

# CLASSIFICAÇÃO GEOTECNOLÓGICA DE ROCHAS. APRECIACÃO SINTÉTICA DA QUESTÃO (II Parte)

Geotechnological classification of rocks. Synthetic appreciation of the problem (Part II)

por

FERNANDO OLAVO FRANCISS\*

## 3. - CONSIDERAÇÕES GERAIS REFERENTES ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MEIOS ROCHOSOS

Conforme salientamos na nota introdutória, a essência de uma *classificação geotecnológica de meios rochosos* reside na consideração das suas propriedades físicas. Diferentes *critérios de classificação* exprimem diferentes atitudes em relação aos principais factores intervenientes na consideração de tais propriedades. Consequentemente, na discussão e eventual proposição de critérios de classificação, cumpre sempre recordar preliminarmente quais são esses principais factores para favorecer a estruturação de uma determinada atitude. Com esse objectivo, o texto seguinte resume alguns dos aspectos primários da questão.

### *Complexidade da noção de propriedade física*

Para entendermos o significado de *propriedade física* necessitamos considerar o *sistema* formado pelo *meio rochoso* e as *grandezas físicas intervenientes*.

O meio rochoso constitui o núcleo do sistema. As grandezas determinantes do

---

\* Eng. Civil (PUC - Rio de Janeiro), Dr. Eng. (Univ. Grenoble)  
Prof. dos cursos de pós-graduação da PUC.

*factores internos e factores externos.* Os primeiros dependem da natureza do meio rochoso, enquanto os segundos dependem da solicitação ambiental.

Os factores internos resultam da *composição material e arranjo estrutural* dos componentes materiais (incluindo descontinuidades de matéria). Tanto as componentes como o grau de anisotropia do tensor  $P^{p,q}$  decorrem dos factores *composição e estrutura*. A magnitude das componentes reflecte a composição material, enquanto a anisotropia traduz o arranjo estrutural. Quanto menor a complexidade estrutural do meio rochoso (portanto quanto menor seu grau de assimetria), tanto menor será o grau de anisotropia e tanto maior será a simplicidade do tensor  $P^{p,q}$ , assinalado por uma quantidade maior de componentes iguais ou nulas.

O relacionamento do factor estrutura com as propriedades físicas resulta da aplicação dos princípios de Neumann e Curie. Para estruturas simples definidas por operações de simetria, as componentes do tensor  $P^{p,q}$  são invariantes para transformações de coordenadas correspondentes às operações de simetria (princípio de Neumann). Para estruturas complexas, resultantes da superposição de estruturas simples, as componentes dos tensores  $P^{p,q}$  decorrem da associação (obedecendo a normas operacionais compatíveis com a natureza da propriedade analisada) das componentes dos tensores elementares representativos das propriedades das estruturas simples (princípio de Curie). Consequentemente, a inferência de propriedades físicas mediante a análise de informações resultantes do levantamento de *feições litológicas\** (apreciação do factor composição) e *feições estruturais* (conhecimento do factor estrutura) constitui tentativa válida sob o aspecto físico e matemático. *A consideração de ambos os factores na elaboração de metodologias de classificação assume grande importância por permitirem a estimativa de propriedades.*

Os factores externos consistem no *nível e tempo de actuação* das solicitações ambientais. As variações de nível induzem modificações apreciáveis na composição e estrutura do meio, alterando as propriedades físicas, enquanto o tempo de actuação exige a definição de propriedades em termos reológicos. Tais factores merecem atenção na idealização de critérios de classificação.

---

\* Feições litológicas no sentido lato. Incluem aspectos decorrentes de meteorização.

seu *ambiente físico* constituem as *grandezas influentes* no sistema e são designadas simbolicamente por  $i^q$  quando reportadas a volumes unitários. Correspondem a acções provocadas por quaisquer campos físicos. O expoente simbólico  $q$  identifica a natureza da acção. As grandezas determinantes do *estado físico* do meio rochoso constituem as *grandezas de estado* e são designadas simbolicamente por  $e^p$ . Correspondem a respostas do meio rochoso quando estimulado por variações das grandezas influentes. O expoente simbólico  $p$  identifica a natureza da resposta. Tanto  $i^q$  como  $e^p$  constituem grandezas tensoriais compatíveis com a expressão fenomenológica da causa ou efeito físicos caracterizados (escalares, p. ex.: densidade; vectoriais; p. ex.: gradiente hidráulico; tensoriais de ordem 2, p. ex.: estado de tensões, etc...).

O relacionamento\* entre grandezas  $p$  e  $q$  determina novas grandezas  $C^{p,q}$  e  $R^{q,p}$ , denominadas *concordâncias* e *rigidezas*, definidas por:

$$C^{p,q} = \frac{\delta e^p}{\delta i^q}$$

$$R^{q,p} = \frac{\delta i^q}{\delta e^p}$$

Concordâncias e rigidezas correspondem às *propriedades físicas* do meio rochoso. Como devem ser funcionalmente compatíveis com as ordens  $m$  e  $n$  dos tensores representativos dos parâmetros  $e^p$  e  $i^q$ , as propriedades  $C^{p,q}$  e  $R^{q,p}$ , genericamente simbolizadas por  $P^{p,q}$ , constituem tensores de ordem  $m+n$  (p. ex.: constantes elásticas, tensor de ordem 4 reportado a um espaço tridimensional). Portanto, a impossibilidade de quantificar todas as propriedades físicas por grandezas escalares dificulta a elaboração de critérios simples de classificação. Restam sempre soluções que consistem em definir propriedades complexas por meio de invariantes, índices de anisotropia, componentes mais relevantes dos tensores  $P^{p,q}$ , etc...

