



01190 / 10

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO DEL SOPORTE Y DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO
DE TÚNELES EN MACIZOS ROCOSOS UTILIZANDO REDES
NEURONALES ARTIFICIALES**

TESIS

Como requisito para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta

JOSÉ LUIS RANGEL NUÑEZ

Director de tesis

DR. MIGUEL P. ROMO ORGANISTA

MÉXICO, DF

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

JULIO 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA COPIA NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

15-Jul-02

RECEIVED
BIBLIOTECA
MAY 15 1902

ÍNDICE

Resumen	[iii]
Agradecimientos	[v]
1. Introducción	[1]
Motivación	
Antecedentes	
Objetivo	
Método	
2. Consideraciones para el diseño de túneles en roca	[7]
2.1 Mecanismos de falla probables	
2.2 Caracterización del macizo rocoso	
Caracterización de las discontinuidades	
Caracterización de la roca intacta	
Caracterización del macizo rocoso equivalente	
2.3 Modelado del túnel	
Análisis de túneles estructuralmente inestables	
Análisis de túneles con falla plástica	
2.4 Criterio de estabilidad	
Gráficas adimensionales	
Criterio de estabilidad	
2.5 Seguimiento geotécnico	
Tendencias actuales de la instrumentación	
Problema de control	
Estrategia de control	
Desplazamientos inducidos por heterogeneidades en el terreno	
2.6 Modelado de sistemas dinámicos	
Proceso dinámico	
Sistema ingenieril de rocas	
3. Conceptos básicos de redes neuronales artificiales y lógica borrosa	[47]
3.1 Redes neuronales artificiales	
Estructura	
Tipos de redes neuronales	
Entrenamiento	
Bases de datos	
Análisis paramétrico	
3.2 Lógica borrosa	
Conjunto borroso	
Operaciones lógicas	
Reglas condicionales	
Sistemas difusos	
Lo difuso y lo aleatorio	



3.3	Sistemas neuro-difusos	
	Arquitectura ANFIS	
	Proceso adaptativo	
	Número de funciones de membresía	
	Explosión de reglas	
4.	Aplicaciones de las RNA a la Ingeniería de Túneles	[67]
4.1	Análisis de estabilidad	
	Objetivo	
	Método	
	Resultados	
	Comparación	
	Conclusiones	
4.2	Seguimiento del proceso constructivo	
	Objetivo	
	Método	
	Resultados	
4.3	Evaluación del módulo de deformabilidad a partir del comportamiento observado del túnel	
	Objetivo	
	Método	
	Resultados	
4.4	Comentarios generales	
5.	Conclusiones	[93]
	Referencias	[97]
	Anexo A	[103]
	Anexo B	[107]

RESUMEN

La investigación se centra en el estudio del procedimiento constructivo de túneles excavados en macizos rocosos y en el desarrollo de algoritmos de análisis simples que puedan utilizarse en las etapas de diseño y construcción. Se hace énfasis en la aplicación de la técnica de redes neuronales artificiales y de lógica borrosa a problemas particulares de la ingeniería de túneles.

Considerando las tendencias actuales en observación y control durante la construcción del túnel y los factores principales que rigen su estabilidad, exceptuando la presencia del agua, se desarrollan tres sistemas: uno para el diseño del procedimiento constructivo y soporte de túneles, el segundo para predecir las condiciones de riesgo en los tramos próximos a excavar, y el tercero para estimar el módulo de deformabilidad del macizo rocoso y el factor de plastificación con base en el desplazamiento de la clave y la calidad de la roca observados durante la construcción del túnel.

La estabilidad del túnel durante su construcción y vida útil se define utilizando cuatro criterios: magnitud de desplazamientos y zonas plásticas (métodos numéricos y analíticos), criterios empíricos y estados límite de falla (método simplificado de estabilidad de túneles).

Los sistemas desarrollados se caracterizan por ser modulares, donde se combinan diferentes técnicas, entre ellas destacan las redes neuronales artificiales y la lógica borrosa, las cuales fueron construidas a partir de bases de datos sintéticos generados con modelos numéricos 3D no-lineales y criterios empíricos.

This research focuses on studying the constructive processes of tunnels excavated in rock masses, and on developing new simple design algorithms for the design of tunnels and for controlling the constructive process.

Three systems were developed considering the new control techniques in tunnelling, and the principal factors which govern the overall stability of the excavation: one carries out the design of the constructive process and support of the tunnel, the second one predicts risk conditions during tunnelling, and the last one estimates the deformability modulus of the rock mass and the plastic factor according the observed displacement and quality of the rock around tunnel.

The overall stability of the tunnel is evaluated taking into account four criteria: deformation and plastic zones around tunnel, empirical criteria and limit analyses.

All systems are modular and several methodologies were combined in developing them: artificial neural networks, fuzzy logic, closed solutions and empirical criteria. Some of these methods were designed using a virtual data base, which was obtained using a 3D non linear finite element and finite difference methods.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco los comentarios, contribuciones y el apoyo brindado por los sinodales de la tesis: Ursula Iturrarán V., Francisco Cervantes P., Miguel P. Romo O., Daniel Reséndiz N., Gabriel Auvinet G., Gustavo Ayala M. y Enrique Tamez G.

Agradezco al director de la tesis, Miguel P. Romo O., sus críticas, orientaciones y los recursos asignados.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (proyecto 33032-U), por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Doy gracias a mis amigos que con su apoyo particular, comentarios, críticas, discusiones de café y su conocimiento, hicieron que no solo comprendiera con mayor detalle los temas centrales de esta investigación, sino también sus proyectos técnicos y locuras: Efraín Ovando, Enrique Tamez, Gustavo Ayala, Gabriel Auvinet, Jesús Alberro, Francisco Sánchez Sesma, Federico Mooser, Oscar Luna, Enrique Ibarra, Carlos Carranza, Ernesto Holguin, Alec Dawson, Patric Bruines, Hirozaku Akagi, Jorge Aguirre y Victor Taboada.

Finalmente, doy las gracias a mi madre y a mi hermano por acompañarme, apoyarme y aconsejarme en todo momento.

1 INTRODUCCIÓN

Motivación

Es común que las obras de ingeniería civil se construyan conociendo sólo información parcial sobre las propiedades y el comportamiento de los suelos. La carencia de datos pertinentes se incrementa cuando se trata de túneles en masas rocosas. En estos casos, se tiene un conocimiento fraccionario de los parámetros que afectan la construcción y el revestimiento durante el diseño de la obra. Inclusive, aún durante el proceso constructivo las condiciones geológicas a la elevación del túnel son poco conocidas.

Con el fin de mejorar, al menos parcialmente, esta situación se ha recurrido al uso de modelos matemáticos calibrados, para simular, predecir y analizar el comportamiento del sistema túnel-revestimiento. Sin embargo, debido a la complejidad de los sistemas de la ingeniería de túneles, las soluciones matemáticas existentes son imprecisas porque la interacción entre las diferentes variables que controlan el proceso de tuneleo no es plenamente comprendida. Consecuentemente, una buena dosis de incertidumbre siempre está presente.

Ante este reto, en los últimos años se han explorado otros enfoques para evaluar el comportamiento durante y después de la construcción de sistemas túnel-revestimiento. En el área de monitoreo se evalúa la conveniencia de definir la estabilidad del túnel en términos del tensor de deformaciones en (la vecindad de) las paredes de la excavación, en lugar de o como complemento básico de la medición (casi rutinaria) de las convergencias, que por sí mismas arrojan información poco valiosa para entender el comportamiento del sistema túnel-revestimiento. En cuanto al modelado matemático, existe una tendencia internacional de sustituir estas herramientas basadas en principios físicos porque los fenómenos que se presentan durante la construcción de un túnel en una masa rocosa no son comprendidos plenamente. Los modelos matemáticos son muy útiles cuando se conocen los mecanismos físicos que controlan el fenómeno y en los casos en que la incertidumbre e imprecisión no afectan apreciablemente la precisión del modelo matemático. A este respecto, es importante enfatizar que la precisión no necesariamente es un sinónimo de modelo realista.

Debido a la complejidad del problema de túneles, no es fácil distinguir cuáles son las variables que más influyen en el comportamiento global del sistema túnel-revestimiento. Cuando se analiza la información referente al comportamiento de estas obras, resulta evidente que se necesita recurrir a otras opciones de modelado para entender el problema de tuneleo en masas rocosas. Una alternativa, cuya aceptación por ingenieros e investigadores ha crecido en el pasado reciente se basa en conjuntos borrosos (Zadeh, 1965) y redes neuronales artificiales (McCulloch y Pitts, 1943). El éxito que ha tenido el uso conjunto de estas dos técnicas en la solución de problemas de ingeniería geotécnica, y la creciente credibilidad en estos sistemas híbridos fueron la mayor fuente de inspiración para realizar este trabajo.



Antecedentes

El comportamiento de un túnel durante y después de su construcción depende fundamentalmente de siete factores:

- o *Estado inicial de esfuerzos en el medio*
- o *Propiedades mecánicas del macizo rocoso, suelo y discontinuidades:* resistencia, deformabilidad y permeabilidad
- o *Características geométricas de las discontinuidades:* orientación, persistencia, abertura, etc.
- o *Características geométricas del túnel:* dimensiones, forma y profundidad
- o *Características del soporte*
- o *Procedimiento constructivo*
- o *Condiciones del agua subterránea*

Sin embargo, se ha observado en la práctica que sólo dos de ellos tienen una participación importante en la estabilidad de la excavación: el procedimiento constructivo y la presencia de agua

En efecto, la instalación tardía, o en ocasiones anticipada, de un soporte; la manera en que se efectúa la excavación (ataque seccionado o no); el cómo se coloca el revestimiento; el manejo del agua subterránea, la erosión de lentes arenosos durante el flujo del agua y la presencia de materiales expansivos han sido los factores que han ocasionado la mayoría de las fallas en túneles.

En la fig 1 se presentan varios ejemplos de ello. La falla estructural y por desconchamiento se generaron por la inadecuada colocación del soporte; en el primer caso del anclaje, y en el segundo al no lograrse el contacto entre el soporte y el terreno. Las fallas plástica y por graneeo se produjeron por la tardía colocación del revestimiento.



Figura 1 Ejemplos de fallas en túneles.

Si bien muchas de las investigaciones en la ingeniería de túneles, en campo y laboratorio, se han dirigido hacia la comprensión y representación del comportamiento mediante el modelado de los seis factores mencionados, recientemente estos esfuerzos se han incrementado en relación con la secuencia constructiva y la presencia de agua

Actualmente, existe un número significativo de modelos analíticos y empíricos para el estudio de los túneles; sin embargo, son escasos aquellos que toman en cuenta el proceso constructivo y las condiciones del agua en el subsuelo, debido principalmente a las dificultades que se tienen para representarlos adecuadamente.

Muchos de los modelos analíticos son complejos, como el elemento finito y discreto, y es posible evaluar condiciones y características diversas del subsuelo y del revestimiento.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Desgraciadamente, presentan dificultades en su aplicación, requieren de conocimientos especializados y de equipo de cómputo particular, y la determinación de las variables de entrada del modelo muchas veces es difícil

Por el contrario, con los métodos empíricos se obtienen recomendaciones de construcción y del soporte a partir de datos cualitativos y cuantitativos, y los parámetros de entrada se determinan de manera sencilla en campo y laboratorio; pero los resultados tienden a ser conservadores en exceso, y en ocasiones es imposible dar respuesta a condiciones particulares del terreno o de la estructura del túnel.

Durante las últimas dos décadas la tendencia en el análisis de túneles ha sido buscar el equilibrio entre estos dos enfoques, por lo que se han desarrollado herramientas analíticas sencillas que utilizan la experiencia obtenida de los criterios empíricos enmarcada dentro de un método o sistema racional.

Además, considerando los desarrollos en maquinaria y materiales, en estrategias de construcción, y especialmente en el monitoreo sistemático del comportamiento de los túneles durante y después de su construcción, se ha iniciado una época en la ingeniería dirigida al cuestionamiento, evaluación, modificación, y en su caso, generación de modelos de análisis y estrategias de observación y control distintas a las que corrientemente se han empleado en la ingeniería de túneles. Ejemplos de esto son la detección anticipada de zonas débiles mediante la medición de la magnitud y orientación del vector desplazamiento (Steindorfer y Schubert, 1997), el análisis de las gráficas de energía específica y velocidad de penetración de las máquinas tuneladoras para optimar el empleo de cortadores y tiempos de excavación (Zeninetti *et al.*, 1992), etc

El manejo, procesamiento y análisis de la información obtenida durante la observación del comportamiento de los túneles han obligado a utilizar técnicas estadísticas y en especial sistemas expertos y de inteligencia artificial, donde se integran nuevas variables para un mejor análisis y entendimiento del proceso constructivo

Un sistema experto es aquél que funcionalmente simula el razonamiento y el proceso de toma de decisiones, que realiza un ingeniero con experiencia amplia sobre el comportamiento del fenómeno en cuestión. La simulación del conocimiento o experiencia del experto se realiza mediante reglas *si... entonces*. Estos métodos son adecuados cuando el conocimiento de un problema dado se puede formular de manera explícita y clara, vía el tipo de reglas mencionado. La definición precisa en términos de la ingeniería geológica raramente se puede lograr. Por consiguiente, el uso de sistemas expertos para resolver problemas de la ingeniería geológica, en general, y de túneles, en particular, es limitado y deben emplearse cautelosamente

Si el sistema en estudio está plagado de vaguedades e indefiniciones, resulta apropiado recurrir a un modelado basado en la teoría de Conjuntos Borrosos (CB) y razonamiento aproximado, o a la combinación de aquéllos con Redes Neuronales Artificiales (RNAs). Esta última unión de modelos conduce a los sistemas neuro-difusos, los cuales combinan conocimiento e información de una manera robusta, reproduciendo de una manera más aproximada la forma en que los ingenieros piensan y razonan acerca de un problema en particular. Las RNAs adquieren conocimiento de la información presentada por medio de algoritmos de optimación. Por otro lado, los CB permiten expresar lingüísticamente el conocimiento del sistema, vía reglas *si... entonces*

Estos métodos, basados en la inteligencia artificial, se distinguen de los sistemas expertos en que no requieren necesariamente de un experto para la adquisición del conocimiento, sino de una base de datos o ambos. La base de datos es obtenida mediante la observación repetida del fenómeno, y tiene que ser completa, es decir, describir al fenómeno en todas sus manifestaciones

La aplicación de las técnicas previamente mencionadas en la ingeniería de túneles es diversa

- Moon, *et al* (1995) proponen un sistema experto integral denominado NESTED para estudiar la estabilidad de túneles, formado por cuatro RNA, tres de ellas aplicadas al diseño del túnel y la cuarta a la estabilidad de cortes, y tres sistemas expertos para clasificar macizos rocosos. En este trabajo se muestra la manera de combinar diferentes técnicas para mejorar la respuesta de un sistema respecto a la identificación de modos de falla en túneles, diseño preliminar del túnel y el cálculo del factor de seguridad de taludes.
- Shi J. *et al*. (1998) presentan el caso donde se utiliza una RNA modular para predecir el asentamiento en superficie durante la construcción de un túnel somero en suelos poco resistentes. En un trabajo semejante, Rangel y Romo (2000) compararon los asentamientos inducidos por tuneleo en el suelo arcilloso de la ciudad de México con los calculados utilizando métodos semianalíticos y con técnicas de RNAs. Los resultados de ambos trabajos muestran las ventajas de considerar factores adicionales (incluidos implícitamente en la información recabada durante el monitoreo de fenómeno) en la predicción del asentamiento, con lo cual la estimación con la técnica de RNAs se aproxima más a los valores medidos.
- Zettler, A.H. *et al* (1998) determinan el índice de calidad RMC (Rock Mass Class) y el soporte requerido por un túnel excavado con máquina tunelera utilizando un sistema híbrido basado en lógica borrosa. En este trabajo se emplean como variables de entrada parámetros poco usuales en la ingeniería de túneles, como la fuerza aplicada en los cortadores, la potencia y la velocidad de avance. Con este sistema se pudo generar, procesar y analizar la información en tiempo real, y así evaluar el proceso constructivo; es decir, se resuelve un problema de control y no de análisis. Un trabajo semejante es el realizado por Alvarez Grima, *et al*. (2000), donde se aplica un sistema neuro-difuso para modelar el funcionamiento de una máquina tunelera. El sistema es adaptativo basado en el método de Takagi-Sugeno-Kang, TSK, (Takagi y Sugeno, 1985), y emplea el algoritmo neuronal de retropropagación para adecuar las funciones de membresía (representación lingüística de la información que se le proporciona a un sistema difuso) a los datos del modelo.
- Uno de los trabajos más interesantes desde el punto de vista de innovación y aplicación de la inteligencia artificial es el realizado por el grupo de trabajo de Hudson J.A. (Hudson, J.A., 1992 y Cai, J.G. *et al*. 1998), donde se construye la matriz de interacción del flujo de energía en un macizo rocoso (sistema RES, Rock Engineering System) con un sistema híbrido utilizando inteligencia artificial. Con la matriz de interacción es posible estudiar integral y dinámicamente al sistema formado por la estructura del macizo rocoso, las condiciones hidráulicas, el estado de esfuerzos y el proceso constructivo de túneles.

Con base en las anteriores referencias se muestra una tendencia nueva en la ingeniería de túneles hacia la construcción de sistemas híbridos para la solución de problemas altamente no lineales, con lo cual se superan las desventajas particulares de cada una de las técnicas, siempre y cuando se tengan bases de datos que involucren el o los fenómenos que se desean analizar. Asimismo, los sistemas resultantes tienen las ventajas de ser sencillos y requerir de recursos de cómputo convencionales.

Si bien esta tendencia hace pensar que en el futuro se tendrían sistemas de análisis y control potentes y completos, a corto plazo deben mejorarse aspectos relacionados a la implementación de las bases de diseño, establecer mejores mecanismos de acoplamientos entre técnicas de análisis y establecer esquemas para mejorar su confiabilidad.

Objetivo

La investigación se centra en el estudio del procedimiento constructivo de túneles excavados en macizos rocosos y en el desarrollo de algoritmos de análisis simples que puedan utilizarse en las etapas de diseño y construcción. Se hace especial énfasis en la aplicación de la técnica de RNA y de Lógica Borrosa (LB) a problemas particulares de la ingeniería de túneles

Considerando las tendencias actuales en observación y control durante la construcción del túnel y los factores principales que rigen su estabilidad, exceptuando la presencia del agua, se proponen y desarrollan tres sistemas: uno para el diseño del procedimiento constructivo y soporte de túneles, el segundo para predecir las condiciones de riesgo en los tramos próximos a excavar, y el tercero para estimar el módulo de deformabilidad del macizo rocoso y el factor de plastificación con base en el desplazamiento de la clave y la calidad de la roca observados durante la construcción del túnel.

Los sistemas propuestos se construyen con módulos y en cada uno de ellos se aplican técnicas diferentes, entre las que destacan las RNA y LB, las cuales fueron construidas a partir de bases de datos sintéticos generados con modelos numéricos 3D no lineales y criterios empíricos

Finalmente, se describe la matriz de interacción del flujo de energía en un macizo rocoso propuesta por Hudson (1992), y se establecen directrices para investigaciones futuras

Método

El diseño del revestimiento y del procedimiento constructivo se basa en análisis numéricos 3D de elementos finitos y de diferencias finitas no lineales y evolutivos

La estabilidad del túnel se define utilizando cuatro criterios: magnitud de desplazamientos y zonas plásticas (métodos numéricos y analíticos), criterios empíricos y estados límite de falla (método simplificado de estabilidad de túneles)

El análisis del vector de desplazamientos para identificar condiciones futuras de riesgo se realiza utilizando el método de diferencias finitas.

La síntesis y aplicación de los resultados numéricos se realiza con las técnicas de RNA, LB y soluciones de la mecánica de los medios continuos. Lo anterior se desarrolla utilizando un sistema modular, cuya característica primordial es ofrecer un ambiente sencillo y amigable al usuario, así como poder analizar problemas en tiempo real. Los cascarones de programación utilizados son MATLAB y SIMULINK

La interpretación de los resultados y recomendaciones para la construcción y seguimiento del túnel se apoyan en el análisis del comportamiento observado en modelos numéricos y casos históricos, considerando diferentes mecanismos de falla simplificados

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE TÚNELES EN ROCA

2.1 Mecanismos de falla probables

El problema fundamental al que se enfrenta el ingeniero de diseño es la definición del o los mecanismos de falla posibles que se pueden generar durante el proceso de excavación de un túnel. Conocido el mecanismo, la solución para evitarlo es inmediata cuando se cuenta con un modelo para su análisis, experiencia suficiente y creatividad

En túneles sin agua en el macizo rocoso pueden presentarse dos tipos de inestabilidades de la excavación o ambas: estructural y plástica.

En el mecanismo de inestabilidad estructural, la falla se desarrolla a lo largo de las discontinuidades del macizo rocoso, mientras que en el segundo mecanismo la roca se plastifica a grado tal que se genera la falla

Conociendo el modelo geológico es posible definir el tipo de inestabilidad potencial. Por ejemplo, para túneles someros, donde los esfuerzos geoestáticos son bajos, ubicados en rocas duras con discontinuidades bien desarrolladas, el mecanismo de falla es estructural y controlado principalmente por las fuerzas de gravedad actuando en los bloques de la clave y paredes. En este mecanismo el empleo de las clasificaciones geomecánicas es inapropiado (Hoek, 2000) Por el contrario, si la resistencia al esfuerzo cortante del macizo rocoso es menor o comparable con el esfuerzo geoestático, como es común en rocas de mala calidad (muy alteradas y/o fracturadas), la falla por plastificación podrá ocurrir, y en esta condición las clasificaciones geomecánicas podrán ser útiles.

El modelo geológico queda definido por:

- La distribución espacial de las unidades geológicas y discontinuidades
- Las propiedades mecánicas de cada unidad y discontinuidades
- El estado de esfuerzos geoestático y tectónico
- Las condiciones hidráulicas

2.2 Caracterización del macizo rocoso

Un macizo rocoso se compone principalmente de discontinuidades (fallas, fisuras, planos de estratificación, de foliación, de cizallamiento, etc) y de la roca intacta (roca sin discontinuidades), por lo que al describir ambas partes se caracteriza plenamente al macizo rocoso; sin embargo, su comportamiento al excavar un túnel aún está indefinido

En efecto, dependiendo del grado de fracturamiento que presente la roca y del estado de esfuerzos antes, durante y después de la construcción del túnel, la roca seguirá un

comportamiento específico: el de las discontinuidades, el de la roca intacta o una condición intermedia, y lo mismo sucederá con el mecanismo de falla probable

La definición del comportamiento del macizo rocoso es difícil y en general se recurre a criterios empíricos o a la experimentación en campo para su identificación.

En la tabla 2.1 se presenta un criterio empírico propuesto por Sheorey (1997) y Hoek (2000), basado en el número de familias de discontinuidades.

Tabla 2.1 Definición del mecanismo de falla de acuerdo con los criterios de Sheorey (1997) y Hoek (2000)

CONDICIÓN DE LA ROCA		CONDICIÓN DEL MEDIO	MECANISMO DE FALLA
	Roca intacta, masiva o con fisuras muy separadas	Roca Intacta	Frágil
	Una discontinuidad o una familia de discontinuidades	Macizo Rocoso Discreto	Estructural
	Dos familias de discontinuidades, una más desarrollada que la otra		
	Un plano de discontinuidad atravesando un macizo rocoso fracturado		
	Dos familias de discontinuidades con características semejantes	Macizo Rocoso Equivalente	Frágil
	Dos familias de discontinuidades más una aleatoria, o más de dos familias de discontinuidades		

En la tabla 2.1 y la fig 2.1 se distinguen tres condiciones del medio: roca intacta, macizo rocoso equivalente y discreto

Por roca intacta se entiende la condición en la cual ninguna o alguna discontinuidad semidesarrollada intercepta al túnel, y se considera que las propiedades de la roca intacta gobiernan el comportamiento del medio. En cambio, cuando el número de discontinuidades aumenta, la condición de roca intacta se desvanece y se acrecienta la de las discontinuidades, tal que la combinación de ambas características, de la roca y discontinuidades, rigen el comportamiento, y se considera al medio como un macizo rocoso equivalente.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

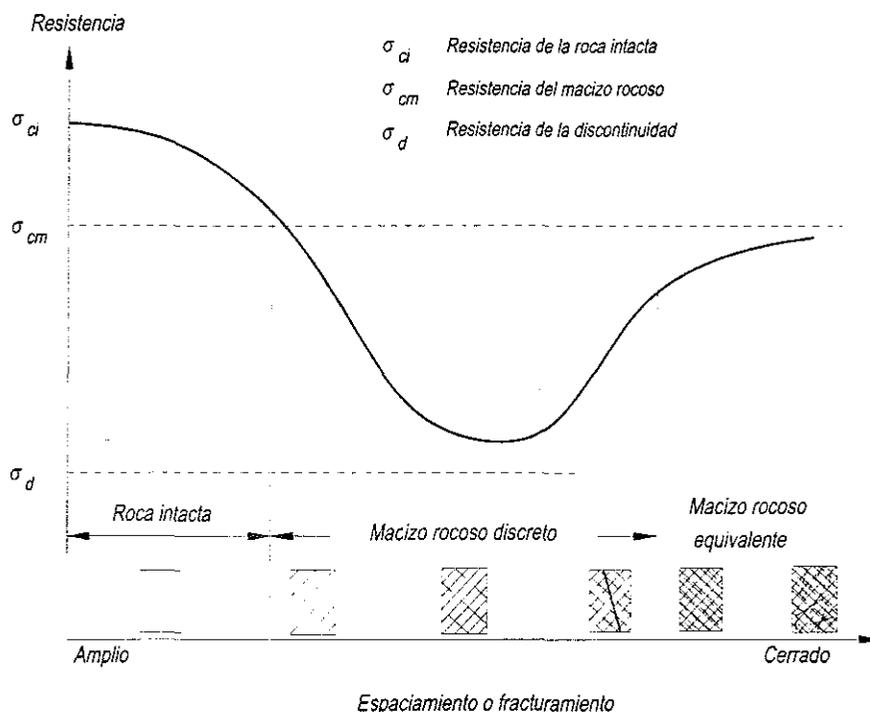


Figura 2.1 Comportamiento del medio

En estas dos condiciones, roca intacta y macizo rocoso equivalente, puede considerarse al medio como isótropo y homogéneo, con un mecanismo de falla tipo frágil probablemente

Una condición intermedia entre roca intacta y macizo rocoso equivalente es el macizo rocoso discreto, donde por el número, orientación y condición de las discontinuidades, las características del fracturamiento rigen el comportamiento del medio, y por tanto se presenta la falla estructural. La simulación de esta condición en un modelo analítico o numérico se realiza introduciendo anisotropía en las leyes constitutivas. En esta condición, la deformación y la resistencia del medio dependen del espaciamento e inclinación de las discontinuidades respecto al esfuerzo principal mayor.

Cuando se presentan una o dos familias de discontinuidades, o varias familias pero alguna está más desarrollada o es significativamente más débil, se ha observado que el comportamiento de la masa rocosa tiende a un comportamiento anisótropo gobernado por las condiciones de la o las discontinuidades

Jaeger y Cook (1979) proponen un criterio para evaluar si la falla se desarrollará a través de la roca intacta considerando que se tiene el criterio de cedencia de Mohr-Coulomb y para una familia de fracturamiento:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq \frac{2(\tau_{sd} + \mu_d \sigma_3)}{(1 - \mu_d \tan \beta) \operatorname{sen} 2\beta} \quad (2.1)$$

donde; μ_d : Componente friccionante de la resistencia de la discontinuidad ($\mu_d = \tan \phi_d$)
 τ_{sd} : Componente cohesiva de la resistencia de la discontinuidad
 ϕ_d : Ángulo de fricción interna de la discontinuidad
 β : Inclinación de los planos de discontinuidad respecto al esfuerzo principal mayor actuante

Cuando la desigualdad no se satisface, la falla se desarrolla a través de la roca intacta (frágil), contrariamente el mecanismo de falla será estructural (tabla 2.1).

Si se tienen tres o más familias con características semejantes, el comportamiento de la masa rocosa podrá simularse mediante un modelo equivalente, donde las discontinuidades y la roca influyen ponderadamente, y el mecanismo de falla potencial puede describirse como del tipo frágil, aunque las deformaciones mayores se presentan a lo largo de las discontinuidades.

Si bien existen criterios teóricos y empíricos para definir el tipo de comportamiento y mecanismo de falla, en la realidad la decisión aún es subjetiva y depende particularmente de la experiencia y juicio ingenieril del diseñador, principalmente cuando se tienen varios sistemas de fracturamiento, distribuidos aleatoriamente y con características diferentes, lo cual es usual en campo.

La forma en que el medio debe caracterizarse, depende del mecanismo de falla que se presentará, del modelo con el que se simulará el sistema y de la ecuación constitutiva que representará el comportamiento del material.

Caracterización de las discontinuidades

Una forma de definir a las discontinuidades es indicando el número de familias, su orientación, la condición de las paredes (índices de rugosidad, J_r y JRC , y de alteración Ja), la separación, el tipo de relleno y el coeficiente de permeabilidad. Una parte importante de las clasificaciones geomecánicas propuestas por Bieniaswki (1989) y Barton *et al* (1974), se enfocan a la caracterización de dichos parámetros, por lo que se recomienda consultar dichas referencias. De manera resumida estas clasificaciones se presentan en el anexo A.

Con los parámetros antes citados es posible, mediante correlaciones (Sheorey, 1997; Barton, 1995; y Hoek, 2000), estimar la resistencia al cortante de las discontinuidades. Para conocer el ángulo de fricción base, ϕ_b (Patton, 1966), y la resistencia a la compresión de las paredes de las discontinuidades JCS (Deere y Miller, 1966), es recomendable realizar pruebas de laboratorio y de campo. Los procedimientos para estimar dichos parámetros y las correcciones aplicables, se presentan en Hoek (2000), Barton y Choubey (1977) y ISMR (1978).

Barton y colaboradores (1973, 1976, 1977, 1990 y 1995) han realizado investigaciones dirigidas a la definición de la ley de resistencia cortante de las discontinuidades en macizos rocosos sustentadas en el trabajo de Patton (1966), donde se propone la ecuación empírica 2.2, que considera los cambios graduales de la resistencia al cortante (τ) respecto al incremento del esfuerzo normal (σ_n).

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (2.2)$$

donde JRC es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad. Esta expresión se modifica cuando existe relleno en la discontinuidad, teniéndose (Barton, 1995):

$$\tau = \sigma_n \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \quad (2.3)$$

Es importante comentar que la ecuación 2.2 está definida cuando $\sigma_n > JCS$ (Hoek y Bray, 1977, recomiendan emplear esta ecuación a niveles bajos de esfuerzo, $\sigma_n < 0.3 JCS$), donde en vez de presentarse la falla por cortante, existe aplastamiento del material; asimismo, para valores de σ_n cercanos a cero, la resistencia cortante tenderá a cero, por lo que la ecuación 2.2 implícitamente indica que la resistencia a la tensión en la discontinuidad es cero, lo cual no siempre sucede.

Las expresiones 2.2 y 2.3 son válidas cuando el plano de falla coincide con la discontinuidad ($\beta \approx 30^\circ$), para inclinaciones menores de $\beta < 30^\circ$ Sheorey (1997) propone las siguientes expresiones

empíricas basadas en el trabajo de Donath (1964), las cuales deben utilizarse con precaución para condiciones diferentes a las indicadas por Donath.

$$\tau = \tau_{s\beta} \left(1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_{t\beta}} \right)^{c\beta} \quad (2.4)$$

donde;

$$\sigma_{c\beta} = \sigma_{ci} - (\sigma_{ci} - \sigma_{c30}) \operatorname{sen} 1.5(\beta + 30); \quad \tau_{s\beta} = \tau_s - (\tau_s - \tau_{s30}) \operatorname{sen} 1.5(\beta + 30)$$

$$\sigma_{t\beta} = \sigma_t - (\sigma_t - \sigma_{t30}) \operatorname{sen} 1.5(\beta + 30); \quad \sigma_{t30} = \sigma_t \operatorname{sen}^4(30) \approx 0.06\sigma_t$$

$$\tau_{s30} = \sigma_{t30} \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_{t30}} \right) \right]; \quad \mu_{030} = c_{30} \tau_{s30} / \sigma_{t30}$$

$$c_{30} = \frac{\ln \left[\frac{0.3JCS + \sigma_{t30}}{\tau_{s30}} \tan \left(\phi_b + JRC \log_{10} \frac{JCS}{0.3JCS + \sigma_{t30}} \right) \right]}{\ln \left(1 + \frac{0.3JCS}{\sigma_{t30}} \right)}$$

$$b_{30} = \frac{\sigma_{t30}}{\tau_{s30}} \left(\sqrt{1 + \mu_{030}^2} + \mu_{030} \right) - 1, \quad b_{30} \leq 0.95$$

$$\sigma_{c30} = \tau_{s30} \left(\frac{1+b_{30}}{b_{30}} \right)^{b_{30}} \left(\sqrt{1 + \mu_{030}^2} + \mu_{030} \right); \quad \frac{(1+b_{\beta})^{1+b_{\beta}}}{\beta_{\beta}^{b_{\beta}}} = \frac{\sigma_{c\beta} \sigma_{t\beta}}{\tau_{s\beta}^2}, \quad b_{\beta} \leq 0.95$$

$$\mu_{0\beta} = \frac{\tau_{s\beta}^2 (1+b_{\beta})^2 - \sigma_{t\beta}^2}{2\tau_{s\beta} \sigma_{t\beta} (1+b_{\beta})}; \quad c_{\beta} = \mu_{0\beta}^{0.9} \frac{\sigma_{t\beta}}{\tau_{s\beta}}$$

siendo, σ_{ci} y σ_t las resistencias a la compresión simple y a la tensión de la roca intacta, respectivamente, y τ_s la resistencia al esfuerzo cortante cuando el esfuerzo normal es cero

Caracterización de la roca intacta

La roca intacta se caracteriza utilizando criterios de resistencia y deformabilidad, así como con el peso volumétrico y el coeficiente de permeabilidad.

Actualmente, existe una diversidad de criterios de cedencia para la roca intacta, uno popular es el propuesto por Hoek-Brown (1980), definido por la siguiente expresión

$$\sigma_i = \sigma_3 + [m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_{ci}]^{1/2} \quad (2.5)$$

donde m y s son constantes que se determinan mediante una regresión estadística de los resultados de pruebas de compresión simple y de tensión en núcleos de roca.

En general, las características de deformabilidad de la roca intacta se establecen con los módulos tangentes obtenidos de pruebas de compresión simple o triaxiales.

Caracterización del macizo rocoso equivalente

El criterio de Hoek-Brown (Hoek, 2000) es una forma de caracterizar a un macizo rocoso que en las últimas décadas se ha aplicado en un espectro amplio de condiciones. Una de sus ventajas es la definición sencilla de los parámetros; mediante pruebas de laboratorio simples y utilizando las

clasificaciones geomecánicas, pero su mayor desventaja es su representatividad baja en rocas de calidad muy mala a regular.

La caracterización del macizo rocoso mediante la propuesta de Hoek-Brown comprende la definición de las leyes de resistencia y deformabilidad

Criterio de cedencia. El criterio de resistencia propuesto por Hoek-Brown es (Hoek E *et al* , 2002):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (2.6)$$

siendo; $m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$

GSI es el índice de resistencia geológica (Hoek, 2000), que se estima visualmente en afloramientos del macizo rocoso. Alternativamente puede evaluarse el GSI de correlaciones empíricas con el índice de calidad propuesto por Bieniawski, 1989:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (\text{Considerando la condición de agua subterránea como seca, } J_w=15, \text{ y el ajuste de orientación igual a cero})$$

La constante m_i , que depende del origen de la roca y su textura, y la resistencia a la compresión simple de la roca intacta σ_{ci} , se obtienen de ensayos de laboratorio (Hoek, 2000). El factor D depende del grado de daño inducido al macizo rocoso por efecto de los explosivos y/o la relajación de esfuerzos (anexo A)

Módulo de deformabilidad. Serafim y Pereira (1983), han propuesto una relación entre el módulo de deformación *in situ* (E_{mr}) y el índice de calidad de Bieniawski, RMR . Esta relación se basa en análisis inversos realizados en las cimentaciones de presas, y se ha encontrado que sus evaluaciones son aceptables en rocas de buena calidad; para las de mala calidad, los valores son altos. Desde el punto de vista de aplicación, Hoek (2000) ha modificado la relación proponiendo:

$$E_{mr} (MPa) = \begin{cases} 1000 \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} & \text{para } \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \\ 1000 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} & \text{para } \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.3 Modelado del túnel

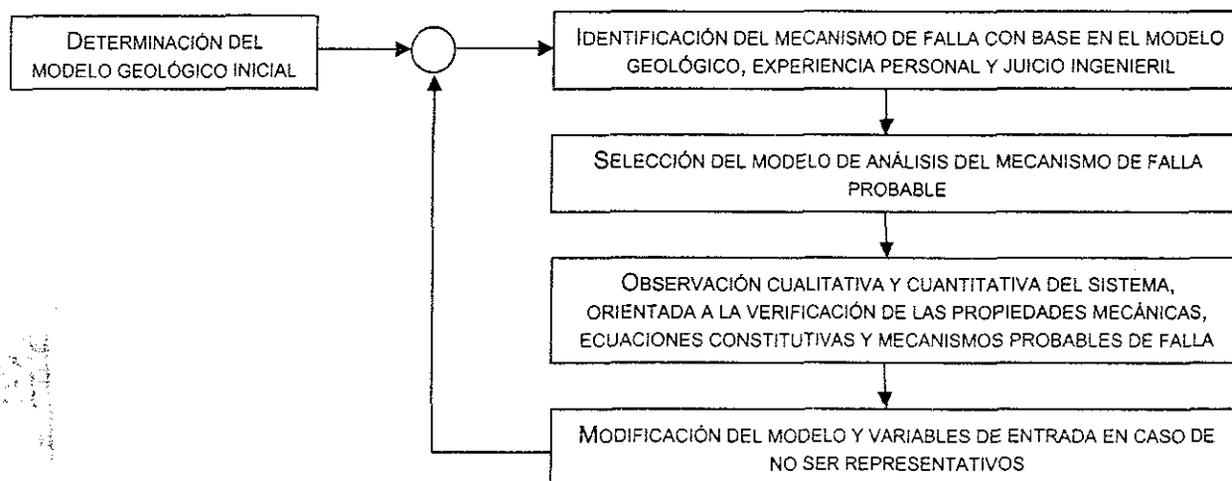
En la actualidad, existe una infinidad de modelos (empíricos y analíticos, físicos y numéricos, sencillos y complejos) que pueden ser de gran utilidad al ingeniero tunelero. Su selección depende de la capacidad de modelar el mecanismo de falla y la secuencia constructiva.

En efecto, los modelos de análisis y diseño disponibles son capaces de simular casi todas las características de los macizos rocosos y condiciones de frontera; sin embargo, la simulación del comportamiento del macizo rocoso podrá no corresponder a la realidad, aplicarse a una condición inadecuada, o requerir de técnicas complejas para la determinación de los parámetros de entrada del modelo.

Un modelo correcto es aquel donde las hipótesis adoptadas se cumplen, las cuales se verifican durante la construcción del túnel con la instrumentación adecuada. Por tanto, es posible establecer

que un diseño no está completo hasta no verificarlo en la construcción, donde deberán hacerse las adecuaciones o los ajustes pertinentes

En resumen, el éxito de la aplicación de un modelo dependerá de los resultados obtenidos en las siguientes etapas:



Los modelos que no concuerden con el proceso físico observado durante la construcción, no deberán utilizarse, a menos que el objetivo de diseño sea que la estructura se comporte como el modelo.

Actualmente, los modelos de análisis más utilizados por su intervalo amplio de aplicación y por considerar la secuencia constructiva son:

- Teoría de bloques
- Métodos de equilibrio límite
- Curvas características
- Diferencias finitas
- Elementos finitos
- Elementos discretos

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

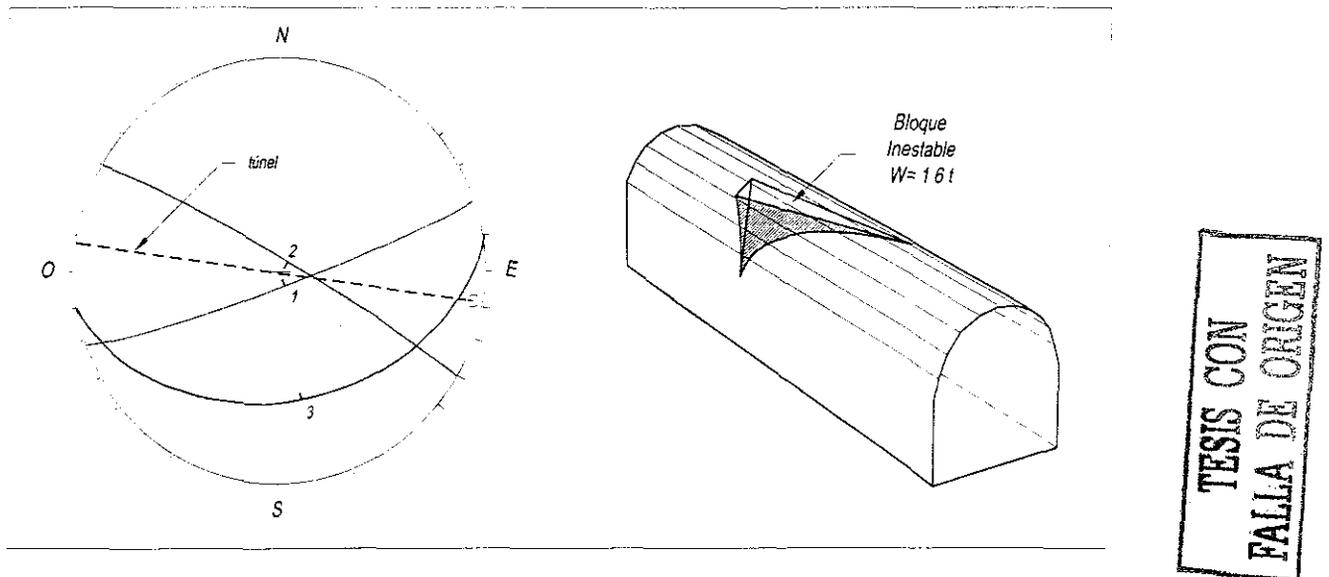
Análisis de túneles estructuralmente inestables

Este tipo de inestabilidad se presenta en túneles construidos en macizos rocosos fracturados a profundidades someras, donde la resistencia de la roca intacta es mucho mayor que la resistencia de las discontinuidades y el esfuerzo geostático. En estas condiciones, las intersecciones entre las familias de discontinuidades forman bloques que en las paredes y en la clave tienden a deslizarse o a caer por peso propio hacia el interior del túnel. Un bloque caerá o deslizará si la resistencia cortante desarrollada a lo largo de las discontinuidades es menor que su peso.

En general, este tipo de fallas son progresivas, siendo local en un principio, y pudiéndose propagar hasta la superficie si el túnel es somero o hasta donde pueda desarrollarse el arqueo, si no se aplica antes una medida correctiva.

En la fig 2.2, parte derecha, se observa un túnel con un bloque inestable ubicado en la clave, de 1.6 t de peso. En la parte izquierda de la misma figura se muestra una red estereográfica, donde se representan los rumbos y echados de las tres familias de discontinuidades que han formado dicho bloque; asimismo, se indican el rumbo y echado del eje del túnel. La geometría del bloque

se obtiene con base en la teoría de bloques, a partir de la relación que existe entre las proyecciones estereográficas de las discontinuidades y eje del túnel.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 2.2 Mecanismo de falla estructural

Goodman y Shi (1986) han desarrollado el método denominado *Teoría de Bloques*, para poder analizar las condiciones de los bloques que se forman cuando una excavación se efectúa. La teoría utiliza los principios de la geología estructural para identificar los bloques potencialmente inestables, y criterios de estado límite para definir cuál bloque será inestable y cuándo se produce el deslizamiento entre bloques. Las leyes de cedencia que comúnmente se emplean son las descritas anteriormente mediante las ecs 2.2 y 2.3.

En general, la secuencia de análisis es:

- a) *Levantamiento estructural*. Determinación del rumbo y echado de cada una de las familias de discontinuidades
- b) *Propiedades de las discontinuidades*. Evaluación del ángulo de fricción básico ϕ_b , el coeficiente de rugosidad JRC , el índice de rugosidad Jr , la resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad JCS y el índice de alteración Ja .
- c) *Bloques potencialmente inestables*. Identificación de los bloques potencialmente inestables utilizando la teoría de bloques, considerando diferentes longitudes de excavación sin soporte
- d) *Factor de seguridad*. Cálculo del factor de seguridad de cada uno de los bloques dependiendo de su movimiento potencial de salida: caer, rotar o deslizarse
- e) *Diseño del soporte*. Cálculo del revestimiento requerido para que el factor de seguridad sea aceptable o cumpla con una norma particular.

Para el cálculo del revestimiento requerido se considera que, para los bloques de la clave, la capacidad del soporte sea mayor que el peso del bloque (de 1.3 a 1.5 veces). Deberá tenerse cuidado, en caso de emplear anclaje, de distribuirlo de manera uniforme alrededor del centro de gravedad del bloque, para evitar rotaciones que reduzcan el factor de seguridad; asimismo, evitar que el ancla trabaje a cortante. En caso de utilizar concreto lanzado, lo cual es preferible cuando la roca es suave y los bloques pequeños, el espesor se diseña por cortante de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t = \frac{W_c FS}{0.5 \sqrt{f_c} P} \quad (2.8)$$

donde t es el espesor de concreto lanzado en cm , f_c su resistencia a la compresión simple a 28 días en kg/cm^2 , W_c el peso del bloque inestable en kg , P el perímetro de la cara del bloque que aflora al túnel en cm , y FS el factor de seguridad (variable entre 2 y 5), con el cual se busca eliminar la incertidumbre en la geometría del bloque inestable, pero principalmente situar en el intervalo elástico a las deformaciones que se generan por la excavación, de aquí los valores altos del factor de seguridad propuesto.

