

**ISÓTOPOS ESTÁVEIS COMO ASSINATURAS GEOQUÍMICAS  
DE OBJETOS DE MÁRMORE**

N. Herz

## ABSTRACT

Geochemical signatures are valuable to identify marble statues and inscriptions. To establish the provenance, i.e. the rock's original stone-quarry, can help define the authenticity or forgery of an artifact; help restore original fragments; indicate routes of ancient commerce; and study the evolution of sculpture styles and of aesthetic tastes. Many geological and chemical techniques have been used for over one hundred years to meet these goals. However, the huge variety of chemical features, the requirement or large samples for analyses and the lack of data banks have been the major causes for failure. Recent methods have appeared that use the stable isotope signatures of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ , used both for establishing the provenances and to assemble fragments. A data bank for the quarries of ancient Rome and Greece has been developed so that artifacts of unknown provenance can now be conveniently compared and the origins of the starting materials can be established.

## RESUMO

As assinaturas geoquímicas são úteis para identificar estátuas e inscrições clássicas feitas em mármore. A possibilidade de estabelecer a proveniência, ou seja, a pedra original, pode contribuir para a definição da autenticidade ou da falsificação de um artefato; ajudar na restauração de fragmentos de um original; indicar rotas de comércio antigo; e dar informações sobre a evolução dos estilos esculturais e o gosto estético. Por mais de cem anos, muitas técnicas geológicas e químicas foram utilizadas com vistas à consecução desses objetivos. Contudo, a enorme variabilidade das características químicas, a necessidade de grande quantidade de material para análise, e a falta de banco de dados foram os fatores responsáveis pelo fracasso desses métodos. Mais recentemente, surgiu uma nova metodologia, empregando as assinaturas dos isótopos estáveis  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , que já mostrou eficiência para fins de determinação da procedência e também associação de fragmentos de artefatos. Um banco de dados das pedreiras da Grécia e Roma antigas foi elaborado, assim que artefatos com origens desconhecidas podem agora ser confrontados com as informações disponíveis.

## INTRODUÇÃO

Existem dois grandes problemas com os artefatos gregos e romanos de mármore: a proveniência e a associação dos fragmentos. Antigamente, os arqueólogos ignoravam o primeiro aspecto, recorrendo aos nomes das localidades em descrições dos objetos de mármore. Os nomes eram baseados em critérios subjetivos, além de discutíveis. A literatura arqueológica é rica em discussões quanto à autenticidade ou à origem das peças clássicas, mantidas entre arqueólogos, historiadores de arte e curadores de museus.

As pedreiras principais de mármore da época clássica, e as supostas características de cada uma, foram descritas por Lepsius (1890). Ele valeu-se dos nomes de lugares em descrições arqueológicas: p.e., o mármore "Pentelic" tinha granulação média, boa foliação e mica; o "Hymettian" exibia granulações fina e cor azul; o "Parian" possuía granulação média e grossa, cor branca e translucidez; o "Naxian", ou simplesmente "Ilha", apresentava granulação grossa e ausência de estruturas. Herz & Pritchett (1953) compararam inscrições descritas em epígrafes; freqüentemente o mesmo pedaço de mármore era chamado de "Pentelic" por um e de "Hymettian" por outro. Naquela época, não existiam meios de determinar com precisão a proveniência do mármore.

O conhecimento da procedência dos artefatos ajuda a provar a sua autenticidade. Considerando também que os períodos de operação das pedreiras mais importantes são conhecidos, sabendo-se a origem dos artefatos contaremos com informações sobre a sua data de fabricação, as

rotas do comércio antigo e, certamente, entenderemos melhor a evolução do gosto estético.

