

Exigencias, y retos de la implementación adecuada del método observacional en la geotecnia

Rubén D. Aguilar-Collazo¹, Guilliam R. Barboza Miranda²

¹ Ingeniero Civil, Esp. Gerencia de Proyectos de Construcción, Candidato a Magíster en Ingeniería - Geotecnia - Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Correo electrónico: rdaguilarc@unal.edu.co

² Ingeniero Civil, Magíster en Geotecnia - Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Docente Ucarbagena del Programa de Ingeniería Civil, Correo electrónico: guibami36@yahoo.es

RESUMEN

El presente trabajo de revisión está enfocado hacia una sub-rama de la Ingeniería Geotécnica denominada "Investigación del subsuelo e instrumentación" y tiene como propósito principal establecer aspectos teóricos y conceptuales de algunos avances y tendencias del desarrollo del método observacional (MO) propuesto formalmente por el profesor Ralf Peck (1966) y usado exitosamente por Terzaghi en su práctica profesional. El MO a menudo permite máxima economía y garantía de seguridad, brindando a los diseños geotécnicos la posibilidad de ser modificados de acuerdo con los progresos de la construcción. El método tiene limitaciones ya que no debe usarse a menos que el diseñador tenga en mente un plan de acción para cada situación desfavorable que pueda ser revelada por las observaciones. Estas observaciones deben ser confiables, revelar la significancia de un fenómeno y deben ser reportadas oportunamente para estimular una acción rápida. La posibilidad de una falla progresiva puede introducir un serio problema de incertidumbre. A pesar de las limitaciones, el potencial de ahorro de tiempo y dinero sin sacrificar la seguridad es tan grande que cualquier ingeniero que trabaja en el campo de la geotecnia necesita conocer sus principales características. En muchos países la aplicación del MO es aun limitada en gran medida por la falta de comprensión del mismo.

PALABRAS CLAVE: Método observacional, ingeniería geotécnica, diseño, construcción.

ABSTRACT

The present review is concerned with a sub-branch of Geotechnical Engineering called "sub-soil investigation and Instrumentation". This paper has as main purpose to establish theoretical and conceptual aspects of some advances and trends of the development of the observational method (OM). This method was proposed by the professor Ralf Peck (1966) and it was used successfully by Terzaghi in his practice. The OM often allows for maximum economy and ensuring safety, it provides the possibility to realize geotechnical designs that may vary according to the progress of the construction. The method has limitations and it should not be used unless that the designer has in mind a plan of action for each revealed unfavorable situation by observations. These observations must be reliable to reveal the significance of a phenomenon, the observations should be reported promptly to encourage quick action. The possibility of progressive failure can introduce a serious problem of uncertainty. Despite the limitations, the potential savings in time and cost without sacrificing security is so great that any engineer that working in the field of Geotechnical Engineering needs to know its main features. In many countries the implementation of the OM is still largely limited by a lack of understanding.

KEYWORDS: *Observational method, geotechnical engineering, design, construction.*

1. INTRODUCCIÓN

El método observacional (MO) proporciona un enfoque distinto hacia el diseño. Peck (1966) afirma que en la ingeniería geotécnica muchas variables permanecen desconocidas, por lo tanto los resultados de los cálculos que se realizan no son más que hipótesis de trabajo, sujetas a confirmación o modificación durante la construcción. En el pasado dos métodos habían sido usados para tratar las inevitables incertidumbres, ya sea adoptando un factor de seguridad excesivo o haciendo suposiciones de acuerdo con la experiencia general promedio. El primer método es antieconómico; el segundo es peligroso. El MO surgió como una alternativa de trabajo. Este método fue reconocido por Terzaghi como un enfoque de diseño (Terzaghi and Peck, 1967) y formalizado posteriormente por Peck.

De acuerdo con Peck (1966) la implementación adecuada del MO permite máxima economía y garantía de seguridad, brindando a los diseños geotécnicos la posibilidad de ser modificados de acuerdo con los progresos de la construcción. El método tiene un limitante puesto que no debe usarse a menos que el diseñador tenga en mente un plan de contingencia para cada situación desfavorable que pueda ser revelada por las observaciones. Estas observaciones deben ser confiables, revelar la significancia de un fenómeno y deben ser reportadas oportunamente para estimular una acción rápida.

El presente documento busca establecer aspectos teóricos y conceptuales de algunos avances y tendencias del desarrollo del método observacional (MO) que sirvan de referencia para su estudio dentro del campo de la ingeniería geotécnica, dado que su aplicación es aun limitada en muchos países, especialmente de Latinoamérica, en gran medida por la falta de comprensión y adecuación del mismo.

2. METODO OBSERVACIONAL (MO) EN LA GEOTECNIA

El MO es definido por la Construction Industry Research and Information Association, CIRIA (en Nicholson et al. 1999) como un proceso dirigido, continuo e integrado de diseño, control de construcción, seguimiento y revisión, que permite que modificaciones previamente definidas sean incorporadas a una obra durante o después de su construcción, según resulte conveniente y donde todos los elementos mencionados deben ser sólidos. El objetivo de la aplicación del método es lograr mayor economía, sin comprometer la seguridad. Powderham & Ruty (1994) explican que el MO es una técnica creada para ahorrar en costo y/o tiempo.

Peck (1966) definió que la aplicación completa del MO involucraba los siguientes "ingredientes".

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> a) Exploración suficiente para establecer al menos la naturaleza, el patrón y las propiedades del subsuelo, pero no necesariamente en detalle. b) Evaluación de las condiciones más probables y las desviaciones concebibles más desfavorables respecto de estas condiciones. En esta evaluación la geología juega un papel importante. c) Establecimiento del diseño con base en hipótesis de trabajo del comportamiento anticipado bajo las condiciones más probables. d) Selección de las cantidades a ser observadas durante el proceso de construcción y calcular sus valores anticipados sobre la base de las hipótesis de trabajo. e) Cálculo de los valores de las mismas cantidades bajo las condiciones más desfavorables compatibles con los datos disponibles en relación con las condiciones subsuperficiales. |
|---|

- f) Selección por adelantado de un curso de acción o modificación del diseño para cada desviación significativa previsible de los resultados de las observaciones a partir de aquellas predichas sobre la base de las hipótesis de trabajo.
- g) Medición de cantidades a ser observadas y evaluación de las condiciones reales.
- h) Modificación del diseño a las condiciones reales.

Peck (1966) afirma que el grado de aplicación de cada "ingrediente" depende de la naturaleza y complejidad de cada trabajo de ingeniería. De acuerdo con Patel et al. (2005) se pueden distinguir de modo general dos aplicaciones del MO: (a) Enfoque "Ab initio", adoptado desde el inicio del proyecto y (b) Enfoque "The best way out", adoptado después que el proyecto comienza y algún evento inesperado diferente al diseño predefinido ocurre o se produce una falla, entonces el MO se utiliza para establecer una forma de salir de la dificultad. Este último enfoque ha sido utilizado recientemente en excavaciones profundas en Singapur (Nicholson et al. 2006).

Patel et al. (2005) conceptúan que en el MO, la modificación del diseño predefinido (moderadamente conservador) al "más probable" reduce el margen contra fallas estructurales y por lo tanto es necesario un mayor control del sitio, equilibrado por un monitoreo riguroso y el establecimiento de planes de contingencia adecuados antes de implementar el MO. Las obras de construcción también tienen que ser flexibles y ser capaz de adaptarse fácilmente a cualquier cambio en el diseño o programa, exigido para cualquier implementación de planes de contingencia. El MO es más efectivo cuando hay un amplio margen de incertidumbre y se usan términos como "más probable", y "más desfavorable" para describir el rango de condición del suelo. Es importante mencionar que en algunos casos (por ejemplo en túneles) la condición "más probable" puede ser excedida (Powderham, 1994).

