

ESTUDOS ARQUEOMÉTRICOS APLICADOS À ANÁLISE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO¹

Maria Thaís Crepaldi Affonso*

L'homme ne copie jamais, il ne peut pas, ce serait contraire aux ordonnances naturelles. Le fruit d'une civilisation mûrit au terme d'aboutissement de tous les moyens techniques; les moyens techniques sont la lente addition d'un effort constructeur de la raison; de zéro on a monté jusqu'à X, en passant avec échec et succès par 1, 2, 3 et 4, etc.; c'est le capital même d'une société, accumulé et qui constitue dès lors la nourriture d'un esprit ainsi déterminé et qui prétend à rayonner, à se classer au palmarès des époques de la terre. C'est alors ce sentiment des choses raciné dans de profondes bases acquises et qu'on a désigné sous le nom de culture.
(Le Corbusier, *Urbanisme*, 1925.)

AFFONSO, M.T.C. Estudos arqueométricos aplicados à análise de materiais de construção. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 49-60, 1997.

RESUMO: O estudo arqueométrico de materiais de construção não visa somente a definição das argamassas mais adequadas à restauração de obras civis. A identificação da qualidade do material utilizado pode dar indicações sobre o grau de conhecimento tecnológico dominado pela comunidade em questão e, conseqüentemente, sobre o seu grau de organização social. Aqui serão descritos os principais métodos de análise aplicados ao estudo de ligantes carbonáticos e a abrangência de sua aplicação.

UNITERMOS: Arqueometria — Materiais de construção — Ligantes carbonáticos — Cal.

Introdução

A Arqueometria, ou seja, o estudo científico de materiais arqueológicos enfoca, em primeira instância, quatro fatores básicos, que afetam tanto o direcionamento e seleção das análises a serem aplicadas, quanto a interpretação dos resultados obtidos:

1. *fatores geológicos e geomorfológicos:* a situação geográfica do sítio arqueológico estudado condiciona os tipos de matéria-prima à disposição na região assim como a facilidade de acesso, transporte e exploração;

2. *fatores tecnológicos:* o grau de tecnologia dominado pela comunidade em questão, normalmente espelhado nos diversos artefatos arqueoló-

(1) Pelo fato desta publicação ser dirigida principalmente a um público dedicado à Arqueologia, os dados técnicos foram simplificados ao máximo, com o intuito de facilitar sua compreensão e realçar sua importância quando na interpretação de materiais arqueológicos. As temperaturas de queima citadas são propositalmente abrangentes e consideram condições normais de temperatura e pressão. No item *Tecnologia*, não foram considerados materiais dolomíticos como matéria-prima para os cimentos. No tópico *Definições*, as definições fornecidas são baseadas em normas alemãs vigentes (*Nota do autor*).

(*) Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Alemanha.

gicos associados, condiciona os tipos de materiais e objetos passíveis de produção na época histórica considerada;

3. *fatores funcionais*: a suposta finalidade do objeto ou material analisado traduz a extensão de seu uso e sua importância para a comunidade;

4. *fatores econômicos*: ditam sobre a quantidade de energia e trabalho a ser empregada para a produção do artefato analisado.

Este trabalho procura elucidar os métodos arqueométricos aplicados à análise de materiais de construção, baseando-se nos aspectos acima citados.

Tecnologia

Para uma melhor compreensão das dificuldades encontradas na análise mineralógica e química dos materiais de construção provenientes de contextos arqueológicos, serão descritos aqui alguns termos específicos, assim como as características mais importantes dos ligantes carbonáticos mais freqüentemente utilizados.

Definições

— *materiais ligantes*: são materiais sólidos, normalmente de granulização fina, que apresentam a propriedade de ligar grãos através da reação química ocasionada pela sua mistura em um meio líquido, normalmente a água.

— *hidraulicidade*: um material é dito hidráulico quando ele tem a propriedade de endurecer em meio aquoso e de ser estável à ação da água depois de endurecido.

— *cal*: é um ligante carbonático não hidráulico, fabricado pela calcinação de carbonato.

— *cimento*: é um ligante hidráulico de granulização fina, mais complexo que as cales.

— *argamassa*: composta pela mistura de agregados em granulometria de areia (na Alemanha até 4mm), ligante e água.

— *concreto*: composto pela mistura de agregado grosseiro, cimento e água.

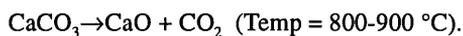
— *aditivo pozolânico*: é um material não hidráulico, mas que tem a propriedade de reagir hidráulicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) proveniente da hidratação da cal (CaO). Ou seja, a mistura de cal hidratada com um aditivo pozolânico resulta num material que é capaz de endurecer em meio aquoso e de resistir à ação da água depois de endurecido. O termo *pozolana* caracteriza original-

mente os tufos vulcânicos da região de Puzzuoli (lat. *Puteoli*) e da baía de Nápoles, Itália, que apresentam a propriedade de reagir hidráulicamente com a cal.