As primeiras pedreiras comerciais começaram a operar nas Ilhas Cíclades, no século VII a.C., e desde o século VI eram bem conhecidas no mundo grego. O mármore extraído nas ilhas de Naxos, Thasos e outras do Mar Egeu (Fig. 1) possuía granulação muito grossa. Os mármores do tipo "Ilha" permaneceram no comércio até que as variedades de granulação mais fina e maior translucidez da ilha de Paros começaram a ser extraídas, o que se verificou no início do século VI a.C. No final deste e começo do século V, o mármore do Monte Pentelikon, nas proximidades de Atenas, tornou-se popular, conquanto o de Paros fosse ainda o preferido para as estátuas mais importantes. O mármore de Paros foi usado durante a época romana até a renascença (Riederer & Hoefs, 1980); o de Pentelikon foi empregado na construção dos grandes edifícios de Acrópole; o azul, de granulação fina, do Monte Hymettos, perto de Atenas, manteve-se muito popular desde o século V a.C., por ocasião das épocas helênica e romana. Outras pedreiras importantes exploradas nas épocas romana e bizantina incluíam a Doliana no Peloponeso, Alikina Ilha de Thasos, Proconeso no Mar de Mármara, e alguns lugares da Ásia Menor.

A associação de fragmentos quebrados é outro problema importante. Os epígrafos juntam os fragmentos com base nas características vistas nas letras, não prestando muita atenção no mármore propriamente dito (Herz & Wenner, 1978). Na junção das estátuas, usam-se também crité-

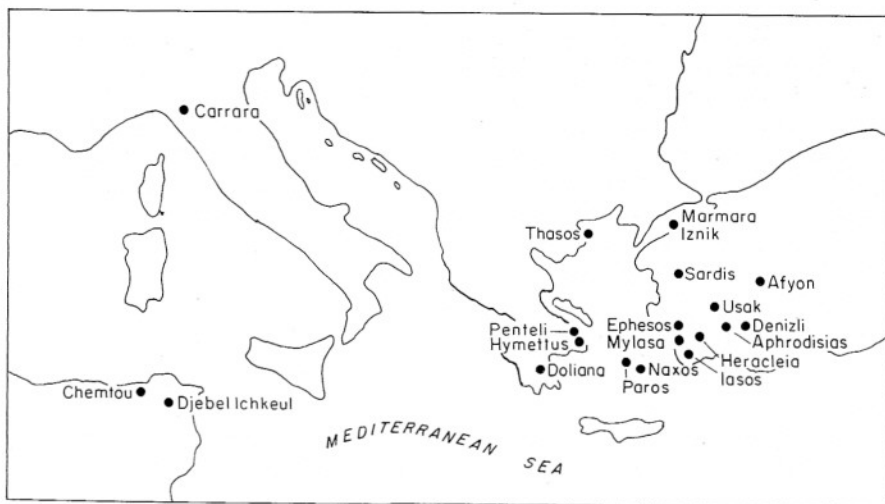


Figura 1 — Mapa reunindo as pedreiras principais da época clássica greco-romana.

rios subjetivos. Numa identificação de fragmentos já associados por epígrafos, testes isotópicos demonstraram que de seis inscrições, três foram reunidas erroneamente. Problemas com estátuas foram também resolvidos: o busto de Antonia Menor, no Museu Fogg em Boston, foi investigado por ter sido feito a partir de cinco pedaços. Análises demonstraram que três eram de Paros e dois de Carrara (Herz, 1985). A chamada cabeça de Agripina, no Museu Ny Karlsberg em Copenhague, foi feita de três pedaços, também não relacionados: o fragmento principal era de Paros, enquanto que os outros dois provinham de Carrara e da Turquia (Tabela 1). Eliminando-se os dois que não pertenciam à obra, ficou claro que a estátua era de Lívia, esposa de Augusto César e não de Agripina, a mãe de Nero.

### TÉCNICAS ANALÍTICAS

Muitas técnicas foram procuradas com o propósito de resolver os problemas do mármore arqueológico. Lepsius (1890) fez o primeiro estudo detalhado das pedreiras gregas antigas, fornecendo descrições das características de cada mármore. Desde então, os arqueólogos continuaram a utilizar os mesmos testes subjetivos daquele autor, incluindo o do cheiro, sem recorrer no entanto aos termos ou às técnicas empregadas na mineralogia ou petrografia.

