

NOTAS SOBRE A FRICÇÃO ENTRE PARTÍCULAS DE MATERIAIS GRANULARES*

Notes on interparticles friction of granular materials

por
ÚLPPIO NASCIMENTO*

RESUMO – Analisa-se e comenta-se a principal bibliografia sobre o assunto com vista ao estabelecimento da situação actual do problema. Resume-se essa situação no que respeita aos seguintes aspectos: sistemas de ensaio, condições de ensaio, materiais ensaiados e resultados obtidos, leis e outras constatações experimentais sobre fricção, e teorias da fricção.

SYNOPSIS – The most important literature on the subject is analysed with a view to establishing the present situation of the problem. This situation is summarized as regards the following aspects: test systems, test conditions, tested materials, results obtained, laws and other experimental verifications on friction, and friction theories.

1 – INTRODUÇÃO

Para melhorar os métodos de caracterização dos maciços constituídos por blocos ou por solos granulares incoerentes, quanto à sua resistência ao corte, interessa progredir no conhecimento racional das relações entre essa resistência e os parâmetros básicos de que ela efectivamente depende. Quer dizer, interessa desenvolver a teoria da resistência desses maciços o que, depois de identificados os mecanismos que determinam essa resistência, envolve a determinação dos parâmetros característicos desses mecanismos e o estabelecimento das relações quanti-

* Trabalho recebido em Outubro 1977. A sua discussão está aberta durante um período de três meses.

* Investigador, Chefe do Serviço de Geotecnia do LNEC.

tativas que a partir desses parâmetros permitam calcular a referida resistência. Por outras palavras, há todo o interesse em progredir no sentido do estabelecimento duma equação constitutiva de solos granulares.

Com esta orientação têm-se vindo a realizar no LNEC estudos sobre os mecanismos de atrito interno [12], sobre as relações das forças de contacto entre partículas dum maciço com o estado de tensão do contínuo equivalente a esse maciço [13], sobre a influência da tensão intermédia no atrito interno dum maciço granular [14] e ainda sobre a determinação do ângulo de fricção entre partículas de materiais granulares por meio dum goniómetro especialmente concebido para o efeito [15].

No presente trabalho, que se integra no tema “Estudos relativos ao atrito interno de materiais granulares e maciços de blocos”, incluído no Plano de Fomento do triénio 1974/1976, resumem-se notas de leitura da principal bibliografia sobre fricção entre partículas de materiais granulares bem como da sua análise e comentário dentro da perspectiva de teorização, acima referida, que orienta a investigação.

2 – NOTAS SOBRE A PRINCIPAL BIBLIOGRAFIA

2.1 – *Terzaghi, K. 1925*

A fricção entre partículas, um dos fenómenos básicos da mecânica dos solos, chamou, evidentemente, a atenção de Terzaghi logo num dos seus primeiros trabalhos em que aborda as causas físicas da proporcionalidade entre pressão e resistência friccional [1]. Nesse trabalho põe Terzaghi a seguinte interrogação: Quais são as causas físicas dessa proporcionalidade tão claramente definida? A resposta a essa questão é dada nos termos das seguintes hipóteses:

a) – Quando as superfícies de contacto são quimicamente puras, isto é, não são separadas por qualquer película de lubrificante, a fricção é causada por interações físico-químicas entre os corpos em contacto, as quais formam, por assim dizer, uma ponte firme ou semi-firme entre as superfícies, e a fricção é a resistência ao corte dessa ponte.

b) – O contacto efectivo entre os corpos não se dá em toda a superfície bruta de contacto, mas sim, apenas, em áreas muito menores, em forma de ilhas, cuja superfície designa por superfície útil de contacto.

c) – A pressão nessa superfície útil de contacto é igual em ordem de grandeza à resistência à compressão do mais fraco dos dois materiais em contacto.

d) – Como a pressão de contacto só pode ser transmitida de molécula a molécula duma superfície à outra dos materiais em contacto, as esferas de influência das moléculas em ambos os lados do plano de separação devem penetrar umas nas outras. Esta penetração requer uma mudança de orientação dos eixos das moléculas afectadas, e essa mudança só pode dar-se sob a influência duma pressão da ordem de grandeza da resistência à compressão do material. A resistência à compressão não pode ser excedida porque qualquer acréscimo que a ultrapasse causa deformações plásticas e, por consequência, um aumento da superfície útil de contacto. Pode portanto avaliar-se a área da superfície útil de contacto dividindo a carga total pela resistência à compressão do material mais brando.

Implícita nestas hipóteses encontra-se porém a seguinte contradição apontada pelo próprio Terzaghi:

Não se pode facilmente imaginar que no contacto entre os corpos haja pontes com resistência ao corte sem que essas mesmas pontes tenham também resistência à tracção; no entanto está empiricamente estabelecido que a fricção se desenvolve quando há deslizamento e também que nenhuma resistência se desenvolve quando há separação.

Segundo a explicação de Terzaghi, a contradição é apenas aparente. Com efeito, tanto a resistência à fricção como a resistência à separação dessas pontes são proporcionais à superfície útil de contacto, a qual por sua vez, é proporcional à carga que aperta entre si os materiais em contacto. Quando se aplica essa carga, a superfície útil de contacto aumenta e, com ela, aumenta também tanto a fricção das referidas pontes, o que produz efeitos observáveis, como também a resistência à tracção dessas mesmas pontes, muito embora sem que isso produza efeitos observáveis. Quando se retira a carga, e desde que a coesão do material exceda por pouco que seja a adesão resultante da resistência à tracção das ditas pontes, a junta entre os materiais abrirá por recuperação elástica, a superfície útil de contacto tornar-se-á extremamente pequena e, consequentemente, tornar-se-á desprezável a resistência à separação dos materiais.

2.2 – *Tschebotarioff e Welch, 1948*

Com o fim de determinar directamente a fricção entre grãos de solos de modo a eliminar os efeitos do travamento entre eles (interlocking), foram feitos

ensaios sobre quatro minerais (quartzo, calcite, pagodite e pirofilite [2]. Os ensaios foram realizados numa caixa de corte directo fixando com gesso na caixa superior um bloco do mineral a ensaiar, com cerca de 2 polegadas cúbicas, e tendo a face inferior polida. Na caixa inferior foram embebidos, em argamassa de cimento, pequenos fragmentos do mesmo mineral do bloco. Os ensaios foram realizados com os minerais em três condições: secos, húmidos e completamente submersos. Também se realizaram ensaios com dois minerais diferentes. Nestes casos o mineral mais duro montou-se na caixa superior.

No Quadro I apresentam-se os valores médios dos coeficientes de fricção obtidos, dos quais concluem os autores, entre outras coisas, o seguinte:

a) – O coeficiente de fricção entre grãos de quartzo e entre grãos de calcite é sensivelmente igual quando eles estão secos, mas, quando húmidos ou submersos, a fricção aumenta cerca de 4,5 vezes no quartzo e de 2,5 na calcite.

b) – Pelo contrário, nos outros dois minerais ensaiados, o coeficiente de fricção dos minerais húmidos ou submersos é algo inferior ao que têm quando secos.

c) – O coeficiente de fricção entre minerais diferentes pode variar dentro de largos limites e parece depender mais da natureza dos filmes adsorvidos nas respectivas superfícies do que do grau de rugosidade das superfícies dos minerais em contacto.

QUADRO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TSHEBOTARIOFF E WELCH
(Coeficientes de fricção)

MINERAIS	SECOS	HÚMIDOS	SUBMERSOS
Quartzo sobre quartzo	0,106	0,455	0,455
Calcite sobre calcite	0,107	0,268	0,263
Pirofilite sobre pirofilite	0,163	0,120	0,122
Pagodite sobre pagodite	0,198	0,166	0,165
Quartzo sobre calcite	0,098	0,266	0,333
Quartzo sobre pirofilite	0,152	0,194	0,180
Quartzo sobre pagodite	0,179	0,162	0,168
Calcite sobre pagodite	0,168	0,157	0,152
Calcite sobre pirofilite	0,233	0,127	0,134
Pirofilite sobre pagodite	0,179	0,113	0,113

2.3 – *Bowden e Tabor, 1950*

Num tratado sobre a fricção e a lubrificação de sólidos [3] lembram os autores que as duas leis básicas da fricção – que a fricção é proporcional à carga e é independente da área das superfícies de deslizamento – são conhecidas de há muito tempo. Leonardo da Vinci (1454-1519) parece tê-las verificado experimentalmente e Amontons em 1699 redescobriu-as. Coulomb em 1781, verifica as observações de Amontons e faz a distinção clara entre fricção estática – a força requerida para iniciar o deslizamento – e fricção cinemática, a força requerida para o manter. Ele mostra que a fricção cinemática pode ser apreciavelmente menor do que a fricção estática e observa que a fricção cinemática é aproximadamente independente da velocidade de deslizamento (o que por vezes é considerado como uma terceira lei).

Segundo estes autores, Coulomb considerou a possibilidade de a fricção poder ser devida à adesão molecular entre as superfícies, mas rejeitou-a com o fundamento de que, se assim fosse, a fricção deveria ser proporcional à área de deslizamento dos corpos, e está demonstrado que o não é. Concluiu então que a fricção era devida ao travamento (interlocking) das asperezas das superfícies e representava principalmente o trabalho de elevação da carga sobre as cristas dessas asperezas.

Acerca do mecanismo da fricção põem os autores do tratado como primeiro ponto a esclarecer o seguinte: Qual é a área de contacto entre sólidos que são colocados um contra o outro? A experiência mostra que mesmo a superfície mais cuidadosamente preparada contém elevações e depressões que são grandes quando comparadas com as dimensões moleculares. Os sólidos são suportados sobre as cristas das mais altas dessas irregularidades sendo portanto muito pequena a área de contacto íntimo. A área real de contacto é de facto quase independente do tamanho das superfícies e é determinada pela carga, uma vez que, sob a intensa pressão em pontos de contacto localizados, ocorrem deformações plásticas e fluimentos até que a área seja suficientemente grande para suportar a carga.

Outro ponto a esclarecer é a natureza dos estragos causados na superfície. Está demonstrado que nos metais há uma adesão real e soldadura nos pontos de contacto. A força friccional é, em larga medida, a força necessária para cortar estas junções. Esta observação explica a clássica lei da fricção, desde que a área onde se formam estas junções seja sensivelmente independente da área aparente de deslizamento das superfícies e seja directamente proporcional à carga aplicada.

