Sociedad Española de Mecánica de Rocas

www.semr.es

Boletín nº 2 2º Semestre 2009

Editorial 3
Actividades de la SEMR en 2009 4
Noticias 6
Jornada Técnica Anual 9
Eventos de interés 10
3ª Edición del Premio anual de la SEMR 10
Enlaces de interés 22
Ser Socio de la SEMR 22
Próximas elecciones SEMR 23
Entidades y Empresas Colaboradoras 24

Comité de Redacción

Coordinador:
Javier González-Gallego (CEDEX)
javier.gonzalez@cedex.es

Comité de Redacción:

Claudio Olalla (Presidente SEMR)
Eusebio Nestares (ADIF)
Leoncio Prieto (RODIO)
Juan Antonio Díez (CEDEX)
Áurea Perucho (CEDEX)

Sede Social
Laboratorio de Geotecnia- CEDEX
C/ Alfonso XII 3 y 5
28014 Madrid
Teléfono: 91 335 73 24 / 51
Fax: 91 335 73 22
E-mail: semr@cedex.es

Junta Directiva

Presidente: Claudio Olalla Marañón
Vicepresidente: Luis González de Vallejo
Secretaria: Áurea Perucho Martínez
Tesorero: José Estaire Gepp
Representante del CEDEX: Juan Antonio Díez Torres

Expresidentes:
Manuel Romana Ruiz
José María Sanz Saracho

Vocales de Grupos de Trabajo:

A - Investigación y Docencia
Claudio Olalla, Áurea Perucho, Alcibíades Serrano
B - Estudios Geológicos
Ramón Benet, Luis González de Vallejo, Eusebio Nestares
C - Proyecto, Modelización e Instrumentación
Felipe Mendaña, Rafael Portilla, Fernando Román
D - Tratamientos de Mejora y Refuerzo
Gustavo Armijo, Leoncio Prieto, Julio Retuerto
E - Procesos Constructivos de Infraestructura
Laureano Cornejo, José Manuel Gutiérrez Manjon, Davor Simic
F - Minería, Almacenamientos y Voladuras
Leandro Alejano, Ricardo Laín, Pedro Ramírez

Editorial

En este segundo número del Boletín de nuestra Sociedad, se me brinda la oportunidad de dirigirme a todos los socios.

Han transcurrido ya más de ocho años desde que iniciamos una nueva etapa, después de pasar por un largo periodo de inactividad, lo que supuso empezar prácticamente desde cero. En esta nueva etapa se ha producido una profunda renovación y sobre todo una revitalización de la ***SEMR***, cuyos resultados pueden calificarse de excelentes. Cabe resaltar algunos de ellos, como son la celebración de las ***Jornadas Técnicas***, en las que han participado la mayoría de los socios, además de otros muchos asistentes.

El interés de estas jornadas ha permitido consolidar la cita anual del mes de abril, como el principal evento de la Sociedad. Al acierto de elegir temáticas de actualidad y de gran impulso tecnológico, se ha unido el prestigio de los conferenciantes y la participación de insignes invitados del ámbito internacional de la Mecánica de Rocas.

También la Sociedad ha desarrollado una intensa labor de presencia y participación en los foros internacionales de la ***Mecánica de Rocas*** y de la ***ISRM***, que ya han dado muy buenos resultados, organizando tres ***workshops*** internacionales y estando presentes como co-organizadores de un congreso internacional.

En la vertiente más científica debemos destacar el notable incremento de publicaciones en revistas internacionales del mayor prestigio por parte de autores pertenecientes a esta ***Sociedad***, la participación de jóvenes investigadores en el ***Premio de la SEMR***, y el reconocimiento de la excelencia a la labor profesional e investigadora a través de los premios nacionales e internacionales concedidos a miembros de la ***SEMR.***

Estos muy buenos resultados deben animarnos a seguir por el camino ya emprendido y a atrevernos a ir más lejos con nuevas metas, como la incorporación de nuevos socios sobre todo del sector más joven, la ampliación del campo de actividades hacia aspectos tecnológicos y científicos de reciente desarrollo, una mayor implicación en cuestiones de interés social y medioambiental relacionadas con la ***Mecánica de Rocas***, y de nuevo ofrecer a los más jóvenes un lugar de encuentro y de orientación en su futuro profesional.

Muy pronto (***21 de enero de 2010***) se celebrarán elecciones en la ***SEMR***, de donde saldrá una nueva Junta Directiva para los próximos 4 años. Esta es una gran oportunidad para impulsar la ***Sociedad***, haciéndola mas participativa y plural, tanto en el número de socios que entren a formar parte de la nueva Junta, como en la necesaria renovación generacional.

En esta segunda edición del ***Boletín de la SEMR*** encontrarán un resumen de las principales actividades celebradas en el ultimo año y de las futuras, entre las que se destacan la ***Jornada Técnica*** sobre ***Almacenamiento Subterráneo de Gases***, con el **CO_2** como protagonista, de gran interés y actualidad, aspecto que representa una nueva frontera en la ***Mecánica de Rocas***. El ***Workshop Internacional*** sobre ***Rocas Volcánicas*** programado para ***mayo de 2010*** en ***Tenerife***, es una excelente ocasión para adentrarse en la geomecánica de los materiales volcánicos, muy poco conocidos en general, pero de creciente interés ante los ambiciosos proyectos de infraestructuras previstos en las Islas Canarias.

Desde aquí os animo a participar activamente en la vida de la Sociedad.

Luis González de Vallejo
Vicepresidente

Actividades de la SEMR en 2009

El 22 de abril se celebró la **Jornada anual de 2009**, cuyo tema fue **"Cálculo de túneles".**

La jornada se celebró como viene siendo habitual en horario de mañana en el salón de actos del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del **CEDEX.**

La Jornada se organizó, en colaboración con el **CEDEX** y, en este caso, con **AETOS**.

En esta ocasión se contó como conferenciantes con los profesores **Ronald Brinkgreve** (programa Plaxis), **Loren Lorig** (Itasca, programa FLAC), **Samuel Estefanía** (INTECSA) e **Isabel Reig** (IBERINSA).

PROGRAMA

8,45-9,00	**Inscripciones y recogida de la documentación.**
9,00-9,15	**Presentación de la Jornada.** D. Ángel Aparicio. *Director General del CEDEX.* D. Fernando Pardo de Santayana. *Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.*
9,15-10,00	**Revisión de las soluciones analíticas existentes para el cálculo de la curva de convergencia en macizos elastoplásticos.** Isabel Reig. *IBERINSA.*
10,00-10,45	**Aspectos particulares a tener en cuenta en el cálculo de un túnel.** Samuel Estefanía. *INTECSA.*
10,45-11,15	Pausa, café.
11,15-12,15	**Aplicación de modelos numéricos continuos y discontinuos al análisis de túneles** Loren Lorig. *Itasca, programa FLAC.*
12,15-13,15	**Finite element calculations for tunnelling in soft grounds** Ronald Brinkgreve. *Programa PLAXIS.*
13,15-13,45	**Mesa Redonda**
13,45-14,00	**Clausura** D. Manuel Arnáiz. *Presidente de AETOS.* D. Claudio Olalla. *Presidente de la Sociedad Española de Mecánica de Rocas.*

Esta jornada al igual que las anteriores ha tenido gran acogida entre la comunidad geotécnica con una asistencia de 170 personas.

En la Jornada anual se realizó la entrega del **3º Premio de la SEMR**, para jóvenes investigadores.

Dicho premio, dotado con un diploma y 3000 euros, fue otorgado a la ingeniera de caminos, canales y puertos **Dª Nuria Pinyol**, por su trabajo realizado sobre **"Deslizamientos rápidos. Criterios de análisis. El caso de Vaiont".**

En este boletín se incluye un resumen completo del trabajo premiado.

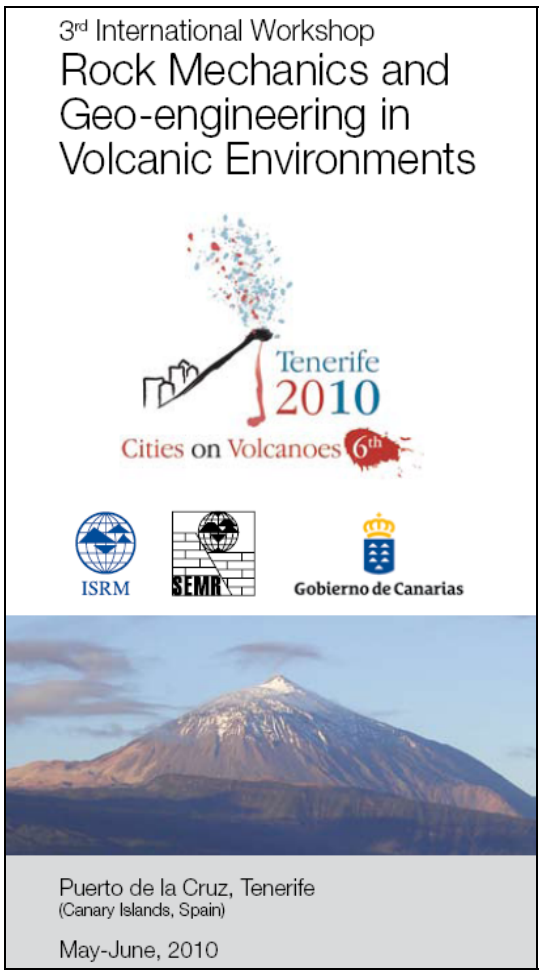
Durante 2009 se ha trabajado en la preparación del que será el ***"3rd International Workshop on Rock Mechanics and Geo-Engineering in Volcanic Environments"***, después de los celebrados en **Madeira** (en noviembre de 2002) y en **Azores** (Julio de 2007).

Este **3er Workshop Internacional** organizado por la **SEMR** y el **Gobierno de Canarias** formará parte de los eventos internacionales de la **ISRM.**

Este Workshop se celebrará en Tenerife del **30 de Mayo al 1 de Junio**, y forma parte del macro-congreso "**Cities on volcanoes6**", un congreso multidisciplinar que trata de una amplia temática en relación a las zonas urbanas cercanas a áreas volcánicas.

La editorial **Balkema** editará un libro con las ponencias presentadas.

Habrá dos conferencias invitadas, por parte de **Nick Barton** y de **Alcibíades Serrano**.



Toda la información sobre este Workshop puede consultarse en:

http://www.citiesonvolcanoes6.com/rockmechanics.html

Este año se ha trabajado en la preparación de la próxima Jornada Anual de la **SEMR**.

Esta jornada se celebrará el 14 de abril de 2010, en colaboración con el **CEDEX**, como es habitual, y con el **IGME**.

Su título será ***"Almacenamiento subterráneo de gases"***.

En la sección de este boletín dedicada a la Jornada Anual de la **SEMR** se detalla toda la información referente a la misma.

Noticias

PREMIO NACIONAL DE INGENIERIA CIVIL

El jueves 29 de enero de 2009, en un acto presidido por la Ministra de Fomento, tuvo lugar la entrega del **Premio Nacional de Ingeniería Civil 2007** a ***Alcibíades Serrano González***, como reconocimiento a su brillante trayectoria profesional.

El acto de entrega se realizó en la sede social de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Palacio de Fernán Núñez de Madrid.

A continuación se muestra el discurso que leyó **D.Claudio Olalla Marañón** (Presidente de la **SEMR**) durante la celebración del acto.

