MECANISMO FRICCIONAL DE SULCAGEM*

Frictional Mechanism of Ploughing

Por
ÚLPIO NASCIMENTO**

RESUMO — Nota-se que diversos fenómenos de rotura e desgaste observados no contacto e deslizamento entre materiais geológicos, tais como a sulcagem das superfícies de contacto, não parecem poder explicar-se apenas com base nos mecanismos de fricção de travamento (Coulomb, 1781), de adesão (Terzaghi, 1925) ou de rotura frágil (Byerlee, 1967).

Refere-se a sugestão de Jaeger (1971) de que além de tais mecanismos ocorrerá também um outro, de fractura em superfícies relativamente planas, o que é evidenciado quando o deslizamento se dá entre materiais de diferente dureza e o mais duro risca, estria ou sulca o mais mole.

Considera-se, por um lado, o que se passa na fricção entre metais de diferente dureza, em que o mecanismo de sulcagem está perfeitamente identificado, e cuja resistência friccional é a soma de duas parcelas: uma, independente da sulcagem, que satisfaz a lei de Amontons, e outra, proporcional à secção transversal dos sulcos, que não satisfaz aquela lei (Bowden & Tabor, 1950). E considera-se, por outro lado, os estudos de Nishimatsu (1972) relativos ao corte de rochas pelas máquinas de perfuração de túneis, em que o corte da rocha se faz com ferramentas que abrem sucessivos sulcos contíguos. Deduziu-se assim que a resistência tangencial a vencer pela máquina também é a soma de uma parcela independente dos sulcos, que satisfaz a lei de Amontons, com outra que é proporcional à profundidade dos sulcos, ou seja à sua secção transversal.

A analogia dos dois mecanismos, o da fricção metálica, microscópico, e o do corte de rochas, macroscópico, sugere que a fricção entre materiais geológicos seja também determinada pelo mesmo mecanismo. E, sendo assim, o coeficiente de fricção de tais materiais, quando haja sulcagem, será também a soma duma parcela satisfazendo a lei Amontons, independente dos sulcos portanto, com outra que é proporcional à secção transversal destes.

SYNOPSIS — It seems that several failure and wearing phenomena observed in the contact and sliding of geologic materials, such as the ploughing os contact surfaces, cannot be explained only on basis of interlocking friction (Coulomb, 1781), adhesion (Terzaghi, 1925) or brittle failure mechanims (Byerlee, 1967).

---

* Comunicação apresenta no International Symposium on Weak Rock, Tokio, September, 1981.
** Investigador do LNEC.

Reference is made to the suggestion presented by Jaeger (1971), according to which bisedes those mechanisms, another occurs, i.e. fracturing of comparatively flat surfaces, which is clearly shown when sliding takes place with materials of different hardness and the harder material scratches and ploughes out the softer material.

On one hand, an analysis is made of what occurs in the friction of metals with different degress of hardness, a case in which the mechanisms of ploughing is well-known and whose frictional resistance is the sum of two terms: one being independent of ploughing and complying with Amontons's law, the other proportional to the cross-section of the track and not complying with that law (Bowden & Tabor, 1950). On the other hand, attention is given to the studies by Nishimatsu (1972) on rock cutting by tunnel boring machines, in which cutting is carried out with tools that open successive contiguous tracks. Thus the shear strenght to be overcome by the machine was than deduced to be also the sum of a term independent of tracks that complies with Amontons's law, and other proportional to the depth of tracks, that is their cross-section.

The analogy between the two mechanisms — the mechanisms of mettalic friction, which is microscopic, and the mechanism of rock cutting, of macroscopic characteristics — suggests that the friction between geologic materials sould also be determined by the same mechanism. Therefore, the coefficient of friction of those materials when ploughing occurs will also be the sum of a term complying with Amontons's law, thus independent of tracks, and other term proportional to the cross-section of tracks.

1 — INTRODUÇÃO

Em estudos que se vêm realizando no LNEC sobre a resistência friccional entre partículas de materiais granulares (1) analisaram-se os principais mecanismos que têm sido propostos por vários autores para explicar as clássicas leis da fricção de Amontons e, mais recentemente, o deslizamento descontínuo ("stick-slip") entre materiais geológicos. São eles o mecanismo de travamento ("interlocking") atribuído a Coulomb (2), o mecanismo da adesão, proposto por Terzaghi (3) e o mecanismo da rotura frágil, apresentado por Byerlee (4).

