

CORRELAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS E PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE GRANITOS ORNAMENTAIS: PROPOSIÇÃO DE EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

Fabiano Cabañas Navarro¹ e Antonio Carlos Artur²

¹Curso de Pós-Graduação em Geociências – IGCE-UNESP. Caixa Postal 178 – 13506-900 – Rio Claro - SP
E_mail: navarrofc@bol.com.br

²Deptº de Petrologia e Metalogia – IGCE-UNESP. Caixa Postal 178 – 13506-900 – Rio Claro - SP

RESUMO

As rochas ornamentais apresentam uma gama variada de propriedades tecnológicas cada qual como reflexo de suas características petrográficas (composição, mineralogia, texturas e estruturas). O presente trabalho utiliza técnicas de análise multivariada para a correlação de parâmetros petrográficos e tecnológicos em rochas graníticas brasileiras utilizadas como material de revestimento. São apresentadas 10 equações matemáticas fundamentadas em parâmetros petrográficos, com as quais é possível obter uma previsão das diferentes propriedades tecnológicas analisadas (porosidade aparente, resistência à compressão uniaxial, módulo de ruptura, desgaste abrasivo e coeficiente de dilatação térmica). Tais equações representam uma ferramenta adicional para a previsão das características tecnológicas de granitos ornamentais, constituindo um método rápido e de baixo custo.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, as rochas ornamentais têm se firmado como uma opção bastante promissora para o revestimento interno e externo de grandes obras de engenharia. A consolidação deste panorama se deve ao fato desses materiais, quando especificados adequadamente, atingirem boa relação custo-benefício, reunindo características tais como aspecto estético autêntico, boa resistência mecânica e/ou química, requinte e nobreza, além de classicamente ser entendido como símbolo de *status*.

Quando observadas do ponto de vista tecnológico, as rochas devem ser entendidas como um corpo dinâmico com características físicas e químicas definidas. Dessa forma, toda rocha quando utilizada como material de revestimento apresenta uma resposta diferente, em função do ambiente em que estão aplicadas e das condições a que estão sujeitas (poluição atmosférica, esforços fletores em fachadas, desgaste abrasivo em pisos, etc.). Diferentes comportamentos tecnológicos podem ser simulados em laboratório, segundo diversos métodos de ensaios regulamentados por instituições como ABNT (Brasil), ASTM (EUA), DIN (Alemanha) e CEN (Comunidade Européia). Através desses ensaios pode-se reconhecer as propriedades físicas, mecânicas e químicas, além de entender suas relações com as características petrográficas (mineralogia, texturas e estruturas) das rochas analisadas.

A adequada caracterização tecnológica de rochas normalmente requer um grande número de

ensaios, fato que transforma os trabalhos de avaliação da qualidade da rocha em um estudo mais lento e com um custo relativamente mais elevado. Essa realidade é patente no meio empresarial, o que explica uma certa resistência para a total caracterização tecnológica de sua carteira de produtos. Em contrapartida, conforme comentado por Chiodi Filho e Rodrigues (1999) as exigências do mercado internacional apontam cada vez mais para a necessidade do reconhecimento das propriedades da rocha, principalmente para a comercialização nos mercados europeu e americano.

Dessa maneira a busca de índices para prever o comportamento tecnológico de rochas pode contribuir para a caracterização de materiais de revestimento de forma melhor direcionada, proporcionando agilidade e custos mais baixos. De encontro a essa necessidade, a utilização da análise petrográfica pode contribuir significativamente para a previsão do comportamento tecnológico de rochas ornamentais, uma vez que a resposta aos ensaios tecnológicos é o reflexo das características petrográficas do material.

Dentro desse contexto, a proposta deste trabalho, é mostrar como a análise petrográfica pode contribuir para a seleção de materiais rochosos destinados ao revestimento de obras civis. Como resultado do estudo estatístico realizado foram definidas dez equações matemáticas baseadas em parâmetros petrográficos que permitem a previsão do comportamento tecnológico de rochas ornamentais classificadas petrograficamente como granitos.

ÍNDICES DE QUALIDADE E A IMPORTÂNCIA DA PETROGRAFIA

A busca de índices que permitam prever o comportamento tecnológico de rochas é uma problemática cada vez mais estudada, visando sobretudo a redução de custos (Mello Mendes, 1968; e Whittaker *et al.*, 1992). Para o setor de rochas ornamentais os primeiros comentários sobre a influência das características petrográficas no comportamento tecnológico se devem a Rodrigues *et al.* (1996 e 1997) e Navarro (1998). Esses trabalhos tratam da necessidade do estudo petrográfico, como técnica auxiliar para a especificação de granitos como material de revestimento, sendo apresentado um enfoque qualitativo sobre a importância da petrografia para o comportamento tecnológico. Posteriormente, Navarro *et al.* (1999), propuseram três equações para a previsão do desgaste abrasivo e quatro equações para a previsão da resistência à flexão, com base em parâmetros petrográficos. Tugrul e Zarif (1999), ao

estudarem amostras de granitos provenientes da Turquia, apresentaram uma série de gráficos, com as respectivas equações de reta, relacionando características petrográficas e tecnológicas.

A grande importância dos trabalhos acima relacionados foi destacar o uso da petrografia como uma poderosa ferramenta para prever e auxiliar a compreensão do comportamento tecnológico da rocha, pois é o único método que permite o total reconhecimento dos aspectos petrográficos, características essas que orientam as propriedades tecnológicas das rochas. Dessa maneira o estudo dessas variáveis são extremamente importantes para a definição de índices petrográficos para previsão da qualidade tecnológica, sem contudo desqualificar a realização de ensaios.

MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados neste trabalho compreendem 66 amostras representativas de rochas comercialmente designadas como granitos ornamentais, provenientes dos estados de São Paulo (38 amostras), Espírito Santo (16 amostras) e Bahia (12 amostras). A seleção baseou-se nos catálogos de rochas ornamentais de cada um dos estados mencionados (IPT, 1990, 1993; SGM, 1994). Para facilitar o tratamento dos dados as amostras estudadas foram agrupadas em sete conjuntos litológicos, de acordo com sua classificação petrográfica, a saber:

sienogranitos (C1), monzogranitos (C2), sienogranitos e monzogranitos porfiróides (C3), charnoquitos (C4), ortogneisses (C5), gabróides/dioritóides (C6) e sienitóides (C7).