Cal (CaO)

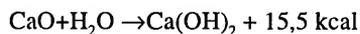
A cal é produzida quando rochas calcárias compostas predominantemente por calcita (CaCO_3) são aquecidas a temperaturas suficientemente altas (entre 800-900 °C), que causem a liberação das moléculas de dióxido de carbono sob a forma de gás.

Processo de queima:



Quando misturada com água, formam-se cristais hexagonais de hidróxido de cálcio, também chamado portlandita, sob a liberação de calor, ou seja através de uma reação exotérmica. A mistura formada é dita coesa.

Processo de hidratação (gera a coesão da mistura):



O endurecimento da mistura é gerado pelo processo de recarbonatação, também exotérmico, pelo qual o gás carbônico do ar e de soluções ácidas percolantes é reabsorvido e reage com a portlandita, que retorna à forma de carbonato de cálcio com liberação de água, normalmente sob a forma de vapor.

Processo de recarbonatação (gera o endurecimento da mistura):



A cal hidratada não endurece em meio subaquático e resiste parcialmente à ação da água, sendo portanto utilizada principalmente em construções cobertas, protegidas da ação de intempéries.

Rochas carbonáticas calcíticas e a cal hidratada recarbonatada apresentam globalmente a mesma composição mineralógica e química. Calcários finamente granulados, quando misturados com água e endurecidos pela ação prolongada do sol, por exemplo, são facilmente confundidos com cales recarbonatadas, principalmente se as amostras apresentarem alguns milênios de anos. Com o passar dos anos, há um crescimento dos cristais calcíticos provenientes da recarbonatação, ocasionando um



Fig. 2 — Micrografia de elétron retroespalhado, em microscópio eletrônico de varredura, mostrando fases calcossilicatadas hidratadas (CSH), encontradas em argamassa hidráulica romana. A amostra, proveniente das termas de Bárbara, Trier, Alemanha (séc. II d.C.), é composta por cal e por fragmentos e farinha de telha.

Cimento Portland

O cimento portland é um ligante hidráulico com normas fixas, composto predominantemente por clínquer finamente granulado e pequenas quantidades de gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e/ou anidrita (CaSO_4).

O clínquer é produzido quando uma mistura de material carbonático e material argiloso (aluminossilicatos), em uma razão aproximada de 2:1, é queimada a temperaturas entre 1200-1500 °C. Através da queima, são ocasionados rearranjos químicos, pelos quais são formados compostos artificiais, chamados *fases do clínquer*. Dentre estas, as mais importantes são a alita (C_3S) e a belita (C_2S)¹. Para que estas fases não voltem a se com-

binar quimicamente, é provocado um resfriamento rápido da mistura, fazendo com que elas incorporem um alto teor de energia e sejam, desta forma, muito reativas. Este estado metaestável das fases de clínquer é o responsável pelo caráter hidráulico do cimento portland ($\text{C}=\text{CaO}$; $\text{S}=\text{SiO}_2$; $\text{H}=\text{H}_2\text{O}$).

Processo de queima:

2/3 material carbonático

+

1/3 material argiloso

↓

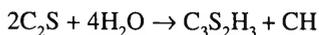
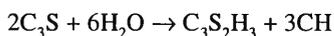
C_3S + C_2S

21% 49%

Assim como para a cal, o processo de hidratação do cimento portland é exotérmico, ou seja, libera energia na forma de calor.

Processo de hidratação (considerando somente as fases calcossilicatadas):

(1) No tópico *Cimento Portland*, as fases calcoaluminatadas foram desprezadas. A fórmula apresentada pretende ser ilustrativa e não representa a estequiometria correta.



Através da adição de água, ocorrem recombinações químicas e duas fases principais são formadas:

— 70% da mistura é composta por fases calcosilicatadas hidratadas (CSH), caracterizadas por seu hábito cristalino em forma de agulhas microscópicas entremeadas e que conferem o caráter hidráulico e resistência mecânica à mistura (Fig. 2).

— 22-24% da mistura é composta por cristais hexagonais de hidróxido de cálcio.

— o restante é composto por fases secundárias não consideradas neste trabalho.

Objetivos

As metas do estudo de materiais de construção varia muito com a época estudada.

Grande parte dos estudos de argamassas tem como meta a definição dos materiais mais adequados à restauração de uma determinada obra civil. O cimento portland, apesar de ser muito resistente e hidráulico, não é, na maioria das vezes, o ligante mais adequado quando na restauração de obras antigas. A diferença de resistência entre o cimento e o material original pode ocasionar fraturas inesperadas, por vezes, mais indesejáveis que aquelas anteriormente existentes. A identificação da composição da argamassa original, permite uma reprodução da mesma, de forma que haja uma compatibilidade entre os materiais de restauração e a obra original.

