

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA COMO FERRAMENTA PARA A PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE GRANITOS ORNAMENTAIS: UMA DISCUSSÃO

Fabiano Cabañas Navarro¹ e Antonio Carlos Artur²

¹ Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Geociências IGCE/UNESP
Av. 24A, 1515, B. Bela Vista, 13506-900 - Rio Claro, SP

Fone: (19) 526-2824/ Fax: (19) 524-9644/ e-mail: navarrofc@bol.com.br

² Depto de Petrologia e Metalogenia - DPM/IGCE/UNESP

Av. 24A, 1515, B. Bela Vista, 13506-900 - Rio Claro, SP

Fone: (19) 526-2824/ Fax: (19) 524-9644/ e-mail: acartur@rc.unesp.br

RESUMO

O presente trabalho discute a aplicabilidade e importância da utilização de parâmetros petrográficos como ferramenta para a previsão do comportamento tecnológico de granitos ornamentais. Para isso utiliza-se de dados inéditos e de trabalhos anteriores dos autores, onde são apresentados informações petrográficas e tecnológicas de rochas ornamentais com diferentes composições, texturas e estruturas provenientes dos estados de São Paulo, Espírito Santo e Bahia, os quais foram correlacionados através de métodos estatísticos de análise multivariada. Com isso foram hierarquizadas as variáveis petrográficas mais relevantes para cada um dos ensaios tecnológicos considerados (porosidade aparente, desgaste abrasivo Amsler, resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura), e posteriormente discutido os significados estatístico e tecnológico dessas variáveis. As equações matemáticas definidas foram testadas através da aplicação de parâmetros petrográficos obtidos em rochas tecnologicamente não catalogadas. Os resultados obtidos confirmam a eficiência dos parâmetros petrográficos como um instrumento favorável na previsão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais *strictu sensu*, representando um método rápido e de baixo custo. Além disso, reconheceu-se a necessidade de aperfeiçoamento desses modelos através de estudos que considerem parâmetros petrográficos adicionais, tais como orientações cristalográficas e a orientação das diferentes famílias de fraturas.

INTRODUÇÃO

A crescente utilização de rochas ornamentais e de revestimento no cenário mundial, e sobretudo de granitos no Brasil ao longo dos últimos anos (ABIROCHAS, 2001), tem diversificado as situações de uso/adequação e, conseqüentemente, acarretado maior probabilidade de ocorrência de patologias por emprego inadequado da rocha. Situações dessa natureza conduzem ao prejuízo estético, econômico e cultural de uma obra arquitetônica ou civil, sendo recomendável estudos prévios de caracterização petrográfica e tecnológica desses materiais afim de fornecer subsídios para a correta aplicação da rocha, procedimentos esses que previnem a especificação inadequada dos materiais.

A atuação de um mercado consumidor cada vez mais exigente quanto aos padrões de qualidade e

critérios de manuseio e aplicação de rochas, tem motivado pesquisadores no mundo todo ao estudo das propriedades físicas, mecânicas e químicas desses materiais. Nesse sentido um dos caminhos para a qualificação das rochas tem sido a procura de índices de qualidade expressos por equações matemáticas (Tuğrul & Zarif, 1999; Navarro *et al.*, 1999; Navarro & Artur, 2001; Navarro, 2002) e métodos não destrutivos (Weiss *et al.*, 2000; Artur *et al.*, 2001) para o reconhecimento das propriedades das rochas, visando com isso a previsão do comportamento tecnológico e o planejamento e caracterização adequada do material a custos mais acessíveis.

Sob este foco a contribuição do presente trabalho com relação à aplicação de estudos petrográficos para a previsão do comportamento tecnológico de granitos ornamentais, se faz pela discussão de equações apresentadas e discutidas nos trabalhos de Navarro & Artur (2001) e também testadas por Navarro (2002). Essas equações, se baseiam em parâmetros petrográficos (composição mineral, texturas e estruturas) e se propõem à previsão de parâmetros físicos e mecânicos (porosidade, desgaste abrasivo, resistência à compressão e módulo de ruptura) em rochas granitoides utilizadas como material de revestimento.

Os dados apresentados por esses autores, permitem a discussão da eficácia da utilização de informações petrográficas para a previsão de parâmetros tecnológicos de rochas ornamentais correspondentes à granitos *strictu sensu* segundo a classificação de Streckeisen (1976).

PETROGRAFIA E PARÂMETROS TECNOLÓGICOS: PROBLEMÁTICA E MÉTODOS DE CORRELAÇÃO

A investigação da influência das características petrográficas nos parâmetros físicos e mecânicos das rochas é objeto de estudos técnicos e científicos a longa data, visto a importante contribuição que essas informações podem fornecer para a construção de obras e o aproveitamento da rocha como material de construção e revestimento (Mello Mendes *et al.* 1966; Mello Mendes, 1968; Rzhovsky & Novik, 1971; Yoshida, 1972; Whittaker *et al.*, 1992; entre outros).