No se exige a quien va de camino que piense a cada paso en la meta. Basta que lo haga de vez en cuando, tantas veces como sea necesario para mantener el rumbo. Tampoco se nos pide a los amigos que pensemos a cada momento en nuestros maestros, pero de vez en cuando se nos ofrece una oportunidad para hacerlo, para buscar una pausa y recapacitar. STA VIATOR, "detente viajero" se podía leer en los antiguos epitafios romanos, solicitando por un instante la atención del caminante distraído.

No es nuestro caso, ya lo sabéis, Alcibíades Serrano González es uno de los ingenieros geotécnicos de mayor prestigio que ha dado la historia española. Tengo el honor y la satisfacción de presentaros ahora una breve semblanza.

Natural de La Matanza de Acentejo, un pueblo de la isla de Tenerife, Alcibíades realizó brillantemente sus estudios de ingeniería de Caminos, terminándolos en el año 1960.

Durante esos años, en su afán de profundizar en el conocimiento de las matemáticas aplicadas, (lo que ha sido su "otra" gran vocación), se matriculó en la facultad correspondiente y, cursando durante los veranos, estudió la Licenciatura, año a año, hasta su casi finalización.

Antes de acabarlos ya fue contratado como profesor de Matemáticas en nuestra Escuela.

Inició su labor profesional el campo de la Geotecnia bajo los auspicios primero de Don José Entrecanales y, posteriormente, del que fue padre y mentor de la Ingeniería Geotécnica española; Don José Antonio Jiménez Salas. Sus primeros años profesionales los ocupó en una empresa constructora.

Durante ese tiempo, Don José Antonio pudo apreciar las grandes capacidades analíticas y teóricas de Don Alcibíades y le recomendó continuar sus estudios en la Universidad de Cambridge, en Inglaterra: Allí deslumbró a propios y extraños y desarrolló la ya famosa "teoría de los campos asociados".

De él dijo, en aquellos años, el Profesor Roscoe que "había sido el alumno más brillante que había tenido nunca".

Posteriormente continuó su labor investigadora y su ejercicio profesional en el ámbito del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en donde llegó a ser Director durante casi dos lustros, sin impedirle desarrollar al mismo tiempo, una producción científica e investigadora activa.

Esta tarea la compaginó con la docencia de la Geotecnia, fundamentalmente en la Escuela de Ingenieros de Madrid.

Con innumerables conferencias en su haber, su dilatada experiencia investigadora, docente y profesional, le ha llevado a publicar no sólo en Congresos nacionales e internacionales de distinto ámbito, entidad o importancia, sino también y sobretodo, en las revistas internacionales de mayor y reconocido prestigio, que exigen para su publicación la superación previa de los comentarios y preguntas de los revisores. Estos revisores suelen ser normalmente los máximos expertos a nivel mundial en los temas tratados y por publicar.

Citaré solamente ahora algunas de las revistas especializadas en donde han sido publicados artículos suyos;

- la "Geotéchnique" inglesa,
- el "Canadian Geotechnical Journal",
- el "Soils and Foundations" japonés,
- el "Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering" de los Estados Unidos de América, o
- el también "International Journal of Rock Mechanics and Mining Science"

Son reconocidas mundialmente sus aportaciones a la Mecánica de Rocas; Nick Barton; Evert Hoek; Richard Bieniawski; John Hudson; Richard Goodman … todos ellos en activo, han pasado por Madrid y como grandes depositarios del saber a nivel mundial en Mecánica de Rocas, dan referencias de su valía y han sido testigos de su poderosa creatividad.

Así por ejemplo, John A. Hudson, Catedrático del Imperial Collage de Londres y actual Presidente de la Sociedad Internacional, ha manifestado, *"soy testigo de ello, que sus trabajos teóricos sobre cimentaciones en rocas, han supuesto poder disponer de un marco teórico y conceptual similar al que*

existe al respecto en el domino del cálculo de túneles y de taludes, y que no existía con anterioridad".

Como profesional, de vida larga y fecunda, se ha visto enfrentado a los mayores retos que ha tenido la ingeniería geotécnica española. Permitidme que de nuevo cite algunas muestras:

- las cimentaciones de las centrales nucleares de Almaraz, Vandellós o Ascó.
- las cimentaciones de las grandes presas, como el Atazar, el Limonero y otras.
- grandes puentes; El Alamillo, en Ayamonte, IV sobre el Guadiana, …
- los grandes túneles;
- los puertos más importantes; Málaga, Algeciras,
- etc.

Por no añadir las innumerables estructuras civiles que han recibido los sabios consejos de un ingeniero que siempre ha unido, con imaginación, la teoría y la práctica y que ha sabido comprometerse cada vez que alguien ha llamado a su puerta.

Un ingeniero, por cierto, que ha desarrollado su labor en todo el mundo. Pero describir sus trabajos nos llevaría a una extensión que no cabría en el tiempo que se me ha otorgado.

Trabajar es crear, es producir, pero también es convivir responsablemente con otras personas en la tarea de transformar el mundo, garantizando que las realizaciones de la ingeniería sean testigos perdurables del progreso de la humanidad. Pero sigamos adelante.

Ha sido Catedrático por oposición de la asignatura de Mecánica de Rocas en la Escuela Técnico Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. En la actualidad, aunque se encuentra ya jubilado, continúa ejerciendo su labor como Profesor Emérito, en la Universidad Politécnica de Madrid.

Se le puede y debe considerar como maestro de la gran mayoría de catedráticos y profesores titulares de reconocido prestigio nacionales: los profesores Rodríguez Ortiz, Soriano y otros en Madrid, Alonso y Gens en Barcelona, Sagaseta en Santander, Blázquez en Ciudad Real, Celma en Valencia, Oteo en La Coruña. Así como el profesor Rodríguez Roa en Santiago de Chile. Podemos decir sin equivocarnos que casi todos los actuales Catedráticos de Geotecnia de este país, han sido alumnos suyos.

Pero si, como ya he dicho, sus méritos académicos y profesionales son referenciados y consultados en las revistas más prestigiosas y son motivo de estudio en universidades y centros de investigación de todo el mundo, no es menor su categoría personal.

Hombre sencillo, persona de bien, vitalista y alegre, amante de las ciencias, de las humanidades y de las artes. Ningún área del saber le es extraño.

Permitidme, por tercera vez, una breve enumeración de ejemplos concretos;

- es un melómano consumado, (acude regularmente al Auditorio madrileño);
- es un lector habitual, (incluso en latín; !! la Eneida la lee en latín ¡¡);
- estudioso de la historia, española y universal;
- es aficionado a la pintura (podéis encontrarle sin dificultad en el Museo del Prado, donde acude casi todos los domingos a primera hora de la mañana);

Amigo de sus amigos. Quiere a sus seres queridos. Amante de la vida y de lo profundo de la vida. Aprecia también el valor de las pequeñas anécdotas que la cotidianeidad nos ofrece de positivo. Sabe reconocer aquellas cosas esenciales que, como se dice en el Principito, "son invisibles a los ojos de los hombres".

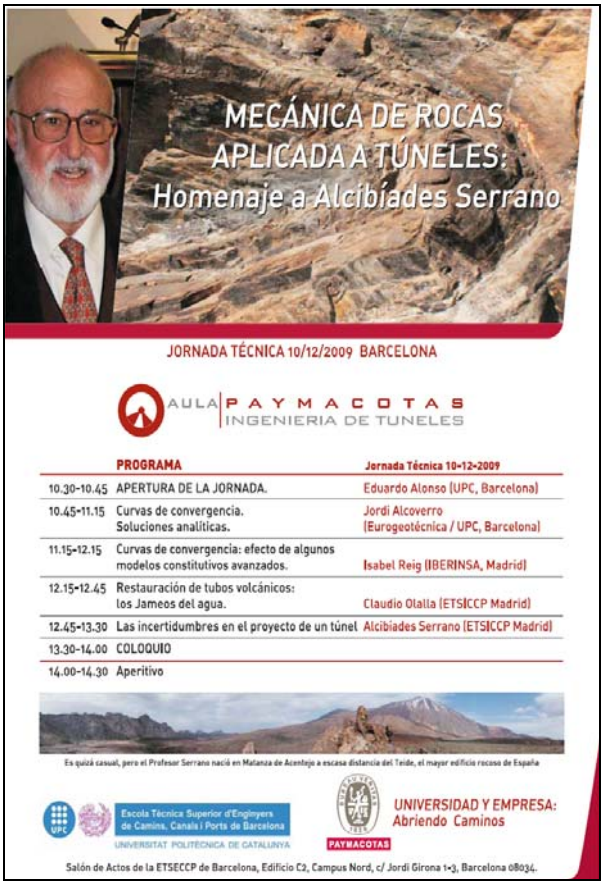
Pero al terminar mi exposición, una vez más, se pone de manifiesto que el todo de una persona es siempre mayor que la suma de las partes. Y una vez más, se advierte la incapacidad que tienen las palabras para dejarnos satisfechos cuando queremos traducir su contenido y deseamos expresar el agradecimiento de nuestro interior. Tendrá que ser así, no podremos remediarlo.

Querido Alcibíades, las campanas de la ingeniería nos han convocado esta tarde junto a ti, alrededor de ti. Y la presencia aquí de tus amigos es más elocuente que mis palabras, para destacar tu amistad y tu legado.
Muchas gracias

Claudio Olalla Marañón
Presidente SEMR

Además, se ha celebrado una jornada técnica en homenaje al **Profesor *Alcibíades Serrano*** organizada por **Paymacotas** y la **Universidad Politécnica de Cataluña**.

Esta jornada con el título de **"Mecánica de rocas aplicada a túneles"** se ha celebrado el 10 de diciembre de 2009 en el Salón de actos de la **ETSECCP** de Barcelona.



MEDALLA GEORGE STEPHENSON

Antonio Gens, **Benoit Garitte** y **Jean Vaunat** del Departamento de Ingeniería del Terreno de la **Universidad Politécnica de Cataluña** han recibido la **Medalla George Stephenson** de la Institution of Civil Engineers (ICE) británica.

La **Medalla George Stephenson** fue instituida en el año 1881 y se otorga anualmente desde entonces.

Ha sido concedida por el artículo ***"In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading: observations and interpretation"*** publicado en la revista Géotechnique.

La medalla fue entregada por el Presidente del ICE, **David Orr**, en una ceremonia celebrada en Londres el 24 de Octubre.de 2008.

CONFERENCIA ROCHA

D. Luis González de Vallejo (vicepresidente de la **SEMR**) ha sido invitado a dar el año que viene la próxima conferencia **ROCHA** en la **Fundación Gulbelkian** de Lisboa.

GEOTECHNICAL RESEARCH MEDAL

Los profesores ***Eduardo Alonso y Sebastia Olivella*** han recibido la **"Geotechnical Research Medal"** otorgada por la **"Institution of Civil Engineers" (ICE, UK)** por el articulo publicado en 2008 en la revista **"Geotechnique"** con el titulo ***"Gas flow through clay barriers"***.

Esta medalla se concede a la mejor contribución en el campo de la Investigación en Geotecnia publicada por el ICE en el año anterior.

Jornada Técnica Anual

Desde el año **2002** la **SEMR** lleva organizando una **Jornada Técnica Anual**, cuya fecha de celebración coincide con el segundo miércoles después de Semana Santa. Tradicionalmente y, gracias a la colaboración del **CEDEX,** esta jornada se realiza en el Salón de Actos de este organismo.

Esta **Jornada Técnica** ha venido teniendo gran acogida entre los técnicos que trabajan en Mecánica de Rocas. La asistencia media suele estar entre 150 y 200 personas, tanto de socios como no socios.