Como se observa, la expresión 2.8 no considera la resistencia al corte de las discontinuidades que forman el bloque, por lo que el valor del espesor del revestimiento es conservador.

Es conveniente mencionar que en túneles con forma circular o semejante, el trabajo estructural del revestimiento de concreto es más eficiente, en varios órdenes de magnitud, que el anclaje (Hoek, 2000; Tamez *et al* 1997).

Una desventaja que tiene la teoría de bloques, es que ha sido desarrollada exclusivamente para bloques prismáticos formados hasta con tres familias de discontinuidades y la pared del túnel; asimismo, se desconocen los desplazamientos generados en la periferia

Una alternativa de análisis es el empleo del método de elemento discreto (Cundall, 1988), donde el medio es simulado con elementos regulares, interconectados mediante elementos reológicos. Si bien actualmente existen programas comerciales, su aplicación no es inmediata ya que requiere de técnicas especiales para la generación de la estructura tridimensional, de la asignación de valores a las variables de los modelos geológicos y de preparación especializada para el postproceso e interpretación de los resultados. Un ejemplo de la aplicación del método se presenta en Barton (1995).

Es importante resaltar que en el caso de la teoría de bloques no se considera que la resistencia al cortante de la discontinuidad depende del ángulo entre la discontinuidad y el esfuerzo principal mayor (β ec 2.4); sin embargo, cuando se emplea la técnica de elementos finitos o discretos, debe tomarse en cuenta para considerar el efecto de anisotropía

Análisis de túneles con falla plástica

Métodos de equilibrio límite

El Método Simplificado de Estabilidad de Túneles (MSET) propuesto por Tamez (1997), es un ejemplo de los métodos de equilibrio límite. En este caso se modela el mecanismo de falla del frente y de la clave del túnel mediante tres bloques (fig 2.3), y se calcula el factor de seguridad mediante el análisis del equilibrio de momentos de las fuerzas que actúan en los bloques del mecanismo propuesto.

Como su nombre lo indica, este método es una simplificación de los mecanismos de falla que suelen presentarse en un túnel. Por tanto, la geometría de los bloques es una aproximación burda de la forma de los mecanismos de falla para el frente y de la clave, que si bien está geometría no cumplen cabalmente con un mecanismo de falla cinemáticamente admisible, los resultados obtenidos concuerdan con los criterios empíricos y soluciones numéricas (Tamez *et al* 1997) -

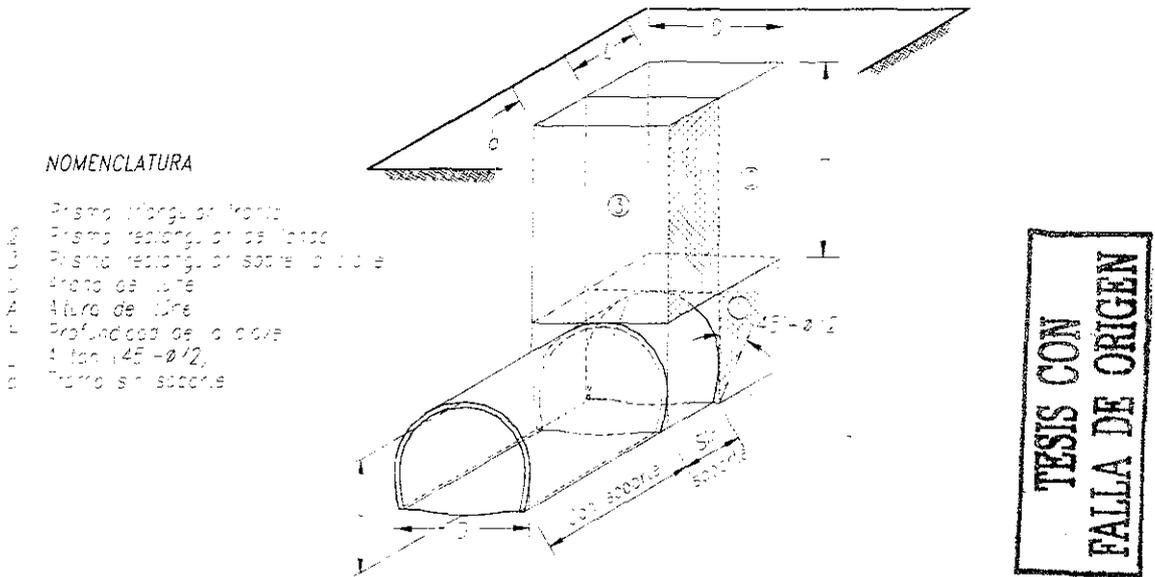


Figura 2.3 Modelado del mecanismo de falla en el MSET (Tamez, et al., 1997)

Considerando el equilibrio de momentos de todas las fuerzas que actúan en los bloques, se obtiene la expresión que define el factor de seguridad de la excavación:

$$FS_g = \frac{2s_{m2} \left[\frac{D}{L} \left(1 + \frac{a}{L} \right) + 1 + \frac{2a}{L} \right] \frac{Z_d}{D} + 2s_{m3} \left(\frac{a}{L} \right)^2 \frac{Z_d}{D} + 27c \sqrt{K_p} \left(1 + \frac{2a}{L} \right) + p_f K_p \left(1 + \frac{2a}{L} \right)}{\gamma H \left[\frac{A}{H} \left(\frac{1}{3} + \frac{a}{L} \right) + \left(1 + \frac{a}{L} \right)^2 \right] + q_s \left(1 + \frac{a}{L} \right)^2 - p_a \left(\frac{a}{L} \right)^2 - p_f K_p} \quad (29)$$

siendo s_{mi} la resistencia lateral que se desarrolla en los bloques $i=1,2$ y 3 , respectivamente; Z_d la altura de la zona de influencia de la excavación ($Z_d \approx 1.7D$); p_f y p_a las presiones aplicadas en el frente de excavación y en la periferia del túnel, respectivamente; q_s la sobrecarga en superficie y $K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$.

Se observa que esta expresión es función de diversos factores:

- *Características geométricas del túnel:* la profundidad a la clave, el ancho y la altura de la sección de excavación (H , D y A)
- *Propiedades del suelo:* la resistencia al esfuerzo cortante y el peso volumétrico (c , ϕ y γ)
- *Procedimiento constructivo:* la longitud de avance sin soporte (a), la presión de apoyo de la clave proporcionada por un escudo o soporte (p_a), y la presión de estabilización del frente (p_f).
- *Magnitud de sobrecargas en la superficie* (q_s)

Esta técnica se aplica comúnmente en suelos. En macizos rocosos su utilización aún es limitada a condiciones donde los macizos son masivos o muy fracturados, y primordialmente cuando la profundidad del túnel es somera.

Método de convergencia-confinamiento (MCC)

También llamado de las curvas características, es un método que se ha utilizado desde hace varias décadas, siendo sus primeros promotores Peck (1969) y Lombardi (1973).

La técnica consiste en calcular dos curvas que representan, en el espacio esfuerzo-desplazamiento, el comportamiento del medio y del revestimiento, durante la excavación y colocación del revestimiento del túnel (fig 2.4).

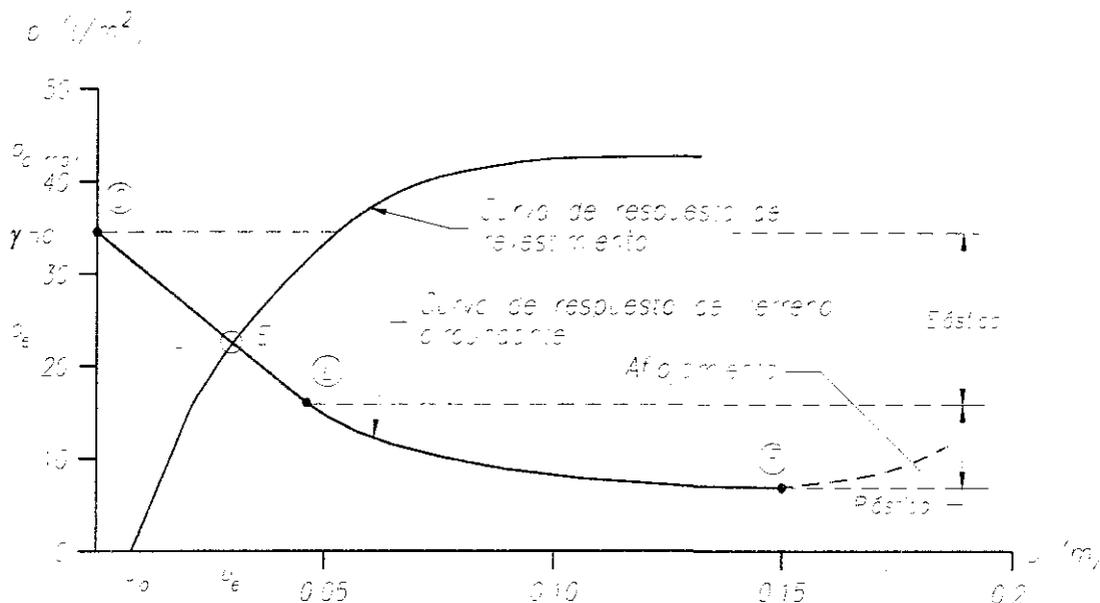


Figura 2.4 Método de las curvas características

La curva característica del revestimiento muestra un comportamiento opuesto a la del medio; es decir, conforme el desplazamiento radial crece, los esfuerzos en el revestimiento se incrementan. Precisamente este efecto caracteriza la interacción macizo rocoso-soporte, *la relajación del medio generada por la excavación del túnel la recibe conjuntamente el sistema medio-soporte con base en sus rigideces*.

El punto E de la gráfica, con coordenadas p_e y u_e , indica la condición estable de deformaciones y de equilibrio de esfuerzos entre el medio y el soporte, y dichas coordenadas definen la presión de trabajo del soporte y el desplazamiento radial esperado, respectivamente. La relación existente entre la presión máxima de soporte del revestimiento y la presión de equilibrio ($p_{c,max}/p_e$), puede considerarse como una medida de las condiciones de seguridad en el trabajo del revestimiento, y se recomienda que sea mayor de dos.

Existen diferentes expresiones para calcular la curva característica del medio, las cuales se basan en soluciones clásicas de medios elásticos que incluyen la generación de zonas plásticas alrededor del túnel con diversas leyes de cedencia del medio (Kirsch, 1898; Fenner, 1938; Talobre, 1957; Kastner, 1962; Salençon, 1969; Detournay, 1983; Fairhurst y Carranza-Torres, 2002).

El desplazamiento radial que se presenta en el medio antes y durante la excavación del túnel pero previo a la colocación del revestimiento u_{lo} , se incluye en el análisis mediante el desplazamiento hacia la derecha de la curva característica del revestimiento; es decir, existe deformación en el medio y no en el revestimiento.

El valor de este desplazamiento previo, denominado inicial, depende del procedimiento constructivo del túnel. En efecto, cuando la construcción del túnel se realiza con un escudo con presión aplicada en el frente de excavación, el desplazamiento inicial será muy cercano a cero; por el contrario, cuando no se aplica presión en el frente y existe una longitud de excavación sin

soporte considerable, la magnitud del desplazamiento inicial crece sustancialmente, siendo siempre mayor del 30% del total, como posteriormente se verá.

Una descripción detallada del método de las curvas características se presenta en Tamez *et al.* (1997) y Carranza-Torres (2002).

Las expresiones para calcular la curva característica del medio considerando un material cohesivo-friccionante y la curva del soporte, que en este caso se considera elásto-plástica, son:

$$u_r = \begin{cases} (\gamma_m H_0 - p_i) \frac{(1 + \nu_m)r}{E_m} & \text{para } p_i \geq p_{cr} \\ r \left[1 - \sqrt{\frac{1}{1+A}} \right] & \text{para } p_i < p_{cr} \end{cases} \quad \text{(terreno)} \quad (2.10)$$

$$u_r = \frac{p_i}{k_c} \quad \text{(soporte)} \quad (2.11)$$

$$p_{c,max} = \frac{f_c}{2} \left[1 - \frac{(r-t)^2}{r^2} \right] \quad (2.12)$$

donde;

u_r	Desplazamiento radial
$p_{c,max}$	Presión de soporte máxima del revestimiento
r y H_0	Radio del túnel y profundidad del eje del túnel
γ_m , c y ϕ	Peso volumétrico, cohesión y ángulo de fricción interna del medio
E_m y E_r	Módulos elásticos del medio y del revestimiento
ν_m y ν_r	Relación de Poisson del medio y del revestimiento
t y f'_c	Espesor y resistencia a la compresión simple del concreto a 28 días del revestimiento

$p_{cr} = \gamma_m H_0 (1 - \text{sen} \phi) - c \cos \phi$ Presión límite de plastificación del medio

$k_c = \frac{E_r}{(1 + \nu_r)r} \frac{r^2 - (r-t)^2}{(1 - 2\nu_r)r^2 + (r-t)^2}$ Rigidez elástica del anillo de concreto

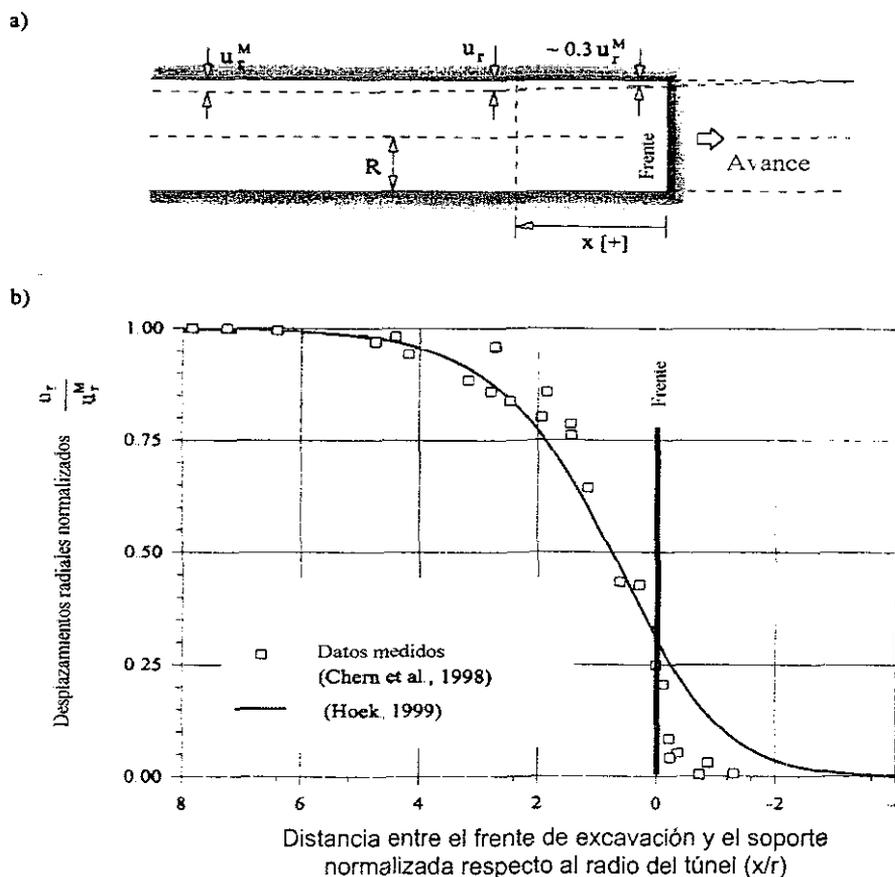
$$A = \begin{cases} \frac{2(1 + \nu_m)}{E_m} c \left(\frac{R_p}{r} \right)^2 & \text{Terreno cohesivo} \\ \frac{2(1 + \nu_m)}{E_m} (\gamma_m H_0 + c \cot \phi) \text{sen} \phi \left(\frac{R_p}{r} \right)^2 & \text{Terreno cohesivo - friccionante} \end{cases}$$

siendo R_p el radio plástico definido por:

$$R_p = \begin{cases} r \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_m H_0 - p_i}{c} \right) - 1 \right] & \text{Terreno cohesivo} \\ r \left[(1 - \text{sen} \phi) \frac{\gamma_m H_0 + c \cot \phi}{p_i + c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \text{sen} \phi}{2 \text{sen} \phi}} & \text{Terreno cohesivo - friccionante} \end{cases}$$

Para evaluar el desplazamiento inicial u_{i0} , Panet (1995) propuso una relación empírica y geométrica, que posteriormente fue mejorada por Hoek (Carranza-Torres y Fairhurst, 2000) a partir de los trabajos realizados por Chern *et al.* (1998). La expresión resultante es la siguiente (fig 2.5).

$$\frac{u_{io}}{u_t} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/r}{1.1}\right) \right]^{-1.7} \quad (2.13)$$



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.5 (a) Perfil de los desplazamientos radiales u_r para un túnel sin soporte en la vecindad del frente de excavación.
(b) Estimación empírica del desplazamiento inicial en función de la cercanía del frente de excavación (Carranza-Torres y Fairhurst, 2000).

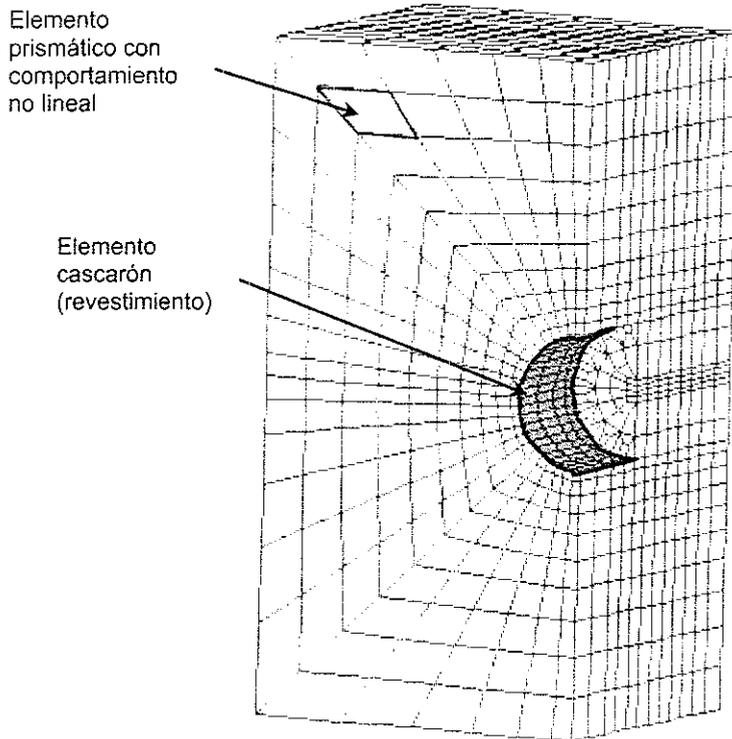
Si bien esta técnica es sencilla y considera el comportamiento elastoplástico del medio, la interacción medio-soporte y el desplazamiento inicial, tiene las siguientes desventajas:

- Es sólo válida para túneles circulares con revestimientos cerrados.
- Considera un estado de esfuerzos que se aplica en el campo lejano.
- La determinación de u_{io} es exclusivamente geométrica, ignorando el módulo de deformabilidad del terreno y la formación de zonas plásticas alrededor del túnel (Bernaud y Rousset, 1996).
- No se consideran los efectos viscosos del material ni el tiempo de colocación del soporte.

Métodos numéricos

Para modelar la secuencia constructiva del túnel con modelos numéricos, como el método de elementos finitos o de diferencias finitas, se requiere tomar en cuenta la naturaleza tridimensional del problema y el comportamiento no lineal del medio

En general, los elementos que se utilizan para modelar el medio son prismáticos (fig 2.6), con un número mínimo de nodos igual al número de aristas, isoparamétricos. El comportamiento de estos elementos se establece con leyes esfuerzo-deformación que consideran la posible generación de zonas plásticas alrededor del túnel (elastoplásticidad o viscoelastoplasticidad; cuyas leyes de cedencia comúnmente son las de Drucker-Prager, Mohr-Coulomb y Hoek-Brown).



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.6 Malla de elementos finitos tridimensional

Para la representación del revestimiento suelen utilizarse elementos cascarón, triangulares o cuadrados, con comportamiento elástico-lineal isotrópico u ortotrópico, donde actúan esfuerzos de membrana y/o de flexión

Existen elementos especiales denominados de interfase, que se utilizan para modelar el contacto entre el revestimiento y la roca, donde pueden presentarse desplazamientos relativos entre ambos medios y el correspondiente efecto dilatante

Secuencia constructiva El proceso constructivo del túnel se modela efectuando el análisis numérico de manera evolutiva; es decir, antes de excavar el túnel se calcula el estado de esfuerzos geoestático (por peso propio y esfuerzos tectónicos en caso dado), y posteriormente se realiza la primera etapa de excavación del túnel sin soporte removiendo los elementos finitos ubicados en la zona del túnel, pero exclusivamente aquéllos localizados en la longitud de avance correspondiente (fig 2.7).

Este proceder permite la redistribución de esfuerzos y deformaciones en la malla de elementos conforme avanza la construcción del túnel. Una vez realizada la excavación, la construcción del revestimiento se simula mediante la colocación de elementos cascarón en toda la periferia del túnel, pero únicamente en la zona previamente excavada. En esta etapa el revestimiento no se somete a ninguna carga, con excepción de aquellas asociadas al peso propio

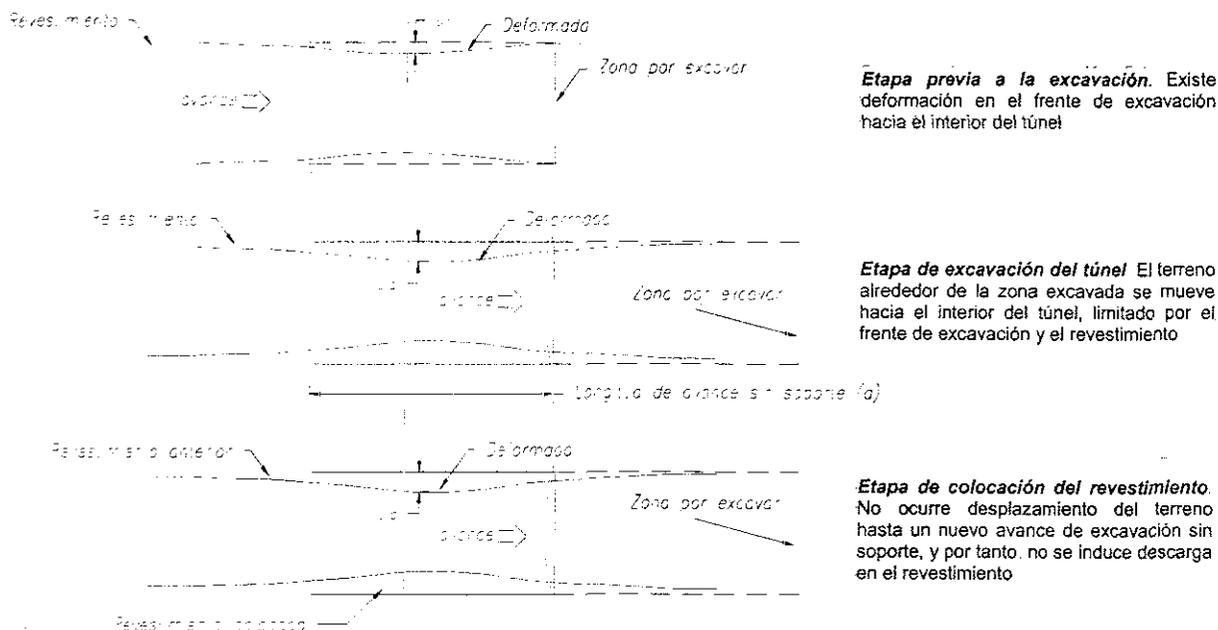


Figura 2.7 Etapas del procedimiento constructivo

Es importante comentar que en la mayoría de los algoritmos evolutivos de elementos finitos no es posible considerar la no-linealidad geométrica durante la colocación del revestimiento en la zona recientemente excavada; es decir, los elementos del revestimiento se colocan en la posición inicial de los nodos, no en la posición deformada. Este aspecto, es una fuente de error durante el modelado del proceso constructivo con el MEF y debe tomarse en cuenta en la interpretación de los resultados.

Posteriormente a la colocación del revestimiento, se realiza el avance de excavación nuevo retirando los elementos del interior del túnel ubicados en la zona de avance en turno. En esta etapa, el desplazamiento del medio hacia el interior del túnel en la zona recientemente excavada es limitado por el revestimiento ya colocado y por el terreno del frente de excavación, lo que ocasiona que el revestimiento colocado en la etapa anterior de excavación tome carga adicional (efecto de arqueo).

Los resultados obtenidos con el MEF o el MDF, siguiendo la secuencia antes descrita, son los desplazamientos, los estados de deformaciones (plásticas y elásticas) y de esfuerzos en el medio y el revestimiento para cada etapa constructiva.

En la fig 2.8 se ejemplifican dos de los resultados obtenidos con el MEF considerando la secuencia constructiva, en este caso particular los resultados representan la condición de un avance de excavación sin soporte de 6 m.

El desplazamiento inducido durante la construcción del túnel, tanto en el medio como en el revestimiento, es la suma de todas las etapas del modelado de la construcción exceptuando la inicial (geoestática).

En la fig 2.9 se muestra la forma típica de los desplazamientos obtenidos en la periferia del túnel; el comportamiento ondulatorio observado en la fig 2.9b es debido a la superposición de avances de excavación consecutivos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

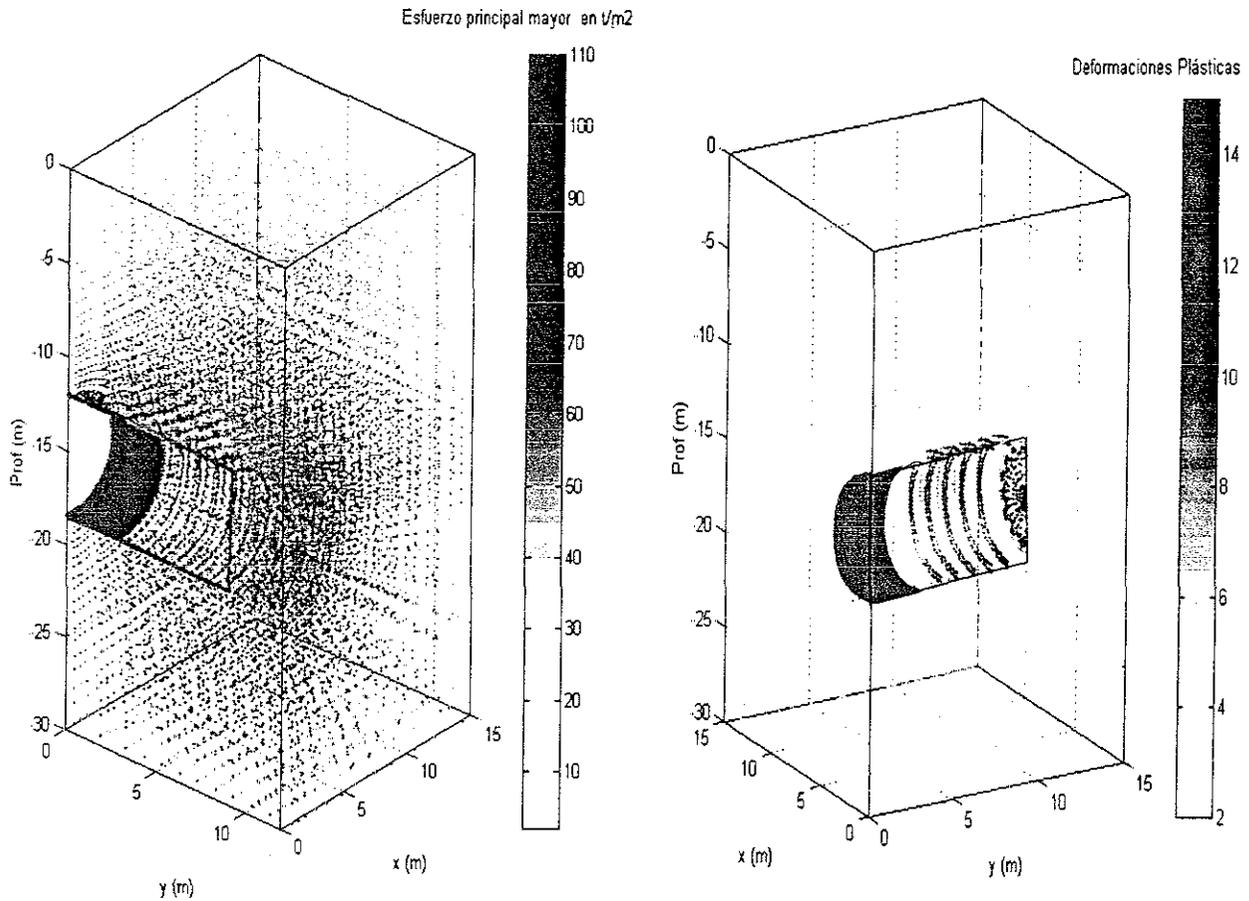
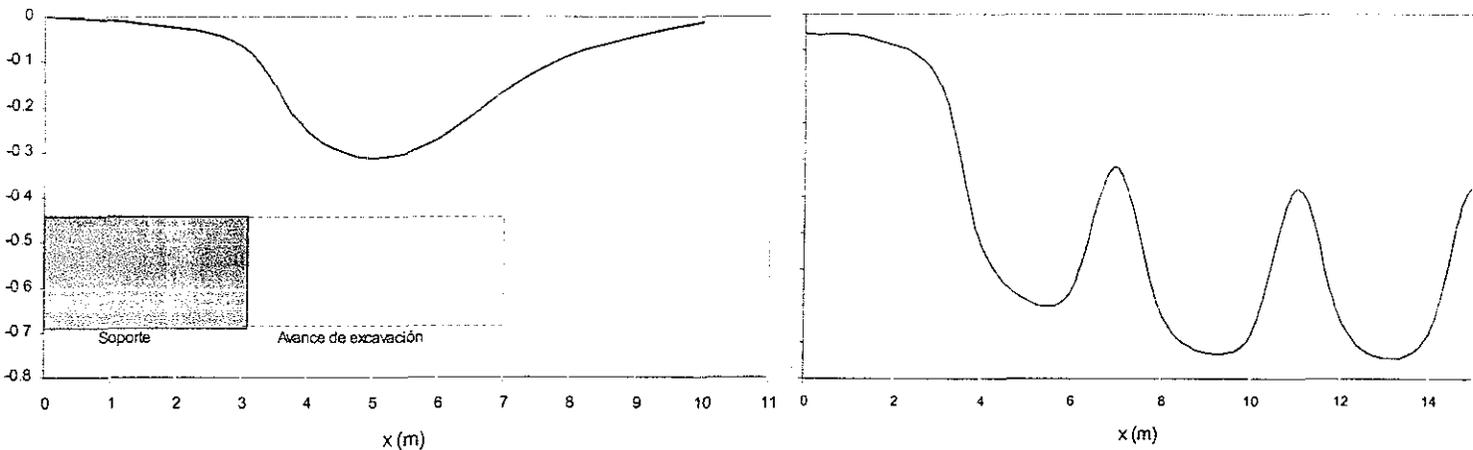


Figura 2.8 Esfuerzo principal mayor y deformación plástica obtenidos con el MEF para una longitud de excavación sin soporte de 6 m.

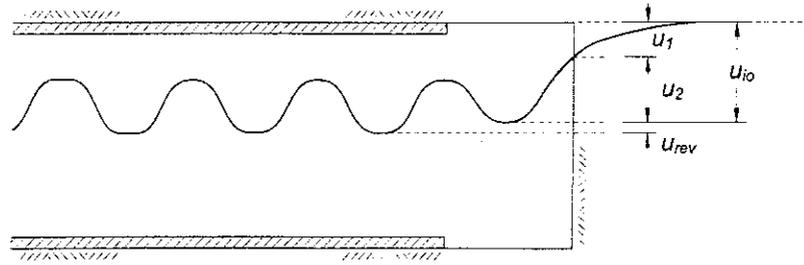


a) Desplazamiento de la clave para un avance

b) Desplazamiento de la clave considerando avances consecutivos

Figura 2.9 Desplazamientos en la periferia del túnel considerando el proceso constructivo

Como se indicó, los desplazamientos mostrados en la fig 2.9 son los totales menos los geostáticos, pero este desplazamiento puede subdividirse en tres componentes:



$$u_{total} = (u_1 + u_2) + u_{rev} = u_{io} + u_{rev} \quad (2.14)$$

donde, u_1 : desplazamiento previo a la excavación del terreno, el cual no es posible medirlo con las campañas de instrumentación convencionales

u_2 : desplazamiento provocado por la excavación del túnel antes de colocar el soporte

u_{io} : desplazamiento previo antes de colocar el revestimiento, $u_{io} = u_1 + u_2$

u_{rev} : desplazamiento del revestimiento ocasionado por los ciclos siguientes de excavación

Esta diferenciación es útil para evaluar las condiciones de trabajo del revestimiento y posibles heterogeneidades presentes en la cercanía del frente de excavación.

En la fig 2.10 se presentan las magnitudes de dichos desplazamientos al variar la longitud de avance (a), para tres casos particulares

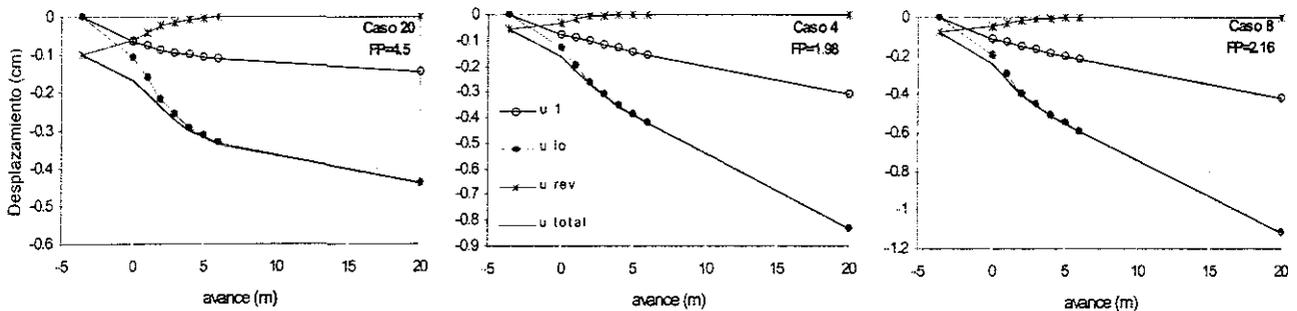


Figura 2.10 Variación de las componentes del desplazamiento de la clave con respecto a la longitud de avance sin soporte, para un túnel de 6 m de diámetro.

Se tienen los siguientes comentarios:

- para avances menores de un diámetro del túnel, la variación de los desplazamientos es abrupta.
- el desplazamiento previo a la colocación del revestimiento u_{io} , es la componente de mayor magnitud del desplazamiento total, al menos el 70%, y crece conforme el avance sin soporte es mayor.
- el desplazamiento generado antes de excavar el túnel u_1 , es también una componente importante del desplazamiento, varía entre el 20% y 40% del total.
- el desplazamiento del revestimiento u_{rev} , es la componente de menor magnitud, menos del 10% del total, y es despreciable para avances mayores de un radio del túnel.

De lo anterior, se obtiene una conclusión valiosa para la instrumentación de los túneles; es necesario enfocar la medición de los desplazamientos de la periferia del túnel en la zona de avance sin soporte. Los cambios del vector de desplazamiento que se presenten cuando la distancia al frente de excavación es mayor de 15 diámetros del túnel son debidos a efectos viscosos u otros factores ajenos a la secuencia constructiva

Es conveniente mencionar algunos aspectos importantes de los resultados obtenidos de los análisis con el MEF realizados en este estudio al modelar la secuencia constructiva:

- Antes de la excavación del avance próximo, se produce un desplazamiento radial en la futura periferia del túnel. Este desplazamiento es provocado por la redistribución de esfuerzos en el macizo del frente de excavación y su valor es del 30% del desplazamiento obtenido cuando el túnel se excava sin soporte, o mayor (Hoek, 2000, se reportan valores de un tercio de la deformación total generada)
- El desplazamiento generado en el revestimiento es la componente menor del desplazamiento total (menor del 10%).
- Se inducen esfuerzos cortantes en el revestimiento en la zona inmediata al avance de excavación y en el medio adyacente al revestimiento

Existen otros procesos que pueden modelarse con modelos numéricos (MEF o MDF), y que en este trabajo no se consideran: el efecto de los explosivos en las propiedades mecánicas del macizo rocoso, posibles desplazamientos que pueden ocurrir en la frontera entre el revestimiento y la roca, y el tiempo de fraguado del concreto. Este último aspecto puede ser de importancia durante el modelado de la secuencia constructiva ya que los esfuerzos cortantes generados en la cercanía de la excavación sin soporte podrían reducirse considerablemente

2.4 Criterio de estabilidad

Gráficas adimensionales

Una manera de visualizar globalmente el proceso de excavación del túnel es utilizar gráficas adimensionales donde se relacionen las variables importantes del el proceso constructivo del túnel. Si bien es un proceso común en otras áreas de la ingeniería, ha habido pocos intentos relevantes en túneles (Reséndiz y Romo, 1981; Bernaud y Rousset, 1996; Carranza-Torres, 1998; Hoek, 2000). A continuación se presenta una ampliación de los trabajos realizados por Hoek (2000)

Considerando como las variables de entrada más importantes en el proceso al esfuerzo geostático a la profundidad del eje del túnel (p_o), la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso (σ_{cm}), el módulo de deformación del macizo rocoso (E_{mr}), el avance de excavación sin soporte (a), el radio del túnel (r_o) y la rigidez elástica de un cilindro hueco de concreto (k_c); y que las variables de salida que describen el comportamiento del túnel son el desplazamiento de la periferia del túnel (u_r), el esfuerzo máximo en el revestimiento (p_e) y el radio plástico (R_p), es posible definir las siguientes parámetros adimensionales:

$$FP = \frac{5 \sigma_{cm}}{p_o}; \quad a_n = \frac{a}{r_o}; \quad u_n = \frac{u_r}{r_o}; \quad k_n = \frac{k_c r_o}{E_{mr}}; \quad p_{en} = \frac{p_e}{p_o} \quad (2.15)$$

La variable FP , denominada factor de plastificación (Terzaghi 1943, Broms y Bennerwark 1967, Tamez *et al.*, 1997), ayuda a definir en qué condición se encuentra el medio; valores menores que la unidad sugieren la falla o generación de zonas de plastificación grandes.

La variable k_n es una forma de cuantificar el contraste en rigideces entre el macizo rocoso y el revestimiento, y da idea de la influencia que el revestimiento tiene en el valor de los

desplazamientos generados en la periferia del túnel; a mayor contraste mayor influencia y menores desplazamientos (en el intervalo de $0.01 < E_r/E_{mr} < 0.4$ se tiene la mayor influencia en la magnitud de los desplazamientos totales; Einstein y Schwartz, 1979).

Utilizando los modelos del MEF y MCC, y proponiendo intervalos de variación de los parámetros de entrada, es posible construir gráficas adimensionales relacionando todas las variables del proceso.

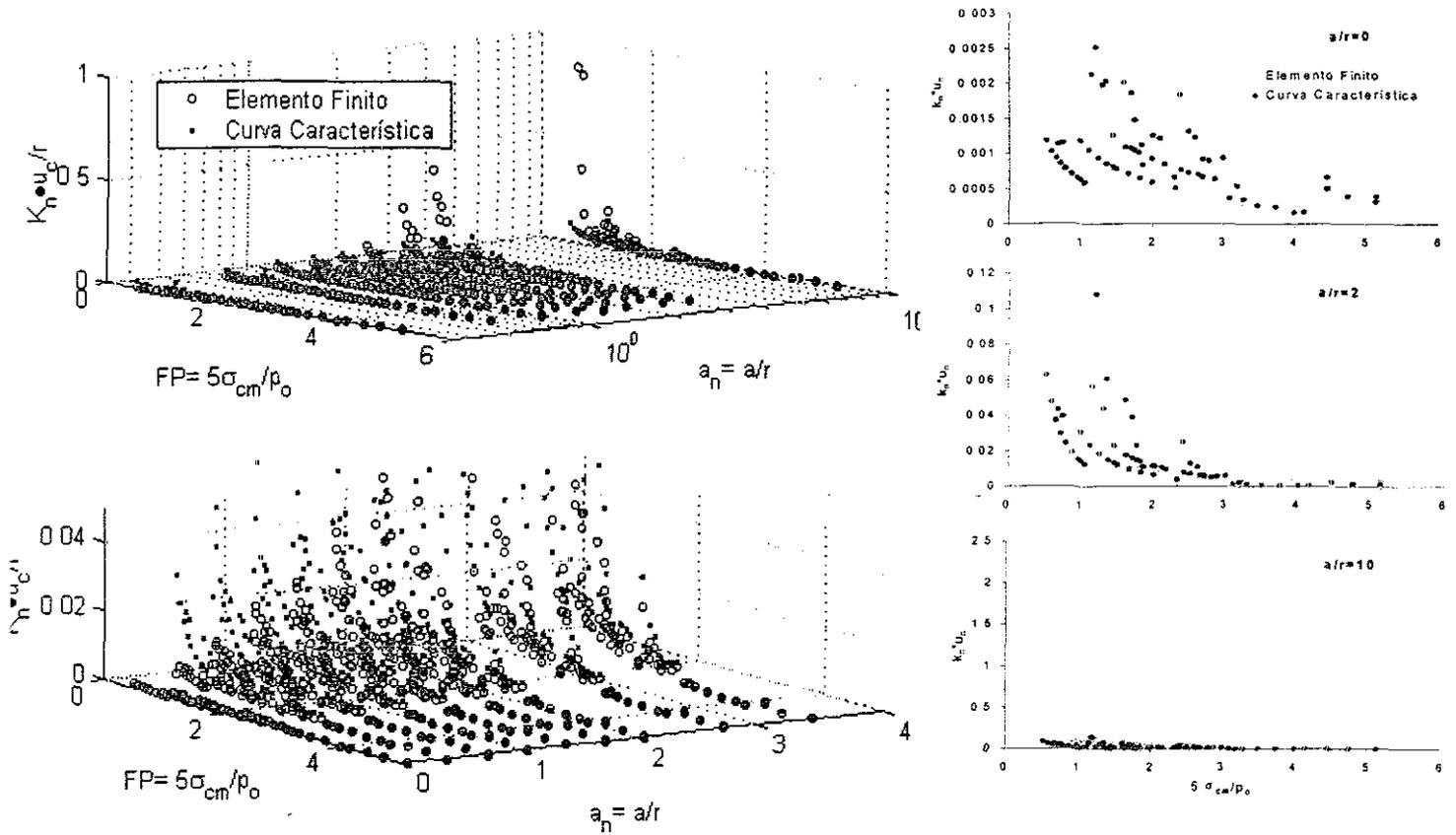
Desplazamientos verticales en la clave

Haciendo variar los parámetros adimensionales FP , a_n y k_n dentro de los intervalos indicados en la tabla 2.2, que en la práctica son usuales, se obtiene el desplazamiento vertical normalizado de la clave, u_n , utilizando las técnicas del MEF y el MCC

Tabla 2.2 Intervalos de variación de los parámetros adimensionales de entrada

Valores	$FP=5\sigma_{cm}/\rho_0$	$a_n=a/r_0$	$k_n=k_s r_0/E_{mr}$
Mínimo	0.59	0	0.73
Máximo	5.1	10	6.13

La gráfica adimensional que relaciona las variables de entrada del proceso con el desplazamiento vertical normalizado se presenta en la fig 2.11



a) Gráficas tridimensionales

b) Secciones para $a_n=0, 2$ y 10

Figura 2.11 Gráficas adimensionales que relacionan el desplazamiento vertical normalizado de la clave del túnel (u_v/r_o) con las variables FP , a_n y k_n .

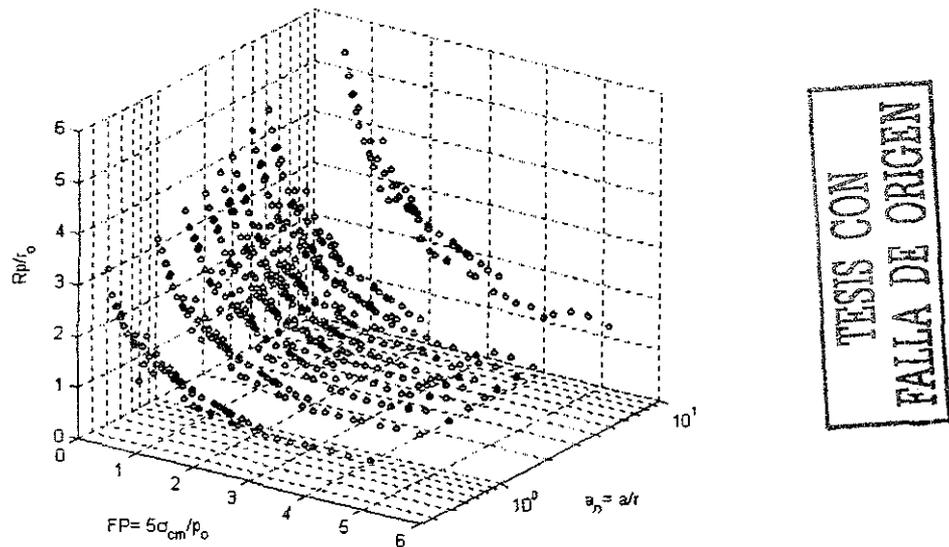


Figura 2.12 Gráfica adimensional que relaciona el radio de plastificación normalizado (Rp/r_o) con las variables FP , a_n y k_n .