2.4 – Penman, 1953

Com vista ao estudo de um silte constituído em cerca de 90% por partículas de quartzo, realizaram-se ensaios para determinação do ângulo de fricção entre fragmentos relativamente grandes de cristais de quartzo [4]. Os fragmentos foram embebidos em gesso numa caixa de corte. Não se preparou nenhuma superfície especial: as superfícies do quartzo foram apenas lavadas com água e sabão para remover gorduras e depois lavadas com água destilada.

Os ensaios de fricção foram feitos com cargas normais desde 2,96 libras até 151,3 libras o que, tendo a superfície de quartzo em contacto 1,2 polegadas quadradas, significa que se atingiu a pressão máxima de 126 lb/in². Com o fim de aumentar muito mais a pressão, realizaram-se ensaios em que na caixa superior se fixaram com gesso três pequenos fragmentos de quartzo partidos de fresco, os quais deslizaram sobre a superfície de quartzo da caixa inferior. A carga normal foi desde 4,1 libras até 145 libras. Acima de 100 libras começaram a ouvir-se ruídos de esmagamento, e depois do ensaio os três pontos estavam danificados e a superfície inferior riscada.

Os resultados obtidos nos ensaios com as partículas embebidas em água e nos ensaios com elas secas em estufa a 105°C foram os seguintes:

QUADRO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PENMAN
(Ângulos de fricção)

TIPO DE CONTACTO	SATURADAS	SECAS
Em superfícies planas	33°	11°
Em três pontos	carga de 4,1 libras	29°
	carga de 145 libras	19°
		–

Donde o autor conclui que o ângulo de fricção de quartzo sobre quartzo decresce de 33° sob a pressão normal de cerca de 126 lb/in² até 19° sob uma pressão normal muito maior.

2.5 – Rabinowicz, 1961

No seu trabalho [18], relativo à fricção e desgaste entre metais, o autor começa por salientar as limitações da equação que em anos recentes tem dominado a teoria de fricção:

$$f = \frac{s}{p} \quad (a)$$

(f = coeficiente de fricção, s e p , resistência ao corte e dureza do mais mole dos metais em contacto), salientando que ela deve ser modificada de forma a suprir tais limitações. Considera, para esse efeito, o trabalho de adesão W_{ab} dos materiais em contacto, definido pela equação

$$W_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (b)$$

(γ_a e γ_b = energia livre de superfície dos materiais a e b ; γ_{ab} = energia livre de interface, todas por unidade de área).

Nota que são insuficientes os elementos disponíveis sobre o trabalho de adesão dos sólidos, o que não sucede com os líquidos. Refere em seguida os trabalhos de Machlin e Yankee (1954) que comparam o trabalho de adesão W_{ab} de várias combinações de deslizamento com o trabalho de coesão W_{aa} do material mais fraco, e que postulam que não haverá soldadura entre eles durante o deslizamento se $W_{ab} < W_{aa}$, o que é suportado pelos resultados dos seus ensaios, ainda que limitados. Voltando à sua teoria, o autor considera uma aspereza cónica de ângulo Θ pressionada numa superfície plana que se deforma plasticamente, e escreve a expressão da energia total (E) como a soma de três parcelas: o trabalho (positivo) da carga normal correspondente à penetração (x) da aspereza, o trabalho (negativo) de deformação da superfície de dureza p , e o trabalho (positivo) de adesão dado pelo produto de W_{ab} pela correspondente área de contacto. Quando se atinge o equilíbrio será $dE/dx = 0$ e assim se obtém a nova expressão do coeficiente de fricção:

$$f = \frac{s}{p} \sum_{n=0}^{\infty} \left(2 \frac{W_{ap}}{p} \cdot \frac{1}{x} \right)^n \quad (c)$$

Mostra esta expressão que o coeficiente de fricção cresce quando aumenta a relação W_{ab}/p , e que esse crescimento é ilimitado quando $W_{ab}/p = x/2$. Nota porém o autor que a verificação experimental desta teoria implicaria a determinação

do raio das junções ($r = x \cotg \Theta$) e da rugosidade da superfície, mas que tais valores, por serem gerados durante o deslizamento e não impostos externamente, não podem ser controlados. Mas refere que existe outro fenómeno controlado pela energia de superfície, que é a formação de partículas de desgaste, e que é passível de experimentação. Segundo o autor, para uma partícula se soltar, a energia elástica armazenada na partícula durante a sua separação deve igualar ou exceder a energia de adesão que a ligava ao seu substrato.

Para uma partícula hemisférica de diâmetro d , ter-se-á

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_r^2}{E} \cdot \frac{\pi d^3}{12} = W_{ab} \frac{\pi d^3}{4} \quad (d)$$

onde σ_r é a tensão residual no fragmento e E o módulo de elasticidade. A partir desta equação e considerando que

$$\frac{\sigma_r^2}{\sigma_{yp}^2} = v^2 = \frac{1}{10}$$

e que σ_{yp} , tensão de cedência, é cerca de 1/3 da dureza p , e ainda que σ_{yp}/E é cerca de 3×10^{-3} , deduz o autor a equação

$$d = 60000 \frac{W_{ab}}{p} \quad (e)$$

onde entra a mesma relação W_{ab}/p que entra em (c). Para verificar experimentalmente esta equação utiliza uma máquina de desgaste onde dois provetes anelares são forçados por rotação a deslizar um sobre o outro, e mede o diâmetro das partículas de desgaste assim produzidas. Pondo depois num diagrama esses diâmetros em função da correspondente relação W_{ab}/p obtém um conjunto de pontos satisfatoriamente representados pela recta da equação (e).

2.6 – Horn e Deere, 1962

Um dos trabalhos mais importantes sobre as características friccionais de minerais que ocorrem frequentemente em solos e rochas é, sem dúvida, o de Horn e Deere [5].

Nesse estudo foram realizados ensaios de dois tipos: ensaios de deslizamento entre superfícies de contacto desses minerais, e ensaios de corte sobre solos homo-minerais.

Nos primeiros, os ensaios foram realizados num aparelho especialmente concebido para o efeito fazendo deslizar uma peça móvel (o deslizador) com três apoios, sobre uma peça fixa; o mineral a estudar era colocado no deslizador; em cada um dos três apoios, formando uma espécie de “botões” hemisféricos, e colocado também na peça fixa, formando uma superfície plana sobre a qual se realizava o deslizamento dos referidos apoios. Quando os minerais eram lamelares (moscovite, biotite e flogopite) os apoios do deslizador foram realizados por três pequenas lâminas complanares em vez de “botões”.

Foram estudados minerais de estrutura maciça (quartzo, feldspato microclínico e calcite) e de estrutura lamelar ou micácia (moscovite, biotite, flogopite, clorite, serpentina, steatite e talco) em quatro diferentes condições de humidade superficial: secagem na estufa a 105°C, humidade de equilíbrio secagem na estufa/ar, humidade de equilíbrio saturação/ar e saturação. A humidade relativa do ar variou entre 17% e 97%, mas na maioria dos ensaios os valores ficaram compreendidos entre 17% e 35%. Os ensaios saturados foram analisados estando a superfície de deslizamento coberta pelo menos com 1,6 mm (1/16”) de água destilada.

A maioria dos ensaios foi realizada em minerais com superfícies muito lisas, polidas com um óxido abrasivo. Numa série de ensaios sobre uma espécie de quartzo, as respectivas superfícies de deslizamento foram despolidas com pó de carborundum N.º 240. Nas micas os ensaios foram realizados sobre superfícies de clivagem. As superfícies dos minerais foram previamente lavadas ou com acetona (embebida em algodão) ou com sabão e água corrente; e não se notavam diferenças entre as características friccionais das superfícies lavadas dum ou doutro modo.

Na sua maioria os ensaios foram conduzidos com a velocidade de 18 mm/min (0.7”/min) e considerados como “lentos”, mas foram feitos outros a 150 mm/min (6.0”/min) considerados rápidos.

Foram estudadas também as características lubrificantes de outros líquidos polares, além da água, (etileno glicol e amilamine) e não polares (tetracloroeto de carbono e decahidronaftaleno).

Os ensaios sobre solos homo-minerais foram realizados com uma caixa de corte convencional sobre uma areia fina de Ottawa, constituída quase totalmente por partículas de quartzo puro e sobre moscovite pulverizada. O pó de moscovite foi cortado ligeiramente antes do ensaio procurando que as faces de clivagem ficassem paralelas ao plano de corte. As condições de humidade foram três: secagem na estufa, equilíbrio secagem na estufa/ar, e saturação. A velocidade de ensaio foi de 0,08 mm/min (0,003”/min).

Os resultados dos ensaios de deslizamento, realizados com forças normais variando desde 0,3 kgf (0,65 lb) até 4,5 kgf (10,2 lb), deram coeficientes de fricção $\mu = T/N$ praticamente constantes, independentes de N portanto. Quer dizer, a relação entre T e N é linear e passa pela origem, o que permite caracterizar friccionalmente os minerais ensaiados apenas pelo coeficiente de fricção μ ou então pelo correspondente ângulo de fricção θ_μ tal que $\text{tg } \theta_\mu = \mu$.

Resumem-se seguidamente alguns dos principais resultados obtidos.

Características friccionais de superfícies minerais

No Quadro III apresenta-se um resumo dos valores dos coeficientes de fricção obtidos entre superfícies lisas de minerais.

(1) – *Relação entre fricção estática e cinemática* – Para as várias condições de humidade verificou-se que o coeficiente de fricção cinemático é igual ou ligeiramente inferior ao coeficiente estático. Exceptua-se o quartzo com as superfícies saturadas porque nestas condições se observou o bem conhecido fenómeno de deslizamento descontínuo (stick-slip).

Este fenómeno é devido à elasticidade do aparelho de ensaio e evidencia-se quando é maior a diferença entre a fricção estática e cinemática.

(2) – *Influência da estrutura do cristal nas características friccionais* – A água actua como um antilubrificante quando satura superfícies lisas de minerais cujos cristais têm uma estrutura maciça (tridimensional), como sejam quartzo, microclina, feldspato e calcite; enquanto actua como lubrificante em minerais com cristais lamelares (bidimensionais) como a moscovite, biotite, flogopite, clorite, serpentina, steatite e talco. A relação entre os coeficientes de fricção estática quando as superfícies estão saturadas e secas em estufa pode medir a acção lubrificante e antilubrificante. Enquanto que nos minerais maciços esta relação vai de 3,45 a 6,90, o que mostra uma forte acção antilubrificante, nos minerais lamelares ela oscila entre 0,63 a 0,42, o que evidencia a acção lubrificante.