En la página web de la **SEMR** se puede consultar el programa detallado de todas las jornadas que se han celebrado hasta el momento y que han sido:

- **Excavaciones subterráneas en roca**, 23 de abril de 2002.
- **Taludes en roca**, 23 de abril de 2003.
- **Tratamiento de túneles en roca**, 21 de abril de 2004.
- **Reconocimiento y estudio de medios rocosos**, 20 de abril de 2005.
- **Túneles en rocas blandas**, 26 de abril de 2006.
- **Cimentaciones de presas en roca**, 18 de abril de 2007.
- **Túneles en condiciones difíciles**, 2 de abril de 2008.
- **Cálculo de Túneles,** 22 de abril de 2009.

Además, dado el importante avance en el campo de las tuneladoras, se han celebrado dos **Jornadas Extraordinarias** relacionadas con este tema:

- **Tuneladoras en roca,** 16 de marzo de 2006.
- **Experiencias recientes en tuneladoras**, 5 de junio de 2007.

La Jornada técnica de 2010, se celebrará el miércoles 14 de abril, en el salón de actos del **CEDEX** y el tema será:

"ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE GASES".

En esta jornada además de la colaboración habitual del CEDEX se contará con la participación del IGME para la organización de la misma.

Los conferenciantes propuestos son los siguientes:

- D. Darius Fedeyi del BRGM de Francia
- D. Eduardo Alonso, recientemente premiado por su trabajo sobre "Migración de gases en rocas arcillosas", sobre el proyecto de Mont Terri.
- D. Modesto Montoto, Catedrático de la Universidad de Oviedo.
- D. José Pedro Calvo Sorando, Director General del IGME, para presentar el Mapa Nacional de unidades geológicas favorables.

Eventos de interés

- **30 May-1 Junio 2010**, Tenerife, Canary Islands, Spain – **3rd International Workshop on Rock Mechanics and Rock Engineering in Volcanic Environments**: an **ISRM** Specialized Conference.
- **15-18 Junio 2010**, Lausanne, Switzerland – **EUROCK'2010** – Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering: an **ISRM** Regional Symposiuman.
- **25-27 Agosto 2010**, Beijing, China – **5th International Workshop on Rock Stress**: an **ISRM** Specialized Conference.
- **23-27 Octubre 2010**, New Delhi, India. **6th Asian Rock Mechanics Symposium - Advances in Rock Engineering.** The 2010 ISRM-Sponsored International Symposium
- **16-21 Octubre 2011**, Beijing, China – **ISRM 12th International Congress on Rock Mechanics**: The 2011 ISRM International Congress.

3ª Edición del Premio anual de la SEMR

En el año 2004 se creó el ***Premio de la Sociedad Española de Mecánica de Rocas***, con el fin de incentivar a los jóvenes para la investigación en el campo de la mecánica de rocas

Dicho Premio, que tiene carácter bianual, se otorga al trabajo de investigación que se considere que contribuye mejor al progreso del conocimiento en mecánica de rocas y a la innovación científica o tecnológica en este campo. La elección del trabajo premiado la realiza un tribunal que es elegido por la Junta Directiva de la Sociedad.

Se aceptan trabajos de investigación como tesis doctorales, proyectos fin de carrera, tesis de master, trabajos monográficos de investigación realizados en universidades, centros de investigación públicos o en empresas.

Los candidatos deberán tener menos de 36 años en el momento de cerrarse la convocatoria y acreditar haber realizado su trabajo en España.

El Premio consiste en un diploma acreditativo y 3000 euros, y se entrega durante la celebración de la Jornada técnica anual de la Sociedad.

La primera edición del Premio se entregó en el año 2005 y la segunda en el año 2007.

En la **Jornada Anual 2009** se realizó la entrega del **3º Premio de la SEMR**, para jóvenes investigadores a la ingeniera de caminos, canales y puertos **Dª Nuria Pinyol**, por su trabajo realizado sobre ***"Deslizamientos rápidos. Criterios de análisis. El caso de Vaiont".***

A continuación se incluye el resumen completo del trabajo premiado. En la biblioteca de la SEMR se puede consultar el documento en su versión íntegra.

DESLIZAMIENTOS RÁPIDOS. CRITERIOS DE ANÁLISIS. EL CASO DE VAIONT

Núria M. Pinyol
Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Barcelona. UPC

Introducción

El 9 de Octubre de 1963 se produjo un gran deslizamiento en la ladera de la margen izquierda del embalse de Vaiont (Italia). Cuando el embalse se encontraba prácticamente lleno, 280 millones de m^3 deslizaron y alcanzaron una velocidad de más de 100 km/h. El impacto de esta enorme masa contra el agua del embalse produjo una gran ola que saltó por encima de la coronación de la presa bóveda (276 m de altura) y se precipitó sobre varios pueblos del valle del Piave provocando más de 2000 víctimas, la mayoría en el pueblo de Longarone.

A lo largo de los años Vaiont ha sido objeto de estudio por parte de la comunidad científica con el fin de determinar las causas de la gran velocidad del deslizamiento traslacional. Este interés sigue vigente en la actualidad como lo demuestran el número de artículos recientemente publicados (Vardoulakis, 2002; Helmstetter *et al*., 2004; Sitar *et al*., 2005; Veveakis *et al*., 2007). El trabajo presentado aquí se añade a esta lista aportando nuevas ideas y conclusiones prácticas.

Se resume a continuación el estudio realizado. En primer lugar se presenta el caso y la interpretación de los datos disponibles con énfasis en las medidas de auscultación relevantes. Posteriormente se analiza la estabilidad del deslizamiento de Vaiont en dos secciones representativas. Un simple análisis retrospectivo convencional de la rotura indica que es necesario un ángulo de fricción en la superficie de rotura significativamente mayor al posteriormente medido en ensayos de laboratorio y ampliamente aceptado. El análisis presentado incluye la resistencia aportada por los estratos de roca que rompieron durante el deslizamiento. De lo contrario, el deslizamiento no es cinemáticamente admisible. Ello permite explicar la situación de equilibrio previa al llenado del embalse. La limitación de este análisis recae principalmente en la imposibilidad de explicar la gran velocidad alcanzada por el deslizamiento.

A continuación se presenta un análisis que explica la aceleración del deslizamiento basado en el desarrollo de excesos de presión intersticial en la superficie de deslizamiento como consecuencia del calor generado por el propio deslizamiento. Se detallan los procesos termo-hidro-mecánicos que tuvieron lugar en la superficie de rotura y posteriormente se aplican a un deslizamiento plano y a la geometría característica de Vaiont. Los resultados de este análisis muestran que la resistencia friccional pudo prácticamente anularse segundos después de iniciarse el movimiento. La velocidad calculada en la modelización se ajusta a las observaciones *insitu*.

Para el caso del deslizamiento plano y bajo la hipótesis de agua incompresible y medio poroso indeformable se obtiene una solución analítica que permite estimar con relativa facilidad la velocidad del deslizamiento en función del tiempo o espacio recorrido.

Un análisis de sensibilidad permite identificar la propiedad fundamental que desencadena un movimiento acelerado. Las conclusiones extraídas permiten obtener consecuencias prácticas de interés en situaciones similares.

Con el fin de poder aplicar las conclusiones del análisis a un deslizamiento de menor tamaño, más comunes en la naturaleza, se discuten los efectos escala mediante el análisis completo de un deslizamiento con geometría similar a la de Vaiont pero de tamaño menor.

Los principales resultados del análisis se han preparado para ser publicados en artículos de revista titulados: *A criteria for rapid sliding I. A review of Vaiont case* y *Criteria for rapid sliding II. Termo-hydro-mechanical análisis and scale effects in Vaiont case.* La solución analítica de los procesos termo-hidro-mecánicos aplicada a deslizamientos planos ha sido publicada en la revista *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (Pinyol y Alonso, 2009).

El trabajo se ha realizado bajo la supervisión del profesor Eduardo Alonso, catedrático del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Descripción fundamental del Deslizamiento de Vaiont

A finales del año 1960, finalizada la construcción de una presa bóveda de 276 m de altura y con el embalse parcialmente lleno, se observó una grieta perimetral de 2.5 km de longitud y 1 metro de ancho que delimitaba una gran masa de roca inestable que deslizaba hacia el embalse (en dirección Nor-noroeste, Fig. 1). A lo largo de los tres años siguientes, el movimiento fue monitorizado superficialmente. Las flechas a lo largo de la grieta de la Figura 1 indican la dirección del movimiento. La dirección en los contornos laterales (al Este y Oeste) muestran que la masa se alejaba de la roca estable lo que implica que la resistencia friccional en los contornos no tuvo un papel relevante. Por ello un análisis 2D permitirá resultados suficientemente aproximados. Los desplazamientos horizontales están indicados en función de su posición y del tiempo en dos perfiles con dirección Norte-Sur. Estos desplazamientos, prácticamente constantes a lo largo de todo el perfil, son indicativos de un movimiento esencialmente de sólido rígido.

Figure 1. Mapa del deslizamiento de Vaiont. Figura simplificada de Belloni y Stefani (1987) con información adicional de varios autores.

El principal objetivo de la instrumentación instalada fue correlacionar los desplazamientos con el nivel del embalse. La Figura 2 muestra la evolución del desplazamiento y del nivel del embalse. Se midieron

velocidades de 20-30 cm/día en los días previos a la catástrofe ocurrida el 9 de Octubre de 1963. Finalmente $280 \cdot 10^6$ m^3 de masa de roca aceleraron e invadieron el embalse a una velocidad estimada de 30 m/s (110 km/s aproximadamente).

También se instalaron piezómetros en cuatro sondeos (Fig. 1). Ninguno de ellos alcanzó el estrato donde se localizó la superficie de rotura. Por otra parte se trataba de tubos abiertos, lo que en todo caso, impediría una correcta medida en capas impermeables y en concreto en las inmediaciones de la superficie de rotura. Las medidas indican en general que el nivel de agua en la ladera se correspondía con el nivel del embalse con una variación de niveles prácticamente simultánea (excepto uno de los piezómetros que durante el periodo inicial registró mayores presiones). De ello se concluye una alta permeabilidad de la roca situada por encima de la superficie de rotura. Sin embargo, como indican algunas correlaciones, la lluvia y la filtración subterránea debieron influir en la presión que actuaba en la superficie de rotura. Sin embargo, se puede concluir que la subida del nivel del embalse fue el desencadenante de la rotura aunque no se conozca con exactitud la presión alcanzada en la superficie de rotura.

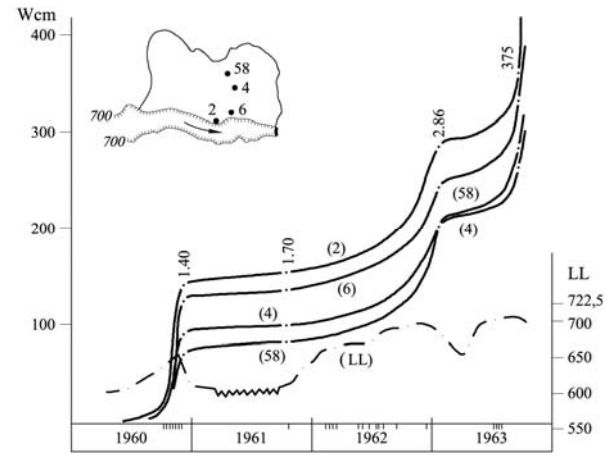


Figure 2. Desplazamientos acumulados en el periodo 1960-1963 y la correlación con el nivel del embalse. En la escala de tiempo se indica los momentos en los que se registraron temblores sísmicos. (de Nonveiller, 1987)

También se midieron velocidades de ondas sísmicas (ondas volumétricas, P) en la parte central del deslizamiento. Se registró un descenso de la velocidad de ondas P que se interpretó como indicador del progresivo deterioro y agrietamiento de la masa de roca debido a la distorsión ocasionada por el movimiento.