### *Influências dos factores externos e internos nas propriedades físicas*

A propriedade  $P^{p,q}$  reflecte duas categorias de factores, denominados

---

\* Apresentação simplificada da questão. O texto actual pretende apenas introduzir o conceito de propriedade física.

*Escala de apreciação das propriedades físicas*

Outro factor determinante de complexidade na apreciação das propriedades físicas  $PP^9$  decorre da sua variação espacial, normalmente assinalada por frequentes descontinuidades. Algumas situações heterogéneas autorizam a sua simplificação em zonas estatisticamente homogéneas, associadas à identificação de feições singulares importantes (diques, falhas, contactos expressivos, etc...). Contudo, a distinção entre meios heterogéneos e homogéneos resulta da escala de apreciação das propriedades.

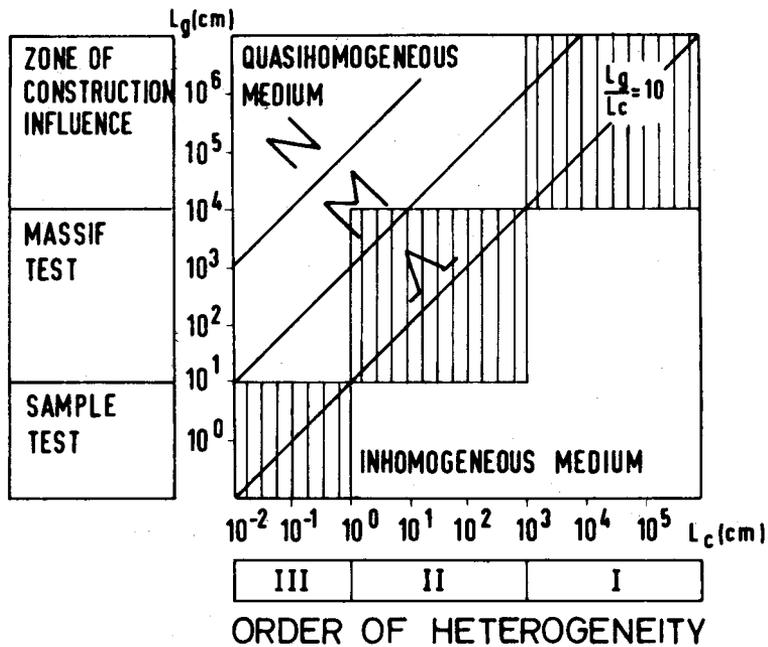


Fig. 2 - Gráfico representativo da heterogeneidade estrutural do maciço rochoso M, N - áreas predominantes das diferentes leis de permeabilidade (respectivamente lognormal, Maxwell e Gauss).

Meios heterogéneos são assimiláveis a meios quase-homogéneos quando acusam flutuações irregulares das suas características (noção de heterogeneidade) assinaladas por períodos de variação inferiores à décima parte das suas dimensões médias. O gráfico da Fig. 2 indica a relatividade do conceito. Sua diagonal

diferencia, em primeira aproximação, situações quase-homogêneas de situações heterogêneas. Os ensaios de laboratório, os ensaios de campo e as zonas influenciadas por obras de engenharia, envolvem diferentes domínios quase-homogêneos de consideração dos meios rochosos quando as suas propriedades são respectivamente apreciadas nas escalas petrográficas, estrutural e do maciço. Portanto, a *escala relativa* de aplicação dos critérios de classificação merece atenção. A utilização de diferentes critérios para diferentes escalas constitui uma solução.

Todavia, zonas quase-homogêneas não traduzem invariança de propriedades  $P^{p,q}$ . O conceito de homogeneidade estatística implica em maior ou menor dispersão dos seus valores em torno de uma tendência central. A indicação de valores máximo e mínimo ou médias e desvios responde ao problema.

#### *Distinção entre propriedades físicas e propriedade tecnológica*

O conhecimento das propriedades  $C^{p,q}$  ou  $R^{q,p}$  exige a integração dos relacionamentos diferenciais:

$$C^{p,q} = \frac{\delta e^p}{\delta i^q}$$

$$R^{q,p} = \frac{\delta i^q}{\delta e^p}$$

sob as condições de contorno (estacionárias ou transitórias) impostas por cada tipo de ensaio (de campo ou laboratório). O significado mais ou menos verdadeiro das propriedades  $C^{p,q}$  e  $R^{q,p}$  determinadas durante a realização de qualquer tipo de ensaio, depende da confiabilidade no reconhecimento das condições de contorno (medida das variações de  $e^p$  e  $i^q$  nos limites dos sistemas) e da exactidão do método de integração dos relacionamentos diferenciais. Em acréscimo uma única grandeza influente  $i^q$  pode eventualmente introduzir variações em mais de uma grandeza de estado  $e^p$  dificultando a interpretação do ensaio. Na realidade, para evitar formulações complicadas na integração dos relacionamentos diferenciais (limitações de ordem teórica) ou para contornar a impossibilidade material de conhecer com precisão a evolução temporal e espacial das grandezas  $i^q$  e  $e^p$  (limitações de ordem prática), a interpretação dos ensaios requer a adopção de hipóteses mais ou menos simplificadoras (constância

