

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS COMO FERRAMENTA PARA A PREVISÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS EM GRANITOS ORNAMENTAIS

Fabiano Cabañas Navarro

Geólogo Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Geociências IGCE/UNESP Rio Claro, SP
Av. 24A, 1515, B. Bela Vista, Rio Claro, SP
Fone: (19) 526-2824/ Fax: (19) 524-9644/ e-mail: navarrofc@bol.com.br

RESUMO

O trabalho apresenta e discute dados de caracterização tecnológica referentes a ensaios de resistência à compressão uniaxial, módulo de ruptura e determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (P), obtidos para cinco tipos de granitos ornamentais com diferentes composições minerais, texturas e estruturas. As variedades estudadas correspondem ao Preto Piracema, Verde Lavras, Lilas Gerais, Marrom Caldas e Ibiúna Amêndoa Vermelha.

Desses materiais, foram obtidos 82 corpos-de-prova (45 utilizados para os ensaios de compressão e 37 para a determinação do módulo de ruptura), os quais foram submetidos a medidas de ultra-som em estado seco. As tensões máximas de ruptura obtidas nos dois tipos de ensaios mecânicos foram correlacionadas com os valores de velocidade de propagação de ondas, e dispostos em gráficos de dispersão de pontos.

O tratamento estatístico através da análise da linha de tendência mostrou que a velocidade de propagação de ondas apresenta coeficientes de correlação de 83% em relação ao módulo de ruptura, e de 54% em relação à resistência à compressão. A partir desses dados foram obtidas duas equações, uma considerando o módulo de ruptura e a propagação de ondas ($MR = 0,0075V_p - 21,832$), e outra entre a compressão uniaxial e a propagação de ondas ($Unix = 0,043V_p - 40,901$).

Utilizando tais equações é possível estimar os parâmetros mecânicos considerados, com base na velocidade de ultra-som sem, no entanto, descartar a execução dos ensaios propriamente ditos. Dessa forma, o presente trabalho ressalta a importância da utilização de métodos expeditos e não destrutivos visando a caracterização das propriedades mecânicas de granitos ornamentais e de revestimento.

INTRODUÇÃO

A utilização de métodos ultra-sônicos no campo da engenharia de materiais é algo crescente, sendo qualificado como um ensaio não-destrutivo dos mais importantes em diversas aplicações tecnológicas. Seu grande uso é a detecção e avaliação de descontinuidades superficiais e medidas de espessuras, e menos freqüentemente, para determinar propriedades físicas, estrutura, tamanho de grão e constantes elásticas dos materiais (Santini, 1996).

Na área de mecânica de rochas, a utilização de medidas de propagação de ondas é empregada principalmente para a investigação da presença de tensões e de estabilidade de maciços rochosos (Rzhevsky & Novik, 1971). Alguns parâmetros mecânicos podem ser determinados com grande precisão, tais como o módulo de Young, módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson (Lama & Vutukuri, 1978). Segundo esses autores, a previsão desses parâmetros pode ser conseguida com no máximo 6% de erro, quando comparados os valores calculados e os valores obtidos experimentalmente em rochas isotrópicas. Em materiais anisotrópicos a porcentagem de erro pode alcançar 24%, ou mais de acordo com a intensidade das orientações presentes.

A velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas pode ser aplicada como instrumento para a determinação do grau de fissuramento e porosidade em rochas (Mouza *et al.*, 1983 *in* Figueiredo *et al.*, 2001). Trabalhos nessa linha de investigação são apresentados por Rzhevsky & Novik (1971), que apresentam equações para a previsão da porosidade em dolomitos com base na propagação de ondas. Como outro exemplo desse tipo de aplicação, cita-se Köhler (1991) que propõe equações para a previsão desse parâmetro em mármore utilizados como estatuária.

O principal empecilho para a aplicação desse método em materiais heterogêneos como as rochas é a presença de contatos entre materiais com diferentes velocidades de propagação de ondas, causando reflexões dos raios e assim produzindo distúrbios de propagação (Lama & Vutukuri, 1978).

As vantagens e potenciais de utilização dessa técnica, são ainda pouco empregadas para o estudo de rochas ornamentais, embora seja crescente o número de casos na literatura que mostrem casos favoráveis da aplicação dessa técnica.

Diversos trabalhos tem investigado a influência de anisotropias texturais e estruturais para o comportamento tecnológico das rochas. Um fator comum desses trabalhos é o emprego de métodos de ultra-som para avaliação da intensidade de orientação das rochas, servindo assim como elemento de comparação para a interpretação de dados mecânicos.

Alguns exemplos desse enfoque são apresentados por Ruedrich *et al.* (2001a), que investigaram o estado de alteração de colunas de mármore utilizando técnicas de tomografia de ultra-som, constatando a eficiência do método para o detalhamento da estrutura e composição da rocha, e com isso a obtenção de bases para a conservação de monumentos.

Ruedrich *et al.* (2001b), correlacionaram propriedades como tensão de ruptura, dilatação térmica e anisotropias da velocidade de propagação de ondas associada ao estudo das texturas e estruturas em mármore, provenientes do Palácio de Potsdam (Alemanha). Como conclusão reconheceram a associação dessas técnicas para a previsão do comportamento tecnológico de rochas, e portanto passível de utilização em projetos de reconstrução e conservação de obras.

Weiss *et al.* (2000) e Weiss *et al.* (2001) demonstraram a utilização da velocidade de ondas ultrassônicas e dados de porosidade como um binômio adequado para o estudo e detecção dos efeitos e processos de alteração em mármore calcíticos e/ou dolomíticos com variações texturais e estruturais diversas.

Nesse sentido, a proposta do presente trabalho é apresentar algumas vantagens para a utilização de métodos indiretos como ferramenta para a previsão de parâmetros mecânicos em granitos ornamentais selecionados. Ainda que preliminares, os resultados alcançados mostram que a aplicação de ensaios para determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas são bastante promissoras e eficientes para a previsão dos parâmetros considerados.

MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram selecionados cinco tipos de rochas de revestimento classificadas comercialmente como granitos apresentando diferentes características composicionais, texturais e estruturais (Tabela 1). Desse conjunto de amostras, apenas um tipo não é comercializado, os demais são produzidos com regularidade ou estão temporariamente paralisados.

Os quatro materiais comercializados são provenientes dos centros produtores Candeias (tipos Preto Piracema, Verde Lavras e Lilas Gerais) e Caldas (tipo Marrom Caldas), ambos na região sul de Minas Gerais. A amostra não comercializada é proveniente do Maciço Granítico Ibiúna, sul de São Paulo.

TABELA 1: Nome comercial, tipo petrográfico e procedência dos materiais selecionados.

Nome Comercial	Tipo Petrográfico	Procedência
Lilas Gerais	Gnaiss sienogranítico róseo	Itapecirica, MG
Verde Lavras	Gnaiss 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).

Abaixo encontra-se uma breve descrição petrográfica dos tipos selecionados.

Granito Lilas Gerais

Corresponde a um gnaiss sienogranítico de coloração róseo-lilás, com estrutura gnáissica homogênea do tipo fitada, a localmente com discreto aspecto bandado. A estrutura gnáissica caracteriza-se por forte iso-orientação dos cristais quartzo-feldspáticos alongados, ressaltada pela presença de concentrações lineares, descontínuas de minúsculas lamelas de biotita distribuídas de forma mais ou menos homogênea pela rocha, conferindo-lhe feição fitada. Já o aspecto bandado, bastante discreto, deve-se a leitões subcentimétricos descontínuos, irregularmente espaçados, compostos por frações quartzo-feldspáticas mais grosseiras e empobrecidas em biotita. A textura é tipicamente granoblástica, predominantemente equigranular, de granulação média a média-fina, a inequigranular, devido a presença esporádica de leitões quartzo-feldspáticos de granulação mais grosseira. A granulação oscila entre 2,0 e 6,0 mm, com a presença de raros cristais de feldspato potássico que atingem dimensões próximas a 1,0 cm, e na média dimensões ao redor de 2,0 a 3,0mm. Microscopicamente, os minerais mostram bom engrenamento entre si, caracterizados por boa recristalização metamórfica, e apenas localmente apresentam feições microgranulares a fracamente protomilonítica. O grau de microfissuramento mineral é bastante discreto e a alteração mineral fraca a praticamente ausente, evidenciada por cristais de plagioclásio pouco saussuritizados. *Mineralogia: microclínio (35,4%), plagioclásio (23,1%), quartzo (34,6%), biotita (6,7%) e opacos (0,2%).*

Granito Verde Lavras

Representado por um gnaiss charnoquítico de coloração cinza esverdeada com estrutura gnáissica homogênea, grosseiramente orientada, e discreto padrão listrado caracterizado por concentrações lineares a anastomosadas, mais ou menos contínuas de biotitas lamelares. Apresenta textura porfiróide serial, com matriz quartzo-feldspática protomilonítica a blastomilonítica de granulação média a média grossa. Os megacristais de microclínio e, subordinadamente, de plagioclásio perfazem aproximadamente 15% do volume da rocha e exibem formas retangulares, que podem atingir dimensões de até 4,0 x 1,0 cm, ovaladas, alongadas e estiradas. Os cristais retangulares e, em alguns casos, os ovalados, encontram-se parcialmente envoltos por anéis de biotita e/ou agregados microcristalinos. Microscopicamente, apresenta textura protomilonítica a blastomilonítica caracterizada pela presença de delgados leitões com minerais microgranulares, parcial a totalmente recristalizados. Estes leitões são milimétricos a submilimétricos, geralmente de aspecto anastomosado e heterogeneamente distribuídos pela rocha. Os megacristais apresentam desde bordas microgranuladas, fraturas cicatrizadas e microfalhas, até intenso estiramento com o desenvolvimento de cristais alongados e mesmo laminados, iso-orientados, e no geral com intensa recristalização metamórfica. *Mineralogia: ortoclásio mesoperitítico (31,4%), plagioclásio (15,8%), quartzo (39,3%), agregados microcristalinos fibrosos (7,0%), biotita (4,7%), opacos (1,6%) e bastita (0,5%).*

“Granito” Marrom Caldas

Este tipo corresponde na verdade a um álcali-feldspato quartzo sienito de coloração marrom clara com estrutura orientada (estrutura de fluxo plástico), marcada por intensa iso-orientação de cristais tabulares de feldspato potássico. A textura é fanerítica, discretamente inequigranular, de granulação predominante média. A granulação varia entre 2,0 e 6,0 mm, predominando na faixa de 2,0 a 3,0 mm.

A alteração dos feldspatos se apresenta com diferentes graus de intensidade e heterogeneamente distribuída, sendo mais proeminente quando associada ao fraturamento de maior expressividade, o qual ocorre perpendicularmente ao maior alongamento do grão. *Mineralogia: ortoclásio (65,8%), diopsídio (8,8%), hornblenda (7,8%), aegerina-augita (4,5%), biotita (0,3%), oligoclásio (1,8%), quartzo (4,8%), opacos (3,3%), titanita (1,4%), apatita (1,5%), zircão e rutilo (traços).*

“Granito” Preto Piracema

Esta rocha corresponde petrograficamente a um gabro com quartzo, de cor preta com estrutura isotrópica, maciça. A textura é fanerítica média-fina, com a presença de esporádicos cristais prismáticos de plagioclásio, o que confere à rocha um aspecto discretamente porfirítico. Microscopicamente exhibe textura subofítica intergranular, contendo intersticialmente quartzo e microclínio. *Mineralogia: plagioclásio (54,1%), clinopiroxênios (34,4%), opacos (4,1%), hornblenda (2,7%), microclínio (1,9%) e quartzo (2,8%).*