3. OBSERVACIONES SOBRE EL MO

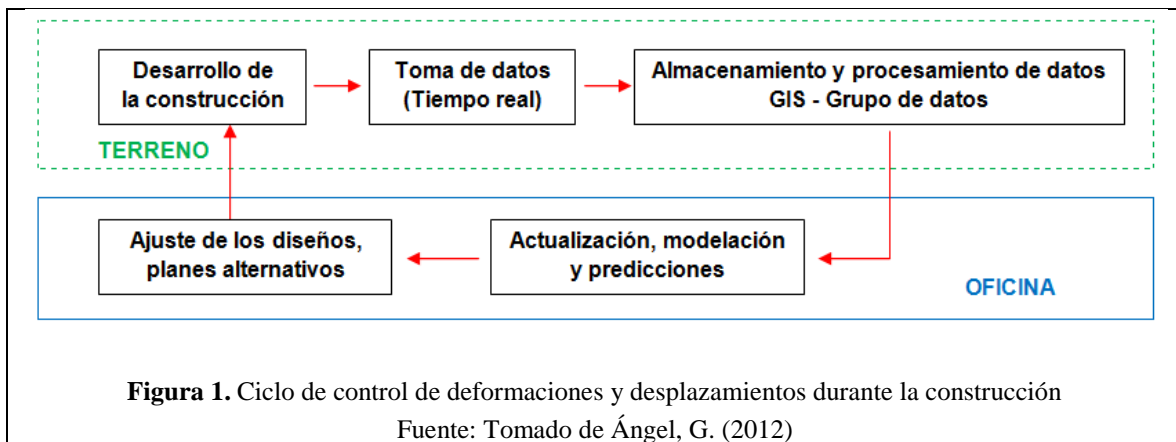
Según Szavits-Nossan (2006) en el MO, el proceso de construcción puede comenzar con un diseño basado en una evaluación más optimista de las condiciones naturales del suelo que en el método convencional. Al mismo tiempo, las medidas cuidadosamente planificadas para la detección de posibles diferencias entre las condiciones del suelo asumidas y reales se proporcionan en el diseño, así como acciones planeadas para llevar a cabo en el caso de que se produzcan diferencias significativas. Con este enfoque, el proceso de diseño se extiende en la fase de construcción. Se aprovechan las observaciones y datos recopilados durante la construcción para adaptar el diseño a las condiciones del suelo real en una forma ordenada y planificada. Este método puede ser caracterizado como un enfoque de aprendizaje sobre la marcha "learn to go" y según Nicholson et al. (1999) y Allagnat (2005) se ha aplicado con éxito en la práctica por muchos diseñadores de túneles, en excavaciones, fundaciones, obras de tratamiento del suelo, terraplenes, estructuras de eliminación de residuos, etc.

Aunque el uso del MO brinda ciertas ventajas, algunos autores se han planteado preguntas acerca de sus limitaciones y su uso adecuado. Powderham (1998) manifiesta que el MO genera ciertas limitaciones técnicas y contractuales que han desalentado su aplicación más amplia y frecuente. Sin embargo algunos autores opinan que el método es un elemento de un sistema de control de calidad, que permite investigaciones de sitio menos intensivas, que estimula la introducción de innovaciones, que es una de las armas más poderosas del arsenal de la ingeniería civil.

Según Powderham (2002a), a partir de un diseño inicial más optimista, se pueden crear preocupaciones sobre la seguridad, lo cual podría estar inapropiadamente asociado con márgenes de seguridad demasiado bajos. Esta circunstancia también ha desalentado el uso más amplio del MO. Szavits-Nossan (2006) afirma que las preocupaciones sobre las limitaciones y el uso correcto del MO pueden ser clarificadas, a través de la naturaleza de las incertidumbres y sus probabilidades, así como el reconocimiento del papel de la gestión de riesgos. Clayton (2001) afirma que la gestión de riesgos gana cada día mayor aceptación en la ingeniería geotécnica. Los riesgos en ingeniería se pueden limitar a niveles aceptables o acordes con las medidas de diseño, por ello la gestión del riesgo entra en el diseño de ingeniería. Reconocer, evaluar y gestionar el riesgo son el núcleo del MO.

Szavits-Nossan (2006) añade que el MO supone que los cambios de diseño son posibles, que se ocupa de las incertidumbres en las condiciones del suelo y entorno geológico y que su aplicación incurre en costos adicionales a los del diseño convencional. Cuando los cambios de diseño no son posibles o factibles, el método no es aplicable. Si existieran casos en los cuales no hay incertidumbres en las condiciones del suelo o si las hay son insignificantes, entonces el uso del MO sería antieconómico.

En la figura 1 se esquematiza un ciclo de control de deformaciones y desplazamientos durante la construcción en un contexto del MO, el cual se relaciona como ejemplo. En el terreno se desarrolla la construcción y se realiza toma, almacenamiento y procesamiento de datos, mientras que en la oficina se llevan a cabo actualizaciones y nuevas modelaciones y predicciones para ajustar los diseños iniciales y establecer planes alternativos de acción acordes con la información de campo obtenida.



3.1. DUALIDAD DE INCERTIDUMBRES

Szavits-Nossan (2006) resalta la importancia de reconocer la naturaleza dual de la incertidumbre teniendo en cuenta lo planteado por Beacher & Christian (2003) and Christian (2004). Hay dos tipos de incertidumbres: la incertidumbre aleatoria o aquella que se basa en la variabilidad natural de una propiedad, y la incertidumbre epistémica o aquella proveniente de la falta de conocimiento, o que se origina en el conocimiento insuficiente de una propiedad, o de las consecuencias de estos. Los dos tipos de incertidumbres juegan un papel importante en la ingeniería geotécnica. Algunos autores se refieren a la incertidumbre aleatoria como objetiva, porque se basa en el campo, y a la epistémica como subjetiva, porque se basa en nuestra mente. Mientras que la incertidumbre epistémica puede ser reducida con un programa de investigación del subsuelo más amplio, tal programa no haría mucho para reducir la incertidumbre aleatoria.

Ambas incertidumbres son cuantificadas por las probabilidades, por ello es importante conocer el tipo de incertidumbre que la probabilidad representa si se busca una interpretación apropiada. Szavits-Nossan (2006) destaca que la división o incluso la distinción entre los dos tipos de incertidumbres puede ser algo confusa y puede depender del modelo conceptual que representa las condiciones naturales del suelo. El autor reconoce que esta dualidad puede tener una influencia importante en la clarificación de algunas ambigüedades sobre el uso del MO.

3.2. CONTRIBUCIONES AL DESARROLLO DEL MO

A partir de lo planteado por Peck (1969), quien acuñó el nombre y formalizó el método observacional mediante la identificación de sus ocho "ingredientes", sus ventajas e inconvenientes, a continuación se citan algunas contribuciones hechas al MO.

3.2.1. Powderham: Diseño inicial y modificación progresiva

Powderham (2002 b) reconoce que los problemas de seguridad son relevantes y que un alto grado de certeza en los resultados del proyecto y la programación se requieren generalmente en la práctica moderna de la construcción, la cual es liderada por equipos en lugar de individuos. Powderham & Nicholson (1996) consideran un enfoque "seguro" de diseño a través de una "modificación progresiva" del diseño inicial basado en parámetros conservadores, para aproximarse a las condiciones más probables a través de las observaciones de campo. Powderham (2002 b) perfecciona el MO, abogando por un diseño inicial más conservador, que luego es modificado progresivamente en pasos pequeños y controlables así como usando más datos, cuyas tendencias están disponibles por las observaciones, muy probablemente con el propósito de ahorrar costos en lugar de introducir medidas de contingencia. Con este enfoque, el nivel de riesgo puede mantenerse o incluso disminuir a medida que avanza la construcción.

El enfoque de Powderham (2002 a) se resume como sigue:

- a) Iniciar la construcción con un diseño que proporciona un nivel de riesgo aceptable para todas las partes
- b) Mantener o disminuir este nivel de riesgo
- c) Avance de la construcción en fases claramente definidas
- d) Implementar de modo apropiado cambios necesarios progresivamente y demostrar resultados aceptables a través de la retroalimentación observacional.

A pesar de ser más conservador que el propuesto por Peck, el diseño inicial que propone Powderham puede ser todavía menos conservador que el enfoque convencional. Powderham (2002 a) describe el uso de árboles de decisión muy elaborados con mecanismos de activación semejantes a un semáforo, para hacer cambios de diseño.

3.2.2. Muir Wood: Túneles y diseño inicial

En su trabajo sobre el "nuevo" método austriaco para túneles (NATM), Muir Wood (1987) propuso una versión simplificada del MO para su uso en túneles:

- a) Planear un modelo conceptual
- b) Predecir las características esperadas en las observaciones

- c) Observar y comparar con (b)
- d) Si hay diferencias entre (b) y (c) que se sustentan en los valores de los parámetros, entonces (a) es insuficiente o inadecuado (?).
- e) Diseñar un modelo conceptual revisado.
- f) Repetir (b), (c), (d) y (f) hasta que sea necesario.

Muir Wood (1987, 1990) resalta que la adopción del método en túneles debe presuponer la habilidad para complementar o suplir el soporte del túnel, mientras que el proceso observacional está en curso, sin el riesgo de colapso del túnel. También debe presuponer un grado general de confianza en el enfoque, que se espera esté basado en experiencia comparable y en el análisis de circunstancias particulares.

Muir Wood (2000) advierte sobre posibles problemas en los túneles, si las "condiciones más probables" definidas por Peck, son adoptadas como base para el diseño inicial de túneles. Al realizar un análisis de riesgo bajo supuestos muy simplificados, Muir Wood (2000) demuestra que los costos de construcción mínimos esperados para el diseño inicial y las condiciones del suelo que se encuentran durante la excavación, se obtienen con una probabilidad mínima de seguridad (p), la cual está en función de (k), que es la relación entre el costo unitario del soporte complementario del túnel, que se coloca si se encuentran las peores condiciones del suelo, y el costo unitario de colocar el mismo soporte tal como estaba previsto en el diseño inicial, el cual es más bajo.