Con base en los resultados de la fig 2.11 y las gráficas mostradas en la fig 2.12 (la gráfica adimensional que relaciona el radio plástico normalizado, Rp/r_o , con las variables de entrada previamente mencionadas, obtenidas con el MCC), se tienen los comentarios siguientes respecto

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

al procedimiento constructivo del túnel y se establecen las diferencias que existen al utilizar dos técnicas diferentes durante el modelado (MEF y MCC).

- Comentarios sobre el proceso constructivo (figs 2 11 y 2 12):
 - Existen concentraciones de valores siguiendo una curva con tendencia descendente (desplazamientos menores), conforme aumenta el factor de plastificación o al disminuir el avance normalizado
 - Cuando $FP < 1$, los desplazamientos en la clave y los radios de plastificación se incrementan exponencialmente. Este comportamiento se correlaciona en la realidad con la presencia de problemas severos de inestabilidad. Por tanto, el valor $FP = 1$ constituye la frontera entre el comportamiento plástico del medio y la falla del túnel, principalmente cuando no se coloca el revestimiento
 - Cuando el factor de plastificación oscila entre $1 < FP < 3$, existen incrementos moderados de desplazamientos y radios de plastificación, lo cual también sugiere la definición de la zona donde existe la plastificación del medio alrededor del túnel sin producirse la falla
 - Para valores de $FP > 3$, los desplazamientos y los radios de plastificación generados son pequeños, por lo que esta condición define la zona donde el comportamiento del medio alrededor del túnel es elástico.
 - Cuando los avances normalizados son pequeños ($a/r_o \leq 0.33$) se tiene poca influencia en la generación de zonas plásticas alrededor del túnel, por lo que el mecanismo de falla del túnel es principalmente por el frente de excavación
 - En el intervalo de $0.33 \leq a/r_o \leq 0.8$, continúa el avance teniendo influencia ligera en la generación de zonas plásticas; sin embargo, el mecanismo probable de falla del túnel puede desarrollarse en el frente, en las paredes del túnel no soportado o en ambos sitios
 - En el intervalo de $0.8 \leq a/r_o \leq 1.3$ el avance normalizado empieza a tener una influencia importante en la generación de las zonas plásticas (los incrementos de los radios de plastificación y desplazamientos son grandes), y la falla del túnel se desarrolla principalmente en las paredes del túnel no soportado, aunque puede presentarse en el frente.
 - En el intervalo de avances normalizados largos $a/r_o > 1.3$, el avance del túnel tiene influencia importante en la generación de las zonas plásticas, y el mecanismo de falla se da primordialmente en las paredes del túnel no soportado
 - Para avances normalizados $a/r_o > 2.5$ el efecto del frente de excavación del túnel en el comportamiento de la excavación es despreciable, teniéndose desplazamientos similares a la condición de túnel sin soporte; es decir, no existe el efecto tridimensional generado por la cercanía del frente de excavación

- Comparación entre técnicas de análisis (figs 2 11 y 2 13):
 - Cuando el avance de la excavación sin soporte es nulo, el MEF y el MCC producen resultados similares
 - Para factores de plastificación mayores de $FP > 2.5$, sin importar el valor del avance normalizado, ambas técnicas dan resultados similares.
 - A medida que el avance sin soporte crece, con el MEF se calculan desplazamientos de la clave mayores. Este efecto puede deberse a: la forma de representar la dilatación (el ángulo de fricción interna considerado en el MEF es mayor en la zona plastificada), el modelado de la cercanía del frente de excavación (el MCC produce desplazamientos iniciales menores, fig 2.13), y el MEF considera el peso del revestimiento y el incremento de los esfuerzos geostáticos con respecto a la profundidad

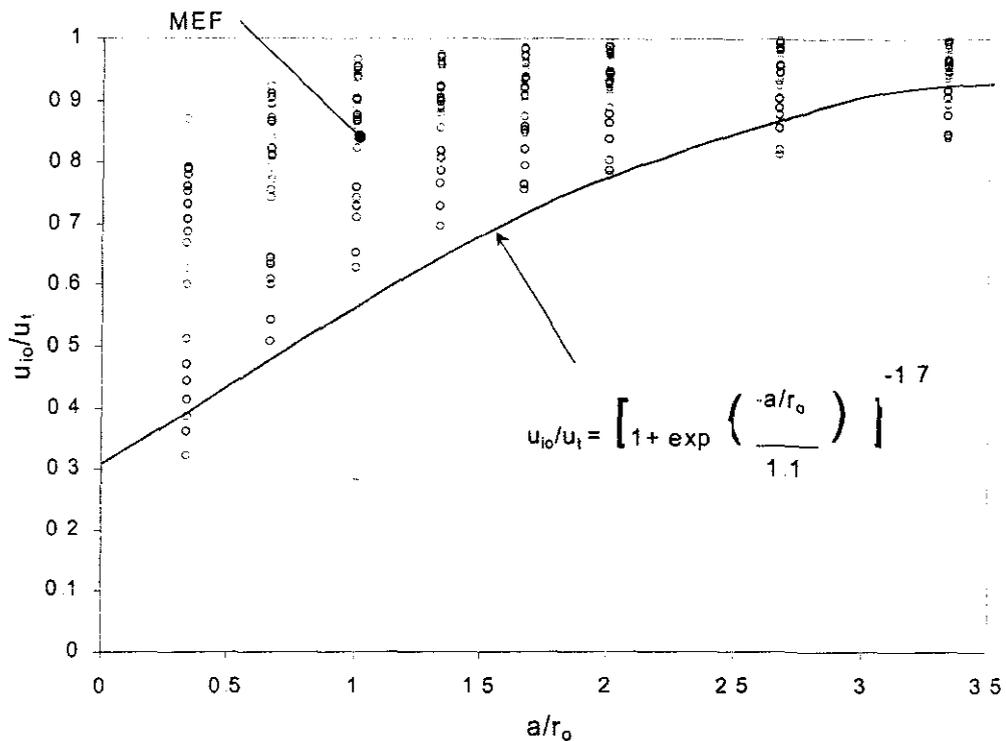


Figura 2.13 Efecto de la cercanía del frente de excavación en la estimación del desplazamiento inicial utilizando el MEF y el MCC.

A partir de las tendencias observadas en la gráfica adimensional del desplazamiento en la clave, es posible proponer expresiones mediante análisis de regresión de los datos. Para las condiciones estudiadas, la expresión que produce el mejor ajuste es (fig 2.14):

$$k_n u_n = \begin{cases} [0.0124a_n - 0.0013]FP^{(0.0289a_n^2 - 0.4947a_n - 0.9745)} & \text{para } a_n > 0.3 \\ [0.0105a_n + 0.0011]FP^{(-1.7978a_n - 0.533)} & \text{para } a_n \leq 0.3 \end{cases} \quad (2.16)$$

Al estimar el desplazamiento vertical con las expresiones 2.16 se obtiene un error relativo promedio del $E_r=53\%$, con respecto al resultado obtenido con el MEF.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

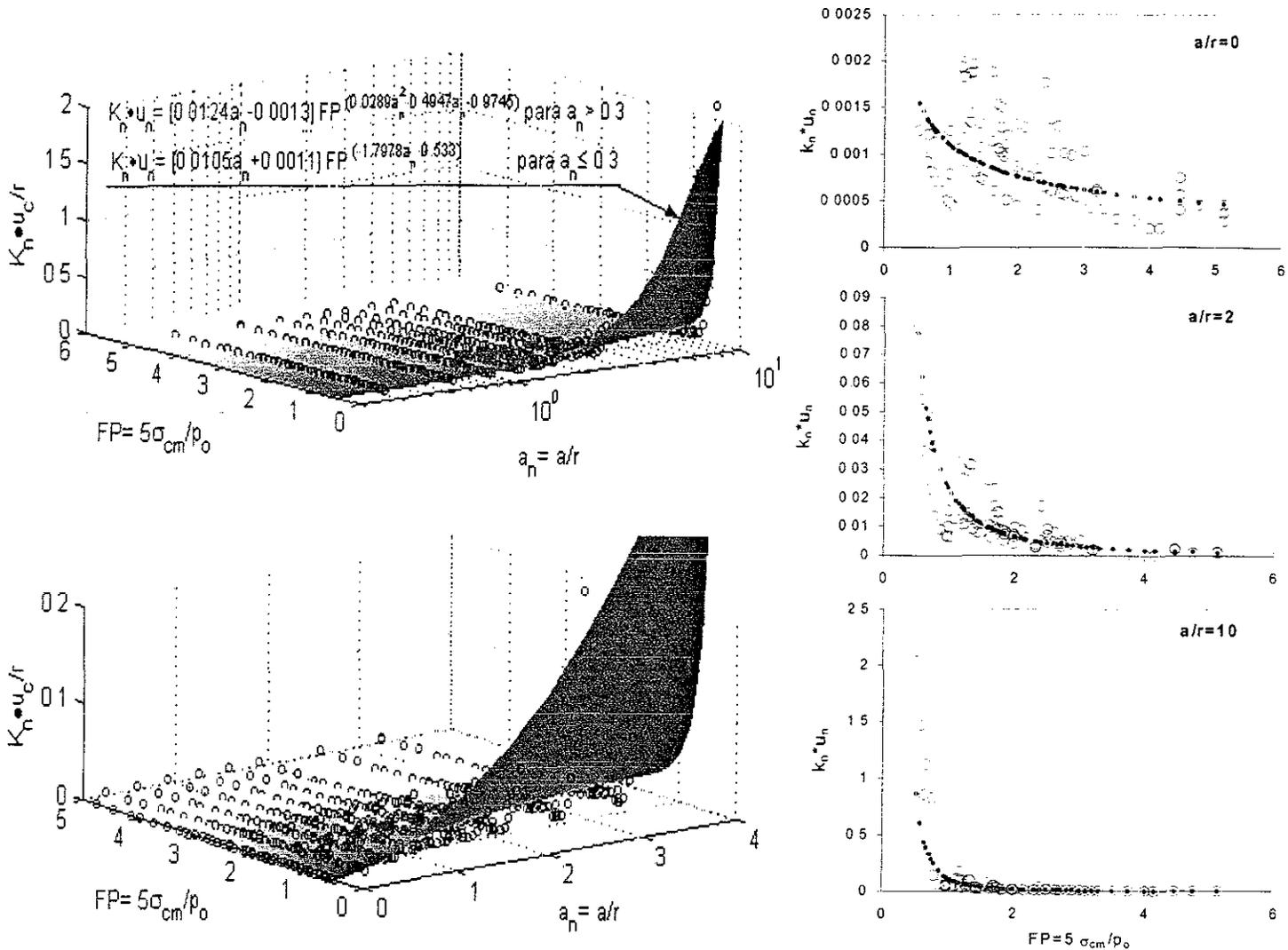


Figura 2.14 Ajuste de los datos obtenidos con el MEF

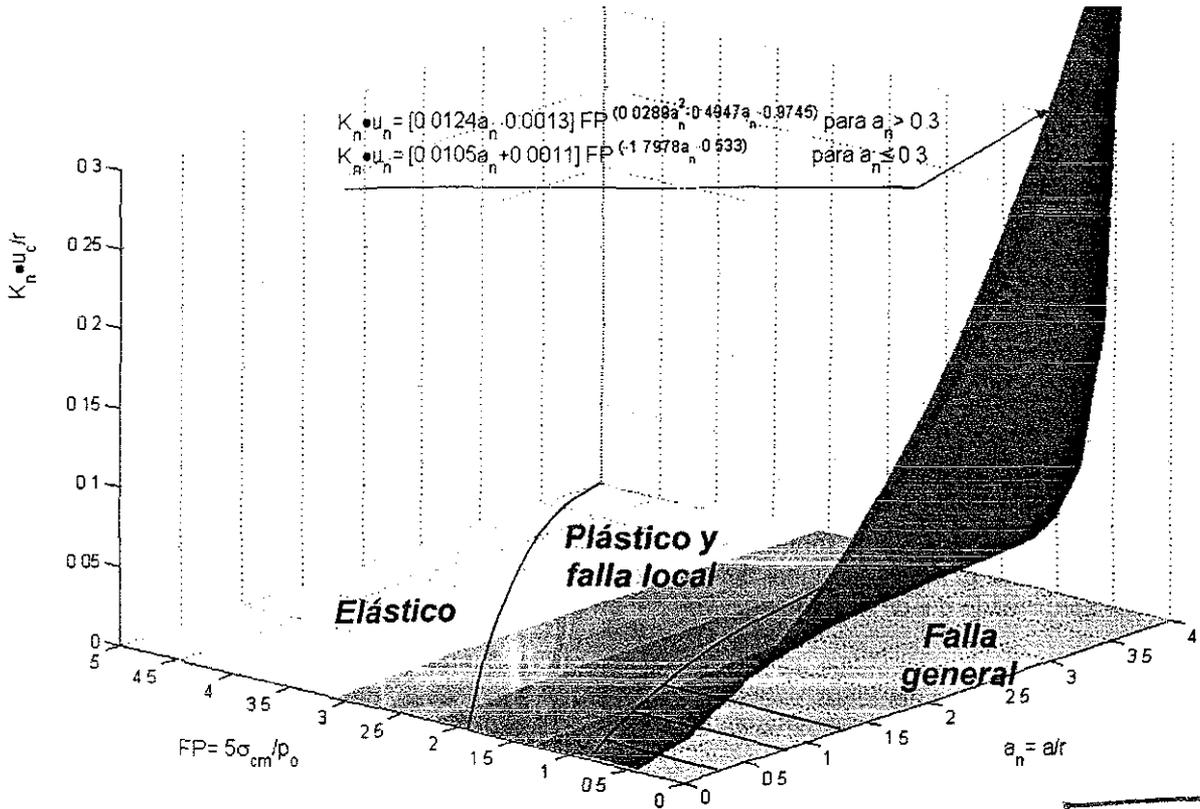
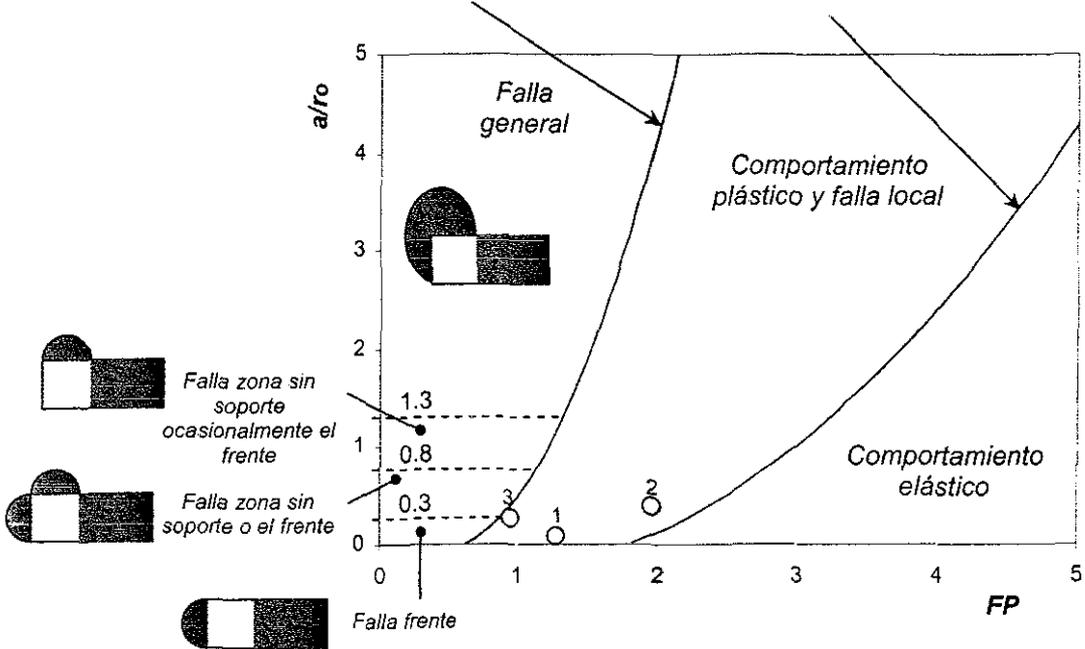
Criterio de estabilidad

A partir del comportamiento observado en las curvas adimensionales y del análisis de regresión, es posible elaborar una gráfica global donde pueda evaluarse la condición de estabilidad del túnel y el valor aproximado del desplazamiento vertical en la clave.

En efecto, a partir de los valores de FP , a_n y k_n , puede obtenerse un punto en la gráfica de la fig 2.15 o utilizarse directamente las expresiones de frontera indicadas, para establecer la condición de estabilidad, el mecanismo probable de falla del túnel y el desplazamiento esperado.

$$a/r_0 = 1.8264FP^2 - 1.736FP + 0.385$$

$$a/r_0 = 0.2476FP^2 - 0.3455FP - 0.1747$$



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.15 Comportamientos posibles del túnel en el proceso constructivo.

En la fig 2 15 se presentan tres casos de túneles construidos en el proyecto del Canal de la Mancha, cuyas características se resumen a continuación:

CASO	TÚNEL	GSI	m_i	σ_{ci} (MPa)	Avance (m)	Espesor del soporte (cm)	Observaciones
1	Túnel de desvío Inglés	58 a 68	6 a 8	3 a 5	1 5	30	Excavación seccionada en lutita y arenisca (Marga calcárea y Glauconítica). Existieron problemas ligeros y locales en el revestimiento
2	Colina Castle (Túnel sur)	30 a 60	5 a 7	2 a 3	1 5 a 2	16	Arcilla preconsolidada. Excavación a sección completa Sin problemas
3	Acantilado Shakespeare	60 a 70	5 a 8	1 5 a 6 5	1	30	Lutitas con Caliza y Margas calcáreas. Tratamiento del terreno en paredes y frente de excavación

Obsérvese la correlación buena que existe entre el comportamiento del túnel y lo indicado en el criterio de estabilidad de la fig 2.15. Si bien, en el túnel construido a través de la colina Shakespeare (caso 3) no se reporta incidente alguno, el procedimiento constructivo utilizado (mejoramiento del terreno) obedece a la precaución de evitar la posible generación de zonas plásticas alrededor del túnel

2.5 Seguimiento geotécnico

Tiene como fin asegurar el comportamiento adecuado del túnel durante y después de su construcción, lo cual se realiza bajo el esquema siguiente:

- Observación del comportamiento del túnel
- Evaluación del comportamiento
- Diseño de los mecanismos correctivos

La manera tradicional de observar el comportamiento ha sido: evaluar la calidad del macizo rocoso con las clasificaciones geomecánicas (RMR y Q), efectuar medidas de convergencia de las paredes del túnel, medir los desplazamientos generados dentro del medio (extensómetros o inclinómetros), medir los parámetros mecánicos (pruebas de placa, corte, etc), determinar los esfuerzos de trabajo del revestimiento utilizando gatos planos y caracterizar el soporte mediante su muestreo selectivo (espesor y resistencia).

Con los datos anteriores, el ingeniero verifica que las propiedades mecánicas y el mecanismo de falla planteados en la etapa de diseño sean adecuados, y posteriormente juzga la condición de estabilidad de la excavación y soporte ayudándose, en primer lugar, de su experiencia, y en segundo, de herramientas de análisis (principalmente procesos de inversión) y criterios empíricos.

Cuando las propiedades mecánicas o el mecanismo de falla probable son erróneos, se hacen las adecuaciones pertinentes en el modelo de análisis. Para el caso del mecanismo de falla, su adaptación es un problema difícil de resolver, debido principalmente a las limitaciones de los modelos (condiciones de frontera restringidas, tiempo de cómputo largo, equipo especializado y variables de entrada de difícil evaluación).

Una vez verificado o modificado el mecanismo de falla y juzgada la estabilidad de la excavación, se proponen las soluciones correctivas en los tramos de riesgo que se detecten, y se realizan proyecciones de las condiciones de la excavación que podrán presentarse en los avances inmediatos, a fin de identificar y prever posibles riesgos.

Desafortunadamente, dada la dispersión amplia que se obtiene en los valores de las variables de entrada, el carácter cualitativo de algunas de ellas, la calidad siempre cambiante de la roca, los modelos simples de análisis que no reconocen condiciones particulares o el gasto alto, en tiempo y recursos de cómputo, de los métodos de análisis poderosos y la experiencia nula en proyectos o formaciones rocosas nuevas, hacen que el seguimiento geotécnico sea una actividad *sui generis* y, por que no, artística. No obstante, muchos de los proyectos seguramente hubieran fracasado sin el seguimiento geotécnico, aunque éste haya sido limitado y con los inconvenientes antes mencionados.

Tendencias actuales de instrumentación

Las técnicas actuales de instrumentación y observación del proceso de excavación del túnel tienen las siguientes desventajas:

- Las técnicas de medición de los esfuerzos y/o deformaciones son complejas y caras; su implementación consume mucho tiempo y dan resultados poco representativos ya que solo es posible colocar algunos instrumentos o realizar pocos ensayos
- Las medidas de convergencia dan una imagen general y cualitativa del comportamiento de la excavación, por lo que no permiten establecer tendencias claves del comportamiento del túnel
- Presentan dificultades para su acoplamiento a los procedimientos y materiales nuevos para la construcción de túneles (máquinas tuneleras, concreto lanzado reforzado con fibras, etc).

Para solventar estos inconvenientes se han propuesto otras opciones de instrumentación y observación, de las cuales sobresalen:

Microsísmica (fig 2 16). Determinación de la velocidad de onda de corte en la zona del frente de excavación mediante técnicas de refracción y reflexión. La velocidad de onda de corte y su frecuencia pueden correlacionarse con la calidad del macizo rocoso, y con ello establecerse un índice menos subjetivo (Ashida, 2001) Por otro lado, cuando se realizan estudios de reflexión en el frente de excavación es posible observar inversiones de velocidad en el terreno y localizar reflectores que pudieran poner en riesgo la estabilidad del túnel.

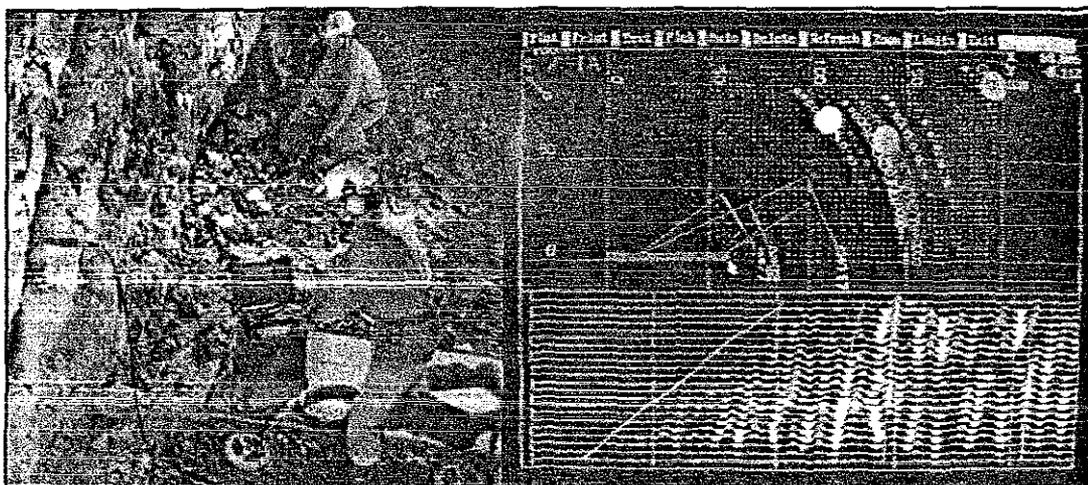


Figura 2.16 Determinación de la velocidad de onda de corte y de reflectores en el frente de excavación.

Vector de desplazamientos (fig 2 17). Schubert y su grupo de trabajo en la Universidad de Graz (Steindorfer y Schubert, 1997) observaron que la orientación del vector de desplazamientos está relacionada con el tipo de roca que se presentará en el frente del túnel; cuando el macizo rocoso

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

próximo es de menor calidad, el vector se dirige hacia el frente, y en sentido contrario cuando la calidad mejora. A partir de esto, ellos proponen un método para el monitoreo de la excavación, con el cual se juzga la calidad del macizo rocoso y se prevén condiciones de riesgo.

En la fig 2.17 se observa una estación total que conjuntamente con primas ópticos colocados en las paredes de los túneles, es posible medir los cambios del vector de desplazamiento con respecto al tiempo. En la parte derecha se observa el cambio de la inclinación del vector de desplazamiento conforme el frente de excavación avanza, nótese que al aproximarse dicho frente al contacto con la unidad geológica con un módulo de deformación mayor, el vector se inclina hacia dicho contacto, y existe un alineamiento de los vectores de las paredes y clave con respecto al mencionado contacto.

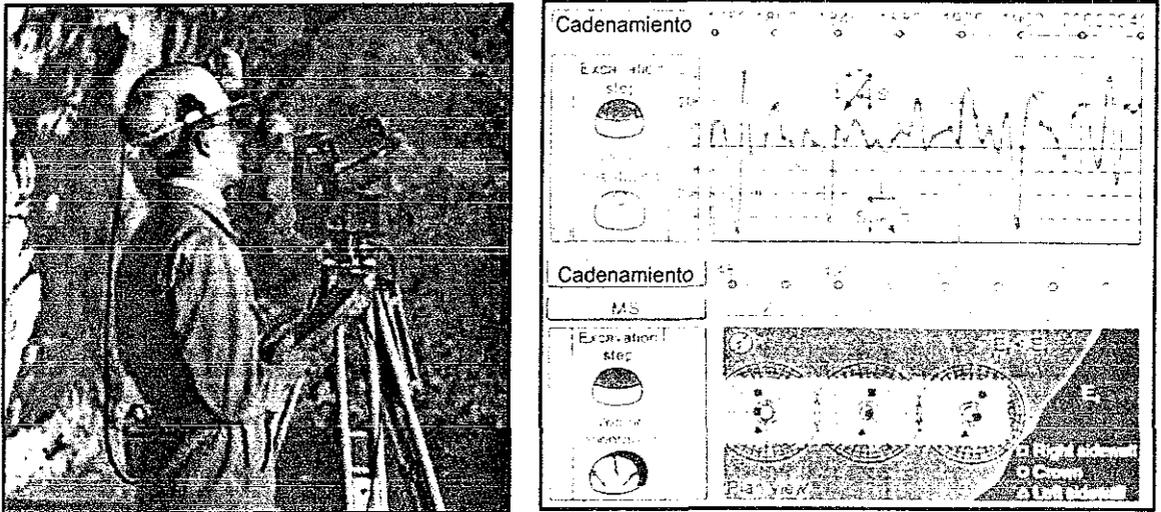


Figura 2.17 Orientación del vector de desplazamiento en las paredes del túnel

Esfuerzos en el revestimiento (fig 2.18). Midiendo las deformaciones en el revestimiento mediante galgas, es posible conocer de manera sistemática las condiciones de trabajo del revestimiento. Los equipos nuevos son más estables, sencillos de operar y de costo menor.

En la fig 2.18 se muestran dos de ellos: strain-gages de cuerda vibrante y celdas de presión. Ambos se embeben en el concreto, son estables y con una durabilidad alta (mayor 20 años)

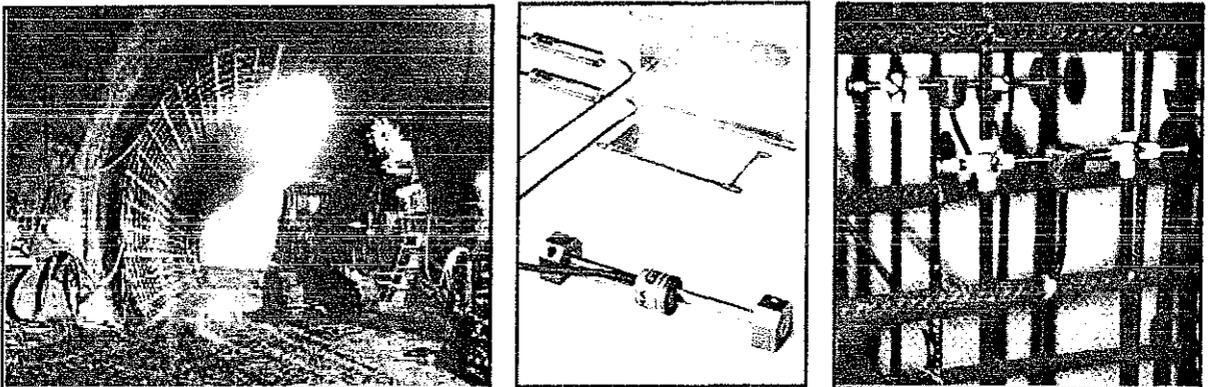


Figura 2.18 Medición de los esfuerzos en el revestimiento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Como alternativa se tienen los sensores de fibra óptica; si bien estos son más estables a los cambios de temperatura su precio alto es la principal desventaja.

Instrumentación de máquinas tuneladoras (2.19). Las máquinas tuneladoras modernas poseen un grado alto de automatización, basado primordialmente en los sistemas de control que monitorean continuamente las variables primordiales del proceso de excavación y del estado de la máquina (velocidad de avance, magnitud del torque y empuje aplicados, velocidad de rotación, etc.). La respuesta de estos sistemas depende de las condiciones de la roca (roca intacta y discontinuidades), las dimensiones del túnel (diámetro y forma) y de las características del equipo (fuerza/cortador, torque, revoluciones/min, diámetro y número de cortadores, etc).

Debido a que las dimensiones del túnel son constantes, la velocidad de avance, rendimiento o variables de control de una máquina tuneladora dependen primordialmente de las características del macizo rocoso y el desgaste de los cortadores. Los ingenieros geotécnicos y mecánicos han aprovechado esta información para poder evaluar la calidad del macizo rocoso que se atraviesa, establecer la relación entre dicha calidad y el comportamiento de la máquina, y con ello optimar el proceso constructivo dada la geología (diseño de los cortadores, empuje de la maquinaria de acuerdo con la calidad de la roca, etc)

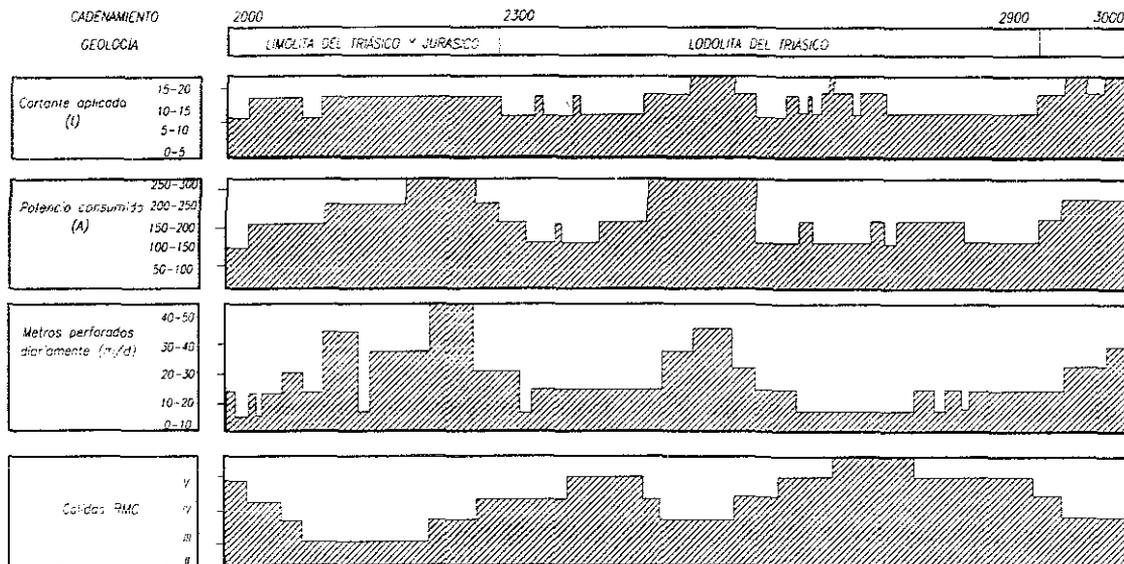


Figura 2.19 Variables para el análisis del proceso constructivo cuando se emplea una máquina tuneladora (Poisel et al., 1999).

Con los procedimientos antes descritos es posible:

- Predecir condiciones de riesgo (vector de deformación, micro-sísmica y variables de control de la máquina tuneladora)
- Evaluar las condiciones de trabajo del revestimiento (medición de esfuerzos y desplazamientos)
- Determinar módulos de deformación del macizo rocoso (vector de deformación y micro sísmica)
- Verificar el comportamiento adecuado del túnel

Asimismo, con estas técnicas recientes de instrumentación se tienen retos nuevos, como la interpretación de los datos obtenidos y su adecuación a las técnicas de análisis comunes.

Problema de control

El seguimiento geotécnico puede visualizarse como un problema de control, principalmente por la tendencia actual de automatización de los procesos constructivos. Un ejemplo es el empleo de las máquinas tuneladoras, donde el proceso es altamente dependiente de las condiciones, características y manejo de la máquina, por lo que el control adecuado de las variables que rigen a la máquina y la relación de estas variables con las características de calidad del macizo rocoso gobiernan la estabilidad de la excavación y la optimización del proceso.

Por otra parte, considerando que la instrumentación actual produce un volumen considerable de información, obligan al ingeniero a utilizar sistemas especializados para su manejo adecuado. Estos sistemas pueden bien ser los empleados por la ingeniería de control.

Visualizar el seguimiento geotécnico como un problema de control es de gran utilidad, ya que con ello se facilita la identificación, manejo, análisis, interpretación y almacenamiento de las variables que controlan el proceso, y es posible además, realizar el proceso en tiempo real e ir adecuando los modelos de análisis y control de acuerdo con el comportamiento del túnel observado.

Un aspecto importante del sistema de control es su capacidad para considerar variables cuantitativas y cualitativas de entrada y de proceso, sin que éstas sean necesariamente las que caracterizan los modelos de análisis comunes.

Estrategia de control

En la fig 2.20 se presenta la estrategia de control propuesta para el procedimiento constructivo del túnel.

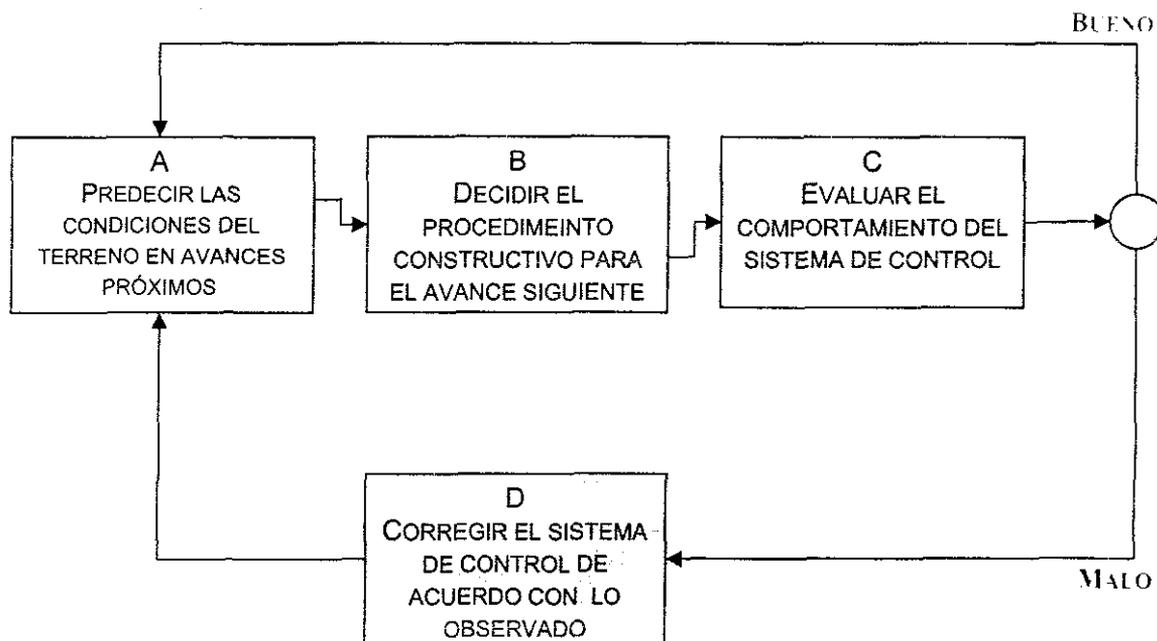


Figura 2.20 Estrategia de control para la excavación de un túnel

Se observan cuatro etapas:

- A. Se desea saber si la calidad del macizo rocoso cambiará para los avances de excavación próximos. Aquí, la predicción se realiza con base en la calidad de roca, el comportamiento observado en los tramos actual y previos, y con la ayuda de información obtenida de estudios de microsísmica y de la perforación de barrenos en el frente de excavación.

- B En esta etapa se decide el procedimiento constructivo óptimo con base en el resultado obtenido en la etapa A (se cambia la secuencia constructiva, el tipo de soporte, la fuerza y rotación aplicada en una máquina tunelera, etc)
- C. En esta etapa el túnel se ubica en la zona para la cual se realizaron las predicciones en la etapa A. Por tanto, es posible evaluar si el resultado de la etapa A y la decisión tomada en la etapa B fueron correctos. En caso afirmativo, se realizan predicciones para las etapas siguientes, es decir, se va nuevamente a la etapa A y, en el caso negativo, se procede con la etapa D.
- D Se corrige el sistema de control con base en los datos observados y se inicia nuevamente el ciclo

De todo el ciclo de control, las etapas A y D son las más delicadas. En efecto, en general el sistema a controlar, el proceso constructivo del túnel en este caso, es altamente no lineal y frecuentemente las variables de entrada al sistema contienen ruido, por lo que los modelos utilizados para realizar la predicción o adecuación tienden a ser complicados.

Es importante comentar que para poder utilizar sistemas de control como estrategia para llevar el seguimiento constructivo del túnel, debe cumplirse la premisa que exista una relación entre el pasado y futuro de la o las variables que se desean predecir, y que el sistema no tenga un comportamiento caótico

Etapa de predicción

Las técnicas utilizadas que han generado resultados satisfactorios son: ecuaciones en diferencias (ARX, ARMAX, FIR, Box-Jenkins, etc.), redes neuronales artificiales (RNA), lógica borrosa (LB), estadística, procesos estocásticos y técnicas híbridas (RNA-ARMAX, LB-RNA, etc). La selección de la técnica a aplicar depende en gran medida del grado de no-linealidad del fenómeno.

En general, la estrategia de diseño del modelo predictor se sintetiza en la fig 2 21.

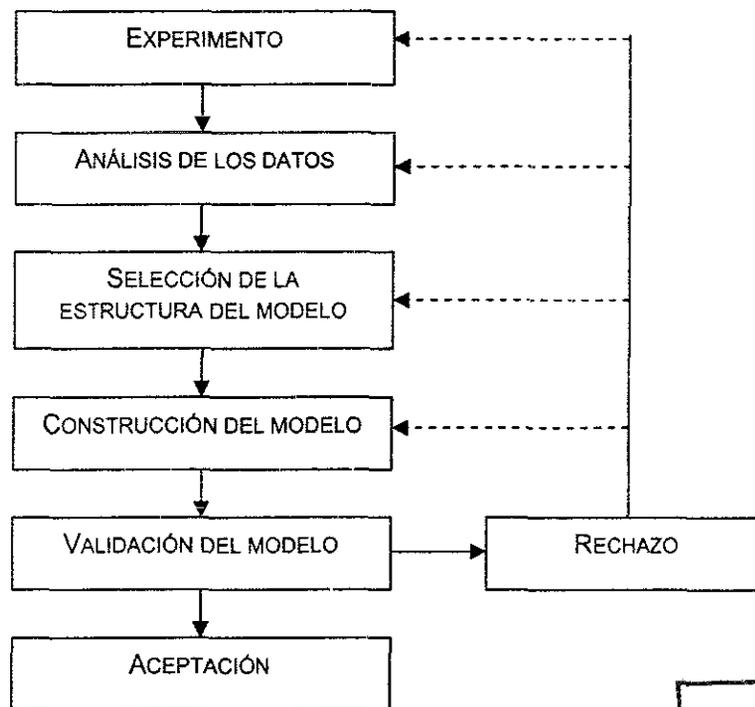


Figura 2.21 Estrategia de diseño del sistema predictor

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los sistemas predictores pueden construirse utilizando resultados obtenidos directamente del fenómeno, de la observación de sistemas con un comportamiento semejante o empleando modelos matemáticos, físicos o numéricos

En la ingeniería de túneles existen ejemplos de modelos predictores:

- Poisel *et al.* (1999) a partir de un análisis inverso relacionan parámetros de una máquina tunelera (fuerza aplicada al cortador, avance y potencia de la máquina) con la calidad de roca utilizando un sistema neuro-difuso (fig 2.19). Si bien este modelo predictor no fue utilizado dentro de una estrategia de control, sirve como modelo inicial para proyectos con características semejantes.
- Alvarez, *et al.* (2000) proponen dos sistemas, uno neuro-difuso y otro con RNA, para optimar el funcionamiento de una máquina tunelera a partir de una base de datos real (Nelson, *et al.*, 1994; Bruines, 1998). Aquí, se utilizan como variables de entrada al sistema características del macizo rocoso (resistencia a la compresión simple de la roca intacta, frecuencia del fracturamiento), características geométricas (diámetro del túnel y cortadores), parámetros de la máquina (revoluciones por minuto, fuerza aplicada a los cortadores y torque), y como variable de salida se tiene la velocidad de penetración de la máquina. Muestran que con el sistema neuro-difuso se mejora el mapeo entre los factores de entrada (características de la roca, máquina y aspectos geométricos) y la velocidad de penetración, y con ello es posible optimar el trabajo de la máquina en comparación con las técnicas estadísticas.
- Yamamoto, *et al.*, (2001) estiman la resistencia del macizo rocoso y la energía de excavación con máquina tunelera midiendo el coeficiente de energía, medido en barrenos ubicados en la periferia del frente de excavación del túnel. Posteriormente, obtienen la distribución espacial de la resistencia del macizo rocoso, de la energía de excavación y de la velocidad de onda P medida en barrenos utilizando técnicas geoestadísticas (función media y de covarianza, y como método de interpolación el Kriging), en las zonas próximas a excavar. Combinando estos resultados con estudios de tomografía de reflexión sísmica obtienen una imagen tridimensional de las condiciones del macizo rocoso, y comentan que al utilizar las técnicas de manera aislada los resultados obtenidos son pobres.

En todos los casos se subraya que la predicción de las condiciones del material en avances futuros es difícil, debido principalmente a la distribución caótica de la calidad de la roca. Si bien en Yamamoto, *et al.*, (2001), se obtienen aproximaciones buenas, en su método se emplean técnicas indirectas costosas, además de ser difícil su aplicación rutinaria. Por otra parte, se observa que las variables de entrada no son aquellas empleadas en la ingeniería de túneles tradicional (medidas de convergencia, etc), y que su correlación con la variable por controlar en general es alta. Un punto a resaltar de los dos primeros casos es la utilización de bases de datos como conocimiento en la construcción de los sistemas de control; otro, que los resultados amplían dicho conocimiento.

Etapas correctivas del sistema de control

En esta etapa se emplean distintas estrategias de optimación, como la minimización de funciones de error, de energía o procesos estocásticos (procesos de decisión de Markov), para adaptar el controlador al comportamiento observado del sistema. Existen diversas técnicas adaptativas: redes neuronales recurrentes, ecuaciones en diferencias, algoritmos genéticos, aproximaciones estocásticas, aprendizaje reforzado y sistemas híbridos.

El sistema de control, como el indicado en la fig 2.20, puede ser abierto, semiabierto o cerrado; en el caso abierto, el controlador recibe información del comportamiento del sistema y utiliza esta información para modificarse; en un sistema semiabierto, la información obtenida del sistema también se utiliza para corregir al controlador, pero esta modificación se realiza fuera de línea (off-line); en un sistema cerrado no se utiliza la información generada por el sistema.

Una de las características que debe tener un sistema de control para su aplicación al seguimiento del proceso constructivo de túneles es ser abierto o semiabierto, dado que antes de empezar la

construcción de un túnel se tiene poca información sobre las características del macizo rocoso, las condiciones hidráulicas, etc., y este conocimiento se va incrementando a medida que la construcción avanza.

Preproceso de la información

La calidad de la respuesta del sistema de control depende en gran medida de la calidad de los datos con los cuales se diseña o se adecua el sistema, y dado que es común tener ruido en las variables que se utilizan durante la observación del comportamiento del túnel, es necesario realizar un análisis de los datos obtenidos (fig 2.21), para valorar los efectos no-lineales, los niveles de ruido, la representatividad y la coherencia. Asimismo, es conveniente llevar a cabo un análisis de componentes principales a fin de reducir el número de variables de entrada a los modelos de control.

Para evaluar el nivel de ruido, la representatividad y la coherencia de los datos se realizan análisis estadísticos (correlación y análisis espectral), gráficas matriciales (interrelación de todas las variables del sistema) y filtraje.

Recientemente, el grupo de Jones en la Universidad de Gales (Jones, *et al.*, 1998), ha propuesto la técnica denominada Prueba Gama, que puede asistir en el análisis no lineal como precursor del modelado (anexo B). Con esta técnica se obtienen dos índices Γ y A . El primero es una estimación de la varianza del ruido en los datos, mientras que el segundo da idea del nivel de complejidad requerido del modelo para representar apropiadamente el fenómeno.