de  $C^{p,q}$ , homogeneidade, isotropia, etc...) compatíveis com a importância técnica e económica dos seus objectivos. Contudo, apesar das simplificações introduzidas, a determinação das propriedades  $C^{p,q}$  e  $R^{q,p}$  mediante ensaios adequados sempre envolve um consumo significativo de tempo e energia. Consequentemente a avaliação directa e rotineira de propriedades físicas como actividade integrante de metodologias de classificação não constitui uma proposição atraente. Entretanto, a sua estimativa indirecta através dos resultados de uma modalidade peculiar de ensaios muito simples, denominados *ensaios tecnológicos*, constitui uma opção tentadora. Tais ensaios quantificam a resposta, impropriamente designada por *propriedade tecnológica*, dos meios rochosos aos mais variados estímulos provocados por técnicas e equipamentos padronizados (vide Tabelas IV e V). As propriedades tecnológicas, normalmente reportadas sob forma de índices tradutores de propriedades  $P^{p,q}$  ou eventualmente, de variações de grandezas  $e^p$  mensuradas no equipamento ou no meio rochoso, reflectem tanto a integração das propriedades físicas intervenientes no ensaio, quanto à sua tecnologia específica. Ocasionalmente, o conhecimento de propriedades físicas revela pouca utilidade, quando índices adequados favorecem uma apreciação mais objectiva do comportamento dos meios rochosos através de ensaios tecnológicos simuladores da relação causa-efeito sob exame (p. ex.: ensaio de abrasão).

O conceito de propriedade tecnológica admite uma interpretação flexível. Por exemplo, pressupondo a sondagem à rotação como modalidade de teste tecnológico, os índices de recuperação modificados (Kiruna, RQD, etc...) podem ser qualificados como "índices tecnológicos" quando a técnica e o equipamento de perfuração são razoavelmente padronizados.

A relativa simplicidade dos ensaios tecnológicos (relativa em comparação aos ensaios para determinação das propriedades físicas) estimula o uso de índices tecnológicos como valores directores (critérios classificadores) em metodologias de classificação e indicadores do carácter das propriedades físicas (como funcionam os limites de consistência na metodologia da Classificação Unificada de Solos).

### *Interdependência de propriedades físicas*

Comummente, durante a fase de caracterização e classificação de meios rochosos, em particular nos estágios iniciais de desenvolvimento da estruturação

Basic Physical Properties of Rocks

Properties	Basic parameter	Symbol	Unit of measurement	Definition
Density	Apparent specific gravity	$\gamma$ (gamma)	$\text{g/cm}^3$ ( $\text{N/m}^3$ )	Weight of a unit volume of rock in its natural state (with its pores, joints, etc.)
	Porosity	$P$		Relative volume of all pores contained in a unit volume of rock
Mechanical	Ultimate compressive strength	$\sigma_{\text{com}}$ (sigma)	$\text{kg/cm}^2$ ( $\text{N/m}^2$ )	Critical value of uniaxial compressive stress at which a rock breaks
	Ultimate tensile strength	$\sigma_{\text{ten}}$	$\text{kg/cm}^2$ ( $\text{N/m}^2$ )	Critical value of uniaxial tensile stress at which a rock breaks
	Young's modulus	$E$	$\text{kg/cm}^2$ ( $\text{N/m}^2$ )	The ratio of the acting longitudinal stress to the corresponding relative longitudinal strain (conventional stress, at which a specimen experiences relative elastic strain, equivalent to unity)
	Poisson's ratio	$\nu$ (nu)	-	The ratio of elastic longitudinal strain to elastic lateral strain under normal uniaxial stress (ratio of lateral deformation to longitudinal deformation)
Thermal	Thermal conductivity	$\lambda$ (lambda)	$\text{W/m. } ^\circ\text{C}$	Quantity of heat passing in unit time through unit section in a direction perpendicular to that section with a difference of temperature of $1^\circ\text{C}$ over unit distance
	Specific heat	$c$	$\text{J/kg. } ^\circ\text{C}$	The amount of heat required to raise the temperature of 1 kg of a substance through $1^\circ\text{C}$
	Coefficient of linear expansion (expansivity)	$\beta$ (beta)	$1/^\circ\text{C}$	The percentage increase in the dimensions of a body on heating through $1^\circ\text{C}$
Electromagnetic	Electrical resistivity or specific resistance	$\rho$ (rho)	ohm.m	The reciprocal of the intensity of a current passing through unit area of a specimen at an electric field strength in the specimen equal to unity
	Dielectric constant or relative permittivity	$\epsilon$ (epsilon)	-	Coefficient showing by how much the electric field intensity falls when a rock specimen is placed in the field
	Magnetic permeability	$\mu$ (mu)	-	Coefficient showing a change in the intensity of a magnetic field when a rock specimen is brought into it

Physicochemical and Technical Parameters of Rocks,  
Most Commonly Used in Mining

