

Utilización de testificación geofísica en la clasificación geotécnica de las facies detríticas de la cuenca de Madrid

Geophysical logging application to the geotechnical classification of Madrid basin detritic facies

I. M. Fernández Fuentes y V. Cuéllar Mirasol

Laboratorio de Geotecnia, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Alfonso XII, 3, 28014 MADRID

ABSTRACT

This paper sets the relationship between geophysical parameters and geotechnical properties of the detritic materials from the Madrid Basin. The geophysical parameters have been obtained from geophysical logging made in twenty seven boreholes.

The geophysical parameters Natural Gamma-ray and Conductivity have been selected in this research due to their direct relationship with some soils index proprieties (granulometry, plasticity).

The regression coefficients obtained in this study justify the possible use of geophysical logging to classify the grounds from a geotechnical point of view.

Key words: *geophysical logging, geotechnical, correlatins, detritic.*

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1334-1337

ISSN:0213683X

Introducción

El objetivo de esta investigación es establecer las relaciones existentes entre algunos parámetros medidos en la testificación geofísica de sondeos realizados en materiales detríticos y sus propiedades geotécnicas.

El interés de estas relaciones estriba en la posibilidad de conseguir propiedades in situ con nuevas técnicas, que permiten una mínima perturbación del medio, una gran rapidez en la obtención de los resultados y unas características de medida diferentes a las hasta ahora utilizadas.

Se llama testificación geofísica al conjunto de técnicas que permiten la obtención en un sondeo de registros, (también conocidos como log o diagráfias), de determinados parámetros físicos que sirven para caracterizar las formaciones del terreno perforados por los taladros. Los parámetros medidos muestran las variaciones de forma continua con la profundidad, al mismo tiempo que son extremadamente sensibles a pequeñas variaciones en la vertical lo que les hace muy interesantes para los estudios geotécnicos, donde los espesores de materiales implicados suelen ser pequeños y por tanto, se deben detectar mínimas variaciones que pueden ser determinantes en el comportamiento geotécnico global.

De los distintos parámetros geofísicos que se pueden obtener a lo largo de

un sondeo con los equipos de testificación utilizados se han seleccionado para el presente estudio los registros Gamma Natural y Resistividad aparente, ya que son los que mayor relación guardan con las propiedades geotécnicas con las que se quieren relacionar.

Los autores que trabajan en la Cuenca de Madrid distinguen tres grupos de facies: Facies detríticas, Facies evaporíticas y Facies intermedias constituidas por materiales terrígenos de origen aluvial y lacustre formados en un medio continental. La presente comunicación se centrará únicamente en las Facies detríticas del área en estudio. Los abanicos aluviales y ambientes asociados constituyen el medio sedimentario del que forma parte estos materiales. Los depósitos de grano más grueso, gravas y arenas, suelen ser predominantes en puntos más cercanos al área fuente, mientras que los depósitos más finos, limos y arcillas, se sitúan en áreas más distales.

Las arenas de los niveles altos suelen llevar también intercaladas capas de arcillas más o menos abundantes, del mismo modo que las arcillas puede llevar interestratificadas capas de arena, Escario (1985). Estas capas son con frecuencia de tipo lenticular (correspondientes a fondos de paleocanales) y, por tanto, resulta difícil establecer su continuidad. A veces constituyen acuíferos confinados, cuya incidencia puede ser importante en obras subterráneas. Estas características son las

que hacen necesario encontrar herramientas que den información de forma rápida y precisa del porcentaje de finos así como de la presencia o no de agua en los niveles de arenas.

El conocimiento del sistema deposicional de los materiales miocenos en este área permite enfocar los problemas geológicos y geotécnicos. Sin embargo, para mayor precisión, es necesario el estudio mediante sondeos. Estas Facies detríticas miocenas presentan unas características al ser perforadas (necesidad de entubación, no completa recuperación de testigo, dificultad de caracterizar las propiedades in situ, como grado de humedad, etc.) que les hace especialmente interesantes para la utilización de la testificación geofísica.