No entanto, diversos fenómenos de rotura e desgaste observados no contacto e deslizamento entre materiais geológicos tal como a sulcagem das superfícies do contacto, não parecem poder explicar-se apenas com base nos referidos mecanismos. Jaeger (5) sugere que, provavelmente, além do referido mecanismo de fractura das saliências, proposto por Byerlee, ocorre também outro mecanismo de fractura em superfícies relativamente planas e paralelas é direcção do deslizamento, o que é, aliás, bem evidenciado quando o deslizamento se dá entre materiais de diferente dureza e o mais duro risca, estria ou sulca ("ploughing") o mais mole (5, p 117). Tendo-se presente o que se passa na fricção entre metais de diferente dureza, em que o mecanismo de sulcagem do mais mole pelo mais duro es-

tá perfeitamente identificado (2), esta sugestão apresenta-se como muito razoável e merecedora de ser analisada. Por outro lado, o recente desenvolvimento dos estudos sobre o corte de rochas, relacionados sobretudo com as máquinas de perfuração de túneis (6), tem evidenciado uma certa analogia entre o corte da rocha por meio de sulcos abertos pela ferramenta da máquina de perfuração e o mecanismo de sulcagem utilizado na teorização de fricção entre metais. E esta analogia proporciona outro visão do problema da fricção entre materiais geológicos, o que pode ter interesse.

São pois estes motivos e a orientação do presente trabalho.

2 — MECANISMO DE SULCAGEM NA FRICÇÃO METÁLICA

Está bem estabelecido o conceito de que a resistência friccional entre superfícies metálicas pode considerar-se como a soma de duas parcelas: uma devida à adesão, isto é, ao corte das junções metálicas que se estabelecem nos contactos efectivos entre as superfícies, contactos esses cuja área á pequena em relação à área aparente das superfícies em contacto mas grande em relação às dimensões moleculares; e outra parcela devida ao processo de sulcagem ("ploughing"). O mecanismo de participação dessas duas parcelas no processo de fricção metálica é resumidamente o seguinte (2, p. 90).

Considere-se o deslizamento entre as superfícies de dois metais de durezas diferentes. Uma dada saliência do metal mais duro penetra na superfície do mais mole até a área de contacto ser suficiente para suportar a carga N aplicada à saliência. Sendo A a projecção da área de contacto assim gerada e q a tensão de cedência do metal mais mole ter-se-á.

$$\overline{A} = \frac{N}{q} \tag{1}$$

A força T necessária para fazer deslizar a saliência na direcção paralela à superfície será, como se disse, a soma de duas parcelas: uma T_s para vencer a resistência ao corte s devida às junçõs metálicas formadas nos pontos de íntimo contacto entre os dois metais; e a outra T_p para vencer a resistência à sulcagem.

Será pois

$$T = T_s + T_p \tag{2}$$

Sendo a primeira parcela dada pelo produto

$$T_s = \overline{A}\, s \tag{3}$$

Quando à segunda parcela, sendo A_p a secção transversal do sulco e p a pressão média, exercida na direcção do deslizamento, necessária para deslocar o metal do sulco da frente da saliência, será dada pelo produto

$$T_p = \overline{A_p}\, p \tag{4}$$

Como para uma saliência hemisférica de raio r que abra sulco de largura 1, a área A_p é dada aproximandamente pela expressão $1^3/12$ r, ter-se-à

$$T_p = \frac{1}{12}\,\frac{1^3}{r}\,p \tag{5}$$

Quer dizer, a resistência friccional por sulcagem é proporcional ao cubo da largura do sulco.