(3) – *Influência do polimento sobre as características friccionais* – Depois de polidas as superfícies de quartzo foram despolidas pelo ataque de bisulfito de amónio. O despolimento provoca um ligeiro decréscimo no coeficiente de fricção estática quando as superfícies estão nas condições de equilíbrio com o ar depois de

QUADRO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE HORN E DEERE
(Coeficientes de fricção)

MINERAL	ORIGEM	SECAGEM NA ESTUFA		EQUILÍBRIO SECAGEM NA ESTUFA/AR (17% A 35%)		SATURAÇÃO		$\frac{\mu_s}{\mu_d}$	
		Estát. μ_s	Cinem. $\frac{k}{\mu_d}$	Estát. μ_m	Cinem. $\frac{k}{\mu_m}$	Estát. μ_s	Cinem. $\frac{k}{\mu_s}$	μ_s	$\frac{k}{\mu_d}$
Minerais de estrutura máfica	Quartzo transparente	0,11	0,10	0,11	0,10	0,42	0,23*	3,82	2,30
	Quartzo leitoso	0,14	0,14	0,16	0,16	0,51	0,27*	3,64	1,91
	Quartzo róseo	0,13	0,11	0,13	0,11	0,45	0,26*	3,45	2,36
	Feldsp. microclina	0,11	0,11	0,13	0,11	0,76	0,76	6,90	6,90
	Feldsp. microclina	0,12	0,12	0,12	0,12	0,77	0,77	6,42	6,42
	Calcite (Scratching)	—	—	0,21	0,21	0,60	0,60	—	—
	Calcite (N.S.)	—	—	0,12	0,12	—	—	—	—
	Calcite (N.S.)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,68	0,68	4,85	4,85
Minerais de estrutura lamelar	Moscovite	0,43	0,43	0,30	0,10	0,23	0,23	0,54	0,54
	Moscovite	0,41	0,41	0,32	0,32	0,22	0,22	0,54	0,54
	Moscovite	0,45	0,45	0,36	0,36	0,26	0,26	0,58	0,58
	Flogopite	0,31	0,31	0,25	0,25	0,15	0,15	0,48	0,48
	Flogopite	0,29	0,30	0,22	0,22	0,16	0,16	0,55	0,53
	Biotite	0,31	0,31	0,20	0,26	0,13	0,13	0,42	0,42
	Clorite	0,53	0,53	0,35	0,35	0,22	0,22	0,42	0,42
	Serpentina	0,62	0,62	0,50	0,47	0,29	0,26	0,47	0,42
	Serpentina	0,76	0,76	0,65	0,65	0,48	0,48	0,63	0,63
	Steatite	0,38	0,38	0,26	0,26	0,23	0,19	0,61	0,50
	Talco	0,36	0,36	0,24	0,24	0,16	0,16	0,45	0,45

* – Traduz um valor aproximada do coeficiente cinemático de fricção; baseado na média entre os valores máximo e mínimo observados no conhecido fenómeno de deslizamento descontínuo (stick-slip)

secas em estufa, mas provoca um substancial acréscimo quando as superfícies estão saturadas. O efeito antilubrificante da água acentua-se quando as superfícies estão despolidas.

(4) – *Influência da humidade relativa do ambiente* – Nos minerais maciços é insignificante a diferença de fricção entre as superfícies secas na estufa e com a humidade de equilíbrio com o ambiente; mas há um acentuado decréscimo nos minerais lamelares. Isto para os valores do Quadro III obtidos para o ar com humidades relativas variando entre 17% e 35%. Mas quando a humidade relativa ultrapassa um certo limiar à volta de 40% o coeficiente de fricção estática vai subindo regularmente até atingir o valor correspondente à saturação para 100%. Para uma moscovite o coeficiente decresce regularmente até cerca de 97% de humidade relativa, altura em que cai bruscamente até atingir o valor correspondente à saturação para 100%.

(5) – *Influência da história da humidade superficial* – A resistência friccional estática de superfícies polidas de feldspato e de clorite foi medida em condições de humidade de equilíbrio atingidas depois ou de saturação ou de secagem em estufa. Os resultados revelam que a fricção com humidade de equilíbrio depois de saturação é sensivelmente análoga à obtida com saturação. O que mostra que a superfície inicialmente saturada é capaz de reter mais humidade depois de secagem ao ar do que a que pode absorver depois de ser seca em estufa.

(6) – *Influência da rugosidade da superfície* – Como as superfícies dos minerais de estrutura maciça que ocorrem nos solos naturais são geralmente muito mais rugosas do que as superfícies altamente polidas que foram estudadas, estudou-se a influência dessa rugosidade nas características friccionalis do quartzo. Os resultados mostraram que a ação antilubrificante da água diminui rapidamente quando as superfícies são rugosas. Por exemplo, a fricção com superfícies saturadas em relação às superfícies com humidade de equilíbrio secagem na estufa/ar que era de 3,18:1 para as superfícies altamente polidas, baixou para 1,34:1 quando as superfícies foram despolidas com carborundum N.º 240. Pode pois concluir-se que o efeito antilubrificante da água no quartzo e noutros minerais de estrutura maciça se tornará insignificante quando as superfícies atingem uma rugosidade crítica. Isto concorda com a afirmação de Terzaghi (1925) de que o coeficiente de fricção estática de superfícies despolidas de vidro não foi afectado por filmes superficiais.

(7) – *Influência da velocidade de deslizamento* – Estudou-se a influência da velocidade de deslizamento em quartzo polido, quartzo despolido e em mica flogopite. Concluiu-se que a resistência friccional do quartzo polido ou despolido, não é afectada pela velocidade de deslizamento quando esta varia entre 0,7 a 6,0 polegadas/min. Na flogopite, com o aumento de velocidade de 0,7 para 6,0 polegadas/min., notou-se um aumento da resistência friccional de 12%, na humidade de equilíbrio secagem em estufa/ar, e de 28% nas condições de saturação.

(8) – *Influência da polaridade do lubrificante* – Realizaram-se ensaios lentos em dois tipos de quartzo altamente polidos e dois tipos de mica, ensaios esses com as superfícies saturadas com fluidos polares (água, glicol etileno e amilamine) e não-polares (tetracloroeto de carbono e decahidronaftaleno). Comparados com a fricção das superfícies secas na estufa, todos os fluidos aumentam a fricção estática das superfícies de quartzo. No entanto os fluidos de alta polaridade causam muito maior acréscimo do que os não polares.

Nas micas todos os fluidos reduzem a fricção. Os não polares reduzem no entanto essa fricção, em relação às condições de secagem em estufa, de apenas 10% a 20%, enquanto que para os polares (água e amilamine) essa redução é de 45% a 50%. Somente para o etileno glicol se verifica que o seu efeito lubrificante é menor do que o dos líquidos não polares.

Características friccionais de solos homo-minerálicos

Ensaio de corte directo sobre areia de Ottawa fina e solta demonstraram que, à parte os efeitos das forças capilares, a humidade superficial das partículas não tem nenhuma influência mensurável sobre a resistência drenada ao corte. A observação ao microscópio de diversos grãos mostrou que eles são bem arredondados, com uma esfericidade média de 0,8 e superfícies rugosas. Atribui-se a esta rugosidade a água não ter nenhum efeito antilubrificante na resistência ao corte. Parece pois que, no que diz respeito aos solos, o fenómeno da antilubrificação tem apenas interesse académico. A resistência drenada de pó de moscovite mostrou-se, pelo contrário, muito sensível às variações de humidade. Quando seco na estufa tem um ângulo de atrito interno de 27°0; depois de posto em equilíbrio com o ar a 40% de humidade relativa aquele ângulo baixou para 24°2; e depois de saturado passou para 16°2. Estes resultados concordam com os obtidos em ensaios de deslizamento em lâminas de moscovite. Recorde-se no entanto que o pó de moscovite foi

ligeiramente cortado antes de se iniciar o ensaio, de modo a orientar as partículas paralelamente ao plano de corte. Conclui-se que em certos minerais lamelares pode, em certas condições, haver um efeito de lubrificação pela água, o que pode explicar alguns escorregamentos de terrenos e roturas em túneis.

Conclusões

O trabalho termina com o apuramento das seguintes conclusões:

(1) – A fricção cinemática desenvolvida entre superfícies minerais é geralmente igual ou ligeiramente inferior à fricção estática. Ocorre uma excepção quando superfícies de quartzo são saturadas com um fluido de elevada polaridade. Nestas condições a fricção cinemática é apreciavelmente inferior à fricção estática.

(2) – Quando a humidade superficial aumenta, a fricção entre superfícies de minerais com estrutura maciça também aumenta, enquanto se dá o contrário para minerais de estrutura lamelar.

(3) – A acção antilubrificante da água nas superfícies de minerais de estrutura maciça diminui rapidamente quando aumenta a rugosidade das superfícies.

(4) – Variações na velocidade de deslizamento entre 0,7 e 6,0 in/min não têm nenhum efeito nas características friccionais de superfícies minerais de estrutura maciça. A fricção entre superfícies de mica aumenta com a velocidade de deslizamento. Isto pode explicar parcialmente o aumento de resistência ao corte drenada de argilas, notada noutras investigações quando aumenta a velocidade de corte, desde que os minerais de argila tenham estrutura cristalina semelhante à da mica.

(5) – A polaridade dum fluido influencia as respectivas características lubrificantes. Todos os fluidos estudados actuam como antilubrificantes quando aplicados em superfícies lisas de minerais de estrutura maciça. No entanto os fluidos de alta polaridade produzem os maiores graus de antilubrificação. Todos os fluidos investigados lubrificam superfícies lisas de minerais lamelares. Embora não se encontrasse nenhuma correlação consistente entre polaridade e aptidão

lubrificante, os fluidos altamente polares foram geralmente os lubrificantes mais efectivos.

(6) – À parte os efeitos das forças capilares, as variações da humidade superficial não têm nenhuma influência mensurável sobre a resistência ao corte drenada de solos compostos de minerais de estrutura maciça. No entanto a resistência ao corte drenada de solos compostos de minerais lamelares decresce quando aumenta a humidade superficial das partículas respectivas.

(7) – Um aumento de humidade pode causar a rotura de um maciço de solo que contenha elevada percentagem de minerais lamelares. É também possível que algumas roturas ocorridas na abertura de túneis em rocha e escavações em rocha a céu aberto tenham resultado da entrada de água nas juntas cujas superfícies foram cobertas com minerais lamelares ou onde a própria rocha contenha uma elevada percentagem destes minerais.

