



## Metodologie, strumenti e servizi innovativi per lo sviluppo del patrimonio culturale dei Geo-Archeo-Siti

OR1 - Analisi del contesto e fabbisogno tecnologico  
Attività 1.3 - Ricognizione geomaterialistica dell'ambiente costruito

**REPORT** - *Archeologia dei materiali da costruzione*

**TITOLO:** Archeologia dei materiali da costruzione

**OBIETTIVO REALIZZATIVO:** OR1 Analisi del contesto e fabbisogno tecnologico

**DATA DI SCADENZA:** 30/06/2022

**DATA DI PRESENTAZIONE:** 16/02/2022

**PARTNER RESPONSABILE:** Euphorbia Srl Società Benefit

**PARTNER CONTRIBUTORI:** DST – Università del Sannio

**STATO:** Finale

**AUTORI:** Vari

**REVISORI:** Maria Rosaria Senatore, Agostino Meo

**NATURA:** Report

**LIVELLO DI DIFFUSIONE:** Pubblico

#### **CRONOLOGIA DELLE VERSIONI**

<b>Versione</b>	<b>Data</b>	<b>Autore</b>	<b>Partner</b>	<b>Descrizione</b>
1.0	15/01/2022	Vari	Euphorbia	Prima stesura
1.1	31/01/2022	Vari	Euphorbia	Seconda stesura
2.0	16/02/2022	Vari	Euphorbia	Versione definitiva

## Archeologia dei materiali da costruzione

---

### INDICE

---

1. Genesi e classificazione delle rocce
2. Le pietre scelte per costruire: caratteri di lavorabilità e di resistenza meccanica
3. La coltivazione delle cave col sistema della 'tagliata a mano'
4. I trasporti via terra e via acqua
5. Le lavorazioni in cantiere: spaccatura, sbazzatura, riquadratura
6. Modanature e sculture
7. Principali cause di degrado
8. Nota bibliografica
9. Bibliografia

## 1. GENESI E CLASSIFICAZIONE DELLE ROCCE

---

Le rocce, componenti essenziali della litosfera, sono aggregati di minerali. Quelle costituite da una specie prevalente vengono definite mono-mineraliche; ne è un esempio il marmo, formato quasi interamente (98-99%) da cristalli di calcite ( $\text{CaCO}_3$ ); oppure la quarzite, costituita quasi unicamente da quarzo ( $\text{SiO}_2$ ). Più frequenti sono però le rocce poli-mineraliche, formate cioè da diverse specie di minerali.

Esistono vari criteri di classificazione, ma il più utile, al fine della conoscenza dei materiali da costruzione, è quello basato sull'origine, da cui dipendono molti caratteri di lavorabilità e di resistenza meccanica; non meno importante è inoltre la classificazione delle rocce in base alla composizione, ovvero alle specie minerali e alla struttura aggregativa, dalla quale dipendono molte caratteristiche chimiche e fisiche.

A seconda della loro formazione nella dinamica della crosta terrestre, le rocce si suddividono in tre grandi categorie: magmatiche, sedimentarie, metamorfiche.

Le rocce magmatiche, dette anche 'igneie', derivano dal consolidamento, in seguito al raffreddamento, di masse rocciose allo stato fuso, o liquido, provenienti da regioni profonde della crosta terrestre, o del mantello sottostante, dove regnano forti pressioni e alte temperature.

Tale massa fluida, composta prevalentemente da silicio, ossigeno, alluminio, calcio, magnesio, sodio, potassio e ferro, prende il nome di magma, finché contiene anche gas disciolti; se invece raggiunge la superficie terrestre liberando i gas viene detta lava.

A seconda delle condizioni di raffreddamento si distinguono tre gruppi di rocce magmatiche:

1. intrusive o plutoniche, cioè formate in seguito al consolidamento lento del magma, risalito dalle zone più profonde della terra verso quelle meno calde, ma poste sempre a una certa profondità;
2. effusive o vulcaniche, che hanno origine per il raffreddamento veloce di magmi o lave, saliti in superficie allo stato pastoso o liquido attraverso i condotti vulcanici;
3. filoniane, formate dal consolidamento di piccole intrusioni di magma, senza fuoriuscita dalla crosta terrestre e a non grande profondità, in condizioni di raffreddamento intermedie fra le prime due descritte.

A seconda del tipo di consolidamento, uno stesso magma può dare origine a rocce appartenenti a questi tre gruppi, distinguibili fra loro dalla struttura e tessitura, vale a dire dal genere, forma, dimensioni e tipo di aggregazione dei componenti minerali.

La struttura è visibile a occhio nudo solo nelle rocce costituite da elementi grandi, altrimenti è osservabile al microscopio polarizzatore, oppure al microscopio elettronico. Una prima distinzione della struttura rocciosa dipende dalle dimensioni dei granuli dei minerali. Le rocce originate per lento raffreddamento hanno generalmente una struttura macrocristallina, sono cioè formate interamente da cristalli grandi, visibili a occhio nudo. Se i minerali hanno dimensioni pressoché uguali la struttura si dice anche granulare o pavimentosa. Questo tipo di struttura si trova nelle rocce magmatiche intrusive, come i graniti; il lento raffreddamento del magma permette infatti una crescita ordinata dei cristalli di ogni minerale, che possono raggiungere anche dimensioni considerevoli.

Le rocce effusive, poiché si sono raffreddate rapidamente, sono invece formate da minerali più piccoli; la loro struttura si dice perciò microcristallina se i cristalli sono visibili con una lente e criptocristallina se essi sono visibili solo al microscopio, come in molti basalti. Un altro tipo di struttura è caratterizzata dalla presenza di pochi cristalli grandi (detti fenocristalli) immersi in una pasta di fondo criptocristallina o vetrosa, cioè amorfa. Questa struttura si dice porfirica ed è tipica dei porfidi, (i quali possono essere sia di origine effusiva, sia filoniana).

Alcune rocce effusive (spesso appartenenti al gruppo dei basalti) hanno una particolare struttura detta intersertale (o 'a feltro'), nella quale piccoli cristalli allungati formano un fitto intreccio i cui vuoti sono occupati da pasta criptocristallina o vetrosa.

Vi sono infine rocce effusive formate completamente da una massa vetrosa, come le ossidiane, la cui struttura si dice anche ialina, oppure come le pomice, che presentano una particolare struttura detta pomicea, caratterizzata da un aspetto spugnoso, ricco di bolle; esse derivano infatti dal raffreddamento veloce di magma, cioè di materiale contenente anche sostanze gassose.

Le rocce magmatiche, qualunque sia la loro struttura, non presentano direzioni di isorientamento dei minerali, o piani di prevalente sfaldabilità, ma soltanto fratture sferico-concentriche, o radiali, dovute a ritiri differenziati della massa rocciosa durante il raffreddamento.

Le rocce sedimentarie sono chiamate anche 'esogene' o 'secondarie', in quanto derivano dalle formazioni rocciose primarie, ovvero generate dall'attività magmatica della terra. Le sedimentarie clastiche (o 'detritiche') hanno origine dall'accumulo di frammenti provenienti dalla disgregazione di altre rocce più antiche, oppure di resti di esseri viventi.

I fenomeni di erosione dipendono dall'atmosfera, e possono essere dovuti a molte cause; quella di tipo meccanico è legata agli sbalzi termici o all'azione dell'acqua, che penetrando nelle spaccature delle rocce ne provoca la frammentazione tramite fenomeni di gelo e disgelo. L'erosione di tipo chimico agisce invece sulle rocce alterando determinati minerali o separandone le componenti solubili in acqua. Dopo il trasporto, che avviene in soluzione chimica o in sospensione nel ruscellamento, il deposito può avere luogo per gravità degli elementi litici distaccati dalla roccia madre, oppure per saturazione delle

soluzioni in bacini dove le acque rallentano il movimento (pianure alluvionali, laghi, coste marine).

Le rocce sedimentarie clastiche possono corrispondere a sedimenti sciolti, cioè non litificati, e in tal caso prendono il nome di rocce incoerenti; ne sono esempio un deposito morenico, una spiaggia marina, un banco di argilla. Se tali sedimenti vengono ricompattati (o litificati) si trasformano in formazioni rocciose coerenti. Tale processo, detto diagenesi, può avere luogo per costipamento, cioè in seguito alla compressione esercitata dal peso di altre rocce soprastanti, oppure per cementazione, vale a dire per il deposito di minerali (per lo più carbonati, ma talora anche silicati) trasportati in soluzione dall'acqua e ri-depositati negli spazi fra i granuli sciolti. Sia i sedimenti incoerenti, sia le corrispettive rocce litificate vengono classificati in base alle dimensioni dei clasti che le compongono.

Prendono così il nome di ruditi le rocce costituite da elementi di dimensioni superiori ai 2 millimetri; esse si suddividono in breccie, derivate dalla litificazione di clasti angolosi e in conglomerati, formati invece da ciottoli arrotondati. Le areniti (o arenarie) sono invece costituite da clasti di dimensioni comprese fra i 2 millimetri e i 63 micron, e derivano dalla litificazione di sabbie. Le siltiti, originate per diagenesi dei silts, o limi, sono costituite da clasti con dimensioni comprese fra i 63 e i 4 micron; mentre le argilliti, con clasti di dimensioni inferiori ai 4 micron, sono prevalentemente costituite da minerali argillosi. Le rocce sedimentarie piroclastiche, sono un particolare tipo di rocce clastiche formatesi in seguito alla cementazione, dopo il deposito, di detriti rocciosi prodotti da attività vulcaniche di tipo esplosivo. A questo gruppo appartengono i tufi e le breccie vulcaniche.

Tutte queste rocce coerenti hanno una struttura clastica, caratterizzata cioè dalla presenza di minerali e/o frammenti di rocce più antiche, più o meno selezionati per dimensioni (cioè "classati") e da un cemento che le unisce.

Le rocce sedimentarie di origine chimica si formano invece per precipitazione diretta da soluzioni sature derivate dall'alterazione di rocce più antiche. Fra queste si distinguono quelle carbonatiche, formate da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), che è puro nei calcari, nei travertini, nell'alabastro calcareo, oppure combinato con magnesio nelle dolomie e nei calcari dolomitici. Un altro tipo di rocce sedimentarie di origine chimica sono le evaporiti, formate in seguito a precipitazione di sali per evaporazione del solvente; oltre al salgemma, vanno ricordate anche l'anidrite e il gesso, di notevole importanza fra i materiali da costruzione.

Le rocce sedimentarie organogene derivano invece dall'accumulo di resti animali, quali gusci o scheletri, costituiti da carbonato di calcio oppure da silice. Spesso è difficile distinguere, fra le rocce sedimentarie, quelle di origine chimica da quelle organogene, perché talora le due componenti si alternano, come nel caso assai noto delle dolomie.

In base alla composizione le rocce organogene si suddividono a loro volta in carbonatiche (o calcaree), come i calcari conchiliferi, le madrepora, i coralli e in silicee, fra le quali vanno annoverate le radiolariti, le diatomiti e i diaspri.

Le rocce sedimentarie presentano sempre, in conseguenza della loro genesi, formazioni stratificate: ogni strato corrisponde infatti a un deposito del ciclo sedimentario; molto spesso i granuli di forma appiattita si presentano isorientati.

Le rocce metamorfiche derivano anch'esse da rocce preesistenti -di tipo magmatico o sedimentario- che, in seguito a mutate condizioni di temperatura e pressione, all'interno della crosta terrestre, hanno subito trasformazioni tali da raggiungere una ricristallizzazione dei minerali che le costituiscono. Tale processo può dare origine a minerali nuovi, oppure a diverse forme e dimensioni di quelli già esistenti.