A interação entre a composição, texturas e estruturas que as rochas podem apresentar, é o fator que define a resistência aos agentes químicos, físicos

e mecânicos de toda rocha, ou seja é o resultado da combinação das características petrofísicas do material (Rzhevsky & Novik, 1971).

Entretanto deve-se assinalar que a adequada caracterização de todas as variáveis petrográficas determinantes do comportamento tecnológico das rochas está ligada a dificuldades de quantificação de alguns desses parâmetros, tais como o grau de microfissuramento e o grau de alteração (Rzhevsky & Novik 1971; Yoshida, 1972). Tais dificuldades, obviamente influenciam a obtenção de modelos ou índices para a previsão da qualidade de rochas baseados em características petrográficas. Decorre desse fato a prática freqüente de se correlacionar pares de dados tecnológicos, tais como velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e parâmetros mecânicos; porosidade e parâmetros mecânicos, entre tantas outras combinações (Mello Mendes, 1968; Whittaker *et al.*, 1992). Do ponto de vista técnico e econômico essa prática é bastante adequada, pois permite que se utilize um resultado de ensaio tecnológico de baixo custo e rápida obtenção para a previsão do resultado de outro ensaio mais caro e demorado, com parâmetros confiáveis.

Entretanto, diversos autores correlacionaram dados petrográficos e tecnológicos através de métodos estatísticos baseados na análise de regressão simples (Vutukuri *et al.*, 1974; Lama & Vutukuri, 1978; entre outros).

Para o setor de rochas ornamentais ao nível nacional, as primeiras contribuições sobre a importância dos estudos petrográficos foram feitas por Frazão & Farjallat (1995), Rodrigues *et al.* (1996) e Navarro (1998). Todos esses trabalhos discorrem qualitativamente acerca da importância dos estudos petrográficos e do nível de informação detalhada que é possível obter através dessa técnica, e com isso aprimorar a compreensão dos resultados tecnológicos e assegurar uma melhor aplicação da rocha.

Posteriormente alguns trabalhos procuraram estabelecer relações entre parâmetros petrográficos e tecnológicos de maneira que pudessem ser expressas em equações matemáticas, e portanto passíveis de serem utilizadas como instrumento de previsão. Tuğrul & Zarif (1999) estudaram amostras de granitos turcos e apresentaram diversas equações de regressão simples, correlacionando pares de parâmetros tecnológicos e pares de parâmetros tecnológicos e petrográficos. Através dos dados obtidos esses autores concluíram que a composição mineral, nomeadamente a variação de feldspato e quartzo, são os fatores que mais influenciam as propriedades mecânicas das rochas analisadas, havendo ainda certas complicações quando se compara o grau de engrenamento (tipos e relações de contatos) desses minerais, cabendo para essas situações estudos específicos.

Navarro *et al.* (1999) utilizaram dados de análises petrográficas obtidos em um conjunto de 66 amostras provenientes dos estados de São Paulo, Espírito Santo e Bahia, os quais foram correlacionados aplicando-se o coeficiente de Pearson com dados tecnológicos referentes a essas amostras. Como resultado propuseram três equações

para previsão do desgaste abrasivo Amsler e quatro equações para previsão do módulo de ruptura, todas fundamentadas nos parâmetros petrográficos apontados pelo tratamento estatístico como as variáveis mais importantes para a previsão de cada um dos ensaios considerados. Dessa maneira, o coeficiente de correlação de Pearson mostrou que as porcentagens de quartzo e biotita e o número médio de fraturas por unidade de área são os parâmetros mais importantes para a previsão do desgaste abrasivo. Analogamente para o ensaio de resistência à flexão, esses autores reconheceram que as porcentagens de biotita e feldspato potássico e as granulações de feldspato potássico e plagioclásio, são as feições que mais influenciam essa propriedade.

Na evolução desses trabalhos, Navarro & Artur (2001) também apresentam equações matemáticas baseadas em dados petrográficos para a previsão do comportamento tecnológico de alguns ensaios. Tais equações mostram-se mais refinadas e foram conseguidas pela aplicação de técnicas de análise estatística multivariada.

Conforme comentado por Navarro (2002), as variáveis petrográficas podem ser agrupadas genericamente em três categorias (composição mineral, texturas e estruturas), definindo um trinômio de complexa inter-relação, que responde pelo comportamento físico e mecânico da rocha (Figura 1). Do ponto de vista estatístico, compõe um universo multidimensional bastante complexo, uma vez que muitas rochas com feições composicionais, texturais e estruturais diferentes podem apresentar propriedades físicas e mecânicas semelhantes, ou ainda rochas com composição, texturas e estruturas semelhantes podem apresentar comportamentos tecnológicos distintos.

Dessa maneira é correto admitir que cada variável petrográfica seja responsável por parte da variabilidade presente em um dado tecnológico, e que a somatória dessas variáveis definem o comportamento físico e mecânico da rocha (Navarro, 2002).