Facies detríticas y su clasificación geotécnica

Estos materiales corresponden a la subfacies media del abanico aluvial y constituyen lo que Riba (1957) denominó Facies Madrid. Dentro del casco urbano de Madrid, Martínez Alfaró (1978) define dos unidades litoestratigráficas: una superior y otra inferior separadas por una discordancia erosiva, a las que denomina D2 y D1, respectivamente. Litológicamente la diferencia fundamental entre ambas está en el contenido en arcillas, pues la unidad inferior (D1) es eminentemente arcillosa, mientras que en la su-

perior (D2) predominan los niveles arenosos.

Estos materiales detríticos, también designados localmente como «arena de miga», «tosco», o «materiales tosquizos», son diferenciados en función del contenido en finos. Así, Escario (1970) define estos materiales utilizando como característica de identificación la granulometría y más concretamente el paso por el tamiz nº 200 de la serie ASTM, aunque señala la existencia de toda una gama de materiales intermedios a los que denomina «arenas tosquizas» o «toscos arenosos». De esta forma hace la siguiente clasificación:

- Arena de miga 25 %
- 25 % < Arena tosquiza 40 %
- 40 % < Tosco arenoso 60 %
- 60 % < Tosco

De la Fuente y Oteo (1986) incorpora un quinto término en esta clasificación: el tosco arcilloso con un contenido en finos mayor de 85%, quedando el tosco definido entre el 60 % y 85 % de contenido en finos.

Teniendo en cuenta los análisis granulométricos y la plasticidad de estos materiales. De la Fuente y Oteo (1986) los clasifica atendiendo a los criterios del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos de Casagrande (1942) de la siguiente manera:

- Arena tosquiza: SC-CL
- Tosco arenoso: CL-SC
- Tosco : CL
- Tosco arcilloso: CH

Registro Gamma Natural

Los rayos gamma son ondas electromagnéticas que, con frecuencias superiores a los 10¹⁰ MHz, son emitidas espontáneamente por algunos elementos radioactivos. Casi todas las radiaciones gamma que se producen espontáneamente en el terreno se deben a un isótopo radiactivo del potasio de peso atómico 40(K⁴⁰) y a isótopos de uranio y torio. Debido a que el potasio entra a formar parte de la estructura cristalina de las micas, illitas, montmorillonitas y otros minerales arcillosos, los registros de rayos gamma natural se han utilizado en ingeniería como indicadores cualitativos del contenido de arcilla y lutita de las distintas formaciones atravesadas por los sondeos. Desde este punto de vista constituyen una herramienta muy útil para correlacionar distintas columnas de sondeos.

El grado de emisión de radiación

gamma ha sido medido para diferentes minerales encontrados en rocas sedimentarias, (Serra, 1984). Los valores leídos en unidades API para algunos minerales de las arcillas se presentan en la tabla que sigue.

| MINERAL | FÓRMULA | RADIACIÓN GAMMA (API) |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Ceolinita | Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 80-130 |
| Clorita | (MgFeAl) ₆ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 180-280 |
| Illita | K _{1-1.5} Al ₄ (Si _{7-8.5} Al _{1-1.5})O ₂₀ (OH) ₂ | 250-300 |
| Montmorillonita | (Ca ₂ Na) ₇ (Al,Mg,Fe) ₄ (Si,Al) ₈ O ₂₂ (OH) ₄ ·(H ₂ O) _n | 150-200 |

Tabla I.- Radiactividad gamma para algunos minerales de las arcillas.

Table I. -Gamma radioactivity of some clay minerals.

Registro Resistividad

La resistividad, ρ, al ser un parámetro intrínseco del material proporciona información sobre su naturaleza. La Tabla II muestra los valores de resistividad de algunas formaciones típicas del terreno. En general los valores de resistividad que se pueden encontrar en las aplicaciones geotécnicas oscilan entre 0.5 y 1000 Ω.m.

| MATERIAL | RESISTIVIDAD EN Ω.m. |
|--------------------|----------------------|
| Arcillas | 1-20 |
| Arenas húmedas | 20 - 200 |
| Lutitas | 1 - 500 |
| Calizas porosas | 100 - 1000 |
| Calizas densas | > 1000 |
| Rocas metamórficas | 50 - >1000 |
| Rocas ígneas | 100 - >1000 |

Tabla II.- Resistividades típicas de algunos materiales.

Table II.- Characteristic resistivity of different materials.