Análises de elementos traços foram também realizadas em amostras de mármore clássicos. Rybach & Nissen (1965), analisando Na e Mn por ativação neutrônica, descobriram que os de Marmara e os de Paros possuíam baixos teores de Mn. Para um total de 230 amostras pesquisadas, procedentes da Grécia e da Turquia, os teores de Mn variavam de 0,5 a 200 ppm e de Na de 2 a 300 ppm. O método não era o mais recomendável, posto que os elementos mostraram variações segundo fatores de mais de 100 dentro da mesma pedreira. Assim, a possibilidade de determinar-se a origem de um dado artefato era tida como muito remota.

Conforto *et al.* (1975) analisaram oito elementos traços (K, Sr, Ba, Al, Fe, Mn, Si, Ti) em amostras de mármore da Grécia, Itália e Turquia. Mesmo contando com esses elementos não foi possível identificar-se com certeza os mármore de cada pedreira, uma vez que as variações encontradas para cada elemento foram de algumas ordens de grandeza.

Termoluminescência (TL) natural e artificial também não forneceu bons resultados para os mármore gregos. As diferenças observadas para as curvas TL de uma mesma pedreira eram tão grandes quanto as diferenças obtidas a partir de pedreiras separadas (Afordakos *et al.*, 1974). É claro que o método não serve para determinar a proveniência, mas por ser útil na junção dos fragmentos, considerando que variações dentro um bloco são geralmente muito pequenas.

Espectroscopia "electron-spin resonance" (ESR) de  $Mn^{2+}$  mostrou boas possibilidades (Lloyd *et al.*, 1985), com as determinações indicando que algumas pedreiras podem ser distinguidas. Contudo, para consagrar o método, faz-se necessário a realização de mais trabalho visando à determinação de variações dentro de uma ou mais de uma pedreira. Razões isotópicas de Sr parecem ser um sistema promissor (Herz *et al.*, 1982).  $^{87}Sr/^{86}Sr$  varia entre as pedreiras já pesquisadas, mas são indispensáveis mais dados para a padronização do método. Em todo caso, nenhum dos dois métodos pôde ainda ser empregado por absoluta falta de banco de dados.

Sem dúvida, o método mais promissor é o dos isótopos estáveis, sugerido por H. e V. Craig (1972). Eles utilizaram um diagrama de  $\delta^{18}O - \delta^{13}C$  (Fig. 2) reunindo normas isotópicas. Dez amostras arqueológicas foram analisadas, tornando-se possível a determinação da origem de cinco delas, Atenas, Delfos e Naxos, contudo, a origem das outras cinco — Delfos, Epidaurus e Caesarea em Isarel — não pôde ser precisada. Uma outra vantagem da análise isotópica reside no fato de que a quantidade de material necessário é muito