3.2.3. Requerimientos del eurocódigo 7

Szavits-Nossan (2006) precisa que el código europeo de diseño geotécnico, Eurocódigo 7 (2004) aborda el MO de manera muy breve, pero su descripción es interesante (Cláusula 2.7):

- (1) Cuando es difícil predecir el comportamiento geotécnico, puede ser apropiado aplicar el enfoque conocido como "el método observacional", en la que el diseño es revisado durante la construcción.
- (2) Los siguientes requisitos deberán cumplirse antes del inicio de la construcción:
 - a) Se establecerán límites aceptables de comportamiento.
 - b) El rango de posibles comportamientos será evaluado y se deberá demostrar que existe una probabilidad aceptable de que el comportamiento real estará dentro de los límites admisibles.
 - c) Un plan de monitoreo deberá ser elaborado, y revelará si el comportamiento real se encuentra dentro de los límites aceptables. El monitoreo debe aclarar este punto en una fase temprana, y con intervalos suficientemente cortos para que las acciones de contingencia puedan ser llevadas a cabo con éxito.
 - d) El tiempo de respuesta de los instrumentos y los procedimientos para el análisis de los resultados deberán ser lo suficientemente rápidos en relación a la posible evolución del sistema.
 - e) Un plan de acciones de contingencia deberá ser elaborado, y ser adaptado si el monitoreo revela un comportamiento fuera de los límites aceptables.
- (3) Durante la construcción, el monitoreo se llevará a cabo según lo planificado.

(4) Los resultados del monitoreo deberán ser evaluados en etapas apropiadas y las medidas de contingencia previstas deberán ser puestas en marcha si los límites del comportamiento son excedidos.

(5) El equipo de monitoreo deberá reemplazarse o ser extendido en caso de presentarse fallas en el suministro de datos confiables, en cuanto a su calidad y cantidad.

El primer párrafo de la cláusula 2.7 del Eurocódigo 7 (2004) afirma explícitamente que el MO es una alternativa viable al diseño convencional cuando el ingeniero geotécnico se enfrenta a incertidumbres basadas en el conocimiento del comportamiento del suelo.

3.3. CASOS HIPOTÉTICOS EN EL MO

Según Szavits-Nossan (2006) aunque la aplicación del MO goza de gran acogida en la práctica geotécnica, también es motivo de ciertas preocupaciones. Algunos de los problemas más comunes son los siguientes:

- El inicio de la construcción con un diseño basado en las condiciones de suelo más probables puede poner en peligro la seguridad.
- ¿Cuáles son los márgenes de seguridad que deben ser usados en el diseño basado en el MO, con respecto a la serviciabilidad y estados límites, así como de las obras temporales?
- El uso del MO puede excluirse para comportamiento estructural frágil o en suelos frágiles.
- ¿Es el MO un sustituto en trabajos minuciosos de investigación del subsuelo?
- Las restricciones en asuntos legales, contractuales y de aseguramiento de la calidad pueden obstaculizar la aplicación del MO.

En un intento por resolver estas preocupaciones, Szavits-Nossan (2006) propone las figuras 2, 3 y 4, las cuales presentan tres diferentes casos hipotéticos simplificados, A, B y C, que muestran el cambio de los valores esperados de un parámetro del suelo, que rige el diseño, tales como el avance de los trabajos de construcción y los nuevos datos de observación disponibles. Dado que el valor del parámetro (o su efecto en la estructura) es incierto, se anticipan los límites superior e inferior seguidos desde el inicio hasta el final del proceso de construcción. Sus valores en cualquier momento son anticipados usando todos los datos disponibles e información hasta ese momento, incluyendo la investigación del suelo y observaciones, y utilizando el modelo conceptual elegido (intuitivo o estadístico), que define los valores superior, inferior y más probables de los parámetros.

Szavits-Nossan (2006) explica que el rango entre los límites superior e inferior representa la incertidumbre, que abarca el componente basado en el conocimiento, así como el componente relacionado con la variabilidad natural del suelo. Se asume que la incertidumbre decrece, debido a la disminución de su componente basado en el conocimiento, a medida que avanza la construcción, y se dispone de nuevos datos de observación. El valor más probable del parámetro decae en algún lugar entre sus límites superior e inferior. Los tres casos descritos en las figuras 2, 3 y 4 se refieren a tres posibles situaciones, que dependen de la información recopilada e interpretada a partir de los datos de observación:

- Caso A: Donde el límite inferior y el valor más probable aumentan.

- Caso B: Donde el límite inferior aumenta, pero el valor más probable disminuye.
- Caso C: Donde ambos valores disminuyen.

No se sabe cuál de los casos ocurrirá antes del inicio de las obras de construcción.

Szavits-Nossan (2006) explica que en el enfoque de Peck para el MO, el diseño sigue el valor más probable, mientras que en el enfoque de Powderham, el diseño sigue el límite inferior (o un valor cercano a dicho límite). El diseño convencional no se basa en datos de observación y permanece sin cambios durante la construcción, por lo tanto, sigue el valor inicial del límite inferior anticipado del parámetro del suelo que gobierna. El diseño convencional es seguro, pero poco económico, para los casos A y B. El caso C es la pesadilla de un ingeniero, ya que puede resultar peligroso cuando el margen de seguridad es pequeño. Szavits-Nossan (2006) plantea que los tres casos pueden llegar a ser peligrosos en el enfoque de Peck cuando el margen de seguridad es pequeño, mientras que el enfoque de Powderham es siempre seguro para los casos A y B. También es seguro para el caso C, siempre que haya tiempo suficiente para instalar las medidas de contingencia. Por lo tanto, el enfoque de Powderham es más adecuado con respecto a la seguridad. El enfoque de Peck exigiría un margen de seguridad mayor que el Powderham.

En cuanto al margen de seguridad que se debe utilizar en el diseño del enfoque de Powderham para el MO, Szavits-Nossan (2006) argumenta que ninguna etapa en el proceso de construcción puede ser individualizada. El margen de seguridad solo tiene en cuenta el límite inferior anticipado presente del parámetro de suelo que gobierna, y el tipo de obras (temporal o permanente) como en el caso del diseño convencional, donde el valor preciso del parámetro del suelo que rige es conocido de antemano.

En cuanto a las diferencias entre la serviciabilidad y los estados límites (falla), Szavits-Nossan (2006) afirma que la respuesta a la pregunta de la idoneidad del MO radica en los tipos de datos que pueden ser observados y medidos in situ. Aunque se puedan medir desplazamientos, giros, deformaciones, esfuerzos y presiones de poro, y por lo tanto controlar los estados límites de servicio, la resistencia en general y aquella relacionada con los parámetros (capacidad portante, etc) no pueden ser observadas sin fallas inducidas. Por lo tanto, en general, sería difícil (o tal vez imposible) modificar un parámetro inicialmente previsto como el límite inferior de resistencia (obtenido a partir de trabajos anteriores de investigación del subsuelo) a medida que se tengan más observaciones disponibles durante la construcción. Si este es el caso con una resistencia relacionada con el parámetro del suelo que rige el diseño, el MO se reduciría al diseño convencional. Este es particularmente el caso para el comportamiento de un material frágil. A continuación se muestran las figuras 2, 3 y 4:

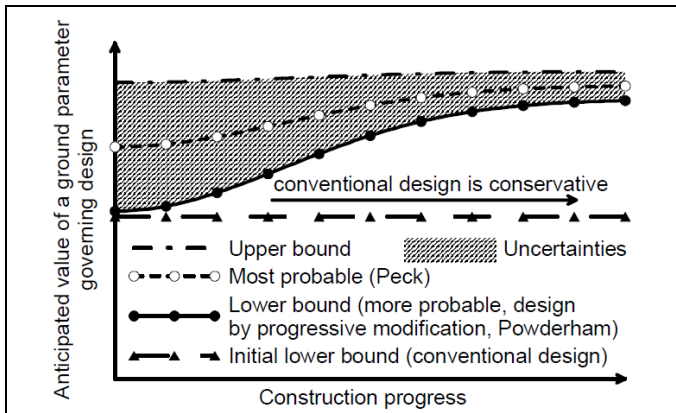


Figura 2. Caso A: El valor anticipado más probable y el límite inferior del parámetro del suelo que rige el diseño se **incrementan** con el avance de la construcción.