Il grado di metamorfismo può essere più o meno elevato, a seconda delle condizioni di pressione e temperatura alle quali è avvenuto. Le rocce metamorfiche sono molto diffuse negli zoccoli continentali e nelle catene montuose, dove si sono verificate tali condizioni.

Il metamorfismo provoca anche una variazione nella struttura delle rocce: molte assumono un aspetto scistoso, cioè caratterizzato da un isorientamento dei minerali, soprattutto di quelli lamellari, come le miche, che si dispongono perpendicolarmente alla pressione; da ciò deriva la presenza di piani paralleli, che determinano una notevole sfaldabilità.

Fra le più frequenti rocce metamorfiche di aspetto scistoso vi sono: gli gneiss (a grana grossa), originati per metamorfismo dei graniti o di rocce clastiche da essi derivate (come le arenarie) e caratterizzati dalla stessa composizione mineralogica; i micascisti, (a grana più fine) derivati da rocce argillose e composti essenzialmente di quarzo e miche; i calcescisti (anch'essi a grana fine) derivati dal metamorfismo di sedimenti calcareo-argillosi e gli argiloscisti (a grana finissima) originati da basso metamorfismo di rocce argillose. Fra questi le ardesie liguri, particolarmente importanti fra i materiali da costruzione, sono un tipo di argiloscisto calcareo con forte isorientamento dei minerali. Un grado di metamorfismo più elevato presentano le filladi, anch'esse a grana finissima, particolarmente utilizzate per produrre lastre per le coperture. Piuttosto frequenti sono inoltre gli scisti verdi, derivati dal metamorfismo di rocce a chimismo basico e le quarziti, derivate da arenarie ricche di quarzo.

Fra le rocce metamorfiche di aspetto non scistoso vi sono le serpentiniti, di colore verde, derivate da rocce intrusive molto basiche, tipiche del mantello che si trova sotto la crosta terrestre.

Il marmo, dovuto al metamorfismo di calcari puri, presenta invece una struttura pavimentosa, o granulata, simile a quella del granito, anche se, a differenza di quest'ultimo, ha sempre un piano prevalente di sfaldatura. La struttura del marmo viene detta anche 'saccaroide', perché caratterizzata dalla presenza di calcite in grossi granuli; essi sono il

prodotto della ricristallizzazione completa dei piccolissimi minerali che formavano i calcari originari: a forti pressioni e a temperature attorno ai quattrocento gradi il carbonato di calcio si riorganizza dando origine a individui cristallini di dimensioni più grandi. Nei marmi di Carrara i minerali di calcite sono in media della dimensione di mm 0,2 e raggiungono talvolta i 2 millimetri.

I marmi puri, costituiti quasi interamente (98% circa) di calcite, sono bianchi; quelli più lavorabili sono definiti 'statuari'. Quelli colorati, detti 'venati', 'nuvolati', 'bardigli', 'arabescati', 'mischì', eccetera, a seconda di quanto e come è esteso il colore, derivano dal metamorfismo di calcari 'impuri'; tali impurità possono essere costituite da granuli di silice, da argille, da idrossidi di ferro, che conferiscono colori dal giallo al rosa al verde, oppure da sostanze organiche, che danno colori dal grigio al nero. In seguito al metamorfismo tali impurità si trasformano in prodotti stabili: il carbonio delle sostanze organiche, ad esempio, si riorganizza in lamelle nere di grafite; gli idrossidi di ferro in cristalli rossi di ematite; grafite ed ematite possono anche migrare a formare zone di colore, dando luogo a marmi con venature grigie, rosse, gialle. I 'cipollini', marmi a base bianca con striature di colore, derivano invece da calcari ricchi in argille, trasformate dal metamorfismo in miche, isorientate in piani paralleli, con colorazioni verdi, grigie, dorate. I 'mischì', infine, sono conglomerati o brecce calcaree. Oltre all'origine, anche la composizione chimica delle rocce riveste una notevole importanza, in quanto è alla base delle strutture cristalline dei minerali costituenti, dalle quali dipendono molti caratteri fisici.

A seconda della composizione le rocce possono essere suddivise nelle seguenti categorie:  
- le rocce solfatiche sono costituite in prevalenza da gesso, cioè da solfato di calcio biidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Ne sono un esempio l'alabastro gessoso di Volterra, facilmente lavorabile, ma poco resistente agli agenti atmosferici e in particolare all'acqua e pertanto più utilizzato per elementi scultorei e decorativi; la pietra da gesso, o selenite, utilizzata, fin dall'epoca egiziana, per produrre leganti, ma talora anche come materiale litico;

- le rocce carbonatiche sono costituite in prevalenza da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Sono abbondanti in natura e molte sono quelle utilizzate nell'edilizia, sia come materiale da costruzione, sia per produrre leganti: i calcari, le dolomie, i marmi, il travertino, l'alabastro calcareo.

Le molecole di carbonato di calcio sono tenute insieme da legami ionici, pertanto le rocce carbonatiche sono attaccabili dagli acidi contenuti nelle piogge, siano essi naturali, come l'anidride carbonica, oppure dovuti all'inquinamento atmosferico, come l'anidride solforosa;

- le rocce silicatiche sono costituite prevalentemente da silice e da silicati. Le più importanti provengono da rocce magmatiche (graniti, sieniti, porfidi, trachiti, basalti) ma vi sono anche molte rocce sedimentarie (arenarie, tufi vulcanici, conglomerati, argille) e metamorfiche (gneiss, micascisti, filladi).

In base alla percentuale di silice che contengono si possono distinguere:

- rocce acide ( $\text{SiO}_2 > 65\%$ )

- rocce intermedie ( $\text{SiO}_2 = 65- 52 \%$ )
- rocce basiche ( $\text{SiO}_2 < 52\%$ )

La diversa composizione mineralogica delle rocce eruttive dipende dalla composizione chimica dei magmi originari, che si dicono 'acidi' se sono più ricchi di silicio e alluminio e 'basici' se ne sono meno ricchi, ma con notevoli tenori di ferro e magnesio. Le rocce basiche sono tipiche dei fondi oceanici e del sottostante mantello; quelle acide degli zoccoli continentali. Dalla diversa composizione chimica delle rocce magmatiche dipendono anche alcune caratteristiche macroscopiche quali il colore; quelle più silicatiche (dette anche sialiche) sono infatti costituite da minerali bianchi o comunque chiari (grigio-rosa); al contrario le rocce originate da magmi basici, ricchi di ferro e magnesio, dette mafiche, sono formate in prevalenza da minerali con una colorazione scura (verde-nero).

Le rocce magmatiche chimicamente intermedie (o 'neutre') sono dovute a magmi basici, che risalendo si inquinano poiché fondono rocce acide della crosta continentale; fra queste vi sono le sieniti e le dioriti (di origine intrusiva) e le trachiti e andesiti (di origine effusiva).

Le rocce silicee sono costituite in prevalenza da silicati, cioè da minerali caratterizzati dalla presenza di tetraedri di atomi di ossigeno con un atomo di silicio al centro. Tali molecole sono unite da legami covalenti, molto resistenti agli attacchi chimici e fisici, che formano tra loro maglie, piani, catene e anelli solidissimi e che inglobano con legami ionici altri elementi. Altrettanto resistenti sono gli ottaedri di allumina, presenti in alcune famiglie di silicati.

## 2. LE PIETRE SCELTE PER COSTRUIRE: CARATTERI DI LAVORABILITÀ E DI RESISTENZA MECCANICA

---

Attraverso lunghi processi di selezione empirica, e dopo ripetute prove di resistenza nel tempo, alcune rocce sono state scelte dall'uomo per essere utilizzate, con scopi diversi, nelle costruzioni. Nel corso dei secoli si è compreso che non tutte le pietre possono essere lavorate nello stesso modo e che non tutte possono essere destinate allo stesso scopo, ma che le diverse rocce si possono estrarre e lavorare secondo particolari direzioni di taglio e si prestano a essere impiegate con differenti funzioni; alcune sono più adatte alle strutture portanti degli edifici, altre agli elementi decorativi, altre ai rivestimenti, altre ancora alle coperture.

Le possibilità di lavorazione delle rocce, la loro durezza, la resistenza alla compressione o alla trazione, il particolare tipo di degrado che possono subire dopo la messa in opera, dipendono strettamente dai caratteri naturali, vale a dire dalla composizione chimica e mineralogica (già viste prima), e dalle caratteristiche fisiche.

La durezza, ovvero la resistenza alla scalfittura, è una caratteristica fisica dei minerali che dipende dalla natura e dalla resistenza dei loro legami chimici. Per misurarla si utilizza una scala empirica, costruita da Mohs in modo tale che ciascuno dei dieci termini che la compongono può scalfire il precedente ed essere scalfito dal successivo:

1. TALCO
  2. GESSO
  3. CALCITE
  4. FLUORITE
  5. APATITE
  6. ORTOCLASIO
  7. QUARZO
  8. TOPAZIO
  9. CORINDONE
  10. DIAMANTE
- La scala di Mohs -

Per le rocce la proprietà della durezza è invece più difficile da definire e può comprendere diversi tipi di resistenza meccanica: all'incisione, all'usura, alla segagione. Tali proprietà dipendono soprattutto dalla durezza dei minerali costituenti; le rocce silicatiche, ad esempio, sono generalmente più dure di quelle carbonatiche; è il caso dei graniti, che pur avendo una struttura granoblastica simile a quella dei marmi sono però molto più duri essendo formati da feldspati e da quarzo (minerali con durezza 6-7) e non da calcite (durezza 3) come i marmi.

La durezza delle rocce mono-mineraliche corrisponde generalmente a quella dell'unico minerale costituente, ma piccole quantità di minerali più duri o più teneri possono variare considerevolmente il valore complessivo della roccia. Un calcare puro, ad esempio, interamente costituito da calcite è generalmente più tenero di un'arenaria, la quale, anche se presenta un cemento calcitico, è però comunque costituita da molti granuli di quarzo.

Un'arenaria a cemento calcitico è comunque più tenera del granito, perché il cemento abbassa notevolmente il valore complessivo di durezza della roccia. Un granito è, a sua volta, meno duro dei cristalli puri di feldspato o di quarzo, sia perché contiene anche della mica, sia, soprattutto, perché i giunti fra i vari cristalli hanno legami sempre più deboli di quelli cristallini e pertanto riducono la durezza complessiva della roccia.

La durezza di una roccia come materiale lavorabile viene considerata corrispondente alla resistenza alla segatura, e in relazione a tale proprietà, si utilizza la seguente classificazione empirica:

- -rocce tenere sono considerate quelle facilmente tagliabili con seghe dentate d'acciaio (ad esempio gessi, tufi vulcanici e calcarei)
- -rocce semidure sono invece tagliabili con seghe d'acciaio senza denti e con sabbia quarzosa all'80-95% (ad esempio calcari semi-compatti, argillosi)
- -rocce dure, sono quelle tagliabili solo con seghe lisce cosparse di smeriglio (ad esempio calcari compatti, marmi, serpentiniti, oficalci)
- -rocce durissime, infine, sono quelle tagliabili solo con seghe lisce cosparse di diamante in polvere (ad esempio graniti, sieniti).

Occorre comunque tenere presente che la maggiore o minore durezza dei minerali, da sola, non determina le possibilità di resistenza generale delle rocce nelle costruzioni. Le mura medievali di Bologna, ad esempio, ancora in buono stato di conservazione, sono realizzate in gesso, il meno duro dei minerali secondo la scala di Mohs.

La durezza è però particolarmente importante nelle zone più sottoposte all'usura, quali i selciati stradali, gli scalini o le angolate degli edifici.