Todas as lâminas petrográficas analisadas foram obtidas das placas utilizadas para a ilustração dos referidos catálogos. Essa situação garante que as seções estudadas são representativas das amostras utilizadas na execução dos ensaios tecnológicos.

ANÁLISE PETROGRÁFICA E DADOS TECNOLÓGICOS OBTIDOS

Todas as amostras selecionadas foram analisadas e descritas ao microscópio petrográfico, tendo especial atenção a quantificação dos aspectos texturais e estruturais. Foram consideradas a composição modal, a granulção média dos principais minerais, contagem e medição do comprimento dos planos de fraturas com e sem preenchimento, determinação da porcentagem de área alterada e contagem dos tipos de contato, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Dados petrográficos das amostras estudadas. **Legenda:** FK- % de feldspato potássico; grFK- granulção média de feldspato potássico (mm); PL- % de plagioclásio; grPL- granulção média do plagioclásio (mm); Qz- % de quartzo; grQz- granulção média de quartzo (mm); Bt- % de biotita; Alt- % de área alterada; ft- número médio de fraturas sem preenchimento/mm²; cft- comprimento médio da fraturas sem preenchimento (mm); ftp- número médio de fraturas preenchidas/mm²; cftp- comprimento médio da fraturas preenchidas (mm); cpl- número de contatos planos/ mm²; ccc- número de contatos côncavo-convexos/ mm²; cse- número de contatos serrilhados/ mm². Séries: GO amostras de São Paulo, AM amostras do Espírito Santo; MC amostras da Bahia.

conjuntos	amostras	parâmetros petrográficos avaliados														
		FK	grFK	PL	grPL	Qz	grQz	Bt	Alt	ft	cft	ftp	cftp	cpl	ccc	cse
C1	GO 4	38,7	8,0	26,5	6,0	26,9	7,0	7,9	20,00	0,45	2668,00	0,03	3058,94	0,97	0,94	1,28
C1	GO 12	37,8	5,0	25,1	3,0	31,2	3,0	5,9	23,75	2,40	375,29	0,02	771,16	0,39	0,38	0,20
C1	GO 13	39,8	6,0	29,6	3,0	28	3,0	2,6	28,21	2,25	367,65	0,01	720,14	0,54	0,55	0,14
C1	GO 15	37,7	8,0	26,5	8,0	29,3	4,0	6,5	21,93	1,47	356,21	0,38	807,01	1,39	2,04	0,16
C1	GO 16	42,3	10,0	24,5	6,0	24,2	8,0	9,0	15,67	1,69	391,63	0,34	797,31	0,69	0,88	0,15
C1	GO 23	35,2	12,0	26,2	9,0	32,9	8,0	5,7	15,71	2,53	442,35	0,23	801,02	0,33	0,30	0,11
C1	GO 24	36,1	6,0	26,1	4,0	30,5	3,0	7,3	4,18	3,20	282,38	0,76	229,85	1,51	1,07	0,12
C1	GO 25	46,8	8,0	24,6	6,0	22,8	6,0	5,8	21,30	1,68	436,70	0,27	726,65	0,75	0,53	0,04
C1	GO 26	34,4	7,0	32,4	8,0	29,8	5,0	3,4	19,55	1,71	544,98	0,07	447,74	0,70	0,71	0,06
C1	GO 27	43,0	12,0	27	4,0	30	6,0	0,0	43,95	1,14	489,34	0,58	551,74	0,74	0,37	0,09
C1	GO 33	45,5	6,0	27,4	5,0	27	5,0	0,0	26,06	1,35	543,82	0,45	905,37	0,43	0,37	0,11
C1	GO 36	42,8	10,0	24,4	8,0	27,8	5,0	5,0	14,19	1,89	581,51	0,17	400,94	0,39	0,25	0,10
C1	AM - 02	26,7	2,0	22,5	1,5	28,8	3,0	13,8	17,18	4,39	233,96	2,33	274,02	1,30	1,07	0,05
C1	AM - 07	32,5	4,0	20,3	3,0	28,9	2,0	13,6	10,03	3,44	389,17	1,65	582,36	0,53	0,61	0,06
C1	MC - 18	31,5	7,0	18,7	5,0	29,6	6,0	6,0	8,81	3,00	408,13	0,25	512,35	0,66	0,67	0,11
C2	GO 8	38,4	8,0	26,4	5,0	29,4	4,0	5,6	40,14	2,02	489,88	0,00	889,62	0,28	0,38	0,31
C2	GO 9	32,2	7,0	36,2	5,0	27,8	4,0	3,8	21,26	0,00	480,68	0,00	442,80	0,28	0,35	0,23
C2	GO 10	42,3	8,0	27,3	5,0	25,8	5,0	4,6	25,41	0,00	480,91	0,00	632,99	0,30	0,31	0,14
C2	GO 11	39,9	8,0	29,2	6,0	25,1	4,0	5,8	23,35	1,98	417,85	0,12	544,36	0,35	0,43	0,13
C2	GO 17	32,8	9,0	34,0	9,0	30,0	6,0	9,0	15,34	2,02	369,21	0,06	1356,20	0,52	0,75	0,20
C2	GO 18	40,6	5,0	31,8	2,0	27,4	3,0	2,0	14,56	1,32	588,65	0,14	1201,87	0,70	0,71	0,27