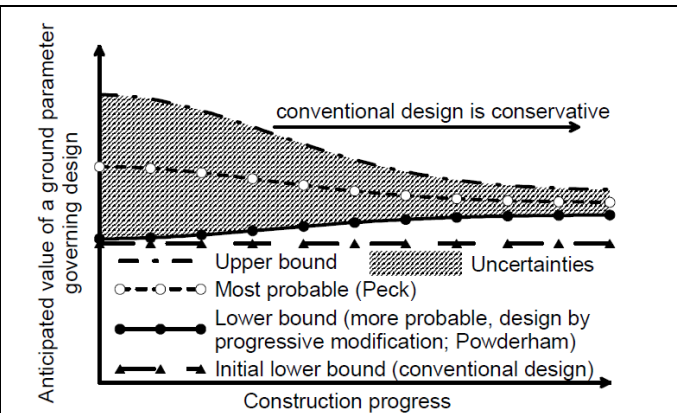


Figura 3. Caso B: El límite inferior del parámetro del suelo que rige el diseño se **incrementa**, mientras que el valor anticipado más probable **decrece** con el avance de la construcción.

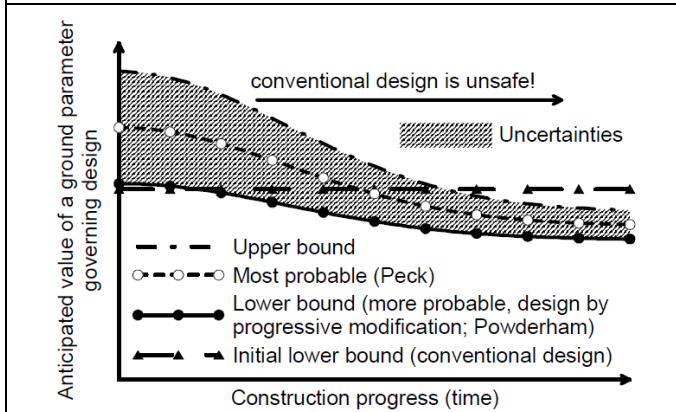


Figura 4. Caso C: El valor anticipado más probable y el límite inferior del parámetro del suelo que rige el diseño **decrecen** con el avance de la construcción.

Figuras 2, 3 y 4. Casos hipotéticos en el MO
Fuente: Tomado de A. Szavits-Nossan (2006), Universidad de Zagreb, Croacia.

Partiendo de estos argumentos, Szavits-Nossan (2006) concluye que el MO es el más adecuado para controlar los estados límites de servicio cuando ellos rigen el diseño. Es aplicable, pero menos adecuado, para controlar los estados límites últimos (falla) en materiales dúctiles que presentan grandes deformaciones que indican la proximidad de la falla, pero no para materiales frágiles que presentan fallas progresivas y no hay tiempo para aplicar medidas de contingencia, por ello si se aplicara en dichos materiales se reduciría al enfoque de diseño convencional. Este último caso estaría representado por las curvas de límite inferior en las Figuras 2, 3 y 4, que tienen una clara disminución repentina.

Szavits-Nossan (2006) afirma que el diseño en ingeniería geotécnica en gran medida se basa en trabajos minuciosos de investigación de subsuelo. El MO no es la excepción, ya que su uso genera grandes costos adicionales en comparación con el diseño convencional. Un análisis exhaustivo de los costos, la confiabilidad y los riesgos inducidos teóricamente daría una proporción equilibrada entre los esfuerzos que se realizan en los trabajos de investigación del subsuelo y los esfuerzos para implementar el MO, sin embargo su confiabilidad parece dudosa en la actualidad.

Las restricciones en asuntos legales, contractuales y de aseguramiento de la calidad podrían dificultar el uso del MO. Sin embargo, si se presta la debida atención a dichas limitantes y existe interés mutuo entre las partes involucradas, se pueden encontrar soluciones viables (descrito por Muir Wood, 1990 y Powderham, 1996).

4. CONDICIONES DEL MO

Según Baars & Vrijling (2005), con el fin de poder implementar adecuadamente el MO, se deben satisfacer las siguientes diez (10) condiciones generales:

- 1) El MO implica cambios de diseño durante la construcción que no deben ser excluidos de los aspectos legales y/o contractuales.
- 2) Debe haber una considerable incertidumbre sobre las condiciones reales de campo.
- 3) La condición de incertidumbre (epistémica) debe ser de alguna manera observable durante la construcción.
- 4) Si la resistencia del suelo es la condición de incertidumbre, entonces el comportamiento de los suelos no debe ser frágil. Por lo tanto, después de alcanzar su valor máximo, la resistencia del suelo no debe disminuir repentinamente.
- 5) Las condiciones de campo desfavorables, esperadas, o favorables deben conllevar a una diferencia apreciable en el costo o riesgo de la estructura o construcción.
- 6) El diseño de la estructura puede ser adaptado, simplificado o reforzado después de obtener los datos de observación.
- 7) Esto significa que la construcción se compone de por lo menos dos etapas (pero preferiblemente más).
- 8) El tiempo de respuesta para monitoreo e implementación debe ser adecuado para el control de la obra.
- 9) Si la construcción se inicia con una estructura más ligera, el ingeniero tiene que estar seguro de que durante la primera etapa no se presentarán cargas máximas, las cuales llevarán a la estructura a un estado de falla antes de que pueda ser reforzada (ver punto 8).
- 10) Los costos de cambiar la estructura (costos adicionales) deben ser menores que el beneficio (ahorros debidos a una estructura más ligera).

Baars & Vrijling (2005) afirman que el punto 3 relacionado con la condición de incertidumbre de campo (datos de observación) es el más problemático para casos geotécnicos, ya que los datos de observación deben conducir en el momento oportuno a información específica de una capa específica de suelo. (Por ejemplo, el asentamiento de un terraplén depende de la rigidez, la permeabilidad y la fluencia de cada capa de suelo, por lo que el asentamiento no es a menudo un buen indicador del grado de consolidación de una capa en particular). Por lo tanto este punto está relacionado con el punto 4, concerniente al problema de comportamiento frágil. En caso de una falla repentina no hay tiempo suficiente para reforzar la estructura entre el primer indicio de colapso y el momento del colapso. Si las primeras nueve (9) condiciones generales se cumplen, el MO puede ser implementado. De acuerdo con la condición 10, esto no siempre será rentable, sin embargo, por ejemplo, si las condiciones reales de incertidumbre epistémica pueden ser resueltas con investigación adicional del subsuelo y si esto es más barato que el sistema adicional de monitoreo del MO, el método de diseño convencional siempre será más barato. Por lo tanto, la elección del MO depende teóricamente de un análisis de riesgo financiero de acuerdo con lo planteado por Benjamin and Cornell (1970).

5. EL METODO OBSERVACIONAL EN EL FUTURO

Rocca (2009) plantea que el desarrollo rápido de la electrónica y de las comunicaciones facilitará grandes avances en equipamiento de laboratorio y de terreno, en las aproximaciones de monitoreo y de observación y en la posibilidad de reconocimiento remoto de los sitios. Todo esto contribuirá con el robustecimiento del MO. Sin embargo la experiencia y el empirismo continuarán siendo esenciales en el diseño geotécnico, tal como lo afirman Simpson y Tatsuoka (2008). El MO va a contar con un refuerzo sustancial por parte de las nuevas tecnologías y del uso creciente de las probabilidades que posibilitará el empleo de la actualización bayesiana. Se aclara que en la inferencia bayesiana las evidencias u observaciones se emplean para actualizar o inferir la probabilidad de que una hipótesis pueda ser cierta (Berger, 1999); su carácter es estadístico. Rocca (2009) vislumbra que en el futuro la aplicación del MO será más confiable y popular. Con el paso del tiempo, la inclinación a licitar grandes proyectos con la ingeniería incluida favorecerá el uso del MO, ya que su implementación requiere de flexibilidad que no la da el sistema proyecto - construcción en forma separada. Rocca (2009) añade que la solución ingenieril a casos complejos que siempre han existido, se ha formalizado a través del MO. Su aplicación tiene asegurado el futuro dentro de las tecnologías de la información y la comunicación (TICs), aunque está muy supeditada a condiciones contractuales flexibles y su éxito, al tipo de falla.

Santamarina (2006) estudia los posibles cambios de paradigma en la geotecnia y hace referencia al MO proponiendo cambios en sus fases convencionales:

De:	A:
<i>Diseño + Construcción</i> →	<i>Prediseño + Construcción + Monitoreo + Adaptación</i>

Peck (1966) ha reconocido que la alternativa del enfoque diseño-construcción fue adoptada instintivamente en situaciones complejas y de allí surgió la metodología del MO. Santamarina (2006) visualiza la aplicación del MO en la era de la información y lo resume a partir de los siguientes pasos:

- 1) Evaluar las condiciones, establecer hipótesis de trabajo, y producir un diseño básico.
- 2) Preconcebir posibles desviaciones, acciones alternativas y modificaciones del diseño.
- 3) Seleccionar los parámetros que se deben medir durante la construcción y diseñar el sistema o red de sensores para favorecer la "inversibilidad" de información crítica.
- 4) Una vez que se inicie la construcción, recolectar los datos e "invertirlos" para extraer la información necesaria para la toma de decisiones.
- 5) Adaptar el diseño según sea necesario. El último paso consiste en la implementación de un bucle de realimentación continua en toda la fase de construcción.