“Granito” Ibiúna Amêndoa Vermelha

Rocha classificada como biotita-hornblenda monzogranito porfiróide com matriz granodiorítica de coloração cinza contendo megacristais rosados. Apresenta estrutura foliada anastomosada, de natureza protomilonítica, caracterizada pelo arranjo subparalelo dos minerais máficos e intenso estiramento de grãos/agregados de quartzo e de megacristais de microclínio. Apresenta textura porfiróide (30% ou mais de megacristais) com matriz inequigranular, hipidiomórfica, de granulação média a média-grossa com megacristais, oscilando entre 2,0 e 10,0 cm, na média 6,0 cm. A alteração dos feldspatos ocorre de forma bastante heterogênea, podendo estar em pontos localizados da amostra, em manchas extensas, mas com pouca intensidade ou muito intensa em pequenas porções isoladas. O fraturamento é marcadamente intracristalino e muito intenso, sobretudo no microclínio, o mineral mais afetado. *Mineralogia: microclínio (30,5%), oligoclásio (24,2%), quartzo (28,7%), hornblenda (7,2%), biotita (6,5%), opacos (1,2%), titanita (2,4%), apatita (0,3%) e moscovita (traços).*

MÉTODO DE TRABALHO

As rochas acima mencionadas foram coletadas em volume suficiente para a caracterização tecnológica das propriedades mecânicas referentes a resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura. Ao todo foram obtidos 82 corpos-de-prova, sendo 45 deles destinados aos ensaios de resistência à

compressão e 37 para a determinação do módulo de ruptura, conforme a Tabela 2.

TABELA 2: Relação do número de corpos-de-prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura para cada um dos cinco tipos de rochas analisadas.

ENSAIOS		Compressão Uniaxial	Módulo de Ruptura
ROCHAS	Lilas Gerais	8	8
	Verde Lavras	10	6
	Marrom Caldas	10	9
	Preto Piracema	7	7
	Ibiúna Amêndoa Vermelha	10	7
TOTAL		45	37

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram executados segundo as prescrições da norma NBR 12767 (ABNT, 1992a). Para cada rocha considerada foram obtidos no mínimo sete corpos-de-prova de forma cúbica com aresta de 7,5 cm, submetidos a esforços de compressão uniaxial até a ruptura.

A obtenção dos valores de módulo de ruptura seguiu os procedimentos da norma NBR 12763 (ABNT, 1992b), a qual preconiza a obtenção de no mínimo cinco corpos-de-prova com dimensões de 5,0 x 10,0 x 20,0 cm, para cada rocha analisada.

As tensões de ruptura referentes aos ensaios de compressão e módulo de ruptura foram obtidas com os corpos-de-prova em estado seco para todas as amostras analisadas.

Considerando as rochas anisotrópicas (foliadas) representadas pelos tipos Lilas Gerais, Verde Lavras, Marrom Caldas e Ibiúna Amêndoa Vermelha houve atenção especial quanto ao esforço aplicado em relação à estruturação presente. Dessa maneira para a determinação do módulo de ruptura considerou-se a direção do esforço paralelamente ao sentido da foliação, simulando o corte utilizado no mercado (Figura 1A). Para o ensaio de resistência à compressão uniaxial parte das amostras sofreram esforço paralelo à direção do plano de foliação e parte perpendicular, conforme relacionado na Tabela 3 e representado na Figura 1B.

Como procedimento anterior à realização dos ensaios mecânicos executou-se a medição da propagação de ondas ultra-sônicas em cada um dos corpos-de-prova considerados, segundo as diretrizes da norma D2845 (ASTM, 1990). O aparelho utilizado corresponde a um medidor de pulso ultra-sônico James modelo C-8901 portátil, que possui dois transdutores piezoelétricos, sendo um para transmissão e outro para recepção de ondas sonoras com frequência entre 36 kHz e 500kHz. A indução dessas ondas elétricas longitudinais (conhecidas como V_p ou de compressão) e da medida do tempo de propagação, permite o cálculo da velocidade de propagação de onda correspondente a cada corpo-de-prova medido.

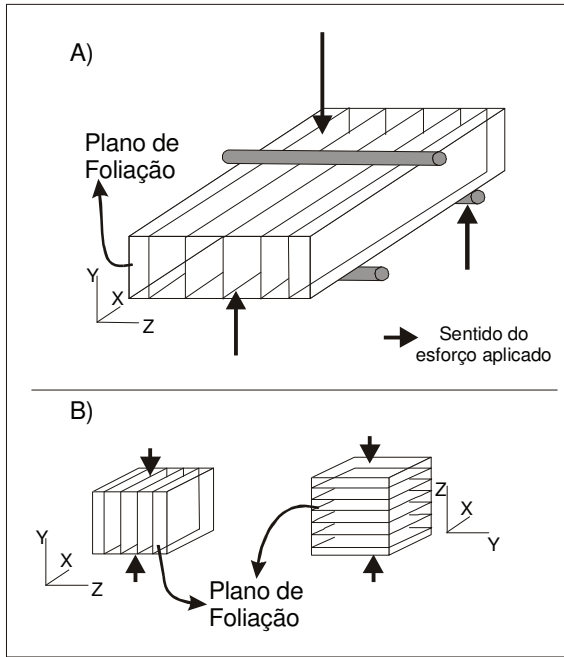


FIGURA 1: Relação entre a foliação e o eixo de compressão considerado nos ensaios mecânicos módulo de ruptura (A) e resistência à compressão uniaxial (B).

TABELA 3: Relação entre a direção de foliação e os esforços aplicados para o ensaio de resistência à compressão uniaxial nas amostras foliadas.

	esforço aplicado em relação à foliação para a compressão uniaxial	
	paralelo	perpendicular
Lilas Gerais	1 a 8 simulando a direção de uso	---
Verde Lavras	6, 7, 8, 9 e 10	1, 2, 3, 4 e 5
Marrom Caldas	1, 2, 3, 4 e 5	6, 7, 8, 9 e 10
Ibiúna Amêndoa Vermelha	1, 2, 3, 4 e 5	6, 7, 8, 9 e 10

Para os corpos-de-prova submetidos à compressão, a propagação de ondas foi medida paralelamente ao sentido do esforço compressivo (Figura 2A). Nos paralelogramos submetidos ao ensaio de módulo de ruptura, a propagação das ondas foi realizada em sentido paralelo ao comprimento do corpo-de-prova (Figura 2B).