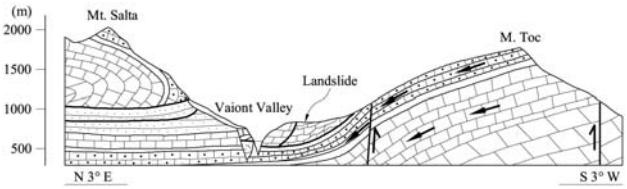


Figure 3. Sección del valle del Río Vaiont. Se indica la antiguo cañón del río y la posición del antiguo deslizamiento (de Semenza and Ghirotti, 2000).

El valle del río Vaiont en la zona de estudio está constituido por estratos de roca que forman un sinclinal de origen Jurásico y Cretácico. La Figura 3 muestra de forma esquemática la geología y geometría del valle. Semenza (2001) en su estudio de la geología del valle concluye que la superficie de rotura había sido sometida a una sucesión de deslizamientos a lo largo de su historia geológica reciente.

La superficie de rotura se localizó en un estrato de arcilla de alta plasticidad con alto contenido en montmorillonita cálcica. Por encima de la superficie de rotura se identificaron capas de margas y calizas finamente estratificadas. Y por debajo, bancos de caliza no afectados por el deslizamiento.

Ensayos de laboratorio publicados por Hendron y Patton (1985) y Tika y Hutchinson (1999) indican que el ángulo de fricción residual movilizado en la superficie de rotura durante el deslizamiento no fue superior a los 12º.

En la Figura 4 se presentan dos secciones representativas (indicadas en planta en la Fig. 1) utilizadas en los cálculos.

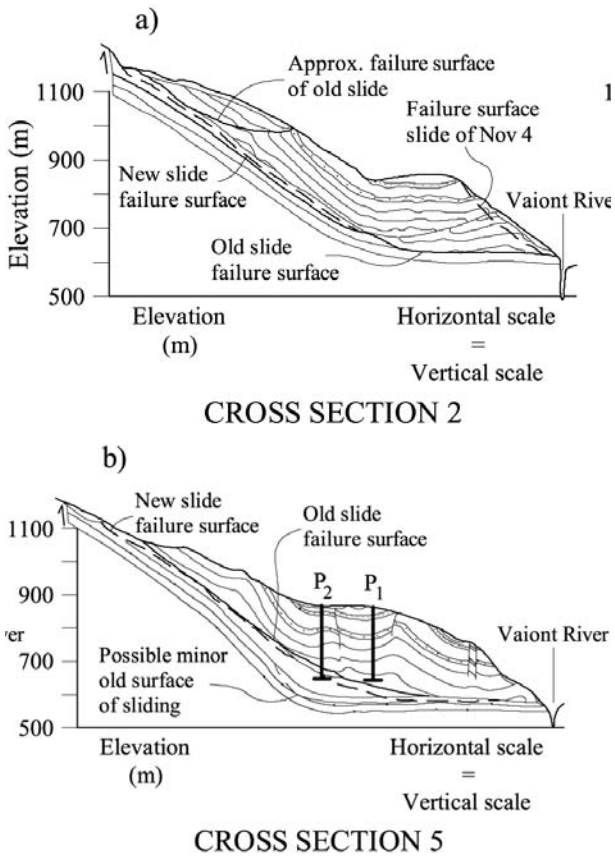


Figure 4. Secciones representativas del deslizamiento. (a) Sección 2 y (b) Sección 5 donde también se indican la posición y longitud de los piezómetros P1 y P2. Su posición en planta de las secciones se indica en la Figura 1 (Hendron y Patton, 1985)

Análisis del deslizamiento

Las dos secciones mostradas en la Figura 4 han sido simplificadas tal y como se indica en la Figura 5. Ambas secciones se pueden describir como dos bloques, uno inferior apoyado sobre una superficie plana horizontal y un segundo bloque superior apoyado sobre una superficie plana inclinada unos 36-37º. La sección puede definirse como dos bloques interactuando: El bloque superior, inestable, y el bloque inferior que actúa resistiendo los

empujes transmitidos por el bloque superior. La interacción en el contacto entre ambos bloques jugará un importante papel en la estabilidad global como se mostrará más adelante.

A falta de datos exactos y de acuerdo a la interpretación de las medidas de los piezómetros y su correlación con el nivel del embalse, se estima la presión de agua actuando sobre la superficie de rotura de acuerdo con un nivel piezométrico horizontal fijado por el nivel del embalse.

La estabilidad del deslizamiento de Vaiont ha sido estudiada por varios autores especialmente en los años posteriores a la rotura (Jaëger, 1965; Nonveiller, 1967; Mencl, 1966; Skempton, 1966; Kenney, 1967). A partir de un análisis de equilibrio límite sin ningún tipo de hipótesis adicional, se obtiene que para la sección 5 el ángulo de fricción necesario en la base del deslizamiento es de 27,9º para una altura de embalse sobre el pie del deslizamiento de 120 m (nivel máximo alcanzado antes de la rotura). Sin embargo, según los datos referenciados anteriormente, el ángulo de fricción disponible en la superficie de rotura no era superior a 12º. Este valor no asegura la estabilidad de la ladera analizada incluso antes de la construcción de la presa. Esta inconsistencia parece indicar que un simple cálculo de equilibrio límite no es suficientemente adecuado para este análisis.

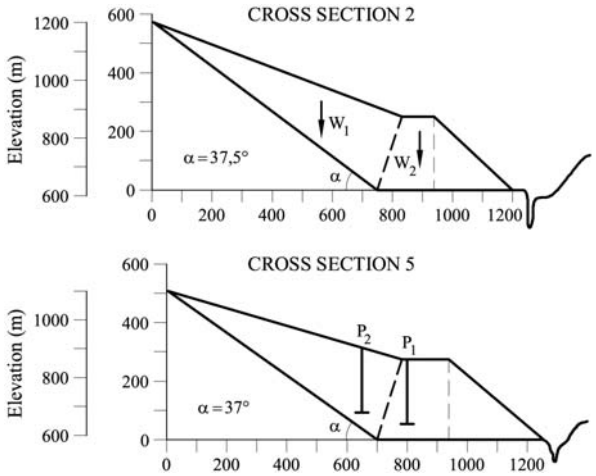


Figure 5. Sección 2 y 5 de Vaiont simplificada usada en los cálculos.

Examinemos la cinemática del deslizamiento (Fig. 6). El bloque superior deslizará en la dirección inclinada de la superficie de rotura ($\mathbf{v_1}$) mientras que el bloque inferior deslizará en dirección horizontal ($\mathbf{v}_2$). Si el movimiento se inicia, ambos bloques se moverán esencialmente a la misma velocidad absoluta ($|\mathbf{v_1}| = |\mathbf{v}_2|$) (esta fue, por otra parte, la información proporcionada por los hitos superficiales). Ello implica que exista una velocidad relativa entre ambos bloques ($\mathbf{v_{12}}$) en la dirección de la bisectriz de la base de cada bloque (plano AB).

El desplazamiento relativo a corte en el plano común AB entre bloques tiene una dirección aproximadamente perpendicular a los planos de sedimentación de las margas y calizas situadas por encima de la superficie de rotura. La resistencia a corte ofrecida por este plano es difícil de estimar pero será apreciable y seguramente influyó en gran medida en la estabilidad de la ladera.

Un punto importante es que la resistencia disponible a lo largo del plano AB probablemente sufrió un proceso de degradación debido al avance del deslizamiento (como refleja la caída de las velocidades de onda medidas antes y después de la aparición de la grieta perimetral). Esta degradación es difícil de cuantificar en términos de la resistencia ofrecida por el plano común AB. Sin embargo puede estimarse que la cohesión disminuye significativamente a medida que la roca va rompiéndose y permite el movimiento del deslizamiento. Típicamente el ángulo de fricción tiende a permanecer constante.

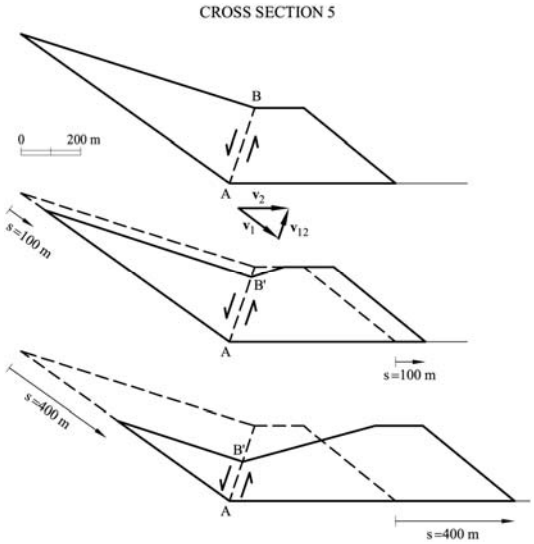


Figure 6. Cinemática del deslizamiento. Sección 5.

Ecuaciones de movimiento

Se ha desarrollado un modelo de cálculo basado en dos bloques interactuando. Las ecuaciones de equilibrio se formulan en condiciones dinámicas y únicamente se incluyen los términos de inercia (sin considerar los efectos viscosos).

Estableciendo:

- las ecuaciones de equilibrio dinámico en la dirección paralela y perpendicular al movimiento de cada uno de los bloques;
- la resistencia a lo larga de la superficie de deslizamiento según la ley de Mohr Coulomb en condiciones residuales ($\tau = \sigma' \tan \varphi_b'$). Donde φ_b' es el ángulo de fricción;
- la resistencia a lo largo del plano AB según la ley de Mohr Coulomb ($\tau = c_r' + \sigma' \tan \varphi_r'$);
- y una ley de evolución de la cohesión para introducir el efecto de la degradación o daño de la roca a lo largo del plano de interacción AB: $c_r' = c_{r0}' \exp(-\Gamma s)$. Donde c_{r0}' es la cohesión inicial y Γ el parámetro de control de la velocidad de degradación de la cohesión con el desplazamiento (*s*);

se puede obtener la siguiente ecuación de movimiento global del deslizamiento:

$$M^* \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = W_1 s_1 - t_1 W_2^* + c_r' AB' t_2 - U_{\mathrm{int}} t_3 + U_1 \tan(\varphi_b') \quad (1)$$

donde M^*, W_1 y W_2^* son funciones de la masa y el peso de cada bloque que varían con el desplazamiento; U_{int} y U_1 son las fuerzas debidas a la presión de agua controlada por el nivel del embalse en el plano AB y en la superficie de rotura base del bloque inferior, respectivamente; y s_1, t_1, t_2 y t_3 son funciones trigonométricas que dependen de la geometría del deslizamiento y de $\tan(\varphi_b')$.

Imponiendo $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = 0$ y para un ángulo de fricción en la base del deslizamiento de 12º, la ecuación (1) ofrece la combinación de c_{r0}' y φ_r' que conduce al equilibrio estricto. Los resultados se indican en la Figura 7 para el nivel del embalse a cota 710 (máximo nivel alcanzado antes de la rotura). La cota 710 corresponde a 120 m de altura respecto al pie del deslizamiento para el caso de la Sección 5.

Finalmente, teniendo en cuenta expresiones empíricas para la resistencia de macizos de roca (Hoek, 2000), se acepta que la resistencia ofrecida por el plano AB se caracteriza por c_{r0}' =770 kPa y φ_r' =38º.

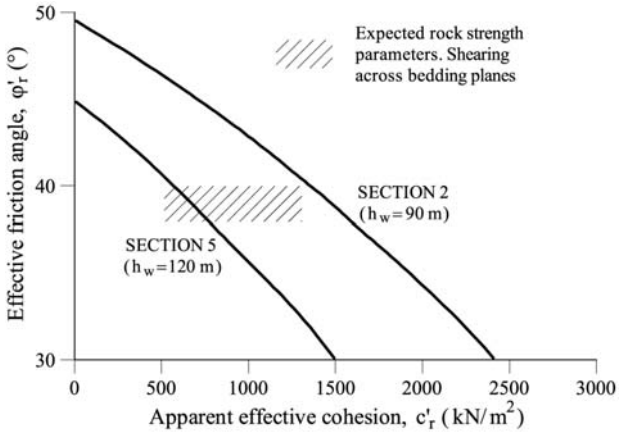


Figure 7. Parámetros resistentes a lo largo del plano AB para equilibrio estricto. Sección 2 y 5. Ángulo de fricción en la superficie de rotura: φ_b' = 12º.

En el caso general, la ecuación (1) describe el movimiento del deslizamiento. La Figura 8 muestra el desplazamiento recorrido y velocidad calculados mediante la integración de la ecuación (1) para la sección 5 y para tres niveles de embalse (h_w) distintos, superiores al nivel correspondiente a la situación de equilibrio estricto (h_w=120 m). Cuanto mayor es el nivel del embalse, más inestable es el deslizamiento (mayor es el área sumergida del pie del deslizamiento). Debido a la transferencia de masa con efecto estabilizador durante el avance del deslizamiento (Fig. 6), éste tiende a desacelerarse hasta detenerse después de recorrer unos pocos centímetros o metros según el nivel del embalse. Podemos ver que la máxima velocidad alcanzada es de unos centímetros por segundo. Sin embargo Vaiont aceleró hasta los 30 m/s al recorrer una distancia de 400 m aproximadamente.

Consideraremos ahora la degradación de la roca movilizada por el deslizamiento cuantificada mediante la reducción de la cohesión. La Figura 9 muestra el desplazamiento y velocidad del deslizamiento calculados para h_w =121 m y Γ = 0.1 y 1. Se observa que al incluir la degradación de la roca, el recorrido y la velocidad máxima alcanzada antes de estabilizarse son mayores. Sin embargo, estos valores siguen siendo significativamente inferiores a los reales y, por otra parte, es difícil de aceptar una degradación tan fuerte de la resistencia en el plano AB (Fig. 6) que se ve cruzado por secciones nuevas de roca del bloquesuperior.

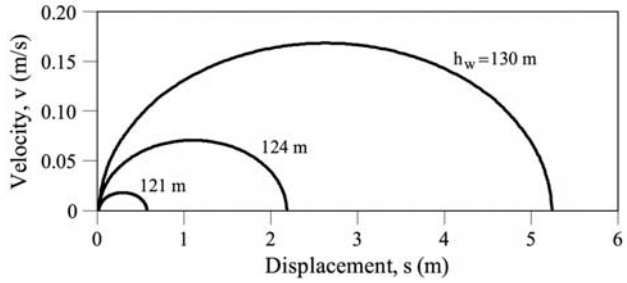


Figure 8. Velocidad y desplazamiento del deslizamiento calculados para tres alturas de nivel de embalse: 121 m, 124 m y 130 m. No degradación de la roca (Γ = 0).

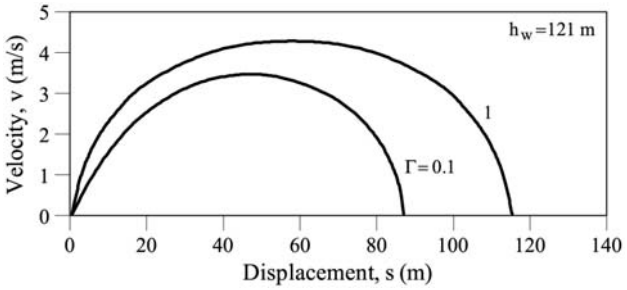


Figure 9. Velocidad y desplazamiento del deslizamiento para una altura de embalse h_w = 121 m. Efecto de la degradación de la roca (Γ = 0.1 and Γ = 1).

La gran aceleración alcanzada por el deslizamiento de Vaiont escapa de las posibilidades del modelo desarrollado en este apartado. El siguiente análisis se centra en los procesos que pudieron conducir a la fuerte aceleración del deslizamiento. El desarrollo presentado hasta ahora ha permitido obtener de manera fiable los parámetros resistentes fundamentales necesarios para los cálculos posteriores.

Procesos termo-hidro-mecánicos

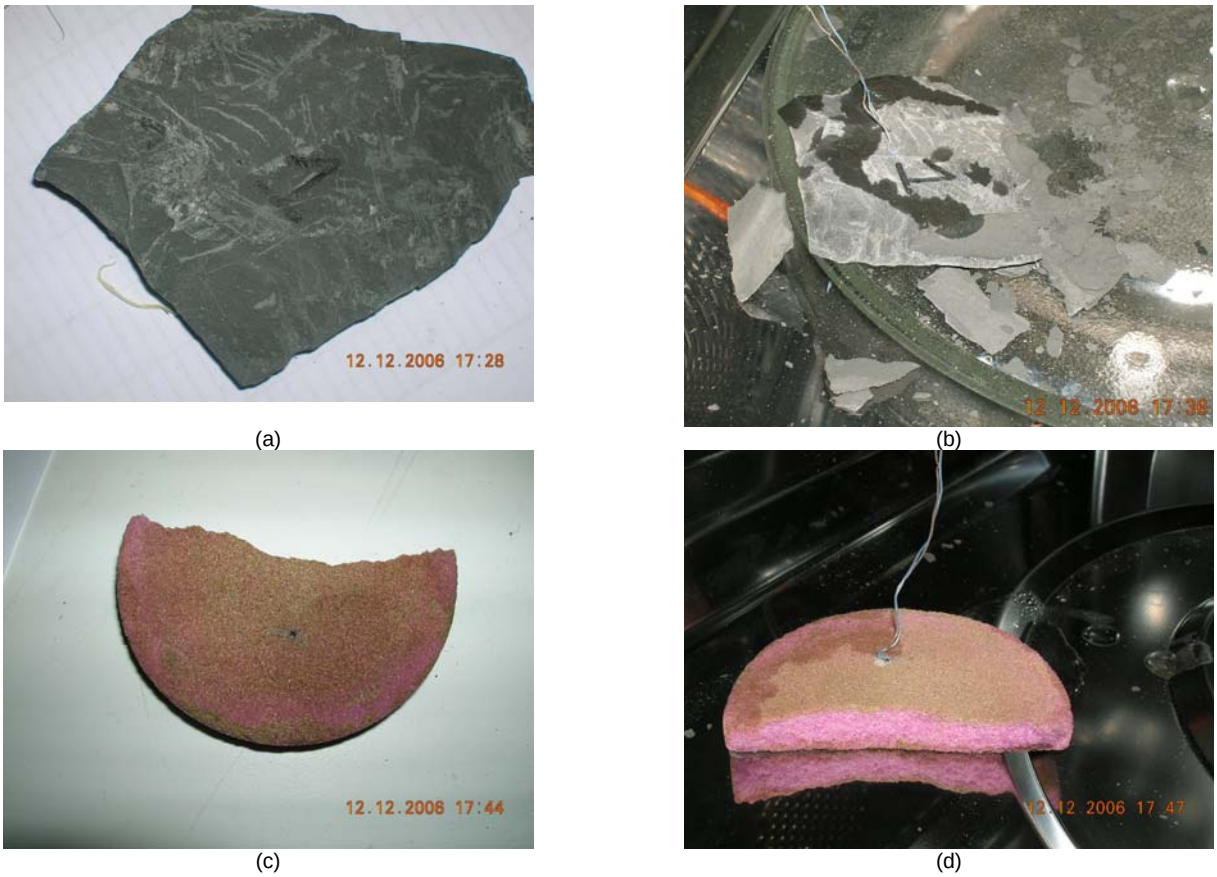
La explicación más generalizada de la gran velocidad alcanzada por el deslizamiento de Vaiont es la generación de presión de agua en la banda de corte de la superficie de rotura debido al calor generado por el propio deslizamiento. De esta manera se reduce la resistencia al corte en la superficie de rotura (Uriel y Molina, 1977; Nonveiller, 1987; Hendron y Patton, 1985; Voigt y Faust, 1982; Vardoulakis, 2002).

Se realizaron dos ensayos de laboratorio para mostrar el efecto del calor sobre la presión de agua en un medio poroso. Dos tipos de roca (una roca arcillosa blanda de baja permeabilidad, 10^{-13} m/s, y una piedra porosa de laboratorio) se sometieron a un pulso de calor en el interior de un horno-microondas y se midió la temperatura en el interior de las rocas. Ambas estaban saturadas. Las Figuras 10a y b muestran la roca arcillosa

antes y después del pulso de calor. El fragmento de roca se rompió en pedazos durante el calentamiento en el que se alcanzó una temperatura máxima de 170 ºC. En el caso de la piedra porosa, ésta se mantuvo intacta (Fig. 10b y c).

Este simple ensayo permite una discusión interesante. El calor dilata el agua y el suelo. El agua, con mayor coeficiente de expansión térmica, genera, al hinchar, una presión de poros que tiende a disipar por flujo. Si la roca es suficientemente permeable, como es el caso de la piedra porosa, la disipación de la presión es casi inmediata. Si la permeabilidad no es suficiente, la presión de agua se acumula pudiendo superar la resistencia de la roca, como ocurrió en la roca arcillosa.

En el caso de un deslizamiento, la generación de calor proviene de la transformación en energía térmica del trabajo friccional desarrollado en la banda de corte de la superficie de deslizamiento (primera ley de la termodinámica). La acumulación de calor permite la dilatación del agua que bajo condiciones concretas puede inducir una acumulación de presión de agua suficientemente alta como para reducir la resistencia de forma significativa y producir la aceleración del deslizamiento.



(a) (b) (c) (d)

Figura 10. Experimentos de calentamiento. (a) Fragmento de la roca Opalinus (roca arcillosa blanda) saturada antes del ensayo de calentamiento; (b) Fragmento de roca Opalinus después del ensayo; (c) Fragmento de piedra porosa saturada antes del ensayo de calentamiento; (d) Fragmento de piedra porosa después del ensayo. Se puede observar el termopar con el que se registró la temperatura.

Se ha desarrollado un procedimiento de cálculo para describir matemáticamente este fenómeno basado en:

- la primera ley de la termodinámica
- las ecuaciones de balance de masa de sólido y de agua
- la ecuación del balance de calor
- las ecuaciones constitutivas del agua, sólido y medio poroso
- la ecuación del movimiento
- las leyes de resistencia (según el criterio de Morh-Coulomb)

Estas ecuaciones permiten modelar la generación de presión de agua en la banda de corte y su disipación, la evolución de la temperatura, aceleración, velocidad y desplazamiento del deslizamiento.

El sistema de ecuaciones se ha resuelto por diferencias finitas mediante un programa en código Fortran desarrollado específicamente para el caso de deslizamiento plano y para la geometría de Vaiont (Sección 5).

Se han adoptado las siguientes hipótesis:

- Los fenómenos termo-hidro-mecánicos que tienen lugar en la banda de corte se han modelado de forma unidimensional en la dirección perpendicular a la banda de corte teniendo en cuenta la extensión en planta de la superficie de deslizamiento y el pequeño espesor de la banda.
- Debido a la rapidez del deslizamiento (duró unos pocos segundos según testimonios) no se han incluido el flujo convectivo y advectivo del calor.

La Tabla 1 muestra los parámetros introducidos en los cálculos. Los parámetros de la arcilla donde se localiza la superficie de rotura se han obtenido a partir de las referencias bibliográficas citadas anteriormente.

Uno de los parámetros relevantes es el espesor de la banda de corte (*e*) donde se localizan las deformaciones

de corte. No existen datos concluyentes de este valor para el deslizamiento de Vaiont. Autores como Morgenstern y Tchalenko (1967), Roscoe (1970), Vardoulakis (1980), Scarpelli y Wood (1982) y Desrues (1984) han publicado valores de espesores de bandas de corte. Una conclusión importante de estos trabajos de investigación es que el espesor de la banda está relacionado con el tamaño de grano característico. Vardoulakis (2002) propone un valor de $e \approx 200 d_{50\%}$ (donde $d_{50\%}$ es el tamaño de grano correspondiente al 50% en la distribución acumulada de tamaños). Para el caso de Vaiont esta relación llevaría a un espesor de unos 2 mm.

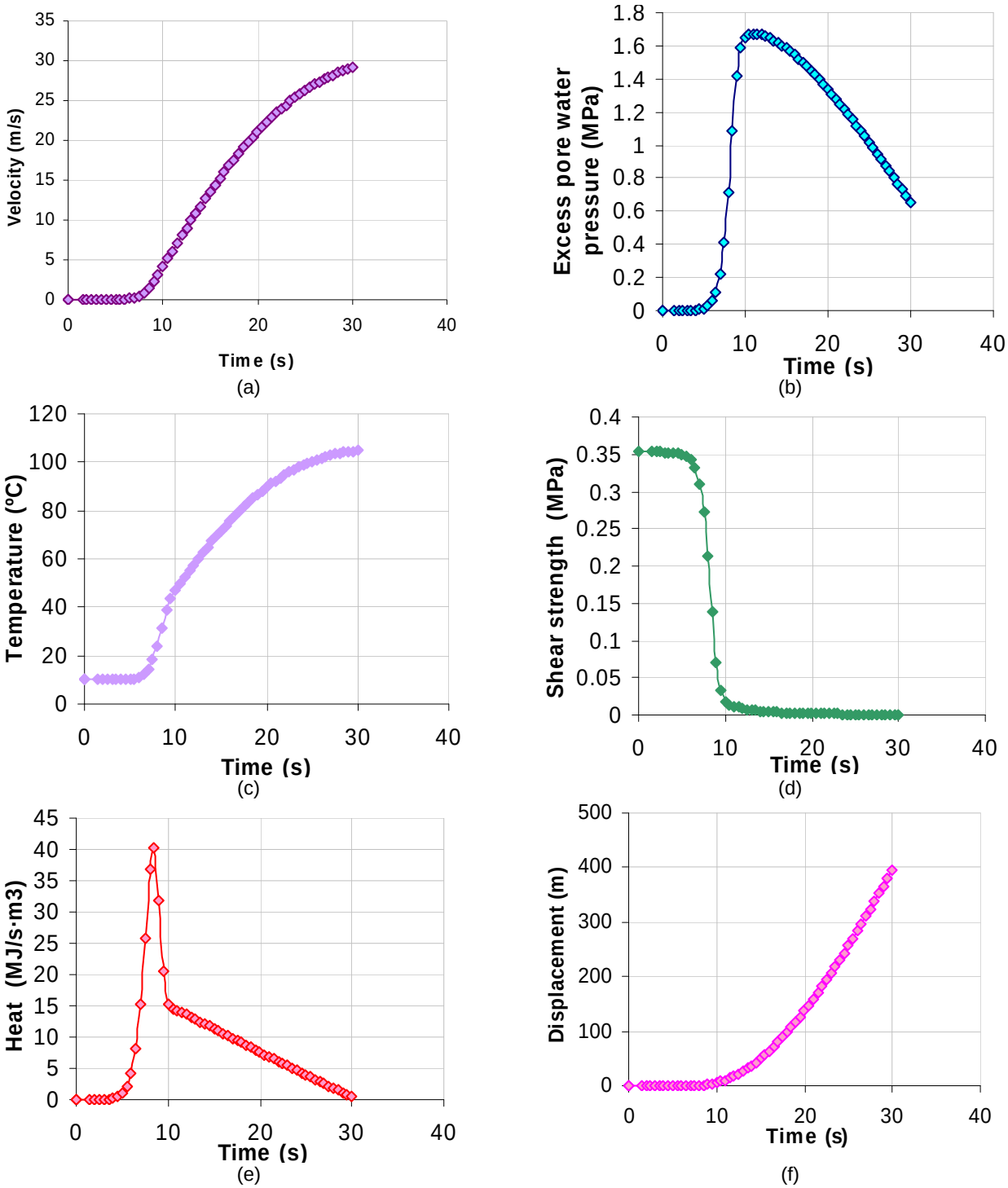


Figure 11. Análisis dinámico de la Sección 5. Evolución en el tiempo de: a) Velocidad; b) Exceso de presión de poros en el centro de la banda de corte bajo el bloque superior; c) Temperatura bajo el bloque superior; d) Resistencia de corte bajo el bloque superior; e) Calor generado en la banda de corte bajo el bloque superior; f) Desplazamiento del deslizamiento.

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Parámetros	Símbol	Valor	Unidad
Agua			
Densidad	ρ_w	1000	kg/m^3
Coeficiente de compresibilidad	α_w	$5\cdot10^{-10}$	1/Pa
Coeficiente de expansión térmica	β_w	$3.42\cdot10^{-4}$	1/ºC
Calor especifico	c_w	$4.186\cdot10^{3}$ 1.0	J/kg·ºC cal/ kg·ºC
Partículas sólidas			
Densidad	ρ_s	2700	kg/m^3
Coeficiente de expansión térmica	β_s	$3\cdot10^{-5}$	1/ºC
Calor específico	c_s	$8.372\cdot10^{2}$ 0.20	J/kg·ºC cal/ kg·ºC
Material de la banda de corte			
Porosidad	n	0.2	-
Permeabilidad	k	$1\cdot10^{-11}$	m/s
Coeficiente de compresibilidad	m_v	$1.5\cdot10^{-9}$	1/Pa
Ángulo de fricción (residual)	ϕ'	12	º
Material deslizado			
Densidad	ρ_r	2350	kg/m^3

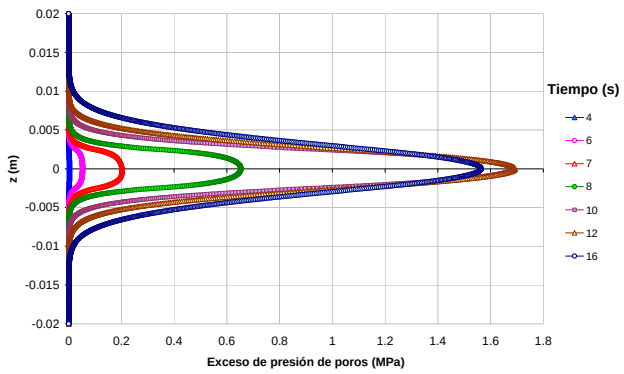


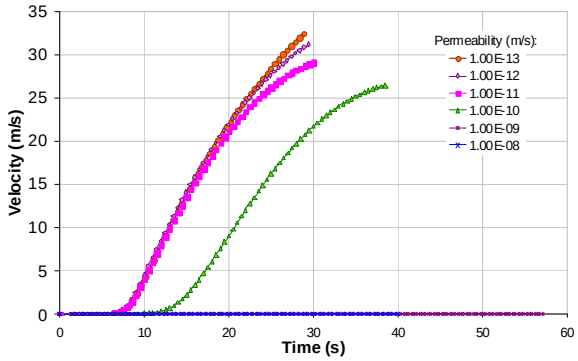
Figura 12. Exceso de presión de poros a lo largo de un corte perpendicular a la superficie de rotura por debajo del bloque superior. Espesor de la banda de corte 5mm.

La Figura 11 muestra los resultados obtenidos para la Sección 5 y para un recorrido de 400 m. Partiendo del equilibrio estricto, se ha desestabilizado el deslizamiento con un incremento del nivel del embalse de 10 cm. Se ha considerado un espesor de la banda de corte de 5 mm (posteriormente se incluye un análisis de sensibilidad). Observamos que el procedimiento de cálculo presentado permite alcanzar los 30 m/s en pocos segundo como indican las observaciones *insitu*. La aceleración del deslizamiento no es lineal. A medida que avanza, se acumula presión de agua (Fig. 10b) en la banda de corte debido al calor generado (Fig. 10e). Cuanto mayor es la velocidad, mayor es el trabajo friccional (igual a la resistencia de corte por la velocidad) que se transforma en calor y mayor el exceso de presión generado. El incremento de la presión intersticial induce la reducción de la resistencia de corte que induce la aceleración del deslizamiento. Esta aceleración, a su vez, implica un incremento de la velocidad que conduce a un incremento adicional de calor. De este modo el proceso se autoalimenta. Sin embargo la presión alcanza un máximo. Este descenso de la velocidad es debido a que cuando la resistencia de corte es prácticamente nula, aunque la velocidad sea alta, el trabajo friccional que se transforma en calor se reduce y desciende la presión de agua generada. Por otro lado, las fuerzas desestabilizadoras también se reducen con el avance del deslizamiento (debido al efecto estabilizador de la transferencia de masa desde el bloque superior al inferior) lo que contribuye a la desaceleración del movimiento.

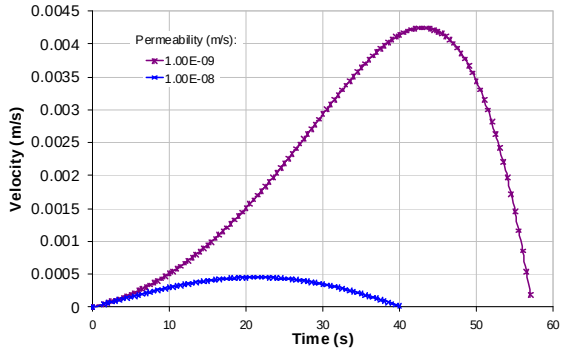
La Figura 12 muestra la evolución temporal del exceso de presión de poros a lo largo de un perfil perpendicular a la superficie de rotura por debajo del bloque superior. La presión se disipa hacia el exterior de la banda.

Análisis de sensibilidad

Los ensayos de calentamiento descritos anteriormente destacan el importante papel de la permeabilidad en los procesos termo-hidro-mecánicos aquí descritos. Se ha examinado el efecto de la permeabilidad del estrato de arcilla donde se localiza la superficie de rotura. En la Figura 13 y 14 se muestra la evolución temporal de la velocidad y el exceso de presión de poros alcanzados en 400 m de recorrido para distintas permeabilidades.



(a)



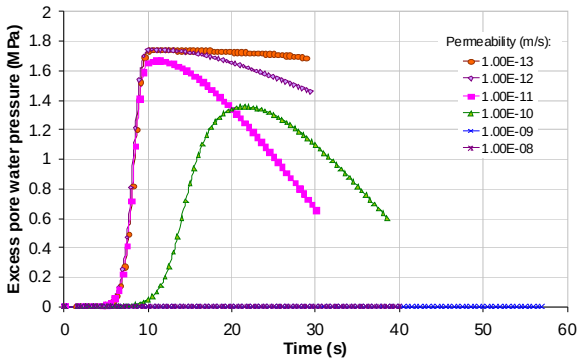
(b)

Figura 13.Efecto de la permeabilidad de la capa donde se localiza la superficie de rotura en la velocidad del deslizamiento. Recorrido máximo: 400 m. Sección 5.

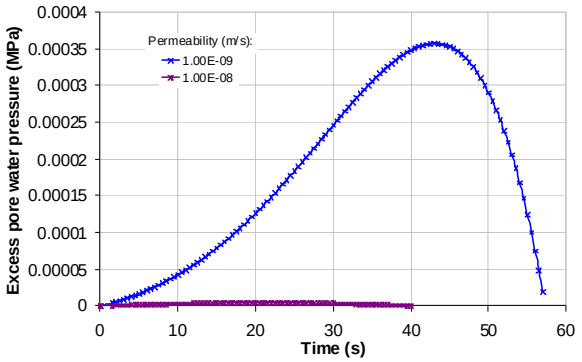
De los resultados se obtiene que en la medida en que la permeabilidad sea suficientemente baja como para permitir la disipación del exceso de presión intersticial inducido por la generación de calor, no se produce la reducción de la resistencia al corte ni la aceleración del

deslizamiento. Se observa que para permeabilidades superiores a 10^{-9} m/s (Fig. 13b y 14b) el exceso de presión acumulado se reduce significativamente. Al desaparecer el efecto de la generación de presión de agua, el deslizamiento se detiene a los pocos segundos por imponerse el efecto estabilizador de la geometría del deslizamiento. La respuesta en estos casos es similar a la obtenida sin considerar el efecto del calor.

En los resultados presentados anteriormente se ha fijado el valor del espesor de la banda de corte (5 mm). Sin embargo, la permeabilidad está relacionada con el tamaño de grano del material que a su vez determina el



(a)



(b)

Figura 14. Efecto de la permeabilidad de la capa donde se localiza la banda de corte en el exceso de presión del interior de la banda de corte. Recorrido máximo: 400 m. Sección 5.

espesor de la banda de corte. La Figura 15 indica la velocidad máxima alcanzada en 400 m de deslizamiento para diferentes valores de la permeabilidad y de espesor de la banda de corte. La línea negra continua une los valores más probables. Permeabilidades altas corresponderán a espesores grandes y viceversa. De nuevo se obtiene que existe un umbral de permeabilidad absoluta (de 10^{-9}-10^{-8} m/s) por debajo del cual se producen deslizamientos rápidos debido a la acumulación de presión de agua. Por encima de este umbral, tal efecto desaparece, al disiparse la presión por flujo.

Se ha analizado el efecto de la compresibilidad del medio poroso. Sin embargo, dentro del rango habitual de valores (10^{-1} MPa, material blando y 10^{-3} MPa, material duro) no se ha observado un efecto relevante.

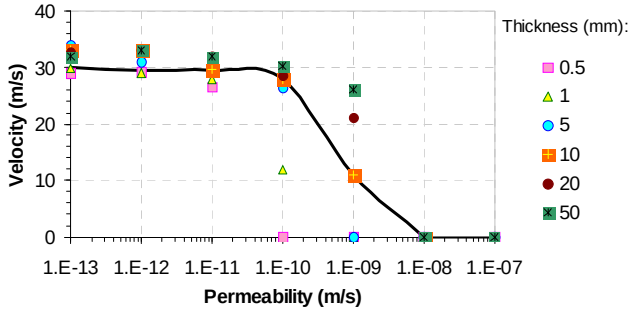


Figura 15. Velocidades máximas alcanzadas en un recorrido máximo de 400 m. Efecto de la permeabilidad y espesor de la banda de corte.

Efecto escala

En los deslizamientos habitualmente presentes en la naturaleza o en obras de ingeniería, el volumen movilizado es significativamente inferior al caso de Vaiont. Con el fin de extrapolar las conclusiones obtenidas y acotar los efectos escala, se ha estudiado el caso de un deslizamiento con la misma geometría de Vaiont y los mismos parámetros pero 100 veces más pequeño. Los resultados se muestran en la Figura 16. En este caso, debido a la reducción de tamaño, se ha considerado oportuno reducir también el recorrido del deslizamiento a 50 m. Se observa que la evolución de las variables es cualitativamente igual que en el caso de Vaiont. El calor generado y en consecuencia, el exceso de presión inducido se reducen en un orden de magnitud debido a que la resistencia al corte en la superficie de rotura, proporcional al peso, se reduce. Sin embargo, la aceleración del deslizamiento es del mismo orden de magnitud. De hecho, la velocidad máxima alcanzada es de unos 10 m/s, inferior a los 30 m/s, por haber fijado un recorrido máximo de 50 m y no de 400 m como en el caso de Vaiont. Aunque el calor generado y el exceso de presión son menores, son suficientes para reducir la resistencia al corte, también menor, a valores cercanos a cero y, por consiguiente, la aceleración del deslizamiento se mantiene.

La Figura 17 muestra el efecto de la permeabilidad en la velocidad de deslizamiento y en la Figura 18 se incluye el efecto del espesor de la banda de corte. De nuevo se llega a la misma conclusión. En deslizamientos con superficies de rotura localizadas en materiales de permeabilidades por debajo de 10^{-9} m/s, las presiones generadas son máximas y por consiguiente la velocidad es alta. Por encima de k=10^{-8} m/s, la disipación anula los efectos térmicos.

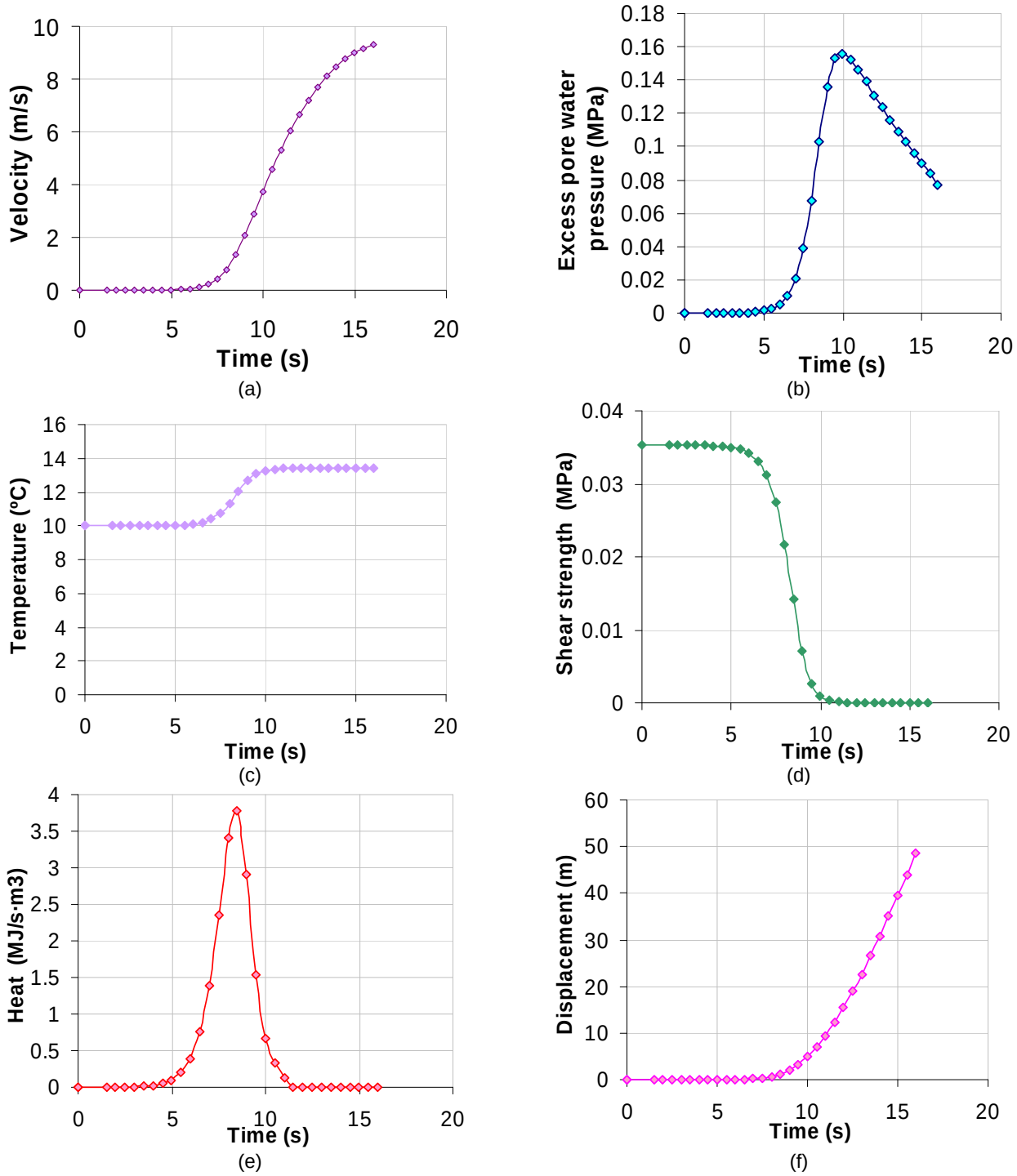
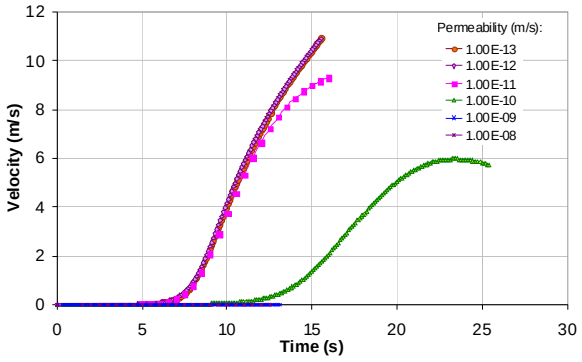
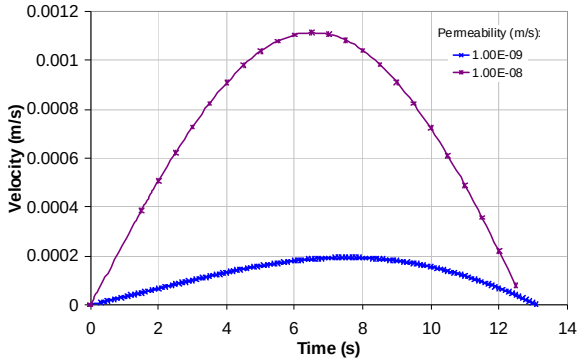


Figure 16.Vaiont reducido (100 veces menor en volumen). Análisis dinámico de la Sección 5. Evolución en el tiempo de: a) Velocidad; b) Exceso de presión de poros en el centro de la banda de corte bajo el bloque superior; c) Temperatura bajo el bloque superior; d) Resistencia de corte bajo el bloque superior; e) Calor generado en la banda bajo el bloque superior; f) Desplazamiento del deslizamiento.



(a)



(b)

Figura 17. Vaiont reducido (100 veces menor en volumen). Efecto de la permeabilidad de la capa donde se localiza la superficie de rotura en la velocidad del deslizamiento. Sección 5. Recorrido máximo 50 m.

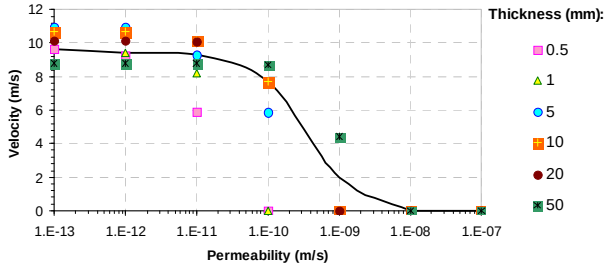


Figura 18. Vaiont reducido (100 veces menor en volumen). Velocidades máximas alcanzadas en un recorrido máximo 400 m. Efecto de la permeabilidad y espesor de la banda de corte.

Conclusiones

En el deslizamiento de Vaiont un gran volumen de roca deslizó sobre una superficie de rotura previamente movilizada (condiciones residuales) localizada en un estrato de arcilla de alta plasticidad y baja permeabilidad. El deslizamiento, desestabilizado por el ascenso del nivel del embalse, alcanzó los 30 m/s en unos 400 metros de recorrido aproximadamente. La estabilidad de la ladera, incluso antes de la construcción de la presa, únicamente puede explicarse si se incluye la resistencia ofrecida por la masa de roca deslizada. El análisis de estabilidad presentado permite calcular los parámetros resistentes fundamentales de la rotura de Vaiont.

La gran aceleración del deslizamiento ha sido modelada mediante un análisis termo-hidro-mecánico. Se concluye que la geometría del deslizamiento y la resistencia en la superficie de corte no son suficientes para explicar el movimiento acelerado en Vaiont. Son necesarios tres parámetros adicionales característicos de la banda de corte: el espesor, la permeabilidad y la rigidez. Un análisis de sensibilidad ha permitido determinar como parámetro fundamental la permeabilidad de la banda de corta (que incluye información aproximada del espesor de la banda). Existe un umbral de permeabilidades (10^{-9}m/s-10^{-8}m/s) por debajo del cual se generan presiones intersticiales máximas en la banda de corte, inducidas por el calor generado por el propio deslizamiento. Por encima de este umbral, la disipación anula los efectos del calor y no son esperables deslizamientos rápidos.

El tamaño del deslizamiento no afecta significativamente a la magnitud de su aceleración inducida por el calor generado en la banda de corte. Por ello pueden alcanzarse velocidades altas incluso en deslizamiento relativamente pequeños. Pero la distancia a recorrer antes de que se modifique apreciablemente la geometría del movimiento, su tipología u otros factores es más pequeña. Ello reduce en la práctica la velocidad alcanzable y su peligrosidad.

Referencias

Desrues, J. (1984) Sur l'application de la stéréophotogrammétrie à la mesure des grandes déformations. *Revue Française de Mécanique* (3): 55–63.

Helmstetter, A., D. Sornette, J.-R. Grasso, J.V. Andersen, S. Gluzman, & V. Pisarenko (2004), Slider block friction model for landslides: Application to Vaiont and La Clapière landslides, *J. Geophys. Res.*, 109, B02409, doi:10.1029/2002JB002160.

Hendron, A.J. & F.D. Patton (1985) The Vaiont slide, a geotechnical analysis basedon new geologic observations of the failure surface. *Technical Report GL-85-5*. Department of the Army US Army Corps of Engineers, Washington, DC.

Hoek, E. (2007) Practical Rock Engineering http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp.

Jaeger, C. (1965). The Vaiont rockslide. Part I. *Water Power*. March, pp. 110-111.

Jaeger, C. (1965). The Vaiont rockslide. Part II. *Water Power*. April, pp. 142-144.

Kenney, T.C. (1967). Stability of the Vajont valley slope, discussion of a paper by L. Müller (1964) on the rock slide in the Vajont valley. Rock Mechanics and Engr. Geol., Journal of the Int. Soc. Rock Mechanics. Vol. 5, 10-16. Vardoulakis, I. (2002) Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrofic landslides. *Géotechnique* 52(3): 157-171.

Mencl, V. (1966). Mechanics of landslides with non-circular slip surfaces with special reference to the Vaiont Slide. *Géotechnique*, 19, No. 4, 329-337.

Morgenstern N.R. & J.S. Tchalenko (1967) Microstructural observations of shear zones from slips in natural clays. *Proceedings Geotechnical Conference,* 147-152, Oslo

Nonveiller, E. (1987) The Vajont reservoir slope failure. Engineering Geology, 24, 493-512.

Pinyol, N.M. & E.E. Alonso (2009) Fast planar slides. A closed-form thermo-hydro-mechanical solution. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. DOI: 10.1002/nag.795

Roscoe, K.H. (1970) The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique* 20:129–170.

Scarpelli, G. & D.M. Wood (1982) Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests. *Proceedings of the IUTAM Conference on Def. Fail. Gran. Media*, Balkema: 473–484.

Sitar,N.; M.M. MacLaughlin, &D .M. Doolin (2005) Influence of Kinematics on Landslide Mobility and Failure Mode. *J. Geotech. and Geoenvir. Engrg*. 131, (6), pp. 716-728

Skempton, A.W. (1966) Bedding-plane slip, residual strength and the Vaiont landslide. Correspondence to *Géotechnique,* Vol. 16, No. 2, 82-84

Tika, Th. E. & J.N. Hutchinson (1999) *Ring shear tests on soil from the Vaiont slide slip surface*. Géotechnique, 49, No. 1, 59-74

Uriel Romero, S. & R. Molina (1977) Kinematic aspects of Vaiont slide. *Proceedings of the 3rd International Conference of the ISRMR*, Denver, 2B: 865-870

Vardoulakis, I. (1980) Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 4:103–119.

Vardoulakis, I. (2002) Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrofic landslides. *Géotechnique* 52(3): 157-171.

Veveakis, E., I. Vardoulakis & G. Di Toro (2007), Thermoporomechanics of creeping landslides: The 1963 Vaiont slide, northern Italy, *J. Geophys. Res.*, 112, F03026, doi:10.1029/2006JF000702.

Voigt, B. & C. Faust (1982) Frictional heat and strength loss in some rapid ladslides. *Géotechnique* 32(1): 43-54.

Enlaces de interés

INTERNACIONALES

FedIGS *– Federation of the International Geo-engineering Societies*
IAEG – International Association for Engineering Geology and the Environment
ICOLD *– International Commission on Large Dams*
IGS *– International Geosynthetics Society*
ISSMGE *– International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*
ITA *– International Tunnelling Association*
IUGS *– International Union of Geological Sciences*
SPE *– Society of Petroleum Engineers*
ISRM*- International Society for Rock Mechanics*

NACIONALES

CEDEX
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas
Colegio Oficial de Geólogos
*Asociación Española de Empresas de Ingeniería del Suelo y Subsuelo (**AETESS**)*
*Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (**AETOS**)*
*Asociación Española de Empresas de Ingeniería (**TECNIBERIA/ASINCE**)*
Sociedad Española de Mecánica de Suelos
Asociación Española de Ingeniería Sísmica
Comité Español de Grandes Presas

Ser Socio de la SEMR

¿Qué supone ser socio de la SEMR?

La **cuota de inscripción** a la *Sociedad* es de **25 euros por año**, que deben ser abonados mediante domiciliación bancaria. Esta cuota da derecho a:

- Asistencia **gratuita** a la **Jornada Técnica** anual de la ***SEMR***, y obtención de la documentación que se entregue
- Tomar parte en las Asambleas Generales y en las votaciones estatutarias.
- Poder ser elegidos por cualquier cargo de la *Sociedad* de acuerdo con los presentes Estatutos.
- Recibir información de la *Sociedad* y participar en ella.
- Elevar a la *Junta Directiva*, las propuestas que tiendan a un mejor logro de los fines de la *Sociedad*.
- Pertenecer a la ***ISRM*** como miembro de la *Sociedad Española*. Esto da derecho a más información en la página de la ***ISRM:*** ***www.isrm.net:***

    - Copia del ***ISRM News Journal*** y de la ***ISRM Newsletter.***
    - Acceso al área para miembros de la ***web*** (en la que se pueden descargar Informes, los"*Suggested Methods*", participar en Foros de discusión, etc.)
    - Participar en Comisiones y grupos de interés de la ***ISRM***.
    - Descuentos en ***Congresos*** de la ***ISRM*** o patrocinados por ella.
    - Descuentos en la suscripción de algunas revistas (*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Journal Rock Mechanics and Rock Engineering*).

La solicitud de ingreso se puede enviar a través de la página web ***(www.semr.es),*** por correo electrónico (semr@cedex.es) o postal (C/ Alfonso XII 3, 28014 Madrid).

Próximas elecciones SEMR

Estimad@ Soci@:

El mandato de la Junta Directiva actual de la SEMR llega a su fin, al estar próximo a cumplirse ya los 4 años para los que fue elegida, en enero de 2006. Por tanto, de acuerdo con los Estatutos de nuestra Sociedad deben convocarse unas nuevas elecciones para proceder a la renovación de la Junta.

Como sabes, en la Sociedad existen actualmente 6 grupos de trabajo, a uno de los cuales cada socio debe adscribirse.

Estos grupos son los siguientes:
a) Investigación y docencia.
b) Estudios geológicos. Reconocimientos y ensayos geomecánicos.
c) Proyectos, modelización, auscultación e instrumentación.
d) Tratamiento de mejora y refuerzo del terreno.
e) Procesos constructivos de infraestructura.
f) Minería, almacenamiento y voladuras.

La Junta Directiva saliente acordó en su última reunión que el número de vocales a elegir para la próxima Junta sea de 3 por cada grupo, excepto para el grupo a), que serán 4.

También se acordó convocar la próxima Asamblea de socios para el 21 de enero de 2010, y a continuación una Asamblea extraordinaria para proceder a la elección de los vocales que formarán parte de la nueva Junta Directiva de nuestra Sociedad. La convocatoria de dichas Asambleas será enviada más adelante.

En el artículo 20 de nuestros Estatutos se indica lo siguiente: “Cada socio podrá votar a tantos candidatos de la agrupación técnica a la que él pertenece como número de vocales haya asignado la Junta Directiva saliente a dicha agrupación. La propuesta de candidatos se efectuará a través de la Junta saliente”.

Con el objeto de facilitar el proceso electoral y de realizar la propuesta de candidatos, te envío este correo para comunicarte que si estás interesado en ser “candidato elegible” para la próxima Junta Directiva, como vocal representante del grupo técnico al que desees estar adscrito, te ruego nos lo hagas saber mediante un correo electrónico a la dirección de la Sociedad (semr@cedex.es) antes del próximo 15 de diciembre. En la última reunión mantenida por la Junta Directiva saliente se decidió proponer como candidatos a todos aquellos que se postulen.Para poder votar debes estar adscrito a uno de los grupos de trabajo. Adjunto se envía una lista de socios, indicando el grupo de trabajo al que se encuentra cada uno adscrito. Te ruego que en el caso de no estar adscrito aún a un grupo o si deseas cambiar me lo comuniques lo antes posible, así como cualquier incorrección que pueda haber.

Agradeciéndote tu colaboración, recibe un cordial saludo,

Áurea Perucho
Secretaria de la SEMR

Entidades y Empresas Colaboradoras

acciona
Pioneros en desarrollo y sostenibilidad

ACS
ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN Y SERVICIOS

AETESS
ASOCIACION DE EMPRESAS DE LA TECNOLOGIA DEL SUELO Y SUBSUELO

CEDEX
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

eptisa

euroestudios
Ingenieros de consulta

FCC
FOMENTO DE CONSTRUCCIONES Y CONTRATAS, S.A.

ferrovial

GEOBRUGG

GEOCISA

GC
GEOCONSULT
Ingenieros Consultores, S.A.

GEOCONTROL

ISOLUX CORSÁN

ifc
IFC Cimentaciones Especiales, S.A.

IBERINSA
IBÉRICA DE ESTUDIOS E INGENIERÍA, S.A.

iiC
GRUPO EP

in situ TESTING S.L.

Intecsa-Inarsa

KELLERTERRA

KRONSA

PAYMACOTAS

prointec

RODIO

Site

TERRA BAUER

GRUPO
TERRATEST

TECINSA
TÉCNICOS EN ESTABILIZACIONES E INYECCIONES, S.A.

GrupoTYPSA