 3-3: si compresión ($\sigma_N > 0$)

Estas dos expresiones implican que, bajo tracción, todo el trabajo disipado en la fractura corresponde al proceso de rotura, mientras que en compresión, la única contribución en dicho trabajo viene del trabajo tangencial una vez descontada la fricción básica.

Usando una magnitud, que cuantifique la energía, como la variable que controle la evolución de la superficie de rotura (variable de endurecimiento o reblandecimiento) ofrece la ventaja, frente a otras variables basadas en la deformación más estándares en Plasticidad, de permitir una interpretación natural de las leyes de evolución a nivel de la Mecánica de Fractura, además de realizar un uso más sencillo y efectivo de la energía de fractura como parámetro del modelo. A medida que W^{cr} aumenta durante el proceso de rotura, se supone que los parámetros *c* y χ disminuyen desde unos valores iniciales c_0 y χ_0 a cero cuando $W^{cr} = G^I_f$ y $W^{cr} = G^{IIa}_f$, respectivamente (ver Figura 3-1 (c)), donde G^I_f y G^{IIa}_f son las energías de rotura en los Modos I y IIa. Esto significa que, independientemente de la forma de la ley de reblandecimiento, se garantiza que la resistencia a tracción del modelo χ desaparecerá precisamente cuando la energía consumida en los procesos de fractura alcance G^I_f, y, por otro lado, significa que el área bajo la curva σ - *u* en tracción pura resultante de los cálculos será exactamente equivalente a G^I_f.

La variación de *c* y χ se supone lineal en términos de una función de escala intermedia definida como

$$S(\xi) = \frac{e^{-\alpha}\xi}{1+\left(e^{-\alpha}-1\right)\xi}$$

Ecuación 3-4

donde $\xi = W^{cr}/G^{I}_{f}$ y $\alpha = \alpha_{\chi}$ para el parámetro χ, y $\xi = W^{cr}/G^{IIa}_{f}$ y $\alpha = \alpha_{c}$ para el parámetro *c*. Esta definición proporciona una familia de curvas descendentes para *c* y χ dependientes de los valores de los parámetros α_{χ} y α_{c} (ver Figura 3-1 (c)). En el caso particular en que $\alpha = 0$, se obtienen funciones linealmente decrecientes, $S(\xi)=\xi$.

El efecto "diente de sierra" de las irregularidades de los planos de rotura, producen que las tracciones tangenciales generadoras de deslizamientos relativos entre ambos lados de la grieta, induzcan una cierta apertura a las mismas denominada dilatancia. La cantidad de dilatancia puede ser definida en la misma representación gráfica que la superficie de rotura, dando la dirección de las deformaciones inelásticas en la grieta en ese espacio (por ejemplo la proporción entre la apertura normal y el deslizamiento relativo tangencial de la junta rota) en cada punto de la superficie cargada. El ángulo de dicha dirección con el eje vertical puede considerarse como el ángulo de dilatancia manifestado por el modelo. De hecho, la dirección paralela al eje vertical no indicaría dilatancia por completo, mientas que la dirección paralela al eje normal indicaría sólo apertura normal de la rotura y nunca deslizamiento tangencial. En términos tradicionales de la Elastoplasticidad, la dirección de las deformaciones inelásticas (regla de flujo) se considera en cada punto perpendicular a una superficie, denominada potencial plástico, definida por *Q = constante*, tal y como muestra la Figura 3-1 (a). Bajo tracción, dicha superficie coincide con la superficie de rotura, es decir, las deformaciones de la junta rota obedecen a una regla asociada. Por otro lado, bajo compresión, dicha regla no es asociada, de manera que la dilatancia disminuye al aumentar la magnitud de dicha compresión, desapareciendo por completo para valores mayores a σ^{dil}, que es otro parámetro del presente modelo. Así, la componente horizontal del vector normal a la superficie de rotura será reducida según el factor f^{dil}, definido por una función decreciente de las tensiones de compresión igualmente representada en la Figura 3-1 (a). Las ecuaciones de las derivadas de *Q* son:

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma_N} = 2\tan\varphi\left(c - \sigma_N \tan\varphi\right) f^{dil}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \overrightarrow{\sigma_T}} = 2\overrightarrow{\sigma_T}$$

Ecuación 3-5

3.3.2 Procesos iterativos

Tal y como se ha ido comentando a la largo de los anteriores apartados, DRAC puede realizar cálculos no lineales que requieren procesos iterativos. Dentro de los distintos tipos de problemas mecánicos no lineales, destacamos el correspondiente a la no linealidad material, que viene descrito por ejemplo por una ley constitutiva elastoplástica perfecta cuyo criterio de rotura podría ser el definido en el apartado anterior.

El mejor proceso iterativo disponible en DRAC que garantiza convergencia cuadrática es el denominado método de Newton-Raphson completo. Esta metodología consiste en aproximarse a la solución exacta mediante la tangente (noción de derivada en forma de matriz tangente) a la función continua a solucionar en un punto cualquiera. Puesto que en el proceso iterativo nunca se encontrará valor exacto de dicha solución, deberemos fijar una distancia suficientemente cercana a la solución exacta, denominada tolerancia, a la cual se parará el proceso iterativo, considerando pues ese valor como el exacto (asumiendo por tanto un error). Además, se fija un número máximo de iteraciones para el caso en que no se llegue nunca a respetar dicha tolerancia.

A la vista de esto uno puede pensar que si realizamos un cálculo en el que la solución exacta diste mucho del punto de partida, se dé que el método sea divergente, hecho además muy habitual. Con el fin de evitar este problema, DRAC permite aplicar la carga de manera progresiva por incrementos. Otra opción disponible en DRAC es la posibilidad de evitar calcular la matriz tangente a final de cada iteración (métodos de Newton-Raphson modificados), ya que muchas veces la obtención de la misma por métodos numéricos es compleja y puede dar problemas de convergencia.

3.3.3 Entrada de datos

La entrada de datos para llevar a cabo un cálculo en DRAC [4] se realiza mediante archivos de texto ASCII, todos subordinados a uno principal o master, tal y como refleja el organigrama situado a continuación.

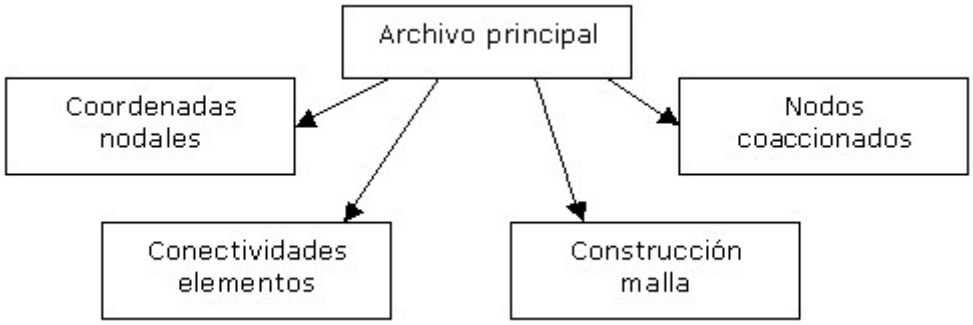

Figura 3-2: Organigrama sobre el funcionamiento de DRAC

El archivo principal se puede divide en 3 partes claramente diferenciadas: la primera consiste en la definición de los parámetros y características comunes en todo el proceso de análisis. La segunda representa todas las etapas o stages, es decir, los cambios de geometría, dentro de las cuales se definen los pasos de carga o steps.

El archivo principal es el que lee el programa al ejecutarse. Su confección responde a unas normas muy estrictas de tipo de variable (alfanumérica o numérica entera, numérica real con un número preciso de decimales, etc.). Cuando se llama a otro archivo se debe especificar su nombre completo en la línea correspondiente.