O tratamento dos dados consistiu basicamente na comparação através de gráficos dos valores de resistência à compressão e módulo de ruptura com os respectivos valores de velocidade de propagação de ondas P obtidos, utilizando-se para isso o programa Excel versão 97. O passo seguinte foi a obtenção de gráficos de correlação e a geração de equações de primeiro grau (tipo $y = ax + b$), correlacionando as variáveis mecânicas com a velocidade de propagação.

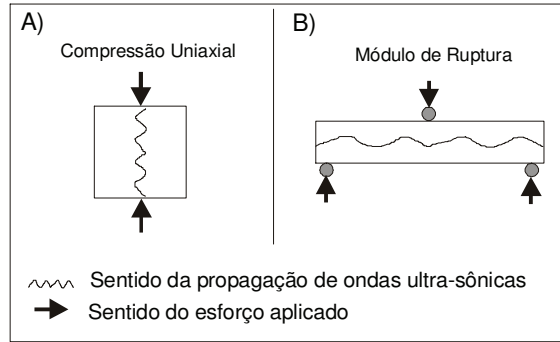


FIGURA 2: Orientação das direções de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais (D 2845; ASTM 1990) para os corpos-de-prova utilizados para os ensaios de (A) determinação da resistência à compressão uniaxial (NBR 12767; ABNT 1992a) e (B) determinação do módulo de ruptura (NBR 12763; ABNT 1992b) com as respectivas direções de propagação de ondas.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados mecânicos obtidos mostram ótimos valores de resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura para todas rochas investigadas. Comparando os valores médios desses ensaios com os limites propostos por Frazão & Farjallat (1996), apresentados na Tabela 4, vemos que os dados obtidos para essas rochas superam com tranquilidade os referidos limites.

TABELA 4: Valores médios de resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura para as rochas analisadas e valores limites propostos por Frazão & Farjallat (1996).

	Compressão uniaxial (MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)	Velocidade de ultra-som (m/s)*
Limites propostos por Frazão & Farjallat (1996)	≥100	≥10	≥4000
Lilas Gerais	177,8	18,9	5294,3
Verde Lavras	232,6	22,6	5491,0
Marrom Caldas	172,3	12,8	4753,5
Preto Piracema	223,7	23,2	6221,1
Ibiúna Amêndoa Vermelha	149,6	13,5	5107,0

* os valores de velocidade de ultra-som apresentados nesta tabela correspondem aos valores médios contidos na Tabela 5, para cada uma das amostras analisadas.

O valores contidos na Tabela 5 mostram os resultados mecânicos e de propagação de ondas obtidos para cada corpo-de-prova de todas as rochas estudadas. De modo geral os resultados mostram pequena variabilidade entre os corpos-de-prova do mesmo tipo de rocha considerada. Assim temos que as variações entre os valores máximos e mínimos para os ensaios de módulo de ruptura não excedem 7 MPa (Marrom Caldas e Ibiúna Amêndoa Vermelha), e seus respectivos valores de velocidade de ultra-som não excedem 740 m/s. Para o ensaio de compressão

uniaxial a diferença entre os valores máximos e mínimos chega a 150 MPa (Verde Lavras) e os valores de velocidade de ultra-som chegam 820 m/s. Ressalta-se que a oscilação dos valores de compressão são relativamente elevadas e serão oportunamente discutidas a frente.

TABELA 5: Valores de Resistência à Compressão Uniaxial e Módulo de Ruptura e respectivos valores de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais (Vp) obtidos para os cinco litotipos estudados.

rocha	nº corpo-de-prova	Ensaio tecnológico			
		Compressão Uniaxial	Vp	Módulo de Ruptura	Vp
		MPa	m/s	MPa	m/s
Lilas Gerais (LG)	1	168,3	5312,8	19,2	5189,1
	2	156,8	5250,4	20,1	5214,5
	3	162,1	5452,3	18,3	5179,1
	4	181,9	5411,5	19,1	5290,8
	5	186,3	5368,2	20,3	5090,9
	6	167,9	5208,5	17,7	5115,8
	7	193,9	5256,7	18,5	5343,9
	8	204,8	5446,8	18,7	5409,9
	média	177,79	5359,41	18,98	5229,2
Verde Lavras (VL)	1	217,	5310,8	23,3	5532,8
	2	267,1	5681,3	22,5	5477,5
	3	207,9	5175,9	22,9	5416,1
	4	123,8	5568,8	24,9	5458,8
	5	275,5	5742,5	21,4	5538,2
	6	252,0	5741,7	20,7	5475,1
	7	269,5	5667,7	---	---
	8	231,8	5830,8	---	---
	9	217,8	5145,5	---	---
	10	263,8	5125,0	---	---
média	232,59	5499,01	22,63	5483,1	
Marrom Caldas (MC)	1	153,5	4382,1	14,9	4995,7
	2	167,4	4465,0	14,5	4896,0
	3	190,7	4516,4	11,9	4414,0
	4	159,5	4510,1	9,9	4897,7
	5	156,3	4478,8	15,5	5029
	6	191,4	5130,4	13,2	4367,3
	7	174,2	5173,0	9,6	4290,1
	8	181,1	5205,3	12,3	4360,7
	9	184,1	5231,3	13,3	4872,7
	10	164,7	5110,4	---	---
média	172,30	4826,73	12,79	4680,3	
Preto Piracema (PP)	1	186,6	6389,3	24,8	6120,8
	2	239,1	6252,2	20,5	6054,9
	3	221,8	6367,0	22,9	6153,8
	4	293,3	6243,5	23,4	6134,4
	5	187,4	6422,7	22,3	6128,4
	6	211,6	6283,6	24,6	6139,8
	7	226,2	6249,6	23,7	6156,8
média	223,72	6315,4	23,18	6126,9	
Ibiúna Amêndoa Vermelha (IBV)	1	123,9	5359,2	14,8	5398,4
	2	159,9	5227,3	9,2	4942,0
	3	127,3	4813,6	14,3	4969,5
	4	175,9	5436,4	13,4	4911,7
	5	171,1	5283,6	12,6	5130,4
	6	164,1	5186,4	14,7	5250,3
	7	154,9	5113,2	15,6	5067,1
	8	132,5	4611,0	---	---
	9	136,6	4891,0	---	---
	10	149,5	5263,6	---	---
média	149,59	5118,5	13,50	5095,6	

A partir desses valores foram criados gráficos comparativos entre os dados de módulo de ruptura e velocidade de ultra-som, e entre os dados de compressão uniaxial e velocidade de ultra-som apresentados respectivamente nos Gráficos 1 (A, B, C, D, E) e 2 (A, B, C, D, E)

Observando os dados contidos no Gráfico 1 (A, B, C, D, E) referentes à cada uma das rochas consideradas, nota-se grande coerência entre os dados do módulo de ruptura e velocidade de ultra-som obtidos. Entretanto algumas situações específicas devem ser comentadas sob o ponto de vista mineralógico, textural e estrutural, no que se refere às variações nos parâmetros mensurados.

