

## USO DO PUNDIT NA DETERMINAÇÃO DE ANOMALIAS ULTRA-SÔNICAS EM BLOCOS ROCHOSOS

*Joaquim Raul Torquato<sup>1</sup>, Maria de Fátima Bessa<sup>1</sup> e Hélio Muniz Fernandes<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NUTEC – DITEM. Av. Prof. Rômulo Proença, s/n, Campus do Pici – 60.451-970 – Fortaleza - CE

Fone: (85)287-5211 - Fax: (85)287-1522

E\_mail: torquato@secrel.com.br

### RESUMO

Uma das análises tecnológicas efetuadas em rochas ornamentais é o estudo do seu comportamento quando expostas a processos de exposição a ondas ultra-sônicas. A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais permite avaliar, indiretamente, o grau de alteração e coesão das rochas.

O estudo de algumas amostras de rochas graníticas aparentemente isotrópicas, mas, com características sônicas totalmente anômalas, se medidas segundo três direções perpendiculares, veio demonstrar as possibilidades de uso desta técnica para a determinação de anomalias mineralógicas ou estruturais em escala não visível a olho nu.

Foram feitas repetições dos ensaios que comprovaram o fato e observações em lâminas delgadas, que mostraram a presença de elementos mineralógicos com orientação incipiente; mas, suficiente para produzir a anomalia detectada com o aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Indicator Tester).

### INTRODUÇÃO

A evolução do conhecimento científico sobre a aplicação de técnicas laboratoriais relativamente novas torna possível, por vezes, encontrar uma nova aplicação para determinado aparelho. É o caso da utilização do PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Indicator Tester), aparelho que se usa na determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais em blocos rochosos.

Durante a realização de um trabalho de rotina foi observado que as velocidades ultra-sônicas num cubo de granito que, no campo, parecia aparentemente muito homogêneo, se mostravam bastante díspares em relação às faces medidas, chegando a apresentar valores médios de diferenças da ordem dos 40%.

Neste trabalho apresentam-se os resultados que foram obtidos no sentido de determinar as causas de tal anormalidade.

Durante a execução do ensaio laboratorial, utilizaram-se corpos-de-prova cúbicos com  $7 \pm 0,2$  cm de aresta, onde se determinaram as velocidades ultra-sônicas tanto nas rochas secas como saturadas.

### O PUNDIT

De um modo geral os ultra-sons são ondas elásticas da mesma natureza das ondas sonoras porém com freqüências que estão fora do nível de percepção do ouvido humano (15 a 20 kHz) e a sua velocidade é medida com base no tempo de transito percorrido entre um emissor e um receptor por uma onda sonora numa distância conhecida.

MOUZA et al. (1983) comentam que as técnicas de ultra-sons aplicam-se para o estudo da anisotropia, propriedades mecânicas e estrutura do meio, pois a medição dessa velocidade num material rochoso constitui um meio de investigação complementar aos ensaios de resistência mecânica, tendo a vantagem de não ser destrutivo.

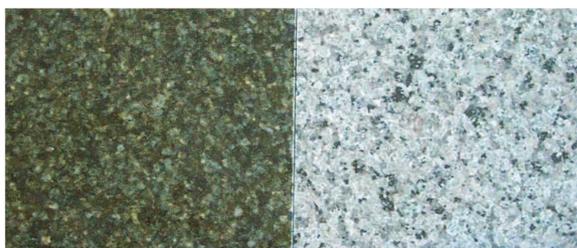
O aparelho usado para os ensaios descritos foi o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Test), pertencente ao Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais do NUTEC, equipado com dois transdutores de 54 KHz, duas possibilidades de medidas, de 0,1 a 999,9  $\mu$ s com possibilidade de variação de 0,1 $\mu$  e de 1 a 9999,9  $\mu$ s em unidades de 1  $\mu$ s, provido de alimentação através de corrente elétrica ou bateria interna. Os disparos são automáticos através de oscilador de cristal de 10 MHz cuja precisão é da ordem de  $\pm 0,1\mu$ s (Foto 1). É um dos poucos ensaios de caracterização tecnológica não destrutivos disponíveis para avaliação das características de alteração e de coesão das rochas, especialmente nos estudos de recuperação de monumentos históricos.