Continuação da Tabela 1

conjuntos	amostras	parâmetros petrográficos avaliados														
		FK	grFK	PL	grPL	Qz	grQz	Bt	Alt	ft	cft	ftp	cftp	cpl	ccc	cse
C2	GO 19	40,6	3,0	31,1	3,0	28,2	4,0	2,0	14,63	1,17	368,95	0,21	584,32	0,71	0,65	0,17
C2	GO 28	42,3	3,0	22,8	3,0	31,4	3,0	3,5	13,85	2,67	396,72	0,43	460,70	1,04	1,23	0,04
C2	GO 29	37,2	5,0	26,8	5,0	31,4	4,0	3,5	16,63	2,18	413,17	0,25	109,31	0,85	0,48	0,06
C2	GO 35	44,6	8,0	26,3	6,0	29,0	5,0	0,0	18,02	1,00	496,84	0,43	855,37	0,26	0,24	0,06
C2	GO 38	37,6	4,0	23,4	5,0	36,1	5,0	2,9	37,04	3,12	452,34	0,61	771,52	0,26	0,60	0,09
C2	GO 39	36,7	6,0	33,8	4,0	26,8	2,0	2,7	18,70	5,71	395,41	0,70	487,63	0,48	0,67	0,03
C2	MC - 26	23,7	1,0	36,8	3,0	30,6	2,0	8,6	18,74	2,61	324,91	0,15	419,15	0,60	1,01	0,49
C3	GO 2	32,0	17,0	27,9	10,0	30,3	6,0	8,7	5,63	1,11	486,216	0,32	354,4	0,48	0,30	0,10
C3	GO 7	34,6	15,0	26,5	3,0	27,6	1,0	16,8	15,30	1,03	737,946	0,52	568,3	0,38	0,82	0,16
C3	GO 34	46,7	8,0	22,5	5,0	27,4	3,0	24,5	15,52	1,83	430,201	0,71	555,1	0,60	0,63	0,28
C3	AM -11	42,6	3,0	18,9	2,0	20,3	6,0	7,8	3,42	5,10	327,154	0,49	624,0	1,31	0,98	0,09
C3	MC - 19	28,0	10,0	11,1	6,0	28,4	6,0	20,5	36,93	0,79	369,991	0,17	756,4	0,48	0,44	0,00
C4	GO 31	41,2	8,0	31,0	6,0	18,6	4,0	6,8	1,87	1,40	416,92	2,27	658,98	0,87	0,80	0,04
C4	GO 32	32,2	4,0	31,4	3,0	23,8	3,0	6,8	1,03	1,14	383,44	1,91	450,98	0,83	0,81	0,02
C4	AM - 08	35,5	8,0	19,1	3,0	26,7	3,0	4,8	1,08	3,62	429,02	3,37	803,76	0,61	0,89	0,06
C4	AM - 09	37,1	5,0	16,6	3,0	25,2	4,0	11,1	1,20	3,54	350,47	3,58	626,28	0,80	1,09	0,08
C4	MC - 33	61,2	2,0	8,4	1,0	10,6	3,0	3,9	3,00	3,06	357,68	1,46	498,82	0,85	1,27	0,24
C4	MC - 36	44,9	2,0	11,6	1,0	30,8	1,0	3,6	6,64	5,99	261,87	2,74	431,90	1,05	1,35	0,07
C4	MC - 38	35,6	1,0	21,4	1,5	27,5	1,0	2,8	4,76	5,07	253,84	1,71	410,54	1,17	1,70	0,02
C5	GO 1	27,0	10,0	37,5	5,0	17,3	5,0	8,2	2,10	2,99	420,64	1,52	460,87	3,20	1,90	1,60
C5	GO 5	38,5	20,0	22,4	7,0	30,4	15,0	9,0	4,36	3,02	1628,07	0,27	3175,72	8,33	10,04	3,63
C5	GO 14	43,7	2,0	33,8	2,0	20,4	3,0	2,0	5,12	5,25	156,49	2,69	280,39	0,63	1,50	0,20
C5	GO 30	43,8	7,0	16,5	5,0	29,2	6,0	10,5	10,36	3,20	486,92	0,40	515,12	0,90	0,74	0,05
C5	GO 40	34,2	2,0	31,2	2,0	19,2	10,0	12,7	7,83	14,46	126,75	3,39	114,76	2,13	2,98	0,34
C5	AM - 01	43,8	1,0	10,8	1,5	33,0	1,0	1,2	5,04	5,28	327,09	2,93	409,45	0,96	1,37	0,03
C5	AM - 03	48,7	5,0	23,1	3,0	23,6	5,0	4,5	11,32	4,14	519,63	1,80	644,95	0,51	0,79	0,07
C5	AM - 04	34,2	2,0	22,6	3,0	23,2	3,0	12,6	19,74	4,23	424,27	1,62	859,48	0,48	0,54	0,06
C5	AM -05	38,9	7,0	12,4	2,0	33,0	3,0	8,7	8,73	3,79	367,98	2,47	709,74	0,60	0,68	0,03
C5	AM - 10	41,1	6,0	20,9	5,0	25,5	4,0	8,6	26,98	3,43	294,48	0,82	822,17	0,82	0,71	0,09
C5	AM - 12	32,8	2,0	24,3	1,0	32,5	3,0	6,7	3,30	3,91	314,69	0,23	517,23	1,60	2,01	0,07
C5	AM - 20	35,0	1,0	25,0	1,5	30,0	1,5	5,0	0,97	5,44	239,56	0,13	230,98	1,42	2,06	0,08
C5	AM - 21	40,0	6,0	15,0	8,0	20,0	9,0	10,0	6,08	3,26	383,83	2,83	491,92	0,40	0,58	0,04
C5	AM - 22	35,0	5,0	35,0	2,0	20,0	4,0	5,0	3,91	3,72	340,76	0,10	468,45	0,42	0,50	0,02
C5	MC - 01	42,6	3,0	15,5	1,0	36,8	3,0	4,6	8,74	3,58	311,48	1,55	614,48	0,81	0,98	0,01
C5	MC - 28	58,3	4,0	9,2	3,0	26,0	5,0	3,3	16,96	4,66	423,13	0,71	706,76	0,39	0,66	0,07
C5	MC - 60	62,0	1,0	5,9	0,5	25,5	1,0	0,0	7,44	4,88	274,86	1,27	560,41	2,46	2,52	0,11
C6	GO 20	0,0	0,0	51,4	2,0	0,0	0,0	11,5	7,37	5,93	269,88	0,46	249,99	1,54	0,72	0,13
C6	GO 21	37,6	2,0	30,8	2,0	8,3	2,0	23,3	5,59	2,53	57,10	0,21	31,68	2,63	1,80	0,75
C6	GO 22	30,7	1,0	33,8	3,0	2,3	0,2	28,4	23,80	2,87	71,20	0,68	65,22	7,93	7,53	3,20
C6	AM - 13	0,0	0,0	65,0	3,5	0,0	0,0	10,0	2,73	4,94	205,28	3,67	275,12	1,15	1,21	0,23
C6	AM - 18	0,0	0,0	60,0	2,0	0,0	0,0	15,5	3,63	2,68	230,83	10,13	260,82	1,38	0,91	1,38
C6	MC - 30	30,2	4,0	68,4	6,0	1,4	1,0	0,0	33,14	3,15	325,99	1,55	694,27	0,45	0,44	0,07
C7	GO 3	57,8	7,0	0,0	0,0	33,7	6,0	2,10	1,73	3,49	2650,23	0,19	1527,53	1,57	1,66	1,78
C7	MC - 07	49,1	3,0	9,1	1,0	0,0	0,0	0,00	14,43	3,62	147,73	0,00	0,00	1,72	1,30	1,53
C7	MC - 17	51,9	6,0	4,5	1,0	7,1	1,0	0,24	7,56	4,56	234,39	0,09	250,76	0,78	0,90	0,26