En el presente trabajo la resistividad se ha medido con la utilización de dos equipos. El primero está dotado de la sonda de Resistividad Normal, la cual proporciona un registro, de la resistencia del terreno al paso de una corriente creada artificialmente entre un electrodo introducido en el sondeo y otro situado en la superficie. Esta sonda requiere para su uso un sondeo libre de entubación y con líquido en su interior.

El segundo equipo utiliza un método basado en una sonda de inducción electromagnética que proporciona como parámetro de medida un registro continuo de la conductividad aparente del terreno alrededor de la entubación. Este método se ideó para trabajar en el interior de sondeos secos o con barro no conductores. Tanto el líquido de perforación como la entubación de PVC apenas afecta al valor de las medidas realizadas. Las condiciones más comunes encontradas en los sondeos geotécnicos son: presencia de entubación y sin líquido de perforación. Por tanto, los datos de resistividad utilizados

han sido obtenidos principalmente con este último equipo.

Relaciones entre las características de identificación geotécnica y los registros geofísicos seleccionados en las Facies detríticas de la Cuenca de Madrid

Los datos en los que se basan estas relaciones proceden de los trabajos realizados en un total de 27 sondeos situados en tres zonas que de Norte a Sur son: Monte del Pardo (14 sondeos), Princesa-Moncloa (10 sondeos) y Retiro (3 sondeos).

Para cada una de las relaciones que se establecen en este apartado se han obtenido cuatro tipos de funciones de regresión (lineal, exponencial, logarítmica y potencial). De ellas, se han seleccionado las regresiones tipo lineal, ya que suelen presentar coeficientes de correlación ligeramente superiores.

Relación registros gamma natural con paso por el tamiz 200:

El número total de muestras ensayadas y, por tanto de puntos que entran en la correlación ha sido de 283. Tras eliminar los puntos de menor frecuencia de repetición, se ha obtenido un coeficiente de regresión de 0.83, con desviación estándar de 5, para 221 parejas de valores. Por tanto la función de regresión con la que se obtienen los registros de gamma natural en función del paso por el tamiz 200 será:

$$y = 0.39 * x + 34$$

siendo, x: paso por el tamiz nº 200 (%), y: Gamma natural (cps)

Así, los distintos materiales definidos en las facies detríticas de Madrid, tomando como tipos básicos los definidos por Escario, podrán ser identificados a partir del registro gamma natural con los valores que se indican a continuación:

- Arena de miga ≤ 44 ± 5 cps
- 44 ± 5 cps < Arena tosquiza 50 ± 5 cps
- 50 ± 5 cps < Tosco arenoso 58 ± 5 cps
- 58 ± 5 cps < Tosco

En la figura 1 se ha dibujado la línea de regresión, en torno a la que se ha dibujado un huso a partir del valor de la desviación estándar.

Este análisis total fue desglosado para cada una de las zonas que intervienen en el estudio con la obtención de los parámetros de regresión, tal como se indica en la Tabla III.

Las arcillas marrones intercaladas entre las arenas arcóscicas y limos, se caracterizan por presentar proporciones similares de esmectitas e illitas (Calvo, 1988). Las esmectitas presentan gradación de Norte a Sur, el contenido de illitas tam-

| ZONA | FUNCIÓN DE REGRESIÓN | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | COEFICIENTE DE REGRESIÓN |
|------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| Monte del Pardo | $y = 0.44 * x + 32$ | 5.7 | 0.79 |
| Princesa-Moncloa | $y = 0.31 * x + 36$ | 6.5 | 0.66 |
| Retiro | $y = 0.35 * x + 33$ | 4.1 | 0.86 |

Tabla III.- Relación entre los registros gamma natural y la granulometría para cada una de las zonas estudiadas.