La tenacità è invece una proprietà fisica delle rocce che consiste nella resistenza all'urto. Non va confusa con la durezza, dato che esistono rocce molto dure, ma non tenaci, come la selce, composta interamente da silice, ma molto fragile e poco resistente agli urti.

In base a prove di laboratorio è stata elaborata una scala di tenacità di alcune fra le rocce più comuni, che pone in alto quelle più resistenti.

Oltre che dalla durezza dei minerali costituenti, la tenacità di una roccia dipende essenzialmente dalla sua struttura e coesione: è evidente dalla scala qui riportata che la tenacità è maggiore nelle rocce microcristalline e criptocristalline. Ciò è dovuto al fatto che, a parità di volume, queste ultime hanno un numero maggiore di legami intercristallini, rispetto a quelle formate da cristalli più grandi.

BASALTI  
PORFIDI  
PORFIRITI E ANDESITI  
DIORITI E GABBRI  
QUARZITI  
GRANITI E SIENITI  
ARENARIE A CEMENTO SILICEO  
CALCARI, DOLOMIE E MARMI  
SERPENTINI  
ARENARIE A CEMENTO NON SILICEO

- Scala di tenacità di alcune rocce -

La tenacità è inoltre molto alta nelle rocce a tessitura intersertale, che è infatti sempre presente nei primi quattro gruppi.

La resistenza alla compressione è quella che i corpi oppongono alle forze che tendono a romperli per schiacciamento. Tale carattere dipende sia dalla durezza dei singoli componenti (cioè dalla resistenza dei legami interni ai minerali), sia dalla struttura delle rocce (cioè dal tipo di contatti esistenti fra i vari cristalli). In genere resistono bene a compressione le rocce formate da cristalli duri, ben impilati fra loro, anche se tenuti insieme da legami deboli, come il granito.

La resistenza alla trazione è quella che i corpi oppongono alle forze che tendono a smembrarli per stiramento. Ben di rado le rocce vengono poste in opera in modo da lavorare a trazione; tuttavia la resistenza alla trazione è importante perché determina quella alla flessione, che è invece piuttosto frequente negli elementi litici delle costruzioni.

È il caso di un architrave, appoggiato sulle estremità e gravato dal proprio peso, oltre che da carichi addizionali; esso sarà soggetto a trazione in prossimità della faccia inferiore.

Questo tipo di resistenza

meccanica è, nelle rocce, generalmente bassa.

MATERIALE	RESISTENZA A COMPRESSIONE	A TRAZIONE
Basalto	3200 Kg/cm <sup>2</sup>	80 Kg/cm <sup>2</sup>
Porfido	1900 Kg/cm <sup>2</sup>	60 Kg/cm <sup>2</sup>
Granito	1800 Kg /cm <sup>2</sup>	40 Kg/cm <sup>2</sup>
Tufi vulc.	80 Kg /cm <sup>2</sup>	10 Kg /cm <sup>2</sup>
Gneiss	1300 Kg /cm <sup>2</sup>	120 Kg /cm <sup>2</sup>
Ardesia	1100 Kg /cm <sup>2</sup>	400 Kg /cm <sup>2</sup>
Marmo	1300 Kg /cm <sup>2</sup>	40 Kg /cm <sup>2</sup>
Calcare	1100 Kg /cm <sup>2</sup>	50 Kg /cm <sup>2</sup>
Arenaria	800 Kg /cm <sup>2</sup>	20 Kg /cm <sup>2</sup>
Travertino	450 Kg /cm <sup>2</sup>	30 Kg /cm <sup>2</sup>
Laterizi	175 Kg /cm <sup>2</sup>	70 Kg /cm <sup>2</sup>
Malta	50-400 Kg /cm <sup>2</sup>	10-40 Kg /cm <sup>2</sup>
Legno	500 Kg /cm <sup>2</sup>	850 Kg /cm <sup>2</sup>
Ghisa	8000 Kg /cm <sup>2</sup>	1400 Kg /cm <sup>2</sup>
Acciaio	2000 Kg /cm <sup>2</sup>	6000 Kg /cm <sup>2</sup>

## Valori di resistenza meccanica dei principali materiali da costruzione

Se si osserva la tabella dei valori qui riportata, si nota come la resistenza a trazione è sempre molto inferiore rispetto a quella a compressione e oscilla fra 1/10 e 1/50 di quest'ultima. Ciò è dovuto al fatto che la resistenza a trazione dipende sostanzialmente dai legami intercrystallini, che sono sempre più deboli di quelli interni ai singoli minerali.

In genere sono più resistenti le rocce a grana fine o, in particolare, quelle microcristalline. Sono le dimensioni dei minerali che determinano lo stato di coesione della roccia: quest'ultimo è maggiore nelle rocce a grana fine perché, a parità di volume, aumentano le superfici dei vari cristalli e quindi i relativi legami, che sono la fonte principale della resistenza alla trazione. Essa è pertanto maggiore in un basalto, piuttosto che in un granito, in un calcare microcristallino, piuttosto che in un marmo saccaroide. Inoltre è alta anche nelle tessiture intersertali e in quelle con minerali allungati e isorientati, come gli gneiss e le ardesie.

La divisibilità è un requisito fondamentale in relazione alla possibilità di estrarre e lavorare una roccia. Essa dipende dalla presenza di microfratture oppure di piani in corrispondenza dei quali la coesione e la resistenza delle rocce è minore o molto bassa. Le fasi di estrazione e di lavorazione hanno sempre sfruttato l'esistenza di queste superfici la cui presenza e frequenza può favorire o impedire determinati impieghi del materiale lapideo. Una formazione rocciosa potrà fornire blocchi grandi solo se i piani di divisibilità sono abbastanza distanziati; la presenza di un sistema fitto di piani di divisibilità può infatti impedire l'estrazione di grandi blocchi e favorire quella di lastre.

La presenza, la disposizione e la frequenza di tali piani, dipende dalla tessitura stessa delle rocce. In quelle magmatiche i piani di divisibilità sono molto rari, e corrispondono essenzialmente alle spaccature naturali createsi per il ritiro durante il raffreddamento. L'estrazione e la lavorazione delle rocce magmatiche, pertanto, non può sfruttare che raramente la presenza di superfici preferenziali di taglio; per contro l'omogeneità della struttura consente una spaccatura precisa in qualsiasi direzione e quindi anche l'estrazione di grandi blocchi uniformi da usare come monoliti; è il caso dei grandi obelischi egizi, ottenuti in blocchi unici di granito, della lunghezza di decine di metri.

Le rocce sedimentarie sono invece caratterizzate quasi sempre da formazioni stratificate, nelle quali si nota chiaramente la presenza di strati o di banchi separati fra loro da giunti

dovuti a pause del processo di sedimentazione. Queste superfici di giuntura sono caratterizzate da una coesione bassissima o nulla della roccia, che lungo tali piani può essere spaccata ed estratta con poco sforzo.

Se in corrispondenza dei giunti la divisibilità della roccia è massima, essa è comunque buona anche nella direzione parallela a quella della stratificazione, a causa dell'isorientamento frequente nei minerali.

Nelle rocce metamorfiche caratterizzate da piani di scistosità (ardesie, gneiss, filladi) la maggiore divisibilità corrisponde invece ai piani di scistosità; quando questi ultimi sono molto ravvicinati (nell'ardesia o nelle filladi), le rocce sono più adatte alla produzione di lastre che non di blocchi lapidei. Se invece i piani di scistosità sono meno frequenti l'estrazione di pietra da ridurre in blocchi non è impossibile, purché uno dei piani di lavorazione venga fatto coincidere con quello della scistosità.

Le rocce metamorfiche carbonatiche, costituite per lo più dai marmi, si presentano invece in grandi banchi omogenei ed è perciò più difficile riconoscere i piani preferenziali di divisibilità, che pure esistono e che sono dovuti al metamorfismo. Nei calcari debolmente metamorfosati, se il piano di scistosità non coincide con quello di sedimentazione, si formano facilmente scagliature a cuneo.

I sistemi tradizionali di estrazione e di lavorazione della pietra hanno sempre sfruttato l'esistenza di tali piani, dei quali cavatori e lapicidi avevano una profonda conoscenza. Nel gergo degli scalpellini e dei cavatori, questo tipo di piano viene tradizionalmente indicato come 'verso'. Il piano separabile più difficilmente viene definito 'contro'. Spesso esiste una terza direzione di

taglio, obliqua o sub-perpendicolare ai primi due, che viene definita 'secondo'. Qui la divisibilità della roccia presenta valori intermedi fra il verso e il contro.

Oltre al verso, o piano di divisibilità preferenziale, esistono nelle rocce altre fessure naturali (o litoclasti), variamente inclinate rispetto al verso. Nel gergo dei lapicidi vengono definite ancor oggi 'peli'; alcune di queste, ri-cementate da minerali come calcite o quarzo, non compromettono la resistenza della roccia e non comportano per lo scalpellino il rischio di far deviare il taglio rispetto alla direzione prestabilita; in questo caso vengono indicate come 'peli buoni'. Quando invece tali fratture rimangono aperte o sono cementate da argilla e rischiano di minacciare la resistenza della roccia, vengono definite 'peli cattivi'.

L'esistenza di tali piani naturali di sfaldabilità, fattore fondamentale per la lavorazione delle rocce, è non meno importante per la posa in opera del materiale. La disposizione delle pietre con il "verso" parallelo alla forza di gravità ne accelera infatti il processo di degrado, mentre la disposizione perpendicolare contribuisce alla buona durata del materiale.

La lucidabilità è l'attitudine di alcune rocce ad assumere superfici lisce fino a speculari per fregamento con abrasivi sempre più fini, in maniera che ciascuno elimini le solcature lasciate da quello precedente.

Attraverso tale abrasione i cristalli costituenti le rocce vengono tagliati su uno stesso piano, in modo da riflettere la luce nella stessa direzione. Ciò dà quell'effetto di brillantezza che è all'origine del significato etimologico del termine "marmo", derivato appunto dal verbo greco "marmàiro" = io brillo.

Non tutte le rocce si prestano ad essere lucidate; in generale sono lucidabili le rocce più compatte, non lo sono quelle molto porose e poco coerenti. Anche la durezza è un requisito favorevole alla lucidabilità, ma è soprattutto importante l'omogeneità, cioè che non vi siano differenze eccessive di durezza fra i componenti, perché ciò impedisce una spianatura perfetta; ad esempio sono lucidabili sia il granito sia i marmi, anche se presentano, come si è visto, valori di durezza assai differenti.

Non lo sono, invece, le arenarie quarzose a cemento calcareo.

Le rocce lucidabili vengono genericamente chiamate "marmi", nel linguaggio commerciale, e pertanto sotto tale definizione si comprendono anche le serpentiniti, le oficalci, i graniti, e persino certi calcari organogeni, come la cosiddetta "lumachella".

Occorre però ricordare che tale esteso significato non corrisponde a quello della classificazione petrografica delle rocce, che nel gruppo dei marmi comprende solo i calcari metamorfici.

Per peso specifico apparente (PV) si intende il peso (espresso in g/cm<sup>3</sup> oppure in Kg/m<sup>3</sup>) di roccia allo stato naturale, mentre per peso specifico assoluto (PS) si intende il peso della pietra ridotta in polvere, in modo tale cioè da eliminare le porosità naturali.

Il grado di compattezza di una roccia (C) è dato dal rapporto fra peso specifico apparente e peso specifico assoluto. Il valore di questo rapporto, sempre inferiore a 1, si avvicina tanto più all'unità quanto meno porosa è la roccia, cioè quanto più è compatta.

Esiste anche un indice di porosità ( $I_p$ ), che indica la percentuale dei vuoti presenti in una roccia: è pari all'1-2% in quelle molto compatte (graniti, calcari), mentre sale al 10-20% nelle rocce porose (tufi).