A verificação experimental desta expressão foi feita por meio de ensaios em que se utilizaram deslizadores de aço, simulando a saliência, sobre uma superfície plana de indium. Deu-se aos deslizadores as formas hemisféricas, cilíndrica (de geratriz paralela ao deslizamento) e de espada (cilindro de geratriz com comprimento quase nulo) formas essas que permitiram manter constante a secção transversal do sulco A_p. Como deste modo a parcela T_p, de acordo com (5), também se mantém constante, isso permitiu, por diferença entre valores totais T determinados, calcular a parcela T_s e, portanto, T_p. Os resultados assim obtidos confirmaram a expressão (5) mostrando que, efectivamente, há proporcionalidade entre T_p e 1^3; e, além disso, mostraram ainda que essa correlação não é afectada pela presença de lubrificante nas superfícies em contacto (2, p. 93).

Dividindo (2) por N e atendendo a (1) e (3) ter-se-à pois a seguinte expressão para o coeficiente de fricção:

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{s}{q} + \frac{A_p}{A} \cdot \frac{p}{q} \tag{6}$$

3 — MECANISMO DE CORTE DE ROCHAS

A construção de máquinas para perfuração de túneis em rocha põe problemas relativos às respectivas ferramentas de corte, tais como forma, material

constituinte, esforços desenvolvidos na ferramenta, rendimento em termos de volume de rocha escavada por unidade de energia dispendida, velocidade de avanço, etc., cuja solução requer um bom conhecimento dos mecanismos desse corte. Por isso tais mecanismo têm sido ultimamente objecto de numerosos estudos, como por exemplo o de Nishimatsu (6) que seguidamente resumiremos e analisaremos do ponto de vista que interessa ao mecanismo de sulcagem.

O modelo considerado por Nishimatsu, tendo em vista um processo de corte que considera ser por rotura frágil, é o que se esquematiza na Fig. 1, supondo-se que o processo de corte decorre em estado plano de tensão. Logo que o cutelo da

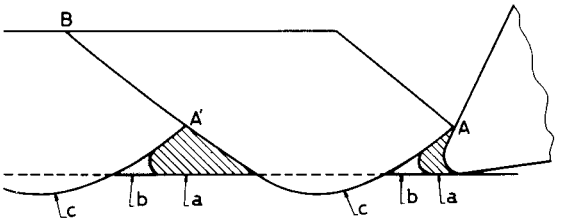

Fig 1 — *Esquema do processo de rotura do corte da rocha (Nishimatsu 1972)*

ferramenta é empurrado contra a frente do sulco gera-se junto ao cutelo uma zona esmagada. À medida que a ferramenta é forçada a penetrar mais profundamente na frente, essa zona esmagada é apertada contra a face de ataque ("rake face") da ferramenta, sendo aí recompactada e ficando a ela aderente, conforme se esquematiza na Fig. 1 em a. Aparece assim a "zona esmagada primária" que actua como se fosse um novo cutelo formado sobre a ferramenta. Quanto mais profunda é esta penetração do cutelo maior será a força exercida na ferramenta. Atinge-se assim um estado de tensão que dá lugar à iniciação e propagação de fissuras macroscópicas de que resulta a formação de uma lasca ("coarse chip"). Após a formação de uma lasca, o contínuo avanço da ferramenta esmaga finamente uma pequena ponta de rocha que ficou sob a fissura no ponto onde esta teve início, conforme se mostra na Fig. 1, em b. Esta é a designação "zona esmagada secundária".

No prosseguimento do processo de corte, a ferramenta avança sem grande resistência para uma zona de sobrecorte (Fig. 1, c) até que o cutelo seja forçado contra a próxima frente do sulco, frente esta formada pelas fissuras macroscópi-

cas anteriormente referidas. O ciclo do processo de corte descrito repete-se depois novamente. Neste ciclo a força de corte cresce com o avanço da ferramenta até um máximo correspondente ao início das fissuras macroscópicas de rotura, e decresce depois abruptamente.

Nota-se que a fissura macroscópica de rotura não tem início no ponto mais baixo da zona esmagada primária, mas sim num ponto junto ao limite superior desta zona (ponto A na Fig. 1), circunstância que contribui para a formação da zona esmagada secundária.