A análise modal foi obtida pelo estudo de seções delgadas utilizando-se um contador automático. A granulação dos minerais foi medida em lâmina e em amostras de mão. Os tipos de contato foram agrupados em três categorias contatos planos, côncavos-convexos e serrilhados, sendo os resultados expressos em unidade de área (contatos/mm²).

Para a avaliação do microfraturamento e da alteração das rochas estudadas utilizou-se um analisador de imagens. Através desse equipamento foram obtidos valores do número médio de fraturas com e sem preenchimento por unidade de área (fraturas/mm²), bem como o tamanho médio dos planos de microfissura (expresso em µm). Para a mensuração do grau de alteração foram consideradas as superfícies dos feldspatos afetados por processos de sericitização, saussuritização ou caulinitização, obtendo-se a porcentagem de área alterada para cada rocha. Os demais minerais alteráveis (opacos, micas, anfibólios e piroxênios) por estarem presentes em pequenas quantidades (acessórios ou traços) nas rochas analisadas, foram apenas descritos qualitativamente acerca desse aspecto.

Os dados tecnológicos utilizados neste trabalho foram obtidos por compilação das informações constantes dos catálogos de rochas ornamentais dos estados de São Paulo, Espírito Santo e Bahia (IPT 1990 e 1993; SGM, 1994). Os ensaios selecionados foram: porosidade aparente, resistência à compressão uniaxial simples, módulo de ruptura (resistência à flexão), resistência ao desgaste abrasivo Amsler e coeficiente de dilatação térmica linear.

ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A análise estatística multivariada é um conjunto de métodos estatísticos que permitem a análise simultânea de um grande número de variáveis, tais como parâmetros petrográficos (mineralogia, texturas e estruturas). O comportamento tecnológico de uma rocha é o reflexo da interação entre esses parâmetros e a maneira como se comportam perante os diversos tipos de solicitações a que possam ser submetidas. Equivale dizer que a resposta da rocha perante a dilatação, porosidade, resistências à compressão e flexão, etc., depende da combinação de um grande número de fatores, que podem explicar ou não grande parte do comportamento da rocha à determinado tipo de solicitação. Isso significa que a somatória de vários fatores podem explicar completamente ou com baixo erro analítico o comportamento de uma rocha.

Pela aplicação dos métodos de estatística multivariada, análise discriminante e análise de regressão múltipla, foram obtidos dois conjuntos de equações matemáticas (A e B) para a previsão do comportamento tecnológico de granitos ornamentais. O conjunto de equações A foi definido através da aplicação da análise de regressão múltipla, utilizando-se todas as variáveis petrográficas e tecnológicas obtidas para os sete conjuntos litológicos estudados.

Para a obtenção do conjunto de equações B, inicialmente aplicou-se a análise discriminante em todo o banco de dados. O resultado apresentado na Figura 1 mostra três agrupamentos nítidos de acordo com a afinidade entre as características petrográficas e tecnológicas das amostras consideradas. Na porção centro-superior do gráfico estão aglutinadas as amostras de composição granítica, representada pelos conjuntos C1, C2, C3, C4 e C5, ao passo que o conjunto C6 (gabróides/dioritóides) ocupam a porção direita do gráfico e o conjunto C7 (sienitóides) a porção esquerda. Essa distribuição indica que os três agrupamentos estão diferenciados uns dos outros por suas características petrográficas e tecnológicas, e portanto devem ser considerados separadamente para a atribuição de equações matemáticas.

Posteriormente foi aplicado a análise de regressão múltipla aos agrupamentos da Figura 1. Os agrupamentos representados por C6 e C7 não puderam ser analisados por esse método devido ao baixo número de amostras em relação ao número de variáveis consideradas, fato que restringe a aplicação desse método. Através da análise de regressão do agrupamento das rochas graníticas foi obtido o conjunto de equações matemáticas B, fornecendo, assim, mais uma equação para cada ensaio tecnológico considerado.

Os conjuntos de equações matemáticas A e B, propostos como ferramenta para a previsão do comportamento tecnológico de granitos ornamentais estão apresentados na Tabela 2.

A análise de regressão múltipla forneceu ainda a porcentagem explicada de cada equação pelas variáveis analisadas (Tabela 3), ou seja, quer dizer que para um determinado ensaio tecnológico considerado as variáveis petrográficas adotadas explicam “X%” do valor calculado através dessa equação.