Pelo exposto acima, conclui-se que o comportamento tecnológico de uma rocha, seja ele físico, químico ou mecânico, é o resultado da interação de diversos fatores e, portanto, sob o ponto de vista estatístico pode ser entendido nas concepções de Davis (1981) como um sistema multivariado. Isso quer dizer que algumas variáveis desse sistema, assumidas como dependentes e representadas pelos parâmetros tecnológicos, podem ser explicadas por um conjunto de variáveis petrográficas, ditas independentes.

Por permitir a correlação de diversos dados simultaneamente, hierarquizando as variáveis segundo o grau de variabilidade presente em cada uma (Davis, 1986), entende-se que a aplicação das diversas técnicas de análise multivariada seja o método estatístico mais indicado para o tratamento desses dados, conforme será discutido a seguir.

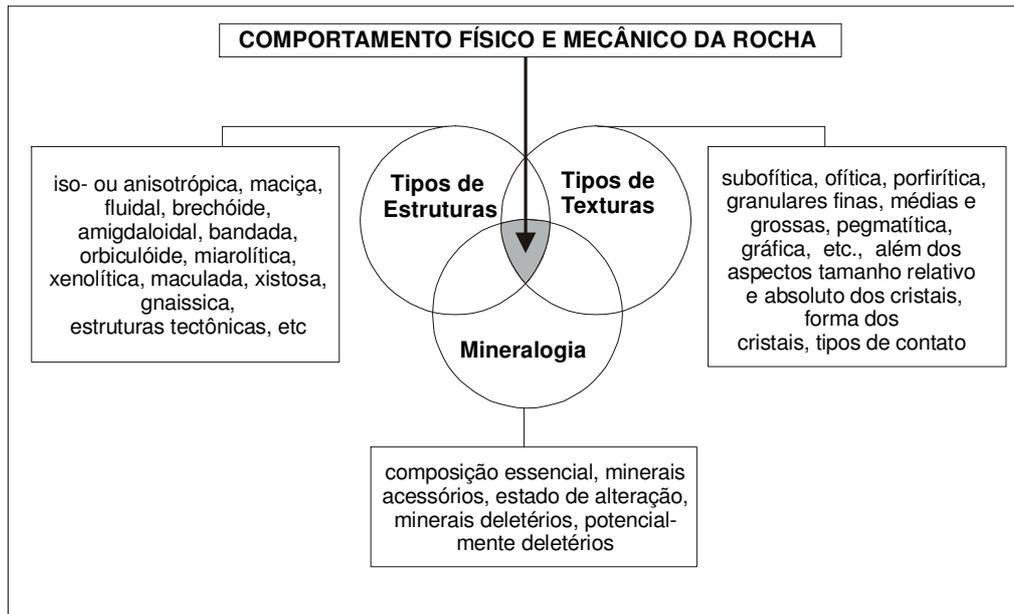


FIGURA 1: Esquema ilustrando o comportamento físico e mecânico de uma rocha, como resultado da interação entre os de aspectos petrográficos definidos pela mineralogia, texturas e estruturas (modificado de Navarro, 2002)

AValiação da Caracterização Petrográfica como Ferramenta para Previsão do Comportamento Tecnológico de Granitos Ornamentais

Com base nas informações contidas nos trabalhos de Navarro & Artur (2001) e Navarro (2002), é possível discorrer com certo detalhe sobre a validade da caracterização petrográfica como ferramenta para previsão do comportamento tecnológico de granitos ornamentais.

Para tanto, serão reproduzidos aqui parte dos dados apresentados por esses autores. Navarro & Artur (2001) submeteram à análise petrográfica 66 amostras de rochas comercialmente designadas como granitos, e provenientes dos estados de São Paulo, Espírito Santo e Bahia. As rochas utilizadas correspondem petrograficamente a sienogranitos, monzogranitos, sieno- e monzogranitos porfiros, charnoquitos, ortognaisses, gabros/dioritos e sienitos.

Os parâmetros petrográficos avaliados foram a porcentagem mineral, granulação média dos minerais essenciais, número médio de fraturas com e sem preenchimento por unidade de área, comprimento médio das fraturas com e sem preenchimento, porcentagem de área alterada e número médio de contatos minerais subdivididos nas categorias plano, côncavo-convexo e serrilhado. Os dados de caracterização tecnológica considerados foram a porosidade, o desgaste abrasivo Amsler, módulo de ruptura, resistência à compressão uniaxial e coeficiente de dilatação térmica linear, todos obtidos de catálogos publicados por IPT (1990), IPT (1993) e SGM (1994).

Esse extenso banco de dados foi tratado estatisticamente em duas etapas. Na primeira foi aplicado um método de análise multivariada conhecido como análise discriminante, visando o

reconhecimento de agrupamentos litológicos com afinidades petrográficas e tecnológicas. Através dessa técnica os autores reconheceram dois conjuntos de amostras, sendo um representado por todas as amostras consideradas e outro excluindo-se as amostras classificadas como gabros/dioritos e sienitos.

Nas amostras desses dois agrupamentos os autores aplicaram a análise de regressão múltipla visando com isso a obtenção de equações matemáticas para previsão dos cinco ensaios tecnológicos por eles considerados. Adicionalmente, apresentaram a porcentagem de variabilidade explicada pelas variáveis petrográficas consideradas, para cada um dos ensaios assumidos, ou seja, o quanto as variáveis petrográficas explicam os parâmetros tecnológicos utilizados.