2.7 – *Byerlee, 1967*

Neste trabalho [17] o autor apresenta a teoria de que a fricção dos materiais geológicos é devida à rotura frágil das asperezas das respectivas superfícies de contacto. Contrapõe a sua teoria à teoria clássica, que atribui a Bowden e Tabor, segundo a qual a fricção é devida à deformação plástica dessas asperezas. Assimila as asperezas a cunhas nas arestas das quais se aplicam a força normal e a força friccional, e calcula, pela teoria da elasticidade, qual a relação entre esta e aquela ou seja o coeficiente de fricção, que corresponde à tensão de rotura à tracção na face da cunha. Exprime essa tensão de rotura à tracção como uma fracção da tensão de rotura à compressão, e, considerando que nos materiais geológicos essa fracção é de 0,1 ou ainda menos, deduz para coeficiente de fricção valores da ordem de 0,15.

Considerando as asperezas como cones, em vez de cunhas, chega a valores de 0,10.

Salienta o autor que a teoria não é aplicável às superfícies rugosas, nas quais pode haver travamento entre as asperezas, pois neste caso as forças são aplicadas nas faces das asperezas e não no topo, como se admite na teoria. Admite porém o autor que em duas situações o travamento será desprezável. A primeira ocorrerá quando uma superfície rugosa contacta com uma superfície lisa, ou seja, uma

superfície em que as asperezas sejam muito menores, daí resultando que os contactos com as maiores saliências se farão muito próximo dos respectivos picos. A segunda dar-se-á quando duas superfícies da mesma rugosidade, que se apresentem planas nos intervalos entre as elevações das asperezas, entrem em contacto ligeiro.

Foram realizados ensaios com uma rocha granítica e com cristais de quartzo, de hornblenda, microclina e calcite. Utilizou-se um aparelho “Atlas benchlathe”, no qual o provete superior era constituído pelo mineral com uma face rigorosamente polida, e o provete inferior por um disco de safira com a face de deslizamento paralela à do provete superior. Todos os ensaios foram realizados em atmosfera de ar seco, obtida introduzindo o aparelho numa câmara de vácuo na qual se descia a pressão abaixo da tensão de vapor de água à temperatura ambiente e, depois, se fazia entrar ar exsiccado por uma coluna de sulfato de cálcio.

A carga normal variou entre 5 e 10 kgf e a velocidade de deslizamento, dada por um parafuso sem fim, era de 0,02 mm/s.

As superfícies dos minerais foram obtidas por desgaste e polimento feito à mão sobre uma placa de vidro. As superfícies de safira com diferentes rugosidades foram obtidas por desgaste em roda de diamante ou num assentador de seda com pasta de diamante.

Depois do desgaste as superfícies foram limpas com detergente e lavadas com água corrente.

A lisura das superfícies e a altura média das asperezas foi determinada com um perfilómetro Talysurf 4. A falta de lisura ao longo das superfícies foi mantida sempre num valor inferior à altura das asperezas.

Prepararam-se também provetes de granito com as superfícies totalmente travadas. Para isso, num provete cilíndrico, abriu-se, com uma serra de diamante, um entalhe circunferencial pelo qual se partiu depois o provete aplicando nos respectivos topos um aumento de flexão. As duas partes foram depois montadas no aparelho com as faces de fractura perfeitamente ajustadas. A altura das asperezas assim obtidas foi de cerca de 0,5 mm. Embora a superfície de fractura fosse ligeiramente ondulada, o desvio do plano andou também à volta de 0,5 mm.

Nos ensaios com o granito observou-se o fenómeno do “stick-slip” tanto nos provetes polidos como nos provetes travados. Depois do primeiro “stick-slip” a fricção aumentou ligeiramente nas superfícies mais lisas e decresceu nas superfícies rugosas e travadas. Registou-se apenas a força que produziu o primeiro movimento dado que a rugosidade muda com o movimento subsequente.

Utilizaram-se cargas normais de 10, 20, 30, 40 e 50 kgf. Os resultados

obtidos com áreas de contacto de 1,97 cm² e 0,316 cm² e rugosidades de 6,3 ± μm. (0,16 μm) mostrou que o coeficiente de fricção não depende da área de contacto. Todas as determinações foram feitas para uma área de contacto de 1,97 cm². Os resultados obtidos no granito postos em função de diferentes rugosidades CLA (“center line average”) apresentam-se numa figura que mostra que μ sobe de 0,2 a 0,5 quando a rugosidade passa de cerca de 0,1 μm a pouco mais de 2,5 μm, e que parece tender a estacionar à volta de 0,6 para rugosidade de cerca de 8 μm.

Em contraste com os resultados obtidos com as superfícies lisas, a superfície totalmente travada de granito mostrou que μ depende da carga normal e da área de contacto aparente (foram usadas três áreas: 0,316; 0,712 e 1,26 cm²). Mas apresentando os resultados em termos de tensão, desaparece a dependência da área de contacto ficando apenas a da tensão normal, dependência essa que se traduz em duas rectas:

$$\mu = 1,3 \text{ se } \sigma_n < 0,06 \text{ Kbar} \quad (n \text{ 60 kgf/cm}^2)$$

$$\mu = 0,8 + 0,03 \sigma_n \text{ se } 0,06 < \sigma_n < 0,15 \text{ Kbar}$$

Nos ensaios de superfícies rugosas em contacto com superfícies lisas de safira, a fricção varia apenas ligeiramente com a distância de deslizamento. E isto muito provavelmente porque a amplitude do travamento das asperezas é controlada pela rugosidade da safira que, dada a sua dureza, se mantém constante durante o deslizamento; o desgaste dá-se pois apenas no mineral, que é menos duro. O “stick-slip” foi pronunciado no deslizamento de superfícies rugosas, mas foi muito pequeno ou ausente nas superfícies finamente polidas.

Não se notou nenhuma variação de μ com a carga normal (10, 20, 30, 40 e 50 kgf na mesma área de 1,97 cm²). Apresentam-se resumidos num diagrama os coeficientes de fricção dos minerais assim referidos com uma rugosidade CLA de 300 μm deslizando sobre superfícies de safira com rugosidades variando de 0,5 μm até 50 μm.

Em todos os ensaios verificou-se, depois do deslizamento, a existência de detritos brancos finos, cujo tamanho aumenta com a rugosidade das superfícies em contacto. Ao microscópio identificaram-se fragmentos do mineral nestes detritos, os maiores dos quais sob luz polarizada, não mostraram qualquer evidência de deformação plástica.

Discutindo os resultados, o autor salienta que o coeficiente de fricção anda pelo valor dado pela teoria (0,10 a 0,15) nos casos em que não há travamento.

Outro resultado interessante é o de o coeficiente de fricção ser relativamente independente da composição do mineral e da sua resistência o que, segundo o autor, é requerido pela teoria.

O comportamento das superfícies completamente travadas ou encaixadas mostra uma fundamental diferença entre materiais frágeis e materiais plásticos. A área de contacto efectivo é neste caso independente da carga normal. Mas, enquanto que para materiais plásticos a resistência ao corte é aproximadamente independente da tensão normal (o autor cita o exemplo da tensão de cedência do aço confinado à pressão de 170 000 psi que não difere mais que 5% da tensão à pressão atmosférica), nos materiais frágeis a pressão de confinamento tem enorme influência fazendo aquela subir quando esta sobe. Isto é muito claro no ensaio do granito que, sob pequena tensão normal, a superfície pode subir acima das irregularidades de travamento, mas, quando a tensão atinge 0,06 Kbar é mais fácil a superfície deslizar quebrando as asperezas mais inclinadas. Este comportamento, segundo o autor, evidencia que a fractura frágil das asperezas é que é o mecanismo que controla o deslizamento de materiais frágeis.

Em superfícies rugosas de minerais o coeficiente μ depende da resistência do material, conforme mostra o diagrama apresentado. Por exemplo, para o quartzo deslizando sobre safira com uma altura média de asperezas de 50 μm , obteve-se $\mu = 0,45$; mas para a calcite deslizando na mesma superfície obteve-se $\mu = 0,35$.

Citam-se depois os resultados obtidos por outros autores quanto ao efeito da presença da água e do ar. Salientando-se também os efeitos das forças atractivas nas superfícies sólidas, especialmente no vácuo. Repare-se em especial que Smith e Gussenhoven (1965) encontraram entre cristais de quartzo polidos uma força atractiva de 14 kgf/cm^2 quando em contacto sob um vácuo de 10^{-6} Torr.

Em conclusão, salienta que o mais importante efeito cuja análise ainda não se domina é o travamento, situação geométrica em que as forças são aplicadas lateralmente às asperezas.

2.8 – Rowe, 1969

Com o fim de correlacionar a resistência ao corte de areias com o ângulo de fricção entre os grãos que as constituem, o autor [6 e 7] determinou esse ângulo por meio de ensaios de corte directo de uma massa de partículas, livres e submersas em água, deslizando sobre um bloco polido do mesmo mineral.

Obteve os seguintes resultados

Esferas de vidro (Rowe, 1962)	17°
Quartzo do rio Mersey (Rowe, 1962)	27°

O ângulo de fricção do quartzo diminui quando aumenta o tamanho das partículas.

2.9 – Skinner, 1969

Utilizando um “friction apparatus”, que aliás não descreve, determinou o autor os seguintes ângulos de fricção para esferas de vidro [8].

	Secas	Saturadas
Esferas de 1 mm	2° a 5°	27° a 38°
Esferas de 3 mm	2° a 7°	38° a 43°

2.10 – Byerlee, 1970

O mecanismo do “stick-slip”, que poderemos traduzir por prende-desliza, deslizamento sacudido, deslizamento descontínuo, etc., é analisado neste trabalho [16], tendo em vista principalmente estudos relativos a sismos.

Apresenta-se o modelo do fenómeno esquematizado na Fig. 1-a, onde m = massa, AB = mola que aplica a força tangencial e v = velocidade.

E apresenta-se também a equação diferencial

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + A \frac{dx}{dt} + f \left(\frac{dx}{dt}, x, t_0 \right) + K (x - vt) = 0$$

onde $m (d^2x/dt^2)$ é a força de inércia para aceleração da massa deslizante m , $A (dx/dt)$ é o amortecimento, geralmente considerado como função linear da velocidade, $f (dx/dt, x, t_0)$ é a força friccional, que pode ser função da velocidade do deslizador, do deslocamento do deslizador em relação ao plano e do tempo de contacto estacionário entre as superfícies, e $K (x - vt)$ é a força da mola, sendo K a respectiva constante.