Se aclara que un problema inverso es un marco general que se utiliza para convertir las mediciones observadas en información sobre un objeto o sistema físico de interés. A esa acción se le llama inversión. Según Finno y Carvello (2005) un procedimiento de análisis inverso utiliza los datos de monitoreo para actualizar las predicciones establecidas.

Santamarina (2006) conceptúa que los problemas inversos están siempre presentes en el procesamiento de datos. Los datos experimentales pueden requerir inversión para determinar el valor buscado (cantidades no medidas). En la ingeniería geotécnica existen múltiples ejemplos de problemas inversos descritos por Stokoe et al. (1994), Glaser and Baise (2000) & Grimstad et al. (2003). El cuadro 1 compara las fases de diseño y construcción bajo los viejos y nuevos paradigmas.

Santamarina (2006) resalta que los avances en la era de la información nos permitirán aplicar esta metodología no solo a situaciones complejas, sino a casi todos los proyectos de construcción.

Cuadro 1. Posibles cambios de paradigma del MO en las fases de diseño y construcción

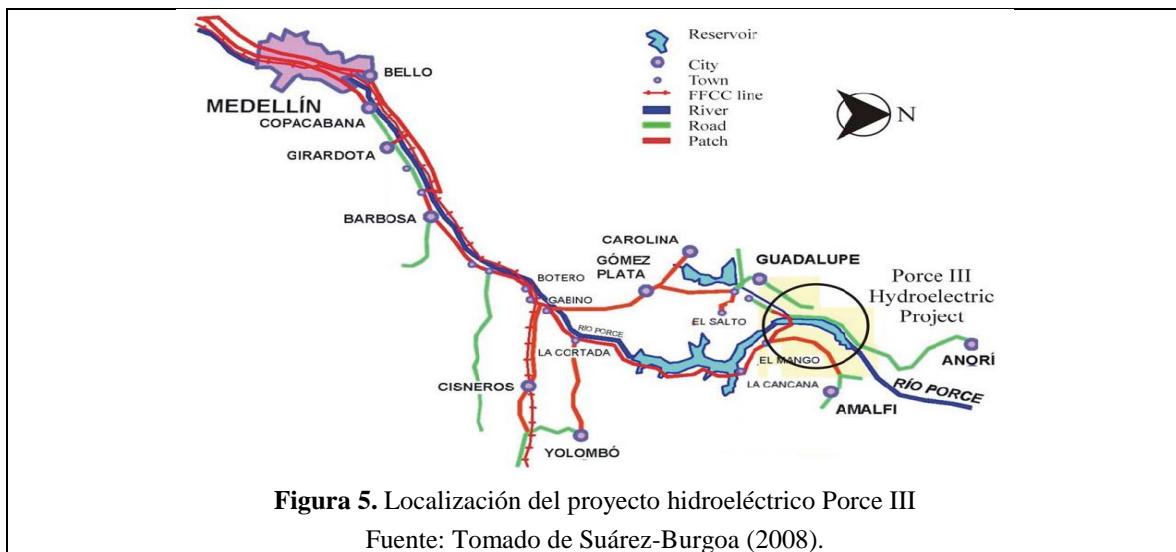
Aspectos relacionados	Viejos paradigmas	Nuevos paradigmas
Filosofía	Diseño seguro	Diseño adecuado / óptimo
Sistema de sensores	Mínimo	Distribuido espacialmente, multi-modo
Durante la construcción	Mediciones esporádicas	Monitoreo continuo
Información inferida	Solo datos medidos	Proceso de inversión exhaustiva
Costo total de construcción	Mayores que los requeridos	Ahorros potenciales importantes
Demanda de tiempo	Construcción limitada	Construcción limitada
Seguridad	Probablemente sobrediseñado	Seguridad conocida y adecuada

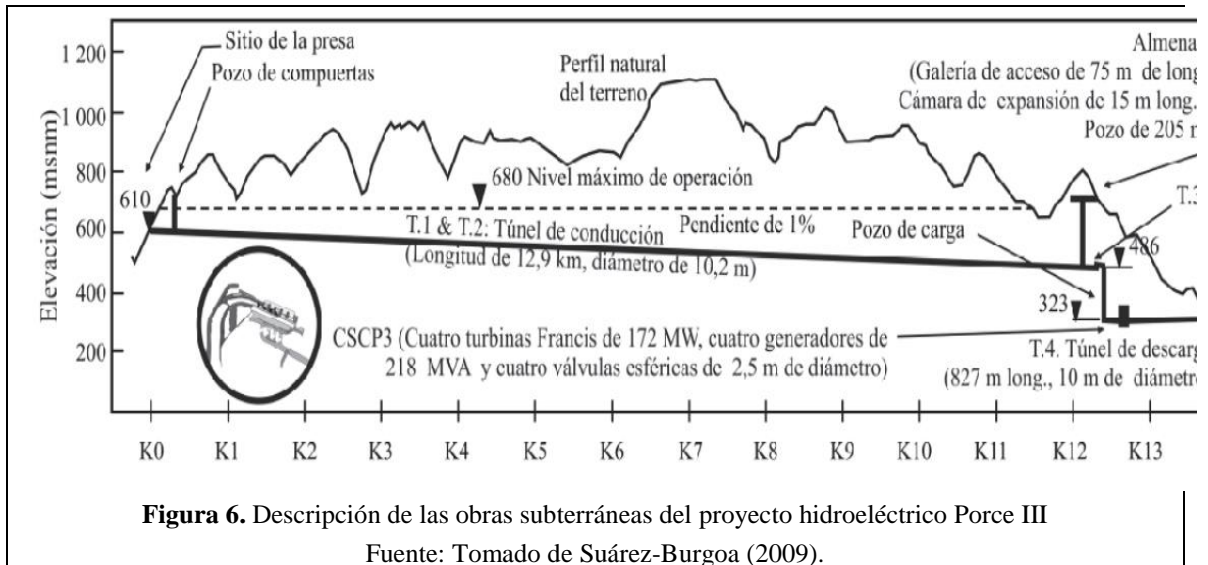
Fuente: Santamarina (2006)

6. CASO DE APLICACIÓN DEL MO:

EXCAVACIONES SUBTERRANEAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PORCE III

El MO se utilizó como herramienta para describir el comportamiento mecánico del macizo rocoso de las grandes excavaciones subterráneas del proyecto hidroeléctrico Porce III. Citando a Suárez-Burgoa (2009), este proyecto está localizado en el norte de los Andes centrales, entre los municipios de Anorí, Amalfi y Gómez Plata, del departamento de Antioquia, Colombia (ver figura 5). El proyecto, propiedad de las Empresas Públicas de Medellín, EPM (2005), consiste en la construcción de una presa con su embalse y las instalaciones de generación y transmisión. El sistema de generación de energía se proyectó para una potencia instalada de 660 megavatios (MW), con el objeto de dar 3605 GWh/año, al entrar en operación en el año 2011. La presa es una de enrocado con cara de concreto con una altura de 151 m, una longitud de cresta de 426 m y ocho metros de ancho. El volumen total del embalse es alrededor de 170 millones de m³ de agua, y el almacenaje útil fue calculado en 127 millones de m³ de agua, con un área de 3698 Km². Los trabajos subterráneos pueden dividirse en cuatro principales grupos de sistemas: aducción (conducción), de disipación de golpes de ariete (almenara), de generación y de descarga. Estos trabajos subterráneos hacen un volumen total de excavación de 1,5 millones de m³. (Figura 6).