Em continuidade a esse trabalho, Navarro (2002, páginas 46 a 48) aplica o teste estatístico F, e sugere a exclusão das variáveis comprimento de fraturas e comprimento de fraturas com preenchimento das equações propostas. Essa informação é importante e será considerada adiante para a sugestão da adequação do método de obtenção dos dados referentes ao microfissuramento.

Navarro (2002) apresenta cinco conjuntos de equações, e conclui que os conjuntos de equações 1 e 2 são mais indicados para a previsão do comportamento físico e mecânico de granitos *strictu sensu* (campos 3A e 3B no diagrama de Streckeisen, 1976).

O conjunto de equações 1 foi obtido utilizando-se todas as amostras estudadas e o conjunto de equações 2 utilizando-se apenas as amostras de composição granítica.

Na Tabela 1 é apresentada a porcentagem de variabilidade explicada para cada ensaio

tecnológico considerado por esse autor, o que permite algumas considerações. Para o ensaio de **porosidade**, pode-se concluir que as porcentagens de quartzo (Qz) e biotita (Bt), no conjunto de equações 1, e a granulção média de feldspato potássico (grFK) e a porcentagem de plagioclásio (PL), no conjunto de equações 2, são os fatores que explicam melhor a variabilidade dos resultados de porosidade. Isso não significa dizer que as demais variáveis não são significativas, mas sim que influenciam em menores proporções os resultados desse parâmetro para o universo de amostras estudado.

Além disso, o tratamento apresentado não considera as relações e porcentagem de correlação entre dois parâmetros petrográficos. Como exemplo cita-se a influência que a porcentagem de quartzo pode apresentar sobre a maior ou menor ocorrência de contatos côncavo-convexos e serrilhados, como por exemplo ocorre em rochas com quartzo intersticial. Ou ainda admitir que a granulção e porcentagem dos feldspatos podem significar maior grau de alteração, conseqüentemente influenciando a porosidade.

Considerando os valores correspondentes para o **desgaste abrasivo Amsler** apresentado na Tabela 1, observamos que para o conjunto de equações 1 as variáveis número médio de fraturas preenchidas (ftp) e porcentagem de feldspato potássico (FK) são as mais significativas. Observa-se ainda para este caso que as variáveis alteração (Alt), porcentagem de quartzo (Qz), feições estas importantes para o desgaste, estão entre as últimas a serem excluídas do modelo. Para o conjunto de equações 2 as variáveis mais significativas são a porcentagem de feldspato potássico (FK) e o grau de alteração (Alt), cabendo destaque para as variáveis representadas pelas três categorias de contatos adotadas.

Os valores referentes ao ensaio de **resistência à compressão uniaxial** obtidos para o conjunto de equações 1 mostram maior influência das variáveis número de fraturas (ft), número médio de fraturas com preenchimento (ftp) e granulção de quartzo (grQz), com certa contribuição dos tipos de contato, sobretudo do tipo serrilhado (cse) e porcentagem de biotita (Bt). Para o conjunto de equações 2, as variáveis reconhecidas como mais influentes para esse ensaio foram os contatos planos (cpl) e a granulção de quartzo (grQz). A alteração (Alt) e o número médio de fraturas (ft) também mostram contribuições significativas.

No que se refere ao ensaio de **módulo de ruptura**, nota-se que as variáveis mais importantes para definir este parâmetro no conjunto de equações 1 são as porcentagens de biotita (Bt) e (FK), e também a granulção média do plagioclásio (grPL). Para o conjunto de equações 2, as variáveis petrográficas reconhecidas como mais significativas foram a granulção de feldspato potássico (grFK), os contatos côncavo-convexos (ccc), a porcentagem de área alterada (Alt) e o número médio de fraturas preenchidas (ftp). Deve-se deixar claro que o fato de considerar alguns parâmetros como mais relevantes para a explicação e/ou previsão de um resultado

tecnológico não desqualifica os demais parâmetros, visto que uma propriedade tecnológica nada mais é que o resultado da inter-relação de todos os parâmetros analisados.

Comentários adicionais devem ser feitos com relação a certas variáveis como a porcentagem de área alterada e os tipos de contatos minerais considerados. É de senso comum que tais parâmetros são determinantes para a obtenção de uma dado tecnológico, especialmente as propriedades mecânicas. Entretanto essas variáveis não se destacaram muito em relação às demais no tratamento aplicado. Segundo comentários de Navarro (2002), pode-se atribuir essas peculiaridades ao banco de dados utilizado, onde observa-se que todas amostras consideradas nesses tratamentos apresentam valores de resistência à compressão uniaxial entre 93,2 e 255,6 MPa, os quais permitem classificá-las quanto ao grau de coerência, conforme critérios propostos pela ISRM (1978) como “muito resistentes” (classe R5) a “extremamente resistentes” (classe R6). Esse fato pode, portanto, mascarar as verdadeiras influências desses parâmetros petrográficos sobre os resultados tecnológicos.