Refere-se que, desde 1930, têm sido apresentadas numerosas soluções para esta equação e citam-se os respectivos autores. O autor não se ocupa porém desses desenvolvimentos matemáticos, concentrando apenas a sua atenção nos mecanismos físicos que têm sido apresentados para explicar o fenómeno. Considera que, basicamente, há quatro teorias, as quais discute à luz dos resultados experimentais recentemente obtidos em rochas e minerais frágeis.

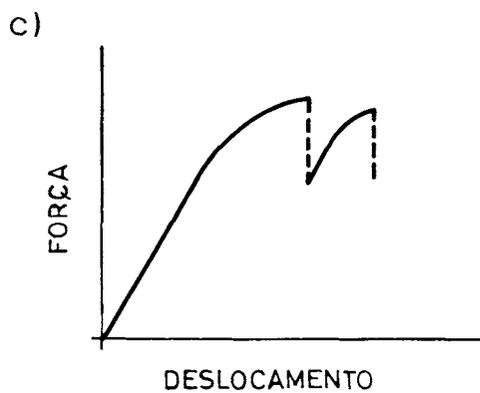
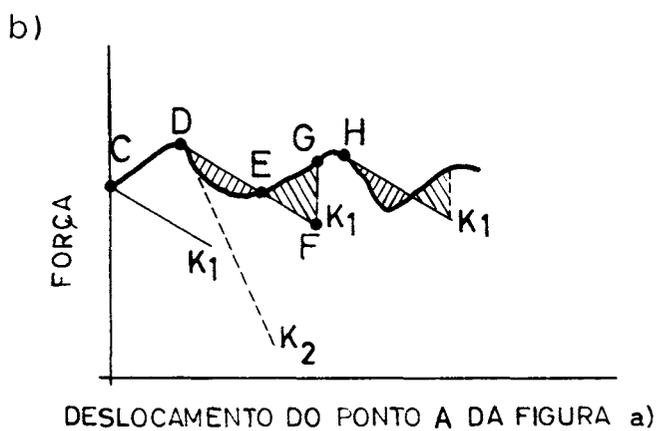
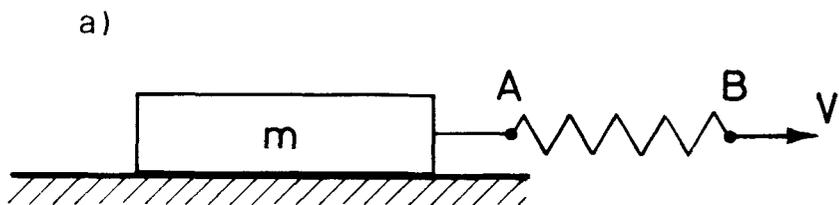


Fig. 1 – Mecanismo do deslizamento descontínuo (“stick-slip”) segundo Byerlee
42

Instabilidade devida ao amolecimento térmico

Como durante o deslizamento há uma elevação de temperatura, isso induz a ideia de que a fricção cinemática pode ser menor do que a fricção estática porque essa elevação de temperatura pode baixar a resistência do material.

Apresentam-se duas razões pelas quais este mecanismo não pode explicar a instabilidade de deslizamento entre superfícies rochosas à temperatura ambiente. Em primeiro lugar porque o mecanismo requer um período de deslizamento estável (para elevar a temperatura) precedendo o deslizamento brusco; mas as experiências de laboratório têm mostrado que o deslizamento se dá bruscamente sem qualquer anterior deformação não elástica detectável. Em segundo lugar, o exame de superfícies de materiais frágeis após deslizamento brusco tem mostrado partículas de desgaste produzidas durante deslizamentos realizados à temperatura ambiente, partículas essas provenientes da fractura frágil dos minerais respectivos. E não há qualquer evidência de que durante o deslizamento se tenha atingido a temperatura de fusão.

Instabilidade devida à fluência

Na teoria da fluência relativa ao “stick-slip”, proposta em 1944 por Ishlinski e Kragelsk, admite-se que a fricção estática é função do tempo de contacto entre as superfícies. No modelo desta teoria, quando o deslizador está em repouso, a junção nos pontos de contacto entre as superfícies deforma-se por um mecanismo de fluência de forma que o tamanho das junções aumenta com o tempo. Durante o deslizamento, o tempo de contacto é tão curto que não dá tempo a que as junções aumentem de tamanho. Deste modo, sendo a força de fricção a força necessária para cortar as junções, a fricção estática será maior do que a fricção cinemática. Uma objecção posta a esta teoria é a de atribuir apenas ao tamanho da junção a força requerida para a cortar, quando tal força depende também da resistência ao corte do material. Se se admite que a resistência à compressão dinâmica do material é elevada ao ponto de impedir o crescimento das junções, deve também admitir-se que a resistência ao corte dinâmico é também elevada. Deste modo tanto fará que as junções sejam grandes e fracas ou pequenas e fortes, pois que a fricção será a mesma em ambos os casos.

O autor refere ensaios que realizou em 1968 com granito que não revelaram qualquer correlação entre a duração da carga estacionária, antes do deslizamento, e a fricção, o que claramente contraria esta teoria da fluência.

Instabilidade plástica

Segundo esta teoria, atribuída pelo autor a Rabinowicz (1959), a força friccional, em vez de ser constante, varia com o deslocamento relativo entre o deslizador e o plano. Quando o movimento de uma superfície sobre a outra se inicia, as junções nos pontos de contacto aumentam de tamanho; e durante este período de crescimento das junções aumenta a fricção. Atinge-se porém uma situação em que o tamanho das junções cessa de crescer e começa a diminuir, acabando eventualmente, por quebrar. Durante este período a fricção diminui. O processo é repetido e a força necessária para causar o deslizamento flutua com o deslocamento relativo entre o deslizador e o plano.

O autor apresenta na Fig. 1-b um diagrama típico da força em função do deslocamento do ponto A do modelo da Fig. 1-a.

Se o deslizador bruscamente se desloca a uma velocidade muito maior do que v , pode desprezar-se a extensão da mola devida ao movimento do ponto B (Fig. 1-a) e então a força F da mola decrescerá de acordo com a relação

$$F = -K_1 x$$

sendo x o deslocamento do deslizador e K_1 a constante da mola. No esquema junto esta relação é representada pelas rectas CK_1 , DK_1 e HK_1 .

Quando, no início, se move o ponto B, a força F aumenta gradualmente até que iguala a força friccional no ponto C (Fig. 1-b). O deslizador iniciará o seu movimento com uma velocidade ligeiramente inferior a v porque a fricção é crescente com o deslocamento. O deslizamento estável prosseguirá até se atingir o ponto D (Fig. 1-b). Para um deslocamento ligeiramente maior que D, a força necessária para provocar o deslizamento será menor do que a força da mola e o excesso da força acelerará o deslizador. Se a massa do deslizador é pequena e se é desprezável o amortecimento do sistema, então será elevada a velocidade do deslizador e poderá desprezar-se a extensão da mola devida ao movimento do ponto B da Fig. 1-a.

A força da mola decrescerá ao longo da recta DE (Fig. 1-b) inclinada de $-K_1$. A área tracejada acima da linha de fricção representa a energia cinética acumulada no deslizador durante a aceleração. A seguir a E a força da mola é menor do que a fricção e o deslizador sofre uma retardação vindo eventualmente a parar no ponto F, altura em que são iguais as áreas tracejadas acima e abaixo da linha de fricção. O deslizador permanecerá em repouso até a força da mola subir de F para G, ponto a partir do qual recomeçará o movimento estável.

Se, como usualmente se faz, se traçar um diagrama da força da mola em função, não do deslocamento do ponto A mas sim do ponto B da Fig. 1-a, ter-se-á um diagrama como o da Fig. 1-c, no qual a um crescimento elástico inicial se segue um período de deslizamento estável e depois uma queda brusca (a tracejado) correspondente ao deslizamento brusco.

Aumentando a rigidez do sistema, correspondente a uma constante da mola K_2 (Fig. 1-b), pode conseguir-se um deslizamento estável porque a força de fricção cai tão rapidamente como a força da mola (Fig. 1-b).

Esta teoria, segundo Byerlee, poderá ser adequada para materiais que possam sofrer deformações plásticas durante o deslizamento, tais como calcário, dolomite e rochas ricas em serpentina, clorite e talco; mas não parece adequada para explicar o fenómeno do “stick-slip” entre superfícies de rochas extremamente frágeis, como o granito à temperatura ambiente.

Instabilidade frágil

O autor refere aqui o seu anterior trabalho (1967) em que apresenta a teoria da rotura frágil das asperezas das superfícies em contacto, como mecanismo causador da fricção. Já resumimos anteriormente esse trabalho deste autor.

Nas conclusões o autor apura, entre outras, as seguintes:

- o “stick-slip” não é mais que um problema de instabilidade e que ocorrerá sempre que a força friccional decresce com o deslocamento mais rapidamente do que o sistema de carga pode acompanhar.
- em casos como os de deslizamento de superfícies metálicas entre si, o decréscimo da fricção com o deslocamento é causado pela rotura plástica por corte das junções entre as superfícies. Em rochas frágeis, a instabilidade durante o deslizamento é provavelmente causada pela rotura frágil e brusca das irregularidades das superfícies, entre si travadas.
- A teoria da rotura frágil é por enquanto apenas qualitativa e, portanto, não inteiramente satisfatória. Sabe-se, por exemplo, que entre superfícies polidas de materiais frágeis, o deslizamento é estável sob pequena tensão normal mas instável se essa tensão é elevada. Porém, presentemente, não se sabe prever a tensão a que se passa da estabilidade à instabilidade.

Outras conclusões apuradas pelo autor orientam-se mais para a explicação dos sismos, saindo portanto do âmbito deste trabalho.

2.11 – *Proctor e Barton, 1974*

Por meio dum novo aparelho especialmente concebido para o efeito na Universidade de Manchester (Rowe, 1971; Barton, 1972), determinaram os autores o ângulo de fricção cinemática entre partículas de diversos materiais [9]. O aparelho permite medir, num dado intervalo de tempo, as forças e os deslocamentos que ocorrem quando uma partícula é forçada a deslizar sobre outra. Supõe-se que existe um plano vertical que contém os centróides das partículas, o respectivo ponto de contacto e ainda que o deslizamento se faz nesse plano, não havendo portanto nenhuma força ou deslocamento normal a esse plano.

A partícula superior é montada no braço de alavanca de uma balança e a inferior num suporte fixo. A força normal pode regular-se por meio dum contrapeso situado no referido braço de alavanca. O deslocamento relativo da partícula superior é medido por dois “linear variable differential transducers” (LVDT) montados com os seus eixos um vertical e outro horizontal. A força de contacto é medida por duas células também montadas com os seus eixos um horizontal e outro vertical.