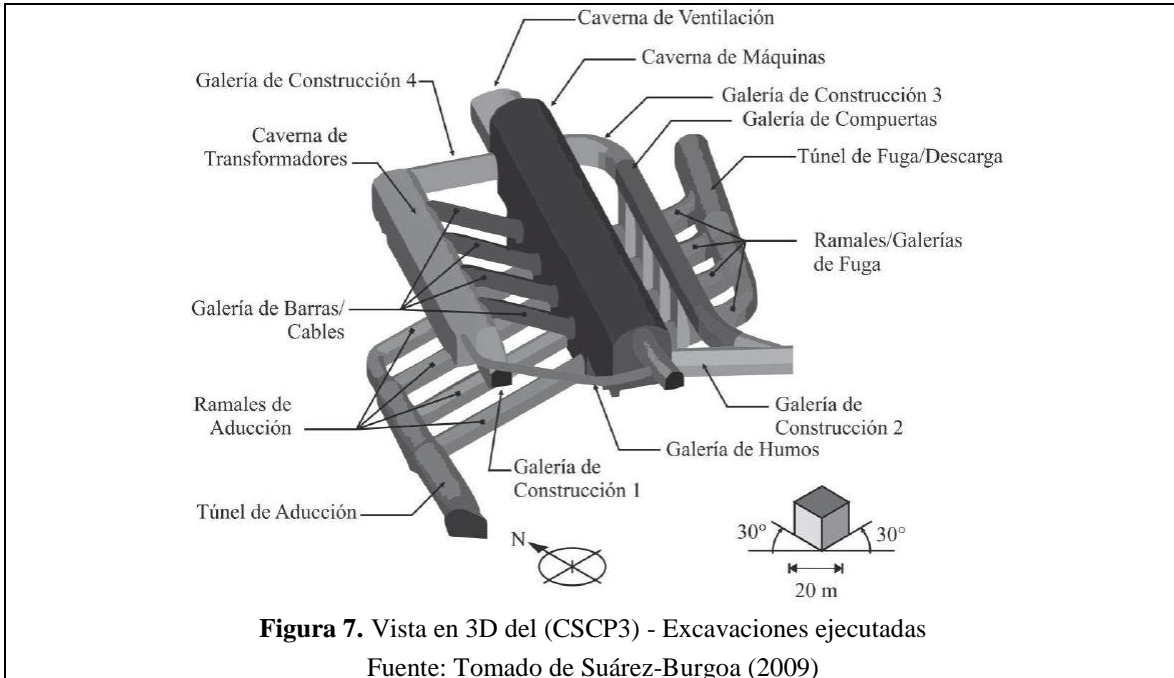


6.1. GEOLOGÍA DEL AREA DE ESTUDIO

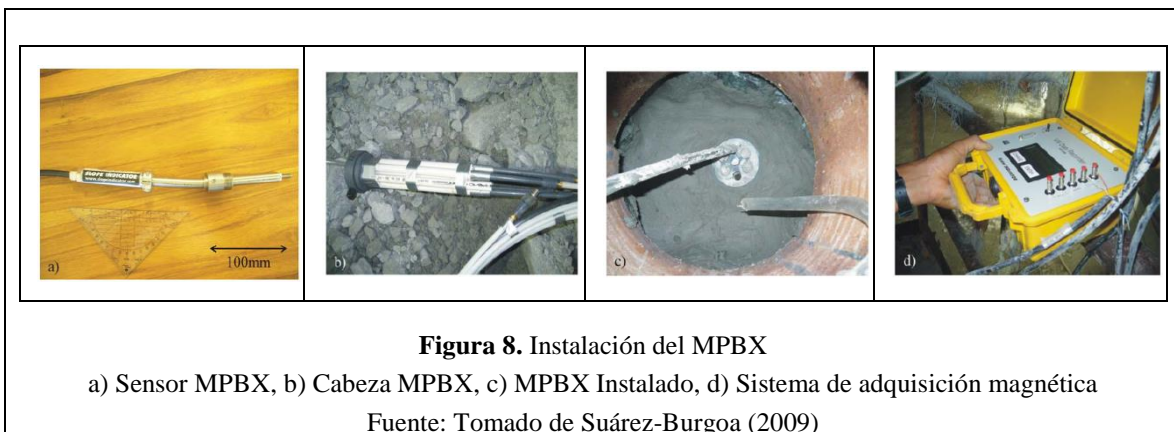
Según Suárez-Burgos (2009), el material presente en el macizo rocoso que alberga el Complejo Subterráneo de la Central de Porce III (CSCP3) es un neis de textura bandeada lepidoblástica. El origen del macizo rocoso es de metamorfismo regional del Paleozoico temprano; posteriormente sufrió una intensa descompresión, fallamientos normales, inversos y de desplazamiento desde el Cretácico tardío; convirtiéndolo en una roca de metamorfismo dinámico. La intensa presión desarrollada durante el metamorfismo dinámico causó desplazamientos en el macizo rocoso y el realineamiento de los minerales paralelamente a la dirección del movimiento. Restrepo et al. (1991) destaca que el macizo rocoso sufrió también la influencia tectónica e hidrotermal, debido a la intrusión del Batolito Antioqueño de 7221 Km² (cuyo borde más cercano está localizado a aproximadamente 20 Km al sudoeste del CSCP3 y que tiene una datación de 63 a 90 millones de años (período Cretácico tardío).

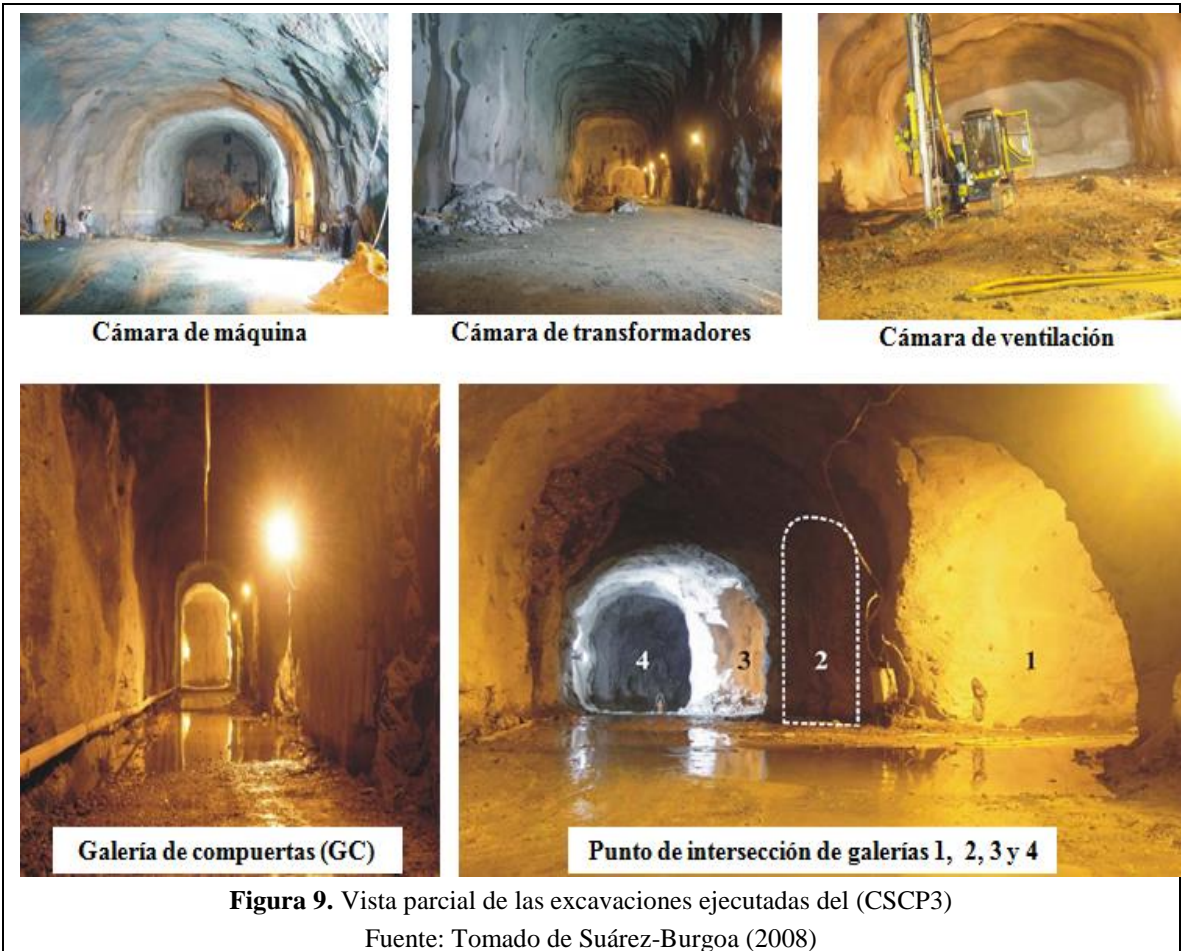
6.2. COMPLEJO SUBTERRÁNEO DE LA CENTRAL DE PORCE III (CSCP3)

Este complejo está compuesto por las cavernas de máquinas, transformadores y de ventilación, cuatro galerías de barras/cables, una galería de compuertas con cuatro pozos de compuertas, cuatro ramales/galerías de fuga, un túnel de fuga (descarga), una galería de humos, una galería de acceso a la caverna de máquinas, galería de acceso y construcción número 1 (galería de acceso a la caverna de transformadores), y galerías de acceso y construcción números 2 a 5 (figura 7).



Suárez-Burgoa (2009) explica que en el CSCP3 se ha empleado la técnica de excavación por etapas con el método de perforación y voladura somera controlada (i. e. método convencional). Los sistemas de soporte en las cavernas del CSCP3 fueron instalados durante el proceso de excavación. Se propuso un único sistema de soporte: Concreto lanzado - malla - anclajes pasivos - concreto lanzado, y en función de requerimientos particulares se colocaron anclajes postensados (anclajes activos). El sistema de instrumentación se instaló para monitorear los desplazamientos y deformaciones en el macizo rocoso debidos a las excavaciones y consistió en puntos superficiales de desplazamiento de convergencia (SCDP), líneas superficiales de desplazamiento de convergencia (SCDL), extensómetros de hoyo de punto sencillo (SPBX) y extensómetros de hoyo de puntos múltiples (MPBX). La instrumentación fue localizada en el túnel de conducción y sus ramificaciones; en los pasos de la galería, en las cámaras de transformadores, de la casa de máquinas y de ventilación y en túneles y galerías de fuga.