Em seguida, Navarro (2002) apresenta dois conjuntos de equações para os ensaios considerados na Tabela 1, e aqui reproduzidos na Tabela 2.

De posse dessas equações esse autor seleciona cinco rochas com diferentes composições, texturas e estruturas, representadas na Tabela 3. Aplicando as equações aos dados petrográficos obtidos para essas amostras, obteve dois conjuntos de resultados calculados, os quais foram comparados com os dados obtidos em laboratório (Tabela 4).

Os valores apresentados nessa tabela mostram que em alguns casos os valores calculados se aproximam bastante dos valores obtidos em laboratório, o que dá credibilidade ao método utilizado. Entretanto, algumas situações merecem ser consideradas.

Para a porosidade observa-se que alguns resultados calculados situam-se relativamente distantes dos valores obtidos em laboratório. Em termos teóricos, a porosidade deve ser mais intensamente influenciada pelo grau de alteração e pela presença de fraturas e, secundariamente, pelos tipos de contato e granulção média (Lama & Vutukuri, 1978). Ressalta-se que o método de avaliação da porcentagem de área alterada utilizado por Navarro (2002) é a medição através do uso de analisador de imagens, uma técnica que diminui a subjetividade das avaliações, mas não contempla a intensidade da alteração, fato que pode induzir distorções nos modelos propostos. No que se refere às fraturas, há uma questão crucial a ser considerada que é a comunicabilidade entre os planos de fratura, uma feição sem metodologia para quantificação em termos petrográficos, embora existam os ensaios de capilaridade e permeabilidade, que podem ser utilizados como parâmetros de referência para essas feições.

TABELA 1: Dados obtidos por Navarro (2002) aplicando análise de regressão múltipla para os agrupamentos litológicos assumidos, apresentando valores totais e parciais (para cada variável) correspondentes à porcentagem da variabilidade dos ensaios tecnológicos explicada pelos parâmetros petrográficos considerados em cada agrupamento. Resultados obtidos com o programa Statistica versão 5.5, utilizando-se o algoritmo *backward stepwise*. Os valores sublinhados destacam as duas variáveis petrográficas de maior peso para cada caso. Os valores subscritos mostram a ordem crescente de retirada da variável do modelo. *Legenda:* CE = conjunto de equações 1 e 2; FK - % de feldspato potássico; grFK - granulação média de feldspato potássico (mm); PL - % de plagioclásio; grPL - granulação média do plagioclásio (mm); Qz - % de quartzo; grQz - granulação média de quartzo (mm); Bt - % de biotita; Alt - % de área alterada; ft - número médio de fraturas sem preenchimento/mm²; ftp - número médio de fraturas preenchidas/mm²; cpl - número de contatos planos/ mm²; ccc - número de contatos côncavo-convexos/ mm²; cse - número de contatos serrilhados/ mm².

C/E	Variáveis Dependentes	(R ²) % DA VARIABILIDADE EXPLICADA PELAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES ANALISADAS													
		TOTAL	FK	grFK	PL	grPL	Qz	grQz	Bt	Alt	ft	ftp	cpl	ccc	cse
Ct 1	Porosidade	38,0	4,390 ₁₁	2,850 ₉	2,575 ₁₂	1,582 ₇	16,501 ₁₃	0,203 ₃	6,270 ₁₀	0,261 ₅	0,024 ₂	1,001 ₆	0,000 ₁	0,225 ₄	2,088 ₈
	Desgaste	60,4	35,568 ₁₃	0,093 ₄	0,331 ₅	1,078 ₈	4,797 ₁₁	0,035 ₁	0,087 ₃	1,622 ₁₀	1,774 ₉	13,705 ₁₂	0,105 ₂	0,737 ₇	0,487 ₁
	Compressão	30,6	0,144 ₃	0,025 ₂	0,376	0,002 ₁	0,129 ₄	6,667 ₁₃	1,759 ₉	0,327 ₅	4,822 ₁₁	9,976 ₁₂	0,995 ₇	1,817 ₈	3,610 ₁₀
Ct 2	Módulo Ruptura	43,7	17,643 ₁₂	0,425 ₄	1,311 ₇	15,006 ₁₃	1,934 ₈	0,573 ₅	3,501 ₁₁	1,077 ₆	0,309 ₃	0,248 ₂	0,943 ₉	0,659 ₁₀	0,110 ₁
	Porosidade	26,8	1,861 ₉	3,760 ₁₂	10,153 ₁₃	1,743 ₈	1,536 ₇	0,442 ₆	1,421 ₁₀	0,456 ₄	0,156 ₃	0,392 ₅	0,100 ₂	0,009 ₁	4,782 ₁₁
	Desgaste	35,9	12,984 ₁₂	0,334 ₂	0,369 ₅	0,597 ₈	0,022 ₁	0,746 ₆	0,640 ₄	14,683 ₁₃	0,646 ₇	0,351 ₃	0,251 ₁₀	1,488 ₉	2,753 ₁₁
Ct 3	Compressão	26,3	1,105 ₈	1,521 ₆	0,000 ₁	2,773 ₉	0,574 ₄	6,092 ₁₃	1,821 ₇	4,673 ₁₂	1,360 ₁₀	0,583 ₅	5,577 ₁₁	0,208 ₃	0,003 ₂
	Módulo Ruptura	44,8	1,352 ₇	5,693 ₁₀	0,118 ₄	1,266 ₅	0,009 ₁	0,021 ₂	5,400 ₉	5,981 ₁₂	2,224 ₈	14,121 ₁₃	1,450 ₆	7,151 ₁₁	0,047 ₃