Tabla III.- Relationship between gamma-natural logs and granulometry in each studied zones

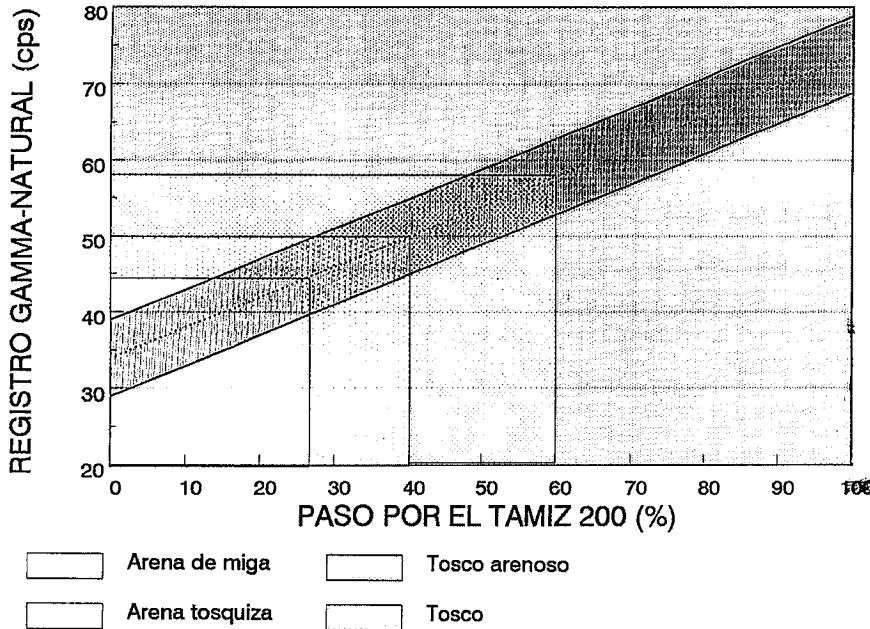


Fig. 1.- Gamma natural - paso por el Tamiz nº 200.

Fig. 1.- Natural gamma - % passing 200 sieve.

bién presenta gradación con disminución de su porcentaje hacia el sur. La proporción de caolinita varía entre 5 y 15 %, alcanzando en ocasiones cierta relevancia los interstratificados esmectita-illita y clorita-illita. Dado que la respuesta en radiación gamma de las illitas es superior a la de las esmectitas (montmorillonita), (ver Tabla I) existirá también una gradación en intensidad de radiación gamma de Norte a Sur. Esto explicaría las ligeras variaciones existentes entre las rectas de correlación obtenidas (ver Tabla III). Así, la radiación gamma, medida en cuentas por segundo, que caracteriza cada uno de los materiales en estudio es ligeramente superior en la zona Norte (Pardo) frente a los obtenidos más al Sur (Princesa-Moncloa).

Relación registros conductividad con paso por el tamiz 200: Para establecer esta relación los registros de conductividad han sido divididos por el nivel de agua en los sondeos. Así, se han establecido dos correlaciones.

La primera relaciona los registros de conductividad por debajo del nivel de agua con el paso por el tamiz nº 200. Bajo estas condiciones se han relacionado un total de 107 pares de elementos. El índice de correlación obtenido ha sido de 0.74, con una desviación estándar de 31.2, y una función de regresión como se indica a continuación:

$$y = 1.3 * x + 69$$

siendo, x: paso por el tamiz nº 200 (%),

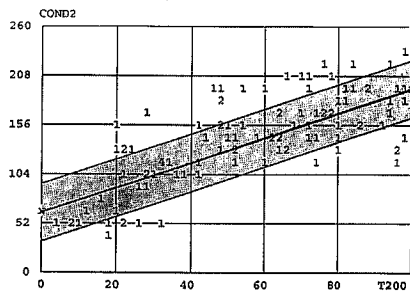


Fig. 2.- Conductividad dentro del agua - paso por el Tamiz nº 200.

Fig. 2.- Conductivity with water - % passing 200 sieve.

y: conductividad dentro del agua (mS/m)

La línea de regresión obtenida se representa en la figura 2. En esta gráfica también se dibuja el huso dado por los valores de la desviación estándar.

La segunda regresión obtenida relaciona los registros de conductividad por encima del nivel de agua con el paso por el tamiz nº 200. En este caso el número de parejas de valores correlacionados ha sido de 130. El coeficiente de correlación obtenido es de 0.73 con una desviación estándar de 28.4, y una función de regresión tal como se indica a continuación:

$$y = 1.76 * x + 26$$

siendo, x: paso por el tamiz nº 200 (%), y: conductividad en seco (mS/m)

La gráfica que ilustra esta regresión aparece en la figura 3. En ella también se dibuja el huso obtenido a partir de los valores de desviación estándar.