Desplazamientos inducidos por heterogeneidades en el terreno

Los resultados de las investigaciones de Schubert (Steindorfer y Schubert, 1997) indican que la orientación del vector de desplazamiento en la periferia del túnel puede relacionarse con posible cambios en la calidad de roca en las zonas próximas a excavar (fig 2.17). A partir de los resultados de estas investigaciones se realizaron análisis numéricos 3D a fin de definir el comportamiento y las tendencias del vector de desplazamiento que pudieran utilizarse durante el control del túnel.

Modelado 3D

Mediante un modelo evolutivo 3D de diferencias finitas explícito considerando un comportamiento elastoplástico del macizo rocoso (Itasca, 1997), se estudia el efecto en el vector de desplazamientos de la presencia de una heterogeneidad tabular en el macizo rocoso de espesor B y localizada a una distancia L del frente de excavación (fig 2.22).

Se estudiaron diferentes contrastes de calidad de roca entre la heterogeneidad y el medio ($0.2 \leq \{FP_2/FP_1\} \leq 5$), anchos de anomalía ($1 \leq \{B/r_0\} \leq 4$) y distancias de la heterogeneidad al frente de excavación ($-1 \leq \{L/r_0\} \leq 3.33$), considerando un túnel de 6 m de diámetro, revestido con una capa de concreto de 0.25 m de espesor y con avances de excavación sin soporte de 2 m. En todos los casos, se modeló el procedimiento constructivo de manera evolutiva, considerando como primera etapa la generación de esfuerzos geoestáticos.

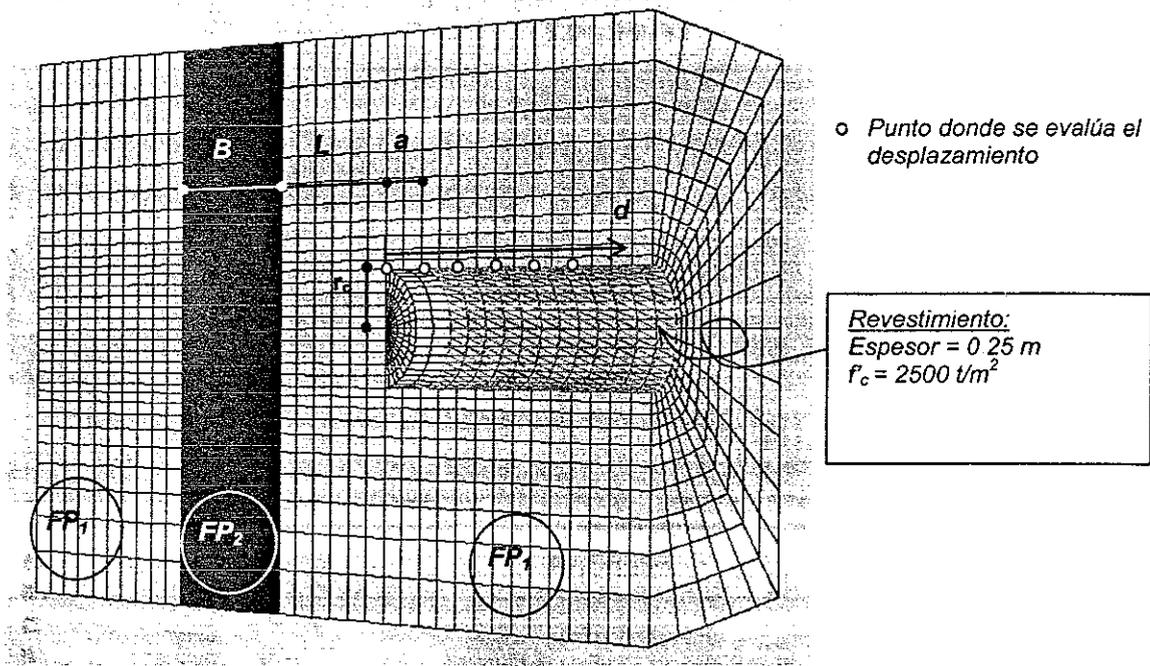


Figura 2.22 Modelo 3D para el estudio del efecto de una heterogeneidad tabular en el vector de desplazamientos medido en la periferia del túnel.

Resultados

Los resultados obtenidos fueron los vectores de desplazamiento en la clave y pared del túnel a diferentes distancias al frente de excavación (d). De la observación de estos resultados se concluye que *la componente vectorial que refleja mejor el efecto de la presencia de la heterogeneidad es la horizontal y en especial la localizada en la clave*. Por lo anterior, los resultados mostrados a continuación se refieren a dicha componente.

Zona de influencia de la relajación de esfuerzos por tuneleo

Con base en los casos estudiados se observa que la zona de influencia de la relajación de esfuerzos por la excavación del túnel en la zona por excavar es aproximadamente de 1.3 veces el diámetro del túnel, y que el efecto de la anomalía para distancias iguales o menores a dicho valor empieza a ser importante en función del contraste y espesor de la heterogeneidad.

En la fig 2.23 se presentan dos casos, $FP_2/FP_1=0.2$ y 4 , donde se observan los contornos de igual desplazamiento horizontal para distintas distancias L y con un ancho constante de la anomalía de $B/r_0=2$. Aquí se observa que el efecto de la presencia de la heterogeneidad es más notorio a medida que el frente de excavación se le aproxima, ocasionando un incremento de los desplazamientos cuando la calidad de roca de la anomalía es menor ($FP_2/FP_1=0.2$), y decremento para una calidad mayor ($FP_2/FP_1=4$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

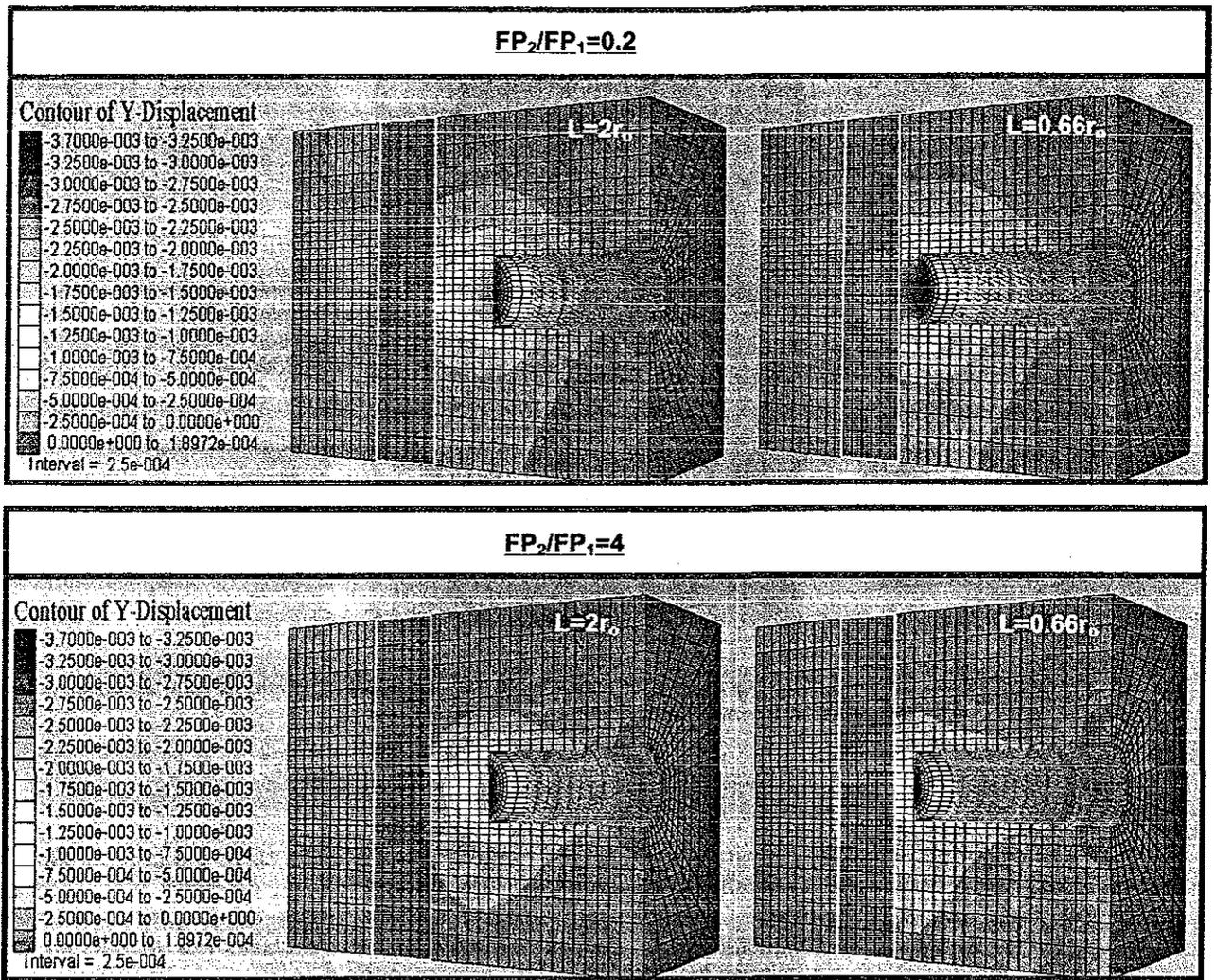


Figura 2.23 Efecto de la presencia de heterogeneidades en los desplazamientos horizontales en el medio para dos casos de contraste de calidad de roca

Orientación del vector de desplazamiento

En la fig 2.24 se presenta la distribución del vector de desplazamiento para dos condiciones de contraste en la calidad de la heterogeneidad y del medio ($FP_2/FP_1=0.2$ y 4).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

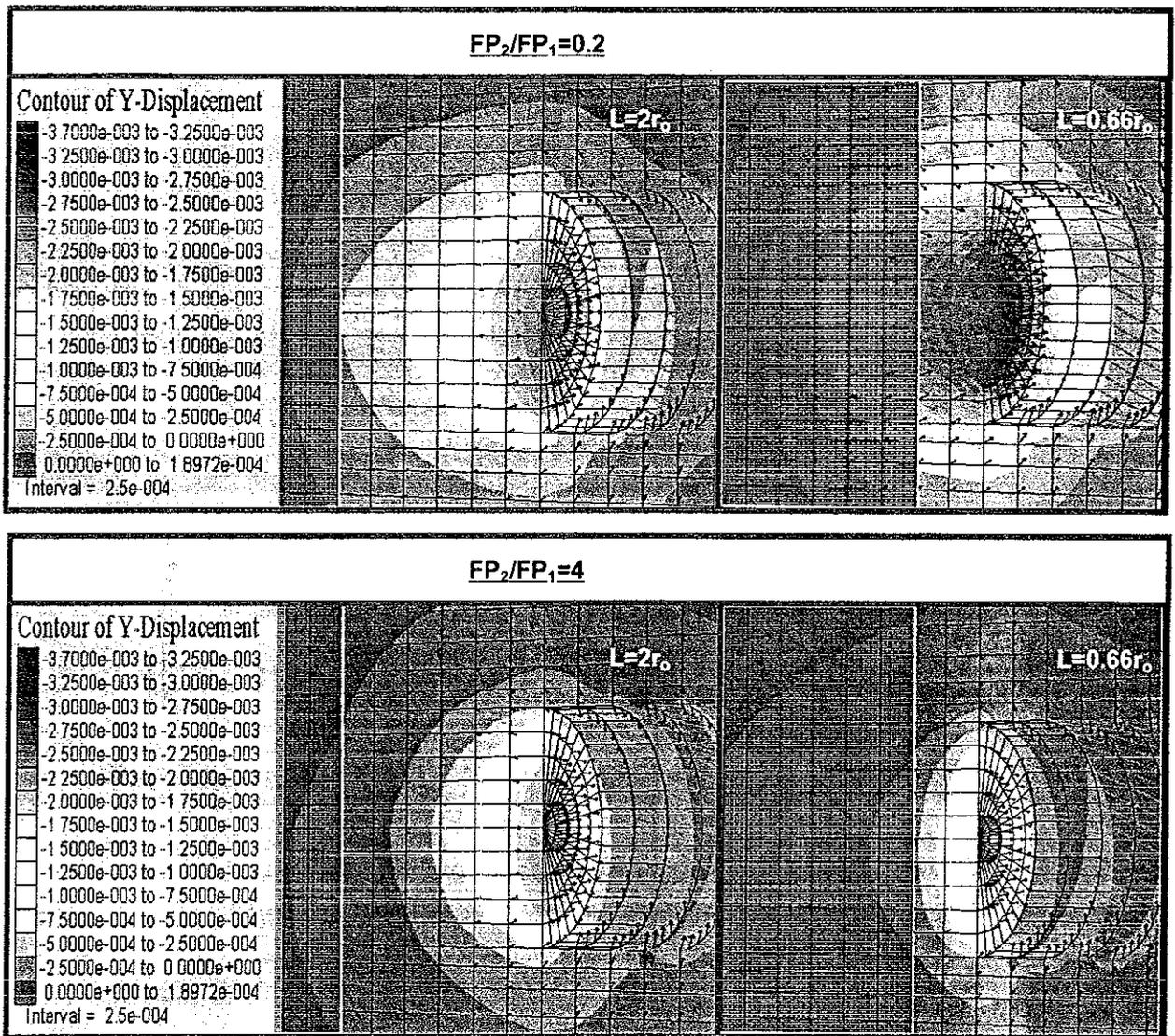


Figura 2.24 Cambio en la orientación del vector de desplazamientos por efecto de la presencia de heterogeneidades en el medio.

Se observa que el efecto de la excavación del frente en el vector de desplazamientos es inclinarlo en dirección contraria a la de la excavación del túnel; esta inclinación es afectada por la presencia de la heterogeneidad: aumenta cuando la calidad de la anomalía es menor y disminuye cuando la calidad es mayor. Este efecto crece a medida que la distancia L disminuye y el espesor B aumenta; es decir, si la relación B/L crece el efecto es mayor y menor si dicho cociente disminuye.

Efecto de la heterogeneidad

El efecto de la heterogeneidad en los desplazamientos horizontales para los casos estudiados se aprecia en la fig 2.25 (el caso $B/L=15$ representa la condición $L \approx 0$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

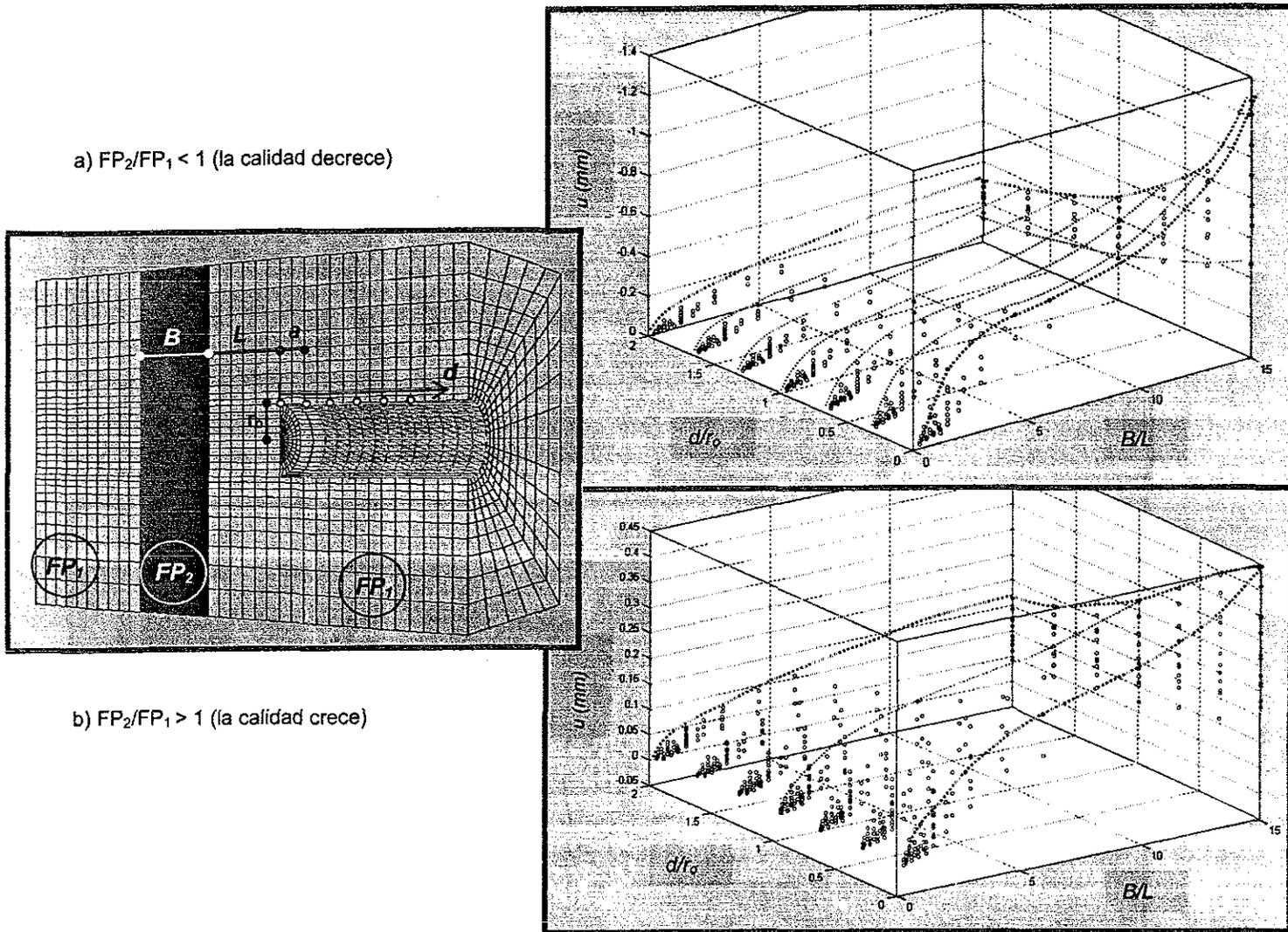


Figura 2.25 Efecto en los desplazamientos horizontales en la clave del túnel por la presencia de una heterogeneidad tabular en la proximidad del frente de excavación.

Se tienen las siguientes observaciones:

- El desplazamiento es positivo (en sentido del avance) si la calidad de la anomalía es mayor ($FP_2/FP_1 > 1$), y negativo (en contrasentido del avance) si la calidad es menor ($FP_2/FP_1 < 1$). Este resultado es de gran importancia porque es un índice para la determinación de la calidad del macizo rocoso en los avances próximos.
- El valor absoluto del desplazamiento es mayor si B/L crece, y menor si B/L decrece.
- A medida que el punto de medición está más cercano al frente de excavación (d/r_0 pequeños), el efecto de la heterogeneidad es más evidente.
- La magnitud de los desplazamientos en la zona revestida ($d/r_0 > 0.66$) decrecen de manera importante en comparación con los obtenidos en la zona sin soporte.
- La magnitud de los desplazamientos para $FP_2/FP_1 < 1$ son mayores que los correspondientes a $FP_2/FP_1 > 1$, por la magnitud de las zonas de plastificación generadas en el primer caso.
- Considerando que puedan medirse confiablemente desplazamientos tan pequeños como de 0.15 mm, es posible reconocer los efectos de la heterogeneidad cuando $3 \leq FP_2/FP_1 \leq 0.45$ y $B/L \geq 0.8$.

2.6 Modelado de sistemas dinámicos

Entender y modelar detalladamente el comportamiento de un macizo rocoso cuando se construye un túnel, talud o cimentación, son actividades difíciles de llevar a cabo, dado que el macizo rocoso es un medio discontinuo, heterogéneo, anisótropo, no lineal y cambiante con el tiempo. Esta dificultad aumenta al considerar que el conocimiento es deficiente en aspectos como la interrelación y dependencia entre las variables que gobiernan dicho comportamiento y la dinámica de los procesos externos, tuneleo, por ejemplo, y geológicos involucrados

Si bien con las técnicas modernas, como el elemento discreto, de diferencias finitas, etc., es posible modelar el comportamiento de la roca mediante ecuaciones constitutivas que consideran o no al medio como un continuo, aún se tienen limitaciones: las variables de entrada o iniciales son independientes, y los métodos se aplican a sistemas estáticos, aunque en ocasiones pueden lograrse aproximaciones al modelado dinámico

Proceso dinámico

En esencia el comportamiento del macizo rocoso es dinámico; es decir, cualquier perturbación inducida en el medio provocará cambios en todas las componentes del macizo rocoso de manera evolutiva. Estos cambios, finalmente alcanzarán un estado de equilibrio, por ejemplo energético, en función de las interrelaciones que existen entre todas las componentes del sistema, pero en ocasiones dicho equilibrio no podrá lograrse y entonces se dice que se produce una falla o colapso en el macizo rocoso.

Esta perspectiva considera que el macizo rocoso, las condiciones de frontera y el proceso constructivo del túnel forman parte de un sistema en el cual todas las partes interactúan.

En la fig 2.26 se ilustra, de manera simplificada, la dinámica de algunos procesos que se llevan a cabo cuando un túnel es excavado

Sistema ingenieril de rocas

Fue propuesto por Hudson (1989, 1991 y 1992) y es conocido por sus siglas en inglés RES (Rock Engineering System). Es una técnica para estudiar y modelar los mecanismos de interacción y la dinámica de los procesos de interacción, considerando los parámetros principales del macizo rocoso, las condiciones de frontera y los efectos externos, como la excavación del túnel.

El sistema RES se apoya en el concepto de matriz de interacción, donde se representan los mecanismos y se modela el flujo de energía del sistema.

La matriz de interacción se construye colocando a los parámetros principales o variables de estado (estado de esfuerzos, flujo de agua, proceso constructivo, etc) en la diagonal principal, y en los lugares restantes se posicionan las funciones de interrelación entre parámetros.

En la fig 2.27 se presenta un ejemplo donde la matriz de interacción contiene cuatro variables de estado; la estructura del macizo rocoso, los esfuerzos, el flujo de agua y el proceso constructivo (Hudson, 1992).

Como se indicó, en los términos ubicados fuera de la diagonal principal se localizan los mecanismos de interrelación entre las variables de estado, las cuales son relaciones causa-efecto. Dado que la relación entre dos variables es distinta dependiendo del sentido del flujo de información (por ejemplo, estructura→esfuerzos y esfuerzos→estructura), la matriz de interacción es asimétrica.

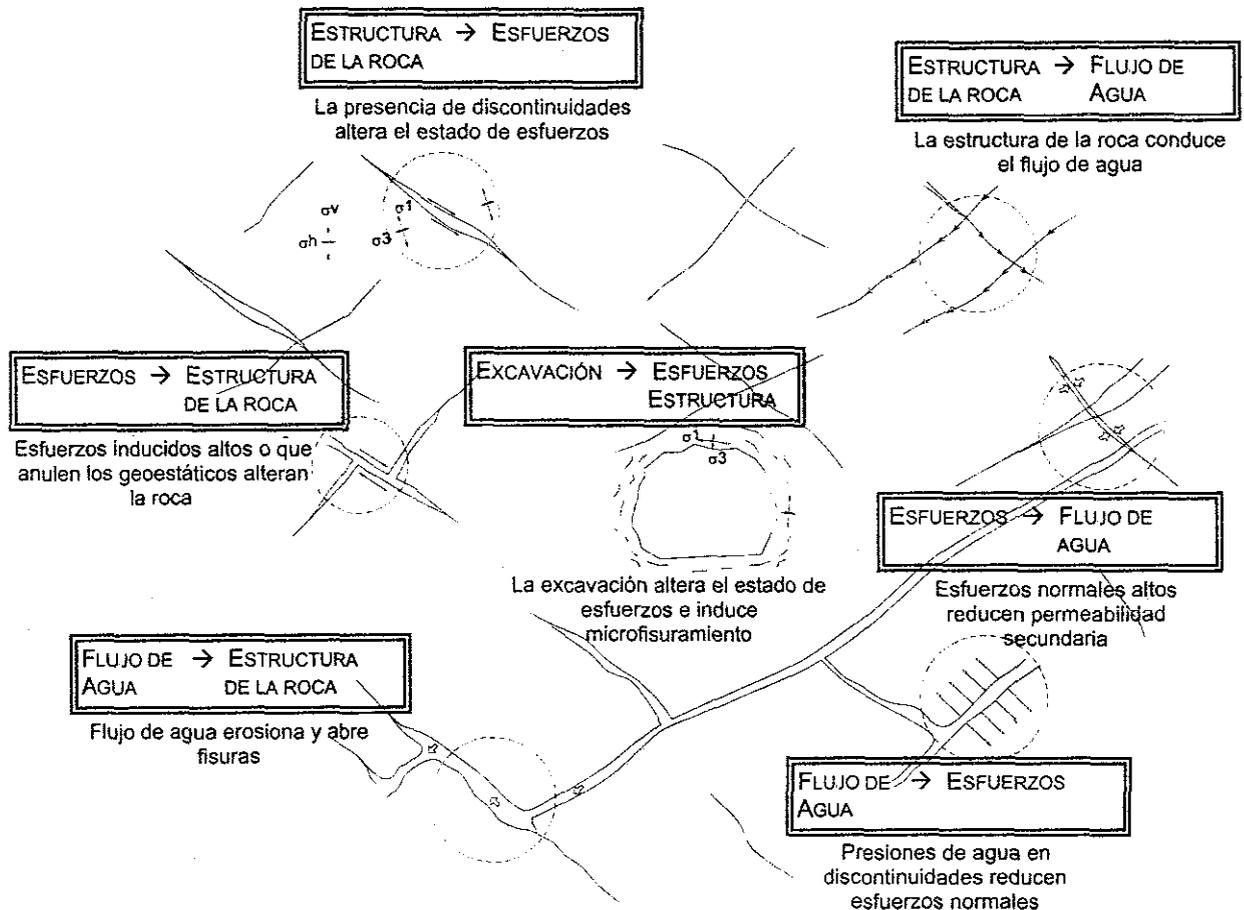


Figura 2.26 Procesos dinámicos actuando en el macizo rocoso en presencia de un túnel (Hudson, 1989)

Esta asimetría conduce a otra característica sobresaliente de la matriz de interacción. Es posible conocer la dependencia, o grado de dominio, de una variable de estado con respecto a las demás y a su vez con el sistema en general. Por tanto, en un sistema es posible definir las variables dominantes y las débiles, y a partir de ello establecer estrategias para controlar al sistema

Para construir la matriz de interacción es necesario realizar las siguientes etapas:

1. Seleccionar las variables de estado potencialmente relevantes
2. Codificar la matriz de interacción
3. Aplicar la matriz de interacción para la predicción de parámetros
4. Monitorear el proceso dinámico
5. Evaluar la energía del sistema

En la primera etapa, se identifican las variables de estado o parámetros potencialmente relevantes de acuerdo con el objetivo del estudio que se desea realizar, el efecto de la construcción del túnel, por ejemplo

En la segunda etapa, se construye la estructura básica de la matriz de interacción y se codifica; es decir, se definen cuantitativamente las relaciones causa-efecto entre todas las variables del sistema. Esta es una etapa complicada y delicada, ya que se establecen los mecanismos de

interrelación, que en general son no-lineales, a partir de estudios de campo y laboratorio, o de la experiencia obtenida en proyectos similares.



Figura 2.27 Matriz de interacción del sistema (RES)

Se han propuesto estrategias diversas para la codificación de la matriz de interrelación: simplificación lineal y binaria, ecuaciones diferenciales parciales y análisis completo de los mecanismos. Recientemente, se han enfocado esfuerzos en la aplicación de sistemas híbridos para realizar la codificación, los cuales se basan en RNA del tipo Multiperceptrón Multicapa y Hopfield (Hudson 1991 y 1992; Jiao y Hudson, 1995 y Cai *et al* , 1998).

La tercera etapa consiste en la operación de la matriz de interacción, para lo cual se han propuesto también diferentes técnicas (Hudson, 1992; Jiao y Hudson, 1995; y *Cia et al* , 1998): análisis de trayectorias, análisis de redes y redes neuronales artificiales.

En la cuarta y quinta etapa, se monitorea el proceso dinámico a fin de definir las condiciones de estabilidad del sistema, basándose en el comportamiento del índice energético atribuido al sistema.



3 CONCEPTOS BÁSICOS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y LÓGICA BORROSA

Día a día han venido incrementándose las aplicaciones de la Inteligencia Artificial (IA) en la geotécnica, principalmente en la construcción de modelos de análisis y en la interpretación empírica de datos observados, ya sea de experimentos o del fenómeno directamente. Entre las técnicas más utilizadas se tienen las Redes Neuronales Artificiales (RNA), Lógica borrosa (LB), Algoritmos Genéticos (AG), Experiencia Adquirida (EA) y sistemas basados en el conocimiento (SBC).

Los resultados de las aplicaciones de la IA si bien han sido hasta ahora alentadores, aún falta mucho por hacer. En principio, remover, mediante el conocimiento sustentado, ese velo mágico y misterioso que se les asigna comúnmente a las técnicas nuevas, establecer métodos sólidos y confiables para su implementación y definir sus alcances y limitaciones en la geotecnia.

El primer trabajo para ubicar la IA en la geotecnia lo presentó D. Toll (1996), aquí se resumen las aplicaciones de la IA en la geotecnia y se dan comentarios sobre la implementación de dichas técnicas. Asimismo, se observa una tendencia marcada en la utilización de sistemas híbridos basados en SBC, RNA y LB a problemas diversos; diseño, análisis e interpretación, y a todo tipo de aplicaciones: caracterización estratigráfica, clasificación, diseño de cimentaciones, estructuras de retención, taludes, túneles, licuación, mejoramiento del terreno, ingeniería sísmica, flujo de agua, caracterización estratigráfica de depósitos de suelos, etc.

La aplicación de la IA en la Ingeniería de Túneles es importante y variable, desde clasificación y asignación de parámetros mecánicos a partir de las clasificaciones geomecánicas (Zhang *et al.*, 1988; Juang y Lee, 1989 y Madhu *et al.*, 1995), hasta el monitoreo durante la construcción (Deb *et al.*, 1994), pasando por la identificación de mecanismos de falla (Lee y Sterling, 1992), diseño del soporte (Fairhurst y Lin, 1985; Feng y Lin, 1992; Ghosh *et al.*, 1987; Zhang *et al.*, 1991; King y Signer, 1994; Sterling y Lee, 1992 y Moon *et al.*, 1995), diseño del proceso constructivo (Halabe y Einstein, 1994; Coulthard y Ciesielki, 1991; Russell y Alhammad, 1993; Rangel y Romo, 1999; Rangel, *et al.*, 2002), y estimación de los asentamientos en superficie (Mi y Jieliang, 1989; Rangel y Romo, 2000).

Muchos de los sistemas mencionados previamente son prototipos, pero dejan ver que los métodos de la IA son técnicas que en un futuro próximo se desarrollarán y se comercializarán ampliamente, principalmente en las áreas de los sistemas expertos, como la asistencia en la toma de decisiones en las etapas de la programación, diseño y seguimiento de la construcción.

El objetivo de este capítulo es dar una visión general de las técnicas de RNA y LB, por tanto, al lector interesado se le recomienda recurrir a las referencias citadas.

3.1 Redes neuronales artificiales

Las RNA es una técnica computacional que, a partir de un modelo simple de la manera en que las neuronas biológicas trabajan en el cerebro, se adquiere, analiza, sintetiza y almacena información de un fenómeno dado, y con base en esta información pueden responderse cuestionamientos futuros sobre el fenómeno

Una red neuronal se conforma de un grupo de nodos (neuronas) que están interrelacionados mediante conexiones. La resistencia de conexión entre nodos se representa mediante pesos, lo cual implica que unos nodos están fuertemente relacionados y otros no

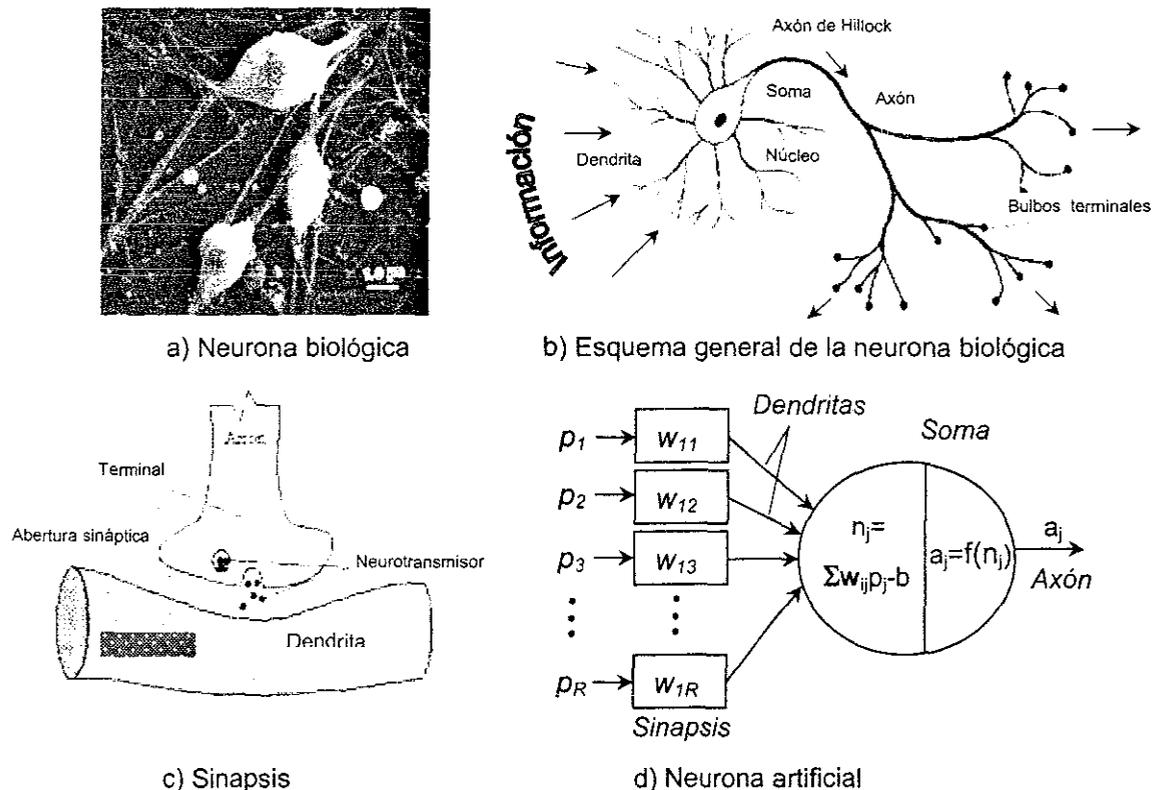


Figura 3.1 Esquemas de las neuronas biológicas y artificiales.

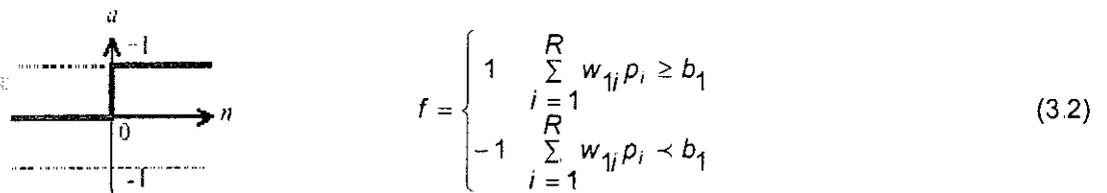
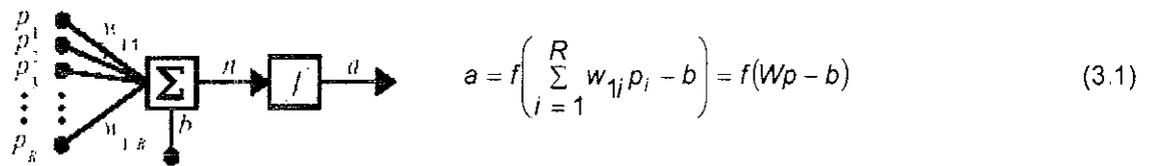
En la parte superior de la fig 3 1b, se presenta la estructura simplificada de la neurona biológica. Sus partes principales son: Dendritas (elementos que reciben la información de neuronas vecinas), el soma (proceso de la información y realización de las funciones vitales), y el axón (transmisión de la información procesada a las siguientes neuronas).

Las neuronas reciben información de sus vecinas mediante las dendritas (fig 3.1b). Esta información posteriormente pasa por el soma y el axón de la neurona hasta situarse en los bulbos terminales, para posteriormente transmitirse a las siguientes neuronas vecinas. Durante este trayecto, la información sufre alteraciones, principalmente es filtrada y en ocasiones amplificada.

En las dendritas existe una zona denominada sinapsis, aquí se transmite la información eléctrica recibida de las neuronas vecinas mediante procesos electro-químicos. El proceso normal es que el impulso eléctrico que llega al bulbo sináptico, causa el desprendimiento de moléculas transmisoras (neurotransmisores), que se difunden a través de la abertura sináptica de la dendrita más cercana (fig 3.1c). Existen dos tipos de sinapsis: excitadoras, cuyos neurotransmisores facilitan el paso de la información, e inhibitoras, donde los neurotransmisores dificultan la comunicación.

En la fig 3.1d se presenta la neurona artificial señalándose las partes equivalentes a la biológica. Las señales que llegan a la sinapsis son las entradas a las neuronas (vector p); éstas son ponderadas (atenuadas o amplificadas) a través de un parámetro, denominado peso (w), asociado a la sinapsis correspondiente. Estas señales pueden excitar a la neurona (sinapsis con peso positivo) o inhibirla (peso negativo) y el efecto de todas las señales de entrada es la suma de las entradas ponderadas. Si la suma es igual o mayor que el umbral de disparo de la neurona (b), entonces la neurona se activa, es decir, pasa el pulso eléctrico a través del axón de la neurona, para transmitirse posteriormente a las siguientes neuronas. El operador que decide cuándo se dispara una neurona y en qué magnitud es conocido con el nombre de función de salida o de transferencia (f).

El anterior proceso simplificado de transmisión de las señales a través de la neurona puede expresarse como sigue:



Este tipo de neurona artificial es conocida con el nombre de perceptrón y fue propuesta por Rosenblatt (1958) Aquí, la respuesta de la neurona es el resultado del promedio ponderado de la R entradas (componentes del vector p), cuya función de salida f es del tipo escalón. En las expresiones anteriores, se incluye el término b , el cual representa un cierto desplazamiento de la función de salida definiendo con ello el umbral de activación de la neurona.

Existen diferentes funciones de salida, siendo las más comunes: escalón, lineal, sigmoide, log-sigmoide, tangente-hiperbólica-sigmoide y gaussiana

Si se consideran varias neuronas interconectadas se tiene una red neuronal (fig 3 2) Esta red es conocida con el nombre de Multiperceptrón y se caracteriza por el hecho de que todos los perceptrones tienen las mismas variables de entrada y como función de salida la escalón. Dado que los perceptrones están ordenados en una columna, se dice que la red es de una capa.

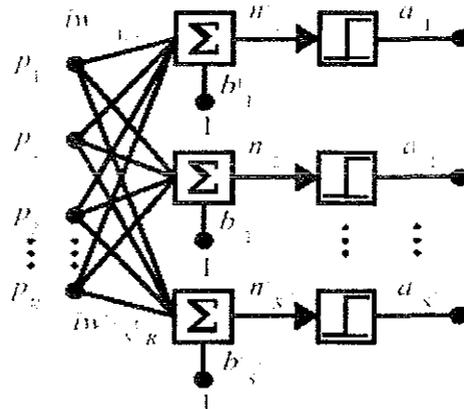


Figura 3.2 Arquitectura del Multiperceptrón.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Estructura

La arquitectura de una red se define con los siguientes factores:

- Número de capas
- Número de neuronas por capa
- Características de las neuronas (función de salida, umbral de activación, etc)
- Patrones de conexión
- Flujo de información

La conectividad de una red se relaciona con la forma en que las salidas de las neuronas se conectan con las entradas de otras, mientras que el flujo de información se refiere al sentido del flujo de información que viaja por la red.

Tipos de redes neuronales

Los diferentes tipos de redes neuronales existentes son el resultado de la combinación de los factores mencionados previamente. En la tabla 3.1 se presentan las redes neuronales comunes.

Multiperceptrón Multicapa. Se forma al colocar en serie los multiperceptrones. Sus conexiones son siempre hacia delante y el aprendizaje es del tipo supervisado con corrección del error. Es uno de los modelos más empleados en la industria, y en general se aplica en problemas altamente no lineales de codificación, clasificación, reconocimiento de patrones, optimación y caracterización de señales.

Multiperceptrón adaptativo. Este multiperceptrón tiene la característica de que la información mostrada a la red se compone por el muestreo, a distintos niveles de desfase en tiempo o espacio, de la variable de entrada. Esta arquitectura se emplea en problemas de predicción y en el procesado de señales, por ejemplo, en la eliminación de ruido.

Funciones radiales. El proceso de la información en este modelo neuronal difiere del empleado en el perceptrón. Aquí, la información de entrada es comparada utilizando la distancia de Hamming, en vez de realizar el promedio ponderado. Por otra parte, como función de transferencia se emplea una función de base radial (tabla 3.1).

La arquitectura se conforma con dos capas con conexiones hacia delante: la primera capa contiene una función de base radial, y la segunda, es una capa de salida lineal. El aprendizaje es supervisado del tipo de corrección del error.

En redes con funciones radiales, si bien se requieren un mayor número de neuronas en comparación con el multiperceptrón multicapa, el tiempo requerido durante el aprendizaje es una fracción del ocupado por el multiperceptrón.

Kohonen. Este modelo parte de la idea de que la información puede organizarse en mapas bidimensionales (Kohonen, 1982), tal como el espacio visual del córtex, capa externa del cerebro, almacena la información.

En la tabla 3.1 se presenta el modelo clásico, donde se tienen dos capas: entrada y salida. Cada una de las neuronas de entrada se conecta a las neuronas de la capa de salida a través de conexiones hacia delante. Entre las neuronas de la capa de salida, puede decirse que existen conexiones laterales de inhibición implícitas, pues aunque no estén conectadas, cada una tiene cierta influencia sobre sus vecinas mediante la función de transferencia, donde se evalúa la cercanía entre ellas.

El aprendizaje es no supervisado, hebbiano (ec 3.11), y del tipo competitivo y cooperativo, donde el objetivo primordial es categorizar los datos de entrada (clustering).

Tabla 3.1 Modelos de redes neuronales de uso común

ESQUEMA	ECUACIÓN	NOMBRE
	$a = f(Wp - b)$	<p>Multiperceptrón</p>
	$a = f^3 \{ W^3 f^2 [W^2 f^1 (W^1 p - b_1) - b_2] - b_3 \}$	<p>Multiperceptrón-multicapa</p>
	$a = f(Wp - b)$ <p>El vector de entrada p está formado por D retrasos de la señal de entrada</p>	<p>Multiperceptrón adaptativo</p>
	$a = f \{ W^2 f_{rb} (\ W^1 - p \ b_1) - b_2 \}$ $f_{rb} = e^{-n^2}$ <p>$\ *\$: Distancia de Hamming</p>	<p>Funciones radiales</p>
	$s_j(t+1) = f \left(\sum_{i=1}^N w_{ji} p_i^k + \sum_{i=1}^N \text{Int}_{p_j} s_p(t) \right)$ <p>Int: Función sombrero mexicano</p>	<p>Kohonen</p>
	$s_j(t+1) = f \left(\sum_{i=1}^N w_{ji} p_i^k - \theta_j \right)$ $f = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^N w_{ji} p_i^k \geq \theta_j \\ -1 & \sum_{i=1}^N w_{ji} p_i^k < \theta_j \end{cases}$	<p>Hopfield</p>

El modelo Kohonen, al igual que el multiperceptrón multicapa, es de las arquitecturas más aplicadas en la industria, a pesar de tener limitaciones respecto al tiempo del aprendizaje y a la necesidad de realizar nuevamente el aprendizaje cada vez que se tiene información nueva. Los campos de aplicación son: reconocimientos de patrones, codificación de datos, compresión de imágenes y optimización

Hopfield. Es una red monocapa (Hopfield, 1982), donde todas las neuronas están interconectadas, con un aprendizaje no supervisado y del tipo hebbiano, En general, estas redes se utilizan en problemas de autoasociación, por ejemplo, para regenerar información incompleta o distorsionada.

Selección del tipo de red neuronal La selección depende del tipo de problema a modelar. En efecto, si se requiere la predicción de una señal en tiempo real puede emplearse el Multiperceptrón adaptativo; si el problema es la identificación de patrones, existen opciones: el Multiperceptrón-Multicapa, Kohonen y funciones radiales.

No existen reglas ni métodos para establecer cuál tipo de red neuronal debe aplicarse, por lo que se recurre a la experiencia del usuario en la aplicación de arquitecturas de redes en un problema similar. No es de sorprender que arquitecturas o redes que se hayan aplicado en algún problema particular y que hayan obtenido resultados inapropiados, posteriormente den resultados excelentes al efectuar modificaciones pequeñas a esa red o aplicar estrategias distintas en el modelo de la red.

Aquí, el enfoque del usuario, la pericia, el conocimiento, la creatividad y los recursos de cómputo juegan un papel principal para obtener éxito en la aplicación.

Por ejemplo, Vullura y Hayagriva (1995) han resuelto el problema del viajero vendedor utilizando las redes Kohonen y Hopfield. En la primera obtiene resultados satisfactorios aunque no óptimos, mientras con la segunda, la solución tiene problemas de convergencia para determinados parámetros iniciales del modelo, pero si estos parámetros son evaluados adecuadamente la solución es buena, en precisión y tiempo

Actualmente, el tipo de red neuronal que se ha aplicado con mayor frecuencia en la ingeniería geotécnica es el Multiperceptrón-Multicapa y Hopfield (Toll, 1998). Este no indica que estas redes sean las mejores, sino más bien, dada su facilidad de implementación y rapidez de cómputo, su aplicación ha sido amplia.