TABELA 2: Modelos matemáticos propostos para a previsão dos resultados dos ensaios tecnológicos relativos à porosidade aparente, desgaste abrasivo, resistência à compressão uniaxial, módulo de ruptura propostos por Navarro (2002). Modelos obtidos com base nos dados petrográficos de todas amostras (conjunto 1) e das amostras de composição granítica (conjunto 2). Legenda para as variáveis petrográficas, vide legenda da Tabela 1

ensaios	EQUAÇÕES PROPOSTAS	
	conjunto de equações 1	conjunto de equações 2
porosidade	= - 0,432 + 0,0108 FK + 0,0217 grFK + 0,0129 PL - 0,0276 grPL + 0,0116 Qz + 0,0082 grQz + 0,0149 Bt - 0,00183 Alt - 0,0031 ft - 0,0251 ftp + 0,000 cpl - 0,0180 ccc - 0,058 cse	= - 0,396 + 0,00899 FK + 0,0229 grFK + 0,0177 PL - 0,0320 grPL + 0,00817 Qz + 0,0159 grQz + 0,0147 Bt - 0,00183 Alt - 0,0097 ft - 0,0203 ftp + 0,011 cpl + 0,008 ccc - 0,205 cse
desgaste abrasivo	= 1,20 - 0,00782 FK + 0,00412 grFK + 0,00182 PL - 0,0144 grPL - 0,00459 Qz - 0,0030 grQz - 0,00192 Bt - 0,00444 Alt - 0,0127 ft + 0,0486 ftp + 0,0268 cpl - 0,0545 ccc + 0,0460 cse	= 1,04 - 0,00748 FK + 0,00433 grFK + 0,00242 PL - 0,0220 grPL + 0,00077 Qz + 0,0102 grQz + 0,00316 Bt - 0,00734 Alt - 0,0084 ft - 0,0136 ftp + 0,0798 cpl - 0,0509 ccc - 0,131 cse
compressão uniaxial	= 175 - 0,188 FK - 0,16 grFK - 0,350 PL - 0,10 grPL - 0,210 Qz - 3,21 grQz + 0,481 Bt + 0,213 Alt + 4,10 ft - 7,99 ftp + 9,7 cpl - 11,3 ccc + 9,1 cse	= 123 + 0,511 FK - 1,23 grFK + 0,007 PL + 4,04 grPL - 0,367 Qz - 6,26 grQz + 0,902 Bt + 0,852 Alt + 2,73 ft - 2,58 ftp + 12,4 cpl - 3,31 ccc + 0,6 cse
módulo de ruptura	= 28,2 - 0,158 FK - 0,126 grFK - 0,0725 PL - 0,581 grPL - 0,0952 Qz + 0,204 grQz + 0,0888 Bt + 0,0425 Alt - 0,109 ft + 0,126 ftp - 1,75 cpl + 1,56 ccc + 0,42 cse	= 19,0 - 0,0788 FK - 0,234 grFK - 0,0241 PL - 0,232 grPL - 0,008 Qz + 0,025 grQz + 0,113 Bt + 0,116 Alt - 0,324 ft + 1,28 ftp - 1,42 cpl + 1,98 ccc + 0,25 cse

TABELA 3: Nome comercial, tipo petrográfico e procedência dos materiais selecionados por Navarro (2002) para o teste das equações matemáticas apresentadas na Tabela 2.

Nome Comercial	Tipo Petrográfico	Procedência
Lilas Gerais	gnaisse sienogranítico róseo	Itapecirica, MG
Verde Lavras	gnaisse charnoquítico cinza-esverdeado	Lavras, MG
Marrom Caldas	álcali-feldspato quartzo sienito	Caldas, MG
Preto Piracema	gabro com quartzo	Piracema, MG
Ibiúna Amêndoa Vermelha*	biotita-hornblenda monzogranito porfiróide com matriz granodiorítica	Ibiúna, SP

* nome comercial sugerido por Navarro (2002).