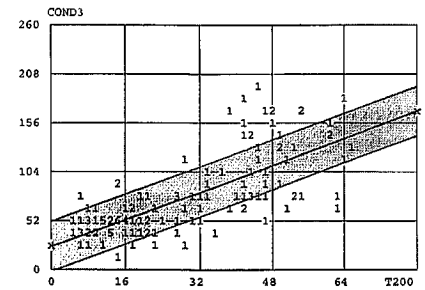


Fig. 3.- Conductividad en seco - paso por el Tamiz nº 200.

Fig. 3.- Dry conductivity - % passing 200 sieve.

Al superponer estas dos gráficas, tal como se hace en la figura 4, se observa cómo la zona de solape entre los dos husos es menor en la zona de las arenas que en la de las arcillas. Por tanto en función de este gráfico podrá diferenciarse si existe o no presencia de agua para las arenas. Este contraste será mayor al aumentar el contenido en sales del agua de formación.

Relación parámetros geofísicos con la plasticidad: Los diferentes autores que estudian la plasticidad de estos materiales a partir del Gráfico de Plasticidad de Casagrande, dan una calificación para el tosco arcilloso de media y media alta, apreciándose un aumento de la plasticidad con el contenido de finos.

De la Fuente (1984) trató de establecer la relación existente entre el porcentaje de partículas que pasan por el tamiz nº 200 y el límite líquido. Llegó a la conclusión de que existe una tendencia a aumentar del límite líquido con el contenido en finos, aunque sin poder establecerse una correlación entre ambas variables. Los

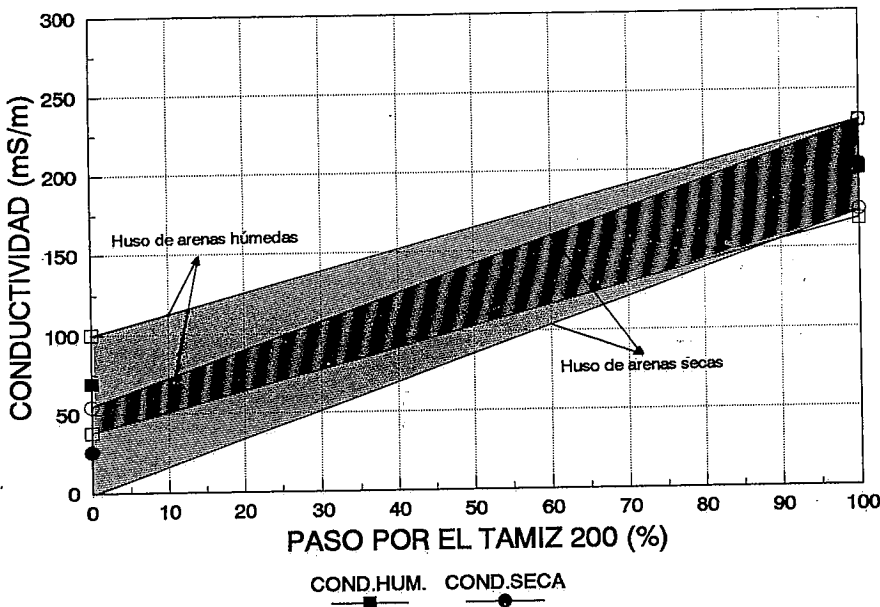


Fig. 4.- Conductividades - paso por el Tamiz nº 200.

Fig. 4.- Conductivity - % passing 200 sieve.

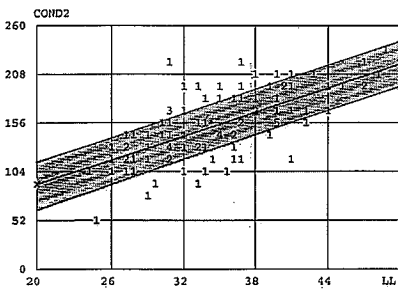


Fig. 5.- Conductividad dentro del agua - Límite Líquido.