Parameter	Definition
Coefficient of strength (Protodyakonov's scale) $f$	Index characterizing relative resistance of rocks to breakage during extraction; approximately equal to one hundredth of ultimate compressive strength
Hardness $II$ (indentation hardness)	Resistance of rocks to indentation by an indenter
Contact strength $F_c$ , kg/mm <sup>2</sup>	Load at which brittle rupture of rock occurs, when it is pressed over an area of contact of 1 mm <sup>2</sup>
Toughness	Relative index characterizing the resistance of rocks to forces tending to separate them
Abrasiveness $k_{ab}$ , cm <sup>3</sup> /m.kgf	Capacity of rocks to wear away metals by friction, estimated by the volume of the metal lost for a unit path of movement over the rock, when the metal is pressed to the rock under 1 kg pressure
Crushability (breakability)	Consumption of power for dynamic crushing of a unit volume of rock
Drillability (unit progress of drilling), m/min	Degree of resistance of rock to breaking by drilling tool, expressed by the length of blast hole drilled in unit time
Blastability (unit consumption of explosive), kg/m <sup>3</sup>	Degree of resistance of rock to breaking by blasting, expressed by the amount of explosive consumed to break 1 m <sup>3</sup> of rock in a mass
Unit amount of drilling, m/m <sup>3</sup>	Number of metres of blast holes needed to break 1 m <sup>3</sup> of rock in a mass
Unit force of cutting	Force developed by the blade used in cutting, referred to the unit of its length
Coefficient of brittleness	Parameter equal to the ratio of the work done to strain a rock purely elastically to the overall work done to break the specimen
Coefficient of plasticity	Parameter equal to the ratio of the total work done to break a specimen to the work done to cause elastic strains before failure
Water permeability (coefficient of percolation) $k_p$ , m/day	Rate of percolation of water at gradient of pressure equal to unity
Natural moisture content	Quantity of water contained in rocks in natural conditions of occurrence; equal to the ratio of its weight in a rock to the weight of dry rock
Moisture capacity $\omega$	Capacity of rock to absorb water, expressed by the ratio of the weight of the water contained in a rock to the weight of dry rock

Parameter	Definition
Coefficient of water saturation $k_{ws}$	Index showing the degree of saturation of rock with water and equal to the ratio of the natural moisture content of rock to its total moisture capacity
Yield of water $\xi$ (xi)	Quantity of water outflowing from a rock under the action of gravitational forces; equal to the difference between total molecular moisture capacity and maximum moisture capacity
Wettability or wetting capacity (boundary angle) $\theta$ (theta)	Capacity of rock to be coated with a film of liquid, characterized by the angle between the plane of a solid and the tangent to the surface of a drop drawn from the point of its contact with the body
Swelling	Ability of rock to increase in volume with water saturation, evaluated by the ratio of the volume of the swelled rock to its original volume
Softening or soaking (water-proofness)	Decrease in the strength of rocks with water saturation, determined by the ratio of ultimate strengths of rocks before and after saturation with water
Shrinkage	Capacity of rock to decrease in volume due to evaporation of moisture
Lower limit of plasticity of ground	Minimum moisture content at which brittle failure of ground does not occur
Upper limit of plasticity of ground	Minimum moisture content at which ground flows
Bulk weight $\gamma_b$ , kg/m <sup>3</sup>	Weight of unit volume of loose rock in its heaped-up state
Granulometric composition	A characteristic of loose rocks showing the percentage content of particles of different coarseness (the proportion of grade sizes)
Angle of repose $\varphi_0$	The angle formed by the free surface of loose rock with the horizontal plane
Looseness factor $k_l$	Ratio of a volume of loosened rock to its volume in a pillar
Angle of internal friction $\varphi$	The ratio of the increments of maximum shearing and normal stresses under breaking loads
Cohesion (cohesive strength) $K$ , kg/cm <sup>2</sup>	Strength of rock in pure shear (without axial pressures)

conceptual da transformação  $S_0 \rightarrow S_f$ , várias modalidades de parâmetros de fácil obtenção são utilizados no estabelecimento de um código de linguagem comum, como informações directoras do zoneamento do maciço rochoso (distinção de classes no interior do maciço) e, frequentemente, para uma primeira estimativa de propriedades físicas, seguida do planeamento dos futuros ensaios de campo e laboratório. Tais estimativas perdem gradualmente interesse com a realização progressiva dos ensaios. Constituem normalmente índices tecnológicos ou quantificadores de feições litológicas e estruturais. A sua utilização para estimar propriedades acusa todavia, algumas limitações. Segundo Rzhovsky (1966) a dependência de uma propriedade física  $P^{p,q}$  em função da composição material  $M$  e do arranjo estrutural  $E$ , sendo  $P_0^{p,q}$  e  $k^{p,q}$  respectivamente, um valor de referência da propriedade e uma constante, assume a expressão genérica :

$$P^{p,q} = k^{p,q} \cdot P_0^{p,q} \cdot f^{p,q}(M) \cdot \varphi^{p,q}(E)$$

Quando a propriedade  $P^{p,q}$  admite uma representação tensorial, a expressão genérica permanece válida para as suas componentes.

Considerando duas propriedades de ordem tensorial idêntica :

$$P^{p,q} = k^{p,q} \cdot P_0^{p,q} \cdot f^{p,q}(M) \cdot \varphi^{p,q}(E)$$

$$P^{r,s} = K^{r,s} \cdot P_0^{r,s} \cdot F^{r,s}(M) \cdot \vartheta^{r,s}(E)$$

a sua interdependência adquire uma das seguintes formas, sendo  $A$  e  $B$  constantes:

- quando:  $f \neq F, \varphi \neq \vartheta$   
 $P^{p,q} = A \cdot X_1(E, P^{r,s}) \cdot \varphi^{p,q}(E)$  para  $M = C^{te}$   
 $P^{p,q} = A \cdot F^{p,q}(M) \cdot X_2(M, P^{r,s})$  para  $E = C^{te}$
- quando:  $f \approx F, \varphi \neq \vartheta$   
 $P^{p,q} = B \cdot X_3(E) \cdot P^{r,s}$  para  $M = C^{te}$
- quando:  $f \neq F, \varphi \approx \vartheta$   
 $P^{p,q} = B \cdot X_4(M) \cdot P^{r,s}$  para  $E = C^{te}$
- quando:  $f \approx F, \varphi \approx \vartheta$   
 $P^{p,q} = B \cdot P^{r,s}$  para  $M, E = C^{tes}$