O fulcro do braço de alavanca é montado numa plataforma que se move por meio dum sistema de parafuso sem-fim e caixa de velocidades accionado por um motor eléctrico. O sistema permite duas velocidades: 1,45 mm/h e 0,051 mm/h.

Ensaaiaram-se partículas artificiais de vidro e de aço, e naturais de quartzo e feldspato. Nos ensaios com vidro e aço, a partícula superior foi uma esfera de 3 mm ou 4 mm de diâmetro, enquanto que a inferior foi uma partícula do mesmo material com uma superfície plana inclinada dum dado ângulo com a horizontal. Nos ensaios com quartzo e feldspato, a partícula superior era irregular e com o tamanho de 3 mm a 4 mm; a partícula inferior foi geral e previamente polida com carborundum de modo a apresentar uma superfície plana, e era montada com essa superfície inclinada sobre a horizontal.

Verificaram os autores, com efeito, que era praticamente impossível utilizar a partícula inferior com forma completamente irregular porque as bruscas variações na topografia da superfície obscureciam a interpretação dos dados, particularmente no que respeita a deslocamentos.

As partículas, sempre manipuladas com pinças, foram preparadas da seguinte maneira: limpas com um pano embebido em acetona, fervidas em água destilada, limpas novamente com um pano embebido em acetona, lavadas com água destilada e secas em estufa (quando é o ensaio “seco” que se deseja).

Os registos obtidos mostram que o ponto de contacto descreve uma trajectória muito irregular e que, portanto, o ângulo com a horizontal do deslizamento correspondente a um dado incremento é muito variável para “micro-incrementos” da ordem de grandeza dessas irregularidades e tende a uniformizar-se para “macro-incrementos” que abrangem um número suficientemente grande de tais irregularidades.

Os resultados obtidos, em termos de médias de ângulo de fricção cinemática, resumem-se no Quadro IV.

QUADRO IV – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROCTOR E BARTON
(Ângulo de fricção cinemática)

CONDIÇÕES	MATERIAL	PARTÍCULA-PARTÍCULA		PARTÍCULA-PLANO	
		$\bar{\theta}_\mu$ médio	Desvio padrão	$\bar{\theta}_\mu$ médio	Desvio padrão
Saturado	Esferas de vidro	17,9	$\pm 2,8$	15,5	$\pm 5,1$
	Esferas de aço	8,1	$\pm 2,1$	8,6	$\pm 1,7$
	Quartzo	26	–	22,2	$\pm 2,3$
	Feldspato	–	–	28,9	$\pm 1,1$
Seco	Esferas de vidro	5 a 10	–	5 a 10	–
	Quartzo	–	–	17,4	$\pm 0,6$

3 – RESUMO SOBRE A SITUAÇÃO ACTUAL

3.1 – *Sistemas de ensaio*

A medição da fricção entre partículas tem deparado com várias dificuldades quando as respectivas superfícies são muito irregulares e o seu contacto se faz por intermédio de zonas de muito pequena área, praticamente pontuais. Os sistemas que têm sido adoptados para vencer tais dificuldades têm sido, como acima se referiu, os que seguidamente se resumem e se esquematizam na Fig. 2.

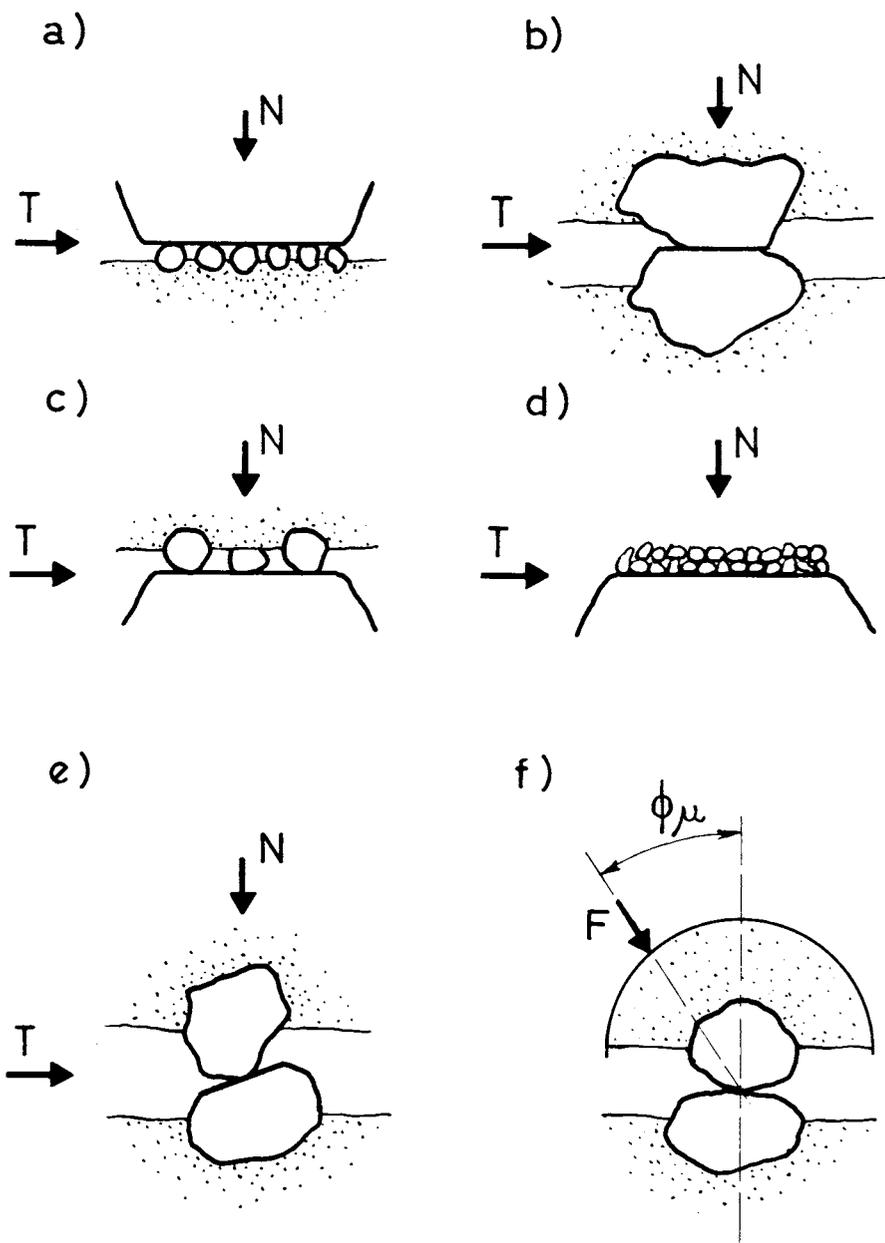


Fig. 2 – Sistemas utilizados para a determinação do ângulo de fricção entre partículas

Tshebotarioff e Welch (1948) utilizaram uma caixa de corte na parte superior da qual montaram um bloco do material a ensaiar, com uma face plana previamente preparada, e na parte inferior várias partículas do mesmo material fixadas com argamassa de cimento (Fig. 2-a). Penman (1953) utilizou também uma caixa de corte onde embebeu duas partículas, de bom tamanho, de cristais de quartzo (Fig. 2-b). Para realizar elevadas tensões nos contactos, embebeu em gesso, na parte superior da caixa três pequenos fragmentos de quartzo, partidos de fresco (Fig. 2-c). Sistema análogo foi adoptado por Horn e Deere (1962), mas utilizando um aparelho especialmente concebido para o efeito. Rowe (1972) utilizou sistema análogo ao de Tshebotarioff, mas com a diferença de que na parte superior da caixa de corte montou uma massa de partículas livres e não fixadas com gesso (Fig. 2-d). Proctor e Barton (1974) utilizaram um aparelho especialmente concebido para o efeito em que na parte superior foi montada uma partícula de material com a sua superfície natural, e na parte inferior outra partícula do mesmo material na qual previamente fora aplanada uma face. Esta partícula inferior foi montada com a face plana inclinada sobre a horizontal (Fig. 2-e).

Estes sistemas requerem, como se vê, a preparação de uma face plana numa das partículas, e não permitem portanto a determinação da fricção entre partículas com ambas as superfícies no seu estado natural. Por isso se concebeu o goniómetro de fricção esquematizado na Fig. 2-f [15].

3.2 – *Condições de ensaio*

As principais condições de ensaio que têm sido objecto de estudo são as que seguidamente se resumem.

Rugosidade das superfícies: Rugosidade natural (irregular ou lisa de superfícies de clivagem), superfície polida artificialmente e, ainda, superfícies despolidas também artificialmente.

Limpeza das superfícies: Simples lavagem com água, ou então limpeza com acetona ou com água e sabão, e depois lavagem com água destilada.

Condições de humidade: Secagem ao ar, secagem em estufa, partículas saturadas, ou então partículas com a humidade de equilíbrio atingida ao ar depois de secas em estufa.

Saturação com outros líquidos: Superfícies das partículas saturadas com outros líquidos polares, além da água, como sejam o glicol etileno e a amilamina, e não polares (tetracloro de carbono e decahidroantraceno).

Força ou tensão normal: Têm sido utilizadas forças normais que vão desde cerca de 10 gf (Proctor e Barton) até 75 kgf (Penman). A pressão normal num caso onde ela foi estimada (Penman) andou por 9 kgf/cm². No ensaio com o goniómetro, a força foi de 650gf [15].

Tipo de ensaio: Ensaio para determinação da resistência à fricção estática ou à fricção cinemática.

Velocidade de deslizamento: Foram utilizadas por Horn velocidades desde 18 mm/min a 150 mm/min, em ensaios que considerou lentos e rápidos, respectivamente. Proctor e Barton utilizaram velocidades de 1,45 mm/h e de 0,051 mm/h (0,001 a 0,025 mm/min).

História: A história da humidade superficial, isto é, os estados por que passou a humidade das superfícies antes de ser atingida a humidade do ensaio, foi também estudada (Horn e Deere).

3.3 – *Materiais ensaiados e resultados obtidos*

Os materiais ensaiados têm sido partículas minerais e partículas de areia e de seixo, partículas de brita e, ainda, pequenas esferas de vidro e de aço e bronze. No Quadro V apresenta-se uma lista desses materiais bem como dos limites dentro dos quais se encontram os valores dos respectivos ângulos de fricção obtidos pelos diversos autores. No Quadro VI pormenorizam-se os resultados relativos às partículas de quartzo.