### O MATERIAL ESTUDADO

Os granitos submetidos ao estudo ultra-sônico foram coletados de pedreiras localizadas na Serra da Meruoca, região noroeste do Ceará. São vendidos comercialmente sob os nomes de Granito Meruoca Clássico e de Granito Verde Ceará (Foto 2). Petrograficamente tratam-se de dois sienogranitos com textura hipidiomórfica seriada, tendo ambos, como minerais principais os feldspatos potássicos (25%<KF<50%), o quartzo (25%,quartzo<40%), o oligoclásio (5%<oligoclásio<15%) e as biotita e hornblenda com teores semelhantes e compreendidos entre 5 e 10%. Localmente, quer na pedreira, quer em amostra de mão, podem ser observadas pequenas concentrações de minerais máficos.



**FOTO 1 - Equipamento utilizado para medir a velocidade ultra-sônica das rochas no Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais do Nutec.**



**FOTO 2 – Placas polidas dos granitos Verde Ceará (esquerda) e Meruoca clássico (direita).**

Como minerais acessórios presentes que, no máximo chegam a 3%, ocorrem opacos (óxidos de ferro), clorita, allanita, epidoto, titanita, fluorita, mica branca/sericita e minerais de argila neoformados.

Macroscopicamente os granitos são de granulação média, e, ambos fortemente coloridos, o Meruoca Clássico apresenta-se preferencialmente como cinza prateado e o Verde Ceará como verde escuro. Pelo conhecimento que se tem da geologia regional, acredita-se que ambos são provenientes da mesma câmara magmática e que as variações deverão ser o resultado da adição ou remoção de algum elemento durante as fases tardias de cristalização (Fe?, Pb?). Ainda sob o ponto de vista de mapeamento geológico, parece que o granito Verde Ceará foi cristalizado numa região mais central da câmara magmática em relação ao granito Meruoca Clássico.

### OS VALORES ULTRA-SÔNICOS OBTIDOS

As medidas globais do parâmetro ultra-sônico em amostras secas e saturadas, destes granitos, forneceram inicialmente durante os trabalhos de laboratório os valores indicados na Tabela 1.

Quando do cálculo dos valores estatísticos da Tabela 1 chamou a atenção o fato do elevado valor do desvio padrão para o Granito Meruoca Clássico. Para tentar verificar o que se estava ocorrendo, foram feitas novas medições em novos corpos-de-prova coletados em blocos diferentes de

modo a se poder ter uma massa de valores que fosse significativa.

**TABELA 1 - Resultados das Medidas de Velocidade Propagação de Ondas Vp (m/s) dos granitos em estudo**

Granito	Valores	Vp <sub>seco</sub> (m/s)	Vp <sub>saturado</sub> (m/s)
Meruoca Clássico	médio	4092	5257
	máximo	4734	6061
	mínimo	3390	4542
	Desvio padrão	672	760
Verde Ceará	médio	5565	7117
	máximo	5876	8079
	mínimo	5341	7447
	Desvio padrão	141	118

Fez-se uma rigorosa análise macroscópica em todos os corpos-de-prova e verificou-se que era possível identificar, com um certo grau de segurança, os três conjuntos de faces paralelas de um cubo onde a quantidade de máficos presentes era maior, média e menor (Foto 3). A separação entre o maior valor e o menor, não oferece dúvidas, já o mesmo não se pode afirmar entre o maior e o médio e, o menor e o médio. Nestes dois casos, a separação foi feita, por vezes, mais por intuição do que por total certeza. Tal fato não alterou a interpretação final uma vez que os valores ultra-sônicos obtidos foram completamente diferentes nas duas direções extremas.



**FOTO 3 – Vista geral dos cubos do granito Meruoca Clássico. Na face superior temos uma visão do que estamos chamando de maior concentração de minerais máficos, na face inferior observa-se as menores concentrações. Notar a grande dificuldade da separação entre elas.**

Nas Tabelas 2 e 3 podemos ver os valores das velocidades ultra-sônicas medidas bem como os valores médios e desvios padrão do conjunto.

Pela análise das tabelas várias observações podem ser feitas, dentre elas evidenciam-se as principais:

- A grande disparidade do mesmo valor entre os 4 conjuntos de dados (caso do conjunto 1

que é nitidamente o de resultados mais elevados),

- A grande semelhança de valores entre os vários corpos-de-prova em cada uma das 4 amostras estudadas,
- Valores semelhantes entre duas colunas diferentes (caso das velocidades máximas e médias dos corpos-de-prova 4, 5 e 6 da amostra 3),
- A diferença entre as médias das velocidades ultra-sônicas mais elevadas e as menores é da ordem de 40% (maior média 5730, menor média 3549 m/s).