As principais conclusões decorrentes da análise dos relacionamentos entre propriedades físicas (ou, com algumas reservas, entre propriedades físicas e índices tecnológicos ou quantificadores de feições litoestruturais) são as seguintes:

- i) Conforme assinalado anteriormente, as propriedades físicas dos meios rochosos dependem basicamente da sua composição material e arranjo estrutural. Quando propriedades e factores internos admitem um relacionamento funcional, tensores  $P^{p,q}$  de ordem  $m$  representativos de propriedades de estruturas simples (cuja associação origina estruturas complexas) normalmente resultam do produto de tensores  $P_0^{p,q}(M)$  e  $\varphi^{p,q}(E)$  respectivamente em ordem  $\leq m$  zero e  $\leq 2$ .
- ii) A interdependência de propriedades  $P^{p,q}$  e  $P^{r,s}$  envolve tanto o factor composição  $M$  quanto o factor estrutura  $E$ . Cada par  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$  acusa várias modalidades de relacionamento: seja com o factor estrutura constante, evidenciando a influência isolada do factor composição; seja a situação inversa; seja com ambos os factores constantes.

Como os relacionamentos funcionais tradutores da influência dos factores  $M$  e  $E$  permanecem parcialmente ignorados, a estimativa de propriedades  $P^{p,q}$  e/ou o estabelecimento de relacionamento  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$  procedem de análises de regressão envolvendo medidas de campo ou laboratório de propriedades físicas, índices tecnológicos e quantificadores de feições litoestruturais. Contudo, a maior ou a menor confiabilidade de tais regressões (algumas ocasionalmente propostas como integrantes de metodologia de classificação) decorre da maior ou menor atenção dada aos aspectos precedentemente comentados. Em princípio, considerando o interesse de estimar propriedades  $P^{p,q}$  ou estabelecer relacionamentos  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$ , permanecem razoavelmente válidas as seguintes observações:

- i) Quantificadores não direccionais de feições litoestruturais autorizam apenas a estimativa de propriedades tensoriais de ordem zero. No caso de propriedades de ordem  $>0$ , autorizam a estimativa de apenas um invariante (geralmente sob a forma de média geométrica de autovalores). Quantificadores direccionais permitem a estimativa de algumas componentes de propriedades tensoriais de ordem  $>0$ .
- ii) A estimativa adequada de propriedades físicas requer o uso simultâneo de quantificadores litológicos e estruturais. A negligência do factor composição ou do factor estrutura implica no aumento da dispersão

dos valores estimados, tanto mais acentuada quanto maior a influência do factor abandonado.

iii) Interdependência estreita de propriedades físicas  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$  (ou com menores restrições, de propriedades físicas  $P^{q,p}$  e índices tecnológicos  $I^{r,s}$ ) requer alguma invariância dos factores M,E, bem como alguma similitude nos relacionamentos funcionais  $f$ ,  $F$  e  $\varphi$ ,  $\emptyset$ . Consequentemente a estimativa de propriedades  $P^{p,q}$  em função de índices  $I^{r,s}$  acusa uma redução de confiabilidade directamente proporcional à extensão dos desvios aos condicionantes mencionados.

### *Funcionalidade das classificações*

As propriedades físicas dos meios rochosos dependem, em última análise, dos factores geológicos responsáveis por sua composição material e arranjo estrutural. Considerando a imensa variedade de associações de expressões litológicas, processos de meteorização, estilos tectónicos, condições morfoclimáticas, influências hídricas superficiais e subsuperficiais, estados de tensão, etc..., parece inviável idealizar classificações geotecnológicas universais sem comprometimentos de eficiência em diversas situações. Conquanto as apreciações constantes dos itens anteriores evidenciem alguma validade universal, cumpre examinar a eventual necessidade de estruturar um modelo-director de sistemas classificadores passível de originar variantes adaptáveis a diferentes condições geológicas. O modelo-director trataria os critérios fundamentais de classificação com muita simplicidade para assegurar um elevado grau de universalidade ao sistema, enquanto os modelos-variantes complementaríam os critérios conforme as suas necessidades, modificando a sua importância relativa e/ou introduzindo condicionantes particulares.

Em princípio, os modelos variantes poderão considerar *factores litológicos*, *estilos tectónicos* e *condições morfoclimáticas*. Em acréscimo a totalidade dos modelos-variantes deverá incluir instruções relacionadas com a caracterização das *feições singulares típicas*, influência dos *regimes hídricos superficial e sub-superficial*, efeitos dos *estados de tensão* instalados e residuais.

Os factores litológicos poderão ser resumidos com a consideração dos seguintes grupos de espécies rochosas:

sedimentos *clásticos*, psamitos, psefitos e pelitos (espécies típicas: conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos).

- sedimentos *originados por precipitação química* (espécies típicas: calcários e dolomitos, como caso particular: evaporitos)
- sequências *plutônicas, granitos e migmatitos* (espécies típicas: granitos, dioritos, gnaisses e xistos cristalinos)
- rochas *ígneas extrusivas e associações vulcânicas* (espécie típica: basalto).

A classificação precedente, embora acuse alguma divergência em relação a classificação genética tradicional, define agrupamentos com características próprias susceptíveis de aceitarem sistemas classificadores comuns.

Quanto aos estilos tectónicos, convém distinguir os domínios de *orogénese*, assinalados por feições estruturais relativamente complicadas, dos *blocos rígidos*, mais simples. Cada tipo exigirá uma modalidade de tratamento específico.