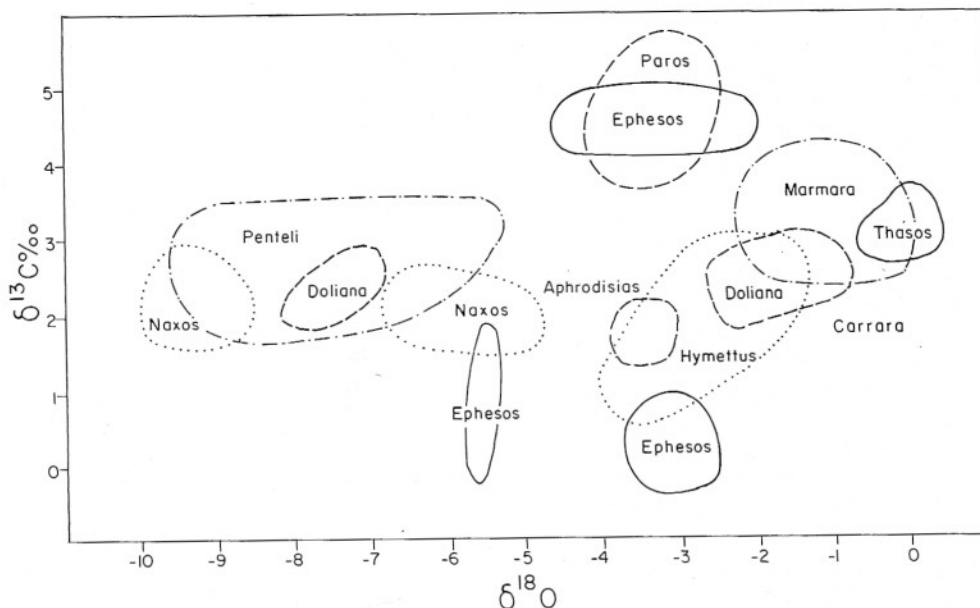


Figura 2 — Diagrama de  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^{13}\text{C}$  para as pedreiras clássicas.

pequena, mais ou menos 10 mg, podendo, portanto, ser retirada sem causar danos aos objetos dos museus.

Presentemente, dispõe-se de um grande banco de dados para as razões isotópicas de C e O (Herz, 1987), sendo que muitos artefatos de mármore foram objeto de caracterização. Da mesma forma, análises isotópicas podem ser empregadas na junção de fragmentos de inscrições e estátuas clássicas (Herz & Wenner, 1981).

### ANÁLISES ISOTÓPICAS E SISTEMÁTICA DO CARBONO E OXIGÊNIO

Craig & Craig (1972) analisaram isotopicamente 170 amostras de pedreiras antigas de Naxos, Paros, Pentelikon e Hymettos, e concluíram que, à exceção de Naxos, os resultados obtidos permitiram a formação de grupos bem definidos. Esse estudo indicou que as assinaturas isotópicas podem servir para a determinação de proveniência, mas que um número maior de investigações ainda se fazia necessário. Hoje é possível explicar-se a anomalia de Naxos: esta apresentava um forte gradiente de temperatura metamórfica levando à variação dos valores isotópicos de O.

Manfra *et al.* (1975) analisaram mármores brancos e coloridos de cinco pedreiras do oeste da Turquia, com os valores isotópicos obtidos

mostrando grande dispersão. Entretanto, comparando só os mármores brancos, os valores permitiram distinguir grupos bem definidos, confirmando, assim, as conclusões alcançadas por Craig & Craig (1972). Estudos posteriores demonstraram também que os valores da quase totalidade das pedreiras clássicas são homogêneos, e que podem servir como assinaturas geoquímicas válidas.

As análises de isótopos envolvem a medida das razões de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  nas amostras, sendo os resultados apresentados relativamente a um padrão internacional, a Belemnita Pee-Dee (PDB), um fóssil carbonático da Carolina do Sul, EUA. O desvio é definido como  $\delta$  e expresso como  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  em partes por mil (‰); isto constitui a assinatura isotópica. Para serem utilizáveis, os valores têm que ser uniformes dentro das dimensões de um artefato, constantes dentro de uma pedreira e mostrar só variações muito pequenas dentro dos limites de um distrito de mineração. As variações  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  dentro de blocos das estátuas devem ser menores de 0,5‰, além de menores de 2‰ dentro de um afloramento ou na maioria das pedreiras (Herz & Wenner, 1981). Provas detalhadas foram feitas dentro do distrito de mármore de Carrara, Itália, descrito por Herz & Dean (1986).

As variações na composição isotópica de O

Tabela 1 — Análises isotópicas da Cabeça de Livia, Museu Glyptotek, Copenhagen (cat. n.º 614).