ROCCIA	POROSITÀ REALI
travertini	5-12%
argilloscisti	0,4-10%
calcari compatti	0,4-2%
gneiss	0,4-2%
graniti	0,4-1,5%
basalti compatti	0,2-0,9%
serpentini	0,1-0,6%

Tabella con i valori di porosità di alcune delle principali rocce

A livello pratico, però, per capire il comportamento dei materiali lapidei al degrado, è più importante conoscere il carattere della porosità, poiché sono soprattutto la comunicabilità e le dimensioni dei pori che determinano il tipo di permeabilità delle rocce. La porosità comunicante o di tipo capillare comporta un'alta penetrabilità dell'acqua nelle rocce (per imbibizione o per assorbimento). La porosità non capillare, invece, alleggerisce il peso delle rocce ma non le rende capaci di assorbire l'acqua.

Il granito, ad esempio, pur essendo molto compatto, per la sua struttura pavimentosa presenta molti spazi intercrystallini piccolissimi e comunicanti fra loro, nei quali l'acqua penetra lentamente. La pomice, invece, la roccia più leggera (l'unica che può galleggiare sull'acqua) e più porosa di tutte, ha però una particolare porosità, costituita da bolle di gas non comunicanti fra loro, e immerse in una massa vetrosa che la rende impermeabile.

Dal tipo di porosità e quindi dalle possibilità di penetrazione dell'acqua dipende anche la maggiore vulnerabilità delle rocce al gelo. La gelività è infatti maggiore nelle rocce che presentano abbondanti pori di piccole dimensioni, dove l'acqua, per capillarità, penetra in tutte le direzioni, anche in salita.

Fra le caratteristiche termiche è particolarmente importante il coefficiente di dilatazione dei materiali in seguito al riscaldamento. La presenza di calore crea un'agitazione termica negli atomi, in seguito alla quale aumenta la loro distanza di legame, determinando una dilatazione di tutti i composti cristallini. Si tratta di variazioni piccole, non percettibili, ma che,

se esercitate con continuità sui giunti cristallini, finiscono per disgregare la roccia, poiché le dilatazioni e i ritiri differenziati possono vincere i deboli legami di superficie. Questo fenomeno è più forte nelle rocce poli-mineraliche, costituite da minerali con diversi indici di dilatazione; ma è notevole anche su rocce mono-mineraliche formate da cristalli, come la calcite, caratterizzati da dilatazioni differenti a seconda degli assi cristallini. I suoi effetti sono accentuati, inoltre, nelle regioni in cui gli sbalzi termici sono veloci, e in certe parti del costruito, come gli spigoli, dove la dispersione del calore (e quindi il raffreddamento) è più veloce che in altri punti.

ROCCIA COEFFICIENTE DI DILATAZIONE

graniti 0,000008

basalti 0,000005

arenarie 0,000004

Tabella con alcuni valori di coefficienti di dilatazione

Anche la conducibilità termica è un carattere fisico importante. In genere i materiali molto porosi (come la pomice) sono anche più isolanti.

Nelle rocce meno conduttrici le differenze di temperatura tra zona e zona si equilibrano più lentamente, aumentando gli effetti dannosi degli sbalzi termici.

La refrattarietà, ossia la resistenza alle alte temperature, è un altro carattere fisico delle rocce, particolarmente importante per la costruzione delle fornaci destinate alla produzione di materiale edilizio

come calce, mattoni, ferro, vetro.

### 3. LA COLTIVAZIONE DELLE CAVE COL SISTEMA DELLA 'TAGLIATA A MANO'

---

In tutte le epoche i 'cicli' produttivi corrispondono a sequenze di operazioni concatenate fra loro, attraverso le quali la materia diventa manufatto. La prima fase di ogni ciclo è costituita dall'estrazione, che consente di attuare il passaggio dalla risorsa naturale, o materia potenziale, alla materia prima vera e propria. Essa diviene tale solo nel momento in cui viene individuata, selezionata ed estratta per essere sottoposta a processi più o meno complicati di lavorazione.

Per le rocce i luoghi dell'estrazione sono le cave, dove si organizza la 'coltivazione', attraverso una lacerazione del sottosuolo che permette il prelievo organizzato della materia.

La parte superficiale di ogni roccia si presenta alterata dagli agenti atmosferici e dalla vegetazione, che vi si radica succhiando le sostanze nutritive, e, al tempo stesso, rallentando l'erosione. Questo strato, che va eliminato per raggiungere la formazione rocciosa sana, prende il nome di 'cappellaccio'. Esso è nascosto dal suolo (costituito da sostanze organiche e da una parte della roccia alterata), la cui profondità dipende sia dal tipo di roccia, sia dal clima, (nelle regioni tropicali si trovano anche 200 metri di suolo e di roccia alterata prima di raggiungere la formazione sana).

Anche in passato il lavoro di estrazione doveva necessariamente essere preceduto da operazioni di ricerca e di 'assaggio' del terreno, al fine di scoprire l'ubicazione dei giacimenti di pietra adatta a essere lavorata. In questa prima fase di prospezione si dovevano anche verificare la consistenza del deposito, le sue caratteristiche di sfruttabilità e l'andamento dei piani preferenziali di divisibilità (o versi), in base ai quali veniva organizzato il taglio della pietra e stabilito l'orientamento della cava.

Non è facile ricostruire quali fossero esattamente le operazioni seguite per individuare un buon affioramento roccioso, ma è assai probabile che i 'prospettori' fossero guidati dall'osservazione di crolli o di franamenti d'erosione che mettevano occasionalmente a nudo porzioni del sottosuolo. L'ubicazione di un giacimento poteva inoltre essere riconosciuta anche in base alla presenza di ciottoli nei corsi d'acqua che lo attraversavano, analogamente a quanto avveniva, ancora in tempi recenti, per la ricerca dei giacimenti metalliferi.

Una volta individuato il deposito di materiale lapideo adatto alle necessità, si provvedeva a organizzarne la coltivazione. Questa era necessariamente condizionata dal tipo di formazione: le rocce sedimentarie, infatti, sono sovente costituite da depositi stratificati più o meno profondi e regolari, mentre quelle intrusive sono rappresentate da ammassi la cui

forma deriva dalle cavità naturali riempite dal magma, sono perciò costituite, generalmente, da blocchi tentacolari solidificatisi negli interstizi della crosta terrestre.

Il giacimento roccioso può inoltre costituire l'intera struttura di rilievi collinari o montani, modellati dall'erosione, oppure può formare il sottosuolo di aree pianeggianti. Pertanto, a seconda del materiale e dei caratteri geomorfologici del deposito, venivano organizzati diversi tipi di coltivazione. Quando i giacimenti si trovavano a mezza costa sui rilievi, l'estrazione a cielo aperto determinava l'apertura di grandi cave a gradoni, disposte ad anfiteatro lungo i fianchi della montagna. Esse erano adatte allo sfruttamento di rocce caratterizzate da una certa omogeneità su un fronte sufficientemente ampio da permettere di fare avanzare la superficie lavorabile in modo uniforme e progressivo.

In genere l'altezza dei gradoni era orientata in base all'andamento naturale della roccia, cioè, laddove possibile, con il piano di distacco corrispondente al verso principale. Per fronte di cava si intende la parete verticale verso monte, perpendicolare alla superficie di distacco; la sua altezza aumentava via via che procedeva la coltivazione e che diminuiva il deposito disponibile. Pertanto, per evitare di esaurire la cava, la zona di coltivazione veniva estesa in senso orizzontale. La base del gradone era in genere costituita da una piattaforma, o 'piazzale di cava', sulla quale si facevano ricadere i blocchi staccati, predisponendo appositi cuscini di schegge, che permettessero di attutire i colpi durante la caduta.

Nelle zone pianeggianti, le cave a cielo aperto potevano essere invece del tipo a fossa e cioè caratterizzate dall'abbassamento graduale della superficie del suolo, operato con grandi trincee scavate in successione.

La coltivazione in sotterraneo, tipica delle miniere, era invece molto rara per le rocce ed era utilizzata solo allo scopo di sfruttare affioramenti particolarmente pregiati, una volta esauriti in superficie.

Assai noto è l'esempio delle cave romane di Aurisina (Trieste): calcare parzialmente marmificato che veniva coltivato in galleria, lasciando però intatti dei grandi pilastri rocciosi per il sostegno del "tetto". Anche il marmo dell'isola di Paros, simile a quello di Carrara, ma a grana più grossa, bianchissimo, molto pregiato e adatto alla scultura, era coltivato in galleria: ai tempi di Plinio veniva infatti chiamato *lychnites*, cioè estratto "alla luce delle lampade" (Nat. Hist. XXXVI, 14).

Assai noto è l'esempio delle cave romane di Aurisina (Trieste): calcare parzialmente marmificato che veniva coltivato in galleria, lasciando però intatti dei grandi pilastri rocciosi per il sostegno del "tetto". Anche il marmo dell'isola di Paros, simile a quello di Carrara, ma a grana più grossa, bianchissimo, molto pregiato e adatto alla scultura, era coltivato in galleria: ai tempi di Plinio veniva infatti chiamato *lychnites*, cioè estratto "alla luce delle lampade" (Nat. Hist. XXXVI, 14). L'ardesia ligure, fino ad epoche molto recenti, era coltivata

con un sistema di avanzamento nell'estrazione dei blocchi dall'alto al basso, (denominato 'da tetto a letto'), del quale esiste una straordinaria documentazione iconografica risalente al 1838. Il sistema tradizionale usato per il distacco ordinato dei blocchi, senza il quale era impossibile la coltivazione sistematica della cava, viene definito 'tagliata a mano'. Esso consisteva nel separare, con appositi strumenti, i sei lati che definivano il parallelepipedo.



Cava di versante. Il materiale estratto è il marmo di Carrara

Assai noto è l'esempio delle cave romane di Aurisina (Trieste): calcare parzialmente marmificato che veniva coltivato in galleria, lasciando però intatti dei grandi pilastri rocciosi per il sostegno del "tetto". Anche il marmo dell'isola di Paros, simile a quello di Carrara, ma a grana più grossa, bianchissimo, molto pregiato e adatto alla scultura, era coltivato in galleria: ai tempi di Plinio veniva infatti chiamato *lychnites*, cioè estratto "alla luce delle lampade" (Nat. Hist. XXXVI, 14). L'ardesia ligure, fino ad epoche molto recenti, era coltivata con un sistema di avanzamento nell'estrazione dei blocchi dall'alto al basso, (denominato 'da tetto a letto'), del quale esiste una straordinaria documentazione iconografica risalente al 1838. Il sistema tradizionale usato per il distacco ordinato dei blocchi, senza il quale era impossibile la coltivazione sistematica della cava, viene definito 'tagliata a mano'. Esso consisteva nel separare, con appositi strumenti, i sei lati che definivano il parallelepipedo.

Nelle cave a gradoni due lati (quello frontale e quello del piano orizzontale) erano già liberi; per separare gli altri tre lati verticali si operava un solco di delimitazione, a monte e ai fianchi, della stessa altezza del blocco da estrarre. Fino a una profondità di 50-60 centimetri il cavatore poteva lavorare dall'alto, inginocchiato o in piedi, usando picchi a lunga immanicatura.