As duas primeiras observações são fruto da heterogeneidade da pedra. As várias amostras foram coletadas em locais diferentes, mostrando assim, perfeitamente, que o estudo de uma rocha poliminerálica como estes granitos, deve ser feita de maneira completamente diferente do que o de uma rocha monominerálica (calcários de um modo geral).

Como as rochas possuem características que as fazem diferentes dos sólidos ideais, a propagação das ondas elásticas através delas é influenciada tanto pelas suas propriedades intrínsecas como pelas suas propriedades extrínsecas.

Sob este aspecto, DESSANDIER (1995) comenta que a velocidade de propagação dos ultrasons em materiais rochosos com baixa porosidade (caso dos granitos), é controlada pela velocidade intrínseca da propagação dos minerais constituintes. Porém em rochas que apresentam elevada porosidade (caso dos calcários) esta velocidade é condicionada pela propagação morfológica dos vazios.

**TABELA 2 – Resultados das Velocidades Ultra-Sônicas  $V_p$  de todas as Amostras Ensaçadas**

Amostra	Corpo-de-prova	Velocidades maiores (m/s)	Velocidades médias (m/s)	Velocidades menores (m/s)
1	1	5727	4815	4450
	2	5836	5362	4372
	3	5762	5254	4375
	4	5754	4894	4370
	5	5600	4842	4213
	6	5706	4762	4339
2	1	4950	4595	3870
	2	4779	4276	3754
	3	4848	4400	3933
	4	4875	4484	3786
	5	4861	4285	3633
	6	4993	4167	3729
3	1	5363	4762	4262
	2	5034	4636	3930
	3	5346	4515	3914
	4	5246	5147	4012
	5	5234	5070	4086
	6	5119	4954	3904
4	1	4734	4516	3755
	2	4454	4047	3391
	3	4542	3889	3501

Fatores intrínsecos à rocha tais como textura, estrutura, microfraturamento, distribuição e composição mineralógica, porosidade, densidade,

anisotropia e fatores extrínsecos tais como alteração (até mesmo incipiente), conteúdo em água, esforços tectônicos, crescimento de minerais secundários, situação geográfica da pedra (sopé ou topo de morro, lado virado para as chuvas e ventos, sem solo e vegetação ou lado protegido e com solo e vegetação, etc.), situação geográfica da frente de lavra (próximo da superfície ou profunda) são os responsáveis pelas anomalias indicadas. É totalmente impossível conceber que uma pedra mantenha exatamente as mesmas características tecnológicas em qualquer local da pedra.

A terceira observação é fruto da grande dificuldade que ocorre na identificação das faces, com maior, médio e menor concentração em máficos. A isotropia da rocha é, por vezes, tão acentuada que nem mesmo com o auxílio do microscópio é fácil determinar em qual das faces dos cubos se situa a maior concentração em máficos. Assim, esta dificuldade associada com a direção aleatória do corte do bloco de onde foi retirado o corpo-de-prova, torna por vezes impossível identificar em qual face do cubo estamos medindo a velocidade ultra-sônica.

**TABELA 3 - Valores Médios e Desvio Padrão de todas as Amostras Ensaçadas**

Amostra	Média valores máximos (m/s)	Desvio padrão	Média valores médios (m/s)	Desvio padrão	Média valores mínimos (m/s)	Desvio padrão
1	5730	78	4988	154	4353	78
2	4345	76	4368	156	3784	106
3	5224	128	4847	150	4018	138
4	4577	*	4151	*	3549	*
<b>Média total</b>	5179 m/s		4651 m/s		3980 m/s	
<b>Desvio padrão</b>	426 m/s		395 m/s		307 m/s	

\* Poucos valores para o cálculo do desvio padrão

A última observação é a que nos levou a fazer este texto. A grande diferença entre os valores ultra-sônicos não pode ser explicada pelos caminhos normais. A velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas é uma das propriedades que caracteriza os materiais pétreos e que depende sobretudo das propriedades elásticas e das densidades desses materiais.

Neste caso, atendendo a que os granitos da serra da Meruoca são, pelo menos aparentemente, comagmáticos, não há por que acreditar em propriedades elásticas ou em densidades muito diferentes.

Os valores das características técnicas de ambas as rochas mostram igualmente a grande semelhança entre os dois litótipos (Tabela 4).