Tabela 4: Comparação entre os resultados tecnológicos calculados pela aplicação das equações selecionadas e os dados obtidos em laboratório para os cinco litotipos selecionados LG (Lilas Gerais), VL (Verde Lavras), MC (Marrom Caldas), PP (Preto Piracema) e IBV (Ibiúna Amêndoa Vermelha). *Legenda:* por - porosidade aparente (%); abs - absorção d'água aparente (%); desg - desgaste abrasivo Amsler (mm); unix - resistência à compressão uniaxial (MPa); rupt - módulo de ruptura (MPa).

amostras	RESULTADOS CALCULADOS											
	resultados de ensaios				conjunto de equações 1				conjunto de equações 2			
	por	desg	unix	rupt	por	desg	unix	rupt	por	desg	unix	rupt
Lilas Gerais	0,27	0,50	177,8	19,0	0,74	0,66	158,9	17,6	0,72	0,73	148,1	16,7
Verde Lavras	0,35	0,51	232,6	22,6	0,57	0,44	120,1	17,4	0,62	0,44	164,6	22,4
Marrom Caldas	1,08	0,74	172,3	12,8	0,28	0,54	179,2	17,8	0,17	0,33	186,0	16,2
Preto Piracema	0,18	0,62	223,7	23,2	0,05	1,17	156,9	24,3	0,29	0,73	172,4	24,9
Ibiúna Amêndoa Vermelha	0,67	0,60	149,6	13,5	1,02	0,86	158,5	12,0	0,88	0,57	140,5	10,5

Comparando os resultados de desgaste Amsler calculados com os obtidos através de ensaios, observa-se bastante coerência com os mesmos, tanto aplicando-se as equações do conjunto 1, quanto do conjunto 2, com exceção para as amostras Marrom Caldas (MC) e Preto Piracema (PP). Isso fornece um indicativo da melhor utilização dos modelos desenvolvidos em rochas granitóides (campos 3A e 3B de Streckeisen, 1976) do que aquelas de composição tendendo a ácida (sienitos em geral) ou básica (gabros, dioritos, tonalitos, etc.). Nesses casos modelos matemáticos específicos devem ser especialmente desenvolvidos.

Os valores calculados e obtidos por ensaio para as propriedades mecânicas, representados pelos ensaios de resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura, mostram resultados bastante próximos, havendo algumas exceções para as amostras Lilas Gerais (LG), Verde Lavras (VL) e Preto Piracema (PP). Segundo Lama & Vutukuri (1978), é coerente admitir que a resistência mecânica das rochas são um reflexo dos aspectos macroscópicos representados pela granulação e tipos de contatos. Essas variáveis têm um significado maior nas equações do conjunto 1 (Tabela 1), que mostram resultados mais próximos dos valores obtidos por ensaio, do que os dados calculados com as equações do conjunto 2, onde essas variáveis tem participação menor (Tabela 1).

Além desses parâmetros sabe-se que as fraturas tem papel determinante para a resistência mecânica, fato não muito evidente nos valores da Tabela 1, onde essas variáveis apresentam baixos valores da porcentagem de variabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os comentários acima mostram que a petrografia pode ser utilizada como um método para a previsão de resultados de ensaios tecnológicos de granitos ornamentais. Constitui ainda um método expedito, de baixo custo e não destrutivo, que fornece informações únicas a respeito das características das rochas.

Contudo, é necessário destacar que o atual estágio do conhecimento nesse assunto, pelo menos ao nível nacional, ainda é incipiente, sendo de extrema importância estudos complementares visando a qualificação e quantificação de determinados parâmetros petrográficos através de metodologias específicas. Como exemplo, salienta-se a importância de estudos com platina universal, para o reconhecimento e quantificação de orientações cristalográficas, que embora não visíveis a olho nu, constituem-se planos de anisotropia, e portanto zonas de menor resistência que influenciam o comportamento tecnológico das rochas (Siegesmund *et al.*, 2000; Weiss *et al.*, 2000).

As fraturas devem ser consideradas como número médio por unidade de área e também como famílias ou sistemas presentes, os quais dependendo do arranjo geométrico que apresentem, respondem com comportamentos mecânicos diferentes (Gueguen *et al.*, 1990). Para isso métodos como a velocidade de propagação de ondas e análise das orientações relativas dos planos de fraturas presentes, através de platina universal podem contribuir de modo decisivo (Weiss *et al.*, 2001).

Outros parâmetros tais como contatos minerais e planos de clivagem representam planos de baixa energia que podem alterar o desenvolvimento dos planos de fratura através de mecanismo de deflexão de fraturas, durante a aplicação da carga (Freiman & Swanson, 1990), o que evidentemente afeta a resistência mecânica da rocha. Neste caso o estudo das orientações através da platina universal também podem contribuir para o aprimoramento dos modelos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (processo nº 00/00762-8) pelo financiamento do projeto de mestrado do primeiro autor.

BIBLIOGRAFIA

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais 2001. Rochas Ornamentais no Século XXI – Bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Coordenador: Peiter *et al.* Rio de Janeiro/ABIROCHAS, 2001. 160p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1992a. Rochas para Revestimento - Determinação da resistência à compressão uniaxial. 2 p. (norma ABNT-NBR 12767).

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1992b. Rochas para Revestimento - Determinação da resistência à flexão. 3 p. (norma ABNT-NBR 12763).

Artur, A.C.; Meyer, A.P.; Wernick, E. 2001. Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e implicações de utilização. Anais I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais e II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste. Salvador, Bahia. p:13-19.