Operazione di estrazione dei blocchi con picco e cunei

Se invece il blocco era di dimensioni maggiori, il solco doveva essere una vera e propria trincea, tanto larga da consentire al cavatore di scendervi. Un esempio eccezionale di quest'ultimo sistema è conservato nelle cave del cosiddetto "tempio G" di Selinunte, in Sicilia, abbandonate in seguito all'interruzione del grandioso cantiere, seguita alla distruzione della città nel 409 a.C. Anche l'omogeneità del materiale condizionava lo spessore dei blocchi e quindi dei gradoni della cava: per marmi e graniti, caratterizzati da rare spaccature, l'altezza poteva essere scelta con maggior libertà rispetto alle rocce sedimentarie, costituite da formazioni stratificate.

Per lo stacco definitivo, in corrispondenza della faccia di base, si usava un altro sistema. La cava veniva scelta e organizzata in modo che tale piano corrispondesse al 'verso', dove minore era la resistenza della roccia alla trazione. Alla base del blocco si scavavano degli alloggi con sezione a 'V', (detti 'formelle' dai cavatori di Carrara), ottenuti con punta e mazzuolo e posti a distanze regolari, ma tanto più ravvicinati quanto più resistente era la roccia; in tali alloggi venivano conficcati, a colpi di mazza, dei cunei; dovevano perciò essere abbastanza profondi da evitare che essi raggiungessero il fondo. Il loro scopo era infatti quello di ripercuotere sui lati la forza proveniente dall'alto. Il principio è infatti lo stesso di una macchina semplice, costituita da due piani inclinati contrapposti che trasformano una forza perpendicolare (colpi di mazza) in due forze parallele alla superficie e opposte, tali da vincere la resistenza della roccia alla trazione. Tale spinta, se esercitata lungo una fila orizzontale continua di cunei, parallela al piano di sfaldatura, è infatti in grado di provocare una somma di forze che porta il blocco a staccarsi nettamente.



L'estrazione dei tamburi destinati al tempio G di Selinunte, rimasti nella cava di Cusa



La coltivazione 'a tetto' dell'ardesia ligure

Per ottenere tale risultato è necessario battere i cunei con gradualità, fino a portarli contemporaneamente alla stessa pressione, ciò che invece non si può ottenere spingendo un solo cuneo fino in fondo. L'abilità di questo lavoro era basata anche sull'esercizio dell'udito: conficcato nella formella, il cuneo produce infatti un suono che varia man mano che aumentano la profondità e la pressione; il cavatore si regolava perciò in modo da far produrre a ciascuno lo stesso suono, sempre più acuto. Quando tutti i cunei erano "in tiro" il

lavoro si fermava, attendendo solo lo stacco della roccia. Per ricostruire la storia degli strumenti utilizzati per l'estrazione (così come per le successive fasi di lavorazione) esistono sia fonti indirette, come quelle iconografiche, sia fonti dirette, o archeologiche, costituite cioè da documenti materiali.

Tra questi il ritrovamento di strumenti originali costituisce un caso piuttosto raro (nelle cave di Carrara, ad esempio, si sono rinvenuti non più di venti oggetti); più facile è invece analizzare le tracce di lavorazione ancora visibili, sia nei monumenti, sia nelle cave. Tuttavia poiché l'arte della pietra è basata su una progressiva asportazione della materia, ovvero su una lavorazione 'a levare', ogni strumento cancella inevitabilmente le tracce di quelli precedenti.

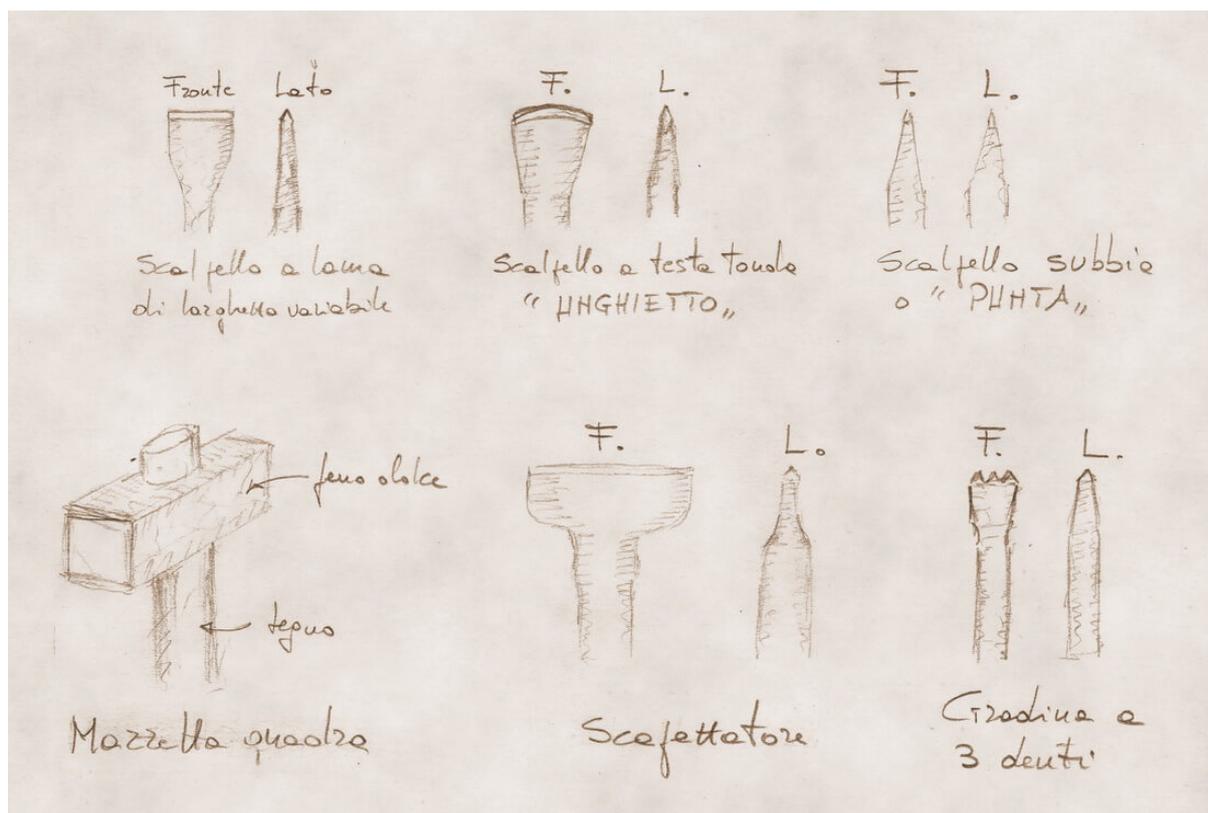
Pertanto sono gli scarti di produzione, i pezzi non finiti, le cave abbandonate prima di avere terminato lo sfruttamento, che consentono di trarre le informazioni maggiori. In base a queste diverse fonti sono stati elaborati utili repertori che descrivono i vari strumenti per la lavorazione della pietra e indicano, per ciascuno, il tipo di tracce che lasciano e la cronologia del loro utilizzo; il più completo è quello curato da Bessac, che abbraccia tutta l'area mediterranea e che copre un arco cronologico compreso fra l'antico Egitto e l'età contemporanea.

A seconda del loro uso gli strumenti si possono suddividere in tre principali categorie: quelli a percussione diretta (o lanciata), che scalfiscono direttamente la pietra, e cioè: il picco da cava, la picchetta, la scure (o martellina liscia, molto in uso, ad esempio, in Italia centrale, per la lavorazione dei tufi), la martellina dentata a taglio verticale (o a zappa), (usata ancora di recente per l'ardesia ligure), e infine la bocciarda (o martello a punta), che venne introdotta nel XVII secolo in Francia e successivamente in Italia.

Gli strumenti a percussione indiretta, invece, sono costituiti da punte, scalpelli, gradine; denti di cane e per essere usati devono essere battuti da percussori; perciò il loro utilizzo impegna entrambe le mani del lapicida. Le punte possono essere a terminazione grande (se vengono usate per sgrossatura) o fine (se servono alla spianatura delle superfici). Gli scalpelli, oltre ad avere una ricca scala dimensionale, possono essere a taglio curvo o diritto. Fra i primi si distinguono le 'ugnole', (cioè unghie), usate per piccole asportazioni, dalle 'sgorbie', più grandi e utilizzate soprattutto per il legno. Le gradine sono particolari scalpelli a 3 o più denti. Non vanno confuse col 'dente di cane', caratterizzato da un 'passo' più grande e che determina un taglio meno fine. I percussori possono essere lignei, lapidei o acciaioli. La mazzetta in legno, ad esempio, da scultura, era già usata nell'antico Egitto per modellare pietre tenere. I percussori litici, molto usati nella preistoria, divengono sempre più rari dopo l'introduzione dei metalli, mentre quelli acciaioli non compaiono prima del 1000 a.C.

Per il lavoro di estrazione, oltre ai cunei (lignei o acciaioli), a punte e mazzuoli, necessari per praticare le 'formelle', ai percussori, costituiti da bocce litiche o da mazze acciaioli, erano usati strumenti a percussione diretta con lunga immanicatura, necessari per l'incisione dei solchi sui tre lati del blocco e, infine, leve per sollevare i pezzi staccati. Il materiale estratto

veniva ribaltato sul piazzale di cava, in attesa di essere trasferito sul cantiere o in laboratorio per essere finito e posto in opera. Sul piazzale veniva spesso avviata già una prima lavorazione; se, ad esempio, erano richiesti blocchi piccoli, era bene provvedere già in cava alla divisione. Inoltre gli elementi appena staccati presentavano spesso forme irregolari, zone difettose (o lesionate durante il taglio o la caduta) che era bene scartare, anche per diminuire il carico da trasportare.



Utensili antichi a percussione e ad urto per la lavorazione artigianale del marmo

Per il lavoro di estrazione, oltre ai cunei (lignei o acciaioli), a punte e mazzuoli, necessari per praticare le 'formelle', ai percussori, costituiti da bocce litiche o da mazze acciaiose, erano usati strumenti a percussione diretta con lunga immanicatura, necessari per l'incisione dei solchi sui tre lati del blocco e, infine, leve per sollevare i pezzi staccati. Il materiale estratto veniva ribaltato sul piazzale di cava, in attesa di essere trasferito sul cantiere o in laboratorio per essere finito e posto in opera. Sul piazzale veniva spesso avviata già una prima lavorazione; se, ad esempio, erano richiesti blocchi piccoli, era bene provvedere già in cava alla divisione. Inoltre gli elementi appena staccati presentavano spesso forme irregolari, zone difettose (o lesionate durante il taglio o la caduta) che era bene scartare, anche per diminuire il carico da trasportare.

Le iniziali operazioni di preparazione del materiale, in cava, erano compito di artigiani specializzati, che facevano uso di cunei anche per la suddivisione dei blocchi, oppure di

seghe a lame non dentate, azionate in modo da penetrare gradualmente nella pietra per oscillazione, con continuo impiego di acqua e sabbia. Un momento importante era costituito dalla eliminazione delle zone difettose, che avrebbero compromesso la lavorazione finale. Le parti da scartare venivano tolte con la mazza, quindi una prima riquadratura era operata con punte grosse e mazzuoli, con i quali si eliminavano le sporgenze e le irregolarità maggiori. Tuttavia la lavorazione giungeva raramente a uno stadio avanzato, dato che le difficoltà del trasporto potevano provocare danni e scalfire il materiale, sul quale si preferiva perciò lasciare uno strato di scarto che, in qualche modo, fungeva da protezione. Le rocce più dure e tenaci, come il granito, rischiavano meno di essere danneggiate durante il trasporto.