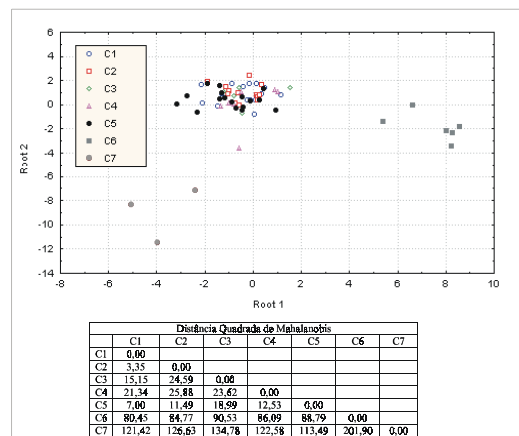


Figura 1: Diagrama de análise discriminante com agrupamentos litológicos por afinidades dos aspectos petrográficos e tecnológicos das amostras analisadas. O quadro com a distância quadrada de Mahalanobis permite a comparação entre as distâncias de afinidade entre cada um dos conjuntos analisados.

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 e coeficiente de dilatação térmica linear. Modelos obtidos com base nos dados petrográficos de todas amostras (conjunto A) e das amostras de composição granítica (conjunto B). **Legenda:** por- porosidade aparente (%); desg- desgaste abrasivo Amsler (mm); unix- resistência à compressão uniaxial (MPa); rupt - módulo de ruptura (MPa); cdtl- coeficiente de dilatação térmica linear (mm/m°C). Para as variáveis petrográficas, vide legenda da Tabela 2.

EQUAÇÕES PROPOSTAS		
ensaios	conjunto de equações A	conjunto de equações B
por	= - 0,436 + 0,0107 FK + 0,0216 grFK + 0,0127 PL - 0,0264 grPL + 0,0111 Qz + 0,0071 grQz + 0,0150 Bt - 0,00152 Alt - 0,0032 ft + 0,000042 cft - 0,0233 ftp - 0,000010 cftp + 0,010 cpl - 0,0160 ccc - 0,087 cse	= - 0,463 + 0,00778 FK + 0,0252 grFK + 0,0195 PL - 0,0304 grPL + 0,0057 Qz + 0,0073 grQz + 0,0146 Bt - 0,00180 Alt - 0,0000 ft + 0,000050 cft - 0,0187 ftp + 0,000150 cftp + 0,099 cpl - 0,026 ccc - 0,418 cse
desg	= 1,19 - 0,00762 FK + 0,00421 grFK + 0,00187 PL - 0,0147 grPL - 0,00425 Qz - 0,0047 grQz - 0,00165 Bt - 0,00485 Alt - 0,0102 ft - 0,000055 cft + 0,0469 ftp + 0,000050 cftp + 0,0318 cpl - 0,0699 ccc + 0,066 cse	= 0,982 - 0,00852 FK + 0,00603 grFK + 0,00389 PL - 0,0205 grPL - 0,00137 Qz + 0,0035 grQz + 0,00306 Bt - 0,00714 Alt - 0,0010 ft + 0,000079 cft - 0,0115 ftp + 0,000100 cftp + 0,153 cpl - 0,0742 ccc - 0,317 cse
unix	= 176 - 0,268 FK - 0,26 grFK - 0,422 PL + 0,56 grPL - 0,519 Qz - 3,42 grQz + 0,428 Bt + 0,457 Alt + 3,48 ft + 0,0329 cft - 6,66 ftp - 0,0158 cftp + 13,5 cpl - 7,0 ccc - 9,8 cse	= 126 + 0,580 FK - 1,50 grFK - 0,122 PL + 3,98 grPL - 0,235 Qz - 5,55 grQz + 0,907 Bt + 0,925 Alt + 1,81 ft + 0,0120 cft - 2,37 ftp - 0,0200 cftp + 6,6 cpl + 1,0 ccc + 11,3 cse
rupt	= 28,0 - 0,165 FK - 0,138 grFK - 0,0817 PL - 0,495 grPL - 0,132 Qz + 0,144 grQz + 0,0863 Bt + 0,0691 Alt - 0,148 ft + 0,00360 cft + 0,278 ftp - 0,00130 cftp - 1,13 cpl + 1,88 ccc - 1,86 cse	= 19,1 - 0,0760 FK - 0,253 grFK - 0,0311 PL - 0,232 grPL - 0,003 Qz + 0,069 grQz + 0,113 Bt + 0,124 Alt - 0,385 ft + 0,00142 cft + 1,31 ftp - 0,00154 cftp - 1,72 cpl + 2,30 ccc + 0,61 cse
cdtl	= 0,00824 + 0,000025 FK + 0,000070 grFK - 0,000004 PL - 0,000125 grPL - 0,000001 Qz - 0,000022 grQz + 0,000069 Bt + 0,000005 Alt - 0,000033 ft + 0,000001 cft + 0,000086 ftp - 0,000001 cftp - 0,000218 cpl + 0,000091 ccc + 0,000122 cse	= 0,00201 + 0,000086 FK + 0,000053 grFK + 0,000059 PL - 0,000075 grPL + 0,000049 Qz - 0,000013 grQz + 0,000130 Bt + 0,000013 Alt - 0,000112 ft - 0,000001 cft + 0,000284 ftp + 0,000000 cftp + 0,000397 cpl + 0,000052 ccc - 0,00127 cse

AVALIAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS

Visando avaliar as equações propostas, procedeu-se a aplicação das mesmas no banco de dados utilizados na pesquisa. Os resultados estão listados na Tabela 4, a qual apresenta os valores de ensaios da literatura e dos resultados da aplicação dos conjuntos de equações A e B. Pela comparação desses resultados observa-se, de modo geral, que os valores obtidos pela aplicação do conjunto B são mais próximos dos resultados da literatura que os valores conseguidos com as equações do conjunto A, principalmente para os conjuntos litológicos C1, C2, C3 e C4. Para o conjunto C5, os resultados obtidos pelo conjunto de equações B, são mais próximos dos resultados da literatura que os obtidos pelas equações do conjunto A, entretanto não apresentam a mesma aproximação como nos casos anteriores. Para os conjuntos C6 e C7, os resultados obtidos pelas equações dos conjuntos A e B apresentam valores distantes dos resultados de ensaios da literatura.

