

Diseño geotécnico de taludes

Análisis mediante modelos numéricos

Javier Vallejos

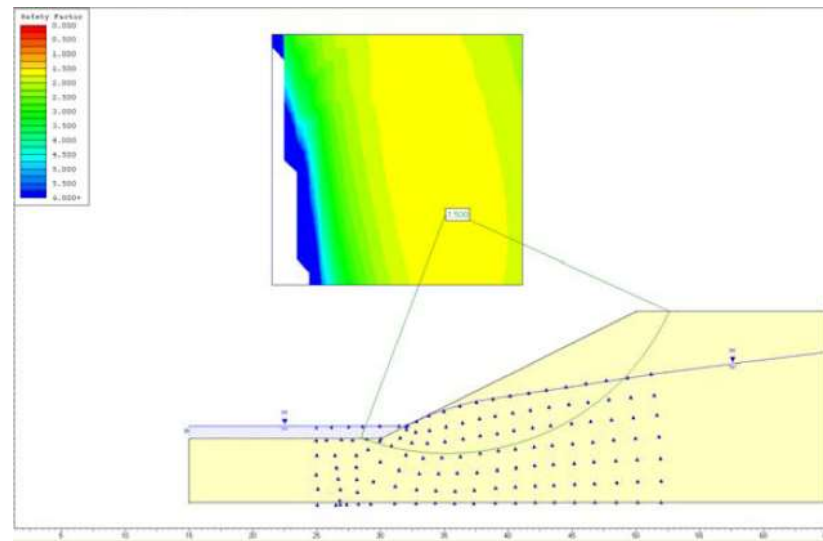
Octubre 2024

Métodos de análisis

Equilibrio limite

- Asume una superficie de falla arbitraria (circular, planar, combinación) y se establecen las condiciones de equilibrio. El criterio de falla es válido en toda la superficie
- Establece equilibrio global de los bloques de roca entre la superficie de falla y las condiciones de borde
- No considera la distribución interna de esfuerzos dentro de los bloques de roca

Ejemplo: Método de las dovelas

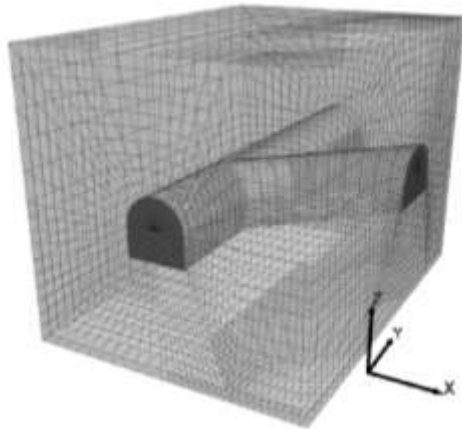


Métodos de análisis

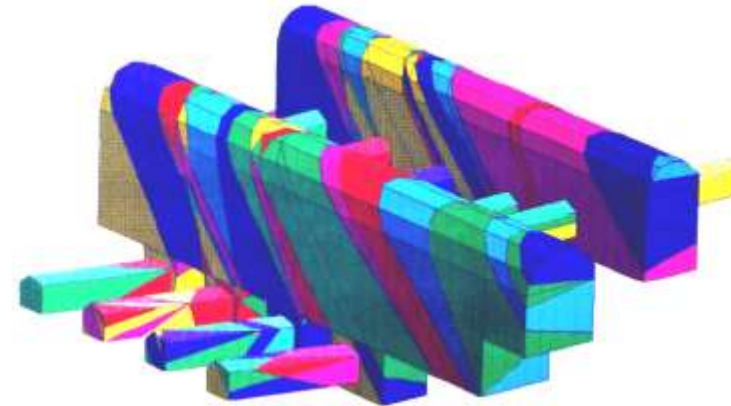
Modelamiento numérico

- Puede ser aplicado a cualquier geometría
- No asume mecanismo/superficie de falla
- Necesario especificar: geometría, parámetros macizo rocoso, secuencia, condiciones de borde
- El comportamiento del macizo rocoso es analizado mediante la visualización de parámetros significativos como desplazamientos, deformación de corte, velocidad etc.

Ejemplos:



Continuo (elementos finitos, diferencias finitas, ...)



Discontinuo (elementos distintos, elementos discretos, ...)

Modelos numéricos

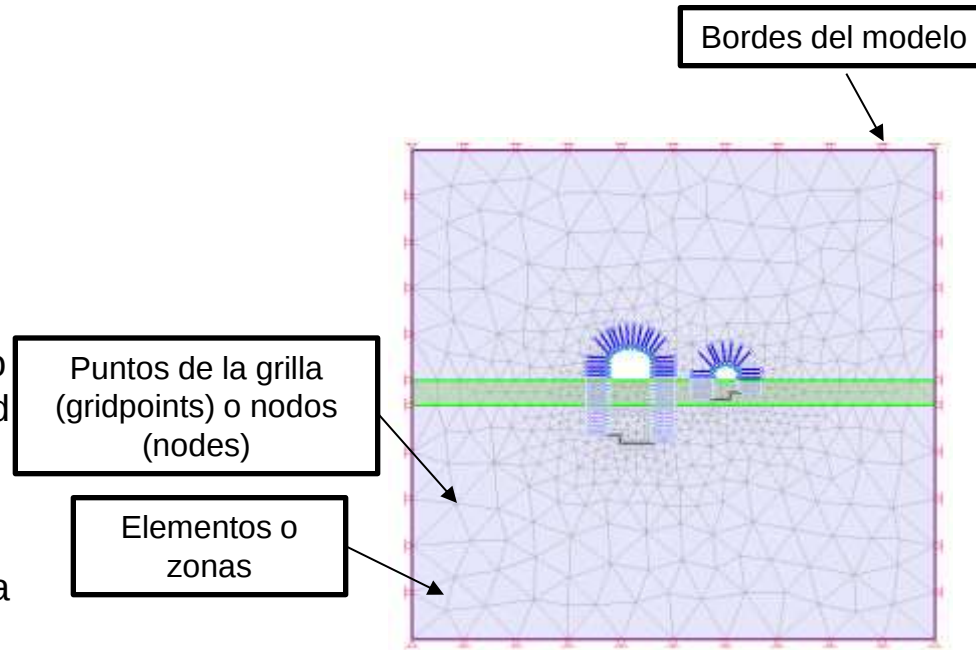
Comparación de métodos de modelamiento numérico y equilibrio limite (Wyllie and Mah, 2004)

<i>Analysis result</i>	<i>Numerical solution</i>	<i>Limit equilibrium</i>
Equilibrium	Satisfied everywhere	Satisfied only for specific objects, such as slices
Stresses	Computed everywhere using field equations	Computed approximately on certain surfaces
Deformation	Part of the solution	Not considered
Failure	Yield condition satisfied everywhere; slide surfaces develop “automatically” as conditions dictate	Failure allowed only on certain pre-defined surfaces; no check on yield condition elsewhere
Kinematics	The “mechanisms” that develop satisfy kinematic constraints	A single kinematic condition is specified according to the particular geologic conditions

Modelamiento numérico

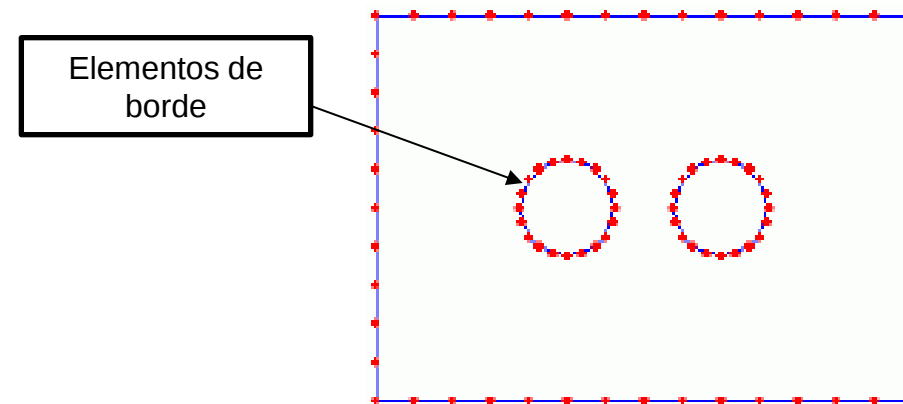
Métodos diferenciales

- Elementos finitos/diferencias finitas, elementos distintos
- El dominio debe ser definido y discretizado
- Ventajas: puede acomodar heterogeneidad y no-linealidad
- Borde del modelo se definen arbitrariamente
- Desventajas: eficiencia computacional baja a media



Métodos integrales

- Elementos de borde
- Solo los bordes del problema son definidos y discretizados. Los bordes pueden ser la superficie de excavaciones, o terreno, fallas, etc.
- Ventajas: Computacionalmente eficiente
- Desventajas: Es más eficiente en modelos homogéneos y elásticos



Modelamiento numérico

Software disponibles

Comparison of commercially available continuum codes (modified from Lorig 1999a)

	Continuum Codes								
	<i>FLAC</i>	<i>FLAC^{3D}</i>	<i>PLAXIS</i>	<i>ADINA</i>	<i>ABAQUS</i>	<i>PHASE²</i>	<i>MAP3D</i>	<i>EXAMINE^{3D}</i>	<i>BEFE</i>
Formulation	Finite differences (<i>FDM</i>)		Finite elements (<i>FEM</i>)				Boundary element (<i>BEM</i>)		<i>BEM</i> + <i>FEM</i>
Dimensions	Two	Three	Two and Three			Two	Three		Two and Three
Interfaces	YES								
Water pressure in interfaces	YES		(?)	YES		NO	(?)	NO	
Water pressure in rock mass	YES					NO	YES	NO	
Inelastic material models	Mohr-Coulomb Hoek-Brown Ubiquitous joints Strain softening Creep		Mohr-Coulomb Strain softening Creep	Mohr-Coulomb Ubiquitous joints Strain softening Creep		Mohr-Coulomb Hoek-Brown	(?)	NO	Mohr-Coulomb Ubiquitous joints Strain softening Creep
Ability to customize constitutive relations	YES		NO	YES		NO			
Time-domain dynamic analysis	YES					NO			

FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group, USA (www.hcitasca.com).

FLAC^{3D}: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Itasca Consulting Group, USA (www.hcitasca.com).

PLAXIS: Plasticity Axisymmetry, PLAXIS BV, Netherlands (www.plaxis.nl).

ADINA: Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, ADINA R & D, Inc. USA (www.adina.com).

ABAQUS: Superior Finite Element Analysis Solutions, ABAQUS, Inc., USA (www.abaqus.com).

*PHASE*²: Finite Element Analysis and Support Design for Excavations, Rocscience 2002, Canada (www.rocscience.com).

MAP3D: Is a fully Three-Dimensional Boundary Element Program, Mine Modelling Pty Ltd, Australia (www.map3d.com).

EXAMINE^{3D}: Three-dimensional Stress Analysis and Data Visualization for Underground Excavations in Rock, Rocscience 2002, Canada (www.rocscience.com).

BEFE: Boundary Element and Finite Element, Computer Software & Services, Austria (members.chello.at/sylvia.beer).

Modelamiento numérico

Software disponibles

Comparison of commercially available discontinuum codes (modified from Lorig 1999a)

	Discontinuum Codes			
	<i>BSM</i>	<i>DDA</i>	<i>UDEC</i>	<i>3DEC</i>
Formulation	Stiffness matrix	Minimization of potential energy	Distinct elements	Distinct elements
Dimensions	Three	Two		Three
Block deformability	Rigid	Rigid / Deformable		
Block geometry	Convex only	Unrestricted (?)	Unrestricted	Convex only (concave formed by joining convex blocks)
Water pressure in interfaces	NO		YES	
Water pressure in rock mass	NO		YES	
Time-domain dynamic analysis	NO		YES	

BSM: Block Spring Model, CANMET Canada (www.nrcan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mines/control/photos/pages/bsm3dbig.jpg.htm)
DDA: Discontinuous Deformation Analysis, Gen Hua Shi, USA (www.ce.berkeley.edu/Programs/Geoengineering/research/DDA)
UDEC: Universal Distinct Element Method, Itasca Consulting Group, USA (www.hcitasca.com)
3DEC: Three-dimensional Distinct Element Code, Itasca Consulting Group, USA (www.hcitasca.com)

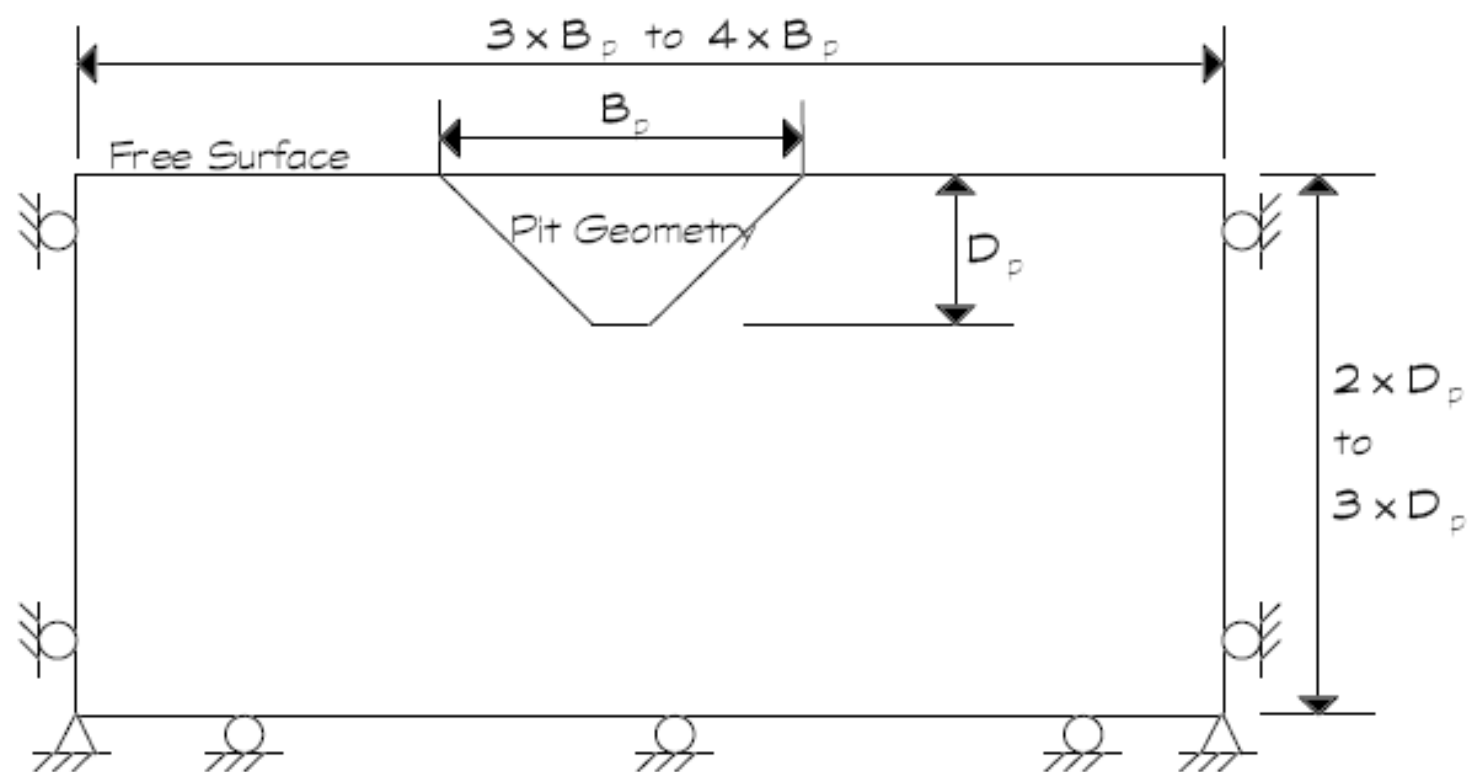
Métodos diferenciales

Requerimientos comunes

- Tamaño del modelo – distancia a los bordes
- Condiciones iniciales y de borde – esfuerzos, restricciones
- Parámetros del material – elástico, parámetros de resistencia
- Densidad de la grilla – tamaño de las zonas/elemento, gradación

Métodos diferenciales

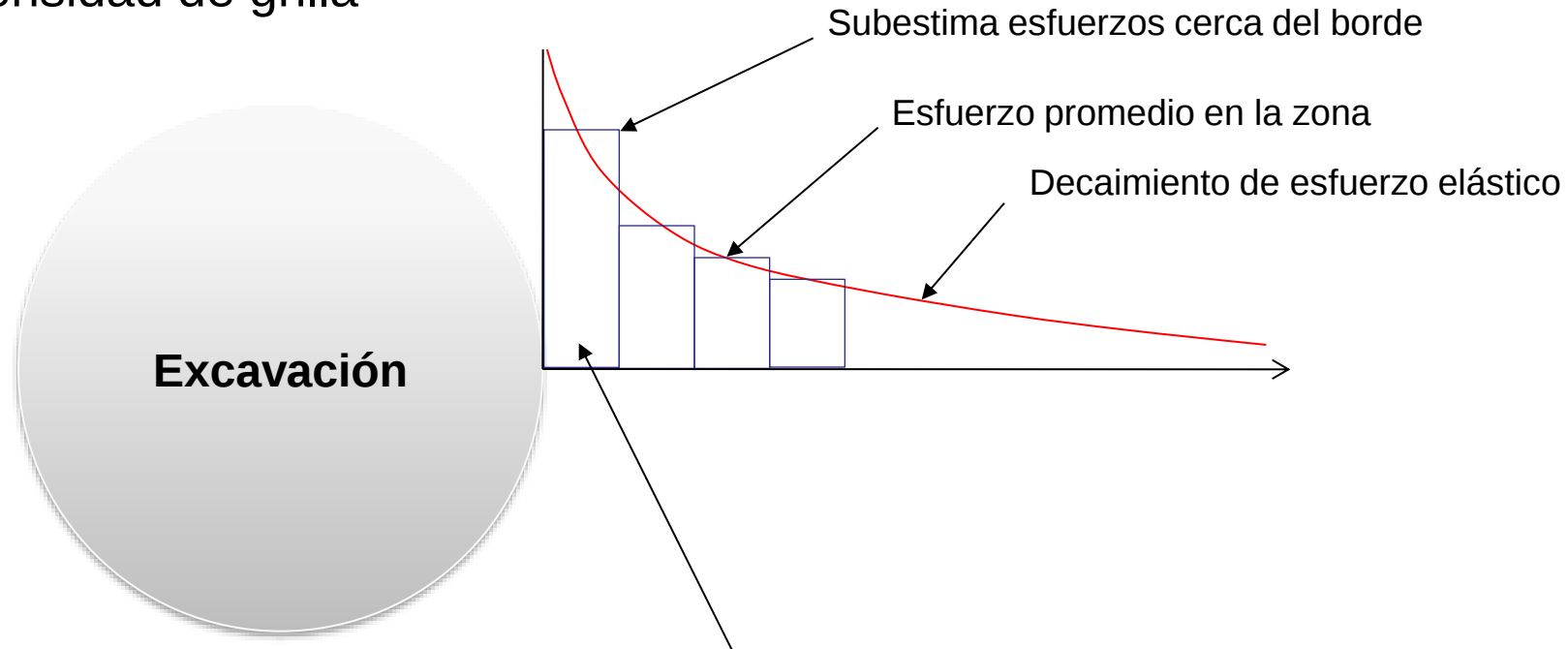
Tamaño



Tamaño de modelo requerido para minimizar la influencia de bordes artificiales en un rajo
(Sjöberg, 1999)

Métodos diferenciales

Densidad de grilla

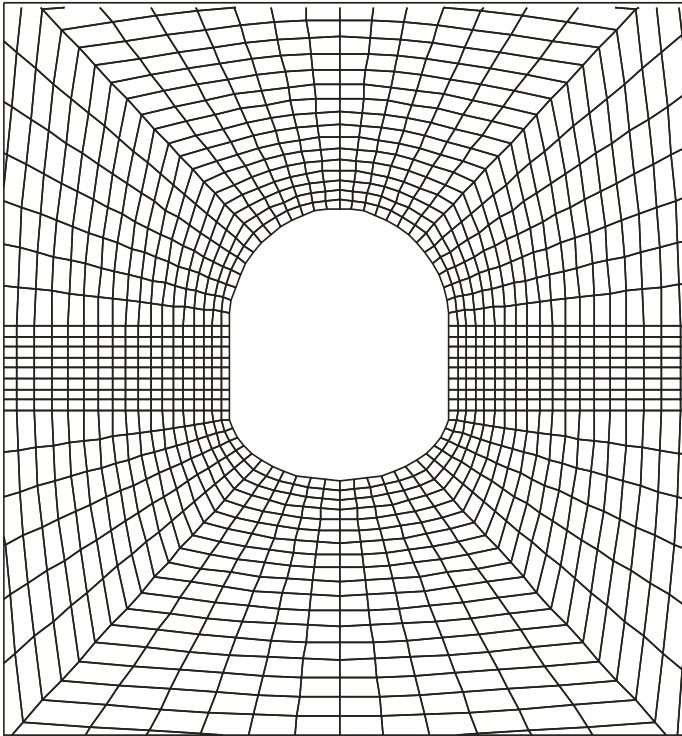


- Discretización gruesa cerca del borde de la excavación puede resultar en una subestimación del esfuerzo. Esto puede conllevar a una subestimación de la extensión de falla
- Se debe utilizar una discretización fina cerca de los bordes de las excavaciones, o donde se esperan gradientes de esfuerzos significativos

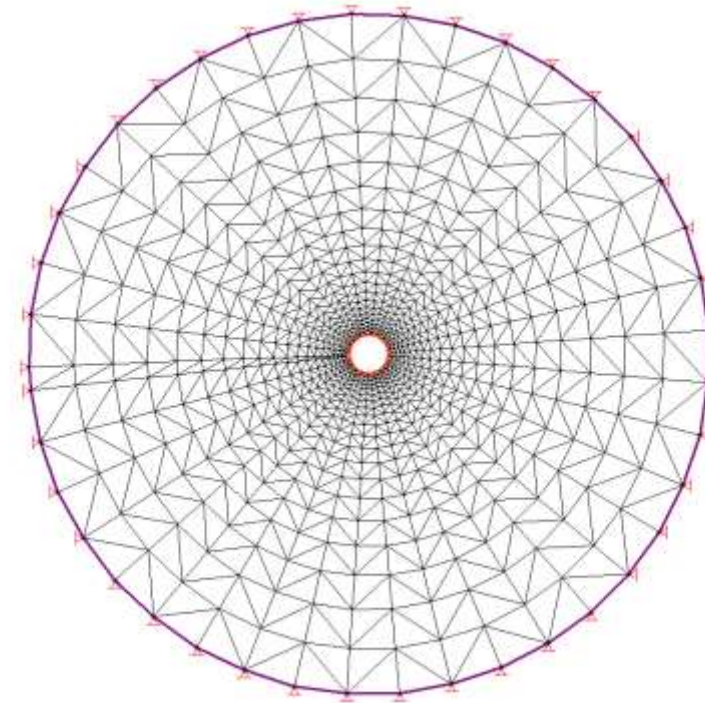
Métodos diferenciales

Densidad de grilla

FLAC



Phase²

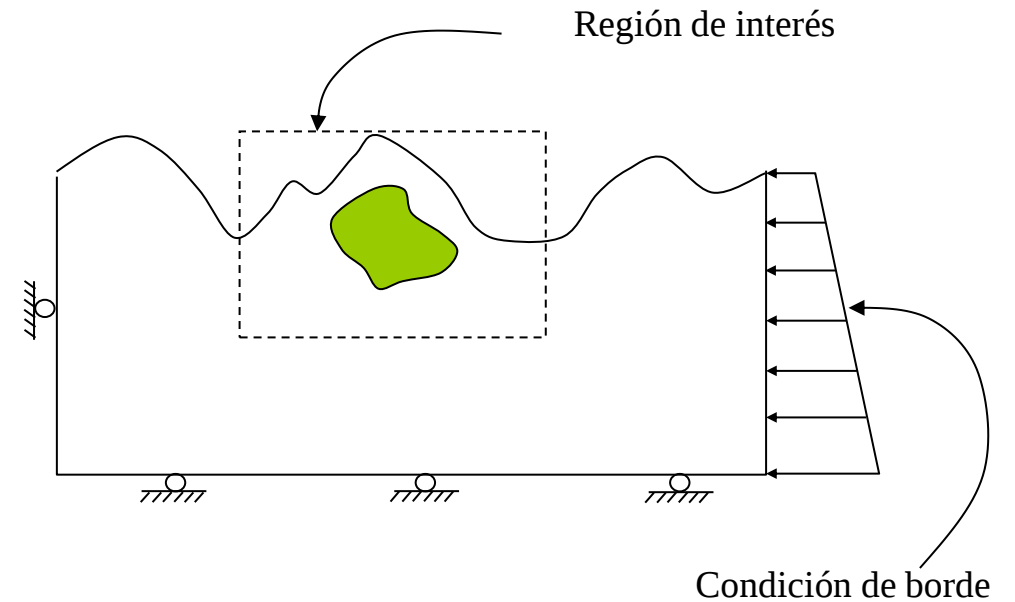


Ejemplo de la variación de densidad de zonas/elementos alrededor de un túnel.
El tamaño de las zonas/elementos aumenta al alejarse del borde el túnel

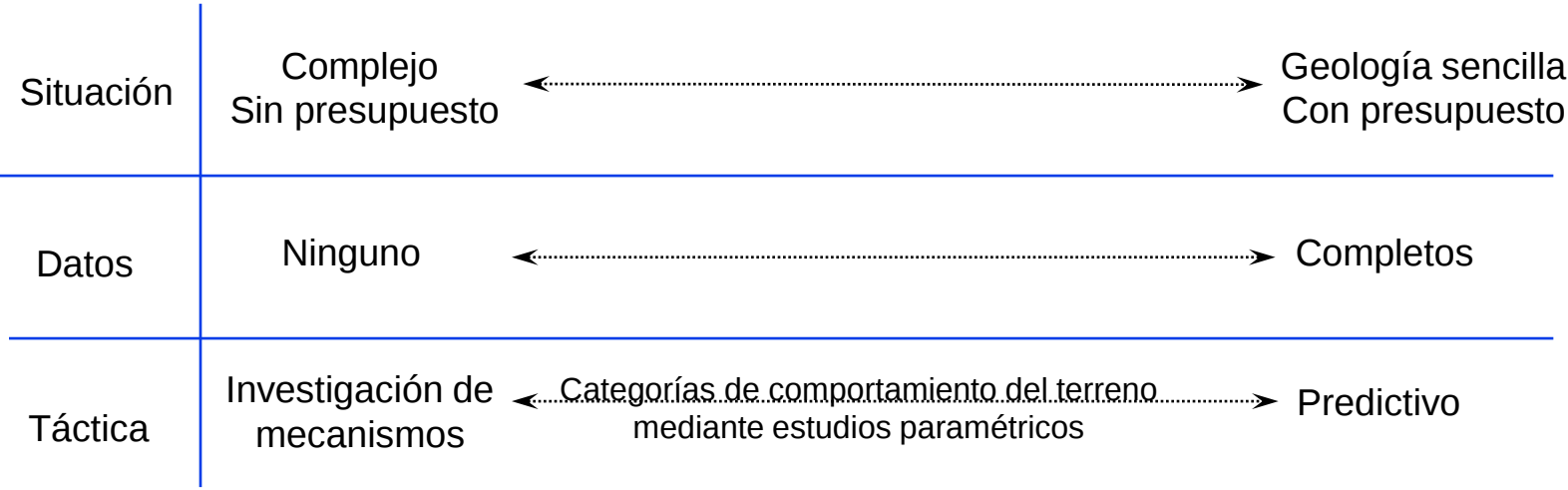
Métodos diferenciales

Condiciones de borde

- Los modelos numéricos en los que el dominio es discretizado tienen tamaño finito, por lo que los bordes del modelo deben ser reducidos en algún momento en comparación con el sistema real
- Se deben aplicar condiciones en los bordes de manera que el interior del modelo crea que aún es parte del sistema real extendido
- El tipo de condición de borde se escoge de manera de representar las condiciones físicas del campo lejano de la mejor manera
 - Esto puede ser realizado de varias maneras



Metodología para el modelamiento



La manera en que los modelos numéricos son utilizados dependen fuertemente en la disponibilidad de datos de entrada confiables, la habilidad de calibrar el modelo, y la credibilidad de los resultados.

Macizo rocoso-Hoek and Brown

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

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

$\sigma_{crm} = \sigma_c s^a$: Resistencia a la compresión uniaxial macizo rocoso

GSI : Geological Strength Index

D : factor de perturbación (daño por tronadura y relajación de esfuerzos)

0: macizo rocoso no perturbado

1: macizo rocoso muy perturbado

Zona perturbada

- Para aplicar el factor D:
 - Se debe escoger un valor adecuado
 - Definir la extensión de la zona perturbada
- El factor D **NO** se debe aplicar a todo el macizo rocoso alrededor de la excavación. Solo debe ser aplicado a la zona perturbada.

(Hoek, 2012)

Zona perturbada-escala de bancos

Guías para evaluar el parámetro <i>D</i> en el caso de taludes		
Condición	Descripción	<i>D</i>
	Tronaduras pequeñas en taludes de obras civiles inducen poco daño en el macizo rocoso, especialmente si se usan tronaduras controladas para minimizar el daño, como se muestra en la fotografía. Sin embargo, siempre se produce algún grado de perturbación debido al desconfinamiento del macizo rocoso.	0,7 Buena tronadura
		1,0 Mala tronadura

Hoek et al. (2002)

Zona perturbada-escala de bancos

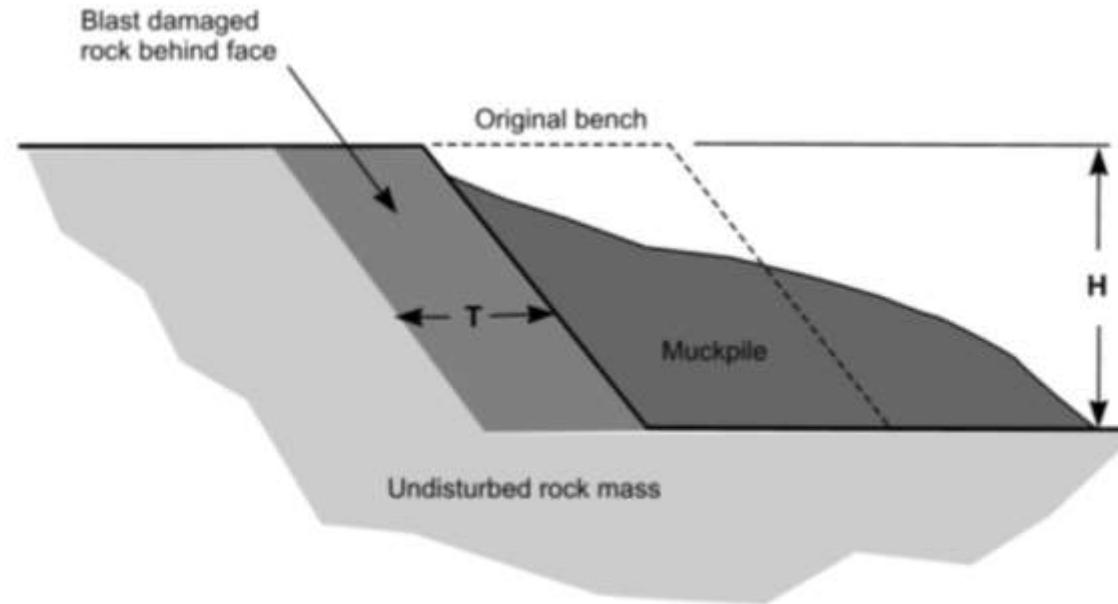


Figure 4: Diagrammatic representation of the transition between the in situ rock mass and blasted rock that is suitable for digging.

- Large production blast, confined and with little or no control $T = 2 \text{ to } 2.5 H$
- Production blast with no control but blasting to a free face $T = 1 \text{ to } 1.5 H$
- Production blast, confined but with some control, e.g. one or more buffer rows $T = 1 \text{ to } 1.2 H$
- Production blast with some control, e.g. one or more buffer rows, and blasting to a free face $T = 0.5 \text{ to } 1 H$
- Carefully controlled production blast with a free face $T = 0.3 \text{ to } 0.5 H$

(Hoek, 2012)

Zona perturbada-escala global

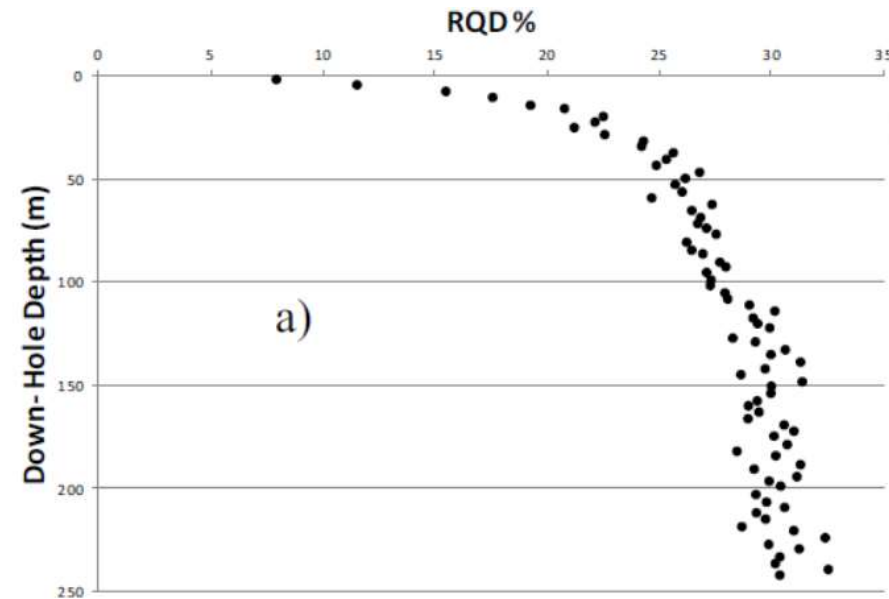
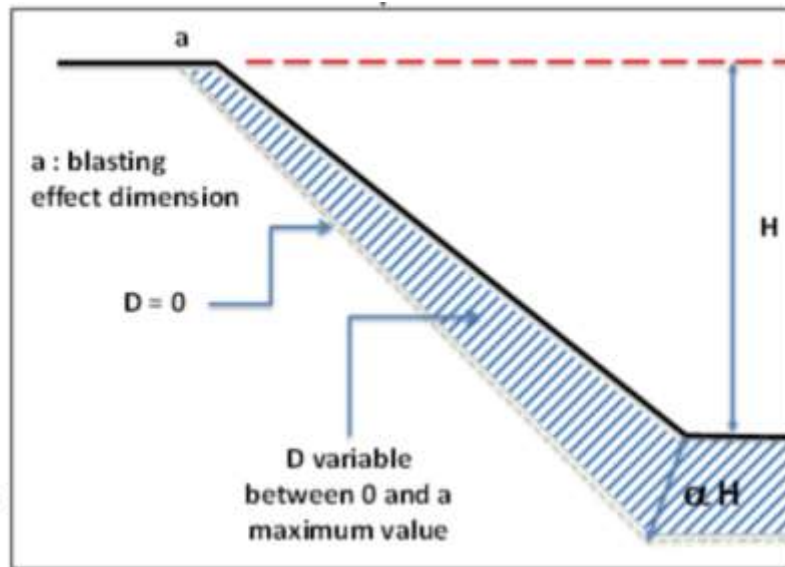
Guías para evaluar el parámetro D en el caso de taludes		
Condición	Descripción	D
	Los taludes mineros en rajos profundos sufren daños importantes debido a las tronaduras de producción, como también al desconfinamiento asociado al desarrollo del rajo.	1,0 Tronadura de producción
	En el caso de algunas rocas blandas la excavación puede hacerse sin tronaduras (e.g.: con bulldozer), lo que reduce significativamente el daño inducido en el macizo rocoso.	0,7 Excavación mecánica

Hoek et al. (2002)

La tabla sugiere que el 70% de la perturbación es generada por el desconfinamiento y 30% por el daño por tronadura

Zona perturbada-escala global

- Modelo conceptual



(Silva and Gomez, 2015)

Zona perturbada-escala global

- Modelo conceptual

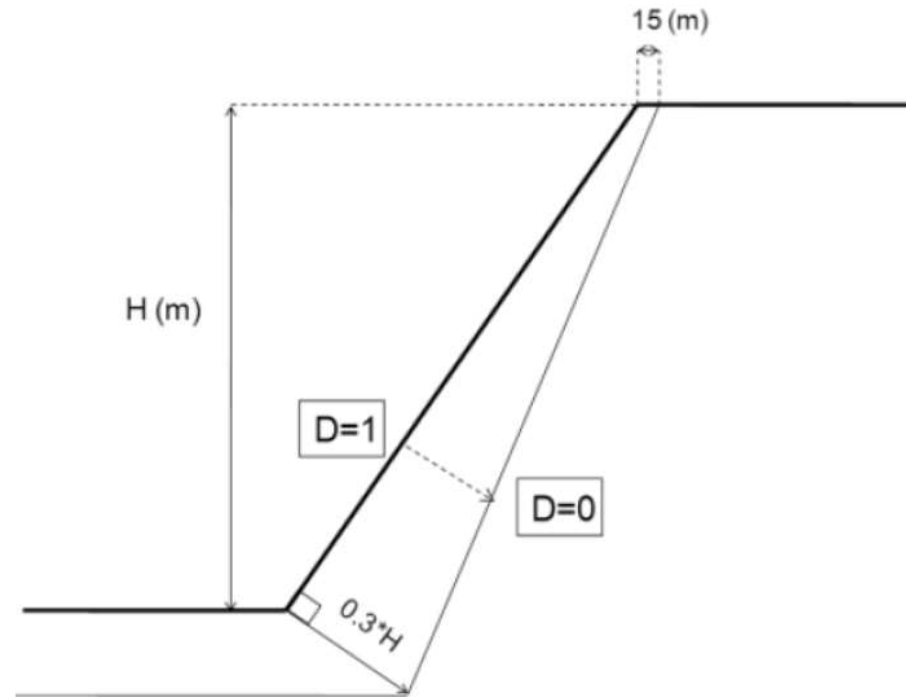
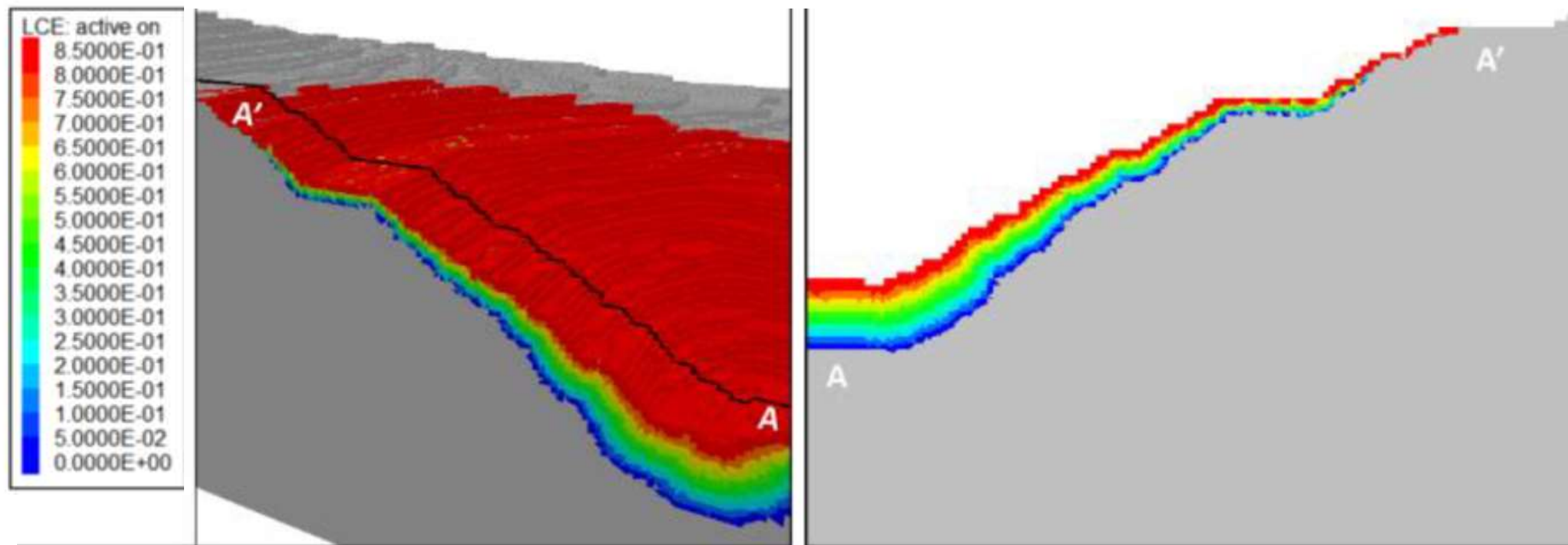


Figure 2. A methodology suggested to represent the damage zone in simple slope stability analysis.

(Silva and Gomez, 2015)

Zona perturbada-escala global

- Modelo conceptual



Método de reducción de resistencia al corte

- El valor del factor de reducción crítico es equivalente a un “*factor de seguridad*” en taludes.
- El factor de seguridad de un talud se define como el número en el cual la resistencia al corte inicial debe dividirse con el fin de llevar al talud a una condición de falla (Dawson and Roth, 1999)
- El criterio de falla adoptado por un análisis plástico suele ser Mohr- Coulomb (c , ϕ). Aunque otros criterios también pueden ser utilizados (Hammah et al., 2005).

Método de reducción de resistencia al corte

Metodología

1. Los parámetros de resistencia del talud (c , ϕ) se reducen por el factor (SSR), y se analiza la respuesta del modelo numérico

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

$$\frac{\tau}{SSR} = \frac{c}{SSR} + \sigma_n \frac{\tan \phi}{SSR}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} c_{trial} = \left(\frac{1}{SSR} \right) c \\ \phi_{trial} = \text{atan} \left(\frac{1}{SSR} \tan \phi \right) \end{cases}$$

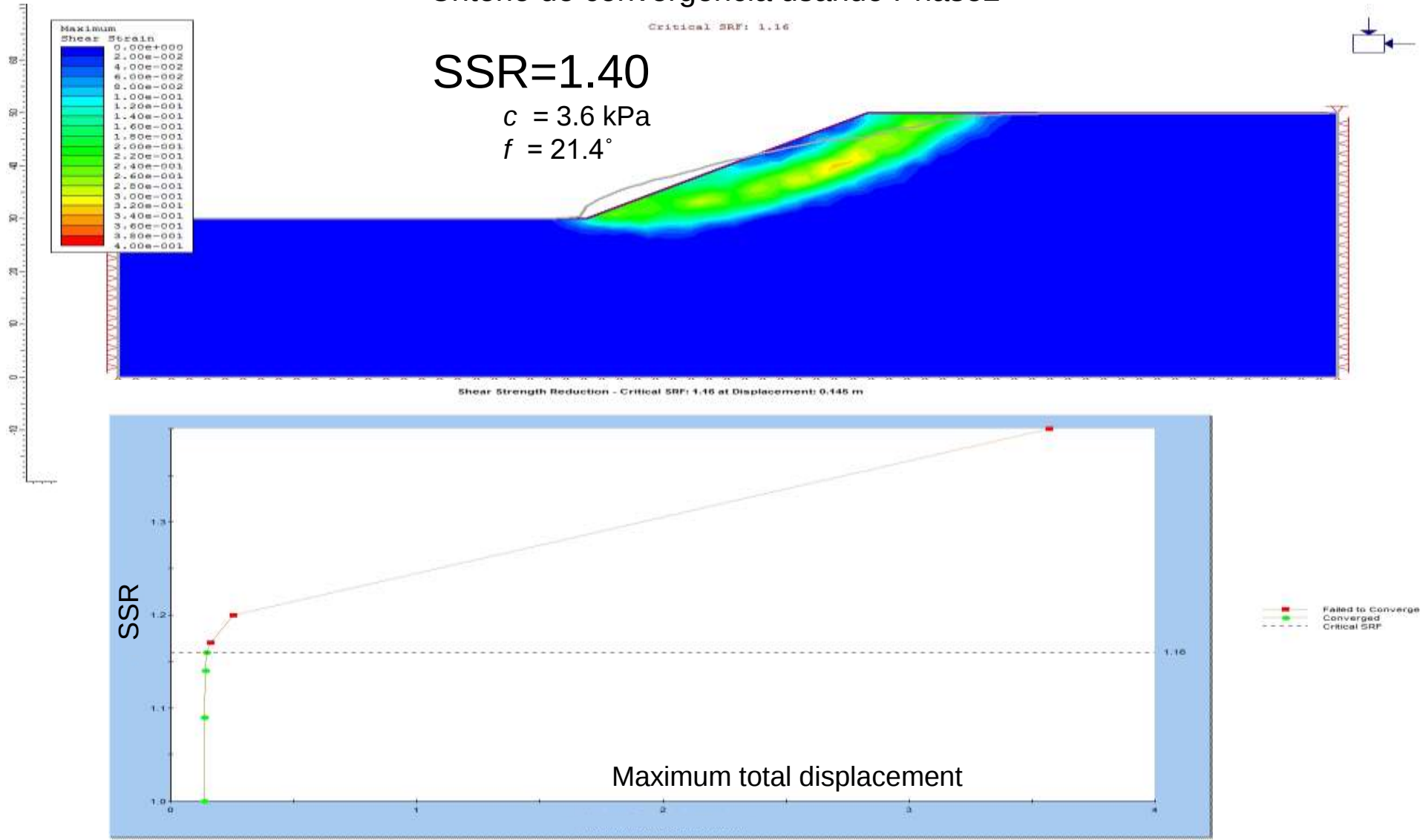
Método de reducción de resistencia al corte

Metodología

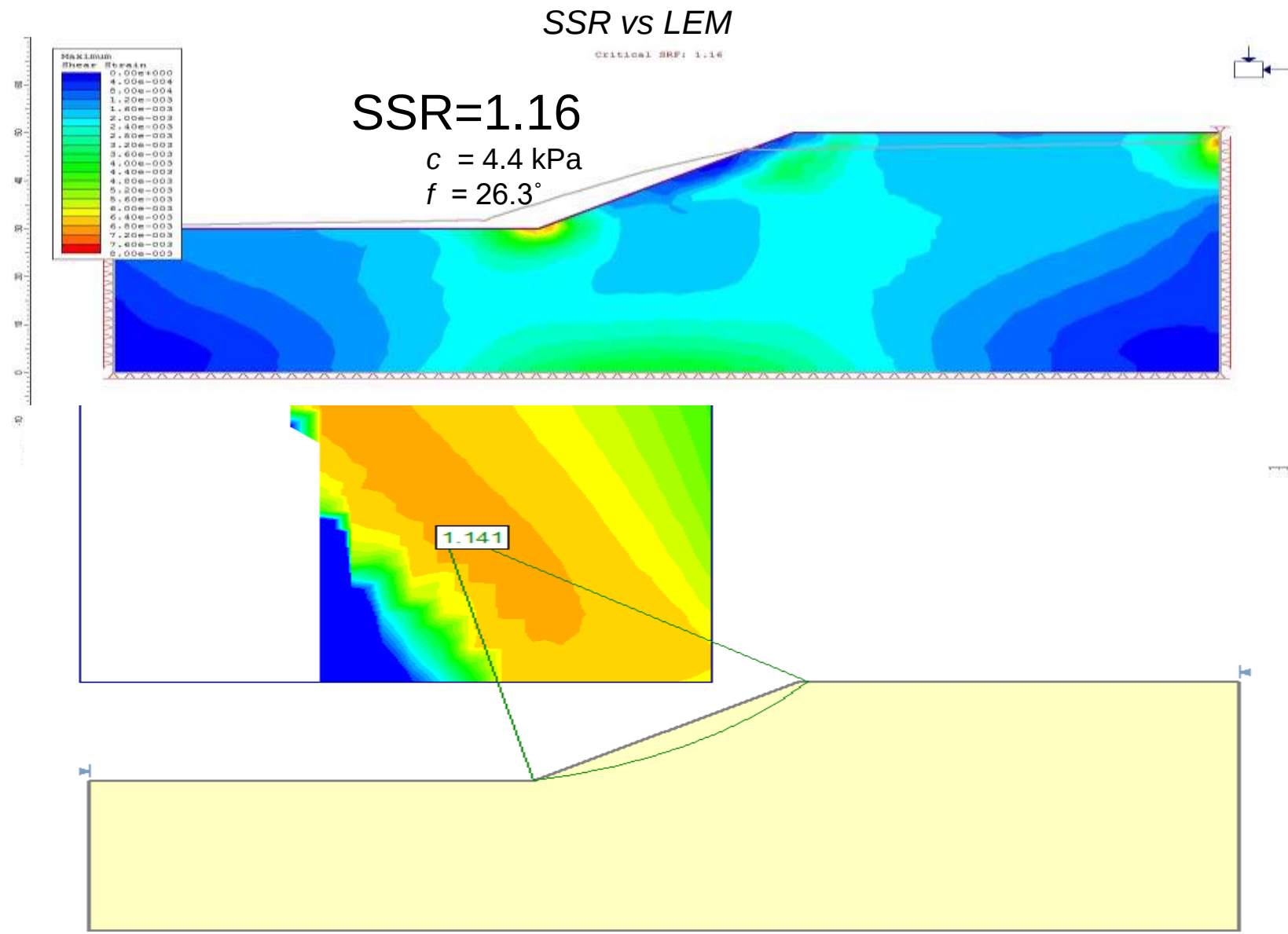
2. El factor (SSR) se incrementa gradualmente hasta que el modelo empieza a presentar indicadores de inestabilidad. Entre los indicadores de estabilidad se incluyen:
 - Solución implícita: El modelo no converge dentro de un número específico de iteraciones/tolerancia.
 - Solución explícita: Aumento en la tasa de fuerzas no balanceadas en el Sistema
 - Incremento repentino de la tasa de desplazamiento
 - Desarrollo de un mecanismo de falla
3. El valor crítico del factor SSR es el máximo valor de los SSR en el cual se logra la convergencia en el análisis de esfuerzos. Si el SSR es mayor que el valor crítico, el modelo es inestable según alguno de los indicadores.

Modelo Numérico Continuo

Criterio de convergencia usando Phase2



Modelo Numérico Continuo



Método de reducción de resistencia al corte

Shear strength reduction method (SSR)

- Si se presentan varios materiales y/o discontinuidades, la reducción se realiza de manera simultánea en todos los materiales.
- Cuando los contornos de desplazamiento, deformación de corte, velocidades, otros, se disponen en secuencia de estable a inestable, estos proporcionan un buen indicador del progreso del mecanismo de falla a través del talud.
- En problemas dominados por deslizamiento, la técnica de SSR es una alternativa válida al equilibrio límite

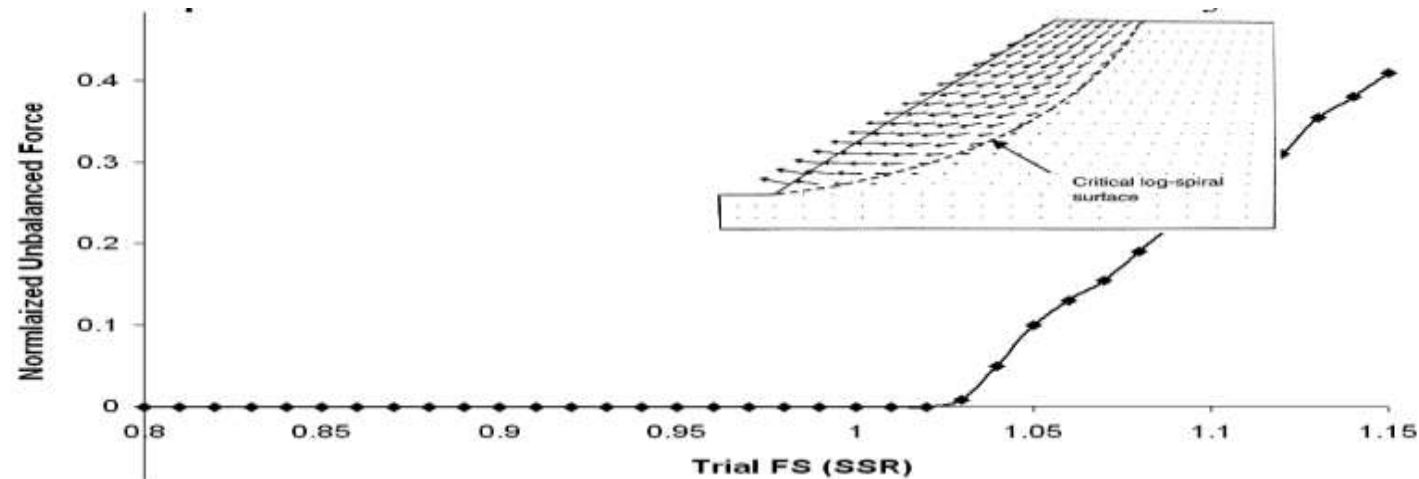
Método de reducción de resistencia al corte

Shear strength reduction method (SSR)

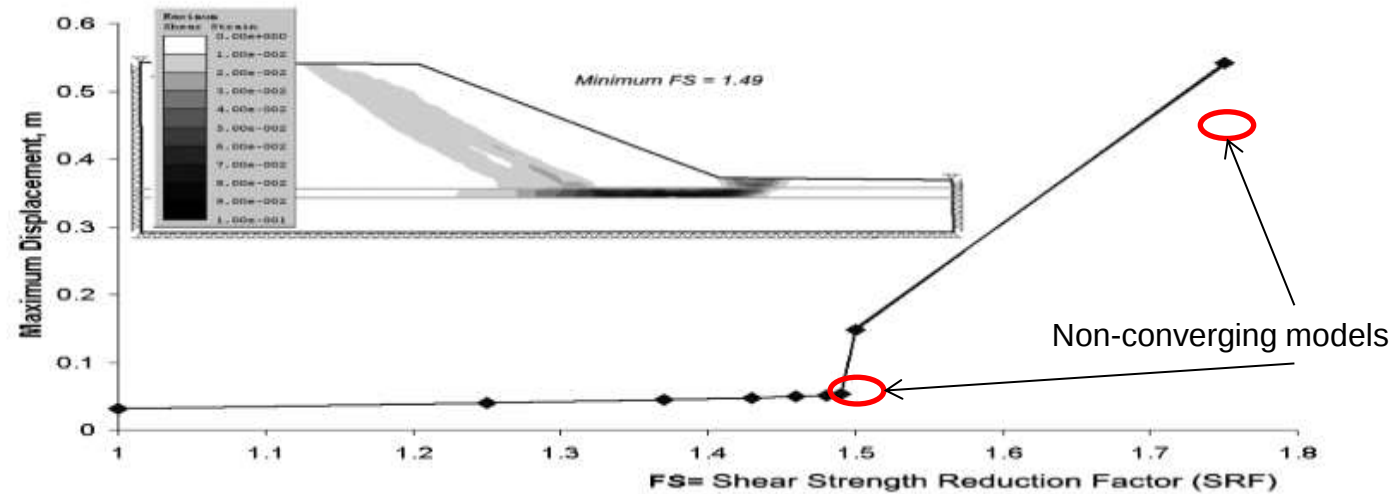
- En taludes simples el FS obtenido mediante SSR suele ser similar al FS obtenido a través de métodos de equilibrio límite (Griffiths and Lane, 1999; Cala and Flisiak, 2001).
- En taludes con geologías complejas existen diferencias considerables entre los valores de FS obtenidos por LEM y SSR (Cala and Flisiak, 2001).

Método de reducción de resistencia al corte (SSR): modelo continuo

Otros criterios



Finite difference analysis result using total unbalanced force magnitude as a stability indicator. (Dawson et al., 1999)



Finite element analysis (PHASE2) result using maximum displacement as a stability indicator. (Diederichs et al., 2007)

Método de reducción de resistencia al corte

Shear strength reduction method (SSR)

- Validez de reducir de manera simultánea cohesión y fricción.
La cohesión suele determinarse con menos confiabilidad que las propiedades de fricción, y en general, los problemas en taludes son dominados por la cohesión sobre la fricción.
- No es claro si la reducción de la resistencia al corte puede ser estandarizada en casos donde se involucra refuerzo.
Duncan and Wright (2005) recomiendan aplicar SSR solo a la resistencia de los materiales del talud.
- El método puede no capturar completamente los mecanismos no relacionados a la resistencia al corte.

Referencias

- Banks, D. (2005). Rock mass ratings (RMRS) predicted from slope angles of natural rock outcrops. *International Journal of rock mechanics and mining sciences*, 42, 3, 440-449.
- Board, M.E., Chacón, P. and Lorig, L. (1996). Comparative analysis of toppling behavior at Chuquicamata open-pit mine, Chile. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. A: Min. industry)*, 105, A11-A21.
- Cala, M. and Flisiak, J. (2001). Slope stability with FLAC and limit equilibrium methods. In Bilaux, Rachez, Detournay and Hart (eds.) *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*: 111-114. A.A. Balkema Publishers.
- Call, R.D. and Savely, J.P. (1990). Open pit rock mechanics. In *surface mining*, 2nd edition (ed. B.A. Kennedy), pp. 860-882. Littleton: Society for mining metallurgy and exploration, Inc.
- Chen, Z. (1995). Keynote lecture: Recent developments in slope stability analysis. In *proc. 8th international congress on rock mechanics (Tokyo, 1995)*, Vol. 3, 1041-1048. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Coates, D.F. (1977). Pit slope manual Chapter 5-Design. *CANMET Report 77-5*, 126 p.
- Coulthard, M.A., Journet, N.C. and Swindells, C.F. (1992). Integration of stress analysis into mine excavation design. *Proc. 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Santa Fe, New Mexico.
- Daly, S., Munro, W.K. and Stacey, P.F. (1988). Slope stability studies for the Lornes pit. In 12th CIM district six meeting (Forni, B.C., Sept. 28 to Oct. 1, 1988). Golder associates (Western Canada) Ltd., report September 1988.
- Dawson, E.M. and Roth, W.H. (1999) Slope stability analysis with FLAC. In Detournay and Hart (eds.) *FLAC and numerical Modeling in Geomechanics*: 3-9. Rotterdam: Balkema.
- Diederichs, M., Lato, M., Hammah, R. and Quinn, P. (2007). "Shear Strength Reduction Approach for Slope Stability Analyses" Invited Position Paper, 1st Canadian-US Rock.
- Duncan, J.M. and Wright, S.G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley, Hoboken, NJ.
- Franklin, J.A. and Dusseault, M.B. (1991). *Rock engineering applications*. New York: McGraw-Hill, Inc., 49-110.
- Goodman, R.E. and Bray, J.W. (1976). Toppling of rock slopes. In *rock engineering for foundations and slopes*. ASCE specialty conference (Boulder, August 15-18, 1976), Vol. 2, 201-234.
- Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49, 3, 387-403.
- Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Corku, B. and Curran, J. (2005). The shear strength reduction method for the generalized Hoek-Broen criterion. *Alaska Rocks: 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics*. Paper 05-810. 6pgs.
- Harrison, J.P. And Hudson, J.A. (2000). *Engineering rock mechanics: part 2: illustrative worked examples*. Pergamon.
- Hoek, E. (1991). When is a design in rock engineering acceptable? In *proc. 7th International congress on rock mechanics (Aachen, 1991)*, Vol. 3, 1485-1497. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Hoek, E. and Bray, W. (1981). *Rock slope engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy,
- 358 p.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. A.A. Balkema.
- Martin, D.C. (1990). Deformation of open pit mine slopes by deep seated toppling. *International Journal of Surface mining and reclamation*, 4, 153-164.
- Pariseau, W. G. (2006). *Design Analysis In Rock Mechanics*. Taylor & Francis.
- Sjöberg, J. (1999). Analysis of large scale rock slopes. PhD thesis. Lulea University of Technology.
- Stacey, T.R. (1968). Stability of rock slopes in open pit mines. National mechanical engineering research institute. Council for scientific and Industrial research, CSIR report MEG 737, Pretoria, South Africa, 66p.
- West, R.J., Larson, N.B., Visca, P.J., Nicholas, D.E. and Call, R.D. (1985). Aitik slope stability study. Call & Nicholas, Inc. report to boliden minerals AB, Mine.
- Wyllie, D.C. and Mah, C.W. (2004). *Rock slope Engineering: Civil and Mining*. 4th Edition.