Dentro de los parámetros y características comunes a todo el proceso, encontramos el título global del estudio, su identificador, tipo de análisis, tipo de elemento, dependencia del tiempo, reglas de integración, número de materiales y definiciones geométricas (numero nodos, elementos de medio continuo, elementos junta, número de etapas), tiempo inicial (si es necesario), concepto de "restart" (solo para procesos que requieran iterar), parámetros del análisis no lineal (si es necesario), conectividades de los elementos (a través de archivo), coordenadas de los nodos (a través de archivo) y finalmente las propiedades materiales y sus correspondientes leyes constitutivas de los tres tipos de elementos posibles.

A continuación, se definen las características de la etapa, que recogen el título, la descripción de la etapa (número de elementos construidos o excavados, numero de pasos de carga, consideración

del peso propio, generación de archivos para el post-proceso) y el listado de los elementos a introducir o retirar.

Por último, se procede a la definición de los pasos de carga. Se inicia otorgando un título a ese step, luego se define la estrategia iterativa (si es necesario) así como los incrementos de carga (puede realizarse automáticamente), la descripción del paso de carga (en forma de número de puntos coaccionados, número de puntos con cargas aplicadas, número de superficies con cargas aplicadas, consideración de la carga gravitatoria y cargas termales), otras estrategias iterativas, el listado de los nodos coaccionados o con movimientos prescritos y finalmente la definición de las cargas aplicada, sean gravitatorias, puntuales, distribuidas o termales.

Dentro del archivo correspondiente a las coordenadas nodales, se introduce en cada línea el número del nodo y sus coordenadas. En el archivo de conectividades, se define en cada línea el número del elemento, el tipo (triángulo o cuadrilátero en 2D y hexaedro, prisma, pirámide o tetraedro en 3D), el tipo de material y sus conectividades, es decir, una enumeración de los números de los nodos que forman sus vértices. Este proceso se realiza de la misma manera para las juntas y las barras que se sitúan de manera ordenada uno tras otro. La construcción de la malla consiste en realizar una lista de los elementos sean de medio continuo, juntas o barras que van a ser construidos o excavados en esa etapa geométrica. Finalmente, en el archivo correspondiente a los nodos coaccionados, se realiza una lista de los nodos que tienen grados de libertad impedidos o bien tienen desplazamientos impuestos.

A continuación se presentan, a título de ejemplo, unos fragmentos de los archivos necesarios para realizar un análisis en DRAC:

```
Analisis 2D suelo homogeneo elastico lineal con juntas y sombrero
somprimj                 0
    2    1    0
    2    2    4
 4294    0 1780 1636    0    2    2    0    2    0    1    1
    0
Conecjuntas.drc
Coordjuntas.drc
    1    1       28.00000 50000000.00000        0.30000         0
    2    1        9.20000  9600000.00000        0.33000         0
    1    1  1000000.00000   100000.00000
    2    1  1000000.00000   100000.00000
stage 1 con sombrero
 1780 1636    0    0    1    0    1    1    1    1    1    0    1
Constjuntas.drc
step de carga bajo peso propio del glaciar
    0
    1    1
  120    0    1    0    0
Coaccjuntas.drc
         1         0        -1
stage 2 sin sombrero
   83   42    0    0    1    0    1    1    1    1    1    0    1
Constsinsomjuntas.drc
step de peso propio
    0
    1    1
  116    0    1    0    0
Coaccsinsomjuntas.drc
         1         0        -1
```