Tabela 3: Resultado da análise de regressão múltipla para os diferentes agrupamentos assumidos, onde os valores apresentados correspondem à porcentagem da variabilidade dos ensaios tecnológicos explicada pelos parâmetros petrográficos considerados em cada agrupamento.

PORCENTAGEM EXPLICADA PELAS VARIÁVEIS ANALISADAS		
ensaios	conjunto de equações A	conjunto de equações B
porosidade aparente	38,1	30,5
desgaste abrasivo	60,7	41,5
resistência à compressão uniaxial	35,6	29,6
módulo de ruptura	48,2	45,9
coeficiente de dilatação térmica linear	18,6	26,6

Tabela 4: Comparação entre os dados tecnológicos da literatura e os dados obtidos pela aplicação da equações dos conjuntos A e B. **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); cdtl- coeficiente de dilatação térmica linear (mm/m°C).

amostras		dados da literatura (IPT, 1990, 1993 e SGM, 1994)					RESULTADOS CALCULADOS									
		por	desg	unix	rupt	cdtl	conjunto de equações A					Conjunto de equações B				
							por	desg	unix	rupt	cdtl	por	desg	unix	rupt	cdtl
C1	GO 4	0,73	0,75	139,0	16,0	0,0075	0,62	0,69	190,22	23,09	0,0090	0,79	0,74	130,97	15,91	0,0055
C1	GO 12	0,51	0,62	148,0	14,5	0,0082	0,59	0,65	155,53	20,00	0,0090	0,68	0,61	151,23	15,98	0,0086
C1	GO 13	0,5	0,55	150,9	15,6	0,0073	0,62	0,63	155,47	20,67	0,0089	0,76	0,61	153,39	15,84	0,0088
C1	GO 15	0,62	0,56	152,0	14,7	0,0109	0,53	0,54	148,64	19,75	0,0085	0,71	0,60	164,48	16,77	0,0092
C1	GO 16	1,07	0,81	125,0	13,4	0,0102	0,70	0,62	134,71	19,30	0,0092	0,83	0,66	127,13	14,69	0,0093
C1	GO 23	0,93	0,58	147,7	16,0	0,0081	0,63	0,62	135,22	16,84	0,0085	0,77	0,66	125,65	12,44	0,0083
C1	GO 24	0,8	0,81	140,0	12,8	0,0096	0,62	0,73	160,74	19,23	0,0092	0,76	0,84	152,52	14,31	0,0092
C1	GO 25	0,95	0,72	138,0	13,4	0,0107	0,65	0,58	147,96	18,57	0,0090	0,79	0,62	147,37	14,17	0,0093
C1	GO 26	0,63	0,65	149,0	14,8	0,0096	0,55	0,60	155,00	20,05	0,0086	0,71	0,66	156,28	14,90	0,0083