Enquanto os factores precedentes assumem relevância no tratamento de obras subterrâneas, as condições morfoclimáticas, ao introduzirem variações nos processos geodinâmicos externos responsáveis por múltiplas expressões de meteorização, erosão, transporte e sedimentação, adquirem importância primordial na consideração de obras de superfície. Dentre os vários ambientes morfoclimáticos convém distinguir os seguintes:

- ambientes de erosão *glacial* (dos tipos alpino e continental) e *periglacial*: pouco importantes em termos de extensão
- ambientes de erosão *subtropical*: com a consideração das variantes “normal” e mediterrânea
- ambientes de erosão *intertropical*: com a consideração das variantes *equatorial* e regime propriamente *tropical*
- ambientes *áridos e semiáridos*
- ambientes de erosão *litorânea*.

Embora a classificação proposta admita algumas críticas, a sua utilização permitirá tratar com eficiência e propriedade as ocorrências peculiares a cada ambiente regional.

Finalmente, na proposição de variantes de sistemas classificadores, *cumpre sempre considerar a sua utilização*. Aparentemente, convirá elaborar modelos adequados aos seguintes tipos de transformação  $S_o \rightarrow S_f$ :

- mineração e desmonte
- obras de superfície: fundações e encostas
- obras de subsuperfície: túneis e cavernas

Com efeito, tais transformações envolvem objectivos diferenciados, consequentemente com operações  $I \xrightarrow{P} E$  e classificações específicas.

#### 4 – CONCLUSÕES

As principais conclusões relacionadas com classificações geotecnológicas de meios rochosos, decorrentes das apreciações precedentes são as seguintes:

##### *Quanto ao seu carácter*

- i) Uma classificação geotecnológica de meios rochosos pretende atender a dois objectivos essenciais:
  - favorecer a *estruturação do campo de actuação das operações de engenharia* na fase conceptual
  - subsistir como *código de linguagem* na fase de materialização.
- ii) Considerando o carácter dominante das operações de engenharia de âmbito geotecnológico, essencialmente de natureza física, os *critérios de classificação* devem necessariamente resultar da consideração dos *factores influentes nas suas propriedades físicas*.
- iii) Considerando o carácter dinâmico da transformação  $S_o \rightarrow S_f$ , da fase de concepção à fase de materialização, os modelos de classificação devem também acusar carácter idêntico, admitindo maior ou menor complexidade em função do aumento ou redução de necessidades de cada estágio de transformação, bem como da disponibilidade de recursos de investigação de campo e laboratório.
- iv) Em face da evolução das necessidades humanas, da ciência e da tecnologia, as metodologias de classificação devem ser consideradas de carácter transitório sujeitas a profundas modificações, sob o risco de assumirem um carácter prejudicial caso consolidem como hábitos imutáveis.

##### *Quanto aos seus princípios e bases*

- a) Os sistemas classificadores envolvem duas operações distintas: *classificação*, agrupamento de realidades cujas características são

conhecidas, *caracterização*, evidenciação das características previamente desconhecidas de uma realidade.

b) O valor de um sistema classificador resulta da apreciação do valor dos critérios adoptados na seguinte ordem de importância :

- sua exaustividade
- ausência da ambiguidade
- sua simplicidade operacional
- seu valor dicotomisante
- quantidade reduzida de critérios.

c) Os valores correspondentes às frequências mínimas de distribuições multimodais de características estabelecem as fronteiras ideais das classes dos sistemas classificadores.

d) As variantes usuais de classificações obedecem normalmente a um dos seguintes cânones :

- sistema unidimensional linear
- sistema unidimensional plurilinear
- sistema bidimensional
- sistema tridimensional.

Os sistemas polidimensionais são evitados por ultrapassarem as limitações humanas de apreensão imediata.

e) A elaboração eficiente de classificações resulta do uso alternado de processos indutivos e dedutivos consoante o seguinte roteiro :

- i) definição e organização de observações sistemáticas
- ii) indução de uma estrutura apoiada no conjunto de observações sistemáticas
- iii) dedução de relacionamentos entre os elementos estruturais previamente induzidos
- iv) verificação da adequabilidade da estrutura e seus interrelacionamentos, mediante redefinição, reobservação, reindução, rededução, reverificação, etc...

f) A operação de caracterização, quando considerada no seu sentido mais amplo, favorece a definição das características ignoradas de uma classe em função das características conhecidas de uma realidade, mediante um processo indutivo, ou a operação inversa, dedutiva, de definição

das características de uma realidade em função da sua vinculação a uma determinada classe.

- g) A estruturação indutiva de observações sistemáticas conserva um carácter impessoal e garante uma confiabilidade quantificável quando recorre aos métodos de inferência estatística.
- h) A comunicação escrita de metodologias de classificação deve incluir definições formais relacionadas com as operações de classificação, com consequente estabelecimento de um código de linguagem, de preferência com associações alfanuméricas, bem como definições operacionais referentes aos procedimentos de caracterização, com detalhamento da sua técnica e eventual relacionamento do instrumental necessário.
- i) Em comunicações escritas, a fixação prévia dos domínios e ambientes de aplicação dos termos em definição ou usados para definir, contribui para a redução da incerteza provocada por possíveis conotações.