3.4 – *Leis e outras constatações experimentais sobre a fricção*

Os estudos acima referidos evidenciam uma satisfatória confirmação das duas leis da fricção enunciadas por Amontons em 1699, segundo as quais [3]:

- a) – a resistência à fricção é proporcional à carga normal à superfície de contacto;
- b) – e é independente da área dessa superfície.

QUADRO V – MATERIAIS ENSAIADOS E RESPECTIVOS RESULTADOS
(Ângulos de fricção)

MATERIAL	Ø _μ (GRAUS)		BIBLIOGRAFIA
	Seco	Saturado	
Minerais de estrutura maciça:			
Quartzo	6 a 8	0 a 45	[5] [9]
Feldspato	6	37	[5]
Calcite	8	31 a 34	[5]
Minerais de estrutura lamelar:			
Moscovite	22 a 24	12,5 a 14	[5]
Biotite	17,5	7,5	[5]
Flagopite	16 a 17	8,5 a 9	[5]
Clorite	28	12,5	[5]
Serpentina	32 a 37	14,5 a 25,5	[5]
Steatite	21	10,5 a 13	[5]
Talco	20	9	[5]
Partículas de solos			
Areia quartzosa	–	22 a 31	[7]
Seixo quartzoso	16 ± 1,3	–	[14]
Partículas de agregado			
Calcário	39 ± 4,7	–	[14]
Gabrodiorito	38 ± 3,8	–	[14]
Cherte	15 (condições desconhecidas)		[9]
Argilito	24 (condições desconhecidas)		[9]
Granito	36 (condições desconhecidas)		[9]
Esferas artificiais			
Vidro	2 a 16	13,8 a 43	[9]
Aço	7 a 32	8,8	[9]
Bronze	–	21	[9]

QUADRO VI – PRINCIPAIS ENSAIOS SOBRE PARTÍCULAS DE QUARTZO

AUTOR	SISTEMA DE ENSAIO	CONDIÇÕES DE ENSAIO				θ_{μ} (GRAUS)		OBSERVAÇÕES
		Rugosidade	Humidade	Força normal kgf	Velocidade mm/min	Estático	Cinemático	
Tshebolarloff e Welch (1948)	Bloco deslizando sobre partículas fixas	Face do bloco polida	Seco Húmido Saturado	4 a 9	?	6 24,5 24,5	Desconhece-se se θ_{μ} é estático ou cinemático	
	Caixa de corte	Face do bloco despolida	Seco Húmido			20,5 20,5		
Horn e Deere (1962)	Partículas fixas deslizando sobre bloco Aparelho especial	Partículas arredondadas sobre bloco polido	Seco Saturado		18 a 150	6 a 8 23 a 27	Partículas limpas com água e sabão	
		Partículas naturais sobre bloco polido	Saturado	?		22 a 31		
Proctor e Barton (1974)	Partícula sobre partícula Aparelho especial	Partículas irregulares	Seco Saturado	0,010 a 0,048	0,001 a 0,025	-- -- 26	Partículas limpas com acetona, fervidas em água, novamente limpas com acetona e finalmente lavadas com água destilada	
		Part. inferior aplicada	Seco Saturado			17,4 ± 0,6 2,22 ± 2,3		
Nascimento (1976)	Partícula sobre partícula Goniômetro de fricção	Part. naturais de seixo quartzoso	Seco ao ar	0,65*	--	16 ± 1,3	* A força não é apenas a componente normal, mas a própria resultante. Partículas limpas com água corrente	

É também evidente nalguns desses estudos que, tal como afirmou Coulomb em 1781 [3]:

c) – deve distinguir-se fricção estática, a força requerida para iniciar o deslizamento, de fricção cinemática, a força, por vezes apreciavelmente menor, necessária para manter esse deslizamento.

Apurou-se ainda que, dentro dos limites de velocidade de deslizamento utilizados nesses estudos:

d) – a fricção cinemática é pouco ou mesmo nada afectada pela velocidade de deslizamento [5]. Esta independência da fricção em relação à velocidade de deslizamento é por vezes considerada como a 3.^a lei da fricção [3].

E constatou-se mais que:

e) – o ângulo de fricção diminui quando aumenta a carga normal.

Pode ainda dar-se como apurado que:

f) – o coeficiente de fricção depende principalmente dos seguintes factores e condições:

- (1) – Irregularidade das superfícies (lisas de clivagem, polidas, despolidas, rugosas, ásperas, dentadas, etc.).
- (2) – Natureza dos materiais em contacto (cristais de minerais, partículas de solo, partículas de britas, blocos de rochas, vidro, metais, etc.). Os minerais podem em primeira classificação dividir-se em minerais de estrutura maciça ou tridimensional (quartzo, feldspato, calcite, etc.) e minerais de estrutura laminar ou bidimensional (moscovite, biotite, clorite, serpentina, talco, etc.).
- (3) – Estado de humidade das superfícies (secas em estufa, saturadas e humidade de equilíbrio com o ambiente atingida a partir ou da secagem em estufa ou da saturação, etc.).
- (4) – Natureza de qualquer outro fluido, que não a água, que banhe as superfícies, designadamente se esses fluidos são polares, como a água, (glicol etileno, amilamina, etc.) ou não polares (tetracloreto de carbono, decahidro-naftaleno, etc.).

E à cerca da influência dessas condições poderá dizer-se que:

g) – entre superfícies polidas de minerais, a fricção cinemática é geralmente igual ou ligeiramente inferior à fricção estática, com excepção de minerais de

estrutura maciça onde a água (ou outro líquido de elevada polaridade) aumenta apreciavelmente a fricção estática, actuando portanto como antilubrificante. Este efeito antilubrificante da água acentua-se quando as superfícies, previamente polidas, foram despolidas. Quando porém aumenta a rugosidade das superfícies desses minerais de estrutura maciça, aproximando-se da rugosidade que ocorre nas partículas de solos naturais, a acção antilubrificante da água diminui rapidamente e torna-se insignificante quando as superfícies atingem uma rugosidade crítica.

h) – pelo contrário, nas superfícies lisas de minerais de estrutura lamelar os fluidos têm uma acção lubrificante, geralmente tanto maior quanto mais elevada for a respectiva polaridade, o que pode explicar alguns escorregamentos de terreno e rotura de túneis.

3.5 – Teorias da fricção

Apuradas as leis e outras constatações experimentais relativas à fricção, vejamos agora alguns dos mecanismos e teorias que têm sido apresentados para as explicar.

Para explicar a primeira lei da fricção, a de que esta é proporcional à carga, foram apresentados os dois mecanismos esquematizados na Fig. 3. O primeiro, atribuído a Coulomb e datado de 1781 [3], é o de travamento ou encaixe (“interlocking”) das saliências duma das superfícies nas reentrâncias da outra, de tal forma que a fricção representa principalmente o trabalho de elevação da carga sobre as cristas dessas saliências. Transporta-se assim para o tamanho por vezes microscópico das rugosidades das superfícies o efeito de cunha ou de plano inclinado hoje perfeitamente estabelecido para as irregularidades macroscópicas das juntas entre blocos de rocha [10, 11, 12]. Na Fig. 3-a esquematiza-se este mecanismo segundo o qual o trabalho realizado pela fricção quando se dá um deslizamento u é gasto na elevação v da carga normal N :

$$T u = N v \quad (1)$$

donde resulta a relação

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{v}{u} = \text{tgi} \quad (2)$$

Haverá portanto proporcionalidade entre T e N admitindo-se que a incli-

nação i das saliências é uma constante característica das superfícies em contacto.

No outro mecanismo (Fig. 3-b), apresentado por Terzaghi em 1925 [1], a fricção é devida à adesão molecular que se estabelece não entre toda a área A de contacto aparente entre as superfícies, mas apenas entre a área \bar{A} de contacto efectivo dessas superfícies. Segundo esta teoria a área de contacto efectiva \bar{A} entre duas superfícies de materiais de diferentes durezas, é determinada pela plastificação das saliências do material menos duro, como consequência de aí se atingir a respectiva resistência à compressão σ_c :

$$\bar{A} = \frac{N}{\sigma_c} \quad (3)$$

Para que haja deslizamento ao longo dessa área \bar{A} será necessário vencer a resistência ao corte s da adesão das respectivas superfícies, dada por

$$T = s \bar{A} \quad (4)$$

De (3) e (4) resulta a relação

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{s \bar{A}}{\sigma_c \bar{A}} = \frac{s}{\sigma_c} \quad (5)$$

que é constante, havendo portanto proporcionalidade entre T e N . Efectivamente, a relação s/σ_c entre as resistências de corte da adesão e de rotura por compressão do material menos duro é uma característica desse material, e sendo assim será portanto constante.

A segunda lei da fricção é também explicada por qualquer dos dois mecanismos referidos, uma vez que em ambos (implicitamente no de Coulomb e explicitamente no de Terzaghi) se distingue área de contacto aparente e área de contacto efectiva. E é óbvio nesses mecanismos que a área de contacto aparente não tem qualquer influência na fricção.

Para explicar a diferença entre fricção estática e cinemática e, por consequência, o fenómeno do deslizamento descontínuo (“stick-slip”), foram apresentadas, como se viu, várias teorias das quais destacamos a da instabilidade devida à fluência, de Ishlinski e Kragelsk (1944), a da instabilidade devida à plasticidade, de Rabinowicz (1959) e a da instabilidade devida à rotura frágil das saliências, de Byerlee (1967).