Para as argamassas romanas, cujo processo de fabricação é descrito em detalhe por Vitruvius (Lamprecht, 1987), os objetivos mais importantes são a classificação do material de acordo com o tipo de obra. A análise mineralógica e petrográfica da argamassa ou concreto permite determinar, por vezes com grande certeza, se o material corresponde a um preenchimento de muro, a um material de revestimento externo (normalmente com características hidráulicas), a um pavimento ou a uma cobertura de parede. Em determinados contextos, é possível a avaliação da idade relativa das amostras, de acordo com a qualidade do ligante e/ou dos agregados presentes, assim como a presença ou não de impurezas. A comparação entre diferentes mate-

riais pode possibilitar a correlação entre obras de construção.

Para a época neolítica, por outro lado, a meta mais importante é a determinação do processo de fabricação empregado para a produção de argamassas, principalmente a identificação ou não do processo de queima para a produção do ligante. Visto a produção da cal requerer grande quantidade de energia calorífica e, subsequentemente, grande quantidade de material combustível, a identificação de que a argamassa é realmente composta por cal e não por um sedimento calcário natural, implica em afirmar que a população local, já no início da vida sedentária, não só dominava uma tecnologia avançada, como também apresentava uma estrutura social que permitia a divisão de trabalho especializado, paralelamente às atividades primordiais de subsistência.

Uma das metas mais importantes e relevantes para materiais presentes em todos os contextos arqueológicos é a identificação das fontes de matéria-prima, tanto para o ligante, como para os agregados.

Métodos de Análise

Microscopia Petrográfica

A microscopia petrográfica de lâminas delgadas polidas permite uma avaliação global da qualidade e das características da amostra, sendo o meio ideal para comparação entre diferentes tipos de materiais. Uma análise petrográfica bem desenvolvida pode trazer muitas respostas e evitar análises dispendiosas desnecessárias.

Os principais pontos a serem observados são:

1. qualidade da matriz ou ligante: diz se o ligante é predominantemente carbonático ou predominantemente argiloso, sem no entanto permitir a determinação mineralógica precisa das fases, devido a sua fina granulação.

2. caracterização dos agregados:

a) mineralógica: a microscopia óptica permite a identificação dos minerais presentes nos fragmentos e a subsequente identificação do tipo de rocha. Tendo definido os tipos de agregados presentes, eles são comparados entre si e com as rochas que ocorrem nos arredores do sítio arqueológico, de forma que as seguintes perguntas sejam respondidas:

— todos os fragmentos de rocha utilizados como agregados provêm dos arredores do sítio ou alguns deles foram importados?

— todos os agregados apresentam características e composições similares? Ou seja, todos os agregados provêm da mesma fonte ou foram adicionados diversos tipos de material?

— os agregados presentes são inertes em relação ao ligante ou têm a possibilidade de reagir com ele formando, por exemplo, fases hidráulicas? Se a resposta for positiva, há indícios de que esta reação tenha sido provocada arbitrariamente ou a adição deste tipo de agregado foi casual?

b) granulométrica: a definição do tamanho dos grãos de agregado e da homogeneidade de sua distribuição pode indicar se os agregados foram ou não classificados (por exemplo peneirados) antes de serem misturados ao ligante, assim como se a distribuição apresentada é típica dos sedimentos encontrados na região ou não.

c) forma dos grãos: a análise da forma dos grãos pode indicar se eles foram ou não trabalhados antes de serem adicionados à mistura. Grãos com cantos angulosos indicam normalmente que houve uma moagem intencional. Se os sedimentos naturais da região também apresentarem cantos angulosos, esta determinação torna-se mais difícil. Grãos arredondados, típicos de sedimentos aluvionares, indicam normalmente que os grãos foram adicionados sem prévio tratamento de moagem (Fig. 3).

Difratometria de Raios X

A difratometria de Raios X utilizando-se material pulverizado permite a identificação precisa da composição mineralógica da amostra. No caso de materiais de construção, esta técnica é principalmente utilizada para a análise de ligantes que, devido à sua fina granulometria, não podem ser identificados com precisão no microscópio petrográfico usual. Enquanto através da análise petrográfica usual é possível determinar se o ligante é carbonático ou argiloso, pela difratometria de Raios X é possível precisar se o ligante é calcítico ou dolomítico (dentre os carbonáticos) ou, sendo argiloso, qual é a fase mineralógica principal (por exemplo illita, montmorilonita ou caolinita).

Microscópio eletrônico de varredura

Através do microscópio eletrônico de varredura, que permite um aumento de até milhares de vezes, é possível a determinação de fases não passíveis

de identificação no aumento do microscópio petrográfico usual, assim como de sua estrutura cristalina. O acoplamento de uma aparelhagem de espectroscopia de energia dispersiva permite análises químicas semi-quantitativas pontuais.