Basados en una conclusión teórica de que un Multiperceptrón-Multicapa con tres capas es un aproximador universal (Hornik *et al.*, 1989), una estrategia propuesta para la obtención de la arquitectura óptima en este tipo de redes es fijar el número de capas a tres e ir incrementando el número de nodos en la capa intermedia hasta obtener la arquitectura que de una respuesta adecuada

Entrenamiento

Para que la respuesta de una red sea adecuada, es necesario determinar su arquitectura mediante mecanismos de aprendizaje.

El aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen mediante el proceso de aprendizaje se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas

Los criterios que se utilizan para realizar el aprendizaje se denominan reglas de aprendizaje, de los cuales se distinguen dos: aprendizaje supervisado y no supervisado. La diferencia entre ambos estriba en la existencia o no de un agente externo que controle el proceso de aprendizaje

Aprendizaje supervisado. Existen tres métodos de aprendizaje:

- Corrección del error
- Reforzado
- Estocástico

Aprendizaje por error La estrategia se describe en la fig 3.3. En este aprendizaje se requiere una base de datos que represente el fenómeno a modelar, la cual se forma con los valores de variables de entradas y sus correspondientes de salida.

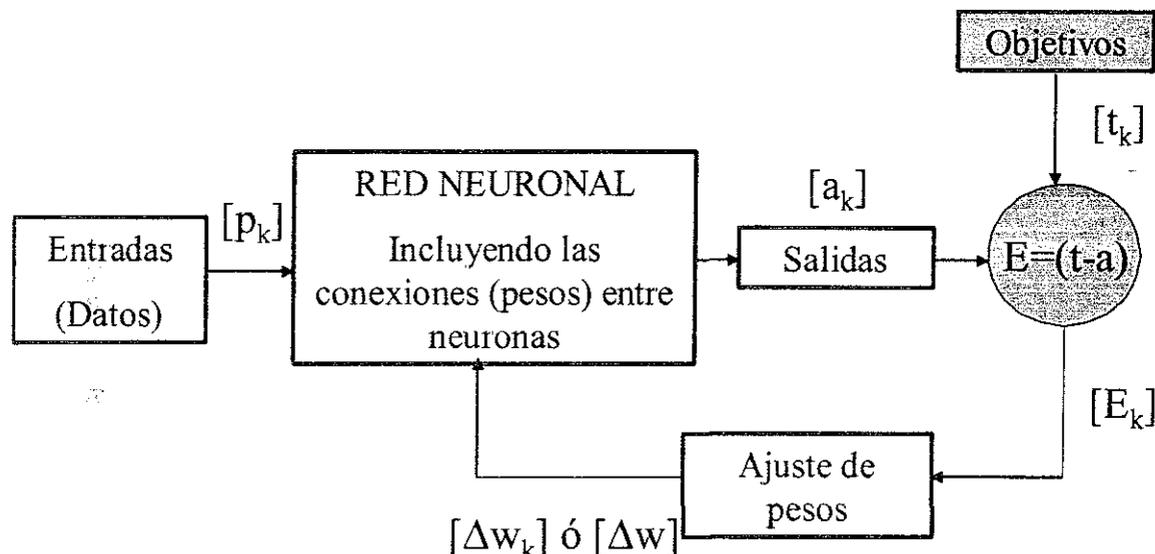


Figura 3.3 Estrategia para el aprendizaje supervisado de una red neuronal utilizando la corrección de la función de error.

Los valores de entrada se introducen a una red cuya arquitectura, pesos de conexión, valores umbrales y funciones de salida iniciales son definidos aleatoriamente, a partir de la experiencia del usuario o mediante técnicas empíricas (Nguyen y Widrow, 1990). Posteriormente, la respuesta de la red inicial a los valores de entrada, vector a , es comparada con los valores de las variables de salidas contenidos en la base de datos, es decir, los valores deseados, vector t . Esta comparación produce un error, con el cual se corregirán iterativamente los valores de los pesos de conexión y umbrales de disparo hasta que se tenga el error mínimo en la respuesta de la red; es decir, el problema de ajuste de los pesos de conexión se convierte en un problema de optimización, es decir, minimización de la función de error.

Existen diversos métodos para encontrar el mínimo de la función error, los más importantes son los denominados de primer y segundo orden (Shepherd, 1997).

La técnica que representa a los métodos de primer orden es la de gradiente, o también nombrada en inglés como *steepest descent*. Aquí, los valores nuevos de los pesos de conexión de la red serán proporcionales al módulo del gradiente del error y seguirán la dirección negativa del vector gradiente, es decir:

$$w(i+1) = w(i) - \alpha \text{grad}\{e\} = w(i) - \alpha \frac{\partial e^2(k)}{\partial w_{1,j}} \quad (3.3)$$

donde i es un índice que indica la etapa del proceso iterativo de adaptación de los pesos de conexión de la red (w), k indica el k -ésimo elemento de la base de datos, $e^2(k)$ es la función de error cuadrático (absoluto o relativo) y α es la longitud de paso en la dirección gradiente

Considerando que la función de error es el error absoluto cuadrático,

$$e^2(k) = (t_k - w^t p_k)^2 \quad (3.4)$$

el gradiente de la función de error queda definido de la siguiente forma:

$$\frac{\partial e^2(k)}{\partial w_{1j}} = \frac{\partial}{\partial w_{1j}} \left[(t_k - w^t p_k)^2 \right] = -2 e(k) p_k \quad (3.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.4 y 3.5 en la 3.3, se obtiene que el nuevo valor de los pesos de conexión es,

$$w(i+1) = w(i) + 2\alpha e(k) p_k \quad (3.6)$$

En los métodos de segundo orden se utiliza un modelo de función cuadrática, y es conocido con el nombre de método de Newton, donde el nuevo valor de los pesos de conexión se calculan con,

$$w(i+1) = w(i) - A^{-1} \text{grad} \{e\} \quad (3.7)$$

donde A es la matriz Hessiana (segunda derivadas).

Dado que es computacionalmente caro calcular la matriz Hessiana, existen diversas técnicas para obtener una aproximación. La más popular es el algoritmo Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963), donde el Hessiano es estimado mediante,

$$A = [J^T J + \mu I] \quad (3.8)$$

donde J es la matriz Jacobiana (primeras derivadas) y μ es un escalar utilizado para incrementar la convergencia del método (cuando $\mu=0$ se está en el método de Newton clásico) Sustituyendo valores en la ec 3.7 se tiene,

$$w(i+1) = w(i) - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e(k) \quad (3.9)$$

En general, los métodos de segundo orden, en especial el de Levenberg-Marquardt, convergen más rápidamente que los de primer orden y son menos proclives a caer en mínimos locales de la función de error, principalmente cuando se acercan al mínimo absoluto. Desafortunadamente, requieren de cantidades grandes de memoria para almacenar en cada paso la aproximación del Hessiano.

Aprendizaje reforzado En este aprendizaje la función del supervisor es indicar, mediante una señal de refuerzo, si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito o fracaso), y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades (Sutton y Barto, 1998)

En los sistemas con aprendizaje reforzado se identifican cuatro elementos principales: política, función de recompensa, función de valor y opcionalmente el modelo del ambiente

La política define la manera en que el agente o supervisor aprende, que generalmente es utilizando reglas o asociaciones estímulo-respuesta

La función de recompensa define cuáles eventos son buenos o malos para el agente a corto plazo, mientras que la función de valor califica los eventos a largo plazo.

El modelo del ambiente es una mímica del comportamiento del ambiente, a fin de predecir su respuesta y en función de ello tomar una decisión sobre el comportamiento del agente.

En el aprendizaje reforzado se buscan acciones para conseguir un valor del estado alto (cantidad total de éxitos que el agente acumulará a largo plazo) y no el éxito en el siguiente suceso.

La parte más importante en los algoritmos de aprendizaje reforzado es el método para estimar el valor del estado. En general, se recurre a la ecuación de Bellman, donde se estima el valor esperado del éxito dado que el agente sigue una política particular y el sistema se encuentra en un estado determinado. Aquí se considera que el proceso es del tipo Markoviano finito.

Un ejemplo de la aplicación del aprendizaje reforzado es el denominado Algoritmo Asociativo con Recompensa y Penalización desarrollado por Barto y Anandan (1985), donde se utilizan redes de dos capas con conexiones hacia delante cuyas neuronas de salida presentan una función de activación estocástica

Aprendizaje estocástico Consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de conexión de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad

Para explicar el aprendizaje estocástico suele utilizarse la analogía entre el estado de estabilidad de la red y el nivel energético en los procesos térmicos, así el estado mínimo de energía corresponde al valor en los pesos de conexión que se ajustan mejor al funcionamiento de la red deseado.

De acuerdo con lo anterior, el aprendizaje consiste en efectuar cambios aleatorios de los pesos de conexión y determinar la energía de la red mediante la función de Lyapunov,

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N w_{ij} s_i s_j + \sum_{i=1}^N b_i s_i \quad (3.10)$$

donde s_i se refiere al valor de salida de la neurona i .

Si la energía es menor después del cambio, se acepta dicho cambio, si por el contrario es mayor, se acepta el cambio en función de una determinada distribución de probabilidades.

Una red que utiliza este tipo de aprendizaje es la Máquina de Boltzman (semejante a la red Hopfield pero con función de salida sigmoïdal).

Aprendizaje no supervisado. Existen dos tipos: hebbiano y competitivo-cooperativo.

El primer caso se basa en el postulado formulado por Donald O. Hebb (1949): Cuando un axón de una neurona A está suficientemente cerca para conseguir excitar una neurona B, toma parte en su activación persistentemente. Algún proceso de crecimiento tiene lugar en una o ambas neuronas, de forma tal que la eficiencia de A, cuando la neurona a activar es B, aumenta

El aprendizaje Hebbiano consiste básicamente en el ajuste de los pesos de las conexiones de acuerdo con la correlación de los valores de activación (salidas) de las dos neuronas conectadas.

$$\Delta w_{ij} = s_i s_j \tag{3.11}$$

Este aprendizaje conduce a redes con las cuales es posible determinar semejanzas, correlaciones o categorías en los datos de entrada, como es el caso de la red de Hopfield.

En el aprendizaje competitivo-cooperativo se pretende que cuando se presente una cierta información de entrada a la red, sólo una de las neuronas de salida se active (alcance su valor de respuesta máximo) Por tanto, en este tipo de aprendizaje las neuronas compiten por activarse

En redes con este tipo de aprendizaje, cada neurona tiene asignado un peso total que es la suma de todos los pesos de las conexiones que tiene a su entrada. El aprendizaje afecta sólo a las neuronas ganadoras (activas), redistribuyendo este peso total entre sus conexiones, sustrayendo una porción a los pesos de todas las conexiones que llegan a la neurona vencedora y repartiendo esta cantidad por igual entre todas las conexiones siguientes de unidades activadas. Por tanto, la variación del peso de una conexión entre una unidad i y otra j , será nula si la neurona j no recibe excitación por parte de la neurona i , y se modificará si es excitada por dicha neurona i

Bases de datos

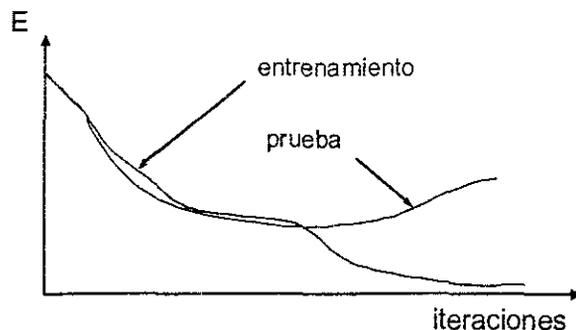
La calidad de respuesta de una RNA depende directamente de la calidad de la base de datos. No existe estrategia alguna para asegurar la respuesta adecuada de una red cuando la base de datos es sesgada, con un nivel de ruido alto, o no representa adecuadamente el fenómeno.

Evaluar cuando una base de datos es o no deficiente es una tarea difícil. Existen estrategias dirigidas a la evaluación de coeficientes de autocorrelación, análisis de componentes principales, *análisis frecuencial*, *gráficas matriciales donde se relacionan todas las variables* y *últimamente la prueba gama* (Anexo B) Con ellas es posible determinar si existen tendencias, agrupamientos, niveles de ruido, representatividad, repetitividad, datos anómalos y la existencia de redundancia en las variables de entrada.

Siempre es recomendable aplicar este tipo de estudios a la base de datos a fin de asegurar que la base utilizada en el proceso de entrenamiento es adecuada; contrariamente, la selección del tipo de red a utilizar y su entrenamiento se torna complicado y en ocasiones decepcionante.

Una vez analizada la base de datos es conveniente dividirla en dos grupos: los datos de entrenamiento y prueba de la red. Con los primeros se realiza el aprendizaje de la red, y con los segundos, que nunca fueron presentados a la red, se verifica la calidad de la respuesta de la red, particularmente su capacidad de generalización; es decir, si la red responde adecuadamente a un espectro completo de las condiciones del fenómeno

Evitar que una red pierda su capacidad de generalización es sencillo. Durante el entrenamiento de la red se monitorea su respuesta tanto para los datos de entrenamiento como los de prueba y se va construyendo la gráfica indicada en la fig 3.4



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.4 Verificación de la capacidad de generalización en una RNA.

Se observa que a partir de un número de iteraciones, el error producido en los datos de prueba no sigue la tendencia descendente de la curva de los datos de entrenamiento. Esta condición significa que la RNA empieza a "memorizar" los datos de entrenamiento, por lo que es necesario detener el aprendizaje de la red en este punto, para evitar que se empiecen a ignorar los casos contenidos en los datos de prueba.

Análisis paramétrico

Un resultado adicional de las RNA es evaluar la importancia relativa que tienen los parámetros que gobiernan el fenómeno modelado. En efecto, del análisis de los pesos de conexión resultantes del entrenamiento de la red, puede evaluarse la importancia relativa de cada nodo de entrada de acuerdo con el siguiente proceso (fig 3 5). Para calcular la importancia relativa del parámetro A vía todos los nodos de la capa intermedia, se suman las importancias relativas que se tiene para cada nodo, las cuales se calculan como sigue:

$$w(1)_{A01} = \frac{W_{A1}}{W_{A1} + W_{B1}} \times \frac{W_{101}}{W_{101} + W_{201} + W_{301}} \quad (\text{importancia relativa de A vía el nodo 1})$$

$$w(2)_{A01} = \frac{W_{A2}}{W_{A2} + W_{B2}} \times \frac{W_{201}}{W_{101} + W_{201} + W_{301}} \quad (\text{importancia relativa de A vía el nodo 2})$$

$$w(3)_{A01} = \frac{W_{A3}}{W_{A3} + W_{B3}} \times \frac{W_{301}}{W_{101} + W_{201} + W_{301}} \quad (\text{importancia relativa de A vía el nodo 3})$$

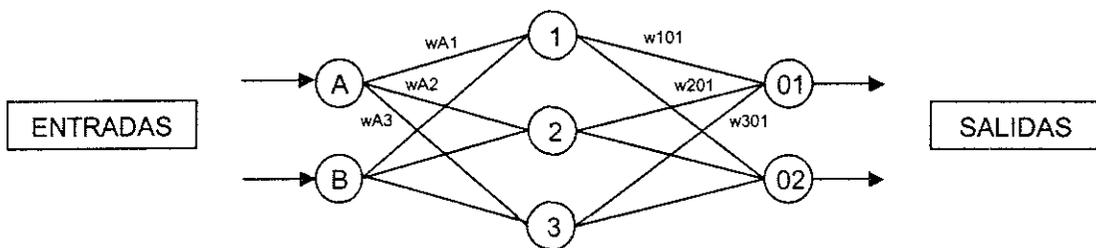


Figura 3.5 Estimación de la importancia relativa de cada parámetro de entrada.

En la fig 3.6 se presenta el análisis paramétrico realizado a una RNA construida para estimar el asentamiento en superficie generado por la construcción de un túnel en suelos blandos, utilizando una máquina tunelera (Rangel y Romo, 2000).

La RNA es un multiperceptrón de tres capas, donde las variables de entrada fueron: el radio del túnel, la cobertura, las propiedades mecánicas del suelo (peso volumétrico, cohesión y módulo de deformación cortante), la presión aplicada en el frente y la velocidad de avance de la tunelera. Los casos analizados incluyen los túneles del drenaje profundo de la ciudad de México, en los tramos del interceptor central, oriente sur, oriente, centro-centro y semiprofundo de Iztapalapa.

Los resultados del análisis de estabilidad indican que los factores de mayor influencia en los asentamientos superficiales son la cobertura, la cohesión, la velocidad de avance y el peso volumétrico. En menor grado, se tienen la presión aplicada en el frente y el módulo de rigidez.

Estos resultados concuerdan con los criterios empíricos de estabilidad de túneles en suelos cohesivos (Tamez, *et al* 1997), donde el factor de plastificación es función de la cohesión, esfuerzo geoestático (γH) y la presión aplicada en el frente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

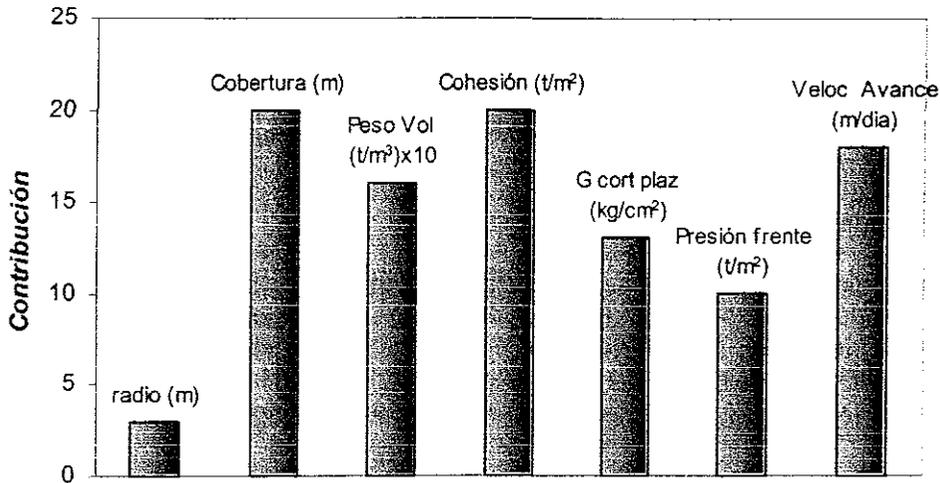


Figura 3.6 Contribución de las variables de entrada en la estimación del asentamiento en superficie generado por la construcción de un túnel con escudo (Rangel y Romo, 2000).

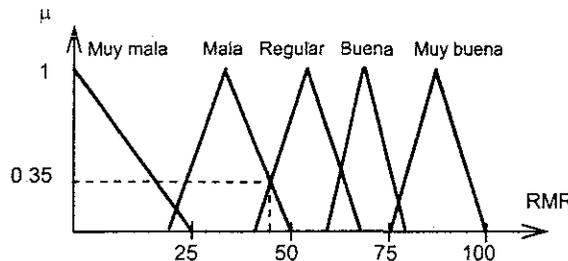
3.2 Lógica borrosa

La LB se inicia con los trabajos de Zadeh (1965) al aplicar la lógica multivaluada a la teoría de conjuntos, estableciendo la posibilidad de que los elementos tuvieran diferentes grados de pertenencia a un conjunto (por ejemplo, una roca con un RQD=40%, Rock Quality Designation, tendría un grado de pertenencia a una calidad de roca mala de valor de 0.8, en el intervalo de 0 a 1) Zadeh introdujo el término borroso y desarrolló un álgebra completa para los conjuntos borrosos, sin que tuviera aplicación práctica hasta mediados de los años setenta, cuando E H Mamdani diseñó un controlador borroso para un motor de vapor.

Por tanto, en LB se trabaja con conjuntos, que se definen por sus funciones de membresía o pertenencia, que se denotan como $\mu_c(x)$ e indican el grado de pertenencia (entre 0 y 1) del elemento con valor x al conjunto C . Por ejemplo, se podría definir la calidad de roca de un macizo rocoso utilizando el criterio de Bieniawski mediante cuatro grupos con valores del RMR acotados de la siguiente manera,

1. Muy mala = {RMR < 25}
2. Mala = {20 < RMR < 50}
3. Regular = {40 < RMR < 65}
4. Buena = {60 < RMR < 80}
5. Muy buena = {75 < RMR ≤ 100}

Las funciones de membresía a estos conjuntos borrosos podrían tener la forma indicada en la figura 3.7. En este caso, un macizo rocoso con un RMR=40 pertenecería en un 35% al conjunto de calidad mala ($\mu_{mala}(40)=0.35$) y en un 35% al de regular ($\mu_{regular}(40)=0.35$).



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.7 Conjunto borroso que describe la calidad de un macizo rocoso.

Conjunto borroso

Un conjunto borroso A que pertenece al espacio X, se define por el conjunto de pares ordenados $(x, \mu_A(x))$,

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\} \quad (3.12)$$

La forma de la función de membresía $\mu(x)$ no es exclusivamente triangular, en sí puede adoptar formas arbitrarias. Comúnmente son triangulares, trapezoidales, sigmoidales, gaussianas, con forma de campana, de escalón, etc. Las más populares son la de forma de campana y gaussiana, debido principalmente a que son suaves, carecen de valores nulos en todos sus puntos y tienen notación simple.

Como se observó, los conjuntos borrosos tienen la particularidad de describir conceptos vagos (roca mala, resistencia alta, soporte ligero, etc.).

Operaciones lógicas

En la LB, las operaciones entre conjuntos se plantean en forma de operaciones borrosas entre las funciones de membresía. Estas operaciones son un superconjunto de la lógica booleana estándar, de hecho si se llevan al extremo los valores borrosos, es decir, a 0 y 1, las operaciones lógicas, tablas de verdad, se cumplen. En la tabla 3.2 se indican las operaciones lógicas empleadas en LB.

Tabla 3.2 Operaciones borrosas y su equivalencia

Operación matemática	Operación conjuntos	Operación lógica	Operación Borrosa
Adición	Unión o conjunción	-y-	Mínimo (A,B)
Producto	Intersección o disjunción	-o-	Máximo (A,B)
Complemento	Complemento	-no-	(1-A)

La manera en que se aplican los operadores de intersección, unión y complemento en las funciones de membresía en dos conjuntos borrosos A y B, se ejemplifica con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Intersección} \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.13)$$

$$\text{Unión} \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.14)$$

$$\text{Complemento} \quad \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.15)$$

Existen otras maneras de definir las operaciones borrosas, de hecho es posible construir otras estrategias (Yager, 1980; Sugeno, 1977) Las indicadas previamente son las que se utilizan rutinariamente.

Reglas condicionales

Son estatutos o condiciones que se aplican a los conjuntos borrosos a fin de llevar a cabo una actividad determinada. Mediante estos estatutos es posible incluir la información o conocimiento que se tiene de un fenómeno dentro de los modelos borrosos. Estas condiciones son del tipo,

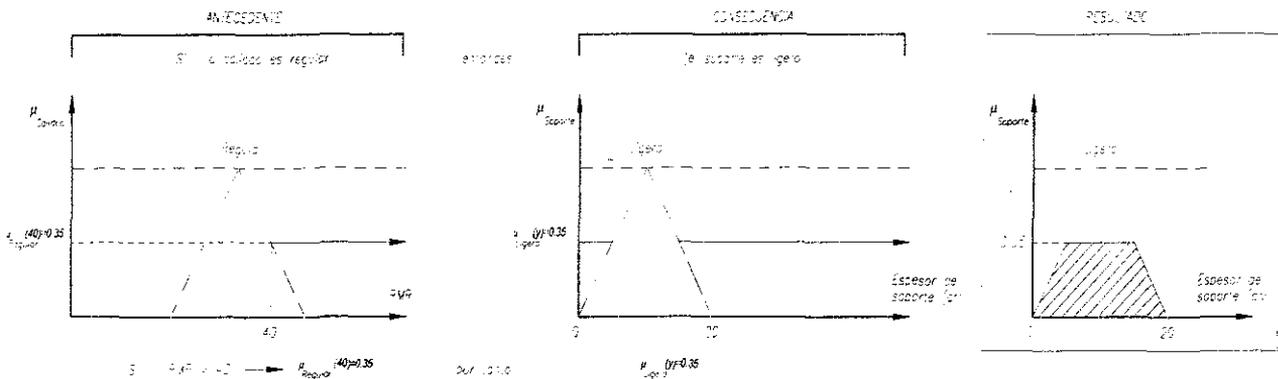
Si x es A, entonces y es B (si la roca es blanda, entonces la calidad es regular)

Donde A y B son conjuntos borrosos que representan conceptos cualitativos (roca blanda, calidad regular, etc) Se denomina antecedente a la parte 'si x es A', y consecuencia a 'entonces y es B'.

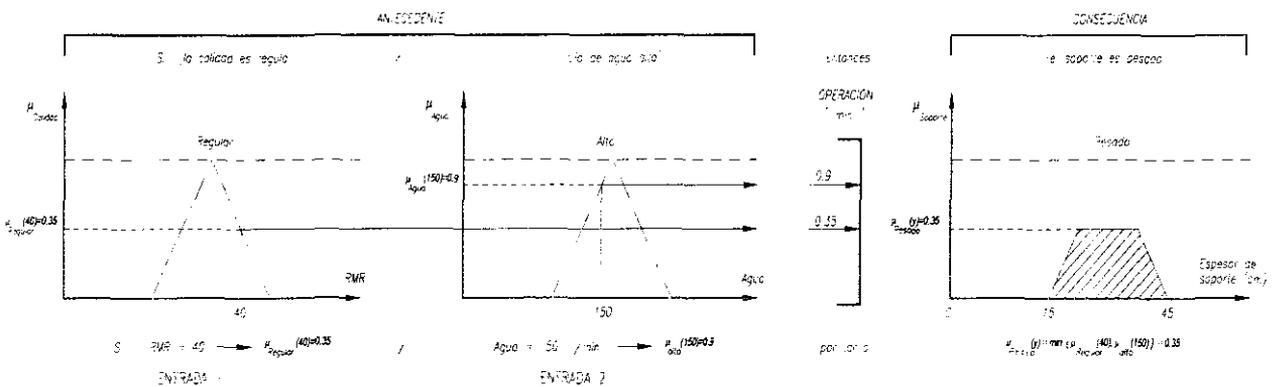
A cada regla condicional se le asocia un valor denominado peso que, en principio, coincide con el grado de pertenencia de la entrada x al conjunto indicado en el antecedente ($\mu_A(x)$). Este peso permite establecer el grado de pertenencia de la salida y del sistema al conjunto indicado en la consecuencia de la regla ($\mu_B(y)$); es decir,

Si (x es A) , entonces (y es B) Por tanto, el peso de la regla es $\mu_A(x)$ [antecedente], y el grado de pertenencia de la salida y es $\mu_B(x) = \mu_A(x)$ [consecuencia]

Por ejemplo,



Cuando el sistema tiene varias entradas, se aplican las operaciones borrosas. Por ejemplo,



Un caso común es tener diferentes entradas, salidas y reglas condicionales. Aquí, las operaciones borrosas se aplican a las entradas y salidas, y el resultado seguirá un proceso denominado de agregación

Cuando se construye un sistema de LB, todo el conocimiento que se tiene del fenómeno a modelar se expresa por un conjunto de reglas condicionales. Este conjunto de estatutos forman la denominada base de reglas del sistema.

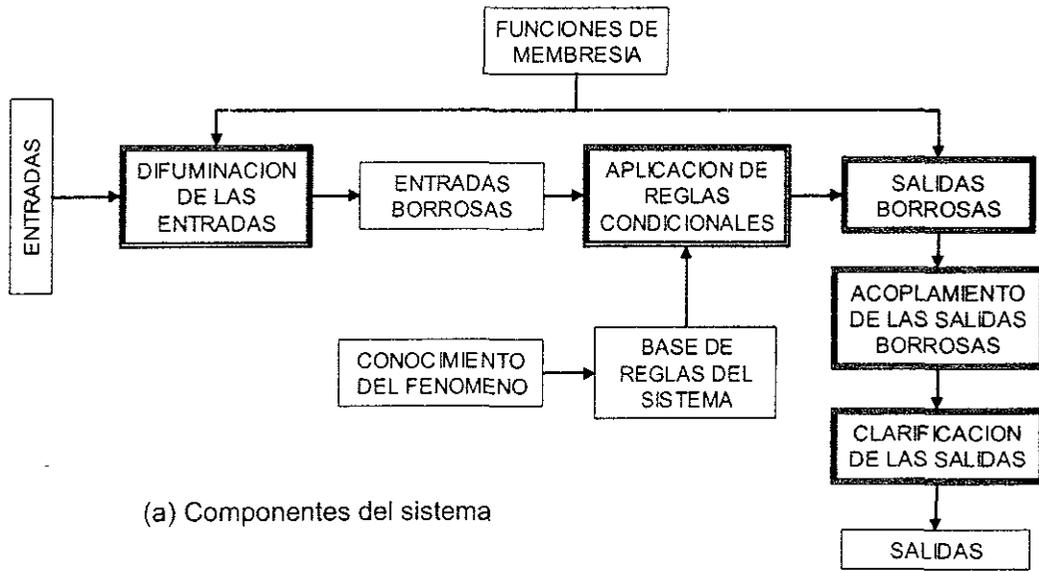
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Sistemas difusos

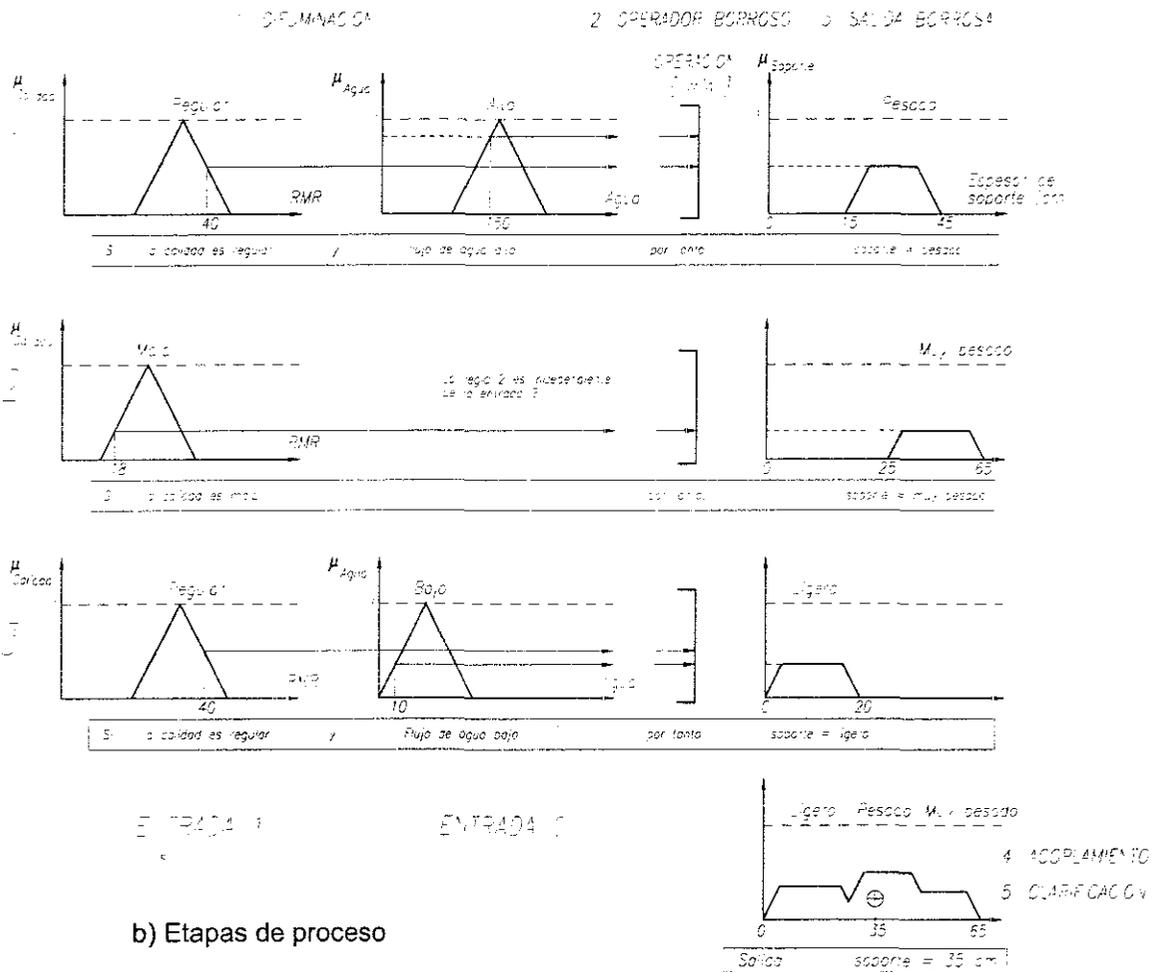
En la fig 3.8 se muestran las componentes y el funcionamiento de un sistema difuso

Se tiene cinco etapas fundamentales en el funcionamiento de un sistema difuso (fig 3.8):

1. *Difuminación*. Se asigna el grado de pertenencia que cada variable tiene en los conjuntos borrosos, vía las funciones de membresía.
2. *Aplicación de las reglas de control*. Se aplica la base de reglas condicionales del sistema a los grados de pertenencia obtenidos en la etapa anterior, considerándose las operaciones borrosas. En esta etapa se obtienen los grados de pertenencia de cada salida.
3. *Salidas borrosas*. A partir del grado de pertenencia de las salidas se construye el conjunto borroso de cada salida al considerar las reglas condicionales del sistema. Existen dos técnicas para realizar la construcción: truncamiento del conjunto borroso (mínimo) y su escalonamiento (producto). La técnica común es el truncamiento.
4. *Acoplamiento de las salidas borrosas*. Los resultados obtenidos al aplicar las reglas de control a los conjuntos borrosos se combinan a fin de tomar una decisión. El método de agregación es una alternativa para llevar a cabo dicha combinación y puede realizarse de maneras diferentes: máximos, probabilística, sumatoria, etc. El método de agregación más utilizado es el de máximos.
5. *Clarificación de las salidas borrosas*. Consiste en obtener un valor numérico para cada una de las salidas del sistema a partir de los conjuntos borroso a los que pertenecen. Existen varias técnicas para llevar a cabo esta actividad: el método del centroide, bisector, el máximo menor, la media ponderada, etc. El método popular es el del centroide, con el cual se calcula el centro del área bajo la curva obtenida al aplicar el método de agregación.



(a) Componentes del sistema



b) Etapas de proceso

Figura 3.8 Componentes y funcionamiento de un sistema difuso.

Lo difuso y lo aleatorio

El término difuso suele confundirse con el de imprecisión e incertidumbre. En si, el término difuso es una forma de imprecisión e incertidumbre.

En efecto, hay varios tipos de imprecisión e incertidumbre, los cuales se diferencian de acuerdo con el concepto al que se aplica la imprecisión: a la medición, a la probabilidad o a las descripciones.

La imprecisión en una medición está asociada con la falta de precisión en el valor de una propiedad de un objeto. Algunas veces tenemos medidas que son inexactas o de poca confianza.

La imprecisión como una forma de probabilidad está asociada a la incertidumbre sobre la ocurrencia futura de un fenómeno o evento; por ejemplo, ¿podría llover mañana?

Imprecisión en las descripciones es el tipo de imprecisión que tratan los conjuntos borrosos. Así, algo puede ser ambiguo, vago, o subjetivo en el contexto del lenguaje. Es ambiguo el decir que la estructura es alta, o las calificaciones son bajas. También puede considerarse ambiguo las percepciones e interpretaciones humanas.

La naturaleza de lo borroso y lo aleatorio es entonces diferente. Son aspectos distintos de la imprecisión o incertidumbre. Lo borroso se asocia a cosas subjetivas, sentimientos o lenguaje, mientras que lo aleatorio expresa las estadísticas de un objeto en las ciencias naturales.

Desde el punto de vista de modelado, la lógica borrosa y la teoría de probabilidad son conceptos también distintos. Las funciones de membresía miden el grado de similitud entre objetos dado una propiedad definida imprecisamente, mientras que las funciones de densidad de probabilidad dan información sobre la frecuencia relativa de una variable aleatoria.

En la ingeniería de túneles se presentan frecuentemente los tres tipos de incertidumbre. En efecto, los macizos rocosos suelen clasificarse y calificarse utilizando términos subjetivos: calidad mala, fracturamiento fuerte, etc. Por otra parte, durante una campaña de exploración y durante el seguimiento constructivo del túnel, se realizan mediciones de alguna propiedad mecánica, el módulo de deformabilidad por ejemplo, o de alguna variable del proceso constructivo, el vector de desplazamiento. En ambos casos se tiene imprecisión tanto en la medición como probabilística.

En el presente trabajo se abordan aspectos referentes a la incertidumbre subjetiva.

3.3 Sistema neuro-difusos

La combinación de las técnicas de RNA y LB nace de la idea de aprovechar la información contenida en las bases de datos generadas durante la observación del sistema (variables de entrada y salida) y la que los expertos conocen (reglas condicionales).

Con ello es posible superar la deficiencia en cantidad y calidad de las bases de datos cuando se construye una RNA, o construir eficientemente las funciones de membresía en un sistema difuso.

Por otra parte, es posible ampliar las capacidades de un sistema neuronal al considerar que las variables del sistema a modelar muestran incertidumbre.

El acoplamiento de las técnicas se hace de maneras diferentes, las principales son: neuronas borrosas, aprendizaje borroso y sistemas neuro-difusos.

En un sistema neuro-difuso se tiene una unidad difusa con la arquitectura clásica (funciones de membresía para las variables de entrada y salida, reglas condicionales, acoplamiento y

clarificación), pero la construcción de las funciones de membresía no se realiza por un experto, sino se utiliza información observada directamente del fenómeno; es decir, una base de datos

En efecto, el ajuste de las funciones de membresía se realiza de manera similar a la efectuada en la etapa de entrenamiento de las RNA. Para ello se caracterizan dichas funciones mediante algunos parámetros, los cuales se van variando en función del error generado por el sistema difuso. Este proceso se repite hasta obtener un error mínimo entre la respuesta del sistema difuso y la información contenida en la base de datos.

Para poder aplicar esta técnica de optimación de las funciones de pertenencia en las interfases difusas es necesario aplicar un método de LB ligeramente distinto el descrito en el inciso previo (Método de Mamdani), el cual se conoce con el nombre de Método Takagi-Sugeno (Takagi y Sugeno, 1995).

En este trabajo se emplea el algoritmo denominado ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, Jang 1993) para construir los sistemas neuro-difusos ANFIS utiliza el método clásico de Takagi-Sugeno (de cero o primer orden) y adapta las funciones de membresía a la información contenida en la base de datos mediante la estrategia de repropagación del error empleando algoritmos de mínimos cuadrados

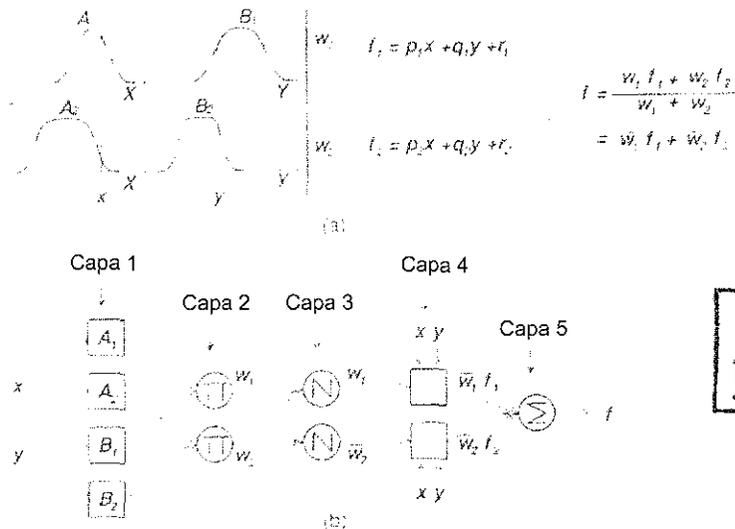
Arquitectura ANFIS

Para describir la arquitectura ANFIS se presenta un ejemplo donde se tienen dos variables de entrada, x y y, y una de salida, z El modelo difuso es del tipo Sugeno de primer orden con reglas condicionales del tipo,

- Regla 1. Si $x = A_1$ y $y = B_1$ entonces $f_1 = p_1x + q_1y + r$
- Regla 2. Si $x = A_2$ y $y = B_2$ entonces $f_2 = p_2x + q_2y + r$

Esta simplificación hace que el método sea computacionalmente más eficiente

En la fig 3.9a se muestra el sistema difuso propuesto en este ejemplo y en la fig 3.9b la arquitectura ANFIS equivalente, compuesta de cinco capas, cada una de ellas formada con las mismas funciones



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.9 Sistema neuro-difuso. a) Modelo Sugeno de primer orden con dos entradas y dos reglas condiciones. b) Arquitectura ANFIS equivalente

Capa 1. Cada nodo de la capa representa una función de membresía; por ejemplo en la fig 3.9a el conjunto A está formado por dos subconjuntos difusos A_1 y A_2 , definidos por sus respectivas funciones de membresía (μ_{A1} y μ_{A2}). La salida de cada nodo es el grado de pertenencia del valor de entrada a dichos subgrupos, es decir:

$$\mu_{A1}(x) = O_{11}$$

$$\mu_{A2}(x) = O_{12}$$

$$\mu_{B1}(x) = O_{13}$$

$$\mu_{B2}(x) = O_{14}$$

La forma de la función de membresía puede ser diversa, pero en general se busca que sea simple y suave, a fin de facilitar su manejo y optimación. Es común emplear funciones del tipo de campana generalizada,

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (3.16)$$

donde se tienen tres parámetros para su definición (a_i , b_i y c_i). A estas variables se les conoce con el nombre de parámetros *premisa*.

Capa 2 Se realiza la operación lógica entre las reglas condicionales, y como salida se tiene el peso para cada regla. En el ejemplo se lleva a cabo el producto (intersección) de las salidas de la capa 1

$$\mu_{A1}(x) \mu_{B1}(y) = w_1 = O_{21}$$

$$\mu_{A2}(x) \mu_{B2}(y) = w_2 = O_{22}$$

Capa 3 Se normalizan los pesos de las reglas, mediante el cociente entre el peso de una determinada regla entre la suma de todos los pesos

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} = O_{3i}$$

Capa 4. Se aplican las reglas condicionales para obtener el valor de la consecuencia

$$\bar{w}_i f_i = \bar{w}(p_i x + q_i y + r_i) = O_{4i}$$

A las variables p_i , q_i y r_i se les conoce con el nombre de parámetros *consecuencia*.

Capa 5 Se calcula la salida del sistema, la cual es la suma de todas las señales que llegan a esta capa.

$$\sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} = O_{51}$$

Proceso adaptativo

Es el proceso mediante el cual el sistema ANFIS se adapta a una determinada base de datos

Para realizar la adaptación del sistema existen tres formas:

- Fijar los parámetros consecuencia y variar los premisa (variar funciones de membresía)
- Fijar los parámetros premisa y varias los consecuencia
- Variar ambos parámetros

La selección de la estrategia depende del problema a modelar. En efecto, cuando se tienen pocos datos y certeza en la información dada por el experto, es preferible cambiar los parámetros consecuencia, y viceversa.

Cuando se emplea el método Takagi-Sugeno de orden cero, los parámetros consecuencia no existen, por tanto el sistema ANFIS varía exclusivamente los parámetros de las funciones de membresía

Las estrategias para adaptar un sistema ANFIS son las mismas que se emplean en las RNAs (sección aprendizaje supervisado por error).

Número de funciones de membresía

Uno de los problemas que se tienen al construir un sistema ANFIS es evaluar el número de funciones de membresía a utilizar para cada concepto o variable.

Cuando se cuenta con una base de datos existen estrategias numéricas enfocadas a determinar concentraciones de valores tanto en las variables de entrada como de salida. Dos de las estrategias más utilizadas son: agrupamiento de datos del tipo C-medio y agrupamiento substractivo

C-medio En esta técnica de agrupamiento, propuesta inicialmente por Jim Bezdek (1981), cada dato pertenece a un subconjunto en un cierto grado, el cual es definido por una función de membresía

El método propone inicialmente unos agrupamientos o clusters, los cuales quedan definidos por las coordenadas de su centro. Esta primera propuesta generalmente se descarta, pero sirve como punto de partida de los subsecuentes intentos. En cada intento, se asocia a cada dato un grado de pertenencia a los distintos agrupamientos, hasta que se minimiza una función objetivo representada por la distancia ponderada desde cualquier punto al centro del cluster (la ponderación se realiza utilizando el grado de pertenencia del punto)

Agrupamiento substractivo. Es un algoritmo que determina el número de agrupamientos necesarios para subdividir a un grupo de datos (Chiu, 1994).

En esta técnica es necesario indicar el radio del cluster, que es la distancia de influencia de la función de membresía. Si este radio es pequeño, se tendrán un gran número de agrupamientos y por ende un mayor número de reglas condicionales en el sistema ANFIS. Si el radio es pequeño, se tendrán pocos agrupamiento, por tanto pocas reglas, las cuales podrán ser insuficientes para el modelado con el ANFIS

Explosión de reglas

Dado que la estructura de un sistema difuso se basa en un número fijo de funciones de membresía, a medida que se incrementan las variables de entrada crece el número de reglas condicionales. Cuando el número de entradas es grande, es decir, más de cuatro o cinco, puede provocarse una explosión del número de reglas, y por tanto, tener un sistema demasiado grande

Por ejemplo, para un modelo difuso de 10 entradas y dos funciones de membresía por entrada, podrían tenerse $2^{10}=1024$ reglas condicionales, lo cual genera que el entrenamiento de un sistema ANFIS se torne difícil y que los resultados obtenidos, pierdan su significado físico.