#### *Quanto às propriedades físicas dos meios rochosos*

- a) As propriedades físicas  $P^{p,q}$  dos meios rochosos nem sempre assumem expressões simples, traduzíveis em linguagem matemática por grandezas escalares. A adopção de modelos incompletos: principais invariantes, autovalores e autovetores mais importantes, índices de anisotropia, etc., substituem os modelos tensoriais adequados, porém mais complexos, exigidos pelo rigor físico e matemático.
- b) As propriedades físicas  $P^{p,q}$  dos meios rochosos dependem de factores internos: basicamente a sua composição material  $M$  e arranjo estrutural  $E$ ; bem como de factores externos: nível e tempo de actuação das solicitações ambientais.
- c) Para estruturas simples definidas por operações de simetria as componentes do tensor  $P^{p,q}$  são invariantes para transformações coordenadas correspondentes às operações de simetria (princípio de Neumann). Para estruturas complexas, resultantes da superposição de estruturas simples, as componentes dos tensores  $P^{p,q}$  decorrem da associação (obedecendo a normas operacionais compatíveis com a natureza da propriedade analisada) das componentes dos tensores elementares representativos das propriedades das estruturas simples (princípio de Curie).

d) Quando propriedades e factores internos admitem um relacionamento funcional, tensores elementares  $P^{p,q}$  de ordem  $m$  representativos de propriedades de estruturas simples (cuja associação origina estruturas complexas) normalmente resultam do produto de tensores  $P_0^{p,q}$ ,  $f^{p,q}(M)$  e  $\varphi^{p,q}(E)$  respectivamente de ordens  $\leq m$ , zero e  $\leq 2$ .

e) A heterogeneidade dos meios rochosos decorrente de variações espaciais das propriedades  $P^{p,q}$ , normalmente assinalada por frequentes descontinuidades, constitui um dos principais factores determinantes da complexidade da sua apreciação.

f) Meios heterogêneos são assimiláveis a meios quase-homogêneos quando acusam flutuações irregulares das suas características (noção de heterogeneidade) assinaladas por períodos de variação inferiores à décima parte das suas dimensões médias.

g) Os ensaios de laboratório, os ensaios de campo e as zonas influenciadas por obras de engenharia envolvem diferentes domínios quase-homogêneos de consideração dos meios rochosos quando as suas propriedades são, respectivamente, apreciadas na escala petrográfica, estrutural e do maciço.

h) Meios rochosos quase-homogêneos nunca acusam invariância de propriedades  $P^{p,q}$ , porém maior ou menor dispersão dos seus valores em torno de uma tendência central.

i) Enquanto as propriedades físicas  $P^{p,q}$  independem da tecnologia dos ensaios (ao menos idealmente), as propriedades tecnológicas  $I^{r,s}$ , reflectem tanto a integração de propriedades físicas intervenientes nos ensaios quanto a sua tecnologia específica.

j) A relativa simplicidade dos ensaios tecnológicos (relativa em comparação aos ensaios para determinação das propriedades físicas) estimula o uso de índices tecnológicos, associados a quantificadores de feições lito-estruturais, como critérios de classificação de meios rochosos, bem como para estimar as suas propriedades físicas.

k) A interdependência de propriedades  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$  (ou com menores restrições índices  $I^{r,s}$ ) envolve funções  $f^{p,q}(M)$  e/ou  $\varphi^{p,q}(E)$  dependentes dos quantificadores dos factores composição  $M$  e estrutura  $E$ . Cada par  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$  acusa várias modalidades de relacionamento:

seja com o factor estrutura constante, evidenciando a influência isolada do factor composição, seja a situação inversa, seja com ambos os factores constantes.

l) Quantificadores não direccionais de feições litoestruturais autorizam apenas a estimativa de propriedades tensoriais de ordem zero. No caso de propriedades de ordem  $>0$ , autorizam a estimativa de apenas um invariante (geralmente sob a forma de média geométrica de autovalores). Quantificadores direccionais permitem a estimativa de algumas componentes de propriedades tensoriais de ordem  $>0$ .

m) A estimativa adequada de propriedades físicas requer o uso simultâneo de quantificadores litológicos e estruturais. A negligência do factor composição ou do factor estrutura implica no aumento da dispersão dos valores estimados, tanto mais acentuada quanto maior a influência do factor abandonado.

n) Interdependência estreita de propriedades físicas  $P^{p,q}$ ,  $P^{r,s}$  (ou com menores restrições, de propriedades físicas  $P^{q,p}$  e índices tecnológicos  $I^{r,s}$ ) requer alguma invariança dos factores  $M, E$ , bem como alguma similitude nos relacionamentos funcionais  $f, F$  e  $\varphi, \Phi$ . Consequentemente a estimativa de propriedades  $P^{p,q}$  em função de índices  $I^{r,s}$  acusa uma redução de confiabilidade directamente proporcional à extensão dos desvios aos condicionamentos mencionados.

o) A consideração da utilidade específica da classificação, bem como da diversidade de condições geológicas, sugerem a conveniência de estruturar um modelo-director de sistema classificador passível de originar modelos-variantes efectivamente funcionais, adaptáveis, em princípio, aos seguintes condicionamentos circunstanciais:

- quanto aos tipos de transformação  $S_0 \rightarrow S_f$ : *mineração e desmonte; obras de superfície: fundações e encostas; obras de sub-superfície: túneis e cavernas*
- quanto aos factores litológicos: *sedimentos clásticos; sedimentos originados por precipitação química; sequências plutónicas, granitos e migmatitos; rochas ígneas extrusivas e associações vulcânicas*
- quanto ao estilo tectónico: *domínios de orogénese e tectónica de blocos rígidos*

quanto às condições morfoclimáticas: *glacial e periglacial; subtropical; intratropical; árida e semi-árida; litorânea.*

### *Considerações finais*

O acto de classificar envolve as seguintes etapas:

- i) evidenciação dos critérios essenciais de uma realidade mediante operações de caracterização
- ii) tipificação dessa realidade em função dos critérios evidenciados, mediante operações de classificação.