Este método possibilita a comparação da estrutura microcristalina entre a cal e sedimentos naturais de calcita, assim como a determinação da composição de camadas de pigmento que frequentemente ocorrem associadas a revestimentos de paredes e pavimentos. O microscópio eletrônico de varredura permite também a determinação e identificação de fungos, tanto no ligante quanto nos blocos de rocha utilizados nas construções. Estes organismos são muitas vezes responsáveis pela deterioração destes materiais e, por isso, meta de combate dos restauradores (Fig. 4).

Análises Químicas

Diferentes métodos analíticos podem ser aplicados para a definição da composição química do artefato, dependendo da quantidade de amostra disponível, da urgência dos resultados e do tipo de material.

Para a determinação da composição básica (elementos maiores ou principais), o método de fluorescência de Raios X é o mais frequentemente utilizado na análise de argamassas. Para tanto, a amostra pulverizada é misturada com um fundente em proporções pré-fixadas e fundida em cadinhos de platina. O “tablete” resultante apresenta uma composição química homogênea e é de fácil manuseio. Métodos como Espectroscopia de Absorção Atômica (AAS) e ICP, para os quais é necessária uma abertura da amostra em meio ácido, exigem por vezes uma quantidade menor de amostra, sua preparação, no entanto, é mais trabalhosa.

Para a determinação de elementos-traço, ou seja, de elementos que ocorrem em quantidades muito pequenas dentro da amostra, o método de Ativação por Neutrons é muito utilizado na Arqueometria. Ele permite trabalhar com quantidades muito pequenas, da ordem de 50-100 mg, e não destrói a amostra que, após ter perdido sua radioatividade, pode ser reutilizada. Através deste método, a amostra pulverizada é armazenada em pequenos recipientes de poliestireno e bombardeada por um fluxo constante de neutrons durante algumas horas. A emissão de raios gama resultante do decaimento radioativo dos núcleos for-

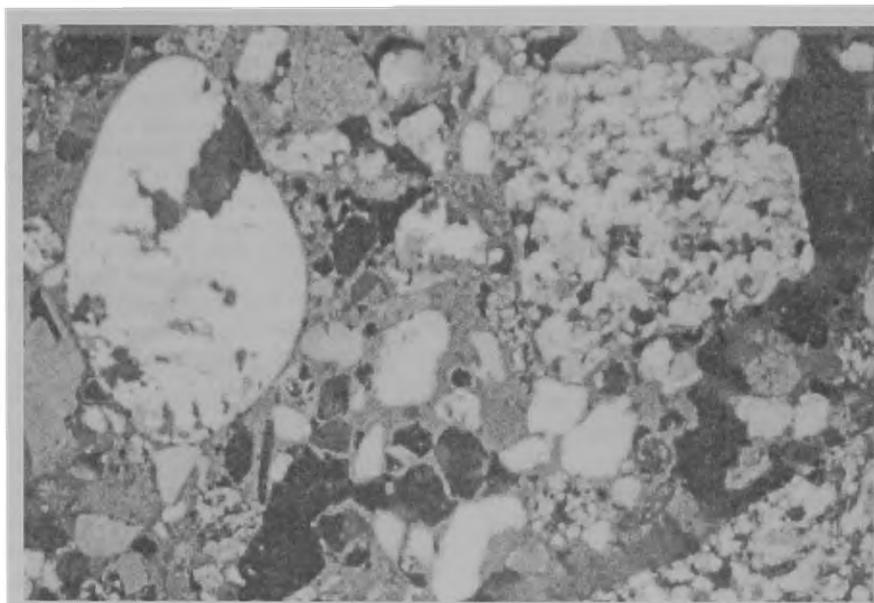


Fig. 3 — Micrografia de lâmina delgada, obtida por microscopia de luz transmitida polarizada, mostrando os seixos típicos dos sedimentos aluvionares do rio Reno, que foram utilizados como agregado em argamassa gótica (ca. 1250 d.C.) proveniente da Catedral de Colônia, Alemanha. O campo horizontal corresponde a aproximadamente 6,0 mm.



Fig. 4 — Micrografia de elétron retroespalhado, em microscópio eletrônico de varredura, mostrando diversas colônias de fungos, encontradas em argamassa neolítica acerâmica proveniente do sítio Fenan, Jordânia.

mados é medida em intervalos pré-determinados e sua intensidade é comparada com padrões. O inconveniente deste método é o fato de requerer um laboratório especial para tratamento de amostras radioativas, assim como da necessidade de um reator onde as amostras possam ser bombardeadas. Além disso, o método requer um tempo relativamente longo até que toda a série de contagens necessárias tenha sido realizada e que todos os dados provenientes tenham sido corrigidos e interpretados. A Espectroscopia de Absorção Atômica (AAS) e ICP também são largamente utilizadas para a determinação de elementos-traço, com o inconveniente de requererem uma preparação mais elaborada e de serem métodos destrutivos.