O Gráfico 1A apresenta dados referentes ao granito Lilas Gerais, onde observa-se pequena oscilação nos valores de módulo de ruptura, embora os dados de propagação apresentem variações mais expressivas. Tais oscilações podem ser explicadas à luz das informações petrográficas apresentadas anteriormente. Assim, pode-se atribuir para os casos com diminuição brusca da velocidade de ultra-som (corpos-de-prova LG 2 e LG 5) a influência de variações na granulação e/ou maior concentração de biotita nessas amostras, feições essas presentes nas porções gnáissicas dessa rocha.

Conforme dados de Rzhovsky & Novik (1971), sabe-se que a biotita mostra valores de velocidade de propagação de ondas ligeiramente menores que os do quartzo e feldspatos. Entretanto cabe ressaltar que o comportamento mecânico dos minerais micáceos exibe tendência plástica, fato que garante um valor de módulo semelhante ao das demais amostras apesar da granulação ligeiramente maior.

Por outro lado casos como os corpos-de-prova LG 7 e LG 8, podem ser explicados por teores menores de biotita e pela menor granulação presente nas porções com estrutura fitada da rocha. Apesar da granulação mais fina garantir maior velocidade de ultra-som, a resistência mecânica pode ser ligeiramente diminuída pela presença de heterogeneidades na granulação, o que explica os valores de resistência semelhantes aos dos outros corpos-de-prova.

Observando-se os dados referentes ao granito Verde Lavras apresentados no Gráfico 1B, nota-se uma pequena anomalia no comportamento mecânico dos corpos-de-prova VL 3 e VL 5, que pode estar ligada às variações no grau de imbricamento mineral definido pela maior ou menor intensidade da foliação presente, constituindo assim um fator textural e estrutural de relevância para o comportamento mecânico, mas não refletido pelas ondas ultra-sônicas. Ademais a presença de minerais opacos (cerca de 1,5%) pode causar distorções na propagação de ondas visto o valor ligeiramente maior dessa propriedade que esses minerais apresentam em relação aos minerais silicáticos (Rzhovsky & Novik, 1971).

O tipo Marrom Caldas (Gráfico 1C) é a rocha que apresenta maior variabilidade da velocidade de propagação de ondas. Do ponto de vista composicional, o ortoclásio é o mineral predominante e perfaz cerca de 65% do volume da rocha. Sua velocidade de ultra-som é de cerca de $5,68 \times 10^3$ m/s, conforme

Rzhevsky & Novik (1971). Os mesmos autores apresentam valores de ultra-som de $7,23 \times 10^3$ m/s para o diopsídio (presente em 8,8% da rocha), $6,8 \times 10^3$ m/s para a hornblenda (7,8%) e $7,35 \times 10^3$ m/s para aegirina-augita (4,5%). Baseado nessas informações deve-se esperar um valor mínimo de velocidade de ultra-som ao redor de 6000 m/s para os corpos-de-prova deste litotipo. Entretanto os resultados laboratoriais para a velocidade de ultra-som variam de 4290 m/s a 5030 m/s, o que permite concluir que esses valores e suas respectivas oscilações devem estar controlados pelo expressivo fraturamento observado no ortoclásio e pela maior ou menor intensidade da alteração desses minerais.

Quanto ao tipo Preto Piracema (Gráfico 1D) observa-se uma variação de apenas 5 MPa entre os valores máximos e mínimos de módulo de ruptura e de apenas 100 m/s entre os valores máximo e mínimo de velocidade de ultra-som.

A amostra Ibiúna Amêndoa Vermelha (Gráfico 1E), é a rocha estudada que apresenta maior complexidade do ponto de vista estrutural e textural. Como principais aspectos que possam explicar a variabilidade dos valores de ultra-som, destaca-se a interação entre a granulação heterogênea (média a média-grossa), a foliação anastomosada bastante afetada pela presença de fenocristais de microclínio (dimensões entre 2,0 e 10,0 cm) mais ou menos orientados, além do fraturamento intenso e das variações de intensidade e distribuição da alteração nesses fenocristais. A combinação desses fatores é algo complexa e com certeza apresentam papel importante na propagação da onda de ultra-som, sendo de grande dificuldade a definição de qual desses parâmetros é o mais preponderante.

Com relação aos dados de resistência à compressão uniaxial apresentados no Gráfico 2 (A, B, C, D, E), observa-se relações interessantes e bastante coerentes, cabendo comentários para situações específicas, que apresentam algumas anomalias.

O granito Lilas Gerais, representado no Gráfico 2A apresenta dados de compressão e de velocidade de ultra-som bastante coerentes. As oscilações mais significativas são exibidas pelos corpos-de-prova LG 3 e LG 7, e podem estar ligadas a variações de granulação a exemplo das variações discutidas para os dados de módulo de ruptura.

Os dados apresentados no Gráfico 2B, referentes ao granito Verde Lavras, mostram uma boa concordância entre os valores de compressão e velocidade de ultra-som, com exceção dos corpos-de-prova VL3, VL 4, VL 9 e VL 10.

A presença de leitos delgados com minerais microgranulares parcial a totalmente recristalizados associados a agregados microcristalinos fibrosos (biotita, clorita, actinolita-tremolita), pode explicar os valores altos para a compressão uniaxial associado aos baixos valores de velocidade de ultra-som apresentados pelas amostras VL 3, VL 9 e VL 10. Ao mesmo tempo que os agregados fibrosos reduziriam a velocidade de ultra-som produziriam melhor acomodação e redistribuição dos esforços no momento da aplicação da carga, garantindo alta resistência.