6.3. APLICACIÓN DEL OMA

Dentro del sistema de obras subterráneas excavadas en el Proyecto Hidroeléctrico Porce III, se encuentra el túnel de conducción superior. De acuerdo con Suárez-Burgoa et al. (2009), en este túnel se emplearon datos obtenidos del proceso de levantamiento de discontinuidades del macizo rocoso, para analizar el comportamiento mecánico del macizo rocoso a través de modelaciones numéricas; como parte de una introducción al método de Aproximación por Modelamiento Observacional (OMA), el cual es un refinamiento del MO. Parte de la premisa de que el proceso "final" de diseño, continúa durante toda la fase de excavación de la obra.

A continuación Suárez-Burgoa et al. (2009) describen en forma de procedimiento, la manera de aplicación del OMA con base en la experiencia del proyecto hidroeléctrico Porce III.

(1) Este tipo de aproximación debe iniciar como mínimo con la aplicación de los datos obtenidos en el diseño "final" al comienzo de la obra. Muchas veces durante el tiempo entre la culminación del diseño "final" y el inicio de la construcción pueden modificarse muchas de las condiciones inicialmente establecidas. De este modo, es necesario hacer una verificación de que las condiciones expuestas en la fase anterior se mantengan antes del inicio inmediato de la obra.

(2) Posteriormente, deben definirse los diversos posibles comportamientos mecánicos del macizo rocoso y los factores que pueden hacer que ese comportamiento varíe (e.g. orientación relativa de las discontinuidades, condiciones de agua subterránea, condiciones de los esfuerzos naturales).

(3) Definidos los diferentes tipos de comportamiento mecánico, se debe seleccionar el tipo y definir la cantidad y ubicación de los ensayos de campo, extracción de muestras con sus respectivos ensayos de laboratorio y definir la cantidad y ubicación de la instrumentación que será necesaria para comprender aquel anticipado comportamiento.

(4) Enseguida se hace una primera modelación. En esta primera etapa de planeación y diseño, se deben emplear análisis probabilistas, con el objeto de tomar en cuenta la variabilidad y la incertidumbre del modelo geológico y geotécnico. En esta fase se analiza el comportamiento del sistema constructivo y del sistema de soporte que se definió inicialmente, para cada tipo de comportamiento mecánico anticipado, y con el modelo geológico-geotécnico se modela cada comportamiento definido.

(5) Como diseño "definitivo-preliminar" se refiere a un diseño definitivo pero solo de la fase preliminar, sabiendo que el proceso de diseño como tal sigue en curso hasta la fase final de la excavación de la obra. En esta fase se debe realizar un análisis de riesgos. El análisis de riesgos se refiere al proceso de encontrar la probabilidad de que lo anticipado en el proceso de diseño "definitivo-preliminar" se cumpla. De encontrarse situaciones de alto riesgo, deben plantearse sistemas de alerta, planes de contingencia, y tener todos los medios físicos y económicos para afrontar la posible eventualidad. La definición del programa de instrumentación está ligada a la programación de los planes de alerta y contingencias.

(6) Definido esto, se debe estimar un rango de cantidades de obra, tiempos de ejecución, personal, maquinaria, equipos e instrumentos necesarios, incluyendo los sobrecostos en dinero y tiempo de los planes de alerta y de contingencia posibles. Aquí se define el plan de construcción, que incluye los límites de las posibles variaciones o modificaciones que pueden presentarse durante la excavación.

(7) El siguiente paso es el seguimiento durante la excavación. Se deben observar, por ejemplo, ciertos indicadores de cambio de esfuerzos: fallas de cuñas, desplazamientos, desprendimientos, flujo de agua, deformaciones de hoyos de perforación, medidas de instrumentos; que es parte de la metodología empírica, pero con un gran refuerzo presupuestario y logístico.

Los ensayos de campo de seguimiento son más conocidos como ensayos de control de calidad. De acuerdo al tipo de obra y los elementos que intervienen en el macizo rocoso (e.g. anclajes, malla, concreto proyectado) se acostumbran realizar los siguientes ensayos de control de calidad: resistencia de anclajes pasivos, resistencia a tracción de anclajes activos con la llave de torque, resistencia de tracción por celdas de presión, ensayo de anclajes de cable, estimación visual de concreto proyectado, ensayos de arranque de concreto proyectado, ensayo de la caja de molde para concreto proyectado y núcleos de concreto proyectado. No obstante, estos ensayos de campo son solo de control de calidad. Para esta aproximación, es primordial también hacer ensayos de control del comportamiento del macizo rocoso, por lo cual deben realizarse ensayos de determinación del módulo elástico, estimación de esfuerzos locales y globales, como mínimo.

(8) Durante el proceso de obtención de datos, el siguiente paso de procesamiento es de suma importancia. Este consiste en centralizar las lecturas obtenidas, interpretar y presentar los resultados procesados. El procesamiento es un trabajo de escritorio que está íntimamente ligado al

empleo de sistemas de información para el almacenamiento y manejo de los datos de entrada, la implementación de los modelos de interpretación, y los sistemas para presentar los resultados.

(9) No obstante, el trabajo de procesamiento no termina en la presentación de los resultados. Estos datos generalmente deben conseguir la obtención de conclusiones o ser la entrada para un trabajo de modelación determinado, con el fin de decidir nuevas acciones y también definir nuevos diseños, que muchas veces pueden ser conceptualmente opuestos a los inicialmente establecidos. Esto implicaría la actualización de todos los datos y la nueva elaboración de planos, que se traducirían al final de todo el proceso en los planos "as build" o "record", (i.e. planos finales del cómo se construyó la obra), comúnmente ausente en toda obra de esta naturaleza. Finalmente, el método OMA plantea también en ciertas circunstancias el seguimiento durante el servicio de la obra.

CONCLUSIONES

El método observacional (MO) proporciona un enfoque distinto hacia el diseño. Aunque en muchos países todavía no está reconocido como una práctica de diseño por la falta de comprensión del mismo, este se ha convertido en una herramienta valiosa, cuyo valor no se puede dimensionar a menos que el ingeniero conozca a fondo su problema y tenga la autoridad para actuar con rapidez en sus decisiones y conclusiones.

La participación activa de los equipos de trabajo involucrados en la aplicación del MO de un proyecto de ingeniería dado es un factor decisivo para el éxito del mismo. Es importante que haya buena compenetración entre los equipos de diseño y construcción, una comunicación clara, sencilla y fluida entre todas las partes involucradas y disposiciones contractuales adecuadas entre el cliente, el diseñador y el contratista.

Si el tiempo de duración de un proyecto se pudiera predecir con exactitud, el procedimiento de observación no sería utilizado. La posibilidad de tener que reducir la velocidad de construcción es un inconveniente inherente en el MO. Esto puede causar pérdidas financieras e incluso puede hacer que el financiamiento del proyecto sea difícil de planear. Finalmente en algunos casos la probabilidad de enfrentarse con las condiciones más desfavorables puede ser tan alta que el procedimiento no valga la pena en términos de costos.

A pesar de sus inconvenientes, El MO ofrece muchas posibilidades de grandes ahorros de tiempo y/o dinero y puede proporcionar el aseguramiento de la construcción sin las penalidades financieras ligadas a la seguridad excesiva. Una parte esencial del MO es la visualización de todas las eventualidades posibles y la preparación anticipada de los cursos de acción para hacer frente a cualquier situación que se presente. Solo si esto se hace se puede decir que la aplicación del procedimiento observacional se justifica.

El MO solo puede usarse durante un proyecto de construcción si el diseño puede ser alterado, por lo tanto esta característica introduce complicaciones en los aspectos contractuales relacionados.

Los casos hipotéticos planteados por Antun Szavits-Nossan sirven para entender el cambio de un parámetro dado de suelo que rige el diseño. Aunque los casos presentan ciertas simplificaciones, se refieren a tres posibles situaciones que dependerán de la información recopilada e interpretada a partir de los datos de observación y del modelo conceptual que defina los valores superiores, inferiores y más probables de los parámetros. Se recomienda tener especial cuidado con el tratamiento del caso C, el cual puede resultar peligroso cuando el margen de seguridad sea pequeño.

El MO es el más adecuado para diseños que se rigen por estados límites de servicio. Es aplicable, pero menos adecuado para diseños que se rigen por estados límites últimos (falla) con comportamiento dúctil, y es inadecuado para estados límites últimos con comportamiento frágil, cuando el MO se reduciría al nivel del método de diseño convencional.