Normalmente, diversos métodos são aplicados paralelamente para uma mesma amostra, dependendo do objetivo almejado. Determinados métodos são mais apropriados à determinação de um grupo de elementos do que outros e a escolha da rota de análise depende muito do tipo de amostra, assim como das perguntas a serem respondidas.

A distribuição relativa de elementos-traço numa argamassa ou cerâmica permanece constante mesmo após a queima (Cogswell et al., 1996) e é freqüentemente típica da ocorrência mineral da qual provém. Esta característica é normalmente considerada como sendo “impressão digital” da fonte de matéria-prima e, por esta razão, largamente utilizada para sua determinação. A distribuição dos elementos-traço na amostra é comparada com aquela de diferentes ocorrências associadas ao sítio arqueológico, sendo que os seguintes pontos devem que ser levados em conta:

— todas as ocorrências minerais na região do sítio arqueológico foram amostradas? Se estas ocorrências foram amostradas somente de maneira parcial, pode ocorrer de não ser possível associar o artefato a nenhuma delas e considerá-lo erroneamente como um produto “importado”

— há grande variação composicional dentro da ocorrência mineral considerada? Muitas vezes, variações observadas dentro de um grupo único de artefatos são interpretadas como decorrentes de uma variação na composição da matéria-prima original; na verdade, a variabilidade observada pode ser muito menor que aquela observada numa ocorrência mineral única, principalmente se a matéria-prima provém de um depósito sedimentar, como argilas por exemplo.

Arqueologia Experimental

L'homme régit son sentiment par la raison; il réfrène ses sentiments et ses instincts en faveur du but qu'il a. Il commande à sa bête par son intelligence. Son intelligence bâtit des règles qui sont l'effet de l'expérience. L'expérience naît du labeur; l'homme travaille pour ne pas périr. Pour produire, il faut une ligne de conduite; il faut obéir aux règles de l'expérience. Il faut penser en avant, au résultat.
(Le Corbusier, *Urbanisme*, 1925.)

A Arqueologia Experimental consiste em retomar as técnicas remotas de fabricação para a avaliação das dificuldades encontradas durante o processo, do tempo de duração, da avaliação de combustível e matéria-prima necessários. Pela Arqueologia Experimental também são verificadas suposições de técnicas, para as quais existem somente indicações indiretas e nenhuma descrição escrita.

Como exemplo será descrito um experimento feito com o intuito de avaliar a possibilidade de produção de cal sem a utilização de fornos especiais, ou seja, queimando-se o calcário em uma fogueira. Esta questão tornou-se importante a partir do momento em que vários autores passaram a identificar cal em materiais neolíticos acerâmicos do Oriente Médio (Kingery et al., 1988), sendo que em nenhum dos sítios correspondentes foram encontrados fornos nos quais esta cal pudesse ter sido produzida.

No experimento, foi montada uma fogueira de cerca 1,2 m de altura, intercalando-se camadas de madeira e de fragmentos de rocha calcária de até 10 cm de diâmetro numa proporção de 2 para 1 (foram utilizados aproximadamente 200 kg de madeira de diversas qualidades e 90 kg de rocha). A fogueira foi queimada durante aproximadamente 6 horas, sem terem sido utilizados foles para manutenção do fogo ou elevação artificial da temperatura. Por um curto período de tempo, foram atingidas temperaturas máximas entre 1100 e 1200 °C. Durante mais de duas horas subsequentes foram alcançadas temperaturas acima de 700 °C. Praticamente todos os fragmentos menores que 6 cm foram completamente queimados, fragmentos maiores mostraram queima parcial, retendo ainda um núcleo inalterado. A cal produzida no experimento foi misturada com água sem prévia moagem dos fragmentos, resultando numa massa de cal hidratada com boa trabalhabilidade.

Demonstrou-se, desta forma, que é possível e relativamente simples produzir cal em fogo aberto

e que o material produzido pela queima é adequado à produção de argamassa.

Os materiais de construção através dos tempos

Le facteur déterminant dans les premières expériences agricoles nous est apparu comme une initiative humaine, non le fruit d'une pression du milieu. C'est à elle-même, à ses problèmes internes, que la société devrait s'adapter en changeant ses stratégies, non à la caducité, forcée des précédentes en regard de ses besoins alimentaires. Les concentrations artificielles de céréales, comme peut-être la chasse spécialisée des grands herbivores, exprimeraient un progrès du travail organisé, perceptible aussi dans les architectures, au sein de sociétés accrues, où cette organisation même, était la condition d'un accroissement démographique générateur de tensions sociales. [...]
(J. Cauvin, *Les Premiers Villages de Syrie-Palestine*, 1978.)