ASTM - American Society for Testing and Materials 1990. Standard Test Method for Laboratory: Determination of Pulse Ultrasonic Elastic Constants of Rocks. 5p. (standard D-2845).

Davis, J.C. 1986. Statistics and data analysis in geology. 2th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 646p.

Freiman, S.W.; & Swanson, P.L. 1990. Fracture of polycrystalline ceramics. Chapter 3 in: Deformation

processes in mineral, ceramics and rocks. Editors: D.J. Barder & P.G. Meredith. p: 72-83.

Frazão, E.B.; Farjallat, J.E.S. 1995. Seleção de pedras para revestimento e propriedades requeridas. *Rev. Rochas de Qualidade*. nº 124:8p. São Paulo.

Gueguen, Y.; Thierry, R. & Darot, M. 1990. Single-crack behaviour and crack statistics. Chapter 2 in: Deformation processes in mineral, ceramics and rocks. Editors: D.J. Barder & P.G. Meredith. p: 48-71.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo. 1990. Catálogo das Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo. Coordenado por L.G. Caruso. São Paulo: SCTDE/PROMINÉRIO. 122p. il. (Publicação 1820).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo. 1993. Catálogo das Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo. Coordenado por E.B. Frazão. - São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico. 79p. il. (Publicação IPT 2048).

ISRM – International Society for Rock Mechanics. 1978. Suggested methods for the quantitative description of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and mining Sciences and Geomechanics Abstracts. Vol. 15, nº6, pp: 319-368.

Lama, R.D. & Vutukuri, V.S. 1978. Handbook on mechanical properties of rocks - Testing Techniques and Results. Clausthal, Germany. Vol 2. 481p.

Landim, P.M.B. 1997. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998 (Ciência e Tecnologia).

Landim, P. M. B. 2000. Análise Estatística de Dados Geológicos Multivariados. Texto Didático 03. Laboratório de Geomatematica. DGA/IGCE/UNESP-Rio Claro, SP.

Mello Mendes, F de 1968. Mecânica das Rochas. Ed. Seção de Folhas da Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. p 541.

Mello Mendes, F de; Aires-Barros, L.; Peres Rodrigues, F. (1966) The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. Proc. First Congress of International Societing of rock Mechanics. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Vol. 1, pp 217-223.

Navarro, F.C. 1998. Granitos Ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: Atas II Congr. Uruguai de Geologia. Punta del Este, Uruguai. p. 103-107.

Navarro, F.C.; Artur, A.C. e Rodrigues, E. de P. 1999. Modelos matemáticos na previsão do desgaste abrasivo e da resistência à flexão em "granitos" ornamentais, a partir de parâmetros petrográficos. In: VI Simp. de Geologia do Sudeste, São Pedro, SP. p.142.

- Navarro, F.C. e Artur, A.C. 2001. Correlação entre características petrográficas e propriedades tecnológicas de granitos ornamentais: proposição de equações matemáticas. Anais I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais e II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste. Salvador, Bahia. p:45-52.
- Navarro, F.C. 2002. Caracterização Petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de “granitos” ornamentais. Dissertação de Mestrado IGCE/UNESP, Rio Claro, SP. 88p.
- Rodrigues, E. de P.; Coutinho, J.M.V. E Chiodi Filho, C. 1996. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. *Rev. Rochas de Qualidade*. São Paulo. nº 127:80-84.
- Rzhevsky, V. e Novik, G. 1971. *The Physics of Rocks*. Moscow, MIR Publishers, 320p.
- Siegesmund, S.; Ullemeyer, K.; Weiss, T. & Tschegg, E.K. 2000. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. *Int. J. Earth Science* 2000. 89:170-182.
- SGM - Superintendência de Geologia e Recursos Minerais 1994. *Catálogo das Rochas Ornamentais da Bahia*. Coordenado por H.C.A. de Azevedo e P.H. de O Costa. Salvador. 148p. il.
- Streckeisen, A.1976. To each rock its proper name. *Earth. Sci. Rev.*, 12:1-33.
- Tuğrul A. & Zarif, I.H. 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology* 51:303-307.
- Vutikuri, V.S.; Lama, R.D. & Saluja, S.S. 1974. *Handbook on mechanical properties of rocks - Testing Techniques and Results*. Clausthal, Germany. Vol 1. 280p.
- Weiss, T.; Siegsmund, S.; Rasolofosaon, P.N.J. 2000. The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Venice, 2000. p:215-223.
- Weiss, T.; Patrick, N.J.; Rasolofosaon, P.N.J. & Siegsmund, S 2001. Thermal microcracking in Carrara marble. *Z. dt. Geol. Ges.* 152 (2-4) p: 621-636; Stuttgart.
- Whittaker B.N.; Singh, R.N. e Sun, G. 1992. *Rock Fracture Mechanics – Principles, Design and Applications*. Elsevier Science Publisher, Amsterdam. 570p.
- Yoshida, R. 1972. Contribuição ao conhecimento de características tecnológicas de materiais rochosos. São Paulo. 2v. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências/USP).