En relación con las diez (10) condiciones generales de Baars & Vrijling, que se deben satisfacer para poder implementar el MO, se resalta que si las primeras nueve (9) condiciones se cumplen, el MO puede ser implementado, sin embargo se debe realizar un análisis de riesgo financiero que defina la rentabilidad de su implementación.

Mirando hacia el futuro, la aplicación del MO será más confiable y popular, teniendo en cuenta el auge de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (TICs) y el uso creciente de las probabilidades que posibilitará el empleo de la actualización bayesiana en las etapas de diseño y construcción como una formalización de la aproximación observacional.

En el túnel de conducción superior adelantado durante del proyecto hidroeléctrico Porce III se analizó el comportamiento mecánico del macizo rocoso a través de modelaciones numéricas; como parte de una introducción al método de Aproximación por Modelamiento Observacional (OMA). Citando a Suárez-Burgoa (2009), la aplicación del OMA en el caso de estudio evidencia la necesidad de alcanzar estados apropiados de práctica y de tecnología, para que los proyectos de ingeniería brinden información oportuna y de alta calidad, de acuerdo a las exigencias de entrada de datos que los modelos numéricos necesitan; para finalmente llegar a un diseño adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

Ángel, G. (2012). Monitoreo e instrumentación. Diapositivas de clases de la asignatura investigación del subsuelo e instrumentación. Maestría en Ingeniería - Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Allagnat, D. (2005). La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

Beacher, G. B., Christian, J. T. (2003). Reliability and statistics in geotechnical engineering. John Wiley & Sons Ltd. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

BSI (2004). Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules. BS EN 1997-1:2004. British Standards Institution, London. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

Benjamin, J.R. and Cornell, C.A. 1970 Probability, Statistics and decision for civil engineers McGraw-Hill, New York. In: Van Baars, S. & Vrijling, J.K. (2005). Geotechnical applications and conditions of the observational method. University of Technology Delft, Faculty of Civil Engineering. HERON, Vol. 50, No 3 (2005). pp. 155-172.

Berger, J.O. (1999) Statistical decision theory and bayesian analysis. Second Edition. Springer Verlag, New York.

Christian, J. T. (2004). Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing? 39th Terzaghi Lecture. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. ASCE, 130 (10), 985-1003. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the observational method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

Clayton, C. R. I. (2001). Managing geotechnical risk: Improving productivity in UK building and construction. Thomas Telford, London. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

EPM. (2005), Construcción de la conducción, central subterránea y obras asociadas, información de geología y geotecnia. Empresas Públicas de Medellín, Vol. 5 (1-2), Medellín, Colombia. In: Suárez-Burgoa, L.O. (2009). Comportamiento mecánico del macizo rocoso del complejo subterráneo de Porce III. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, 2010. Vol. 19, N° 28. pp. 39-54.

Finno, R. F. and Calvello, M. (2005), Supported excavations: The observational method and inverse modeling. Disponible en Internet: URL: www.iti.northwestern.edu/publications.

Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B. (2004).

Designers' guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design – General rules. Thomas Telford, London. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the observational method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

Glaser, S.D., and Baise, L.G., (2000), System identification estimation of damping and modal frequencies at the lotung site, soil dynamics and earthquake engineering, vol. 19, 521-531. In: Santamarina, J.C. (2006). Geotechnology: Paradigm shifts in the Information Age.

Grimstad, A.A., Mannseth, T., Naevdal, G. and Urkedal, H. (2003). Adaptive multiscale permeability estimation, computations geosciences, vol. 7, pp. 1-25. In: Santamarina, J.C. (2006). Geotechnology: Paradigm shifts in the Information Age.

J. J. Restrepo, J. F. Toussaint, H. González, U. Cordani, K. Kawashita, E. Linares and C. Parila, (1991) Precisiones geocronológicas sobre el occidente colombiano. En: Simposio sobre magmatismo andino y su marco tectónico. Memorias (Manizales), pp. 1–22. In: Suárez-Burgoa, L.O. (2009). Comportamiento mecánico del macizo rocoso del complejo subterráneo de Porce III.

Muir Wood, A. (1987). To NATM or not to NATM, Felsbau, 5 (1), 26-30. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method.

Muir Wood, A. (1990). The observational method revisited. In: Proceedings of the 10th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, 2, 37-42.

Muir Wood, A. (2000). Tunnelling: Management by design. E & FN Spon, London. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method.

Nicholson, D. P., Dew C. E., and Grose W. J. (2006) “ A systematic “Best Way Out” approach using backanalysis and the principles of the observational method. In: Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, N. & Maertens, J. (2005). The Observational Method in Geotechnics. GeoTecNet Delft.

Nicholson, D, Tse, C and Penny, C. (1999b). The observational method in ground engineering - principles and applications. Report 185, CIRIA, London. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

Nicholson, D., Tse, C. and Penny, C. (1999a). The observational method in ground engineering – principles and applications. Report 185, CIRIA, London. In: Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, N. & Maertens, J. (2005). The Observational Method in Geotechnics. GeoTecNet Delft.

Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, N. & Maertens, J. (2005). The observational method in geotechnics. GeoTecNet Delft.

Peck, R.B. (1966). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. 9th Rankine Lecture, Géotechnique, Vol. 19, pp. 171-187.

Peck, R.B. (2001) The observational method can be simple, Proc. Instn. Civ. Engrs., Geotech Engng, p. 2. In: Powderham, A. J. (2002 a). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69.

Peck, R.B. and Powderham, A.J. (1999). Talking point, ground engineering, Vol. 32, No. 2, p. 3. In: Powderham, A. J. (2002 a). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69.

Powderham, A.J. (1994) An overview of the observational method: development in cut and cover and bored tunnelling projects. Geotechnique 44, No. 4, pp. 619-636. In: Powderham, A. J. (2002 a). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69.

Powderham, A.J. (1998) The observational method – application through progressive modification; Proc. Journal ASCE/BSCE, Vol. 13, No. 2, pp. 87-110. In: Powderham, A. J. (2002 a). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69.

Powderham, A. J. (2002 a). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69.

Powderham, A. J. (2002 b). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method.

Powderham, A. J. and Nicholson, D. P. (1996) “The observational method in geotechnical engineering” ICE, Thomas Telford, London. In: Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, N. & Maertens, J. (2005). The Observational Method in Geotechnics. GeoTecNet Delft.

Powderham, A.J. and Rutty, P.C. (1994) The observational method in value engineering. Proc. 5th Int. Conf. Piling Deep Fdns Bruges. In: Powderham, A. J. (2002 a). The observational method—learning from projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 155 (1), pp. 59-69.

Rocca, R. (2009). La evolución a largo plazo de la ingeniería geotécnica. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 9(1-2). pp. 56-78.

Santamarina, J.C. (2006). Geotechnology: Paradigm shifts in the Information Age. GeoCongress 2006 Geotechnology in the Information Age. DJ De Grout, JT De Jong, JD Frost, LG Baise, Eds.

Simpson, B. and Tatsuoka, F. (2008). “Geotechnics: the next 60 years”, Geotechnique, Vol. 58, pp. 357-368. In: Rocca, R. (2009). La evolución a largo plazo de la ingeniería geotécnica. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 9(1-2). pp. 56-78.

Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. and Roesset J.M. (1994), Characterization of geotechnical sites by SASW method, Geophysical Characteristics of Sites, ISSMFE, Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, International Science Publishers, New York, pp. 15-25. In: Santamarina, J.C. (2006). Geotechnology: Paradigm shifts in the Information Age.

Suárez-Burgoa, L.O. (2009). Comportamiento mecánico del macizo rocoso del complejo subterráneo de Porco III. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, 2010. Vol. 19, N° 28. pp. 39-54.

Suárez-Burgoa, L.O., Valencia, Y., Ordoñez, O., Navarro, A. & Hidalgo, B. (2009). Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del proyecto hidroeléctrico Porce III, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, N° 26, junio-noviembre, 2009, pp. 69-86. Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia.

Suárez-Burgoa, L.O. (2008). Rock mass mechanical behavior assessment at the Porce III Underground Hydropower Central, Colombia - South America. Master's Degree Thesis in Geotechnical Engineering. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas - Escuela de Ingeniería, Medellín - Colombia, Vol. 1, Main Document, p. 402.

Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the observational method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia. In: Active Geotechnical Design in Infrastructure Development. Logar, J., Gaberc, A., Majes, B. (ed.). Ljubljana : Slovenian Geotechnical Society, 2006. 171-178.

Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley, New York. In: Szavits-Nossan, A. (2006). Observations on the Observational Method. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia.

Van Baars, S. & Vrijling, J.K. (2005). Geotechnical applications and conditions of the observational method. University of Technology Delft, Faculty of Civil Engineering. Heron, Vol. 50, No 3 (2005). pp. 155-172.