A partir deste mecanismo, Nishimatsu estabelece o esquema de forças e tensões da Fig. 2, admitindo, em primeiro lugar, que ao longo da recta AB as tensões se distribuem, concentrando-se em A e anulando-se em B, e em segundo lu-

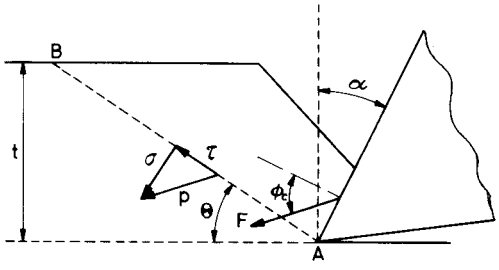

Fig. 2 — *Esquema das forças e tensões no corte de rocha (Nishimatsu 1972)*

gar, que a direcção da tensão resultante p é constante ao longo de AB, ele determina os valores das respectivas componentes normal σ e tangencial τ .

Adoptando depois como critério de rotura da rocha

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \tag{7}$$

deduz a seguinte expressão para a força de corte:

$$F = \frac{2}{n + 1} \cdot C\, t \frac{\cos \phi}{1 - \operatorname{sen} (\phi - \alpha + \phi_c)} \tag{8}$$

sendo ϕ_c o ângulo de fricção de corte da rocha ("angle of friction of rock cutting") e α o ângulo de ataque da ferramenta ("rack angle").

As componentes desta força, a força de corte T, na direcção do corte, e a força de pressão N ("thrust force") têm evidentemente as expressões

$$T = F \cos (\phi_c - \alpha)$$
$$N = F \operatorname{sen} (\phi_c - \alpha) \qquad (9)$$

Para verificação experimental da sua teoria, Nishimatsu realizou ensaios sobre superfícies de rocha serrada utilizando ferramentas de corte, actuando com a velocidade de 5,2 m/min, e com as seguintes dimensões:

ângulo de ataque: 10, 20, 30 e 40°
ângulo de folga ("clearance angle"): 10°
ângulo da ferramenta: 30 mm.

A profundidade de corte variou entre 2 e 16 mm. Experimentaram-se dois materiais com as seguintes características:

	Tufo arenoso	Argamassa de cimento		
		1	2	3
Resistência à compressão (kgf/cm²)	373	108	133	109
Resistência à Tracção (kgf/cm²)	51,8	12,7	14,2	14,3
Resistência ao corte (kgf/cm²)	90,8	22,9	26,3	25,3
Ângulo de atrito interno	51° 54'	46° 00'	43° 15'	49° 45'

As forças de corte e de pressão forma medidas com dinamómetros instalados na placa de fixação da ferramenta e registadas num oscilógrafo. Tomaram-se como valores dessas forças as médias dos mais elevados valores registados em cada 0,1 segundo.