A determinação da primeira ocorrência do uso arbitrário da cal na história humana é motivo de muitas discussões. Desde tempos muito remotos, é verificado o uso de argamassas em construções. Construções de pedras retangulares, típicas da fase acerâmica neolítica B (PPNB) do Oriente Médio, e associadas às primeiras ocorrências de sedentarismo humano, apresentam pisos e paredes recobertas, em sua maioria, por uma argamassa predominantemente carbonática e de textura muito fina. Frequentemente, estas argamassas apresentam uma camada de pigmento vermelho, comum, por exemplo, no sítio Ain Ghazal, Jordânia (Rollefson, 1990).

Nos sítios Cayönü (Özdögan & Özdögan, 1989) e Nevalı Çori (Hauptmann, 1993), Anatólia, Turquia, datados do início do IX milênio a.C. e igualmente correspondentes ao PPNB, foram encontrados pavimentos fabricados artificialmente, que se assemelham muito, em sua textura, aos concretos atuais. Estes são compostos por fragmentos de rocha calcária centimétricos, embebidos em uma matriz carbonática muito fina.

Muitos autores acreditam que estas argamassas e pavimentos tenham sido fabricados utilizando-se a cal (Kingery et al., 1988). Devido ao processo de recarbonatação (vide item *Cal*), a identificação da cal hidratada em materiais de idade avançada e que sofreram milênios de intemperismo é muito difícil e a comprovação desta afirmação é, portanto, con-

testável em muitos dos casos. O fato das argamassas neolíticas serem constituídas de material carbonático não reflete, necessariamente, uma escolha arbitrária deste tipo de material, mas, muito mais provavelmente, o uso de um material de ocorrência local abundante e de fácil exploração e transporte: em toda a Anatólia e a região do Levante, sedimentos carbonáticos representam a grande parte das rochas locais.

A notificação mais antiga do uso da cal na Europa é descrita no sítio Lepenski Vir, Sérvia, datado do VI Milênio. Srejovic (1973) cita a ocorrência de um pavimento composto por fragmentos de rocha calcária queimada, areia e lama.

No Egito antigo, a maioria das argamassas encontradas foram fabricadas utilizando-se gesso (sulfato de cálcio) como ligante. Na pirâmide de Queops (IV^a Dinastia), construída por volta de 2700 a.C., assim como no templo da Esfinge, em Gizé, as argamassas são compostas predominantemente por gipso, apresentando quantidades menores de calcita e quartzo (Ragai, 1989). Noll (1981), no entanto, identificou a cal como sendo o principal componente de argamassas encontradas em uma aldeia escavada nas vizinhanças do complexo das pirâmides e parcialmente contemporânea às mesmas.

A cal como ligante entre blocos de pedra e recobrimento de paredes foi largamente utilizada pelos fenícios. Os gregos, que utilizavam a cal quase que exclusivamente como material de recobrimento, frequentemente adicionavam pigmentos à mesma e a trabalhavam sob a forma de afrescos. Apesar dos gregos dominarem a tecnologia da queima de carbonatos, supostamente herdada dos fenícios, a técnica de construção de muros constituía-se em emaranhar cuidadosamente blocos de pedra de diferentes tamanhos, *sem* a utilização de ligantes entre os mesmos (Haegermann, 1964).

Uma das grandes “descobertas” na história da construção civil, citada por alguns autores como responsável por uma “revolução na técnica de construção” (Deichmann, 1979), é o *opus caementitium* (*opus* = trabalho, construção; *caementitium*, de *caementum* = fragmento de rocha, agregado), também chamado de “concreto romano”. *Opus caementitium* é uma técnica de construção, onde fragmentos de rocha são misturados com um ligante (*materia*), normalmente a cal, e água, similarmente ao concreto atual. Após o endurecimento do ligante, a massa apresenta uma grande resistência mecânica. Normalmente, este “concreto” era recoberto por blocos de rocha trabalhada, perma-