**TABELA 4 - Características Tecnológicas dos Granitos em Estudo**

Propriedades Tecnológicas	Médias brasileiras*	Granito	
		Meruoca Clássico	Verde Ceará
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,550	2,601	2,615
Velocidade ultra-sônica (m/s)	≥ 4.000	5179 – 3980 **	5565
Porosidade aparente (%)	1,0	0,21	0,59
Absorção de água (%)	-	0,08	0,23
Desgaste Amsler (mm)	≤ 1,0	0,72	0,82
Resistência à compressão (Mpa)	≥ 100,0	116,70	134,0
Resistência à flexão (Mpa)	≥ 10	12,47	15,0

\* Dados extraídos de Frazão & Farjalatt (1995)

\*\* Faixa de variação deste trabalho

As características tecnológica dos dois granitos não permitem obter uma explicação para as grandes diferenças sônicas encontradas, pelo contrário, os restantes valores, bastante semelhantes, deveriam ser compatíveis com valores igualmente semelhantes para as propriedades sônicas dos dois granitos. A porosidade (0,59%) do granito Verde Ceará, superior à do granito Meruoca Clássico (0,21%) mostra uma maior quantidade de vazios onde o som se propaga mais lentamente (o inverso do observado), só uma ligeira diferença positiva na massa específica (2,615 versus 2,601) poderia propiciar velocidades superiores para o granito Verde Ceará, no entanto, a muito pequena diferença não poderia ser responsável pela grande anomalia encontrada.

Petrograficamente não foram verificadas diferentes percentuais de microfissuras quando da observação das diversas faces dos corpos-de-prova, deste modo, foi necessário, uma vez mais, recorrer à explicação já esboçada no início deste trabalho: as pequenas, e por vezes até mesmo insignificantes concentrações de minerais máficos, são as responsáveis pelo fato.

De acordo com BAUDRAN *in*: (AVELINE, et al. 1964) o conhecimento da velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas permite, também, o cálculo de um índice de anisotropia da rocha, IA<sub>(vp)</sub>, o qual é obtido através da equação seguinte:

$$IA(V_p) = \left[ 1 - \frac{V_{P(min)}}{V_{P(max)}} \right] \times 100 \quad (\%)$$

Em que V<sub>P(min)</sub> é a velocidade mínima das ondas P segundo uma direção e V<sub>P(max)</sub> é a velocidade máxima das ondas P na direção perpendicular.

No caso do granito Meruoca Clássico, usando os valores médios máximo (5179m/s) e mínimo (3980 m/s), vamos obter para o índice de anisotropia o valor de 23,15 % (quando isotropa este valor é zero), valor este muito elevado e que demonstra que realmente a rocha apresenta uma anisotropia unicamente explicável pelas pequenas concentrações de biotitas, anfíbólios e opacos.

Conclui-se que as velocidades ultra-sônicas pode passar com a maioria dos outros parâmetros

inerentes a cada tipo comercial não totalmente isotropo vendido no mercado.

Sugere-se assim que, para estes litótipos não se apresente um único valor para cada característica tecnológica mas sim valores máximos e mínimos numa faixa de variação que represente as suas características em todas as direções.

## BIBLIOGRAFIA

- AVELINE, M.; BRAUDAN, <sup>a</sup>; HABIB, P., ISNARD, PP.; LEYMARIE, P.; MOLIER, P. – *Résultats expérimentaux sur les relations entre la microfissuration et la vitesse de propagation des ultra-sons dans les granites du Sidobre (Tarn)*. Siences de la Terre, Tome IX, N<sup>o</sup> 4. Nancy, França. 1964. P 439 – 448.
- DESSANDIER, D. – *Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau Blanc de Tauraine. Application a la durabilité des pierres em ouvre*. Thèse présentée à l'Université de Tours pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de Tours Sciences de la Terre, mention: Geomateriaux, 1995.
- MOUZA, J.; AISSAUOUI, A; PAVONE, D. – *Étude de diverses roches au laboratoire par ondes ultrasonores*. Bull. Of the Intern. Association of Engineering. N<sup>o</sup> 28, 133-139, Paris.
- FRAZÃO, E, B.& FARJALLAT, J. E. S. – Seleção de pedras para revestimentos e prioridades requeridas. Rochas de Qualidade. N<sup>o</sup> 124, p.80 – 93. 1995.