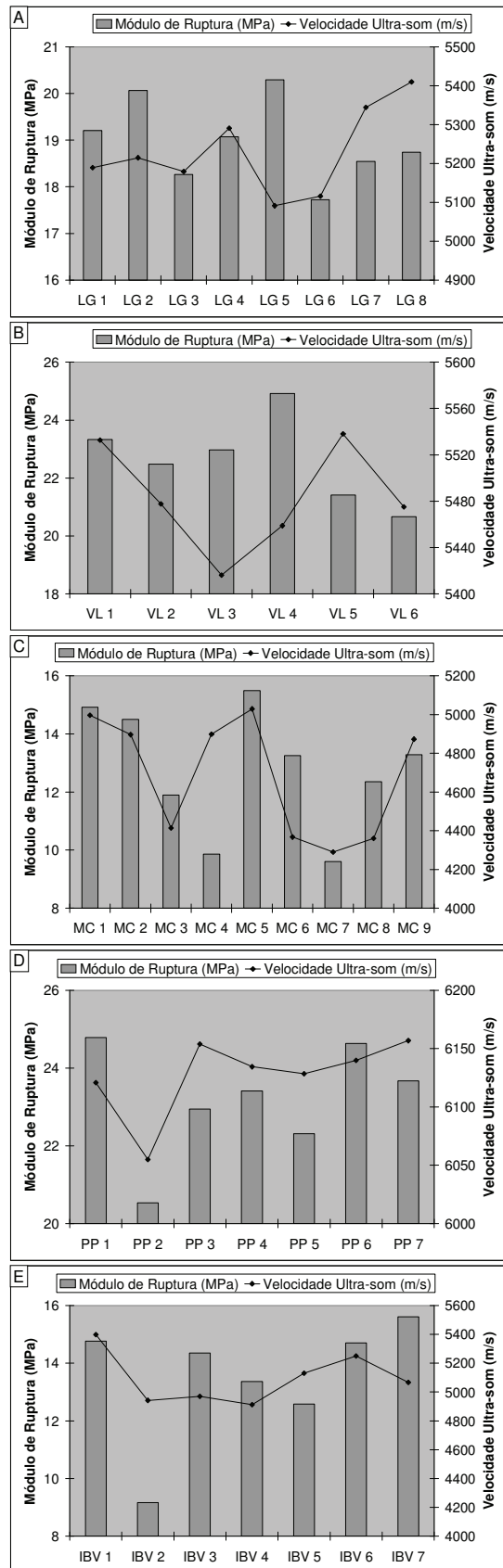


GRÁFICO 1: Dados de módulo de ruptura (MPa) e velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (m/s) para as amostras Lilas Gerais (A), Verde Lavras (B), Marrom Caldas (C), Preto Piracema (D) e Ibiúna Amêndoa Vermelha (E).

No caso da amostra VL 4 a situação se inverte, ou seja, o valor de compressão é bastante baixo, embora a velocidade de propagação esteja dentro da média das demais amostras. A observação em lâmina de megacristais com bordas microgranuladas, fraturas cicatrizadas e microfalhas, pode explicar o baixo valor de resistência mecânica. Pode-se interpretar que o tamanho reduzido desses planos de fraqueza não possibilitem sua detecção através da propagação de ondas de ultra-som. Entretanto o significado mecânico dessas estruturas seria a redistribuição das tensões acumuladas nesses pontos durante a aplicação da carga, causando a propagação das fraturas e culminando na ruptura da rocha, segundo postulado pela teoria de Griffith (in Rzhevsky & Novik, 1971; Vutukuri *et al.*, 1974).

Para a amostra Marrom Caldas (Gráfico 2 C) observa-se o efeito marcante da orientação cristalográfica do ortoclásio, dada pela foliação de fluxo, na velocidade de propagação de ondas. Os valores de velocidade de ultra-som medidos paralelamente à foliação são consideravelmente menores que os valores medidos perpendicularmente a essa estrutura. Já para os resultados de compressão observa-se pequena variação entre o conjunto de corpos-de-prova com carga aplicada paralelamente à foliação e o conjunto com carga aplicada perpendicularmente à foliação. Comparando os valores médios de resistência à compressão desses dois conjuntos temos respectivamente 165,5 MPa e 179,1 MPa.

O tipo Preto Piracema (Gráfico 2D) mostra pequenas variações nos valores de velocidade de ultra-som embora a diferença entre as amostras mais e menos resistentes seja de 107 MPa. A maioria das amostras apresentam dados coerentes quanto às variações entre os dados mecânicos e de ultra-som, contudo os corpos-de-prova PP1, PP 5 e PP 4, constituem situações especiais. Os dois primeiros casos apresentam baixa resistência à compressão e alta velocidade de ultra-som. Uma explicação possível é a alta concentração de clinopiroxênios e hornblenda, minerais com alta velocidade de propagação, respectivamente $7,35 \times 10^3$ m/s e $6,8 \times 10^3$ m/s (Rzhevsky & Novik, 1971). Entretanto esses minerais apresentam clivagem boa em uma direção e partição em duas ou três direções (Deer *et al.*, 1966), podendo estar mais ou menos fraturados. Tais feições petrográficas, constituem portanto, planos de fraqueza e pontos de redistribuição de tensões permitindo a aplicação da teoria de Griffith.

Os dados referentes ao tipo Ibiúna Amêndoa Vermelha (Gráfico 2E), podem ser considerados de muito boa qualidade, em vista da coerência entre os dados de compressão e ultra-som, embora apresente grande complexidade e variações texturais e estruturais. A exceção fica por conta dos corpos-de-prova IBV 1 e IBV 10, que apresentam altos valores de ultra-som e baixa resistência à compressão, fato que pode ser atribuído à presença dos fenocristais e da maior ou menor ocorrência de microfaturas que podem ocorrer nos mesmos.