As operações de caracterização integrantes de metodologias de classificação objectivam apenas a emergência dos critérios essenciais. A consideração dos arquétipos referentes a cada classe permite inferir do restante das características das realidades tipificadas. Um roteiro de classificação, apesar de incluir um roteiro de caracterização parcial, difere fundamentalmente de um roteiro de caracterização integral: considera apenas as operações de caracterização necessárias e suficientes para classificar.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - BERLO, D. K. - "The Process of Communication", Holt, Rinehart and Wilson, Inc. New York, 1960.
- 2 - COATES, D. F. - "Classification of Rocks for Rock Mechanics", Int. J. Rock Mech. Sci. - Vol. I, pág. 421/429.
- 3 - COATES, D. F. - "Rock Mechanics Principles", Dept. of Mines & Technical Surveys, Ottawa, 1966.
- 4 - COATES, D. F., PARSONS, R. C. - "Experimental criteria for classification of rock substances. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 3, 1966.
- 5 - COTTIS, G. I., DOWELL, R. W., FRANKLIN, J. A. - "A rock classification system applied in civil engineering" Civil Engineering and Public Review, June 1971, Part I, 611/614, pag, and Part 2, 737/743 pag.
- 6 - COON, R. F. MERRITT, A. H. - "Determination of the in situ modulus of deformation of rock", ASTM, fev. 1969, 154/173 pag.
- 7 - DEERE, U. - "Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes" - Rock Mechanics and Engineering Geology, 1963, pag. 16/22.

- 8 - DUFFAUT, P. - "La position des bétons et mortiers par rapport à la classification mécanique des roches selon Don Deere" Revue des Matériaux et Construction et des Travaux Publics, ago/set. 70, pag. 659/660.
- 9 - DUFFAUT, P. - "Essai de description structurale des roches à l'usage de l'ingénieur", Premier Congrès International de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur - Paris, France, 8/11 sep. 1970, Tome 1, pag. 295/300.
- 10 - IIDA, R., OKAMOTO, R. - "Geological Rock Classification of Dam Foundation", Vol. 1, Joint Committee on Rock Mechanics, 1970, pag. 161/163.
- 11 - JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. - "Fundamentals of Rock Mechanics", Methuen, London, 1968.
- 12 - KRAUSE, G. H., ZERNEKE, K. L., SCOTT, J. B., JOHNSON, W. S. NELSON, J. S. "Rock Mechanics - Theory and Practice" - Eleventh Symposium on Rock Mechanics - Chapter 10 "Approach to Classifying Rock for Tunnel Liner Design".
- 13 - LADANYT, B. - "Uniaxial Testing of Rocks for Classification Purposes" - Department of Mines and Technical Surveys Mines Branch, September, 1964, 2/39 pag.
- 14 - MELLO MENDES, F. - "Mecânica das Rochas", Secção de Folhas de A.E.I.S.T., 1969.
- 15 - MENCL, V. - "Classification of solid rock masses", International Büro für Gabirgsmechanik, 1968.
- 16 - MOLES, A. A. - "La Création Scientifique", Editions René Kister, Genève, 1957.
- 17 - OBERT, L., DUVALL, W. I. - "Rock Mechanics and the Design of Structure in Rock", Wiley, New York, 1967.
- 18 - OLIVEIRA, R. - "Classificação de Terrenos, Curso de Geologia de Engenharia, LNEC, Lisboa, nov. 1970.
- 19 - ONERADA, T. F. - "Activities on Rock Mechanics in the Japan Soc. of Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, Joint Committee on Rock Mechanics, 1970, pag. 3/7.
- 20 - PATCHING, T. H., COATES, D. F. - "A Recommended Rock Classification for Rock Mechanics Purposes", The Canadian Institute of Mining and Metallurgy and the Mining Society of Nova Scotia, Vol. 71, 1968, pag. 305/307.
- 21 - RATS, M. V., CHERNYASHOV, S. N. - "Statistical Aspect of the Problem on the Permeability of the Jointy Rocks", Proc. of the Dubrovnik Symp, Hydrology of Fractured Rocks, 1965, pag. 227/235.
- 22 - ROCHA, M. - "Mecânica das Rochas", Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa, 1971.
- 23 - RZHEVSKY, Y., NOVIK, G. - "The Physics of Rocks", Mir Publishers, Moscou, 1971.
- 24 - STAPLEDON, D. H. - "Discussion of the paper classification of Rock Substances (D. F. Coates), Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 5, 1968.
- 25 - SZECHY, K. - "The Art of Tunnelling", Akademiai Kiado, Budapest, 1966.
- 26 - TALOBRE, J. A. - "La Méchanique des Roches", Dunod, Paris, 1957.

- 27 - TERZAGI, K. - "Introduction to Tunnel Geology, in Rock Tunneelling with Steel Supports",  
by R. Proctor and T. White, Yougstown Printing, Youngstown, Ohio, 1946.
- 28 - VAN-DER VLIS, A. C. - "Rock Classification by a simple hardenss test, Proceedings  
2nd Int. Congress of Rock Mechanics, Belgrado, 1970.
- 29 - VOIGHT, B. - "On the Functional Classification of Rocks for Engineering Purposes"  
- International Symposium on Rock Mechanics", Madrid, 1968, 131/135 pag.
- 30 - ZIENKIEWICZ, O. C., STAGG, K. G. (Ed.) - "Rock Mechanics in Engineering Practice",  
Division of Civil Engineering School of Engineering, University of Wales,  
Swansea, 1968.