Peça	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	Composição	Pedreira
A — calota craniana	+5,00	-2,99	dolomítica	Ephesos
B — cabeça	+5,38	-3,85	calcítica	Paros
C — nariz	+2,09	-2,64	calcítica	Carrara

e C nos carbonatos são controladas por: 1. o modo de origem, ou seja, como precipitado químico ou como justaposição de camadas orgânicas; 2. a composição da água associada com a rocha durante a sua diagênese e história posterior; 3. a temperatura e o gradiente térmico durante o metamorfismo; 4. a desproporção entre águas de poros e outras fases mineralógicas durante o metamorfismo (Faure, 1986). Uma composição isotópica uniforme, requisito absoluto das assinaturas arqueológicas, deve ocorrer numa grande área se: 1. o protólito for depositado e sofrer diagênese dentro de um ambiente uniforme; 2. o equilíbrio isotópico for atingido e mantido durante a formação ou o metamorfismo; 3. a unidade de mármore for homogênea, quase carbonato puro, e espessa; 4. o gradiente metamórfico for suave. Junto a calcários e mármore, alto teor de  $\delta^{13}\text{C}$  aponta para grande contribuição de  $\text{CaCO}_3$  inorgânico, como resultado de detritos ou de precipitação química. Valores acima de  $4\text{‰}$  para os mármore de Paros e Efesos indicam origem inorgânica. A alta translucidez e a textura uniforme de Paros confirmam essa formação. A grande variação nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  sugere também uma mistura de materiais inorgânicos com fragmentos de camadas orgânicas.

O oxigênio nos carbonatos é também fracionado segundo a sua origem. Carbonatos biogênicos fracionam oxigênio numa razão diversa da dos precipitados químicos, e cada espécie animal ou vegetal também o faz de forma distinta. Uma diferença de mais de  $-6\text{‰}$  está presente nos carbonatos que se formam junto ao assoalho oceânico, a  $0^\circ\text{C}$ ; perto da superfície, o valor chega a  $30^\circ\text{C}$  (Faure, 1986).

Grandes variações nos isótopos de mármore são provocadas por: 1. troca entre os carbonatos e os minerais silicáticos ou óxidos dentro do próprio mármore ou perto do contato com outras formações; 2. gradiente metamórfico forte, ou 3. intemperismo. Para o mármore puro e branco, o item 1 não se constitui problema uma vez longe da zona de contato com outras formações. Durante o metamorfismo regional normal, que ocorreu na quase totalidade das Ilhas Cíclades, o gradiente térmico horizontal alcançou  $15^\circ\text{C}/\text{km}$  ou menos; logo o item 2 não representou um problema. Contudo, onde o gradiente atingiu valores da ordem de  $30^\circ\text{C}/\text{km}$ , como em Naxos, o resultado foi uma expressiva variação em termos de  $\delta^{18}\text{O}$  (Rye *et al.*, 1976).

O valor de  $\delta^{18}\text{O}$  decresce com a intensidade do metamorfismo do calcário: quanto mais alta a temperatura, mais pronunciada a diminuição. Para áreas metamórficas extensas, com camada de mármore espessa e composta de carbonato puro, o equilíbrio era atingido e os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mantidos relativamente constantes. Onde o gradiente horizontal se apresentava muito acentuado, como em Naxos, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  ocupam campos separados (Fig. 2). Estimativas de temperatura para Naxos situam-se entre  $400^\circ\text{C}$ , a su-

deste da ilha, e  $700^\circ\text{C}$ , na parte central, junto às bordas de um complexo migmatítico. O equilíbrio entre minerais de carbonato e de sílica é demonstrado para o mármore em contato com xisto, em Apollonas: um leito de mármore com 20 m de espessura apresentou diferença em  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-6\text{‰}$ , quando passando da zona central à borda (Jansen & Schuiling, 1976).