Para atenuar esta problemática es necesario escoger adecuadamente la técnica de partición y/o disminuir el número de variables de entrada, por ejemplo, mediante análisis adimensional

4 APLICACIONES DE LAS RNA A LA INGENIERÍA DE TÚNELES

En este capítulo se describen tres aplicaciones de sistemas híbridos al análisis del proceso constructivo de túneles basados en RNA y LB: análisis de estabilidad, seguimiento del proceso constructivo y determinación del módulo de deformabilidad a partir del comportamiento observado del túnel (análisis inverso)

Los sistemas se desarrollan en la plataforma SIMULINK-MATLAB, cuyo ambiente facilita la asignación de valores a los parámetros de entrada, el procesamiento de la información y la visualización de los resultados

Finalmente, los sistemas híbridos propuestos se comparan con técnicas usuales de la ingeniería de túneles, y se establecen sus ventajas y desventajas.

4.1 Análisis de estabilidad

Objetivo

Evaluar la estabilidad de la excavación y del revestimiento de un túnel circular dadas sus características geométricas (profundidad y radio), la calidad de roca (índices *GSI*, *RMR* o *Q*), los parámetros del criterio de resistencia propuesto por Hoek (σ_{ci} y m_i , ec. 2.6), las características del soporte de concreto (espesor y resistencia a la compresión simple) y la distancia de avance de excavación sin soporte, a .

Método

Se obtiene la variación de los desplazamientos en la periferia del túnel, los radios de plastificación equivalentes y los esfuerzos máximos en el soporte con respecto a la longitud de avance de la excavación sin soporte, a , utilizando un sistema compuesto por un conjunto de RNA, criterios empíricos y el método de la curva característica (MCC). La base de datos utilizada para el entrenamiento de las RNA se formó con los resultados obtenidos de la modelación evolutiva de la excavación de un túnel, con un sistema tridimensional de diferencias finitas

Con base en los resultados obtenidos (desplazamiento, radio de plastificación y presión máxima en el revestimiento *versus* la longitud de avance sin soporte) y dos criterios de estabilidad, uno descrito en la sección 2.4 (fig 2.15) y otro definido con un sistema neuro-difuso que acopla criterios de estabilidad utilizando el índice *FP* y las magnitudes de las zonas plastificadas y desplazamientos generados, se evalúa la condición de la excavación: inestable, estable con presencia de zonas plastificadas o estable con comportamiento elástico

En la fig 4.1 se presenta un diagrama de flujo general del sistema propuesto, y en la fig 4.2 se muestra la carátula del sistema en el ambiente SIMULINK de MATLAB.

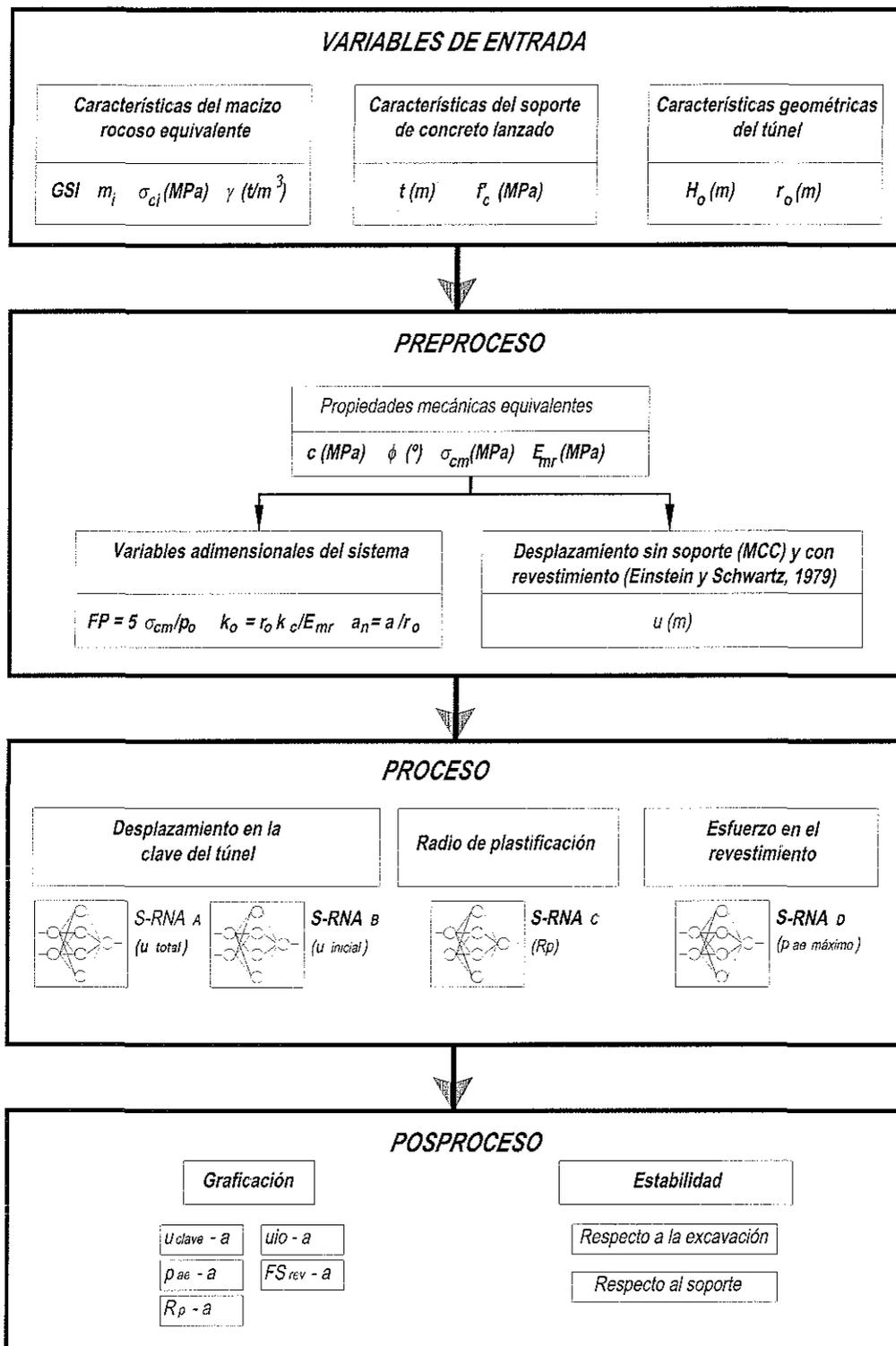


Figura 4.1 Diagrama de flujo del sistema para evaluar la estabilidad de la excavación y del soporte, para un túnel circular en roca

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

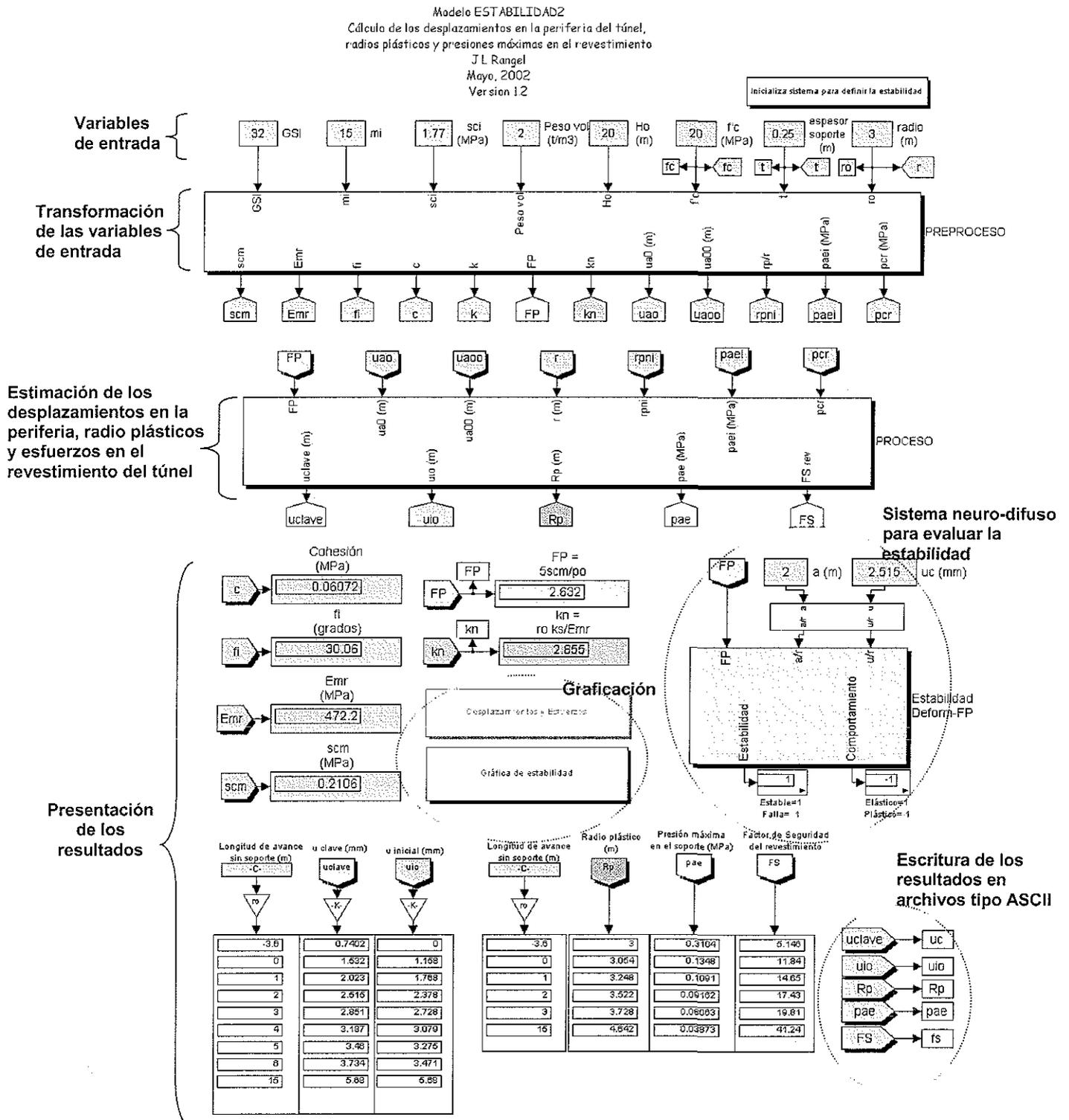


Figura 4.2 Carátula del sistema para evaluar la estabilidad de la excavación y soporte de un túnel circular en roca, desarrollado en el ambiente SIMULINK-MATLAB.



Variables de entrada

Como variables de entrada al sistema (figs 4 1 y 4 2, parte superior), se tienen las que caracterizan al macizo rocoso (GSI , m_i , σ_{ci} y el peso volumétrico), las geométricas (el radio, r_0 , y la profundidad del eje del túnel, H_0) y las que definen al revestimiento de concreto (su espesor, t , y la resistencia a la compresión simple del concreto a 28 días de edad, f'_c)

Se seleccionó el criterio de Hoek para caracterizar al macizo rocoso (sección 2.2), por ser representativo, sencillo y con parámetros que pueden evaluarse fácilmente en campo y laboratorio.

Preproceso

Consiste en dos etapas (figs 4 1 y 4 2):

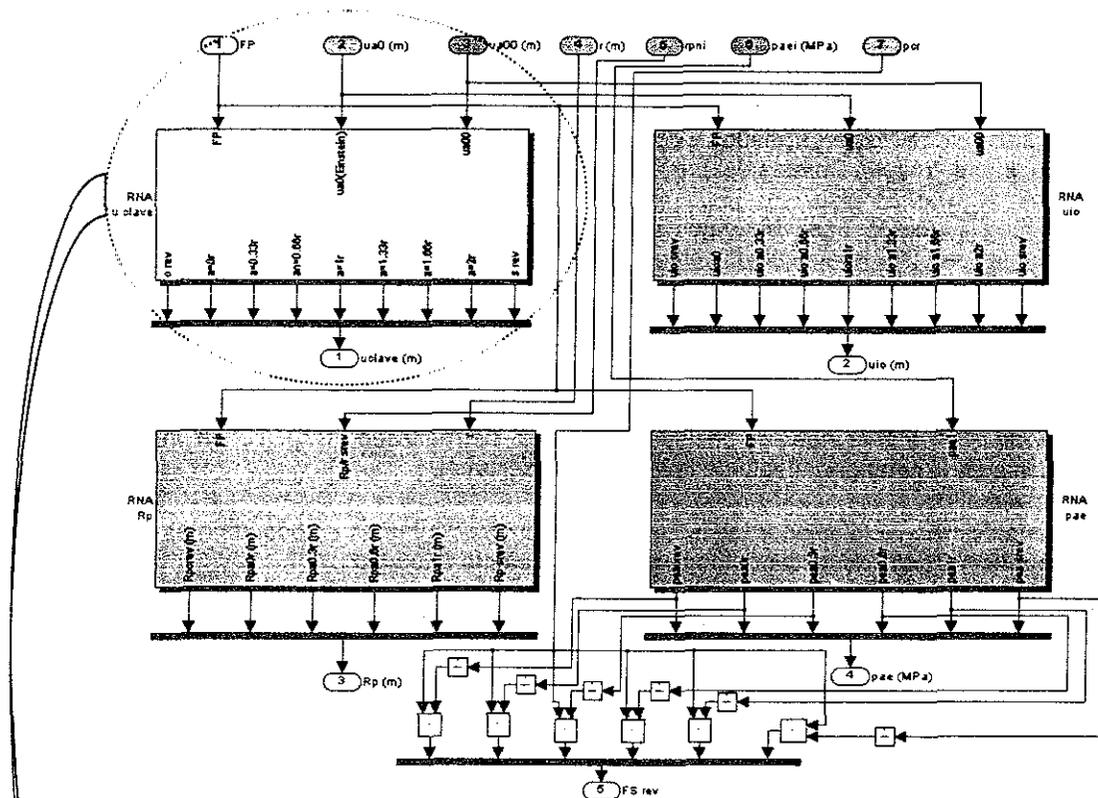
- Determinar las propiedades mecánicas equivalentes del macizo rocoso a partir de los parámetros del criterio de Hoek y de correlaciones empíricas (la cohesión c , el ángulo de fricción interna ϕ , el módulo de deformabilidad E_{mr} y la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso σ_{cm} ; sección 2.2).
- Calcular las variables adimensionales del proceso y los desplazamientos en la periferia del túnel considerando que el soporte del túnel se instala antes de excavar el túnel (Einstein y Schwartz, 1979) y la excavación sin soporte (MCC, ecs 2 10 a 2 12)

Proceso

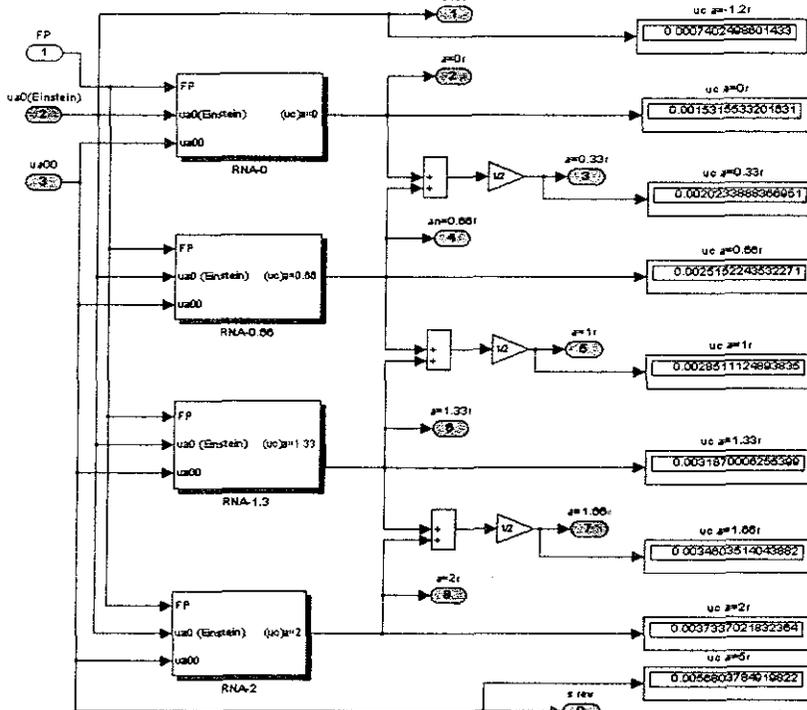
En esta fase se calculan los desplazamientos de la periferia del túnel, los radios de plastificación, los esfuerzos y factores de seguridad en el revestimiento para diferentes longitudes del avance de excavación sin soporte (módulo de proceso, fig 4 2) Esta actividad se realiza con un sistema construido con RNA, las cuales fueron diseñadas con una base de datos obtenida de un modelo 3D evolutivo de diferencias finitas (Itasca, 1997), donde se considera que el comportamiento del macizo rocoso es elastoplástico siguiendo el criterio de cedencia de Mohr-Coulomb

Sistema El módulo de proceso contiene cuatro subsistemas que estiman las variables de salida (desplazamientos total e inicial, radio de plastificación, esfuerzo en el soporte y el factor de seguridad del revestimiento). Cada módulo está compuesto por conjuntos de RNA En la fig 4 3a se ilustra el interior del módulo de proceso y en la 4 3b el grupo de RNA que estiman el desplazamiento total en la clave

Todas las RNA empleadas son Multiperceptrones Multicapa entrenados con el proceso de retropropagación del error. Para la determinación de los pesos de conexión entre neuronas artificiales, los elementos bias, el tipo de función de activación, el número de capas de la red y el número de neuronas por capa (etapa de entrenamiento de la RNA), se utilizaron 227 casos, y para evaluar la capacidad de generalización de la red se emplearon 34 ejemplos, éstos últimos nunca se presentaron a la red durante su diseño



a) Subistemas del módulo de proceso



b) RNA modular para estimar el desplazamiento total de la clave del túnel

Figura 4.3 Detalle del módulo de proceso

Base de datos Un proceso fundamental para asegurar el modelado adecuado de un fenómeno empleando sistemas de inteligencia artificial, es evaluar la representatividad, niveles de ruido, la coherencia de la base de datos utilizada durante el diseño del sistema; en efecto, bases incompletas, datos reiterativos o escalados y conteniendo ruido en exceso, seguramente producen un modelo que da una imagen limitada del proceso y altamente inestable

Con base en lo anterior, la base de datos utilizada para construir el sistema propuesto fue analizada y sintetizada utilizando distintos criterios:

- Estudio de la literatura técnica relacionada. Con base en una revisión de trabajos relacionados, se definen las variables de mayor importancia que definen el fenómeno en cuestión. Desde las primeras investigaciones realizadas por Terzagui (1942), Peck (1969), y recientemente por Tamez *et al*, (1997) y Hoek (2000), se ha observado que el Factor de Plastificación (FP) y la magnitud del desplazamiento normalizado (u/r_0), tienen influencia sobresaliente en el comportamiento de la excavación del túnel
- Análisis estadísticos
- Gráficas matriciales. Al relacionar todas las variables involucradas en el fenómeno es posible visualizar tendencias e identificar datos con comportamiento anómalo
- Análisis de componentes principales. Al igual que el primer inciso, este análisis tiene como objetivo reducir el número de variables involucradas en el fenómeno.
- Prueba Gamma.

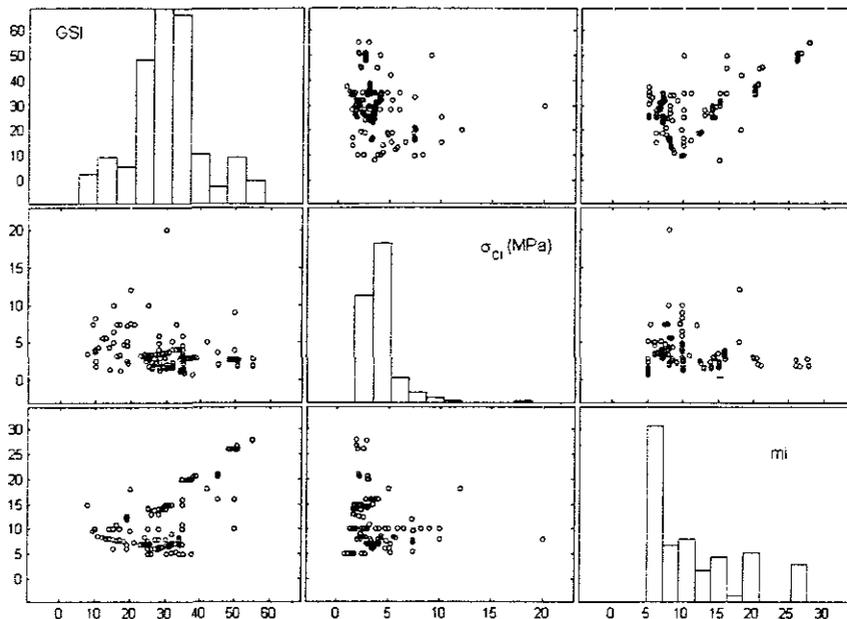
En la fig 4.4 se muestran dos visiones de la gráfica matricial de la base de datos utilizada. En la diagonal principal se presentan, como histogramas, las variables del proceso, y en los términos ubicados fuera de la diagonal principal se grafican las relaciones que existen entre las variables.

En fig 4.4a se indican las variables de entrada al sistema siguiendo el criterio Hoek-Brown, mientras que en la fig 4.4b se muestran variables normalizadas de entrada y salida.

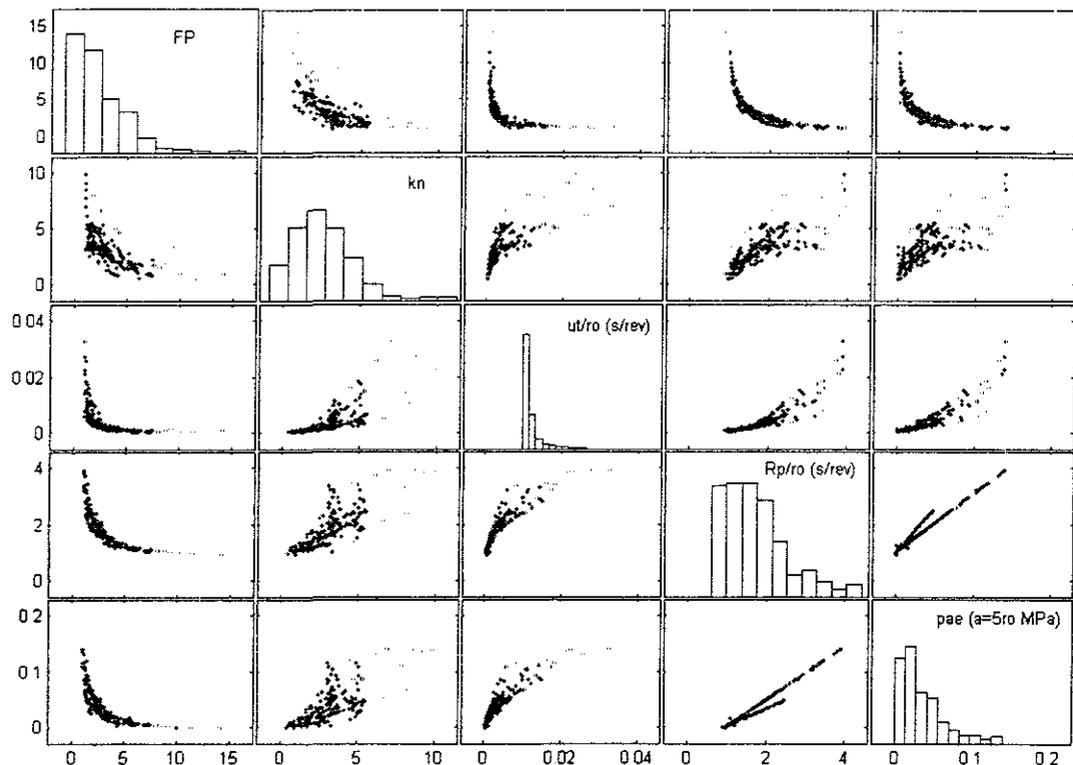
Si bien, la base no es grande, es representativa de la mayoría de las condiciones que se presentan en la práctica, en especial aquellas donde existen problemas de inestabilidad ($FP < 2$, $GSI < 25$) y contrastes de rigidez entre el cilindro hueco de concreto y el macizo rocoso variables entre uno y seis. Es conveniente comentar que se utilizaron valores del factor de plastificación localizados en el intervalo $1 < FP < 14$, por tanto, condiciones de falla total del túnel o con comportamiento elástico fueron excluidas; asimismo, se abarcan profundidades someras ($10 < Ho < 40$ m) y radios variables entre dos y cuatro metros. A pesar de estas limitaciones, nótese en la fig 4.4b que se tiene un muestreo amplio de las variables FP y kn . En dicha gráfica se indican los desplazamientos totales normalizados de la clave, los radios de plastificación normalizados y las presiones máximas en el soporte, todos ellos evaluados cuando el avance de la excavación sin soporte fue mayor de 5 diámetros del túnel. Asimismo, se observa que la relación entre las variables de entrada y salida es no lineal y en ocasiones presenta dispersión moderada, especialmente respecto a la presión actuante en el revestimiento.

Como se comentó previamente, cuando la base de datos es completa, representativa y con niveles de ruido despreciable, las propiedades de generalidad y precisión del modelo construido son adecuadas. En la práctica es común que se tengan datos suficientes para diseñar un sistema cuya generalidad se conserva; sin embargo, surgen problemas cuando con esos datos no es posible alcanzar precisiones adecuadas. En este caso la generalidad y la precisión son los aspectos a nivelar durante el diseño del sistema: incrementar la precisión del sistema reduce la generalidad y viceversa.

El caso en estudio se encuentra en esta situación. La forma en que se resolvió fue utilizar dos estrategias: diseñar sistemas modulares de RNA y aproximar la solución mediante técnicas analíticas. Si bien con la primera estrategia se pierde la visión global del fenómeno no se daña el aspecto de generalidad y se incrementa la precisión, mientras con la segunda estrategia se eliminan algunas componentes no lineales en el mapeo *variable normalizadas-variables objetivo*



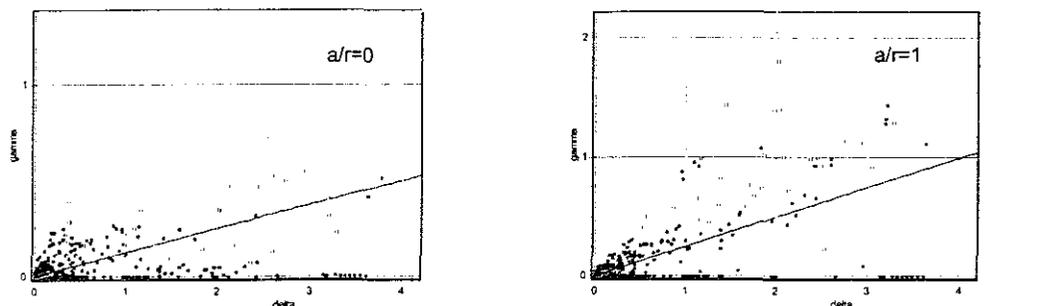
a) Parámetros del criterio de Hoek para caracterizar al macizo rocoso



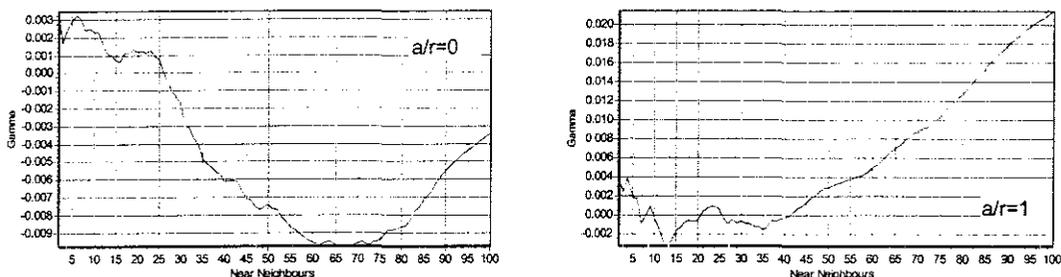
b) Variables adimensionales

Figura 4.4 Intervalos de variación de los parámetros de caracterización del macizo rocoso y de las variables adimensionales que forman la base de datos.

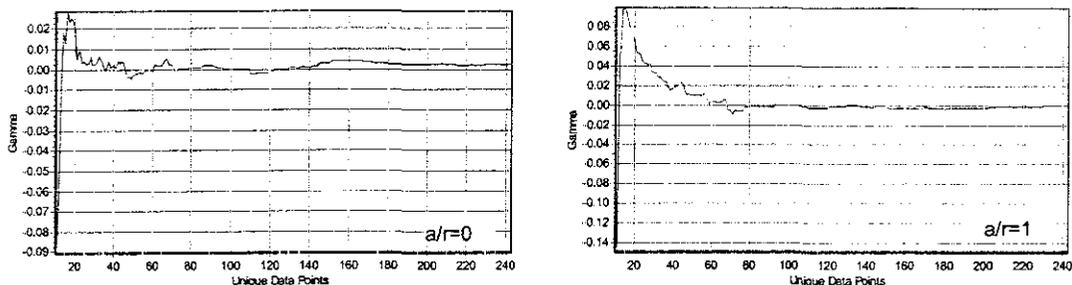
Prueba Gamma Como parte final del preproceso de la base de datos, se llevó a cabo su análisis utilizando la prueba Gamma (anexo B). En la fig 4 5 se presentan los resultados obtenidos de la prueba Gamma, para el caso donde se estiman los desplazamientos totales de la clave en función de la longitud de avance sin soporte



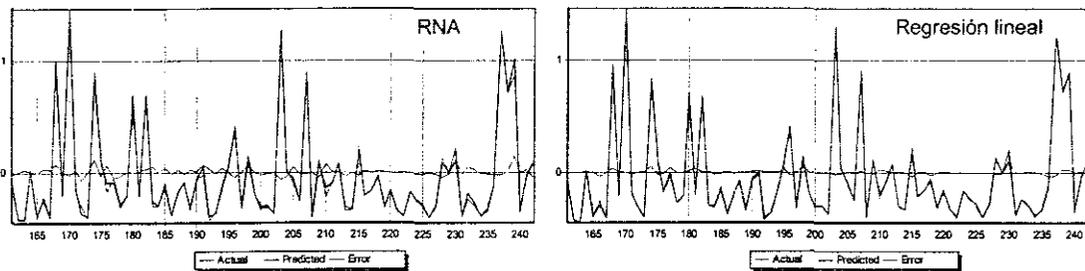
a) Gráficas delta versus gamma



b) Vecinos cercanos



c) Prueba M-test, considerando 30 vecinos cercanos



d) Resultados obtenidos con modelos suaves

Figura 4.5 Análisis de la base de datos del esfuerzo incidente en el revestimiento con la prueba Gamma.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Con base en la fig 4 5 se tienen los comentarios siguientes:

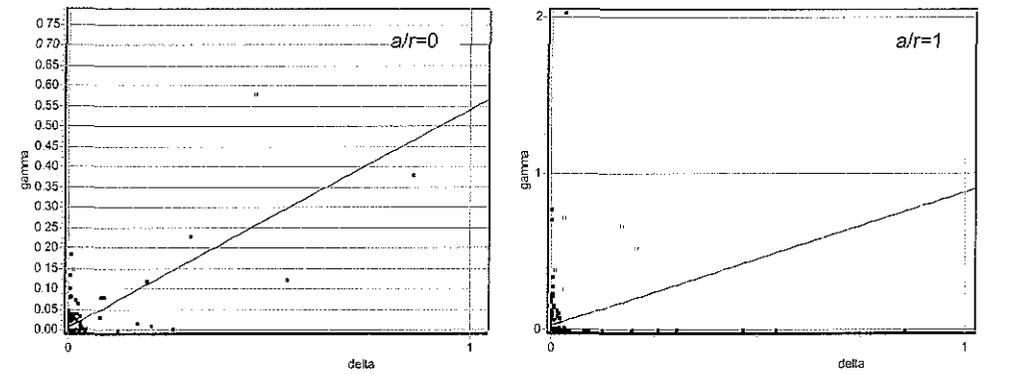
- La base de datos graficada en el espacio δ vs γ muestra dispersión ligera, la cual aumenta conforme se incrementa el avance de excavación sin soporte. Asimismo, no se observan datos en la zona de ruido (esquina superior izquierda, donde se tienen valores bajos de δ y altos de γ), ni en la zona donde se dificulta el modelado (valores grandes de δ y agrupaciones sobre la línea de regresión, anexo B). Por otra parte, el valor de $\bar{\Gamma}$ es cercano a cero y la pendiente A es baja. Con base en lo anterior, es posible utilizar una función suave para estimar el desplazamiento de la clave; asimismo, se observan niveles de ruido bajos.
- Las gráficas vecinos cercanos *versus* Gamma indican que el número de vecinos que genera el valor mínimo de Gamma varía conforme la longitud de avance sin soporte, y los mínimos se localizan en el intervalo de 15 a 70 vecinos cercanos.
- La prueba M-test se utiliza para conocer el número de datos necesarios para poder modelar un proceso utilizando funciones suaves. Las gráficas de la fig 4.5c indican que con 160 datos es suficiente para construir el modelo y tener niveles de ruido menores de $\bar{\Gamma}=0.00441$ (error mínimo). Por tanto, de los 240 datos que forman la base, podrán utilizarse 82 datos para probar el modelo de RNA.
- En la fig 4 5d izquierda, se presentan los desplazamientos totales de la clave del túnel para $a/r=0$, utilizando un prediseño de una RNA del tipo multiperceptrón multicapa denominado BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), teniendo como arquitectura una red de cuatro capas con tres neuronas en la capa de entrada, cinco en cada una de las capas ocultas y cuatro en la capa de salida (3-5-5-4). El error mínimo obtenido con esta red fue de $E=0.004411$, que es muy semejante al alcanzable ($\bar{\Gamma}=0.00441$).
- En la fig 4 5d derecha se muestran los resultados obtenidos con un modelo de regresión lineal, y se observa que la predicción es ligeramente mejor en comparación con RNAs.

De los resultados anteriores es posible concluir que la base de datos es representativa del problema a modelar, ya que los niveles de ruido son muy bajos, asimismo, existen datos suficientes para utilizar a una función suave como modelo del sistema. Los resultados también indican que el proceso es de naturaleza lineal.

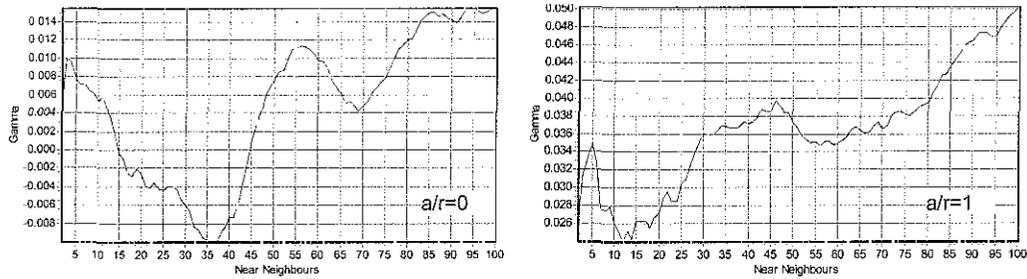
Por otra parte, en la fig 4.6 se muestran los resultados obtenidos de la prueba Gamma para el caso de la estimación del esfuerzo actuante en el revestimiento. Este caso es de interés porque es la condición que presenta mayor dispersión de todos los considerados para el estudio del proceso constructivo (gráfica matricial, fig 4 4b).

Con base en la fig 4.6, se tienen los siguientes comentarios respecto a la base de datos del esfuerzo actuante en el revestimiento:

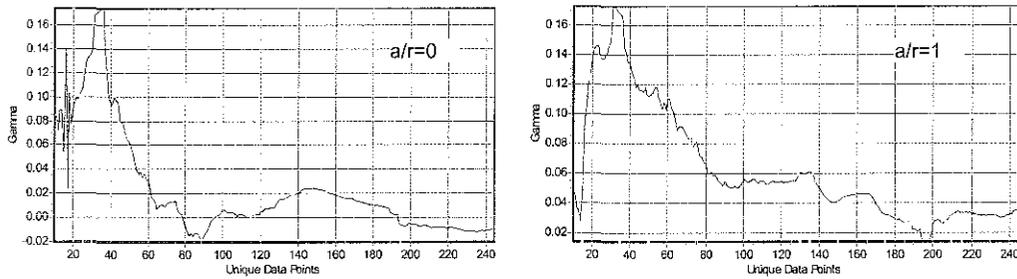
- En las gráficas delta (δ) *versus* Gamma (γ) se observa dispersión alta en valores pequeños de δ , y concentraciones de puntos en el área definida por valores pequeños de δ y altos de γ (esquina superior izquierda). Estas características sugieren un nivel de ruido alto o no linealidad fuerte en el proceso. Este comportamiento es más evidente a medida que el avance de excavación sin soporte aumenta.
- Las gráficas de los vecinos cercanos indican que el intervalo donde la prueba gamma es confiable es entre 15 y 40 vecinos.
- Los resultados de la prueba M-test, para un número de vecinos cercanos de 35, indican que para construir una función suave en los casos $a/r=0$, 0.3 y 0.66, es necesario utilizar al menos 200; sin embargo, para los casos de mayores avances de la excavación sin soporte, los 242 datos son insuficientes para hacer estimaciones confiables.
- En la figura 4.6d se presentan los resultados obtenidos al considerar una red BRGS con arquitectura 2-30-30-5 (gráfica de la izquierda), y un modelo de regresión lineal (gráfica de la derecha). Si bien el error mínimo alcanzado con la RNA es de $E=0.0054$, existen datos en donde la aproximación es inadecuada.



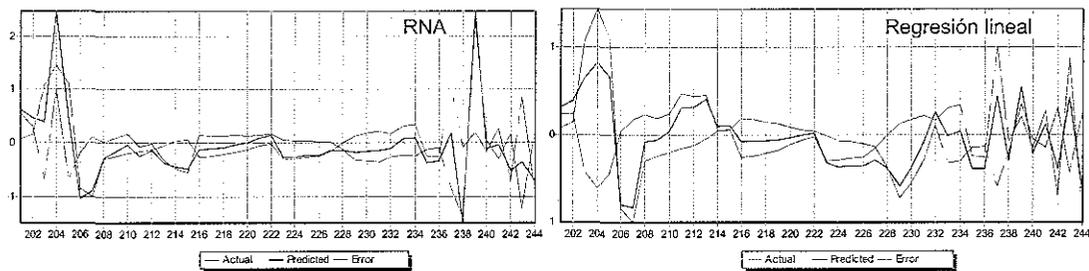
a) Gráficas delta versus gamma



b) Vecinos cercanos



c) Prueba M-test, considerando 30 vecinos cercanos



d) Resultados obtenidos con modelos suaves

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 4.6 Análisis de la base de datos del esfuerzo actuante en el revestimiento con la prueba Gamma

Los análisis de la base de datos descritos previamente conducen a las siguientes conclusiones:

- La base de datos puede considerarse completa y con niveles de ruido despreciables.
- El intervalo de condiciones tanto del macizo rocoso como de las características geométricas de túneles considerado en la base de datos abarca la generalidad de los casos de la práctica cuando las profundidades de los túneles es menor de 60 m. Por otra parte, no considera casos donde el comportamiento del túnel es elástico $FP > 15$ y donde se presenta la falla general $FP < 0.8$.
- Para la estimación de los desplazamiento de la periferia del túnel, inicial y tota, y los radios plásticos es posible considerar funciones suaves, mediante las cuales es posible obtener errores en la estimación menores de $E = 0.01$, que es despreciable.
- Para la estimación de los esfuerzos actuantes en el revestimiento la base de datos se considera adecuada para avances normalizados de excavación sin soporte menores de $a/r \leq 0.666$; para avances mayores, se observa dispersión y niveles de ruido altos.

Desplazamiento vertical de la clave (S-RNA_A). Con el sistema S-RNA_A se calcula el desplazamiento vertical de la clave para diferentes avances normalizados ($a_n = a/r_0$). Se emplean cuatro RNA acopladas que evalúan el desplazamiento radial para un determinado avance (fig 4.3b).

Las RNA se forman por la capa de entrada (tres neuronas), una capa oculta (entre 10 y 25 neuronas) y una capa de salida (una neurona), que utilizan funciones de transferencia del tipo sigmoide-logarítmica. La estrategia de entrenamiento es la Levenberg-Marquardt. La razón principal por la selección de esta estrategia es por su rapidez computacional y estabilidad.

Las variables de entrada al sistema son tres: el desplazamiento radial del túnel sin soporte y cuando se coloca el revestimiento antes de excavar el túnel (MCC y Einstein y Schwartz, 1979, respectivamente) y la variable adimensional *FP*.

El sistema S-RNA_A realiza la estimación del desplazamiento total en la clave con un relativo promedio del $E = 0.03$, y una desviación estándar del $\sigma_E = 0.06$. El coeficiente de correlación obtenido para la base de datos completa fue de $\rho = 0.998$.

Desplazamiento inicial, radios plásticos y esfuerzos máximos en el revestimiento (S-RNA_B, S-RNA_C, y S-RNA_D). Son arquitecturas de red similares a las anteriores, definiendo solamente en el número de neuronas utilizadas en cada capa. Con estos conjuntos de RNA se calculan los desplazamientos previos a la colocación del soporte, los radios de plastificación utilizando el criterio de curva característica y los esfuerzos máximos actuando en el revestimiento, todo lo anterior en función del avance de excavación sin soporte.

Las aproximaciones de los sistemas propuestos se indican a continuación:

Sistema	Error relativo promedio	Desviación estándar	Coefficiente de correlación
S-RNA _B (desplazamiento inicial)	0.05	0.04	0.998
S-RNA _C (radio plástico)	0.005	0.004	0.999
S-RNA _D (esfuerzos en el soporte)	0.09	0.07	0.92

Finalmente, el factor de seguridad del revestimiento se calcula comparando la presión máxima que actúa con la resistente (ec. 2.12).

Posproceso

Consiste en la graficación y análisis de los resultados obtenidos (parte inferior fig 4.2).

Para el análisis de los resultados se emplean las gráficas adimensionales del proceso constructivo descritas en la sección 2.4, donde se establece en el espacio $FP-a_n$ una zonificación de la estabilidad de la excavación y de los mecanismos de falla (fig 2.15).

Alternativamente, se presenta un criterio que define el comportamiento de la excavación en función del valor del índice FP y las magnitudes de la zona plástica y del desplazamiento de la clave generado durante la construcción del túnel. Con base en estos parámetros y en el conocimiento del comportamiento de la excavación se construye un sistema neuro-difuso utilizando el método de Takagi-Sugeno (Takagi y Sugeno, 1985), donde las funciones de membresía se van adaptando a una base de datos utilizando el algoritmo de propagación hacia atrás con mínimos cuadrados.

La definición inicial de las funciones de membresía se realizó utilizando el algoritmo de agrupamiento de datos del tipo c-medio.

El sistema neuro-difuso indicado en la fig 4.2 se detalla en la fig 4.7. Se tienen dos sistemas difusos: en el primero se define si se genera o no la falla de la excavación, y en caso negativo, el segundo sistema decide si la excavación presenta zonas plastificadas. Ambos sistemas tienen tres variables de entrada (FP , a/r y u/r).

En la fig 4.8 se detallada el módulo difuso que define la falla o estabilidad de la excavación. Las variables de entrada tienen 4, 3 y 3 funciones de membresía respectivamente, y un total de 36 reglas de decisión. En la parte baja de la figura 4.8 se presentan superficies que describen las relaciones existentes entre las variables de entrada (FP , a/r y u/r) y la de salida (condición de estabilidad). Se observa que a medida que disminuye FP a partir del valor de dos, la condición de falla se presenta sin importar el valor de a/r y u/r . Asimismo, Para valores de $u/r < 2$, la excavación tiende a ser estable, importando ligeramente el valor de FP y a/r . Estas indicaciones concuerdan con lo observado en campo.