I sistemi di coltivazione della pietra fin qui descritti sono assai antichi. Attività estrattive per procurarsi la selce, con la quale fabbricare utensili, sono documentate già dalla fine del Paleolitico, quando pare venissero effettuate con picconi di osso, come attestano precisi ritrovamenti in Inghilterra. Tuttavia occorre arrivare al 2800 a.C. circa per avere le prime testimonianze archeologiche di coltivazioni sistematiche, destinate alla produzione di elementi per un'attività un'edilizia monumentale. Le più antiche cave all'aperto attualmente note si trovano nei deserti egiziani; molte risalgono al periodo tolemaico o a quello romano, ma non mancano attestazioni databili all'antico Egitto. Particolarmente famosi sono gli studi sull'obelisco di Assuan, la cui estrazione dalla cava, rimasta incompiuta, ha offerto preziosi dati alla conoscenza delle più antiche tecniche estrattive.

Gli Egizi erano in grado di coltivare il granito, tramite il sistema della tagliata a mano, molti secoli prima dell'introduzione degli strumenti in metallo acciaiolo. Per tracciare i solchi si servivano di percussori litici, costituiti da bocce di dolerite (roccia magmatica intrusiva più tenace del granito), con le quali macinavano progressivamente la pietra. L'utilizzo di questo sistema è dimostrato sia da prove dirette, come la cava di Assuan, dove si sono rinvenuti i resti delle bocce stesse e delle tracce lasciate dal loro uso, sia dall'iconografia, che attesta l'impiego di simili utensili in vari stadi della lavorazione della pietra. Per il distacco definitivo è probabile che si utilizzassero cunei di legno, molto secco, che dopo essere stati inseriti negli alloggi, (predisposti con piccoli percussori o con scalpelli di bronzo) venivano bagnati con acqua, per farli dilatare, in modo da provocare le spinte che causavano il distacco del blocco dalla roccia madre. In questo modo si poteva estrarre e tagliare anche il granito, che, come si è visto, ha una resistenza alla trazione pari a 40 kg a cm<sup>2</sup>. Il sistema poteva non funzionare se nella roccia erano presenti litoclasti ('peli') non visibili dall'esterno, i quali provocavano una deviazione rispetto alla linea di rottura stabilita.

È appunto questa circostanza che deve avere determinato l'abbandono dell'obelisco di Assuan, prima che ne fosse portata a termine l'estrazione. L'utilizzo di grandi blocchi lapidei, provenienti dalla coltivazione di cave, è testimoniato inoltre presso le civiltà minoica e micenea, ma è nei grandi cantieri dell'epoca greca arcaica che la tecnica della tagliata a mano conobbe una diffusione notevole e un progressivo perfezionamento. È probabile che, come sostengono alcuni studiosi, i Greci avessero appreso la litotecnica dalla civiltà ittita, piuttosto che dall'Egitto, dove l'uso degli strumenti in ferro pare non sia stato introdotto

prima dell'età tolemaica. Al grande sviluppo della stereotomia greca si deve probabilmente l'introduzione della gradina, apparsa verso la fine del VI secolo a.C. e il cui impiego è forse da collegare alla scultura in marmo.

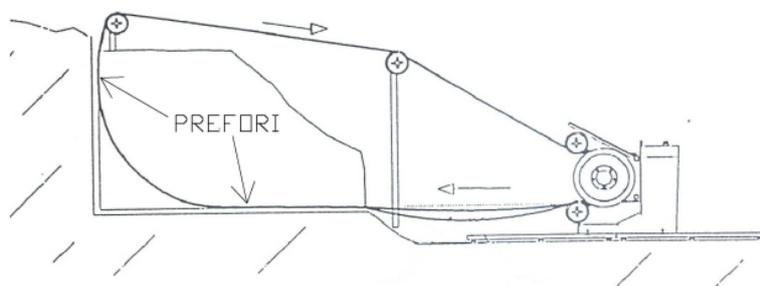
Con l'epoca ellenistica la tecnologia della pietra conobbe un'espansione notevole, diffondendosi in tutto il bacino del Mediterraneo e nell'Europa occidentale e adattandosi a svariati tipi di rocce. In epoca romana si generalizzò l'impiego del marmo, esteso anche all'edilizia privata, tanto che in età imperiale esistevano molte cave, in tutto il Mediterraneo, di marmi bianchi e colorati; le tecniche estrattive erano ancora quelle messe a punto nell'Ellenismo, ma l'organizzazione del lavoro era divenuta più complessa e articolata. Lo studio epigrafico delle sigle che compaiono sovente sui blocchi di marmo, (sia nelle cave sia nei pezzi trasportati nei magazzini di Ostia e Roma) ha permesso di conoscere molti aspetti organizzativi delle cave, che generalmente erano di proprietà imperiale. Nei distretti marmiferi più grandi, ogni area estrattiva era contraddistinta, come unità di lavoro, col termine officina, oppure, come unità amministrativa, veniva definita caesura; al suo interno poteva essere suddivisa in più settori (bracchia), ciascuno con un suo responsabile.

I vari procuratores, posti a capo di una o più cave nelle singole provincie, dovevano far capo a un procurator marmorum, residente a Roma. Essi sorvegliavano anche le concessioni degli appalti, dati su singoli settori, ai quali corrispondeva una fitta rete di squadre di lavoro. Queste ultime avevano una struttura sociale composita: accanto a lavoratori di condizione servile comprendevano uomini condannati ai lavori forzati, ma anche artigiani liberi; il loro operato era generalmente sottoposto alla sorveglianza di militari. Con il tardo impero le attività estrattive registrano una sensibile diminuzione e diverse cave importanti, come quelle africane di Simitthus (Chemtou) o quelle di Luni (Carrara), non presentano tracce di coltivazioni posteriori al IV-V secolo d.C. Recenti indagini archeologiche condotte nelle cave di calcare poste nei pressi di Nîmes, hanno registrato l'esistenza di coltivazioni di età tardoantica condotte ancora con sistemi di tradizione romana, ma assai semplificati e 'degenerati'; le cave sono infatti caratterizzate da maggiore irregolarità nell'organizzazione, dalla mancanza di tracce di estrazione di blocchi grandi, e inoltre dalla drastica riduzione della gamma tipologica degli strumenti.

Nei secoli dell'Altomedioevo si verifica, in tutto il Mediterraneo, una progressiva scomparsa delle attività di estrazione della pietra, fatta eccezione per alcune regioni dell'impero bizantino, quali l'area siriano-palestinese e l'Armenia, dove l'antica tradizione della tagliata a mano sembra sia sopravvissuta senza apparenti interruzioni. Una generale ripresa delle attività estrattive interessa il Mediterraneo occidentale a partire dal XII secolo in poi, anche se in talune regioni se ne trova traccia già nei primi decenni dell'XI secolo. Poiché la litotecnica riappare, dopo secoli di abbandono, in maniera improvvisa e in forme tecnologicamente assai mature, è del tutto logica l'ipotesi che la reintroduzione dell'antica stereotomia classica sia avvenuta tramite il contatto diretto con le regioni orientali del Mediterraneo. Conoscere attraverso quali forme ciò avvenne, costituisce attualmente uno dei temi più complessi, ma anche più suggestivi, della storia della cultura materiale.

Ciò che pare invece un dato sicuro è il fatto che l'organizzazione delle cave di materiale lapideo, in età medievale, riflette la nuova frammentazione politica, alla quale sono evidentemente dovute le leggere differenze di strumentazioni e di tecniche riscontrabili da una regione all'altra. Lo studio dei resti di alcune tagliate ancora visibili nei giacimenti marmiferi di Carrara, ad esempio, ha permesso di distinguere le tracce delle coltivazioni medievali da quelle di epoca romana; le prime sono caratterizzate da maggiori irregolarità, dalla mancanza di un procedimento a gradoni molto estesi, dalle dimensioni variabili (ma comunque piccole) delle tagliate, da avanzamenti curvi, o molto inclinati.

In generale però le cave di pietra dell'Europa medievale sono molto più conosciute dallo studio delle fonti scritte che non da analisi archeologiche. Solo a partire dal XVIII secolo si registra un tentativo di innovazione nei sistemi estrattivi tradizionali, rappresentato dall'uso degli esplosivi.



Schema di taglio di blocchi lapidei

La carica esplodente, per lo più 'polvere nera' (formata da carbone, salnitro e zolfo) veniva inserita entro lunghi fori, ricavati con stretti scalpelli, detti 'fioretti'. Per ottenerli occorreva che un cavatore tenesse retto lo scalpello sulla pietra, facendolo ruotare di 20-30°, mentre un altro lo batteva con la mazzetta. Anche se questo sistema (definito 'varata' nelle cave di Carrara) consentiva un notevole risparmio di energia muscolare umana, comportava però svantaggi notevoli: la maggior parte del prodotto era infatti inutilizzabile per le ridotte dimensioni o per le numerose incrinature; troppo era lo spreco di materiale, e, non ultimo, enormi quantità di detriti tendevano a soffocare le cave. Per tali ragioni l'uso degli esplosivi rimase un fatto molto limitato.

Una radicale innovazione fu costituita invece, alla fine del secolo scorso, dall'introduzione del taglio con filo elicoidale. Presentato all'Esposizione Internazionale di Parigi del 1889 e di lì a poco introdotto in molte cave (a Carrara comparve nel 1895) esso era basato sull'utilizzo di tre fili di acciaio, avvolti a spirale. Dovevano essere abbastanza lunghi (1 Km circa) da formare un grande anello, tenuto in tensione da pulegge che lo facevano scorrere, mentre si abbassavano gradatamente sulla roccia. Il filo trascinava una miscela di acqua e sabbia silicea che provocava una progressiva abrasione della pietra.



Parete di una delle cave di Marmo Nero in cui si vedono molto bene le tracce lasciate dal taglio dei blocchi eseguito con il filo elicoidale

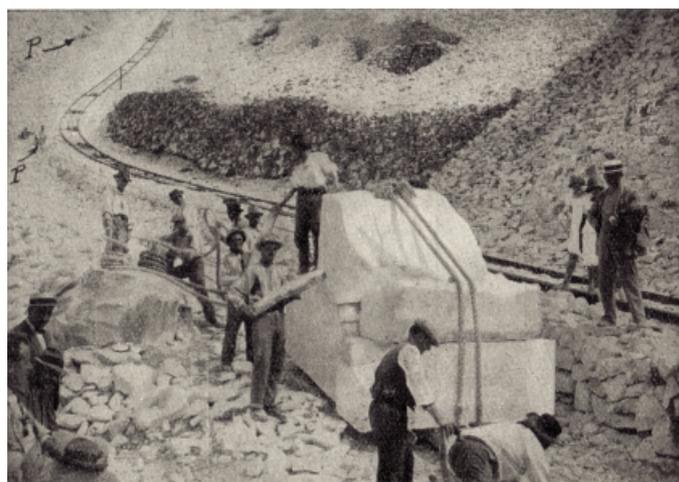
Questo sistema non era adatto per le rocce molto dure, oppure per l'ardesia, troppo fine, e perciò facile a impastarsi. Più recentemente è stato soppiantato dal filo diamantato, una lega metallica che contiene granuli di diamante industriale.

Una radicale innovazione fu costituita invece, alla fine del secolo scorso, dall'introduzione del taglio con filo elicoidale. Presentato all'Esposizione Internazionale di Parigi del 1889 e di lì a poco introdotto in molte cave (a Carrara comparve nel 1895) esso era basato sull'utilizzo di tre fili di acciaio, avvolti a spirale. Dovevano essere abbastanza lunghi (1 Km circa) da formare un grande anello, tenuto in tensione da pulegge che lo facevano scorrere, mentre si abbassavano gradatamente sulla roccia. Il filo trascinava una miscela di acqua e sabbia silicea che provocava una progressiva abrasione della pietra. Questo sistema non era adatto per le rocce molto dure, oppure per l'ardesia, troppo fine, e perciò facile a impastarsi. Più recentemente è stato soppiantato dal filo diamantato, una lega metallica che contiene granuli di diamante industriale.