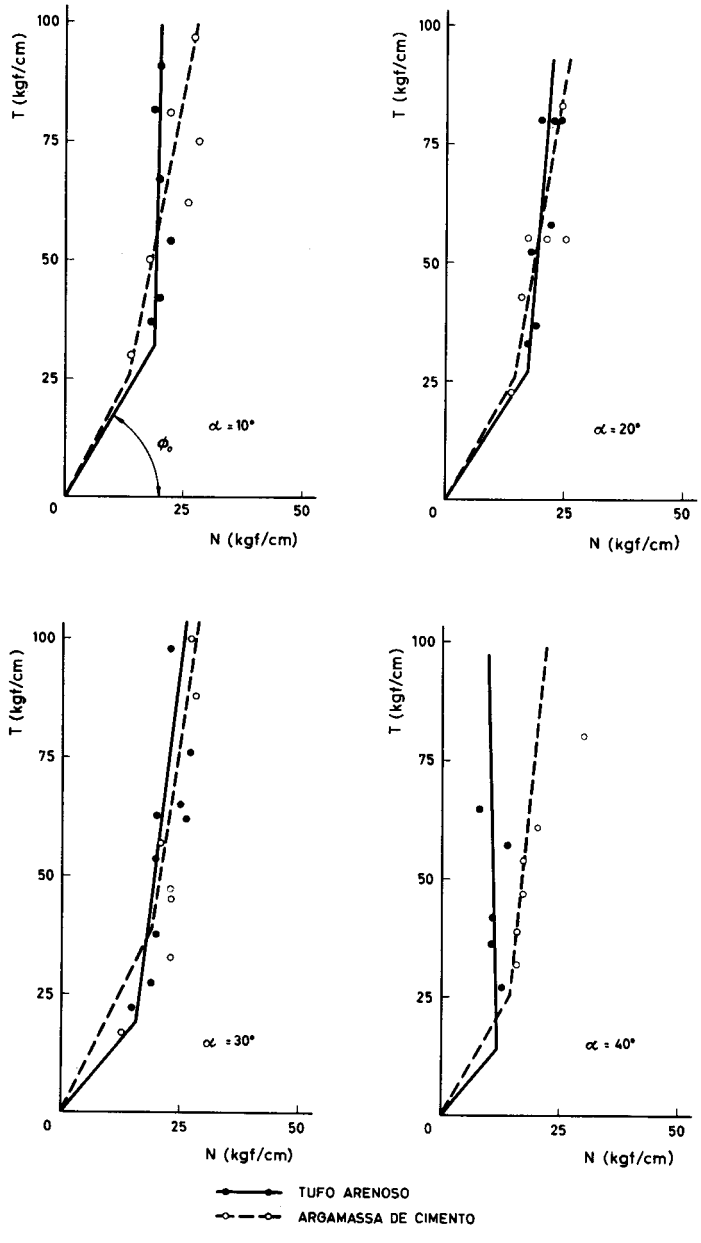

Fig. 3 — *Forças de corte T em função das forças de pressão N.*

Dos resultados obtidos tira Nishimatsu várias conclusões entre as quais a de que há uma relação linear entre a força F e a profundidade do sulco do tipo:

$$F = a + bt \tag{10}$$

atribuindo a primeira parcela à zona esmagada secundária e a segunda parcela à iniciação da fissura de rotura macroscópica.

Tendo porém presente a analogia com a sulcagem na fricção metálica, a expressão (10) mostra que também no corte de rochas a resistência total é a soma de duas parcelas, uma que é devida à sulcagem e outra que o não é.

Mostra ainda essa expressão que, tal como na fricção metálica, a parcela devido à sulcagem é proporcional à secção transversal do respectivo sulco, uma vez que tal secção, por ser de largura constante, é proporcional à sua profundidade t. E daqui resulta finalmente que a sulcagem requer a aplicação na secção do sulco duma pressão p, que é característica do material e não depende portanto da profundidade do sulco.

Analisemos agora os resultados de Nishimatsu pondo-os em diagramas de coordenadas N e T, mais usuais em estudos relativos à fricção.

Dos valores de N_0 e T_0 correspondentes a sulcos de profundidade nula (t = O), deduzimos o correpondente ângulo de fricção ϕ_0 pela expressão

$$\phi_0 = \text{arc tg} \frac{T_0}{N_0} \tag{11}$$

Marcando na Fig. 3, a partir da origem, as rectas inclinada de ϕ_0 para cada série de ensaios, obtêm-se as poligonais nela indicadas. Nestas pologonais, o primeiro segmento representará a parcela F_0 da resistência friccional que não é devida à sulcagem e em que se verifica a Lei Amontons, enquanto que a segunda traduz a parcela devida à sulcagem F_p, em que aquela lei não é verificada.

Ter-se-à pois que a resistência total F é dada pela soma vectorial:

$$F = F_0 + F_p \tag{12}$$

sendo

$$F_p = pt \tag{13}$$

Nas Figs. 4 e 5 apresenta-se um esquema de ferramenta de corte com os diferentes ângulos de ataque e as correspondentes direcções das duas referidas par-