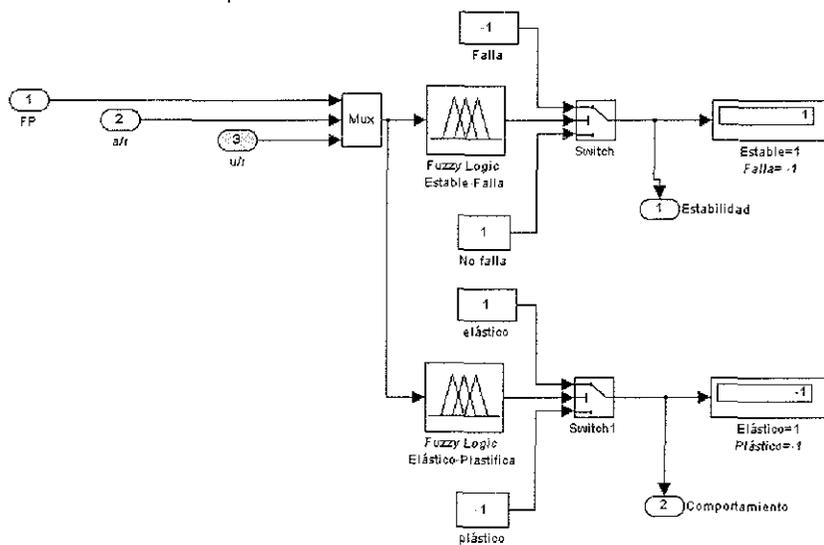


Figura 4.7 Sistema neuro-difuso para definir la condición de estabilidad del túnel

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

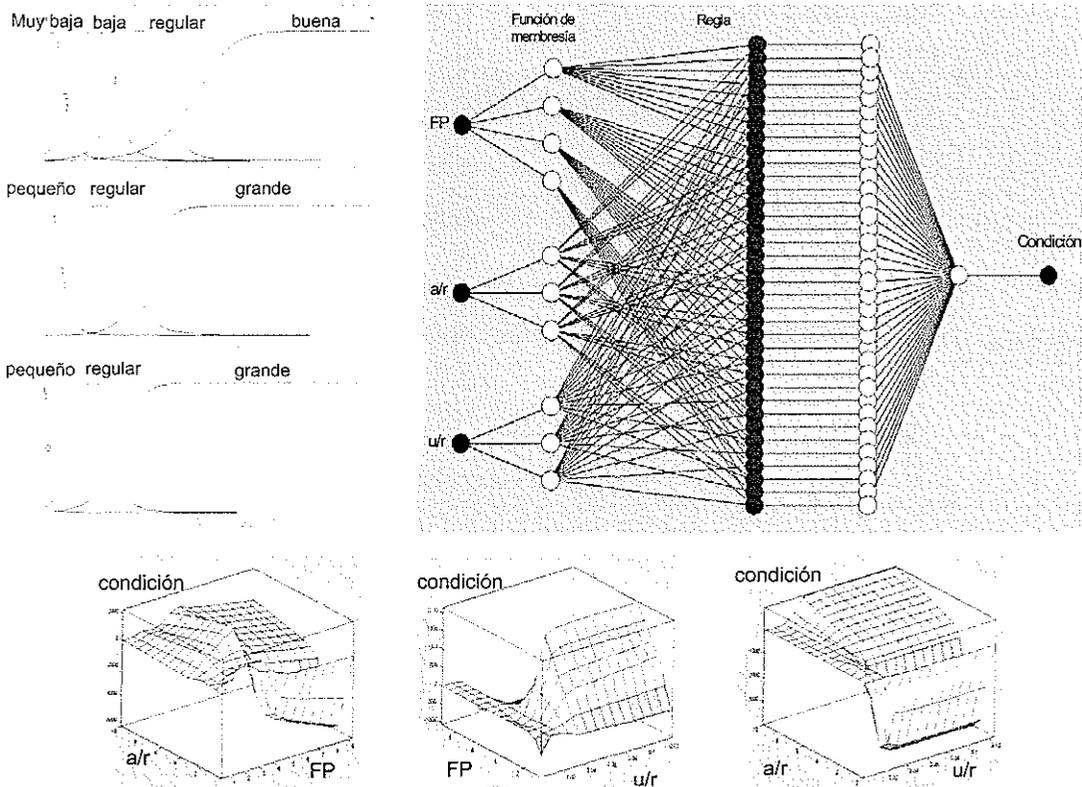


Figura 4.8 Estructura del sistema difuso que determina la estabilidad de la excavación

Resultados

Un resultado típico del sistema propuesto para evaluar la estabilidad del túnel se muestra en la fig 4.9, donde se analiza un túnel con las siguientes características:

Características del túnel		
Geométricas	Macizo rocoso	Revestimiento
$H_0 = 20$ m (profundidad) $r_0 = 3$ m (radio)	$GSI = 25.1$ $\sigma_{ci} = 2.77$ MPa $m_i = 5$ $c = 0.061$ MPa $\phi = 19.7^\circ$ $\gamma = 0.02$ MN/m ³ $E_{mr} = 396.807$ Mpa $\sigma_{cm} = 0.173$ MPa	$t = 0.25$ m (espesor) $f'_c = 20$ MPa $\rho_c \text{ máx} = 1.59$ MPa $k_c = 449.422$ MPa/m

Comparación

Los resultados del sistema son comparados con las técnicas del MDF y el MCC. Se utiliza el mismo ejemplo de la sección anterior, el cual fue un caso utilizado durante el entrenamiento de las RNA y se complementa con un segundo caso, el cual no se consideró durante la etapa de entrenamiento (fig 4.10). Obsérvese la similitud de resultados que se obtiene entre el MDF y el sistema híbrido. Con relación al MCC se observa una sobre valoración de los desplazamientos en la clave en ocasiones hasta del 10%.

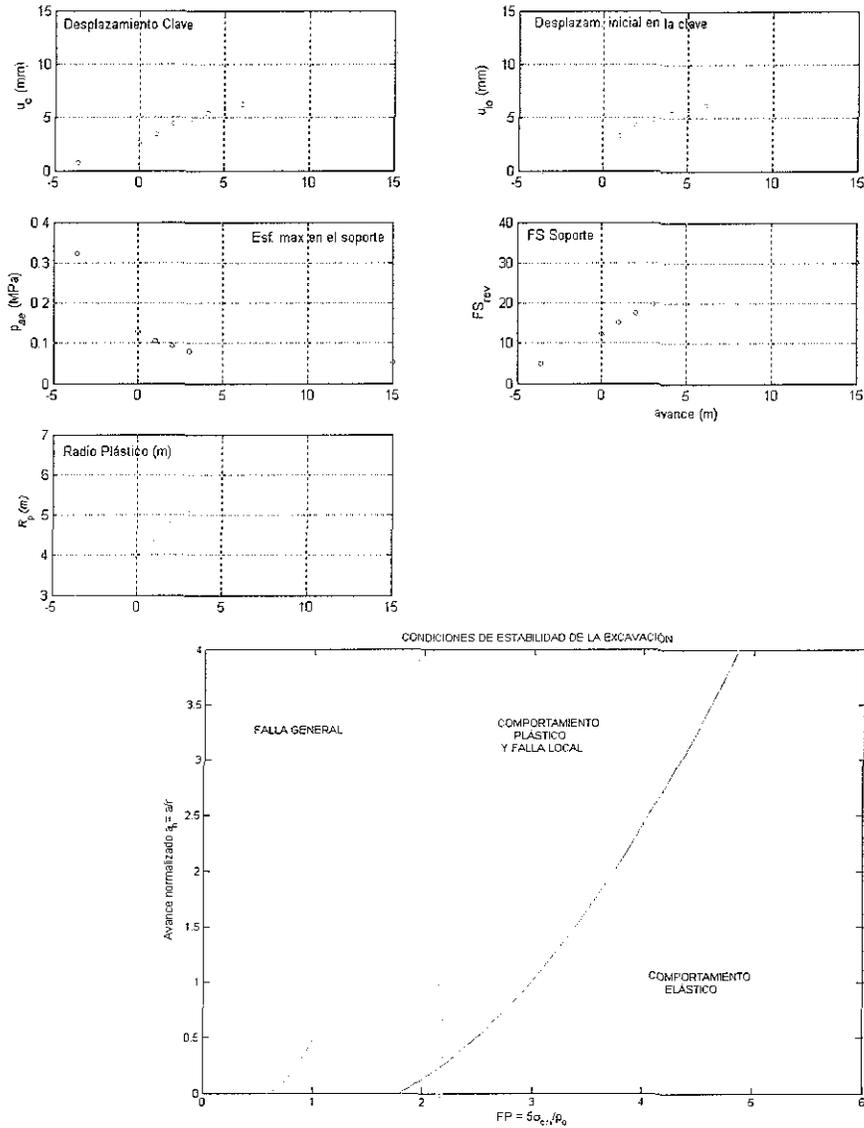


Figura 4.7 Resultados obtenidos con el sistema propuesto.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

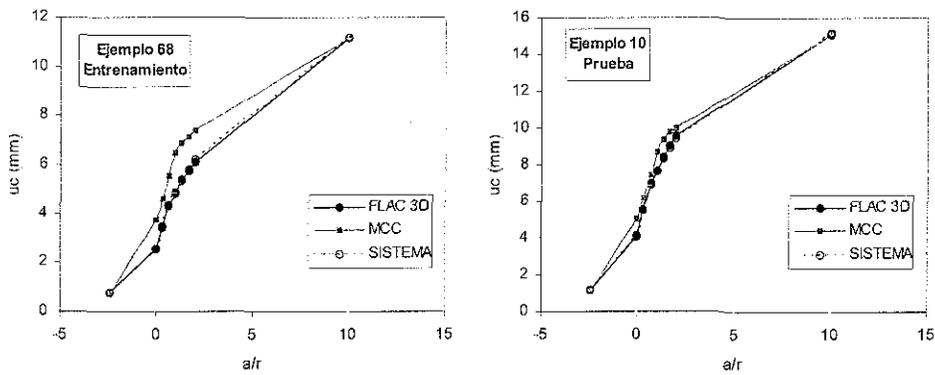


Figura 4.10 Comparación de resultados entre el sistema propuesto, el modelo 3D de diferencias finitas y el método de la curva característica

Con base en los resultados obtenidos se mencionan a continuación las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar el sistema híbrido propuesto

Ventajas

- Es posible calcular simultáneamente los desplazamientos total e inicial en la clave, el radio plástico, el esfuerzo actuante en el revestimiento y la estabilidad de la excavación para distintos avances de la excavación sin soporte.
- Respuesta inmediata del sistema híbrido. Es posible utilizar al modelo en tiempo real
- No requiere de equipo especial de cómputo.
- La respuesta del sistema es amplia. Se obtiene una imagen precisa de las condiciones del proceso constructivo del túnel (radio de plastificación, desplazamiento, esfuerzos en el revestimiento y criterios de estabilidad)
- La respuesta es fácilmente adaptable al seguimiento geotécnico de un túnel.
- Las variables de entrada al sistema se determinan fácilmente, mediante las clasificaciones geomecánicas y ensayos sencillos de campo y laboratorio.
- Se utilizan criterios de estabilidad correlacionables con lo observado en la realidad; y con base en ellos, se determina el comportamiento del túnel (mecanismos de falla probables)

Desventajas

- El intervalo de aplicación del sistema está limitado por la base de datos utilizada durante el entrenamiento
- La base de datos empleada fue obtenida del análisis 3D del proceso constructivo del túnel utilizando el método de diferencias finitas, por tanto, es una aproximación a la realidad, lo cual puede repercutir en la confiabilidad de los resultados que se obtienen con el sistema propuesto. Es de esperarse que datos obtenidos de prototipos muestren mayor dispersión que los obtenidos con simulaciones numéricas.
- Se aplica a túneles de sección circular con revestimientos de concreto

Conclusiones

Se tienen las siguientes conclusiones:

- El sistema híbrido puede estimar los desplazamientos de la clave, radios de plastificación, esfuerzos en el revestimiento y condiciones de inestabilidad del túnel considerando el procedimiento constructivo, las condiciones de calidad del macizo rocoso y características geométricas del revestimiento
- El sistema se aplica exclusivamente cuando el medio se representa como un macizo rocoso equivalente.
- El sistema fue diseñado considerando una base de datos sintética obtenida del estudio de diversos casos de túneles analizados con el MDF 3D
- Si bien la base de datos es representativa de la mayoría de las condiciones reales, no considera la total de las condiciones del macizo rocoso ($0.8 > FP > 15$)
- La precisión del sistema depende de varios factores, principalmente: de la representatividad del modelo del MDF 3D (sección 2.3), de las características de la base de datos (fig 4.3) y de la calidad de los datos
- Para condiciones generales que cumplan con las hipótesis del método empleado, los errores relativos obtenidos en la estimación del desplazamiento varían entre el 3 y 9 % en promedio. Respecto a las condiciones de estabilidad del proceso, la precisión del sistema depende exclusivamente de la calidad de los datos.

4.2 Seguimiento del proceso constructivo

El objetivo fundamental del seguimiento constructivo del túnel es evaluar la estabilidad de la excavación, y a partir de ello determinar las condiciones de riesgo y/o adecuaciones en el proceso constructivo en tramos construidos y por excavar. Esta actividad se efectúa considerando el modelo geológico de diseño y los cambios que este va teniendo durante la excavación del túnel, así como la información geotécnica generada durante la observación del comportamiento del túnel.

Uno de los problemas que actualmente recibe mucha atención, en especial cuando se emplean máquinas tuneladoras, es la predicción de las condiciones de riesgo en los tramos inmediatos al frente de excavación. En esta aplicación se propone una técnica para realizar la predicción basada en la interpretación del vector de desplazamientos medido en la periferia del túnel.

Objetivo

Determinar condiciones de riesgo en los tramos inmediatos al frente de excavación del túnel a partir del comportamiento observado del vector de desplazamientos medido en la periferia del túnel y de la calidad de roca observada en el frente de excavación.

El método a emplear debe caracterizarse por ser flexible (modificar el modelo de diseño a las condiciones nuevas que se presenten), emplearse en tiempo real y ser de fácil implementación, manejo y desarrollo.

Método

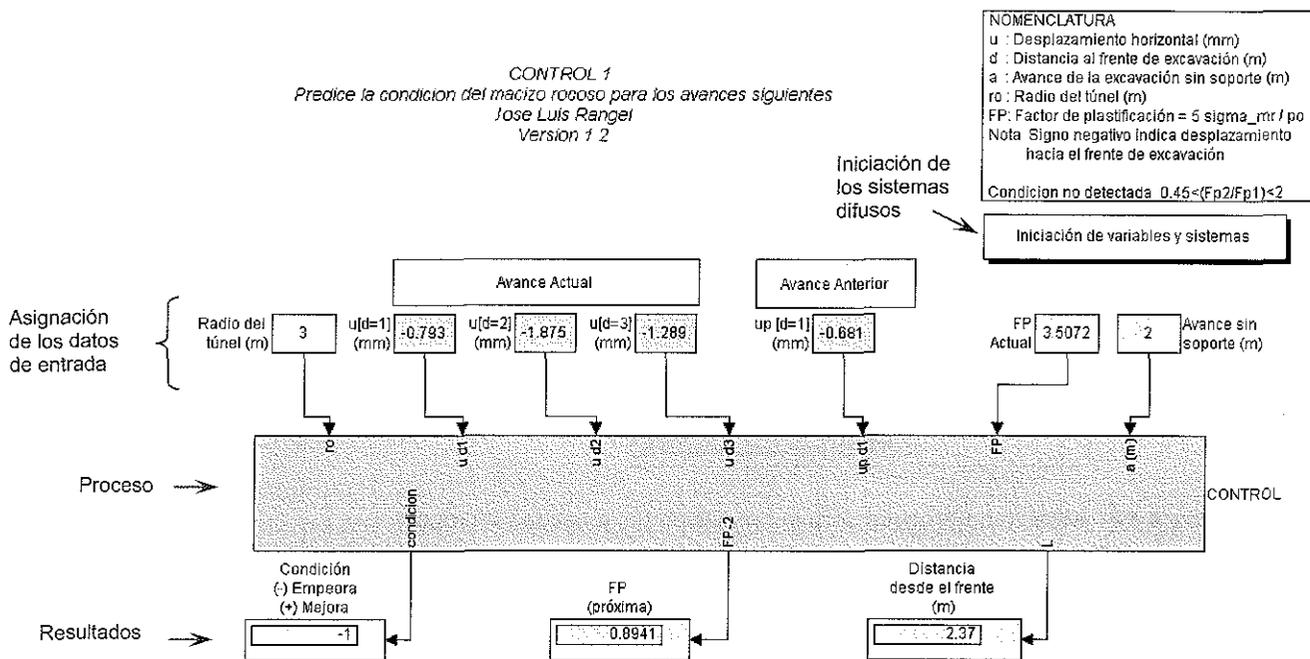
Se estudia la influencia que tiene un cuerpo tabular en el vector de desplazamiento medido en la periferia del túnel utilizando un modelo 3D evolutivo de diferencias finitas (sec. 2.5). Con los resultados del modelo numérico, se construye un sistema neuro-difuso del tipo Takagi-Sugeno capaz de definir las características de la anomalía tabular.

El sistema se desarrolla en el ambiente SIMULINK-MATLAB, por lo que el acceso de información, proceso y visualización de los resultados se optimizan, además de facilitarse el acoplamiento de la técnica a los sistemas de control.

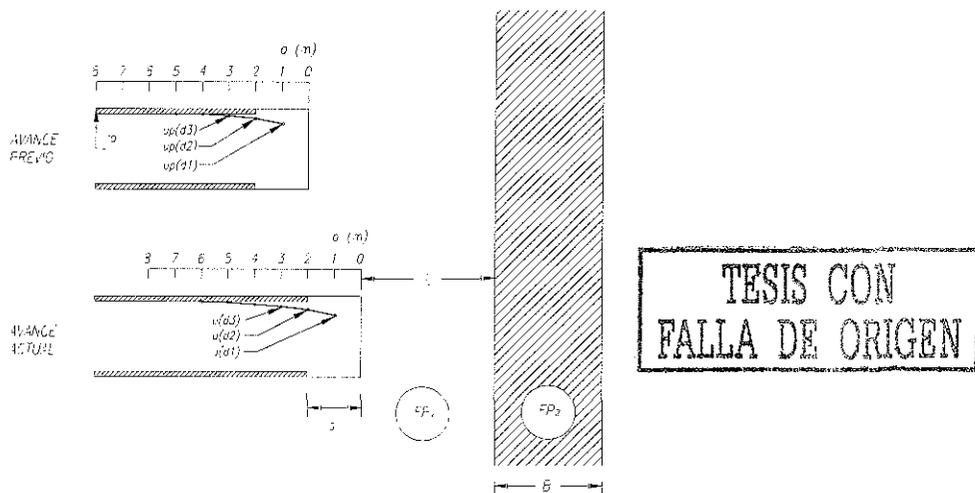
Sistema

En la fig. 4.11 se muestra la carátula principal del sistema propuesto. Se tienen tres partes: asignación de los datos de entrada, módulo de proceso y visualización de los resultados.

Los datos de entrada son los desplazamientos horizontales medidos en la clave tanto en el avance actual (a $0.33r_0$, $0.66r_0$ y $1.0r_0$ alejados del frente de excavación) como en el avance anterior (a $0.33r_0$ del frente), el factor de plastificación observado en el avance actual, el radio del túnel y la longitud de avance sin soporte (fig. 4.11). Es conveniente comentar, que se han utilizado los desplazamientos horizontales y no los verticales, porque el efecto de la anomalía en los desplazamientos verticales es despreciable (sec. 2.5).



a) Carátula principal



b) Definición de las variables de entrada y salida

Figura 4.11 Sistema de predicción de la calidad del macizo rocoso

La unidad de proceso se forma por tres bloques conteniendo sistemas difusos. En estos bloques se determina, en primera instancia, si la calidad del macizo rocoso mejora, posteriormente, se evalúa el factor de plastificación próximo y la distancia a la que se localiza la anomalía respecto al frente de excavación (fig 4.12).

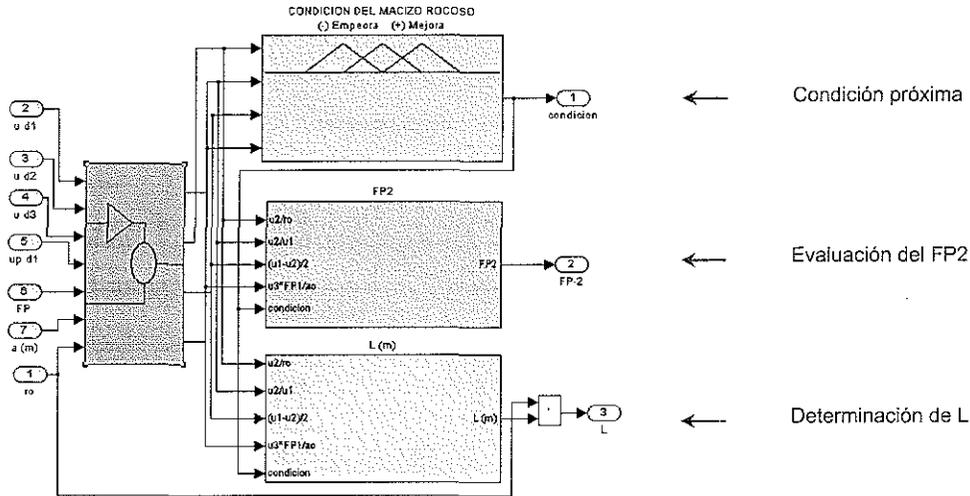
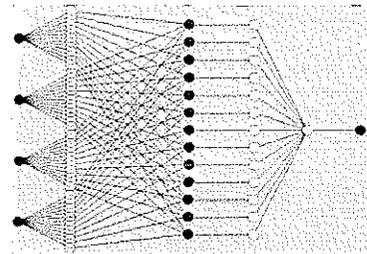
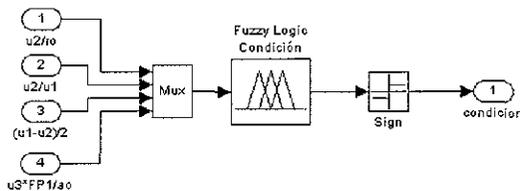


Figura 4.12 Módulo de proceso para la predicción de la calidad de roca

Condición. Para la evaluación de la condición del macizo rocoso en tramos próximos se emplea un sistema difuso (fig 4.13). Este sistema determina si la calidad de la roca mejorará o no, en función de las siguientes variables de entrada:

- Desplazamiento horizontal normalizado actual medido a $0.66r_0$ del frente.
$$\left[\frac{u_{actual}(d = 0.66r_0)}{r_0} \right]$$
- Relación entre desplazamientos horizontales actuales medidos a $0.33r_0$ y $0.66r_0$ del frente
$$\left[\frac{u_{actual}(d = 0.66r_0)}{u_{actual}(d = 0.33r_0)} \right]$$
- La pendiente entre los desplazamientos a $0.33r_0$ y $0.66r_0$ del frente
$$\left[\frac{u_{actual}(d = 0.33r_0) - u_{actual}(d = 0.66r_0)}{d_0} \right]$$
- Diferencia entre los desplazamientos horizontales actual y previo en la posición $1r_0$ y $0.33r_0$, respectivamente, multiplicada por el factor de plastificación actual dividido entre la longitud de avance de la excavación (pendiente generada en un punto particular para avances sucesivos, multiplicada por la calidad de roca).

$$\left[\frac{u_{actual}(d = r_0) - u_{previo}(d = 0.33r_0)}{a_0} \times FP_1 \right]$$



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.13 Sistema difuso que evalúa la condición del macizo rocoso en tramos próximos

La variable de salida del sistema es la condición de la roca; (+1) indica que mejora y (-1) que empeora.

En la sección 2.5 se menciona que una característica principal del efecto de una anomalía tabular es su signo; positivo, cuando la calidad crece, y negativo si decrece (fig 2.25). Desafortunadamente, este efecto es difícil visualizarlo mediante una instrumentación rutinaria, dado que también se miden efectos como la presencia del frente de excavación, y la participación del revestimiento (componentes u_2 y u_{rev} , del desplazamiento total generado durante la excavación). Una forma de evitar parcialmente la descomposición del desplazamiento observado es utilizar las pendientes que existen entre los desplazamientos medidos a lo largo del túnel, y entre avances consecutivos.

La construcción del sistema neuro-difuso se realizó utilizando el método Takagi-Sugeno, donde las funciones de membresía fueron determinadas con la base de datos obtenida del análisis 3D de diferencias finitas, utilizando estrategias de adaptación usuales en las redes neuronales artificiales. La forma inicial de las funciones de membresía se realizó mediante la técnica de minado de datos propuesta por Chiu (1994), donde se aplican medidas de similitud a los datos (distancia euclidiana, por ejemplo).

Con el sistema neuro-difuso descrito se tienen errores absolutos en la predicción de la condición del macizo rocoso del 8.5% y 12.3%, para los datos de entrenamiento y prueba utilizados, respectivamente.

Factor de plastificación próximo Su determinación se realiza con dos unidades neuro-difusas. Esta estrategia se ha tomado con el fin de incrementar la precisión en la respuesta del sistema, dado que el comportamiento del desplazamiento horizontal (pendiente y magnitud) es distinto cuando mejora o empeora la calidad del macizo rocoso. En los sistemas se emplean las mismas variables de entrada y estrategias de construcción del sistema descrito anteriormente.

Cuando la calidad de roca disminuye, los resultados muestran errores del 4.4% y del 12.4% para los datos de entrenamiento y prueba, respectivamente. Cuando la calidad mejora, los errores obtenidos son del 28.3% y 50.5%, para los casos de entrenamiento y prueba, respectivamente.

Llama la atención la diferencia en la aproximación de ambas unidades neuro-difusas, dado que es generada por la componente no lineal (plastificación) que se produce en el medio; es decir, cuando la condición del macizo rocoso empeora, se generan zonas plásticas que incrementan los desplazamientos horizontales, siendo de magnitud tal que dicho efecto es fácilmente detectable. Contrariamente, cuando la calidad de la roca crece, disminuyen las zonas plásticas generadas y la identificación del efecto ocasionado por la anomalía tabular es difícil.

Distancia entre el frente de excavación y la anomalía. Se define con dos unidades neuro-difusas, diseñadas de manera similar que los anteriores sistemas. Los errores obtenidos con este sistema cuando la condición mejora son del 23.3% y 53.3%, para los casos de entrenamiento y prueba, respectivamente. En el caso de que empeore la calidad, los errores son del 18% y 22%, para los datos de entrenamiento y prueba, respectivamente.

Considerando los comentarios anteriores, se observa que la precisión en la respuesta de los sistemas propuestos es aceptable en la predicción de la condición del macizo rocoso (mejora o empeora), ésta disminuye cuando se estima el valor de la calidad del macizo rocoso y la distancia al frente de excavación. Asimismo, la precisión aumenta cuando la anomalía es de menor calidad.

Estos resultados concuerdan con las gráficas mostradas en la fig 2.25, donde el comportamiento del desplazamiento horizontal difiere importantemente cuando mejora o empeora el macizo.

Es conveniente enfatizar que el sistema descrito no reconoce anomalías cuando $0.45 \leq (FP_2/FP_1) \leq 2$, dado que el valor de los desplazamientos horizontales generado por la anomalía es cercano a cero.

Base de datos

En la fig 4.14 se observa la gráfica matricial de la base de datos utilizada para la predicción de la calidad del macizo rocoso, obtenida de un modelo 3D evolutivo de diferencias finitas. En la parte superior se presentan las variables de entrada al sistema relacionadas con las de salida, y en la inferior las variables de entrada de los sistemas neuro-difusos, las cuales están normalizadas.

En la gráfica superior se observa que la relación entre variables de entrada es lineal, teniéndose dos tendencias paralelas correlacionadas con la mejoría o decremento de la calidad de roca. La relación que se presenta entre las variables de entrada y las de la salida tiene en general dos tipos de comportamientos; lineal para el caso de la definición de la condición de calidad y dispersa con relación al FP_2 y la distancia L .

El comportamiento lineal mostrado para la condición de calidad era de esperarse, ya que la definición de la calidad depende exclusivamente del signo del desplazamiento, mientras que la determinación del valor del factor de plastificación próximo y la distancia de la heterogeneidad no es trivial (sección 2.5).

En la gráfica matricial inferior se observan comportamientos semejantes, aunque en este caso se presentan relaciones no lineales entre variables de entrada y las tendencias se logran definir con mayor claridad. Respecto a las variables de salida, las relaciones se conservan respecto a lo observado en la gráfica matricial superior, aunque se observa compactación en la dispersión de los datos.

Resultados

Como se mencionó, los resultados del sistema son la condición del macizo rocoso en tramos por excavar (si mejora o empeora), el valor del FP de la anomalía y su separación respecto al frente de excavación.

Respecto a la precisión del sistema, en la tabla 4.1 se presentan los errores obtenidos para cada variable. Como se observa se tienen errores bajos en la definición de la condición del macizo rocoso y para el $FP_{próximo}$ cuando la condición empeora. Los errores se incrementan cuando la condición mejora lo cual se debe a, como se mencionó, que en esta condición los cambios en el vector de desplazamiento son pequeños.

Tabla 4.1 Errores obtenidos para los datos de entrenamiento y prueba del sistema

Variable		Error (%)	
		Entrenamiento	Prueba
Condición		9	12
FPpróximo	Empeora	4	12
	Mejora	45	50
L (m)	Empeora	18	22
	Mejora	23	53

En la fig 4.15 se muestran los resultados obtenidos para 30 casos estudiados; se observa que en la definición de la condición los resultados son excelentes. Asimismo, se aprecia, de manera más clara, que para el caso de mejoría en la condición de la roca (+1), las estimaciones del FP y L no son tan precisas como en el caso de la disminución en la calidad de roca. Esta desventaja puede suavizarse al realizar la predicción de manera rutinaria.

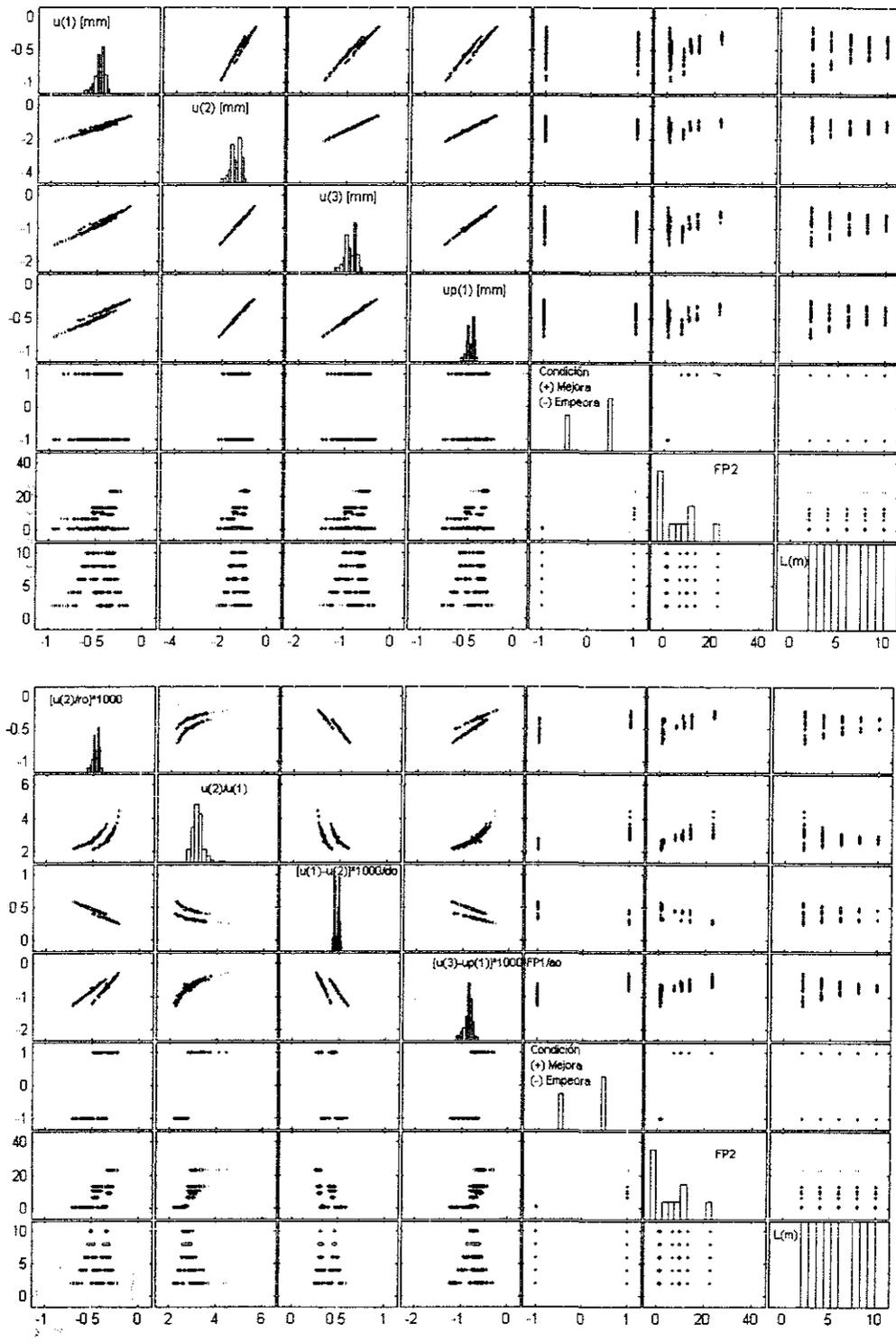


Figura 4.14 Intervalos de variación de los parámetros utilizados para la predicción de la calidad del macizo rocoso (superior) y de las variables adimensionales que forman la base de datos (inferior).

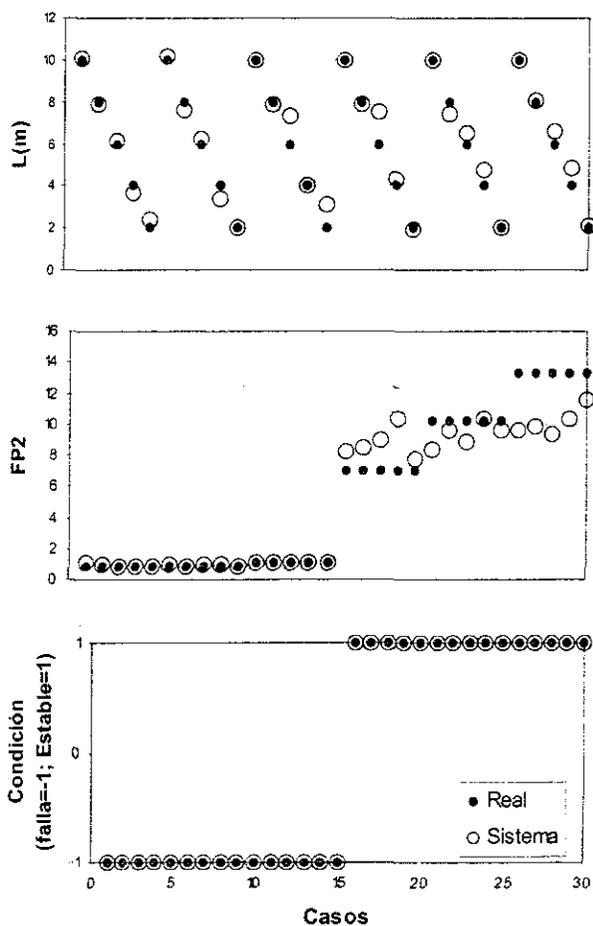


Figura 4.15 Comparación entre los resultados obtenidos con el sistema de control y los establecidos en la base de datos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3 Evaluación del módulo de deformabilidad a partir del comportamiento observado del túnel

Esta actividad, también conocida con el nombre de la solución del problema inverso, se realiza durante la construcción del túnel, a fin de determinar o comprobar los valores de parámetros de difícil determinación en las campañas de exploración, como es el caso del módulo de deformabilidad del macizo rocoso E_{mr} .

En efecto, la determinación del módulo de deformabilidad es complicada, principalmente por los efectos de escala que se tienen al realizar las pruebas de campo (pruebas de placa, de gato plano, etc.), y las condiciones de esfuerzos que en dichas pruebas se tienen (profundidad, esfuerzos tectónicos o de relajación), que muchas veces no son representativos de las reales cuando un túnel se construye.

Una vez verificados o corregidos los valores, estos resultados se aplican, utilizando modelos analíticos o numéricos, a tramos próximos, para poder revalorar, con mayor precisión, su comportamiento y condiciones de seguridad.

Objetivo

Evaluar el módulo de deformabilidad E_{mr} y el factor de plastificación FP a partir de los desplazamientos y calidad de roca observados durante la construcción del túnel.

Método

Utilizando un modelo de diferencias finitas 3D, no lineal y evolutivo, se genera una base de datos formada por 249 casos de túneles circulares construidos en distintas condiciones geométricas y mecánicas.

Posteriormente, se construye un sistema con RNA modulares del tipo Multiperceptrón Multicapa para determinar E_{mr} y FP dados los desplazamientos verticales en la clave del túnel y la calidad de roca observada.

Sistema

En la fig 4.16 se muestra la carátula principal del sistema propuesto, donde se observan tres partes principales: asignación de los datos de entrada, módulo de proceso y visualización de los resultados.

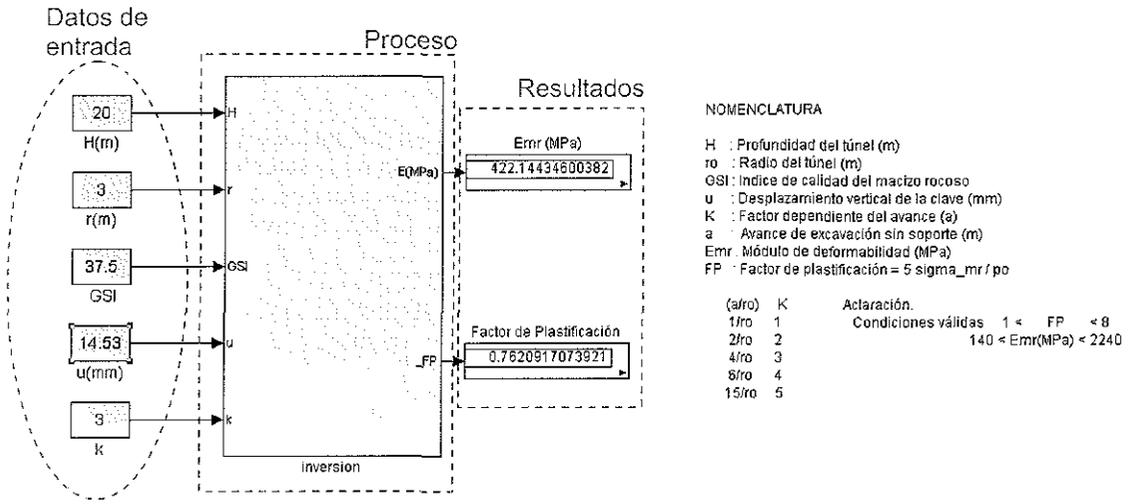
Datos de entrada. Los valores de entrada al sistema son: Profundidad y radio del túnel (H y r_0), el índice de resistencia geológico propuesto por Hoek-Brown (GSI), el desplazamiento vertical total medido en la clave del túnel (u) y el factor K , que indica el valor del avance de la excavación sin soporte normalizada respecto al radio del túnel (fig 4.16a). Dado que el sistema fue diseñado para condiciones particulares, la respuesta del sistema estará dentro de la precisión reportada si:

$$1 < FP < 8$$

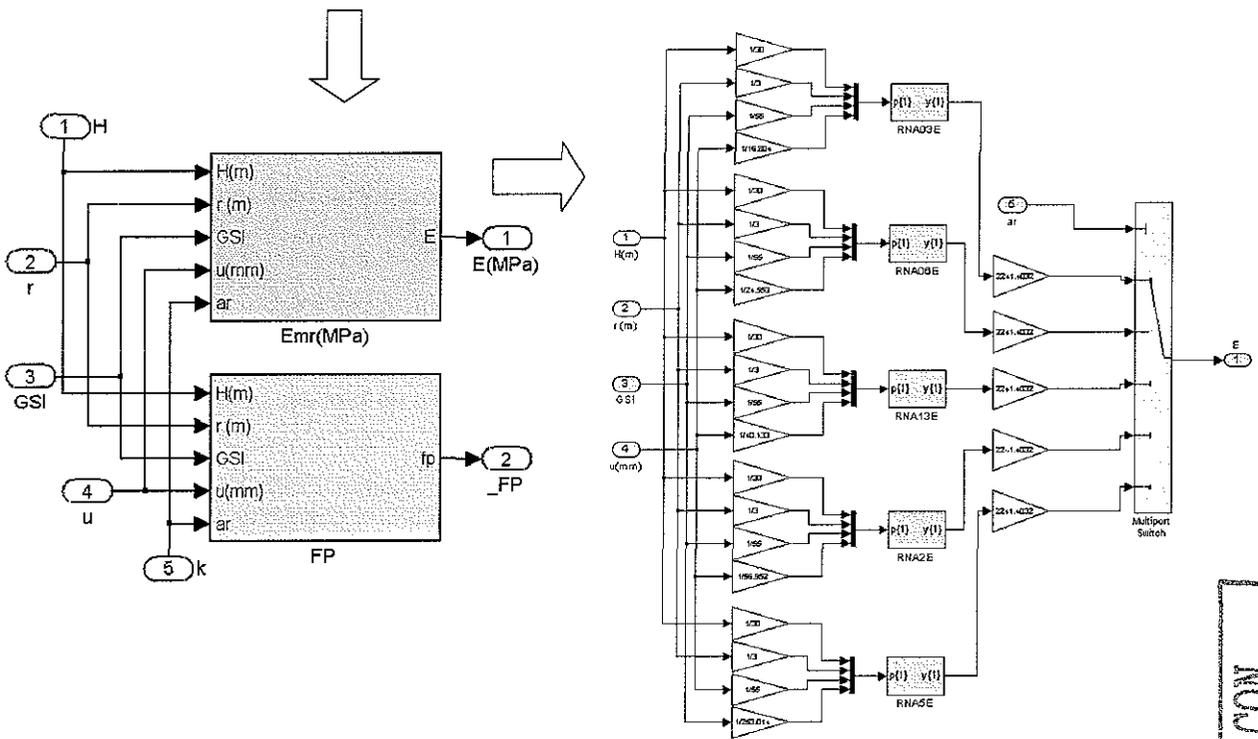
$$140 < E_{mr} \text{ (MPa)} < 2240$$

Módulo de proceso. En este sitio se estiman el módulo de deformación del macizo rocoso y el factor de plastificación en función de las variables de entradas indicadas anteriormente. Se tienen dos unidades de proceso construidas con RNA modulares (fig 4.16b). En la fig 4.16b derecha se detalla la unidad de cálculo del E_{mr} , donde se observan cinco RNA del tipo Multiperceptrón Multicapa. Cada una de las RNA evalúa el módulo para distintos avances normalizados (a/r_0). La arquitectura de las RNA está constituida por dos capas ocultas con 25 y 15 neuronas respectivamente, con funciones de transferencia del tipo sigmooidal-logarítmica.

MODULO DE DEFORMABILIDAD Y FACTOR DE PLASTIFICACION



a) Carátula principal



b) Unidades de proceso

Figura 4.16 Sistema para evaluar el módulo de deformación y el factor de plastificación

Base de datos

El diseño de las RNA se realizó considerando una base de datos sintética obtenida con la técnica numéricos 3D de diferencias finitas. La base de datos se formó con 249 casos, 217 de los cuales

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

se utilizaron para la etapa de entrenamiento de las redes y los restantes para la etapa de verificación. Para cada uno de los 249 casos se fue variando la longitud de avance sin soporte normalizada (a/r_0) para obtener el respectivo desplazamiento total en la clave del túnel.

En la fig 4.17 se despliegan parte de los datos de entrada y salida que forman la base de datos. Se observa que el módulo de deformabilidad Emr , está fuertemente relacionado con el índice de resistencia geológica GSI y el desplazamiento en la clave u ; no así el factor de plastificación FP , el cual solamente muestra relación con el desplazamiento de la clave.

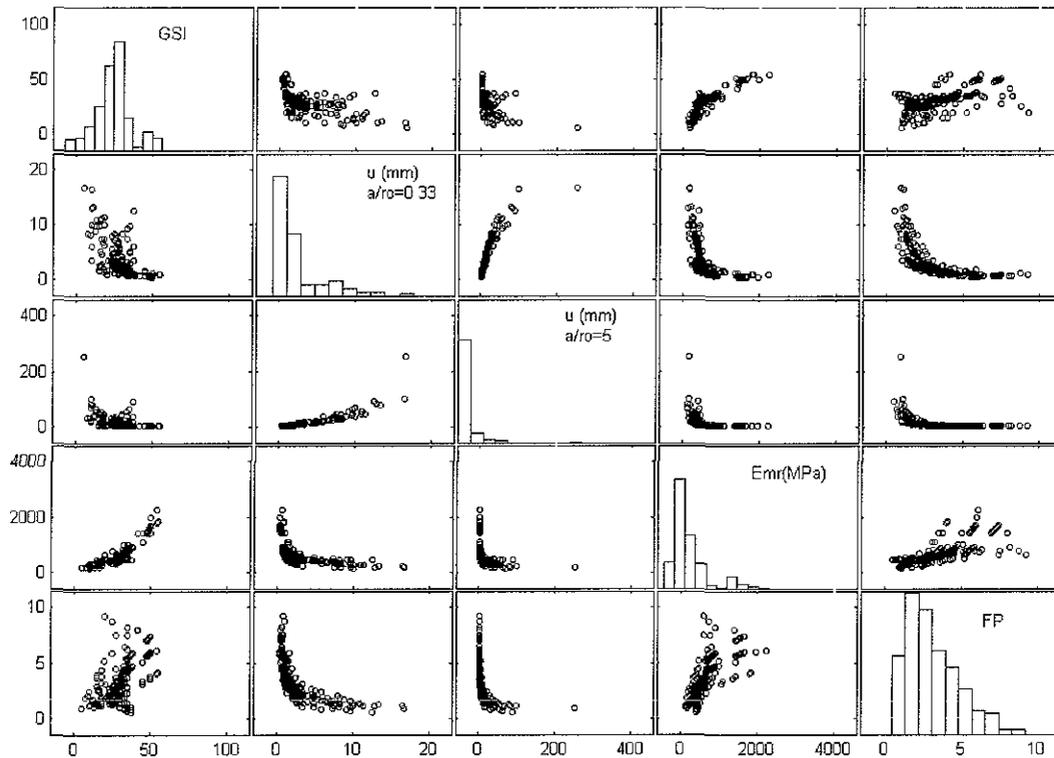


Figura 4.17 Base de datos utilizada para la construcción del sistema para estimar el Módulo de Deformabilidad y el Factor de Plastificación

Resultados

Como se mencionó previamente, se utilizaron 217 y 32 datos para las etapas de entrenamiento y verificación de las RNA. En ambas etapas se obtuvieron coeficientes de correlación mínimos de 0.96.