I SBRO / II SRON – 2001 – Salvador-BA/Brasil

Continuação da Tabela 4

		dados da literatura (IPT, 1990, 1993 e SGM, 1994)					RESULTADOS CALCULADOS									
							conjunto de equações A					Conjunto de equações B				
amostras		por	desg	unix	rupt	cdtl	por	desg	unix	rupt	cdtl	por	desg	unix	rupt	cdtl
C1	GO 27	0,69	0,56	158,7	18,8	0,0107	0,70	0,56	151,97	20,14	0,0094	0,84	0,52	147,67	16,60	0,0093
C1	GO 33	0,33	0,38	151,5	15,5	0,0085	0,57	0,60	143,86	19,10	0,0086	0,71	0,56	144,20	15,23	0,0086
C1	GO 36	1,14	0,57	150,1	14,7	0,0081	0,62	0,59	155,95	17,24	0,0093	0,67	0,59	154,00	12,96	0,0085
C1	AM - 02	0,71	0,94	145,2	21,7	0,0101	0,48	0,81	161,90	24,36	0,0095	0,63	0,83	156,67	20,86	0,0095
C1	AM - 07	0,61	1,04	125,4	17,1	0,0089	0,54	0,78	155,99	21,63	0,0096	0,64	0,77	152,16	18,14	0,0091
C1	MC - 18	0,46	0,77	167,2	16,9	0,0078	0,47	0,70	150,75	19,71	0,0089	0,55	0,76	130,47	14,73	0,0076
C2	GO 8	0,79	0,44	160,0	15,3	0,0093	0,59	0,56	160,34	20,32	0,0090	0,65	0,45	163,52	17,10	0,0086
C2	GO 9	0,49	0,64	160,0	16,7	0,0089	0,63	0,72	148,71	21,98	0,0091	0,74	0,65	145,75	16,32	0,0083
C2	GO 10	0,81	0,65	130,4	13,2	0,0089	0,65	0,62	146,03	20,03	0,0093	0,74	0,57	145,95	15,78	0,0089
C2	GO 11	0,58	0,65	130,0	12,2	0,0098	0,62	0,62	154,94	19,81	0,0091	0,72	0,58	157,86	15,11	0,0088
C2	GO 17	0,69	0,77	168,1	13,3	0,0109	0,64	0,67	131,41	18,14	0,0079	0,90	0,73	132,46	13,12	0,0088
C2	GO 18	1,07	0,75	146,3	17,4	0,0118	0,66	0,74	145,71	20,65	0,0086	0,86	0,76	131,79	14,71	0,0085
C2	GO 19	0,40	0,51	143,6	18,1	0,0089	0,60	0,69	144,40	20,54	0,0087	0,72	0,68	141,33	15,65	0,0087
C2	GO 28	0,90	0,68	150,0	15,0	0,0081	0,55	0,60	155,24	20,15	0,0090	0,66	0,67	155,06	16,40	0,0089
C2	GO 29	0,36	0,59	170,5	17,5	0,0096	0,56	0,64	161,83	19,69	0,0091	0,63	0,67	158,58	15,24	0,0085
C2	GO 35	0,57	0,51	152,1	15,9	0,0087	0,60	0,63	136,18	17,55	0,0086	0,72	0,60	134,92	13,68	0,0085
C2	GO 38	0,92	0,65	156,0	15,0	0,0082	0,47	0,51	149,82	20,45	0,0086	0,55	0,46	157,04	18,54	0,0084
C2	GO 39	0,94	0,68	150,9	15,3	0,0080	0,60	0,67	164,13	20,97	0,0089	0,78	0,68	160,28	14,76	0,0084
C2	MC - 26	0,50	0,47	176,3	22,5	0,0084	0,50	0,76	163,05	24,35	0,0088	0,56	0,65	162,93	19,14	0,0080
C3	GO 2	0,61	0,63	112,0	11,9	0,0084	0,74	0,72	144,37	16,76	0,0094	0,86	0,77	132,73	11,25	0,0087
C3	GO 7	1,17	0,82	164,4	16,2	0,0106	0,93	0,74	166,14	22,63	0,0111	1,05	0,78	152,89	16,72	0,0101
C3	GO 34	0,73	0,52	197,1	18,5	0,0124	0,91	0,60	161,26	19,29	0,0108	0,91	0,59	175,17	17,05	0,0116
C3	AM -11	0,71	0,77	101,4	14,6	0,0075	0,54	0,70	157,89	20,15	0,0090	0,69	0,84	134,19	13,95	0,0085
C3	MC - 19	0,64	0,53	181,5	20,5	0,0094	0,56	0,59	160,20	21,94	0,0098	0,64	0,65	156,49	19,39	0,0094
C4	GO 31	0,81	0,81	145,0	14,00	0,0092	0,62	0,84	133,18	20,01	0,0091	0,84	0,81	135,29	15,19	0,0095
C4	GO 32	1,26	1,01	150,2	15,20	0,0088	0,56	0,90	138,00	22,87	0,0092	0,77	0,90	131,29	17,36	0,0090
C4	AM - 08	0,37	0,81	135,1	18,16	0,0096	0,47	0,90	130,62	20,28	0,0092	0,63	0,80	119,86	17,32	0,0086
C4	AM - 09	0,22	0,62	130,8	20,76	0,0088	0,47	0,86	132,04	21,27	0,0096	0,58	0,77	129,87	19,45	0,0094
C4	MC - 33	0,10	0,35	184,1	20,73	0,0108	0,43	0,65	153,12	18,97	0,0098	0,35	0,49	154,61	16,52	0,0086
C4	MC - 36	0,17	0,49	177,6	20,50	0,0086	0,38	0,71	154,08	19,09	0,0093	0,42	0,63	156,15	18,13	0,0089
C4	MC - 38	0,31	0,47	197,8	15,16	0,0118	0,37	0,75	155,90	22,02	0,0088	0,51	0,76	153,04	17,95	0,0082
C5	GO 1	0,59	0,86	164,5	11,30	0,0085	0,52	1,02	183,95	19,92	0,0090	0,49	0,76	158,29	14,24	0,0076
C5	GO 5	0,61	0,54	119,7	19,30	0,0078	0,59	0,54	183,56	20,55	0,0078	0,57	0,54	132,14	18,89	0,0070
C5	GO 14	1,01	0,61	125,9	20,20	0,008	0,53	0,78	134,01	22,46	0,0091	0,62	0,59	144,60	18,55	0,0091
C5	GO 30	0,75	0,53	160,0	15,90	0,0102	0,64	0,59	155,65	18,31	0,0095	0,71	0,70	145,37	14,50	0,0092
C5	GO 40	0,46	0,62	179,0	20,70	0,0106	0,53	0,67	160,44	25,86	0,0092	0,71	0,74	143,98	19,87	0,0091
C5	AM - 01	0,65	0,64	137,9	21,04	0,0084	0,31	0,71	149,37	19,13	0,0091	0,34	0,62	153,40	18,72	0,0085
C5	AM - 03	0,75	0,76	104,9	14,63	0,0076	0,61	0,66	142,70	20,15	0,0094	0,71	0,62	138,64	16,40	0,0091
C5	AM - 04	0,71	0,56	121,6	18,70	0,0082	0,47	0,74	158,17	22,86	0,0092	0,63	0,72	155,71	18,83	0,0089
C5	AM -05	0,89	0,78	93,2	13,84	0,0111	0,54	0,77	141,23	19,14	0,0096	0,63	0,73	132,28	17,45	0,0093
C5	AM - 10	0,97	0,76	139,5	20,98	0,0072	0,53	0,61	156,66	19,39	0,0089	0,66	0,60	161,25	16,35	0,0092
C5	AM - 12	0,82	0,77	125,4	15,88	0,0096	0,56	0,69	156,72	22,54	0,0089	0,75	0,90	141,21	16,75	0,0087
C5	AM - 20	0,58	1,32	136,1	14,89	0,0070	0,50	0,66	166,36	22,05	0,0089	0,63	0,80	157,91	16,17	0,0083
C5	AM - 21	0,51	0,81	107,8	15,20	0,0083	0,37	0,73	126,85	19,39	0,0091	0,41	0,61	127,89	17,57	0,0085
C5	AM - 22	1,04	0,92	112,3	12,35	0,0072	0,67	0,80	149,99	22,57	0,0090	0,87	0,87	128,46	13,79	0,0083
C5	MC - 01	0,52	0,74	147,4	16,50	0,0096	0,54	0,68	141,27	19,04	0,0092	0,63	0,70	135,95	17,10	0,0092
C5	MC - 28	0,60	0,55	135,8	8,12	0,0104	0,52	0,48	151,28	16,62	0,0093	0,49	0,43	151,17	14,96	0,0088
C5	MC - 60	0,46	0,62	204,2	16,30	0,0090	0,42	0,51	169,02	16,80	0,0091	0,49	0,60	174,98	15,69	0,0095