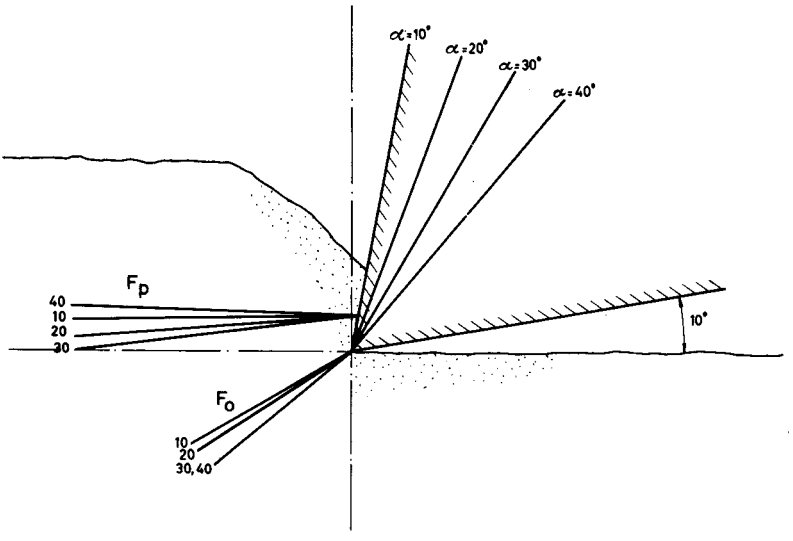

Fig. 4 — *Componentes F_o e F_p da resistência à sulcagem do tufo arenoso*

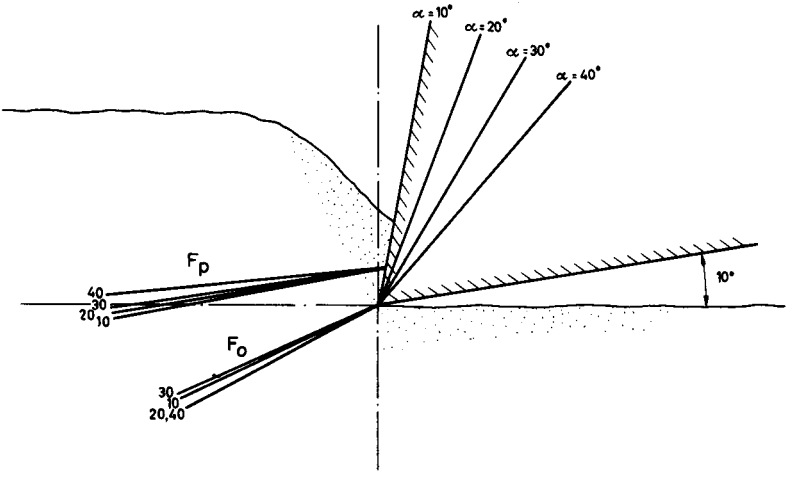

Fig. 5 — *Componentes F_o e F_p da resistência à sulcagem da argamassa de cimento*

celas, conforme se deduz da Fig. 3. Daí resulta que a parcela F_p, devida à sulcagem, tem, para os diferentes valores de α, obliquidades em relação à face de ataque da ferramenta, que variam desde 15° a mais de 45°, conforme se mostra na Fig. 6. Sendo de presumir que estas obliquidades mais baixas sejam inferiores ao ângulo de fricção ϕ_c entre a rocha e a ferramenta, aquela não poderá deslizar so-

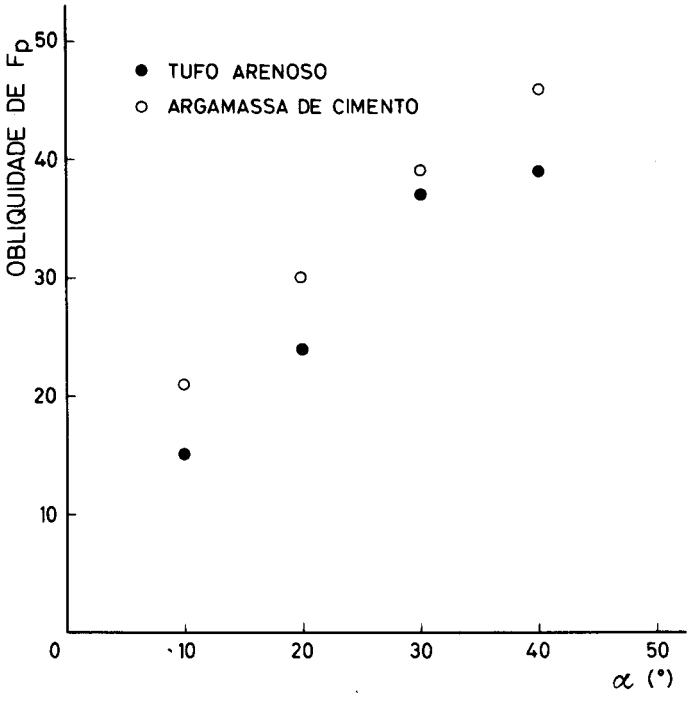

Fig. 6 — *Obliquidade de F_p em função do ângulo de ataque*

bre a face de ataque. Quando, pelo contrário, essa obliquidade atingir o dito ângulo de fricção, então haverá deslizamento. Parece pois que poderá haver duas cinemáticas de sulcagem: para pequenos ângulos de ataque, as lascas serão empurradas à frente da ferramenta; para os maiores ângulos de ataque as lascas da rocha subirão, deslizando, pela face da ferramenta.