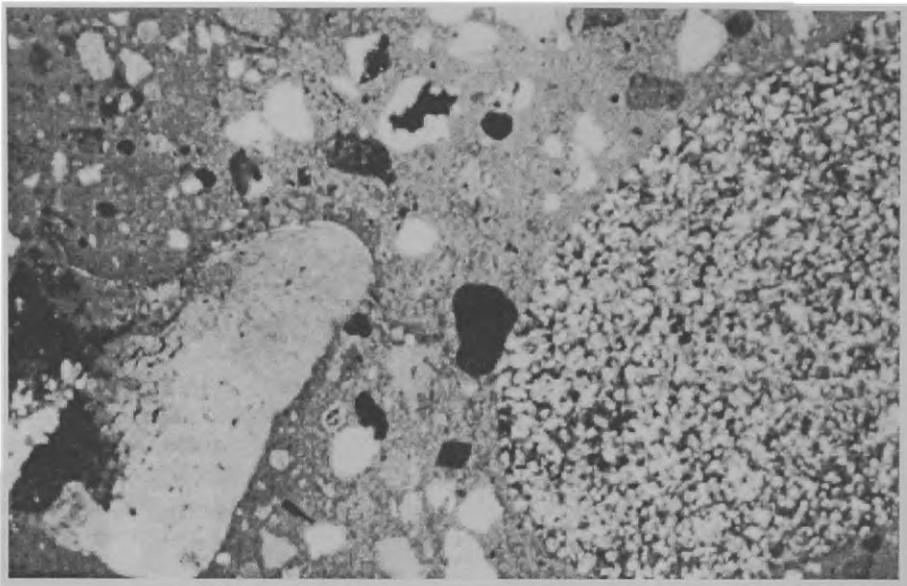


Fig. 5 — Micrografia de lâmina delgada, obtida por microscopia de luz transmitida polarizada, mostrando argamassa romana utilizada como ligante entre blocos de pedra, proveniente das escavações subterrâneas da Catedral de Colônia, Alemanha. A grande variabilidade na granulometria dos agregados é típica de materiais romanos de preenchimento encontrados nesta região. O campo horizontal corresponde aproximadamente 6,0 mm.

necendo invisível, e compo o núcleo de muros e fundações. Os romanos aprimoraram as técnicas de queima da cal, desenvolvendo fornos de escala industrial, que permitiam a produção de grandes quantidades de material de boa qualidade. Estes fornos, no entanto, não chegavam a atingir os 1000°C, impossibilitando que fossem produzidas fases de clínquer (vide item *Cimento Portland*), ou seja, impossibilitando a fabricação de cimento, mesmo que a matéria prima apresentasse uma mistura adequada de carbonato e argila. Os romanos não só desenvolveram fornos eficazes, mas também tinham conhecimento das propriedades hidráulicas das cinzas vulcânicas e dos fragmentos de telha quando misturados à cal. Desta forma, era possível produzir cimentos, ou seja, ligantes hidráulicos. Conseqüentemente, era possível realizar obras arquitetônicas que exigissem ligantes que endurecessem embaixo d'água e que fossem resistentes ao meio aquoso, como por exemplo pilares para pontes ou piers em portos, que ainda podem ser vistos nas cidades de Ansedônia e Ânizio, na Itália. Supõe-se, no entanto, que tenham

sido os fenícios os “inventores” da argamassa hidráulica feita de cal e farinha de telha: as construções mais antigas, nas quais é observada a utilização deste tipo de material, são as termas do rei Davi, em Jerusalém, datadas de aproximadamente 1000 a.C. (Haegermann, 1964).

Nas amostras germano-romanas, as argamassas utilizadas como ligante de blocos de rocha na construção de muros ou fundações caracterizam-se por utilizar, predominantemente, fragmentos de rocha cristalina e/ou sedimentos aluvionares como agregados. O ligante carbonático era constituído predominantemente por cal, em sua maioria de composição calcítica (Fig. 5). Em regiões onde há abundância em rochas dolomíticas (calcários magnesianos), a cal utilizada apresenta, conseqüentemente, altos teores em magnésio.

Em argamassas utilizadas como materiais de revestimento de muros, canais e aquedutos, ou construções constantemente expostas à ação da água, como por exemplo termas, os romanos substituíam os agregados de rocha por grandes quantidades de fragmentos de telha e/ou rochas vulcânicas espe-

cialmente selecionadas. Ao ligante carbonático era adicionada freqüentemente “farinha de telha”, que corresponde a restos de telha finamente moídos. Desta forma, as argamassas hidráulicas de revestimento apresentam freqüentemente uma coloração rosada e são facilmente distinguíveis dos materiais de preenchimento.

As técnicas de produção da cal e cimento, assim como o uso de telhas e farinha de telha como aditivos pozolânicos, foram transmitidas através da Idade Média. Freqüentemente é muito difícil, senão impossível, a distinção entre argamassas romanas tardias e medievais precoces. No geral, percebe-se, ao menos nas amostras de origem alemã, um decaimento na qualidade da cal produzida na Idade Média: muitas vezes, eram adicionadas impurezas ao ligante carbonático, com o intuito de aumentar a quantidade da massa, economizando-se, desta forma, a cal.

Conclusões

O fato da cal se transformar novamente em calcita após sua hidratação e conseqüente recarbonatação, faz com que seja muito difícil reconhecê-la em materiais de idade avançada, que sofreram longa ação de intempéries.