## 4. I TRASPORTI VIA TERRA E VIA ACQUA

In ogni epoca il costo del trasporto, in termini di fatica umana e di tempo, era tra i più alti di tutte le operazioni del cantiere. Nei casi in cui la zona di estrazione si trovava in aree montane, la prima fase del trasporto era rappresentata dalla discesa dalla cava verso il piano, tramite percorsi che generalmente si effettuavano su forti pendenze, e lungo i quali i blocchi dovevano essere frenati.

Un sistema frequente era l'approntamento di piste costituite da piani inclinati, lungo le quali venivano fatti scendere i blocchi, legati a slitte di legno ('lizzate') che scorrevano su travicelli disposti trasversalmente, frenate con funi agganciate ai bordi del percorso; il graduale allentamento delle funi consentiva un lento avanzamento dei carichi. Nelle cave greche del marmo pentelico si conservano straordinarie testimonianze di tale sistema, costituito da una via in forte pendenza, ai lati della quale si trovano ancora i fori usati per i pali dove venivano avvolte e fatte scorrere le funi destinate a frenare le slitte.



La discesa dei blocchi da una cava tramite 'lizzata'

Nelle cave di marmo di Carrara la 'lizzata' è stata in uso fino a epoche recenti. In pianura il trasporto dei blocchi (o dei semilavorati) necessitava invece di sistemi di traino; nell'antico Egitto, essi erano effettuati tramite slitte trascinate dalla forza di centinaia di uomini, mentre nell'antichità classica e nelle epoche successive veniva generalmente impiegata energia animale.

Un mulo non può trasportare più di kg. 150 di materiale (vale a dire non più di due blocchi di cm 20x25x50 circa), mentre un paio di buoi è in grado di trainare un carro con un carico di circa 800 chilogrammi; il trasporto di pesi maggiori era reso possibile moltiplicando gli animali aggogati.

Un tale sistema era certamente in uso presso gli antichi greci: lo studio della nota epigrafe che registra i conti per la costruzione del portico del telesterion di Eleusi (I.G.II, 1673 datata al 333/332 a.C.), ad esempio, documenta l'impiego di 27-40 coppie di buoi per ogni viaggio.



Carri per il trasporto del marmo a Carrara, agli inizi del secolo

Un mulo non può trasportare più di kg. 150 di materiale (vale a dire non più di due blocchi di cm 20x25x50 circa), mentre un paio di buoi è in grado di trainare un carro con un carico di circa 800 chilogrammi; il trasporto di pesi maggiori era reso possibile moltiplicando gli animali aggiogati.

Un tale sistema era certamente in uso presso gli antichi greci: lo studio della nota epigrafe che registra i conti per la costruzione del portico del telesterion di Eleusi (I.G.II, 1673 datata al 333/332 a.C.), ad esempio, documenta l'impiego di 27-40 coppie di buoi per ogni viaggio.

Dalle testimonianze iconografiche offerte da modellini in terracotta, è stato possibile ricostruire l'aspetto dei carri per trasporti pesanti usati sia dai greci che dai romani: erano formati da quattro ruote piene e dotati di un piano orizzontale in legno; i carichi potevano esservi posti superiormente, oppure venire sospesi al di sotto. Il traino di grandi blocchi, effettuato aggiogando molte coppie di buoi, è attestato ancora all'inizio di questo secolo, e solo da pochi decenni è stato completamente sostituito dall'introduzione di speciali automezzi.

Il trasporto meno costoso era rappresentato, in ogni epoca, dalle vie d'acqua; anzi, si può affermare che non di rado la fortuna commerciale di un materiale da costruzione era legata alla vicinanza di vie marittime o fluviali. L'ampia diffusione dei graniti egiziani in età

romana è forse in parte legata alla presenza del Nilo, così come quella dei marmi di Luni alla relativa vicinanza delle montagne marmifere alla costa.

Per i trasporti pesanti erano necessarie imbarcazioni speciali denominate *naùs lithagogoì* dai greci e *naves lapidariae* dai romani. L'archeologia subacquea ha permesso di individuare numerosi relitti affondati, con carichi di marmo del peso di 100-200 tonnellate. Il ritrovamento, nei grandi porti fluviali di Ostia, di molte centinaia di blocchi di marmi e pietre pregiate provenienti dalla Sardegna, dalla Grecia, dall'Africa, dall'Asia Minore, ecc., attesta l'entità del traffico marittimo che convergeva su Roma. Dai magazzini posti presso i bacini portuali, attraverso canali artificiali, i blocchi di cava o i semilavorati risalivano il Tevere, probabilmente con apposite imbarcazioni fluviali. Anche per l'età postclassica è attestato un notevole movimento di pietre da costruzione tramite le vie d'acqua: nel periodo delle Crociate circolavano carichi di marmi provenienti dalla depredazione di monumenti classici, mentre, nei secoli seguenti, le fonti scritte (contabilità di cantieri, atti notarili, ecc.) informano dell'esistenza di apposite imbarcazioni per il rifornimento dalle cave, come nel caso degli approvvigionamenti per l'Opera del Duomo di Firenze (XIV secolo) o di quello di Milano (XV secolo).

Lo sfruttamento dei calcari prealpini dell'area lombarda e veneta era dovuto, in larga misura, alla presenza di vie fluviali e lacustri che permettevano di rifornire i grandi cantieri delle città padane. Assai significativa è inoltre, a questo proposito, la varietà lessicale utilizzata nei documenti notarili di Carrara (secc. XV-XVI) per indicare diversi tipi di barche con i relativi carichi: "leuti", "saette", "naviglioni" per il traffico costiero, oppure scafi a fondo piatto per risalire l'Arno.

## 5. LE LAVORAZIONI IN CANTIERE: SPACCATURA, SBOZZATURA, RIQUADRATURA

---

Prima della posa in opera, gli elementi destinati alle strutture murarie ricevevano, generalmente in cantiere, una preparazione finale che poteva essere più o meno complessa. Lo stadio più semplice era costituito dalla lavorazione detta a 'a spacco', che consisteva nel fratturare la roccia con uno o più colpi, eseguiti a percussione diretta, con un martello tenuto leggermente inclinato. Il colpo emette infatti onde elastiche a compressione e rilasciamento, parallele alla direzione di trasmissione; la parte della materia direttamente a contatto col percussore si comprime e si rilascia trasmettendo l'onda alla materia posta a fianco. Nelle rocce tenere un solo passaggio può rompere subito tutti i legami, mentre in quelle tenaci e poco sfaldabili una buona parte di essi resiste alla percussione. Di conseguenza quanto maggiore è la tenacità delle rocce, tanti più colpi, ripetuti nello stesso punto, saranno necessari per spaccarla. Poiché le rocce sedimentarie e quelle metamorfiche sono caratterizzate dalla presenza di piani preferenziali di divisibilità, la lavorazione a spacco più conveniente è sempre quella parallela a tali piani.

Le murature identificabili con l'opus incertum descritto da Vitruvio (che, anche dopo l'età augustea, dovevano essere molto più diffuse di quanto non si creda), erano formate da pietre lavorate a spacco, in corrispondenza del 'verso' o di un 'pelo'. Tale operazione non richiedeva un lapidista specializzato, ma poteva essere svolta anche da un semplice garzone; essenziale era invece l'abilità del muratore per il lavoro di posa in opera, quello cioè che garantiva la statica del muro. Le strutture in pietre lavorate a spacco tornarono ad essere assai in uso in età post-medievale, anche perché erano solide, pur essendo prive di qualità estetiche; l'aspetto 'disordinato' dei muri era generalmente nascosto da rivestimenti intonacati e affrescati. Oltre che per le pietre da muro la lavorazione a spacco era adatta anche per la produzione di lastre; nell'ardesia ligure, ad esempio, un solo colpo, provocato (nella direzione del verso) con una sbarretta di ferro su una lama d'acciaio detta "scalpella", era sufficiente a dividere la roccia in un blocco di cm 60 x 60. La citata immagine del 1838 che riproduce fedelmente le operazioni di estrazione dell'ardesia, mostra che, in questo caso, la lavorazione a spacco era effettuata in cava, forse per ridurre il peso del trasporto. Anche le tessere dei mosaici venivano ottenute spaccando con colpetti decisi piccole lastre, precedentemente tagliate nella direzione del verso. Con una lavorazione a spacco si poteva anche frantumare la pietra per ottenere pietrisco, da utilizzare per la produzione di calcestruzzo, oppure come inerte nelle malte.

La sbazzatura rappresenta uno stadio di lavorazione più complesso. Può essere effettuata con strumenti a percussione diretta, come mazzuoli o picchi dal manico corto, usati al posto delle punte, oppure da strumenti a percussione indiretta, per lo più punte, battute da mazzuolo: una mano percuote, l'altra aggiusta il tiro. I colpi non devono essere

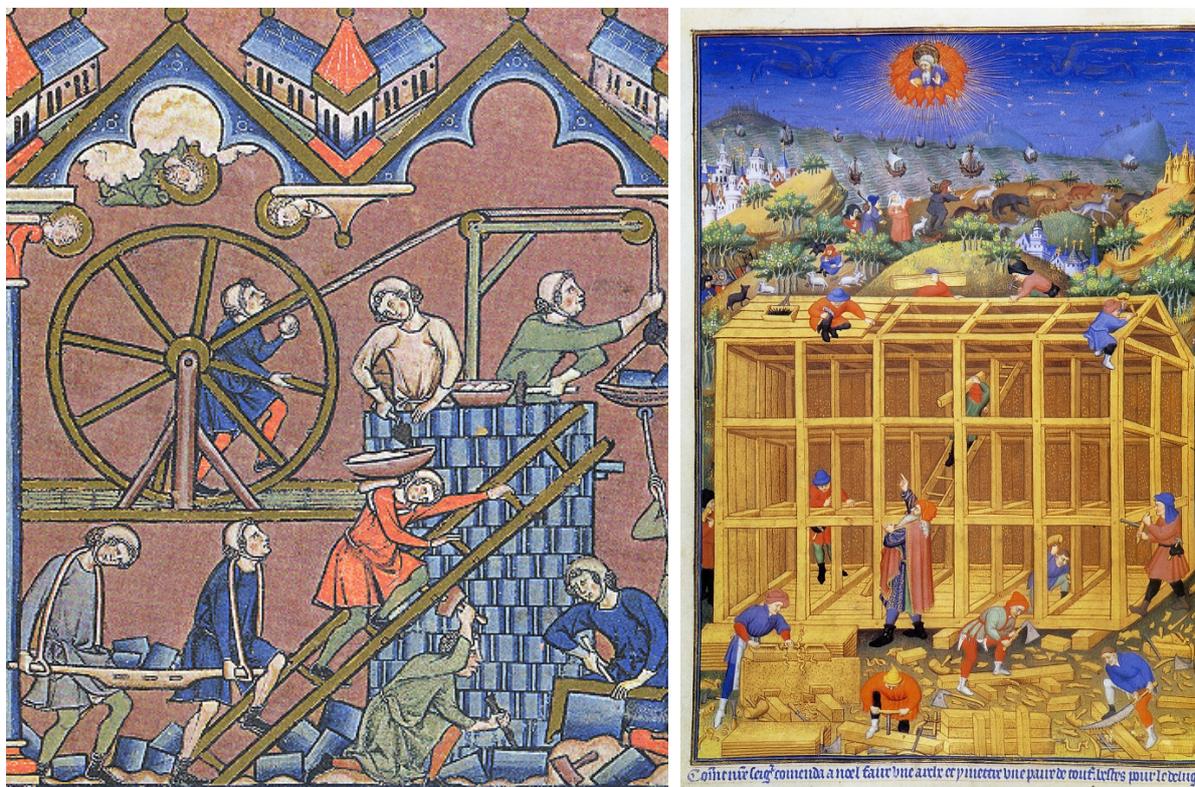
perpendicolari, per non provocare onde di compressione che non fuoriescono più dalla pietra, e ne rompono alcuni legami interni i quali, col tempo, possono provocare nella roccia fratture parallele alla superficie. È una lavorazione che procede gradualmente, con piccoli colpi molto inclinati, tali da provocare fratture localizzate; ciascuno fa partire una scheggia di pochi centimetri. In cava il lavoro di sbazzatura poteva essere effettuato per regolarizzare i blocchi estratti (che comunque mantenevano superfici irregolari) ed eliminare spigoli troppo a rischio nei trasporti. Oppure poteva servire ad adeguare la geometria a quella del manufatto finale. In cantiere venivano invece preparati tramite sbazzatura i blocchetti lapidei da impiegare nelle murature a corsi orizzontali. Rientrano in questa categoria i blocchetti costituenti le murature che gli archeologi francesi definiscono *petit e moyen appareil*, a seconda delle dimensioni. Questo tipo di lavorazione era in uso sia in età classica (*opus reticulatum*, e *vittatum*) sia in età medievale (cosiddetto 'filaretto'). In questo caso la lavorazione delle pietre doveva essere compito di appositi 'sbazzatori' che dovevano disporre di materiale estratto da cava, oppure di sistematiche raccolte di ciottoli, di grandezza ben selezionata.