Fig. 5.- Conductivity in water - Liquid limit.

resultados obtenidos en este estudio al establecer la relación entre gamma natural y contenido en finos ha sido del mismo tipo. Sin embargo, es de interés señalar cómo este grado de correlación aumenta al relacionar la resistividad total medida en estos materiales con el límite líquido. También en este caso se analizaron por separado los registros de conductividad procedentes de los tramos situados por encima y por debajo del nivel de agua en el sondeo. La regresión obtenida para este segundo caso es de mejor calidad que la obtenida con los datos de conductividad en seco. Por tanto la correlación que se presenta relaciona la conductividad del terreno con un cierto grado de humedad y el límite líquido.

El índice de correlación obtenido al relacionar estas dos variables es de 0.67 y la desviación estándar de 26.6, para 97

parejas de valores. Los resultados pueden observarse en la Fig. 5, en la que se ha dibujado un huso a partir de los valores de la desviación estándar. La función lineal que relaciona estos dos parámetros es la siguiente:

$$y = 4.22 * x + 5$$

siendo, x: Límite líquido, WL, y: conductividad por debajo del nivel del agua (mS/m)

Los valores de plasticidad obtenidos por Escario (1985) para el tosco, son de un límite líquido medio de 35, con una desviación estándar alrededor de 5, y un índice de plasticidad del orden de 16 con una desviación estándar alrededor de 4. Si se sustituyen estos valores de límite líquido en la expresión anterior, resulta un valor medio de conductividad para el tosco de 153 mS/m, y valores extremos de 132 y 174 mS/m. Por otro lado, el cálculo de la relación entre la conductividad y el paso por el tamiz nº 200 (ver Fig.2) daba un valor de conductividad en el tosco de 147 mS/m con una desviación estándar de 31. Por tanto, a partir de los datos de conductividad podrán obtenerse valores de límite líquido y de granulometría.

Conclusiones

El alto nivel de correlación existente entre la emisión gamma natural y la granulometría hace posible la clasificación de los materiales detríticos de la Cuenca de Madrid a partir de este tipo de registro geofísico tal como se puede apreciar en la figura 1.

Una vez obtenida la granulometría con el registro gamma natural es posible diferenciar entre arenas secas o arenas húmedas a partir del registro de conductividad. Esta información será mejor al aumentar la conductividad eléctrica en el agua de formación.

El registro de conductividad procedente de medir materiales con un cierto grado de humedad permite informar de la plasticidad de las formaciones arcillosas atravesadas por el sondeo.

Por tanto, se puede concluir afirmando que la utilización de la testificación geofísica como criterio de identificación geotécnica en las facies detríticas de la Cuenca de Madrid es perfectamente válida. La posibilidad de utilizar estos resultados en otras cuencas sedimentarias no es directa, dado que existen factores, como la mineralogía de las arcillas, que hacen variar el número de cuentas por segundo medido con el detector de radiación gamma. Sin embargo, tras calibrar las posibles variaciones con la metodología utilizada, podrán obtenerse con facilidad las correlaciones existentes en los materiales detríticos de otras áreas.

En la actualidad se está poniendo a punto las correlaciones necesarias para obtener características de estado como es el grado de humedad también de gran interés en geotecnia a partir de la conductividad y otros registros geofísicos.

Referencias

Calvo Sorando, J.P., 1988. *Símpoio sobre la geotecnología del subsuelo de Madrid, 1ª sección*, Área de Urbanismo e Infraestructura, Ayuntamiento de Madrid, p. 13-24.

De La Fuente, P., Oteo Mazo C., 1986. *Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid*. Cuadernos de Investigación C11, CEDEX (MOPT), 170 p.

Escario, V., 1970. *Los suelos de Madrid*. Lab. de Transportes y Mecánica del suelo. Publ. 25.

Escario, V., 1985. *Síntesis geotécnica de los suelos de Madrid y su alfoz*. Dirección general de infraestructura del transporte, MTTC, Madrid, 80 p.

Marínez Alfaro, P.E., 1978. *Contribución al conocimiento de la geología del casco urbano de Madrid*. Estudios geol., 34, p. 241-249.

Riba, O., 1957. *INQUA, V Congr*. Inten. Livret. Guide, Exc. 5-55.

Serra, O., 1984. *Fundamentals of well-log interpretation: 1. The acquisition of logging data*. Elsevier, 423 p.