No entanto a interpretação de Nishimatsu é a de que o ângulo de fricção do corte da rocha ϕ_c depende do ângulo de ataque e que tal dependência constitui um suporte da sugestão de que junto ao cutelo da ferramenta se forma uma zona esmagada que actua como se fosse um novo cutelo formado sobre a ferramenta.

A resistência friccional dada pelas referidas poligonais terá pois a forma

$$T = N_o \operatorname{tg} \phi_o + (N - N_o) \operatorname{tg} \phi_p \tag{14}$$

ou, atendendo a (3.8)

$$T = N_o \operatorname{tg} \phi_o + p\ t\ .\ \operatorname{sen} \phi_p \tag{15}$$

No Quadro seguinte apresentam-se os parâmetros destas expressões deduzidos da Fig. 4.

	Tufo arenoso					Argamassa de cimento				
α	N_o kgf/cm	T_o kgf/cm	$\varnothing_o$ o	$\varnothing_p$ o	P kgf/cm²	N_o kgf/cm	T_o kgf/cm	$\varnothing_o$ o	$\varnothing_p$ o	P kgf/cm²
10	16	28	60	85	60	13	25	63	79	47
20	16	26	58	86	55	12	22	61	80	37
30	17	20	50	87	80	14	28	64	81	44
40	15	18	50	91	50	15	27	61	81	37

4 — CONCLUSÕES

Resumidamente, parece poder concluir-se o seguinte:

a) Na fricção metálica, em que há sulcagem, a resistência friccional é a soma de duas parcelas, uma, independente da sulcagem, que satisfaz a lei Amontons, e outra, proporcional à secção transversal dos sulcos, que não satisfaz àquela lei [2].

b) Nas máquinas de perfuração de túneis em que o corte da rocha se faz com ferramentas que abrem sucessivos sulcos contíguos, a resistência tangencial também é a soma de uma parcela, independente dos sulcos, que satisfaz a lei de Amontons, com outra que é proporcional à profundidade do sulco, ou seja à sua secção transversal.

c) A analogia dos dois mecanismos, o da fricção metálica, microscópico, e o do corte de rochas, macroscópico, sugere que a fricção entre materiais geológicos seja também determinada pelo mesmo mecanismo. E sendo assim, o coeficiente de fricção entre materiais geológicos, quando há sulcagens, será também a soma duma parcela de acordo com a lei de Amontons, independente dos sulcos portanto, com outra que é proporcional à secção transversal destes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 — NASCIMENTO, U. — Notas sobre a Resistência Friccional em Partículas de Materiais Granulares. LNEC, relatório, proc. 55/13/3451, Lisboa, 1977. Geotecnia, N° 22 Lisboa, Março de 1978.

2 — BOWDEN, F. P. and TABOR, D. — The Friction and Lubrication of Solids, Oxford Clarendon Press, 1950.

3 — TERZAGHI, K. — Erdbaumechanik, Viena, 1925.

4 — BYERLEE, J. D. — Theory of Friction Based on Brittle Fracture, Journal of Applied Physics, Vol. 38, N.° 7, June 1967, p. 2928-2934.

5 — JAEGER, J. C. — Friction of Rocks and Stability of Rock Slopes, Geotechnique, 21, N.° 2, June 1971, p. 97-134.

6 — NISHIMATSU, Y. — The Mecanics of Rock Cutting. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, Pergamon Press, 1972, p. 261-270.

7 — REILLY, M. P. ROXBOROUGH, F. F. and HIGNETT, H. J. — Programme of Laboratory Pilot and Full-scale Experiments in Tunnel Boring, Proc. Int. Symp. Tunnelling 76, Inst. Min. Met., London, March 1976.