En la fig 4.18 se comparan los módulos de deformabilidad y factores de plastificación obtenidos con el sistema propuesto contra los generados en el modelado numérico (reales), para el avance normalizado vale $a/r_0=0.333$. Nótese que para el caso de Emr , se obtienen excelentes resultados a lo largo de todo el intervalo de análisis, no así con relación al FP , donde para valores mayores de cuatro existe dispersión baja de los resultados.

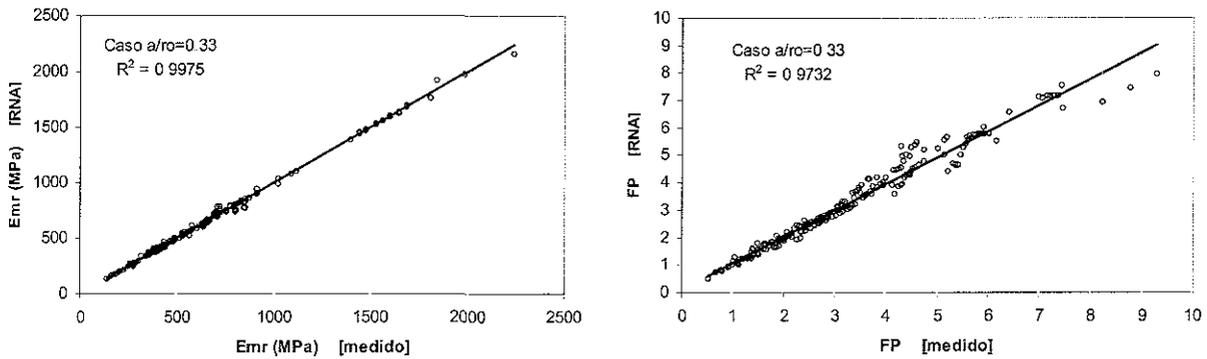


Figura 4.18 Comparación entre los módulos de deformabilidad y factores de plastificación obtenidos con el sistema y los que conforman la base de datos utilizada en la etapa de entrenamiento.

4 4 Comentarios generales

Se han descrito tres aplicaciones de sistemas híbridos basados en RNA y LB en la ingeniería de túneles para las áreas de diseño y construcción.

Los sistemas tienen las características de respuesta inmediata, acceso de la información y visualización de resultados sencillos. Asimismo, es posible adaptarlos rápidamente a nuevas condiciones, actualizando la base de datos y realizando nuevamente el entrenamiento. Por otra parte, también es posible incluir nuevos criterios empíricos u observaciones concretas sobre el comportamiento del fenómeno utilizando los sistemas difusos.

Si bien los sistemas propuestos se desarrollan a partir de bases de datos sintéticas, se observa que utilizando este tipo de sistemas es posible ordenar, procesar e interpretar información de manera eficiente e incrementar la potencialidad de las técnicas de análisis utilizándolas todas ellas de manera conjunta

Con el primer sistema descrito, es posible tener una idea amplia de las condiciones de trabajo del túnel tomando en cuenta el proceso constructivo. El sistema aquí propuesto tiene la particularidad de mezclar técnicas numéricas y analíticas con criterios empíricos de uso común en la ingeniería de túneles.

Con la segunda aplicación es posible prever condiciones de riesgo durante la construcción del túnel. Aquí el sistema hace una distinción entre los desplazamientos horizontales generados en un medio homogéneo con los provocados por la presencia de un cuerpo tabular en las cercanías del frente de excavación. Dada la naturaleza del fenómeno, multiplicidad de soluciones y variables cuyos valores son muy pequeños, la respuesta del sistema puede oscilar; sin embargo, los resultados cualitativos son valiosos durante el seguimiento del túnel.

En la tercera aplicación se resuelve el problema inverso. En este caso se determina el módulo de deformabilidad y el factor de plastificación, dados los desplazamientos y la calidad del macizo rocoso observada en el túnel. Al igual que en el ejemplo anterior, se tiene multiplicidad de soluciones; sin embargo, el sistema identifica adecuadamente de los patrones que rigen el fenómeno

En todas las aplicaciones descritas, la precisión obtenida en los resultados es suficiente para las aplicaciones en la ingeniería de túneles, principalmente para fines de control, dado que el proceso puede realizarse en tiempo real y con equipo de cómputo convencional



5 CONCLUSIONES

La investigación se enfocó al estudio del procedimiento constructivo de túneles excavados en macizos rocosos, considerando tres enfoques: diseño, seguimiento constructivo y técnicas alternas de análisis.

El estudio se basa en análisis numéricos 3D no-lineales, soluciones cerradas y criterios empíricos. La síntesis de la información se realiza mediante las técnicas de RNA, LB y ANFIS, y es interpretada con criterios de estabilidad basados en el factor de plastificación, el avance normalizado de la excavación sin soporte, el desplazamiento normalizado de la clave y el radio plástico

A continuación se enlistan las conclusiones de la investigación.

Modelado numérico

- Las variables adimensionales principales que rigen el comportamiento de un túnel circular para un macizo rocoso, sin presencia de agua son: el factor de plastificación FP , el contraste de rigideces entre el medio y el revestimiento k_n , el avance normalizado de excavación sin soporte a_n , y el desplazamiento normalizado en la periferia del túnel u_n .
- El desplazamiento total generado en la periferia del túnel por la excavación es posible descomponerlo en tres componentes: el desplazamiento del frente previo a su excavación u_1 , el provocado por la excavación del terreno u_2 y el desplazamiento del revestimiento producido por los ciclos posteriores de excavación. Con base en los resultados obtenidos al observar el comportamiento de estas componentes se tiene:
 - Para $a_n < 2r_0$, la variación de los desplazamientos es abrupta al variar el avance, y se produce casi la totalidad del desplazamiento generado por la construcción del túnel. Por tanto, el efecto tridimensional del frente de excavación se presenta principalmente en esta zona.
 - El desplazamiento generado antes de excavar el túnel varía entre 20 al 40% del total.
 - El desplazamiento del soporte es la componente menor de la total (menor del 10 %).
- Se propone una expresión analítica para estimar el desplazamiento total de la clave del túnel considerando el procedimiento constructivo (ec 2.16). El error relativo máximo que se tiene es del 53%, en comparación con los resultados del MEF.
- El resultado obtenido con el MCC, considerando el proceso constructivo, es similar al generado por el MEF cuando el avance de excavación sin soporte es cero y para $FP > 2.5$.

Criterio de estabilidad

- Se proponen dos criterios de estabilidad; el primero basado en FP y a_n (fig 2.15), y el segundo considera a FP , a_n , u_n y el radio plástico normalizado (R_p/r_0).
- Con base en los criterios propuestos es factible definir, de manera sencilla, pero confiable, el comportamiento esperado del macizo rocoso que rodea al túnel: elástico, plástico con inestabilidades locales o la falla de la excavación.

Problema de control

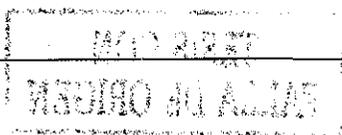
- Se establece una estrategia de control para llevar a cabo el seguimiento del proceso constructivo del túnel.
- Se estudia el efecto de la presencia de una heterogeneidad tabular en los tramos próximos a excavar, de donde se obtienen las siguientes conclusiones (fig 2.25):
 - La componente del desplazamiento que refleja mejor el efecto de la presencia de la heterogeneidad es la horizontal.
 - La zona de influencia de la relajación del frente de excavación es *aproximadamente 1.3 veces el diámetro del túnel*.
 - El efecto de la presencia de la heterogeneidad en el desplazamiento horizontal es positivo (en sentido del avance) si la calidad de la anomalía es mayor en comparación con la del medio, y negativo (en contrasentido del avance) si es menor. El signo atribuido al efecto de la heterogeneidad es primordial para definir la calidad del macizo rocoso en los avances próximos.
 - Dado que en la instrumentación rutinaria durante la construcción del túnel es difícil identificar el signo de la componente del desplazamiento horizontal, alternativamente es posible utilizar el valor de las pendientes existentes entre desplazamientos medidos a lo largo del túnel y entre avances consecutivos. Esta información se introduce al sistema neuro-difuso descrito en la sección 4.3 (fig 4.11), para evaluar la presencia de heterogeneidades.
 - El sistema neuro-difuso propuesto para predecir las condiciones del macizo rocoso generó un error absoluto máximo del 12% para los casos prueba, dicha aproximación se considera aceptable
 - El efecto de la presencia de la heterogeneidad es detectable en la zona no revestida y a una distancia del frente de excavación no mayor del radio del túnel
 - Considerando que es posible medir confiablemente un desplazamiento de hasta 0.15 mm, es posible reconocer efectos de la heterogeneidad cuando $2 < FP_{próximo} / FP_{actual} < 0.45$ y $B/L > 0.8$.

Análisis inverso

- Se propone un sistema formado con RNA en módulos, del tipo multiperceptrón multicapa, para determinar E_{mr} y FP, dados los desplazamientos verticales de la clave, la calidad de roca observada, la profundidad y radio del túnel y la longitud de avance sin soporte.
- El sistema fue diseñado para las condiciones siguientes: $1 < FP < 8$ y $140 < E_{mr}(\text{MPa}) < 2240$. Bajo estas condiciones, se tiene un coeficiente de correlación mínimo con respecto a los datos prueba de $\rho = 0.96$.
- La solución del problema inverso utilizando el sistema propuesto se realiza en segundos.
- Se observa que la aplicación de sistemas cognoscitivos en la solución del problema inverso es *inmediata*. Además, *no se requieren tiempos de proceso largos, ni equipos y programas de cómputo especiales, a diferencia de los procesos que actualmente se utilizan*.

Sistemas híbridos

- Se construyeron tres sistemas híbridos a partir de bases de datos sintéticas obtenidas con modelos numéricos de diferencia finitas, mediante los cuales se realiza el análisis de estabilidad del túnel para fines de diseño, la predicción de condiciones de riesgo en avances próximos y la estimación del módulo de deformabilidad del macizo rocoso y el factor de plastificación a partir de los desplazamientos y la calidad de roca observada durante la construcción del túnel.
- El utilizar sistemas híbridos incrementa el poder de análisis y síntesis que inicialmente tienen las técnicas cuando se utilizan aisladamente. Se observa, por ejemplo, que el sistema ANFIS pudo resolver eficientemente problemas que de manera aislada las RNAs, los criterios empíricos y las soluciones cerradas no lograban una aproximación adecuada.



- Los sistemas presentan las siguientes ventajas:
 - Se da una visión completa del problema estudiado, y su aplicación es inmediata en las etapas de diseño y del seguimiento geotécnico del túnel.
 - La precisión obtenida es mayor en comparación con otras aproximaciones (MCC, MSET, etc).
 - Es posible combinar diferentes técnicas y utilizar variables de entrada cuantitativas y cualitativas, con lo cual se tiene un espectro más amplio de las características y comportamiento del sistema a modelar.
 - La adecuación del sistema a condiciones nuevas es inmediata.
 - El tiempo de proceso es reducido por lo que es posible utilizar los sistemas en tiempo real.
 - La asignación de los valores de entrada y la visualización de los resultados es sencilla.
 - Se utilizan equipo y programas de cómputo convencionales.

RNA, LB y ANFIS

- La aplicación de las técnicas de RNA, LB y ANFIS a la ingeniería de túneles es inmediata; sin embargo, debe de realizarse siguiendo un proceso cuidadoso, donde en principio, se analice la base de datos para evaluar su representatividad, los niveles de ruido, la coherencia de los datos y si el tamaño de la base es suficiente para la construcción de los sistemas cognoscitivos.
- Se describen técnicas para llevar a cabo los análisis de las bases de datos: estadística, gráficas matriciales, componentes principales, análisis adimensional y la prueba Gamma.
- La definición del modelo y arquitectura neuronal, y las características del sistema borroso y neuro-difuso, no es simple. En efecto, depende del tipo de problema, la calidad de la base de datos y de la experiencia del diseñador. En general, es un proceso de prueba y error, donde se busca: optimar los tiempos de cómputo, la precisión y la generalidad en la respuesta del sistema.
- Una estrategia que ayuda a ser eficiente el proceso de diseño es el análisis adimensional y/o de componentes principales de las variables de entrada, y la prueba Gamma en su enfoque paramétrico
- Para el diseño, construcción e implementación del sistema es importante la selección de un ambiente de programación adecuado, donde se permita la combinación de las técnicas de análisis, el manejo eficiente de la información de entrada así como la visualización de los resultados. En los problemas analizados en esta investigación el ambiente SIMULINK resultó ser óptimo.
- Si bien los sistemas construidos son prototipos, ilustran el potencial de aplicación de las técnicas cognoscitivas en la ingeniería de túneles.

Líneas de investigación

- La tesis se desarrolla en tres líneas de investigación:
 - *Diseño*. Modelación numérica 3D y estudio de criterios de estabilidad
 - *Seguimiento constructivo*. Evaluación del procedimiento constructivo.
 - *Técnicas alternas*. Estudio y acoplamiento de técnicas cognoscitivas en la ingeniería geotécnica.
- Los análisis realizados permiten ampliar y identificar nuevas líneas de investigación:
 - *Control*. Proponer un sistema de control para optimar la secuencia constructiva en función del riesgo de inestabilidad, costo y tiempo, donde se consideren conjuntamente criterios empíricos, análisis numéricos tridimensionales y la experiencia obtenida durante la construcción del túnel. Conviene llamar la atención en el último aspecto, ya que no se considera en el seguimiento constructivo actual y es un factor relevante.

- *Caracterización de macizos rocosos*. Determinar el módulo de deformabilidad y la resistencia del macizo rocoso mediante ensayos sencillos, así como su correlación con parámetros de fácil evaluación en campo.
- *Modelado de medios discontinuos*. Proponer técnicas simples de análisis y diseño cuando el macizo rocoso se considera como un discontinuo
- *Matriz de interacción (RES)*. Desarrollar la matriz de flujo de energía propuesta por Hudson, para distintos problemas en la ingeniería de túneles.

REFERENCIAS

- Alvarez Grima, M., P.A. Bruines y P.N.M. Verhoef (2000), "Modeling Tunnel Boring Machine Performance by Neuro-Fuzzy Methods", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. No. 5, pp 259-269
- Ashida, Y (2001), "Seismic imaging technique for looking ahead of the tunnel face using 3-Component receivers", *Modern Tunneling science and Technology*, Swets & Zeitlinger, Balkema, ISBN 9026518609.
- Barto, A y P. Anandan (1985), " Pattern recognizing stochastic learning automata", *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, 15, 360-375.
- Barton, N.R. (1973), "Review of a new shear strength criterion for rocks joints", *Engineering Geology*. 7, 287-332.
- Barton, N.R., R. Lien y J. Lunde (1974), "Engineering classifications of rock masses for design of tunnel support", *Rock Mech*. 6(4), 189-239
- Barton, N.R. (1976), "The shear strength of rock and rock joints", *International Journal of Mechanical, Mining, Science, and Geomechanical*, Abstr. 13(10), 1-24.
- Barton, N.R. y V. Choubey (1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock Mech*. 10(1-2), 1-54.
- Barton, N.R. y S.C. Bradis (1990), "Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice", In *Rock Joints*, proc. International Symposium on rocks joints, Loen, Norway, (eds. N. Barton y O. Stephansson), Balkema, 603-610.
- Barton, N.R. (1995), "The influence of joint properties in modeling jointed rock masses", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs.*, Vol 31, pp 1023-1032.
- Bernaud D. y G. Rousset (1996), "The New Implicit Method for tunnel analysis", *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol 20, 673-690.
- Bezdek, J.C. (1981), *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, Plenum Press, New York.
- Bieniawski, Z.T. (1989), *Engineering Rock Mass Classifications*, New York: Wiley.
- Broms, B.B. y H. Bennermark (1967), "Stability of clay at vertical openings", *ASCE Journal of soils mechanics and foundations*, Div No. 93, SM 1, EUA.
- Bruines, P. (1998), "Neurofuzzy modeling of TBM performance with emphasis on the PR", *Memoirs of the Centre of Engineering Geology in The Netherlands* No. 173, Delft, 202 pp.
- Cai J.G., J.Zhao, y J.A. Hudson (1998), "Computerization of rock engineering systems using neural networks with an expert system", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31 (3), 135-152.
- Carranza-Torres, C. (1998), *Self-similarity analysis of the elasto-plastic response of underground opening in rock and effects of practical variables*, PhD. Thesis of the Graduate School of the University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- Carranza-Torres, C. y C. Fairhurst (2000), "Application of the Convergence-Confinement method of tunnel design to rock-masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion". Comunicación personal.
- Chern, J.C., F.Y. Shiao, y C.W. Yu (1998), "An empirical safety criterion for tunnel construction". En *Proc. Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, pp 222-227.
- Chiu, S. (1994), "Fuzzy model identification based on cluster estimation", *Journal of Intelligent and fuzzy systems* 2 (3), 267-278.

- Coulthard, M.A. y Van Ciesielski (1991), "Expert system to produce a stress analysis program for rock excavation design", Computer Methods and Advanced Geomechanics, (eds Beer, G., J.R. Booker y J.P. Carter), Bookfield VT: Balkema, Vol 1, pp 51-56
- Cundall, P.A. (1988), "Formation of a Three-Dimensional Distinct Element Model – Part I: A Scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks", *International Journal of Rock Mechanics, Mining, Science and Geomechanics Abstr* 25, 107-116.
- Deb, D., Y.M. Jiang, D.W. Park y R.L. Sanford (1994), "Application of artificial intelligence for improving lonwall mine stability", Proc. 8th Int. Conf. computer methods and advances in geomechanics, Morgantown, Rotterdam: Balkema, pp 1823-1830
- Deer, D.U. y R.P. Miller (1966), "Engineering classification and index properties of rock", Technical Report No. AFNL-TR-65-116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory.
- Detournay, E. (1983), *Two-Dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading*. Ph. D. Thesis, University of Minnesota.
- Donath, F.A. (1964), "Strength variations and deformational behavior in anisotropic rocks", State of stress in the Earth's Crust (Eds. W.R. Judd), Elsevier, New York, 281-297.
- Einstein, H.H. y C.W. Schwartz (1979), "Simplified analysis for tunnel supports", Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT4, April, 499-518.
- Fairhurst, C. y C. Carranza-Torres (2002), "Closing the circle, some comments on design procedures for tunnel supports in rock", Proceedings of the 50th Annual Geotechnical Engineering Conference, University of Minnesota, Eds. J.F. Labuz y J.G. Bentler
- Fairhurst, C. y D. Lin (1985), "Fuzzy methodology in tunnel support", Research and Engineering Applications in Rock Masses (ed. Ashworth, E.), Proc. 26th US Rock Mechanics Symposium, Accord MA: International Publishers Service Inc., pp 269-278.
- Feng, X. y Y. Lin (1992), "Knowledge-based expert system for support design in tunnel engineering", Proc. 5th Int. Conf. Underground Space and Earth Sheltered Structures, (ed. Boyer L.L.), Delft, The Netherlands, pp 789-797.
- Fenner, R. (1938), "Untersuchungen zur Erkenntnis des gebirgsdruckes", *Glückauf* 74, 681-695 y 705-715.
- Gosh, A., S., Harpalani y J.K. Daemen (1987), "Expert system for coal mine roof bolt design", Proc. 28th US Rock Mechanics Symposium, Tucson Arizona, pp 1137-1144.
- Goh, A.T.C. (1995), "Empirical design in geotechnics using neural networks", *Geotechnique*, 45, No. 4, pp 709-714.
- Goodman, E.R. y G. Shi (1985), *Block Theory and its applications to rock engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Goodman, E.R. (1989), *Introduction to Rocks Mechanics*, second edition, John Wiley and Sons, New York.
- Goodman, E.R. y G.H. Shi (1985), *Block theory and its application to rock engineering*, Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall.
- Halabe, V. y H.H. Einstein (1994), "SIMSECTION: Knowledge based user interface for tunneling", Proc. 8th Int. Conf. Computers Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. y M.M. Saman), Rotterdam: Balkema, pp 429-434.
- Hebb, D. (1949), *The organization of behavior*, Ed. John Wiley & Sons.
- Hoek, E. y J.W. Bray (1977), *Rock Slope Engineering*, Institution of Min. Metall., London, 401p.
- Hoek, E. y E.T. Brown (1980), *Underground Excavations in Rocks*, Institution of Min. Metall., London, 527p.
- Hoek, E. (1999), "Putting numbers to geology – An engineer's Viewpoint", *FELSBAU*, 17, p139-150.
- Hoek, E. (2000), *Practical Rock Engineering*. <http://www.rocscience.com/roc/Hoek/Hoek.htm>.
- Hoek, E., C. Carranza-Torres y B. Corkum (2002), "Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition", Comunicación Personal.
- Hornik, K., M. Stinchcombe y H. White (1989), "Multilayer feedforward networks are universal approximators", *Neural Networks* 2, pp 359-366.
- Hudson, J.A. (1989), *Rock mechanics principles in engineering practice*. Butterworths. London.
- Hudson, J.A. (1991), "Atlas of rock engineering mechanism: underground excavation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech.*, Abstr. 28, 523-526.

- Hudson, J.A. (1992), *Rock engineering systems: theory and practice* Ellis Horwood. Chichester.
- International Society for Rocks Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Test (1978), "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses", *International Journal of Rock Mechanics, Mining, Science and Geomechanical*. Abstr. 15, 319-368.
- Itasca Consulting Group Inc (1997), *FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 2.0, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Hopfield, J. (1982), "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", *Proc Of the National Academy of Sciences*, 79, pp. 2554-2558.
- Jaeger, J.C. y N.G.W. Cook (1979), *Fundamentals of Rocks Mechanics*, Chapman and Hall, London, 585p.
- Jang, J.S.R. (1993), "ANFIS: Adaptive Network-based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 23, 665-685.
- Jiao, Y. y J.A. Hudson (1995), *Formalizing the system approach to rock engineering*. PhD thesis. Imperial College University of London. London.
- Jones, A.J., P.J. Durrant y S. Margetts (1998), *The Gamma test and how to use it: a practitioner guide*, Department of computer Science, University of Wales, Cardiff.
- Juang, C.H. y Lee D.H. (1989), "Development of an expert system for rock mass classification", *Civil Engineering Systems*, Vol. 6, No. 4, pp 147-156.
- Kastner (1962), *Statik des tunnel und stollenbaues*, Springer Verlag.
- King, R.L. y S.P. Signer (1994), "Using artificial neural networks for feature detection in coal mine roofs", *Proc 8th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown (eds. Siriwardane, H.J. y Zaman, M.M.), Rotterdam: Balkema, pp 1853-1857
- Kirsch, G. (1898), *Die theorie der elastizitat und die bedurinisse der festigkeitslehre*, V.D J. 42(29).
- Kohonen, T. (1982), "Self-organized formation of topologically correct feature maps", *biological cybernetics*, 43, pp 59-69
- Levenberg, K. (1944), "A method for the solution of certain problems in least squares," *Quart. Appl. Math.* Vol. 2, pp. 164-168.
- McCulloch, W.S. y W.A. Pitts (1943), "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bouletin of Mathematics and Biophysics*, 5, pp 115-133.
- Marquardt, D. (1963), "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters," *SIAM J. Appl. Math.* Vol. 11, pp. 431-441
- Moon, H.K., S. Na y Ch. Lee (1995), "Artificial neural network integrated with expert system for preliminary design of tunnels and slopes", *Proc. 8th International Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan (eds Fujii, T.), Rotterdam: Balkema, Vols 1 and 2, pp 901-905.
- Lee, C. y R. Sterling (1992), "Identifying probable failure modes for underground openings using a neural network", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs.*, Vol. 29, No1, pp 49-67
- Lombardi, G. (1973), "Dimensionamiento del revestimiento de túneles". *Publicación especial de la Reunión Presiones de Roca en Revestimiento de Túneles*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, México, Nov.
- Madhu, S., C.H. Juang, J.W. Chen y D.H. Lee (1995), "A Knowledge-based approach to rock mass classification and tunnel support selection", *Civil Engineering System*, Vol. 12, No 4, pp 307-325.
- Mi, Z., P. Jieliang (1989), "An expert system of predicting and preventing surface settlement caused by shield-driven tunneling in city", *Proc. Int. Conf. On Expert System in engineering Applications*, China; Huazhong University of Science and Technology Press, pp 466-472
- Moon, H.K., S.M. Na y C.W. Lee (1995), "Artificial neural networks integrated with expert system for preliminary design of tunnels and slope", *Proc 8th Intern Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan, (eds Fujii, T.), Rotterdam: Balkema, Vols 1 y 2, pp 901-905
- Nelson, P.P., A.A. Yousof y P.E. Laughton (1994), "Tunnel Boring Machine project data. Bases and construction simulation", *Geotechnical Engineering Report GR94-4*, Geotechnical Engineering Center, Department Civil Engineering, The University of Texas at Austin, 78712
- Nguyen, D. y B. Widrow (1990), "Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights", *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, Vol 3, pp. 21-26.

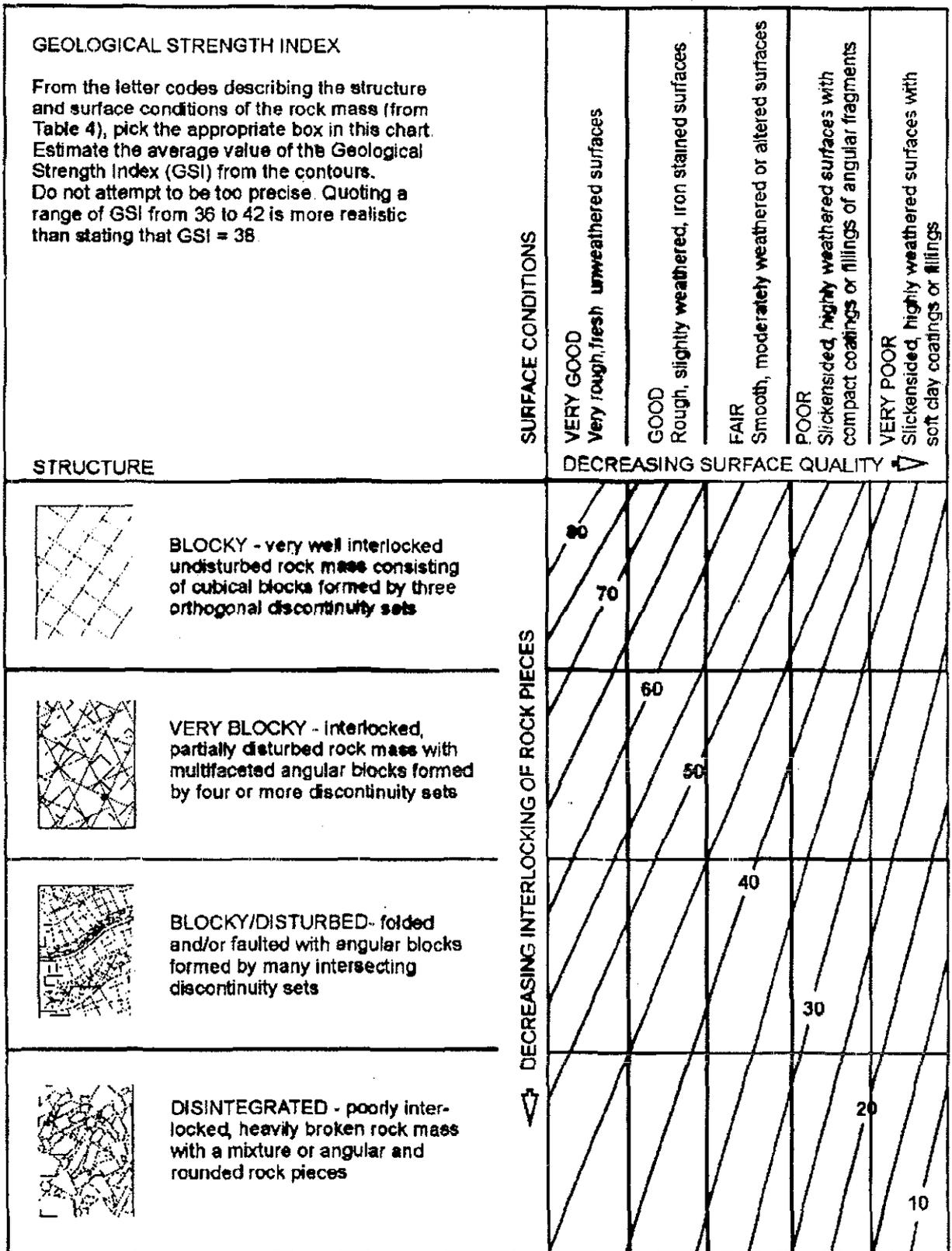
- Panet, M (1995), *Calcul des Tunnels par la Méthode de Convergence-Confinement*. Press de l'école Nationale des Ponts et Chaussées Paris, Francia.
- Patton, F.D. (1966), "Multiple models of shear failure in rock", Proc. First Congress International Society of Rock Mechanics, Lisboa 1, 509-513
- Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", Seventh International Conference on soil Mechanics and foundation engineering, México, state of the Art volume, 225-290.
- Poisel, R., A.H. Zettler, D. Bach, D. Lakovits, y W. Kastner (1999), "Rock Mass Rating based on Tunnel Boring Machine Data", Felsbau Rock and Soil Engineering 17, Verlag G, Essen
- Rangel J.L. y M.P. Romo (1999), "Redes neuronales aplicadas al diseño del procedimiento constructivo en suelos", 3er Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, México D.F.
- Rangel J.L. y M.P. Romo (2000), "Estimación de asentamientos superficiales por tuneleo en suelos blandos de la ciudad de México mediante Redes Neuronales Artificiales", XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Oaxaca, México
- Rangel J.L., A.G. Ayala y M.P. Romo (2002), "Un sistema de inteligencia artificial aplicado al diseño del procedimiento constructivo en rocas", Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Editores: Oñate, Zarate, Ayala, Botello, Moreles, Barcelona, España.
- Reséndiz, D. y M. P. Romo (1981), "Geotechnical problems involved in the design of tunnels in soft-ground", In Soft-ground Tunnelling: Failures and Displacements, A.A. Balkema, Rotterdam, pp1-8.
- Rosenblatt, F. (1958), "The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain", Psychological review, 65, pp386-408.
- Russel, A.D. e I. Alhammad (1993), "A knowledge based framework for construction methods selection", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 20, No 2, pp 236-246.
- Salençon, J. (1969), "Contraction quasi-statique d'une cavité á symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élastoplastique", Annales des Pons et Chaussées, IV, 231-236
- Serafim, J.L. y J.P. Pereira (1983), "Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski", Proceedings of International Symposium on engineering geology and underground construction, Lisbon 1(II), 33-44.
- Sheorey, P.R. (1997), *Empirical Rock Failure Criteria*, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Shepherd, A.J. (1997), Second-order methods for neural networks: fast and reliable training methods for multilayer perceptrons, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Shi, J., J.A.R. Ortigao, y J. Bai (1998), "Modular neural networks for predicting settlements during tunneling", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 124, No. 5, May, pp 389-395.
- Steindorfer A. y W. Schubert (1997), "Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediction in tunneling", Tunnels for people, Golser, Hinkel y Schubert (eds), Balkema, Rotterdam.
- Sterling, R.L. y C.A. Lee (1992), "A neural network expert system hybrid approach for tunnel design", Proc. 33rd United States Symp. On Rocks Mechanics Santa Fe (eds. Tillerson, J.R. y Wawersik, W.R.), Bookfield VT: Balkema, pp 501-510.
- Sugeno, M. (1977), "Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey", (M.M. Gupta, G. N. Saridis, and B.R. Gaines, editors) Fuzzy Automata and Decisión Processes, pp. 89-102, North-Holland, New York
- Sutton, S. R. y A. G. Barto (1998), *Reinforcement learning: An introduction*, MIT Press, Cambridge, MA A Bradford Book
- Takagi, T. y M. Sugeno (1985), "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE., Transactions on systems, Man, and cybernetics, SMC-15 (1), 116-132.
- Salobre, J (1957), *La mécanique des roches*, Paris: Dunod
- Tamez, E., J.L. Rangel y E. Holguin (1997), *Diseño geotécnico de túneles*. TGC Geotecnia, México D.F.
- Terzagui, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, Edit John Wiley and Sons, EUA.

-
- Toll, D. (1996), "Artificial intelligence applications in geotechnical engineering", *Electronical Journal of Geotechnical Engineering*, <http://geotech.civen.okstate.edu/ejge>
- Valluru, R. y R. Hayagriva (1995), *C++ Neural networks and fuzzy logic*, Second edition, MIS Press, New York, NY
- Yager, R., "On a general class of fuzzy connectives," *Fuzzy Sets and Systems*, 4:235-242, 1980.
- Yamamoto, T., S. Shirasagi y M. Inou (2001), "Systems for forward prediction of geological condition ahead of the tunnel face", *Modern Tunneling Science and Technology*, Adachi (eds), Swets y Zeitlinger, Balkema
- Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy sets", *Information and control*, Vol. 8, pp 338-353.
- Zettler, A.H., R. Poisel, D. Lakovits, y W. Kastner (1998), "Control system for tunnel boring machines (TBM): A first investigation towards a hybrid control system", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 35: 4-5, paper N° 120.
- Zhang, Q., Mo, Y.B. y Tian, S.F. (1988), "An expert system for classification of rock masses", *Proc 29th U.S. Symposium, Minneapolis* (ed. Cundall, P.A., Sterling, R.L. y Starfield, A.M.) Bookfield VT: Balkema, pp 535-540.
- Zhang, Q., J.R. Song y X.Y. Nie (1991), "Application of the neural networks models to rock mechanics and rock engineering", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs*, Vol 28, No. 6, pp 535-540

ANEXO A

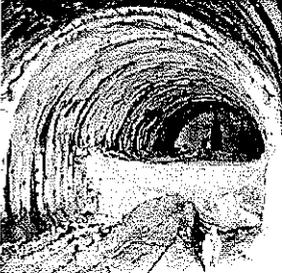
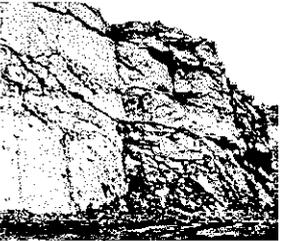
Clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos

ÍNDICE GEOLÓGICO GSI



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Guía para la estimación del factor de alteración por voladura y relajación de esfuerzos (D)

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor sugerido de D
	<p>Calidad excelente en la voladura o excavación mediante máquina tunelera, generando un daño mínimo en el macizo rocoso</p>	<p>D = 0</p>
	<p>Excavación manual o con máquina en macizos rocosos de calidad pobre (sin empleo de voladura).</p> <p>En presencia de materiales expansivos, el daño en la roca puede ser severo a menos que la excavación se realice por etapas como se indica en la fotografía.</p>	<p>D = 0</p> <p>D = 0.5 (sin cubeta)</p>
	<p>Voladura de calidad muy pobre in rocas duras, ocasionando daño local severo, extendiéndose a 2 ó 3 m alrededor del túnel.</p>	<p>D = 0.8</p>
	<p>Voladuras en áreas reducidas en taludes ocasionando daño modesto en el macizo rocoso, particularmente cuando se emplea voladura controlada con se observa en la parte izquierda de la fotografía. Sin embargo, la relajación de esfuerzos induce alguna alteración.</p>	<p>D = 0.7 Voladura Buena</p> <p>D = 1 Voladura pobre</p>
	<p>Producción alta de voladuras en zonas grandes (minas a cielo abierto) donde se altera el macizo rocoso de manera importante y existen relajación de esfuerzos por la excavación realizada</p> <p>En algunas excavaciones en roca suaves se realizan mecánicamente, generando menor daño al macizo rocoso.</p>	<p>D = 1 (voladura)</p> <p>D = 0.7 (mecánica)</p>

RMR			BIENIAWSKI, 1989						
PARÁMETRO			ESCALA DE VALORES						
1	Resistencia de la roca intacta	I_p (kg/cm ²)	> 100	100 a 40	40 a 20	20 a 10	Se utiliza q_u		
		q_u (kg/cm ²)	> 2500	2500 a 1000	1000 a 500	500 a 250	50-250	10-50	<10
Calificación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		100 a 90	90 a 75	75 a 50	50 a 25	< 25		
	Calificación		20	17	13	8	3		
3	Espaciamiento de juntas		> 2 m	2 a 0.6 m	60 a 20 cm	20 a 6 cm	< 6 cm		
	Calificación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las fisuras (Ver inciso D)		Superficies muy rugosas, discontinuas, sin separación, paredes inalteradas	Superficies algo rugosas, separación < 1 mm, paredes algo alteradas	Superficies algo rugosas, separación < 1 mm, paredes muy alteradas	Superficies pulidas, o con relleno < 5 mm, o fisuras abiertas 1-5 mm, continuas	Relleno blando > 5 mm o fisuras abiertas > 5 mm continuas		
	Calificación		30	25	20	10	0		
5	Agua subterránea	Filtración por m_L de túnel	Nula	< 10	10 a 25 l/min	25 a 125 l/min	> 125 l/min		
		Relación u/σ_v	0	< 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Situación general	Seco	Húmedo	Mojado	Goteo presión de agua ligera	Flujo de agua		
	Calificación		15	10	7	4	0		

B. Ajuste en la calificación por orientación de fisuras

Orientación de rumbo y echado		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavo.
Calificación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

CALIFICACIÓN GENERAL RMR= _____

C. Clasificación y propiedades mecánicas

Calificación	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Calidad de roca	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala
Tiempo sin revestir (Avance de referencia)	20 años (15 m)	1 año (10 m)	1 semana (5 m)	10 hrs (2.5 m)	30 min (1 m)
c_{mr} (t/m ²)	> 40	40 a 30	30 a 20	20 a 10	< 10
ϕ_{mr} (grados)	> 45	45 a 35	35 a 25	25 a 15	< 15

D. Guía para la clasificación de discontinuidades

Persistencia	< 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m
Calificación	6	4	2	1	0
Abertura	Nula	< 0.1 mm	0.1 a 1 mm	1 a 5 mm	> 5 mm
Calificación	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugoso	Rugoso	Ligeramente rug.	suave	Pulido
Calificación	6	5	3	1	0
Relleno	Nulo	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Suave < 5 mm	Suave > 5 mm
Calificación	6	4	2	2	0
Intemperismo	Inalterado	Ligeramente alt.	Moderadamente	Muy alterado	Descompuesto
Calificación	6	5	3	1	0

ANEXO B

Prueba Gamma

Introducción

Una de las etapas más importantes para representar analíticamente el comportamiento de un sistema, a partir de una base de datos obtenida de la observación de las variables de entrada y salida, es definir el tipo y estructura del modelo a utilizar.

Esta decisión depende del grado de no-linealidad, ruido o nivel caótico existente en el proceso a representar. Dado que generalmente se desconocen éstas características, la estrategia a utilizar para construir el modelo es la de prueba y error, por tanto, el diseño puede requerir de tiempos de cómputo altos y, en muchos casos, la convergencia a una solución óptima no se logra.

La prueba Gamma ayuda en la definición de las características de la función o modelo a emplear. Por ejemplo, indica el nivel de complejidad del modelo aproximador, y estima el error que puede alcanzarse cuando se utilizan funciones suaves.

Esta prueba fue inicialmente propuesta por Pi (1994) e implementada por Končar (1997) y Aðalbörn Stefansson (1997), y posteriormente discutida por Chuzhanova (1998), Olivera (1999), Tsui (1999 y 2000), pero su desarrollo se reconoce al grupo de Antonia J. Jones (2001)

Hipótesis

La prueba Gamma se basa en que la relación que existe entre las variables de entrada y salida para un sistema dado es del tipo,

$$y = f(x) + r \quad (B1)$$

donde $f(x)$ es una función suave con derivadas parciales acotadas (la norma del gradiente es siempre finita), y r es una variable estocástica con media cero y varianza finita (por ejemplo, ruido blanco)

En la prueba se estima la varianza de r , $\text{Var}[r]$; es decir, la componente de y que es ignorada por la función suave $f(x)$.

Para evaluar la $\text{Var}[r]$ se consideran las hipótesis siguientes:

- a El muestreo de la variable de entrada x es homogéneo; es decir, no existen datos aislados
- b Cada salida es función de la entrada de manera determinista
- c La salida contiene ruido cuya distribución es independiente de la variable de entrada, y su varianza es constante y con media cero

Descripción

La prueba se apoya en la explotación de continuidad de la función desconocida $f(x)$, que modelará al sistema

Cuando dos datos de entrada, x_1 y x_2 , están cercanos, es de esperarse que las salidas, $f(x_1)$ y $f(x_2)$, también lo estén, si la función que relaciona ambas variables es suave. De lo contrario, puede significar que hay un ruido, r , o que el sistema sea altamente no-lineal, o acaso caótico.

La cercanía de los datos de entrada se mide con la distancia cuadrática media entre el dato $x(i)$, denominado pivote, y los p -datos vecinos $x(j)$,

$$\delta(p) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{L(N[i, p])} \sum_{j \in N(i, p)} |x(j) - x(i)|^2 \quad (B2)$$

siendo M el número de datos $\{x(i), y(i)\}$; $N[i, p]$, la lista de los p -datos cercanos a $x(i)$ que se consideran, y $L\{N[i, p]\}$, el número de datos más cercanos a $x(i)$ considerados

La correspondiente distancia cuadrática en el dominio de las variables de salida es:

$$\gamma(p) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{L(N[i, p])} \sum_{j \in N(i, p)} |y(j) - y(i)|^2 \quad (B3)$$

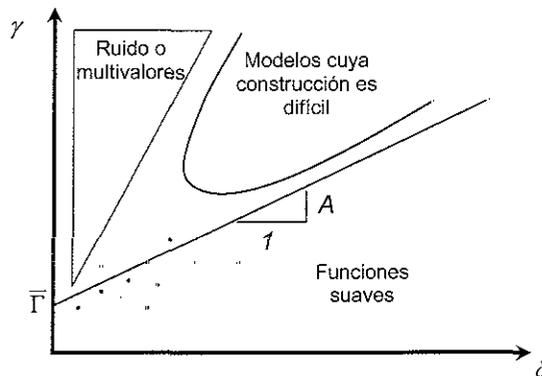
La expresión B3 puede aproximarse mediante (Jones y Evans, 2001),

$$\gamma \cong \text{Var}(r) + A\delta = \bar{\Gamma} + A\delta \quad \text{cuando } M \rightarrow \infty \quad (B4)$$

La prueba Gamma calcula ambas distancias, $\delta(p)$ y $\gamma(p)$, para cada uno de los datos, y posteriormente, determina la línea de regresión dada por la ec B4, y de ésta se obtiene la ordenada al origen $\bar{\Gamma}$, que es $\bar{\Gamma} = \text{Var}(r)$. La pendiente de esta línea de regresión A , es un estimador de la complejidad de la superficie descrita por la función $f(x)$. Si la superficie de f es rugosa (no-lineal), entonces la pendiente A será alta; en cambio, si $A \approx 1$, entonces f es esencialmente lineal.

Interpretación

Dos resultados importantes de la prueba son: la gráfica que relaciona δ vs γ para cada uno de los datos y la línea de regresión $\gamma = \bar{\Gamma} + A\delta$ (fig B.1)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura B.1 Resultados de la prueba Gamma

De la gráfica B.1 se obtiene la información siguiente:

- a) *Zonificación*. Se ha observado que existe una correlación alta entre la ubicación de los resultados de la prueba Gamma en el espacio δ vs γ y las características del proceso, tal que es posible proponer la zonificación indicada en la fig B.1.

En efecto, cuando la distancia δ es baja (puntos cercanos en el espacio de las variables de entrada), y su correspondiente γ es alta (puntos lejanos en el espacio de las variables de salida), indica que los niveles de ruido son altos o existe no-linealidad fuerte

Cuando δ y γ son altos, se observa dispersión fuerte de los resultados, lo cual dificulta la optimización de la línea de regresión. En este comportamiento, la construcción de un modelo es difícil, y por tanto, es conveniente identificar aquellos datos o puntos que generan dicha dispersión. Estos datos deberán de examinarse, y en caso dado, eliminarse

- b) *Línea de regresión*. Como se mencionó previamente, la pendiente de la curva de regresión, A , expresa la complejidad de la superficie de $f(x)$. Cuando la pendiente es fuerte, el nivel de ruido es alto, y es necesario emplear un número grande de datos para el modelado del proceso, o en su caso, realizar el filtrado de la base de datos. Contrariamente, cuando la pendiente disminuye, la función $f(x)$ tenderá a ser lineal.

Una línea de regresión con puntos cercanos a $\delta = \gamma = 0$, indica que los valores de y , dadas las abscisas x , están muy cercanos, y por tanto, los niveles de ruido son bajos. En estas circunstancias es posible emplear funciones suaves para modelar al sistema.

Cuando se evalúan la pendiente A y la ordenada $\bar{\Gamma}$ en función del número de datos utilizados, es posible obtener información adicional del sistema a representar: cuando el valor de A sube al incrementar el número de datos utilizados, el proceso tiende a ser aleatorio, y por tanto, no se recomienda utilizar funciones suaves.

- c) *Análisis paramétrico*. Esta estrategia se utiliza para evaluar la relevancia de las variables de entrada. Se determinan los valores de $\bar{\Gamma}$ y A al ir eliminando paulatinamente las variables de entrada. Dado que durante la eliminación se alteran las relaciones que existen entre puntos vecinos en el dominio de los valores de entrada, los valores de $\bar{\Gamma}$ y A cambian. Cuando al eliminar alguna variable, el valor de $\bar{\Gamma}$ no varía, dicha variable es irrelevante.

Es conveniente mencionar que para encontrar la mejor combinación de variables de entrada, es necesario realizar un número grande de ensayos, lo que es impráctico. Por tanto, es recomendable recurrir a algoritmos de optimación del proceso, como por ejemplo los algoritmos genéticos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN