

Acte d'investidura del
Dr. Evert Hoek
com a doctor *honoris causa*
de la Universitat Politècnica
de Catalunya · BarcelonaTech

6 de març de 2019



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Índex / Table of contents

Ordre de l'acte d'investidura /
Order of the award ceremony

Elogi dels mèrits del Dr. Evert Hoek,
Dr. David Parcerisa /
Oration for Dr Evert Hoek by the sponsor
Dr David Parcerisa

Discurs pronunciat pel nou doctor
honoris causa, Dr. Evert Hoek /
Acceptance speech by Dr Evert Hoek

Ordre de l'acte d'investidura

Benvinguda del rector de la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech, Prof. Francesc Torres.

Lectura de l'acord del Consell de Govern, a càrrec de la secretària general, Sra. Marta de Blas.

Laudatio del padrí, Dr. David Parcerisa.

Acte solemne d'investidura del Dr. Evert Hoek com a doctor *honoris causa* per la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Discurs del nou doctor *honoris causa*, Dr. Evert Hoek.

Entrega del premi Rocscience.

Paraules del rector, Prof. Francesc Torres.

Interpretacions musicals a càrrec de l'Orfeó Manresà.

Canticorum iubilo, Georg F. Händel (1748)

Abide with me, William H. Monk (1861)

Da pacem Domine, Arvo Pärt (1935)

Gaudeamus igitur

Gaudeamus igitur

Gaudeamus igitur iuvenes
dum sumus (bis),
post iucundam iuventutem,
post molestam senectutem
nos habebit humus (bis)

Ubi sunt qui ante nos
in mundo fuere (bis)
adeas ad inferos, transeas
ad superos
hos sivos videre (bis)

Vivat Academia, vivant
profesores, (bis)
vivat membrum quolibet,
vivant membra quaelibet
semper sint in flore (bis)

Elogi dels mèrits del Dr. Evert Hoek

Dr. David Parcerisa

Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech

El Dr. Hoek ha dedicat la seva vida a l'estudi del comportament i el trencament dels massissos rocosos. Val a dir que en algun moment o altre de la vida, normalment durant la infància, tots hem mostrat interès per veure com es trenquen les coses. La meua filla mateixa ara n'és tota una experta. La diferència és que, de gran, el Dr. Hoek no ha deixat mai d'interessar-se per aquest tema i l'ha convertit en el centre de la seva vida.

Durant les últimes dècades, els reptes en matèria d'enginyeria civil i minera s'han tornat cada vegada més grans a mesura que els projectes s'han anat fent més grossos, més profunds, més pesants, més alts... i s'han anat transformant la construcció de preses i ponts, l'estabilització de talussos i l'excavació i el sosteniment de túnels i cavernes. Al mateix temps, els problemes de mecànica de roques també s'han anat fent més grossos, més profunds, més pesants i més alts.

El 1972, en un article titulat "The Teaching of Rock Mechanics", el Dr. Hoek plantejava la necessitat de fer augmentar l'interès per la mecànica de roques. L'autor hi explicava que la resposta de la societat en relació amb la mecànica de roques era molt pobra i que els motius més habituals eren aquests: "**Motiu 1.** Una empresa d'enginyeria civil o minera que tenia un problema de mecànica de roques desconeixia l'existència del tema de la mecànica de roques.

Motiu 2. Un cop decidida a investigar el problema, l'empresa tenia una decepció per la manca de solucions pràctiques.

Motiu 3. Quan l'empresa arribava al convenciment que podia obtenir beneficis econòmics tangibles gràcies a l'aplicació de la mecànica de roques per resoldre els seus problemes, hi havia relativament poques empreses que poguessin proporcionar-li un servei integral per satisfer aquesta necessitat concreta".

Avui en dia, la presència d'enginyers especialitzats en mecànica de roques és fonamental en projectes d'enginyeria civil i minera. Hi ha un conjunt enorme de solucions pràctiques que s'han desenvolupat durant les últimes dècades i fins i tot hi ha empreses dedicades exclusivament a l'assistència en problemes de mecànica de roques.

Les aportacions del Dr. Hoek des del començament de la seva investigació el 1958 han contribuït de manera significativa a fer canvis en aquests tres motius, cosa que ha tingut un impacte decisiu en la manera de resoldre els problemes de mecànica de roques i en els costos que se'n deriven.

El Dr. Hoek ha publicat nombrosos articles i llibres de text d'una qualitat altíssima. Els llibres *Rock Slope Engineering*, que el Dr. Hoek va escriure juntament amb el Dr. Bray; *Underground Excavations in Rock*, escrit amb el Dr. Brown, i *Support*

of Underground Excavations in Hard Rock, escrit amb el Dr. Kaiser i el Dr. Bawden, han estat autèntiques bíblies per als enginyers de roques. Actualment, continua actualitzant el “Hoek’s Corner” al lloc web Rocscience, que és una font d’informació molt valuosa.

A més a més, el Dr. Hoek i el Dr. Brown van desenvolupar el criteri de trencament de roques i massissos rocosos de Hoek-Brown, que s’ha fet servir de manera generalitzada en la pràctica internacional de l’enginyeria de roques. Posteriorment es va combinar amb l’índex de resistència geològica, també desenvolupat pel Dr. Hoek, i es va convertir en una eina importantíssima en l’enginyeria i el disseny de roques. Recentment, el

Dr. Hoek i el Dr. Brown han escrit conjuntament una revisió tant del criteri de trencament de Hoek-Brown com de l’índex de resistència geològica, que es publicarà al *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* el 2019.

Com a consultor, el Dr. Hoek ha assessorat una gran quantitat de projectes d’infraestructures i miners de gran rellevància per tot el món, donant solucions a qüestions primordials i contribuint a desenvolupar condicions de treball més segures.

Durant les últimes dècades, els èxits del Dr. Hoek en disseny i enginyeria de roques han estat tan importants per a la nostra comprensió i l’ús pràctic que li hem d’estar profundament agraïts.

Discurs pronunciat pel nou doctor *honoris causa*, Dr. Evert Hoek

L'ús de massissos rocosos com a material d'enginyeria

Vaig estudiar Enginyeria Mecànica a la Universitat de Ciutat del Cap a Sud-àfrica. Em vaig llicenciar el 1955 i vaig obtenir un màster el 1958 per la recerca sobre la resistència de materials i l'anàlisi de tensions mitjançant models físics. En aquella època, abans de l'aparició dels mètodes numèrics, una de les eines més potents que teníem per a l'anàlisi de tensions era la fotoelasticitat, que es basava en els patrons òptics que es dibuixaven en materials transparents sotmesos a esforços per a l'anàlisi de la distribució de tensions en models bidimensionals i tridimensionals, tal com es mostra a la *Figura 1*.

El 1958, em van contractar com a especialista en anàlisi de tensions a l'Institut Nacional de Recerca en Enginyeria Mecànica de Sud-àfrica i aviat vaig començar a investigar sobre els processos de fractura en roques. Aquesta investigació es va iniciar arran d'una sol·licitud de la indústria minera de l'or a Sud-àfrica, que necessitava estudiar els processos de fractura fràgil en roques massisses dures sotmeses a alts esforços a les mines de profunditat. Aleshores l'or s'extreia a profunditats d'entre 2 i 3 km per

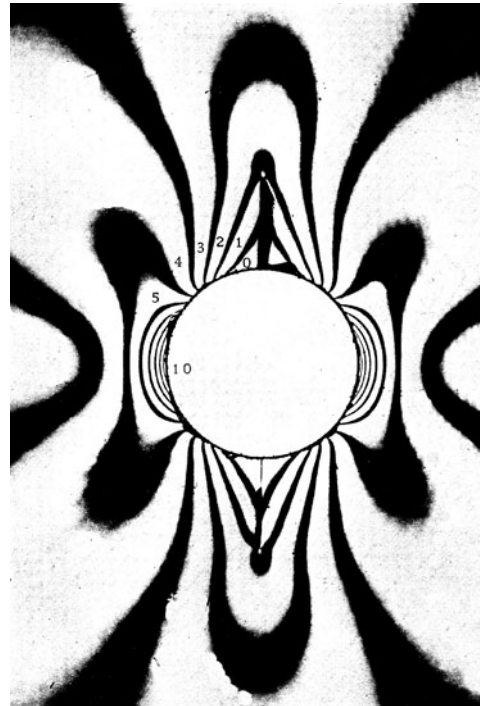


Figura 1
Patró fotoelàstic en un model de placa de vidre que representa el massís rocós que envolta un túnel circular, utilitzat per estudiar el desenvolupament d'esquerdes verticals al sostre i al terra del túnel.

sota de la superfície i els esclats o trencaments explosius de la roca representaven una amenaça important per a la seguretat dels miners. Em vaig passar 8 anys treballant per resoldre aquest problema i la Universitat de Ciutat del Cap em va atorgar un doctorat el 1965 en reconeixement a la meua investigació.

El 1966 em van nomenar professor titular de Mecànica de Roques a la Royal School of Mines de l'Imperial College of Science and Technology de Londres, i catedràtic de Mecànica de Roques el 1970. El meu interès aviat va abraçar també els massissos rocosos, a part de la roca intacta, que ja havia tractat a Sud-àfrica. I és que la meua nova faceta de docent i investigador m'exigia comprendre el comportament mecànic dels massissos rocosos en què s'excaven túnels, fonamentacions i talussos. Des de llavors, aquest tema i el desenvolupament de mètodes per al disseny d'excavacions estables en aquests massissos rocosos han estat el centre del meu interès professional.

Conceptes bàsics del comportament dels massissos rocosos

Una roca és una matriu composta de grans minerals angulars mil·limètrics que pot tenir una gran varietat d'òrigens. La roca intacta es pot haver dipositat per diversos processos de tipus volcànic o, en l'altre extrem de l'espectre, per l'aigua o pel transport aeri de grans erosionats d'aquests sediments rocosos. Després de la deposició, aquestes masses de roca intacta es poden haver vist sotmeses a una àmplia gamma de processos tectònics que podrien haver donat lloc al plegament, la fractura i el cisallament de la roca per formar les estructures de blocs entrelaçats que componen la major part de l'escorça superficial de la Terra. La majoria d'habitatges, fonamentacions, carreteres, túnels, talussos i mines els excavem en aquestes estructures de blocs de roques.

A partir d'aquest resum molt simplista de la formació de massissos rocosos es pot deduir fàcilment que, a diferència dels materials d'enginyeria artificials com l'acer o el formigó, els massissos

rocosos són extremadament variables, tant per composició com per comportament. I és precisament aquesta variabilitat el que planteja el repte més gran en els nostres intents d'entendre els massissos rocosos i d'utilitzar-los com a materials d'enginyeria.

El trencament del material de roca intacta sotmès a esforços normalment s'inicia com a resultat del lliscament o cisallament de les fronteres de gra i dona lloc a l'obertura d'esquerdes de tracció a través dels grans o al llarg de les interseccions de les fronteres de gra. Depenent de la magnitud i la direcció de les tensions i de la resistència de les fronteres de gra, això pot provocar danys a la matriu de grans o desintegrar-la completament.

En una escala més gran, els blocs de roca intacta, subdividits per una intersecció de diàclasis, falles o zones de cisalla creades per moviments tectònics, poden experimentar un procés similar de propagació de fractures en el qual el cisallament dels contactes entre els blocs o la rotació dels blocs poden donar lloc a una desagregació progressiva o un trencament del massís rocós.

Els processos de lliscament, cisallament i rotació, mencionats anteriorment, no són difícils d'entendre o de modelar de manera realista, gràcies a les eines numèriques actuals. La dificultat consisteix a decidir quina combinació de formes i mides de gra o bloc s'han d'incorporar a un model de massís rocós, quines propietats de frontera de gra o de contacte de blocs s'han de fer servir i quines tensions s'han d'emprar en la càrrega del massís rocós en qüestió.

Tendències comunes

Per tal de comprendre el comportament dels massissos rocosos resulta útil trobar tendències comunes que es puguin utilitzar de punts de partida per fer anàlisis detallades de problemes específics. Una de les més útils d'aquestes tendències comunes és la representació adimensional del criteri de trencament de Hoek-Brown que es mostra a la *Figura 2*.

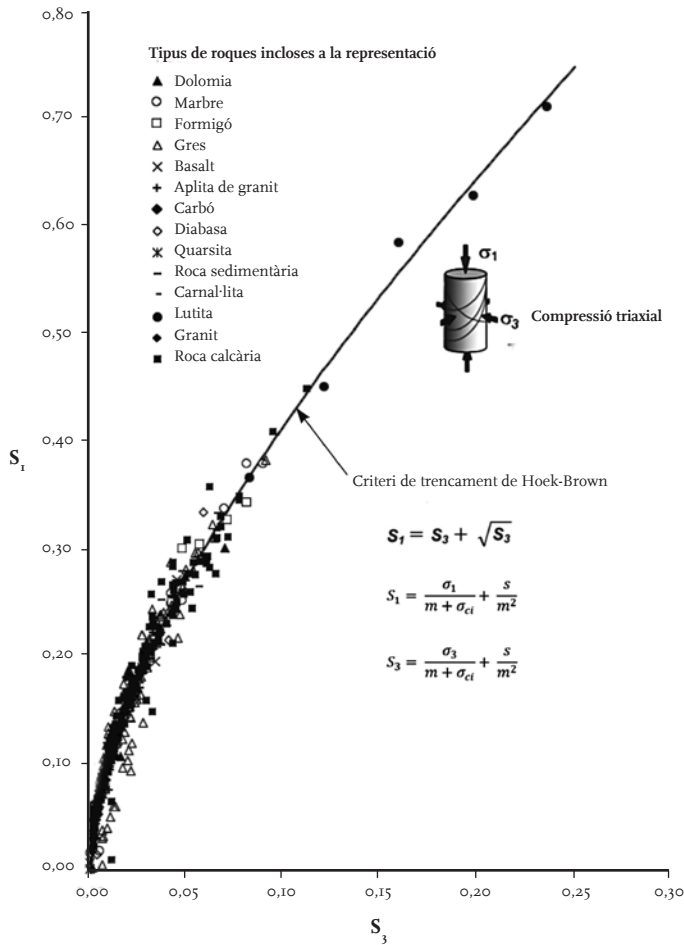


Figura 2: representació adimensional de resistència axial contra la pressió de confinament dels tipus de roques definits pel criteri de trencament de Hoek-Brown, en què σ_1 i σ_3 són les tensions principals màxima i mínima respectivament; σ_{ci} és la resistència a la compressió no confinada, i m i s són constants materials de la roca intacta.

Aquesta figura mostra els resultats d'assaigs de laboratori sobre resistència triaxial fets amb una gran varietat de roques fràgils. Els resultats s'han expressat amb els dos valors de tensió adimensional S_1 i S_3 definits a la figura. Això permet comparar el procés de trencament en una àmplia gamma de tensions aplicades, que cobreixen les tensions típiques que es troben en grans estructures, com ara túnels, fonamentacions de preses i talussos. La notable similitud del comportament de totes aquestes roques és un punt de partida important per a la nostra comprensió del comportament dels massissos rocosos i l'ús d'aquests massissos com a materials d'enginyeria. Tal com es mostra a la figura 2, aquest comportament es pot capturar amb el criteri de trencament de roques i massissos rocosos, introduït per Hoek i Brown (1980), per estimar la resistència d'espèimens sotmesos a càrrega axial mentre se sotmeten a una sèrie de pressions de confinament diferents.

Un altre bon exemple de tendències comunes en massissos rocosos s'il·lustra a la Figura 3, que mostra l'estrenyiment o *squeezing* (expressat com a deformació percentual) en túnels excavats en massissos rocosos amb diferents relacions de resistència a la tensió induïda al massís rocós que envolta el túnel. L'estrenyiment es produeix quan el massís rocós al voltant d'un túnel es trenca de manera dúctil i això fa que es redueixi el diàmetre del túnel. En casos extrems, com al túnel de Yacambú-Quibor a Venèçuela, unes tensions molt elevades en roques de molt poca qualitat a profunditats superiors als 1.000 m van fer que el túnel gairebé es tanqués i que calgués tornar a excavar-ne diverses seccions. L'estrenyiment en túnels és un problema previsible, sempre que es duguin a terme les investigacions adequades durant el procés d'exploració i disseny. Es pot controlar mitjançant unes seqüències d'excavació acurades i la instal·lació d'uns sistemes de sosteniment adequats.

Desenvolupament d'eines de disseny per a l'enginyeria de roques

Fa molts anys que es desenvolupen eines de disseny per a l'enginyeria de roques i he tingut la sort d'haver estat una de les moltes persones implicades en aquest procés durant els últims 60 anys.

Les representacions, com la que es mostra a la figura 3, són eines de disseny molt importants en l'enginyeria de roques. Aquestes representacions de vegades triguen anys a crear-se, ja que es basen en proves de camp d'assaig i error juntament amb una observació i una interpretació acurades per desenvolupar tendències fiables. Els estudis teòrics i les anàlisis numèriques poden ajudar a verificar la validesa de les corbes representades, però generalment són l'observació i l'experiència el que permet detectar patrons comuns de comportament en les condicions tan variades que es troben en la construcció de túnels.

El 1975 vaig publicar un llibre, juntament amb el Dr. J. W. Bray, titulat *Rock Slope Engineering*, que es va convertir en un llibre de text important quan érem a les beceroles de l'enginyeria de roques. Aquest llibre presentava molts dels principis bàsics del comportament dels talussos i mètodes d'anàlisi que es podien utilitzar per comprovar l'acceptabilitat dels talussos dissenyats. El llibre ha passat per diverses revisions i n'han sortit versions més actuals d'altres autors, però els principis bàsics no s'han modificat.

Un segon llibre, *Underground Excavations in Rock*, que vam escriure conjuntament amb el professor E. T. Brown, es va publicar el 1980 i va tenir un paper semblant al del primer volum, descrit abans. Un cop més, es van presentar principis bàsics i càlculs simplificats de disseny amb la intenció de donar a conèixer l'enginyeria de roques pràctica als estudiants i als professionals novells.

Amb el temps, molts dels càlculs presentats en aquests dos llibres es van programar i s'han convertit en un conjunt d'eines numèri-

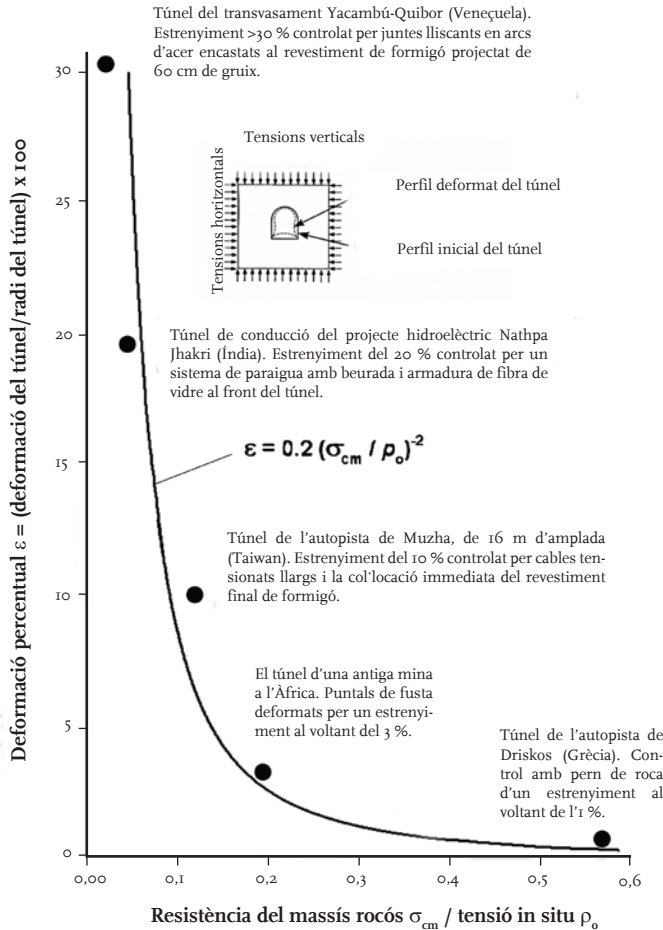


Figura 3: representació del tancament de túnels en massissos rocosos en què la tensió a la qual està sotmès el massís rocós que envolta el túnel en supera la resistència.

ques potents i alhora fàcils d'usar que són àmpliament utilitzades pels enginyers i geòlegs de camp.

Un dels avenços més importants dels últims 60 anys ha estat el desenvolupament dels ordinadors personals i l'evolució de mètodes d'anàlisi numèrica molt sofisticats i potents. Aquestes eines han permès investigar la variabilitat del comportament dels massissos rocosos tenint en compte milers de combinacions de les nombroses variables que defineixen les propietats d'un massís rocós típic. Aquestes investigacions han revelat noves tendències comunes que no s'havien detectat abans i han tingut un gran valor en anàlisis d'estabilitat de diversos tipus.

Abans, normalment calia suposar un mode de trencament a l'hora de realitzar una anàlisi d'estabilitat d'un talús o d'un túnel. La precisió d'aquesta anàlisi depenia de l'experiència de la persona que feia la suposició i hi havia un risc considerable de cometre errors greus si se suposava un mode de trencament incorrecte. Aquesta situació ha millorat espectacularment en els últims anys gràcies a unes tècniques numèriques millorades, que permeten realitzar una anàlisi d'estabilitat sense la necessitat de predeterminedar el mode de trencament, ja que es pot programar l'anàlisi perquè calculi

el mode de trencament més probable directament a partir de la resistència i les característiques de deformació del massís rocós concret.

Tot i així, a causa de la gran variabilitat de les característiques dels massissos rocosos, encara hi ha una possibilitat significativa d'error. És un fet que s'ha d'acceptar dins de la normalitat en l'enginyeria de roques perquè no tenim cap control sobre les propietats del massís rocós en estudi. Tanmateix, les tendències comunes en el comportament dels massissos rocosos que s'han determinat, tal com he descrit abans, proporcionen orientació pràctica sobre el tipus de trencament i sobre les mesures correctives que es poden prendre per controlar o almenys minimitzar el dany causat pels trencaments.

Els processos d'excavació de túnels, talussos i fonamentacions mitjançant voladura, tall o perforació són inherentment destructius, ja que el massís rocós s'ha de trencar per poder fer l'excavació d'enginyeria necessària. L'enginyeria de roques, bàsicament, és l'art d'eliminar la quantitat necessària de roca per fer una excavació i al mateix temps infligir els mínims danys possibles a la roca que ha de quedar i formar part de l'estructura d'enginyeria.

Order of the award ceremony

Welcome from the rector of the Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, Prof. Francesc Torres.

Reading of the Governing Council's decision by the general secretary, Ms Marta de Blas.

Oration for Dr Evert Hoek by the sponsor, Dr David Parcerisa.

Conferral of the honorary doctorate on Dr Evert Hoek by the Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Acceptance speech by Dr Evert Hoek.

Presentation of the Rocscience prize.

Speech by the rector, Prof. Francesc Torres.

The music will be performed by Orfeó Manresà.

Canticorum iubilo, Georg F. Händel (1748)

Abide with me, William H. Monk (1861)

Da pacem Domine, Arvo Pärt (1935)

Gaudeamus igitur

Gaudeamus igitur

Gaudeamus igitur iuvenes
dum sumus (bis),
post iucundam iuventutem,
post molestam senectutem
nos habebit humus (bis)

Ubi sunt qui ante nos
in mundo fuere (bis)
adeas ad inferos, transeas
ad superos
hos sivos videre (bis)

Vivat Academia, vivant
profesores, (bis)
vivat membrum quolibet,
vivant membra quaelibet
semper sint in flore (bis)

Oration for Dr Evert Hoek

by the sponsor Dr. David Parcerisa
Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech

Dr Hoek has dedicated his life to the study of how rock masses behave and break. In fact, almost everyone has at some time, usually during their childhood, been interested in how things break. Even my daughter, today, is a specialist on that subject. The difference is that Dr Hoek persisted after his childhood and chose this interest as a way of life.

Over a number of decades, civil and mining engineering projects have become more and more challenging as they have become bigger, deeper, heavier, taller... thus, how dams and bridges are built, how slopes are stabilised and how tunnels and caverns are excavated and supported have been completely transformed. At the same time, problems in rock mechanics have become bigger, deeper, heavier and taller, too.

In 1972, in a paper entitled “The Teaching of Rock Mechanics”, Dr Hoek discussed the need to increase interest in rock mechanics. The author said that society’s reaction to rock mechanics is very poor and the most prevalent reasons were these:

Reason 1. A mining or civil engineering company with a rock mechanics problem was unaware of the existence of the subject of rock mechanics.

Reason 2. Having decided to investigate a problem, a company became completely disillusioned by the lack of practical solutions.

Reason 3. Once that company was convinced that there were tangible financial benefits to be gained from the application of rock mechanics to its problems, there were relatively few companies that could provide a comprehensive service to satisfy this need”.

Currently, the presence of engineers specialised in rock mechanics is crucial in mining and civil engineering projects. An enormous pool of practical solutions has been developed during recent decades and there are companies that are devoted exclusively to providing assistance in rock mechanics problems.

The contributions made by Dr Hoek from the very beginning of his research, in 1958, have contributed significantly to making changes that affect these three reasons and have had a crucial impact on the way that rock mechanics problems are solved and the costs involved.

Dr Hoek has produced numerous high-quality papers and textbooks. The book *Rock Slope Engineering*, which Dr Hoek wrote with Dr Bray, the book *Underground Excavations in Rock*, with Dr Brown, and a third book, *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, written with Dr Kaiser and Dr Bawden, have become bibles for rock engineers. He has continued to update “Hoek’s

Corner” in the Rocscience website, which is a valuable source of information too.

Additionally, Dr Hoek and Dr Brown developed the Hoek-Brown rock and rock mass failure criterion, whose use has become widespread in international rock engineering practice. Later, it was combined with the geological strength index, also developed by Dr Hoek, to form an important tool in rock engineering and design. Recently, Dr Hoek and Dr Brown co-authored a revision of both, the Hoek-Brown failure criterion and the geological

strength index, to be published in the *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* in 2019.

As a consultant, Dr Hoek has given expert advice on a number of very important infrastructure and mining projects around the world, providing solutions to important issues and contributing to creating safe work conditions.

Over the last decades, Dr Hoek’s achievements in rock design and rock engineering have been so paramount to our understanding and practical use that we must all be deeply grateful.

Acceptance speech by Dr Evert Hoek

Using Rock Masses as Engineering Materials

My original training was in mechanical engineering at the University of Cape Town in South Africa. I graduated with a bachelor's degree in 1955 and was awarded a Master of Science in 1958 for research on strength of materials and stress analysis using physical models. In those days, before the advent of numerical methods, one of the most powerful tools available to us for stress analysis was photo-elasticity, in which optical patterns in stressed transparent materials were used to analyse stress distributions in two- and three-dimensional models, as shown in *Figure 1*.

In 1958, I was employed as a stress analysis specialist by the National Mechanical Engineering Research Institute in South Africa and I soon became involved in research on the processes of fracture in rock. This research was carried out in response to a request from the gold mining industry in South Africa for a study of the processes of brittle fracture in very highly stressed hard massive rock in deep level mines. At that time, gold was being extracted at depths of between 2 and 3 km below surface and explosive failures of the rock, known as rock-bursts, posed a significant threat to the safety of miners. I worked on this problem for the next 8 years and was awarded a PhD for my research by the University of Cape Town in 1965.

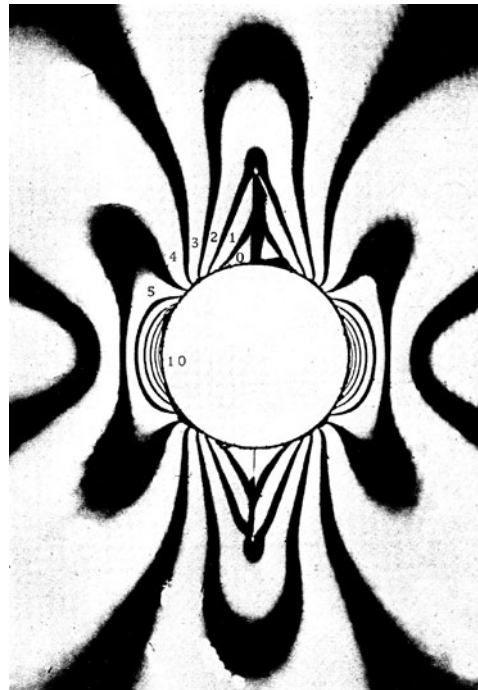


Figure 1: Photo-elastic pattern in a glass plate model representing the rock mass surrounding a circular tunnel, used for studying the development of vertical cracks in the roof and floor of the tunnel.

In 1966, I was appointed a reader in Rock Mechanics in the Royal School of Mines in the Imperial College of Science and Technology, London, followed by professor of Rock Mechanics in 1970. My interest soon broadened to include rock masses, in addition to the intact rock on which I had worked in South Africa. This became necessary since, in my new teaching and research role, I needed to understand the mechanical behaviour of rock masses into which tunnels, foundations and rock slopes are excavated. This subject, and the development of methods for the design of stable excavations in these rock masses, has remained my principal interest for the rest of my working life.

The basic concepts of rock mass behaviour

Rock consists of a cemented matrix of millimetric-sized angular mineral grains derived from a very wide variety of sources. The intact rock may have been deposited by a variety of volcanic type processes or, at the other end of the spectrum, by the water or airborne transportation of grains eroded from these rock deposits. After deposition, these intact rock masses may have been subjected to a wide range of tectonic processes which would have resulted in folding, fracturing and shearing of the rock to form the interlocking blocky structures that make up most of the near-surface crust of the earth. Most of our dwellings, foundations, roads, tunnels, slopes and mines are excavated in or on these blocky rock structures.

From this very simplistic summary of the formation of rock masses it is easy to understand that, as opposed to man-made engineering materials such as steel or concrete, rock masses are extremely variable in both their composition and in their behaviour. It is this variability that poses the greatest challenge in our attempts to understand and to use rock masses as engineering materials.

Failure of stressed intact rock material generally initiates as a result of sliding along or shearing through the cemented grain

boundaries. This results in the opening up of tensile cracks or tears through the grains or along intersecting grain boundaries. Depending on the magnitude and direction of the stresses and the strength of the grain boundaries, this may result in a damaged or completely disintegrated matrix of grains.

On a larger scale, blocks of intact rock, subdivided by intersecting joints, faults or shear zones created by tectonic movements, can undergo a similar process of fracture propagation in which shearing of the contacts between the blocks or rotation of the blocks can result in progressive disaggregation or failure of the rock mass.

The actual processes of sliding, shearing and rotation, described above, are not difficult to understand or, with today's numerical tools, to model realistically. The difficulty is to decide what combination of grain or block shapes and sizes to incorporate into a rock mass model, what grain boundary or block contact properties to use and what stresses to use in loading the rock mass under consideration.

Finding common trends

A useful starting point in understanding the behaviour of rock masses is to find common trends which can be used as starting points for detailed analyses of specific problems. One of the most useful of these common trends is the dimensionless plot of the Hoek-Brown failure criterion shown in *Figure 2*.

This figure shows the results of laboratory triaxial strength tests on a wide variety of brittle rocks. The results have been expressed in terms of two dimensionless stress values S_1 and S_3 , defined in the figure. This permits a comparison of the failure process over a very wide range of applied stresses, covering the typical stresses encountered in major structures such as tunnels, dam foundations and slopes. The remarkable similarity of the behaviour of all these rocks is an important starting point

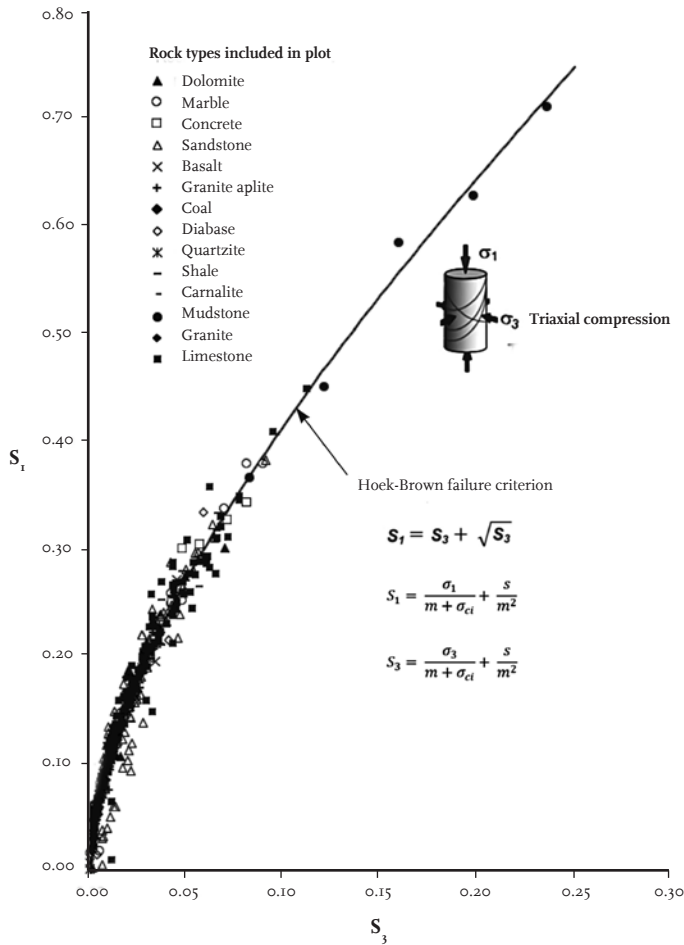


Figure 2: Dimensionless plot of axial strength versus confining pressure for rock types defined by the Hoek-Brown failure criterion, where σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses, respectively; σ_{ci} is the unconfined compressive strength; and m and s are material constants for the intact rock.

for our understanding of rock mass behaviour and the use of rock masses as engineering materials. As shown in *Figure 2*, this behaviour can be captured by the failure criterion for rock and rock masses, introduced by Hoek and Brown (1980) for estimating the strength of specimens subjected to axial loading while subjected to a range of different confining pressures.

Another good example of common trends in rock masses is illustrated in *Figure 3*, which shows squeezing (expressed as percentage strain) in tunnels in rock masses with different ratios of rock mass strength to the stress induced in the rock mass surrounding the tunnel. Squeezing occurs when the rock mass surrounding a tunnel fails in a ductile manner in such a way that the diameter of the tunnel is reduced. In extreme cases, such as the Yacambu-Quibor tunnel in Venezuela, very high stresses at depths in excess of 1000 m in very poor-quality rock resulted in almost complete closure and the need for re-mining sections of the tunnel. Squeezing in tunnels is a predictable problem, provided that adequate site investigations are carried out during the exploration and design process. Control of squeezing is feasible using carefully designed excavation sequences and the installation of appropriate support systems.