Continuação da Tabela 4

		dados da literatura (IPT, 1990, 1993 e SGM, 1994)					RESULTADOS CALCULADOS									
							conjunto de equações A					Conjunto de equações B				
amostras		por	desg	unix	rupt	cdtl	por	desg	unix	rupt	cdtl	por	desg	unix	rupt	cdtl
C6	GO 20	0,23	1,02	255,6	26,0	0,0094	0,30	1,17	203,25	31,98	0,0082	0,75	1,30	165,17	16,66	0,0062
C6	GO 21	0,54	0,80	210,0	25,1	0,0101	0,68	0,82	193,94	23,50	0,0102	0,72	0,81	194,03	17,16	0,0104
C6	GO 22	0,52	0,68	170,0	17,8	0,0093	0,33	0,75	268,56	27,07	0,0100	0,01	0,35	295,41	26,35	0,0099
C6	AM - 13	0,16	1,14	128,9	25,71	0,0091	0,32	1,32	160,52	33,85	0,0082	0,81	1,18	152,20	21,45	0,0074
C6	AM - 18	0,20	2,02	113,3	22,43	0,0097	0,14	1,75	131,21	34,00	0,0095	0,26	0,83	148,06	31,70	0,0087
C6	MC - 30	0,49	1,04	147,5	15,77	0,0073	0,60	0,89	156,44	27,76	0,0080	1,08	0,75	174,08	16,94	0,0088
C7	GO 3	0,71	0,52	211,0	21,80	0,0124	0,56	0,55	223,33	19,34	0,0112	0,15	0,41	150,56	16,22	0,0047
C7	MC - 07	0,1	1,02	169,2	16,64	0,0107	0,08	0,78	211,95	18,38	0,0095	-0,38	0,18	204,46	15,66	0,0053
C7	MC - 17	0,44	0,68	173,2	18,09	0,0088	0,29	0,68	181,44	18,43	0,0096	0,18	0,52	165,35	13,47	0,0068

CONCLUSÃO

O reconhecimento das características petrográficas de uma rocha (mineralogia, texturas e estruturas) só pode ser alcançado através do método da análise petrográfica. De posse de tais informações torna-se possível a previsão do comportamento físico e mecânico de uma rocha sem a execução dos ensaios propriamente ditos. Entretanto para se evitar interpretações errôneas, deve-se dizer que a utilização da petrografia tem um caráter orientativo e preliminar para o reconhecimento das propriedades tecnológicas das rochas, sem implicar na substituição dos ensaios tecnológicos por este método.

Da comparação dos resultados das equações dos conjuntos A e B, com os resultados de ensaios da literatura, conclui-se que o conjunto B é mais indicado para a previsão de propriedades tecnológicas do que o conjunto A.

A aplicação da análise discriminante para as rochas dos conjuntos C6 e C7 mostra que esses grupos devem ser considerados isoladamente no que se refere ao estudo para obtenção de índices de previsão dos parâmetros tecnológicos. Isso se deve ao fato desses conjuntos apresentarem características petrográficas e tecnológicas peculiares, tais como composição mineralógica, texturas, entre outros. Isso também explica os resultados alcançados pela aplicação das equações dos conjuntos A e B, cujos valores são bastante diferentes dos obtidos através de ensaios tecnológicos.

Por esses resultados os autores recomendam a utilização dessas equações apenas em granitos *stricto sensu*, ou seja, amostras cuja composição correspondem aos campos 3a e 3b do diagrama QAP de Streckeisen (1976). Para outros tipos de rochas comercialmente denominadas como granitos, mas que pertençam a outros tipos petrográficos (sienitos, gabros, anortositos, monzodioritos, etc.) deve-se efetuar novos trabalhos de cunho específico.

Essas equações podem ser aplicadas em campanhas prospectivas para novos tipos de rochas,

facilitando e direcionando estudos de caracterização tecnológica e de desenvolvimento da lavra. Outras utilizações podem ser experimentadas, tais como o controle de frentes de lavras onde as variações litológicas são muito intensas; o controle das propriedades tecnológicas em pequenas marmorarias visando a especificação mais adequada do material (e.g. em ambientes muito úmidos ou com alto tráfego), entre outras.

A eficiência de tais equações devem ser testadas com cautela. A meta de trabalho dos autores é a coleta de novas amostras para o teste das equações através da comparação entre os resultados obtidos pela aplicação das equações e os obtidos pela execução de novos ensaios nessas amostras.

Por todas essas possibilidades pode-se dizer que essas equações constituem-se um método rápido e de baixo custo para uma prévia caracterização tecnológica de granitos ornamentais, tipo petrográfico *stricto sensu*, proporcionando relativa segurança para o reconhecimento dessas propriedades, sem entretanto eliminar a necessidade da execução dos ensaios tecnológicos propriamente ditos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (processo nº 00/00762-8), referente ao financiamento do projeto de mestrado do primeiro autor, bem como ao geólogo Dr. Eleno de Paula Rodrigues pelo empréstimo das placas para a confecção das lâminas petrográficas estudadas neste trabalho e ao Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim pelo apoio no tratamento estatístico dos dados.

BIBLIOGRAFIA

Chiodi Filho, C. e Rodrigues, E. de P. 1999. Quadro setorial brasileiro das rochas ornamentais e de revestimento. Rev. Rochas de Qualidade. ed. 147 julho/agosto. p: 86-104.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas 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 Tecnológicas 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).
- 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.
- Mello Mendes, F de 1968. Mecânica das Rochas. Ed. Seção de Folhas da Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. p 541.
- Navarro, 1998. Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico e mecânico. II Congr. Uruguayo de Geología. Punta del Leste, 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.
- Streckeisen, A.1976. To each rock its proper name. Earth. Sci. Rev., 12:1-33.
- Tugrul, A. e Zarif, I. H. 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. Engineering Geology, 51. p:303-317.
- Whittaker B.N.; Singh, R.N. e Sun, G. 1992. Rock Fracture Mechanics – Principles, Design and Applications. Elsevier Science Publisher, Amsterdam. 570p.