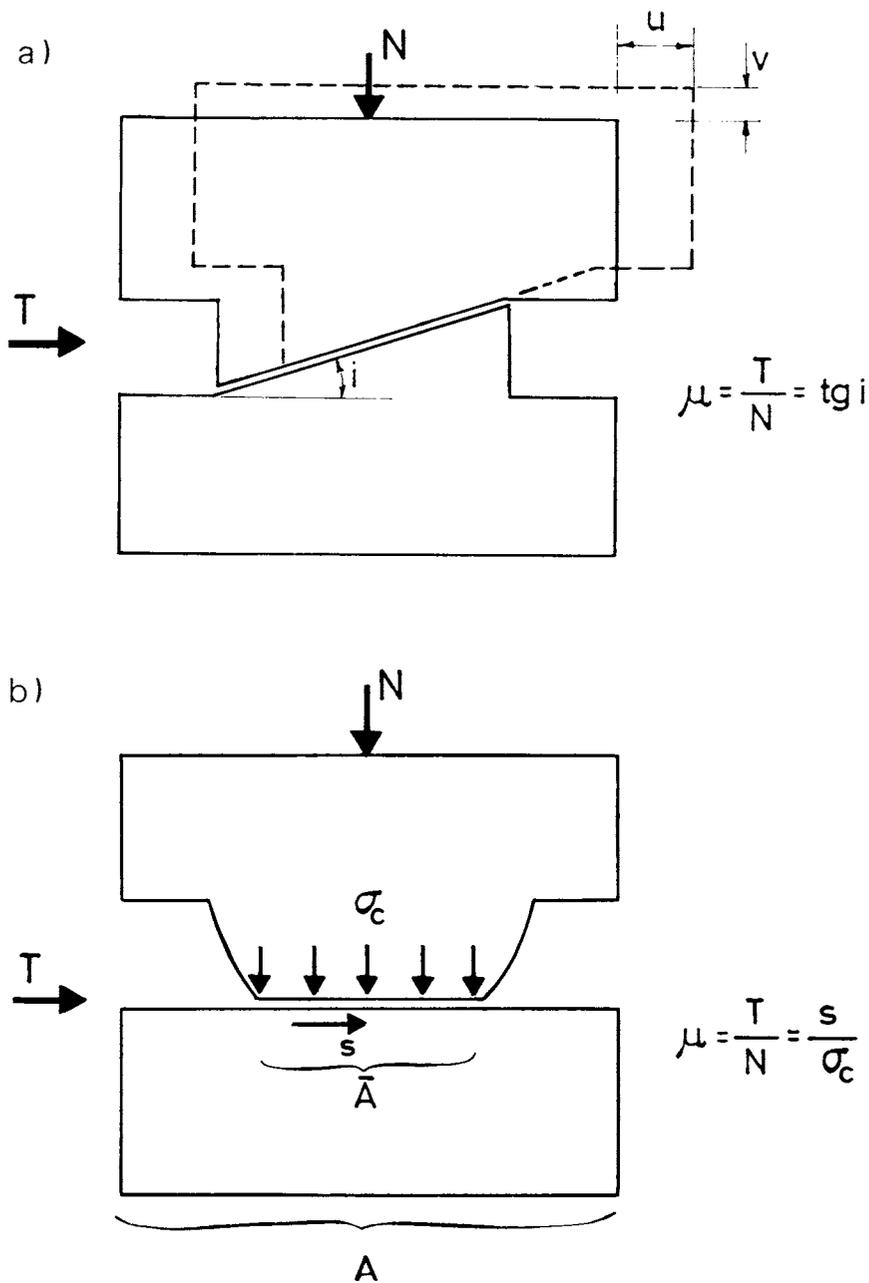


Fig. 3 – Mecanismos que visam a explicação da 1.^a e 2.^a lei da fricção

O mecanismo básico de Ishlinski e Kragelsk consiste, como se viu, em admitir que o tamanho das junções de contacto entre as superfícies aumenta com o tempo devido à fluência do material. E como também admite que a fricção resulta da resistência ao corte dessas junções, tem-se que a fricção estática é maior do que a fricção cinemática porque as junções correspondentes a esta última foram estabelecidas em menos tempo.

O mecanismo de Rabinowicz que, como vimos, também se baseia na resistência ao corte das junções, faz intervir a variação do tamanho dessas junções à medida que se dá o deslocamento das superfícies. E são essas variações de tamanho que fazem variar consequentemente a fricção.

Finalmente o terceiro mecanismo é proposto por Byerlee em 1967 e consiste, como atrás se viu, em assimilar as saliências das superfícies em contacto a diedros (ou cones) em cujas arestas (ou vértices) são aplicadas a carga normal N e a força tangencial T . A fricção corresponde à rotura frágil desses diedros e é dada por

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{1 + \sigma_t / \sigma_c}{\pi/2} \cotg \alpha \left[\frac{\alpha - \frac{1}{2} \text{sen } 2\alpha}{\alpha + \frac{1}{2} \text{sen } 2\alpha} \right] \quad (6)$$

sendo σ_t e σ_c as tensões de rotura à tracção e à compressão do material e

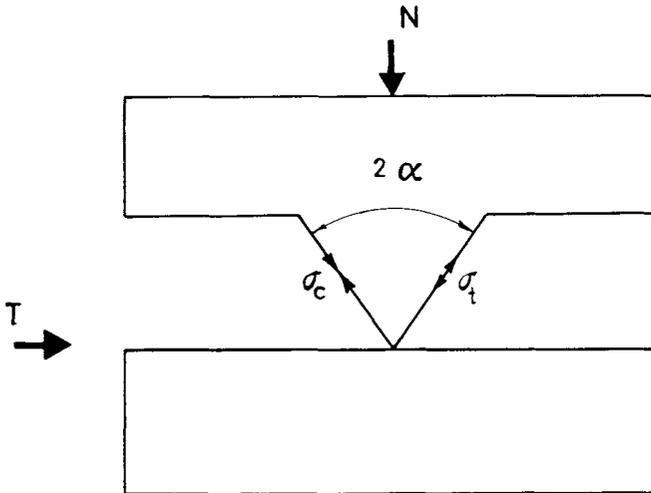


Fig. 4 – Mecanismo da rotura frágil, de Byerlee, que visa a explicação do deslizamento descontínuo (“stick-slip”)

2α o ângulo do diedro. Para os materiais frágeis, para os quais, a relação σ_t/σ_c anda por 0,1, a expressão (6) dá um valor constante de $\mu = 0,15$, o que demonstra a referida proporcionalidade. Para saliências cónicas obtém-se uma expressão análoga à (6) que conduz $\mu = 0,10$. Na Fig. 4 esquematiza-se este mecanismo de Byerlee.

Em relação a outras constatações experimentais, como sejam a acção lubrificante ou antilubrificante da água e doutros fluidos sobre a fricção entre minerais de estrutura laminar ou maciça, a diminuição do ângulo de fricção com a carga normal e a relativa constância desse ângulo para diferentes velocidades de deslizamento, não se encontrou na bibliografia consultada teorizações que as visassem especificamente. Como, porém, não se considera que tenha sido exaustiva a pesquisa bibliográfica realizada, admite-se que o prosseguimento dessa pesquisa detecte contribuições com interesse para as referidas teorizações.

4 – CONCLUSÕES

4.1 – Esta pesquisa bibliográfica mostra que os estudos sobre fricção de materiais geológicos assumiu nas últimas três décadas um grande desenvolvimento, motivado sobretudo pela engenharia geotécnica (obras de enrocamento, taludes rochosos, fundações rochosas, túneis e cavidades subterrâneas, etc.) e pela engenharia sísmica (causas, previsão e características dos sismos tectónicos).

4.2 – A situação actual desses estudos, resumida no Cap. 3, mostra que, embora seja já importante o volume dos resultados obtidos (3.3), foram tão diversos os métodos e condições de ensaio utilizados para a sua obtenção (3.1 e 3.2) que, por vezes, se torna difícil a respectiva interpretação.

4.3 – Todo esse volume de resultados, além de confirmar as leis clássicas da fricção, de Amontons, evidencia também uma série de constatações experimentais (3.4) que, em conjunto com aquelas leis, confere aos fenómenos de fricção uma fonte de conhecimentos sobre a natureza e comportamento dos materiais que se afigura muito importante.

4.4 – Paralelamente com os estudos experimentais sobre a fricção têm sido apresentadas várias contribuições para a sua teorização (3.5), e delas parece concluir-se que esta ainda se encontra longe de terminada. Com efeito, parece insuficiente-

mente contemplada por essas teorias a influência da rugosidade das superfícies e do travamento que dela resulta; e parece também que pouco se tem contado com a deformação elástica das rugosidades, que necessariamente precede a sua plastificação ou rotura frágil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - TERZAGHI, K. - *Erdbaumechanik*, Vienna 1925, p. 50-22.
- 2 - TSHEBOTARIOFF, G. P. and welch, J. D. - *Lateral Earth Pressure and Friction Between Soil Minerals*, Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech., 1948.
- 3 - BOWDEN, F. P. and TABOR, D. - *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford, Clavendon Press, 1950.
- 4 - PENMAN, A. D. M. - *Shear Characteristics of a Saturated Silt, Measured in Triaxial Compression*, Geotechnique, Vol. III, No. 3, 1953 p. 312-328.
- 5 - HORN, H. M. and DEERE, D. U. - *Frictional Characteristics of Minerals*, Geotechnique, Vol. XII, No. 4, Dec. 1962, p. 313-334.
- 6 - ROWE, P. W. - *The Relation Between the Shear Strength of Sands in Triaxial Compression, Plane Strain and Direct Shear*. Geotechnique XIX, No. 1, Mar. 1969, p. 75-86.
- 7 - ROWE, P. W. - *Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, ASCE, Vol. III, June 1972, p. 327-359.
- 8 - SKINNER, A. E. - *A Note on the Influence of Interparticle Friction on the Shearing Strength of a Random Assembly of Spherical Particles*, Geotechnique, Vol. XIX, No. 1, March 1969, p. 150-157.
- 9 - PROCTOR, D. C. and BARTON, R. R. - *Measurements of the Angle of Interparticle Friction*, Geotechnique 24, No. 4, 1974, p. 581-604.
- 10 - PATTON, M. - *Multiple Modes of Shear Failure in Rock*, Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisboa, 1966, Vol. I, p. 509-513.
- 11 - JAEGER, J. C. - *Friction of Rocks and Stability of Rock Slopes*, Geotechnique, 21, No. 2, June 1971, p. 97-134.
- 12 - NASCIMENTO, U. e TEIXEIRA, H. - *Mechanisms of Internal Friction in Soils and Rocks*, Simp. of Int. Soc. Rock Mech., Nancy, 1971, Mem. LNEC, No. 398, 1971.
- 13 - NASCIMENTO, U. - *Contribution to a Theory of Internal Friction*, 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Moscovo, 1973, Mem. LNEC, No. 431, 1974.
- 14 - NASCIMENTO, U. et al - *Influence of Intermediat Stress upon Internal Friction in Block Masses*, 3th Int. Cong. Rock Mech., Denver, USA, 1974, Mem. LNEC No. 461, 1975.
- 15 - NASCIMENTO, U. - *Goniometer for Determining the Interparticle Friction*, 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokio, 1977.
- 16 - BYERLEE, J. D. - *The Mechanics of Stick-slip*, Tectonophysics, 9 (1970), p. 475-486.
- 17 - BYERLEE, J. D. - *Theory of Friction Based on Britle Fracture*, Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 7, June 1967, p. 2928-2934.
- 18 - RABINOWICZ, E. - *Influence of Surface Energy on Friction and Wear Phenomena*, Journal of Applied Physics, Vol. 32 (8), Aug. 1961, p. 1440-1444.