O intemperismo, especialmente num ambiente úmido, pode promover mudanças nas razões isotópicas. Peças do mesmo artefato com histórias diferentes (e.g., uma enterrada num poço, a outra dentro do solo, a terceira colocada numa parede) devem trocar oxigênio com águas de composições diferentes. Mármore fresco comparado a material que sofreu intemperismo por menos de 50 anos mostrou diferenças de até  $0,7\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}$ , mas menores de  $0,2\text{‰}$   $\delta^{13}\text{C}$  (Tabela 2).

Tabela 2 — Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  para amostras de mármore fresco e intemperizado.

Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
Fresco (*)	+1,17	-7,24
Intemperizado (*)	+1,12	-7,93
Fresco (*)	+1,37	-6,93
Intemperizado (*)	+1,20	-7,45
Fresco (**)	+2,57	-7,83
Intemperizado (**)	+2,64	-8,16

(\*) Pedreira Tate, Geórgia, EUA

(\*\*) Sarcófago, Museu Britânico (Coleman & Walker, 1979)

As vezes, há a possibilidade de que um mármore aparentemente homogêneo represente mais de uma formação. As evidências de uma discordância pré-tectônica podem ser destruídas por metamorfismo posterior. A história geológica do Mar Mediterrâneo oriental é muito complexa, incluindo rochas precambrianas a neogênicas e eventos tectônicos de idade Precambriana a Alpina (Bornovas *et al.*, 1983). É possível ter-se idades diferentes em camadas superpostas utilizando isótopos de estrôncio. Os valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  são controlados pela razão de Sr nas águas do mar à época de deposição. As variações são conhecidas para o Fanerozóico (Burke *et al.*, 1982). As razões de Sr mostram que os mármore de Naxos, e também os de Doliana, correspondem a duas épocas distintas de formação; as camadas sedimentares devem ocorrer no contato da falha de empurrão (Tabela 3).

Também a composição isotópica do oxigênio sofreu mudanças nos oceanos durante o tempo geológico. Isto poderia explicar os dois agrupamentos de dados para Doliana (Fig. 2). Fracionamento entre  $\text{CaCO}_3$  e as águas do mar determinaram os dois valores originais de  $\delta^{18}\text{O}$  nos calcários originais, modificados posteriormente por metamorfismo.

Tabela 3 — Análises isotópicas de amostras de Naxos e Doliana. Análise de Sr por Douglas Mose (Dept. Terrestrial Magnetism, Washington, DC., USA).

Localidade	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	n
Naxos				
Apollonas	0,70832	-8,75	+1,93	3
Melanes	0,70792	-3,54	+1,90	3
Doliana				
Grupo I	0,70783	-1,50	+2,51	3
Grupo II	0,70810	-7,51	+2,57	2

Estudos especiais foram feitos no distrito de Carrara, Itália, onde as pedreiras vêm operando continuamente por mais de 2000 anos (Herz & Dean, 1986). Os dados foram acumulados objetivando-se ver se: 1. as pedreiras eram isotopicamente homogêneas, 2. cada uma pedreira poderia ser distinguida das demais recorrendo-se apenas a dados isotópicos e 3. a possibilidade de distinção das pedreiras de Renascença, Seravezza, das de Romano de Commune, Carrara. Análises isotópicas das pedreiras Romanas e Renascença ofereceram os seguintes resultados:  $\delta^{13}\text{C}$  + 1,82 até + 3,06‰ para Carrara e + 1,65 até + 1,90‰ para Seravezza. Os valores isotópicos também separam a pedreira de Mandria, que faz parte da Commune, das outras de Carrara (Tabela 4). Ficou patente que as pedreiras da Renascença podem ser distinguidas e, dentro do distrito de Carrara, tão-só a de Mandria é passível de distinção.

Para verificar-se a uniformidade dentro de uma única pedreira, foram colhidas amostras de uma parede de Fossacava, em Carrara, com o bloco representando algumas camadas sedimentares. Dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  obtidos, cinco situam-se entre + 2,03 e 2,38‰, sendo o sexto de 2,60‰. Os dados mostram uma diferença máxima de 0,5‰ em  $\delta^{13}\text{C}$  dentro do mesmo bloco.