Figura 3-3: Ejemplo de archivo principal en DRAC

```
Coordenadas
    1      940.00000      800.00000
    2      940.00000      813.41200
    3      922.18800      800.00000
    4      922.19000      813.68700
    5      940.00000      826.82400
    6      922.19800      827.77500
    7      904.37500      800.00000
    8      904.38000      814.01900
    9      940.00000      840.23600
   10      922.20900      842.16500
   11      904.39500      828.80300
   12      886.56300      800.00000
   13      940.00000      853.64800
   14      886.57100      814.40700
   15      904.41700      844.16000
   16      922.22200      856.75500
```

Figura 3-4: Ejemplo de archivo de coordenadas nodales

```
Conectividades
    1    1    1 1837 1838 1343 1918
    2    1    1 1780 1781 1372 1836
    3    1    1 1840 1841 1335 1921
    4    1    1 1782 1783 1364 1839
    5    1    1 1843 1844 1327 1924
    6    1    1 1784 1785 1356 1842
    7    1    1 1846 1847 1319 1927
    8    1    1 1786 1787 1347 1845
    9    1    1 2008 2009 1258 2078
   10    1    1 1931 1932 1286 2007
   11    1    1 1849 1850 1311 1930
   12    1    1 1788 1789 1340 1848
   13    1    1 2011 2012 1249 2081
   14    1    1 1934 1935 1277 2010
   15    1    1 1852 1853 1305 1933
```

Figura 3-5: Ejemplo de archivo de conectividades de elementos

```
Construccionmalla con sombrero
    1    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    2    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    3    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    4    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    5    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    6    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    7    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    8    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
    9    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   10    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   11    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   12    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   13    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   14    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   15    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
   16    0    1000.00000    0.75000    0.00000    1
```

Figura 3-6: Ejemplo de archivo de construcción de la malla

```
Coacciones con sombrero
    1  110  0.000000  0.000000  0.000000
    2  100  0.000000  0.000000  0.000000
    3  110  0.000000  0.000000  0.000000
    5  100  0.000000  0.000000  0.000000
    7  110  0.000000  0.000000  0.000000
    9  100  0.000000  0.000000  0.000000
   12  110  0.000000  0.000000  0.000000
   13  100  0.000000  0.000000  0.000000
   18  100  0.000000  0.000000  0.000000
   21  110  0.000000  0.000000  0.000000
   25  100  0.000000  0.000000  0.000000
   30  110  0.000000  0.000000  0.000000
   32  100  0.000000  0.000000  0.000000
   39  110  0.000000  0.000000  0.000000
```

Figura 3-7: Ejemplo de archivo de coacciones

3.3.4 Salida de resultados

Los archivos que genera DRAC al ejecutarse [4], pueden ser divididos en 3 grupos:

El primero corresponde con los archivos temporales (*.TMP y ARX1ITER*.*) que el programa utiliza en su proceso de ejecución, los cuales no contienen ningún tipo de información práctica para el usuario.

El segundo grupo representa los archivos de resultados (*.res) que van dirigidos directamente al usuario. En ellos se indican todas las incidencias acaecidas durante el proceso de cálculo. Si el cliente del programa lo considera conveniente, estos archivos (tantos como etapas tenga el modelo más uno) indicarán tanto los desplazamientos de los nodos, como las reacciones sobre los mismos y las tensiones en los distintos tipos de elementos que encontramos en el modelo. Son de gran utilidad no para la interpretación de los resultados sino para la localización y posterior corrección de los posibles errores que puedan contener los archivos de entrada de datos.

Finalmente, DRAC genera los archivos que servirán como datos para el programa de post-proceso ya citado anteriormente DRACVIU. Dentro de todos los archivos generados, destacamos: *.cnc, *.cnj, (conectividades de los elementos de medio continuo y junta, respectivamente); *.coo (coordenadas nodales); *.tec, *.tej, (tensiones en los elementos de medio continuo y junta, respectivamente); *.dyr (desplazamientos y reacciones en los nodos). Debemos recordar que los desplazamientos y las reacciones están definidos sobre los nodos, mientras que las deformaciones y las tensiones lo están sobre los puntos de integración o de Gauss de todos los elementos.