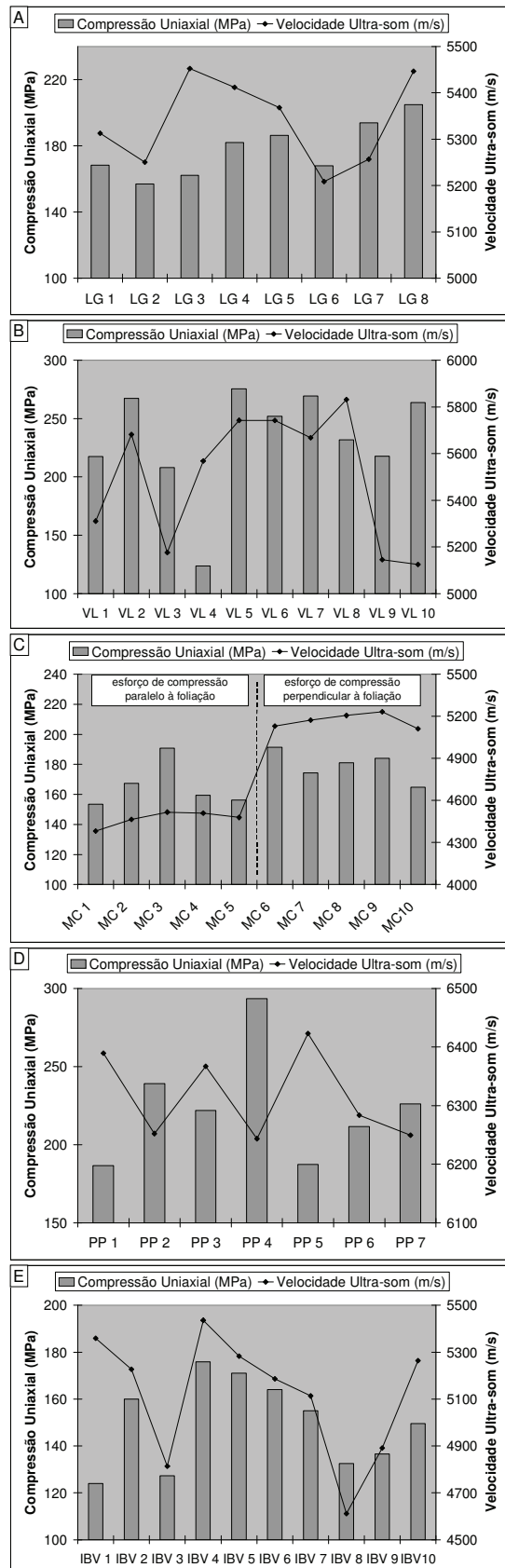


GRÁFICO 2: Dados de resistência à compressão uniaxial (MPa) e velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (m/s) para as amostras Lilas Gerais (A), Verde Lavras (B), Marrom Caldas (C), Preto Piracema (D) e Ibiúna Amêndoa Vermelha (E).

A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO COMO FERRAMENTA DE PREVISÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS

Os gráficos acima apresentados e discutidos permitem concluir que existe um grau de correlação entre os parâmetros mecânicos considerados e a velocidade de propagação de ondas suficiente para o estabelecimento de equações matemáticas. Embora existam situações específicas que não mostram uma correlação direta entre as variáveis tecnológicas consideradas, pode-se encontrar explicações na complexa relação entre os parâmetros petrográficos, conforme discutido. Estudos complementares direcionados para o reconhecimento da influência desses parâmetros na velocidade de ultra-som, sem dúvida contribuirão para uma previsão mais precisa dos parâmetros mecânicos através dessa técnica.

Considerando-se os pontos favoráveis destaca-se a previsão rápida de parâmetros mecânicos relativamente com baixo erro. Constitui ainda um método não destrutivo e de fácil execução, cuja aplicação de cunho prático é a estimativa dos parâmetros mecânicos, aqui considerados, em blocos, placas ou outras peças.

Procurando mostrar a correlação entre os resultados de resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura com os respectivos dados de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, foram gerados gráficos de correlação. Juntamente com esses gráficos foram geradas equações de regressão linear e seus respectivos coeficientes de correlação.

Aplicando análise de regressão linear simples aos dados de módulo de ruptura e velocidade de ultra-som para todas as rochas analisadas, foi obtido um coeficiente de correlação R bastante elevado, igual 83,2% ($R^2 = 0,6925$), como mostra o Gráfico 3. Isso significa que, ao menos nas rochas analisadas, o módulo de ruptura, pode ser previsto com 80% de chance de acerto. Com base nessas informações propõe-se a equação abaixo para previsão do módulo de ruptura a partir de dados de velocidade de ultra-som em rochas graníticas utilizadas como rocha ornamental e de revestimento:

$$MR = 0,0075V_p - 21,832$$

onde: MR = módulo de ruptura (MPa), e
 V_p = velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (m/s).

Também através da análise de regressão linear definiu-se o coeficiente de correlação entre os dados de resistência à compressão uniaxial e velocidade de ultra-som ($R = 54,2\%$ e $R^2 = 0,2938$). A reta representada no Gráfico 4 permite a previsão da compressão uniaxial, e pode ser descrita segundo a equação:

$$Unix = 0,043V_p - 40,901$$

onde: $Unix$ = resistência à compressão uniaxial simples (MPa), e
 V_p = velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (m/s).

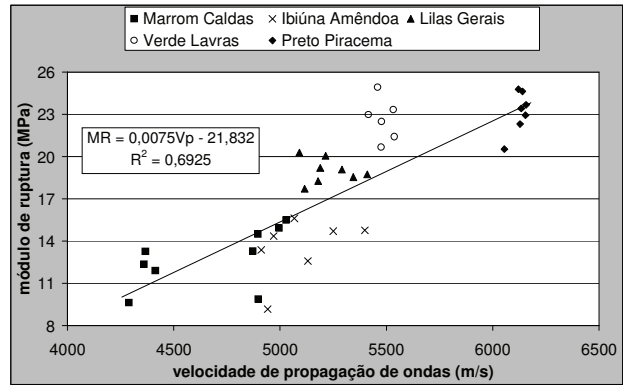


GRÁFICO 3: Análise de regressão linear entre módulo de ruptura (MPa) e velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em 37 corpos-de-prova obtidos dos tipos Lilas Gerais, Verde Lavras, Marrom Caldas, Preto Piracema e Ibiúna Amêndoa Vermelha.