Os valores de oxigênio têm uma distribuição bimodal: um grupo varia de -1,26 a -1,37‰ e o outro de -2,19 a -2,28‰. Todas as amostras são essencialmente de calcita pura, logo as diferenças não podem ser explicadas simplesmente

por razões mineralógicas, sendo mais provavelmente devidas a equilíbrio durante o metamorfismo.

### O BANCO DE DADOS PARA MÁRMORES CLÁSSICOS

Um grande banco de dados isotópicos existe agora para os mármore clássicos. Alguns diagramas mostrando a variação de  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^{13}\text{C}$  foram publicados com o propósito de ajudar na determinação da procedência do mármore (e.g., Germann *et al.*, 1980). Diagramas novos utilizando todos os dados publicados, bem como os inéditos de nosso laboratório, já se encontram disponíveis (Herz, 1987). O novo banco de dados reúne 528 análises de 39 pedreiras, estas incluindo todas as da Grécia e de Roma Clássica, e descritas arqueologicamente, além de algumas outras recentemente descobertas (Cooper, 1981).

Num estudo efetuado em estátuas de mármore do Santuário de Demeter, em Cyrene, não foi possível precisar-se a proveniência desse material em apenas 6 das 61 peças examinadas (Herz *et al.*, 1986). Onde os dados demonstram superposição, há a necessidade de executar-se outros tipos de análise. Nesse sentido, as razões de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  parecem de grande utilidade (Herz *et al.*, 1982). Amostras da pedreira de Alikí, na Ilha de Thasos, forneceram razões isotópicas de 0,70769 a 0,70792, Paros de 0,70757, e Pentelikon de 0,70830 (Tabela 3). Para estas pedreiras, os dados isotópicos de Sr, em adição aos de O e C, melhoraram a discriminação.

Tabela 4 — Média (M), mediana (Md) e desvio padrão (DP) para análises isotópicas das Pedreiras de Carrara (Herz & Dean, 1986).

	M	$\delta^{13}\text{C}$ Md	DP	M	$\delta^{18}\text{O}$ Md	DP
Colonnata	2,297	2,200	0,226	-1,842	-2,060	0,452
Miseglia	2,130	2,020	0,288	-2,224	-2,200	0,591
Torana*	2,108	2,110	0,225	-2,066	-1,950	0,398
Mandria	2,698	2,620	0,249	-0,573	-0,590	0,223
Seravezza	1,769	1,780	0,070	-2,856	-2,750	0,324

\* Excluída a pedreira de Mandria

## CONCLUSÕES

Análises isotópicas de oxigênio e carbono em mármore produzem assinaturas que parecem distintas para a maioria das pedreiras clássicas da Grécia e de Roma. Existe também um grande banco de dados que pode ser utilizado para os testes de proveniência dos artefatos de mármore, de associação dos fragmentos quebrados de estátuas ou de inscrições, e da verificação do estado de intemperismo.