Development of design tools for rock engineering

The development of design tools for application in rock engineering has gone on for many years and I have been fortunate to have been one of the many individuals involved in this process for the past 60 years.

Plots, such as that shown in *Figure 3*, are very important design tools in rock engineering. These plots sometimes take years to develop since they are based on practical trial and error in the field, with careful observation and interpretation to develop reliable trends. Theoretical studies and numerical analyses can help in verifying the validity of the plotted curves, but the exis-

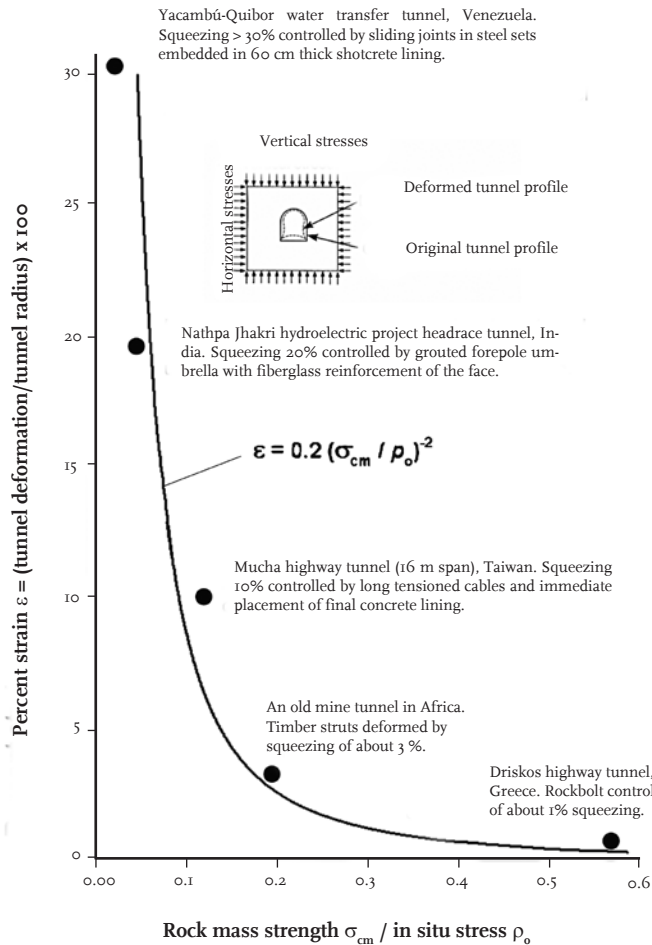


Figure 3: Plot of tunnel closure in rock masses in which the rock mass strength is exceeded by the stress in the rock mass surrounding the tunnel.

tence of common behaviour patterns in the highly varied conditions encountered in tunnel construction are generally detected by observation and experience.

In 1975 I published a book, co-authored with Dr J. W. Bray, entitled *Rock Slope Engineering*, which became an important text book in the early development of rock engineering. This book set out many of the basic principles of rock slope behaviour and methods of analysis which could be used to check the acceptability of slope designs. This book was revised several times and newer versions have been published by other authors, but the basic principles remain unchanged.

A second book, *Underground Excavations in Rock*, co-authored with Professor E. T. Brown, was published in 1980 and fulfilled a similar role to the earlier volume described above. Once again, basic principles and simplified design calculations were set out with the intention of introducing students and young professionals to practical rock engineering.

Over time, many of the calculations presented in these two books were programmed and have found their way into a suite of easy to use but powerful numerical tools that are widely used by engineers and geologists in the field.

One of the major advances of the past 60 years has been the development of personal computers and the evolution of very sophisticated and powerful numerical analysis methods. These tools have made it possible to investigate the variability of rock mass behaviour by considering thousands of combinations of the many variables which define the properties of a typical rock mass. Such studies have revealed new common trends which had not been obvious before and have been of great value in stability analyses of various kinds.

In the past, it was usually necessary to assume a failure mode when carrying out a stability analysis of a slope or a tunnel. The

accuracy of such an analysis depends upon the experience of the person making this assumption and there is a significant potential for serious errors if an inappropriate failure mode is assumed. This situation has improved dramatically in recent years since improved numerical techniques make it possible to carry out a stability analysis without the need to predetermine the failure mode, since the analysis can be programmed to calculate the most likely failure mode directly from the specified rock mass strength and deformation characteristics.

Because of the great variability in rock mass characteristics, there is still a significant potential for error. This must be accepted as normal in rock engineering since we have no control over the properties of the rock mass under consideration.

However, the common trends in rock mass behaviour which have been determined, as described above, provide practical guidance on types failure and on remedial measures which can be taken to control or at least minimise the damage caused by failures.

The processes of excavating tunnels, slopes and foundations, using blasting, cutting or digging, are inherently destructive since the rock mass must be broken up in order to create the engineering excavation required. Rock engineering is essentially the art of removing the required amount of rock to produce an excavation while, at the same time, inflicting the minimal amount of damage on the rock that must remain in place as the engineering structure.