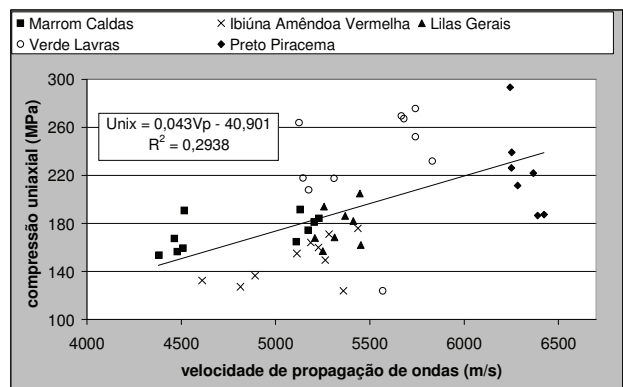


GRÁFICO 4: Análise de regressão linear entre resistência à compressão uniaxial (MPa) e velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em 45 corpos-de-prova obtidos dos tipos Lilas Gerais, Verde Lavras, Marrom Caldas, Preto Piracema e Ibiúna Amêndoa Vermelha.

Embora o coeficiente de correlação apresentado para o parâmetro resistência à compressão seja cerca de 30% mais baixo que o apresentado para o módulo de ruptura, também pode ser considerado um dado significativo para a previsão da compressão.

Segundo Landim (1997) coeficientes de correlação entre variáveis geológicas dificilmente chegam a 50%, o que faz com que os dados aqui apresentados sejam aceitos para testes futuros envolvendo a tentativa de previsão dos parâmetros tecnológicos módulo de ruptura e resistência à compressão uniaxial através de medidas de velocidade de ultra-som em rochas graníticas utilizadas como material de revestimento.

CONCLUSÕES

Embora o comportamento mecânico das rochas apresentem uma complexidade grande para ser explicado com base em um ou dois parâmetros, observa-se que a utilização da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas constitui uma ferramenta promissora para a previsão desses parâmetros.

Nesse escopo, o trabalho apresenta dados tecnológicos obtidos em rochas ornamentais e de revestimento, discutindo o comportamento anômalo de alguns corpos-de-prova com base nas características petrográficas dos materiais analisados. Além disso correlaciona dois ensaios mecânicos (módulo de ruptura e compressão uniaxial) com seus respectivos valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais, propondo com isso duas equações que possibilitam a previsão desses ensaios mecânicos em granitos ornamentais através de um método expedito, de baixo custo e não destrutivo.

Ressalta-se que a aplicação das equações aqui propostas não substituem ou desqualificam a realização dos ensaios mecânicos em laboratórios específicos segundo os procedimentos normalizados, uma vez que constitui um método orientativo para estudos posteriores e detalhados.

Além das duas equações propostas o trabalho abre linhas de investigação futuras. Dentre elas pode-se citar a execução de ensaios em amostras saturadas com água, permitindo uma avaliação mais adequada de rochas em situações de campo, tais como jazidas e obras em que estejam sendo utilizadas; a investigação da real influência dos teores de minerais micáceos para o comportamento mecânico e dos minerais ferromagnesianos para as anomalias de ultra-som; a influência de foliações, estruturas de fluxo e orientações cristalográficas, bem como o microfraturamento para as variações dos ensaios mecânicos e de propagação de ondas.

Os trabalhos de doutorado do autor deverão seguir essa linha de investigação, procurando elucidar algumas dessas questões.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Profs. Drs. Peter Christian Hackspacher (DPM/IGCE/UNESP Rio Claro) e Siegfried Siegesmund (Universidade de Göttingen, Alemanha) pelas discussões e empréstimo de bibliografias. Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Artur (DPM/IGCE/UNESP Rio Claro) pelo auxílio com a petrografia. Ao técnico Adilson José Rossini (Laboratório de Rochas Ornamentais da UNESP Rio Claro) pelo auxílio na execução de parte dos ensaios apresentados neste trabalho. À FAPESP pelo apoio financeiro através do processo 02/03363-2.

BIBLIOGRAFIA

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).

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).

Deer, W.A.; Howie, R.A. & Zussman, J. 1966. An Introduction to the rock forming minerals. London, 1966. 558p.

Figueiredo, P.; Aires-Barros, L.; Torquato, J.R.; Besa, M.F.; Lima, M.B.A.; Fernandes, A.H.M. & Machaqueiro, P. 2001. Contribuição para o estudo das propriedades petrofísicas do Granito Asa Branca e Rosa Iracema do Ceará (Brasil). Anais I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais e II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste. Salvador, Bahia. p:31-36.

Frazão, E.B. & Farjallat, J.E.S. 1996. Proposta de especificação para rochas silicáticas de revestimento. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 8. 1996. ABGE. V1. p: 369-380.

Köhler, W. 1991. Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Steinschäden-Steinkonservierung, 2: 50-53; Hannover.

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). 226p.

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.

Ruedrich, J.; Siegesmund, S.; & Richter, D. 2001a. Marble columns and their state of weathering: structural evidence and ultrasonic tomography. Z. dt. Geol. Ges. 152 (2-4) p: 665-680; Stuttgart.

Ruedrich, J.; Weiss, T. & Siegesmund, S. 2001b. Deterioration characteristics of marbles from the Marmopalais Potsdam (Germany): a compilation. Z. dt. Geol. Ges. 152 (2-4) p: 637-663; Stuttgart.

Rzhevsky, V. e Novik, G. 1971. The Physics of Rocks. Moscow, MIR Publishers, 320p.

Santim, J. L. 1996. Ultra-som: técnica e aplicação. Rio de Janeiro. 287p.

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.; Siegesmund, 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.; Rasolofosaon, P.N.J. & Siegesmund, S. 2001 Thermal microcracking in Carrara marble. Z. dt. Geol. Ges. 152 (2-4) p: 621-636; Stuttgart