## AGRADECIMENTOS

Estes são devidos ao "National Geographic Society", ao "National Endowment for the Humanities" e à "Kress Foundation" dos Estados Unidos pelo apoio dado a este projeto, bem como ao Dr. Franco Levi pela revisão do manuscrito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFORDAKOS, G.; ALEXOPOULOS, K.; MILIOTIS, D. (1974) Using artificial thermoluminescence to re-assemble statues from fragments. *Nature*, **250**:47-48.
- BORNOVAS, J. & TSIAMBAOU, T.R. (1983) Geological map of Greece, 1:500,000. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.
- BURKE, W.H.; DENISON, R.E.; HETHERINGTON, E.A.; KOEPNICK, R.B.; NELSON, H.F.; OTTO, J.B. (1982) Variation of seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  throughout Phanerozoic time. *Geology*, **10**:516-519.
- COLEMAN, N. & WALKER, S. (1979) Stable isotope identification of Greek and Turkish marbles. *Archaeometry*, **21**:107-112.
- CONFORTO, L.; FELICI, M.; MONNA, D.; SERVA, L.; TADDEUCCI, A. (1975) A preliminary evaluation of chemical data (trace element) from classical marble quarries in the Mediterranean. *Archaeometry*, **17**:201-213.
- COOPER, F.A. (1981) A source of marble in the southern Peloponnesos. *Amer. Jour. Archaeology*, **85**:190-191.
- CRAIG, H. & CRAIG, V. (1972) Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis. *Science*, **176**:401-403.
- FAURE, G. (1986) Principles of isotope geology. John Wiley, New York.
- GERMANN, K.; HOLZMANN, G.; WINKLER, F.J. (1980) Determination of marble provenance: limits of isotopic analysis. *Archaeometry*, **22**:99-106.
- HERZ, N. (1985) Isotopic analysis of marble. In: G. Rapp, Jr. & J.A. Gifford (eds.) *Archaeological geology*, p. 331-351, Yale University Press.
- HERZ, N. (1987) Carbon and oxygen isotopic ratios: a data base for classical Greek and Roman marble. *Archaeometry*, **29**.
- HERZ, N. & DEAN, N.E. (1986) Stable isotopes and archaeological geology: the Carrara marble, northern Italy. *Applied Geochem.*, **1**:139-151.
- HERZ, N.; KANE, S.E.; HAYES, W.B. (1986) Isotopic analysis of sculpture from the Cyrene Demeter Sanctuary. In: P.A. England & L. Van Zelst (eds.) *Applications of science in examination of works of art*, p. 142-150, Boston Museum of Fine Arts.
- HERZ, N.; MOSE, D.G.; WENNER, D.B. (1982)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios: a possible discriminant for classical marble provenance. *Geol. Soc. America, Abstracts with Programs* **14**, p. 514.
- HERZ, N. & PRITCHETT, W.K. (1953) Marble in Attic epigraphy. *Amer. Jour. Archaeology*, **57**:71-83.
- HERZ, N. & WENNER, D.B. (1978) Assembly of greek marble inscriptions by isotopic methods. *Science*, **199**:1070-1072.
- HERZ, N. & WENNER, D.B. (1981) Tracing the origins of marble. *Archaeology*, **34**(5):14-21.
- JANSEN, J.B.H. & SCHUILING, R.D. (1976) Metamorphism on Naxos: petrology and geothermal gradients. *Amer. Jour. Sci.*, **276**:1225-1253.
- LEPSIUS, G.R. (1890) *Griechische marmorstudien*. Berlin, Konigl. Akad. Wissen.
- LLOYD, R.V.; SMITH, P.W.; HASKELL, H.W. (1985) Evaluation of the manganese ESR method of marble characterization. *Archaeometry*, **27**:108-116.
- MANFRA, L.; MASI, U.; TURI, B. (1975) Carbon and oxygen isotope ratios of marbles from ancient quarries of western Anatolia and their archaeological significance. *Archaeometry*, **17**:215-221.
- RIEDERER, J. & HOEFS, J. (1980) Die bestimmung der herkunft der marmore von Büsten der Münchner residenz. *Naturwissenschaften*, **67**:446-451.
- RYBACH, L. & NISSEN, H.U. (1965) Neutron activation of Mn and Na traces in marbles worked by the ancient Greeks. In: *Radiochemical methods of analysis*, Vol. 1, p. 105-117. Int. Atomic Energy Comm., Vienna.
- RYE, R.O.; SCHUILING, R.D.; RYE, R.M.; JANSEN, J.B.H. (1976) Carbon, hydrogen, and oxygen isotope studies of the regional metamorphic complex at Naxos, Greece. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**:1031-1049.