O método mais eficaz para a comparação e a identificação das características gerais de materiais de construção é a análise de lâminas delgadas polidas em microscópio petrográfico normal, utilizando-se tanto luz transmitida como refleti-

da. O microscópio eletrônico de varredura é aplicado em casos específicos, quando a definição e comparação da estrutura cristalina é decisiva, ou quando aditivos ou camadas pigmentárias não podem ser identificadas dentro do aumento normal do microscópio petrográfico. O microscópio eletrônico também é indispensável no reconhecimento de materiais orgânicos, como fungos, responsáveis pela deterioração das rochas e ligantes. A difratometria de Raios X se torna importante na identificação da qualidade do ligante como sendo predominantemente calcítico ou dolomítico. Uma análise química global, no entanto, pode tornar a difratometria desnecessária. A determinação da distribuição dos elementos-traço no material permite a classificação da matéria prima original, muitas vezes possibilitando a identificação precisa da ocorrência mineral correspondente.

O estudo de materiais de construção não se destina somente à definição de materiais ideais para uso na restauração, mas ocupa um papel importante na definição do desenvolvimento tecnológico do homem no início de sua sedentarização. A queima da cal em fogo aberto representaria o início da pirotecnologia, ou seja, o domínio e o controle arbitrário do fogo para fins outros que o de cozinha. Este controle arbitrário seria o primeiro passo necessário à produção de metais.

E não é por acaso, que os primeiros testemunhos de escória de produção de cobre datam da metade do VI milênio a.C. e foram encontrados em Çatal Hüyük, na Turquia (Pernicka, 1990).

AFFONSO, M.T.C. Archaeometrical methods applied to building materials. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 49-60, 1997.

ABSTRACT: The analysis of building materials aims not only the definition of the plasters to be used in restauration works. The identification of the nature and quality of the building material can provide many informations about the technology dominated by the community, and consequently about its social organization. In this paper, the most important methods for the analysis of carbonatic plasters will be described, as well as their application field.

UNITERMS: Archaeometry — Archaeomaterials — Building materials — Carbonatic binders — Lime plaster.

Referências bibliográficas

- CAUVIN, J.
1978 *Les Premiers Villages de Syrie-Palestine du IX^{ème} au VII^{ème} millenaire avant J.C.*. Maison de l'Orient Méditerranéen Ancien, 4: Série Archéologique 3. Lyon, 160 pp.
- COGSWELL, J.W.; NEFF, H.; GLASCOCK, M.D.
1996 The effect of firing temperature on the elemental characterization of pottery. *Journal of Archaeological Science*, 23(2): 283-287.
- DEICHMANN, F.W.
1979 Westliche Bautechnik im römischen Osten. *Mitteilung des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung*, 86: 473.
- HAEGERMANN,
1964 Vom Caementum zum Zement, Teil A Vom Caementum zum Spannbeton. *Beiträge zur Geschichte des Betons* 1: 3-72.
- HAUPTMANN, H.
1993 Ein Kultgebäude in Nevalı Çori. M. Frangipani, H. Hauptmann, M. Liverani, P. Matthiae, M. Mellink (eds.) *Between the rivers and over the mountains. Archaeologica Anatolica et Mesopotamica, Alba Palmieri Dedicata*. Dipartimento di Scienze Storiche Archeologiche e Antropologiche dell' Antichità, Università de Roma "La Sapienza": 37-69.
- KINGERY, W.D.; VANDIVER, P.B.; PRICKETT, M.
1988 The Beginnings of Pyrotechnology, Part II. *Journal of Field Archaeology* 15(1): 219-244.
- LAMPRECHT, H.-O.
1987 *Opus Caementitium-Bautechnik der Römer*, Beton-Verlag Düsseldorf, 224 pp.
- LAMPRECHT, H.-O.; KIND-BARKAUSAS, F.; WOLF, H.[Org.]
1990 *Beton Lexikon*, Beton-Verlag Düsseldorf, 375 pp.
- LE CORBUSIER
1925 *Urbanisme*, Ed. Flammarion, Paris, (1994), 284 pp.
- NOL, W.
1981 Zur Kenntnis altägyptischer Pigmente und Bindemittel. *N.Jb.Mineral.Mh*, 9: 416-432.
- ÖZDÖGAN, M.; ÖZDÖGAN, A.
1989 Cayönü, a conspectus of recent work. *Paléorient* 15(1): 65-74.
- PERNICKA, E.
1990 Gewinnung und Verbreitung der Metalle in prähistorischer Zeit. *Jahrbuch des Römisch-germanischen Zentralmuseums Mainz*: 21-129.
- RAGAI, J.
1989 Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars, Part V: Thermal studies (b). *Cement and Concrete Research* 19: 42-46.
- ROLLEFSON, G.O.
1990 The uses of plaster at Neolithic 'Ain Ghazal, Jordan. *Archaeomaterials* 4(1): 33-54.
- SREJOVIC, D.
1973 *Lepenski Vir: Eine Vorgeschichtliche Geburtsstätte Europäischer Kultur*, Luebbe, Bergisch Gladbach, 294 pp.