La squadratura è invece un'operazione assai complessa, che richiede una specializzazione artigianale maggiore. Permette di ottenere blocchi, anche di grandi dimensioni, della forma di regolari parallelepipedi; la loro realizzazione necessita di apposite forniture di cava e pertanto, a differenza delle prime due, non può essere effettuata su materiale raccolto, soprattutto quando si tratta di grandi quantità. Per la squadratura si usano per lo più strumenti a percussione indiretta, che consentono di praticare una scheggiatura localizzata; con le rocce tenere si possono usare però anche strumenti a percussione diretta.

Per la riquadratura delle pietre sono necessarie delle righe, con le quali si misurano e si individuano le superfici, e delle squadre, indispensabili per produrre elementi con angoli di 90°. Ciò spiega perché proprio questi oggetti sono sovente rappresentati nelle lapidi funerarie di scalpellini. Questi ultimi dovevano evidentemente conoscere, oltre ai caratteri delle rocce e all'uso degli strumenti, anche alcune regole empiriche di geometria. È significativo constatare come, nella terminologia usata per indicare le murature in conci squadrati, venga appunto sottolineato, in ogni epoca, l'aspetto della regolarità geometrica: *saxum quadratum* è infatti la definizione data da Vitruvio (*De Arch.* I, V, 8) e *quadrato lapide* è l'espressione che ricorre in età medievale. La squadratura di ogni singolo concio è una lavorazione piuttosto lunga, che nelle rocce semidure o dure può richiedere anche sei-otto ore di tempo. La prima operazione consiste nel realizzare il bordo della prima faccia, usando scalpello e mazzuolo, in modo da ottenere il tipico 'nastrino' di contorno.

Il secondo bordo viene quindi scolpito a 90° rispetto al primo, servendosi di una squadra. Il terzo spigolo, che deve essere ortogonale e complanare agli altri, viene individuato con esattezza ponendo un'asticella di legno in orizzontale sul bordo già pronto e 'traguardando' poi la superficie, cioè osservandola in posizione leggermente scostata, in modo che l'asticella guidi l'occhio nell'individuazione del punto giusto. La superficie verrà poi spianata con altri strumenti: punta, oppure gradina, e mazzuolo. Una volta finito il primo piano il

blocco viene ribaltato per ottenere la seconda faccia: un primo lato viene individuato con la squadra a 90°, mentre il secondo lato della seconda faccia, oltre a essere ortogonale al primo, dovrà anche essere parallelo al lato del primo piano.



Iconografia del cantiere medievale

Le operazioni di rifilatura degli altri bordi e di spianatura delle altre facce procederanno poi nello stesso modo. La lavorazione più facile è, ovviamente, quella della faccia corrispondente al verso, mentre in quella coincidente con il 'contro' la disponibilità della roccia a rompersi è assai minore. Generalmente gli scalpellini preparavano i conci a piede del muro, come attesta la documentazione scritta e iconografica, anche per meglio collegare il loro lavoro con quello dei 'posatori', cioè dei muratori che ponevano in opera le pietre; tuttavia non mancano casi in cui la squadratura dei conci veniva operata già in cava, o comunque lontano dalla zona del cantiere.

Un simile procedimento è stato utilizzato per la fornitura dei blocchi ai cantieri di alcune cattedrali gotiche del Nord della Francia. Lo hanno dimostrato specifiche ricerche, dalle quali sono emersi singolari fenomeni di standardizzazione nelle misure dei conci utilizzati sia per le murature, sia per i pilastri, sia per le volte. Tale procedimento rendeva indipendente il lavoro degli scalpellini e dei muratori, (che per la posa in opera erano talora guidati da piante o schemi di montaggio), e, soprattutto, consentiva ai lapicidi di lavorare anche durante i mesi invernali, quando il cantiere era fermo.

In definitiva, da quanto fin qui esposto, si comprende come lo studio delle opere murarie non possa essere disgiunto da quello della litotecnica; l'aspetto esteriore dei muri, infatti, dipende strettamente dal grado di lavorazione delle pietre e quest'ultima non è che il prodotto finale di un ciclo produttivo, più o meno complesso, nel quale entrano in gioco diverse figure artigianali.

## 6. MODANATURE E SCULTURE

---

Lavorazioni più complesse sono alla base degli elementi più elaborati: architravi, stipiti, cornici modanate, capitelli, rilievi, oppure vere e proprie sculture a tutto tondo.

Gli strumenti necessari per la realizzazione di tali pezzi non sono molto diversi da quelli utilizzati per l'estrazione e per la squadratura delle pietre: scalpelli, punte, gradine e relativi percussori; la differenza è però costituita dalla loro vasta gamma dimensionale, necessaria per ottenere anche i dettagli più piccoli. Altri strumenti utilizzati per la scultura sono il tornio (impiegato per la pietra a partire dal XVII secolo) e il trapano. Quest'ultimo era già in uso nella preistoria, per forare vaghi (o perline) da collana: era costituito da affilate punte di selce, opportunamente fissate su un'asticciola che veniva fatta girare velocemente fra le due mani.

Sfruttando questo principio in età classica vennero realizzati il trapano ad arco (o violino) e il trapano a corda, leggermente diversi per il sistema di trasmissione del movimento. Entrambi erano infatti costituiti da una punta fissata su un'asta; nel primo caso però il movimento veniva prodotto arrotolando la corda attorno all'asta e muovendo l'arco avanti e indietro; nel secondo, invece, il trapano era tenuto da un artigiano, mentre i capi della corda erano retti da un aiutante e mossi velocemente avanti e indietro; questo sistema richiedeva l'impiego di due persone anziché di una, ma permetteva una maggiore libertà di movimento. In età medievale venne introdotto il trapano ad asta, costituito ancora da uno scalpello inserito su un'asta di metallo o legno, ma azionato con una traversa inserita orizzontalmente, mossa dall'alto verso il basso. Più tardi venne introdotta la cosiddetta 'trivella gallica', costituita da una manovella ad angoli retti, tenuta con due mani.

Per la levigatura delle superfici si usavano invece raspe e materiali abrasivi, come le arenarie e la pietra pomice; mentre la lucidatura finale era generalmente ottenuta con abrasivi più fini, come l'ematite macinata, detta anche 'rossetto'. Le tracce degli strumenti si possono riconoscere sia in opere incompiute, sia in quelle che presentano zone non finite, magari sul retro o comunque nelle parti destinate a non essere viste.

In generale, nei lavori di scultura, la prima fase era eseguita con punta grossa, tramite la quale si operava una preliminare aggressione della materia, per arrivare a una sbazzatura del pezzo. In una seconda fase si procedeva a una definizione maggiore della forma, utilizzando strumenti più fini (scalpelli a taglio diritto e rotondo, gradine, trapano) che asportavano piccole porzioni di materia. In una terza fase si usavano strumenti a taglio ancora più piccolo, per rendere la modellatura dei particolari. Nella politura, infine, la pietra, che aveva raggiunto ormai le forme definitive, interessava soltanto come superficie, e veniva progressivamente lisciata e lucidata, cancellando i segni degli strumenti usati in precedenza. Come nelle operazioni estrattive e nelle altre lavorazioni, i caratteri della roccia e dei piani di divisibilità, erano il presupposto fondamentale per ogni scultore; di

conseguenza la direzione in cui la lavorazione era maggiore veniva fatta coincidere con quella del 'verso'.

Nelle rocce dure, come quelle magmatiche, silicatiche, non è possibile realizzare una lavorazione di dettaglio, che dia il senso del movimento: tali pietre sono state scelte quando si volevano ottenere opere scultoree caratterizzate da una notevole rigidità, e tali da dare il senso della durata nel tempo; è il caso, ad esempio, delle statue dei faraoni dell' Antico Egitto o di quelle degli imperatori dell'età tetrarchica, realizzate in granito o in porfido. La scelta di tale materiale ben si prestava alle raffigurazioni frontali, più adatte a esprimere la ieraticità e il distacco dal mondo terreno dei personaggi-simbolo del potere; meno interessava, evidentemente, la resa realistica dei tratti del volto, impossibile da ottenere con tali rocce, che impediscono di realizzare un distacco netto dal piano di fondo. La conquista della raffigurazione umana realistica, con la scultura di età greca e romana e, più tardi, gotica e rinascimentale, è necessariamente legata a un notevole sfruttamento delle rocce calcaree e dei marmi carbonatici, caratterizzati da una minore durezza.

Sia nell'antichità che nel Medioevo, o nelle epoche successive, i lavori di scultura potevano avvenire in cantiere, oppure in apposite botteghe, anche se non mancano testimonianze (soprattutto per l'età romana) di lavorazioni portate a uno stadio assai avanzato già in cava.

Numerose fonti iconografiche attestano la presenza di modanatori e scultori intenti a produrre elementi architettonici o capitelli nei pressi di un edificio in costruzione, all'aperto o protetti sotto apposite tettoie. Esistono anche suggestive prove archeologiche del loro operato, quali i 'graffiti di cantiere': disegni tracciati sul pavimento, oppure sulle pareti, che riproducono timpani, archi, capitelli, elementi di finestre, generalmente in scala 1:1. Questi tracciamenti erano in uso sia in età classica, come attesta quello assai famoso relativo al cantiere del Pantheon, realizzato a terra, sia in età medievale, come provano quelli celebri rinvenuti a Reims, su una parete. A Limoges, Narbonne, Clermot-Ferrand graffiti in scala reale relativi a profili di finestre, portali, guglie, pinnacoli, e ad altri elementi architettonici modanati, erano stati riprodotti, sul pavimento della terrazza superiore, negli spazi rimasti liberi fra gli archi rampanti. È assai probabile, come sostengono alcuni studiosi, che essi rappresentassero il disegno di base sul quale venivano costruite le sagome lignee utilizzate dai lapidici.

L'uso di modelli in argilla o in gesso era indispensabile per la scultura a tutto tondo; ripensamenti, ritocchi, trasformazioni, impossibili da realizzarsi con la pietra, erano invece permessi con questo genere di materiali. Solo quando il modello era pronto poteva essere trasferito nella pietra, con le stesse dimensioni o in scala maggiore. Era questo un lungo lavoro che si basava su sistemi di misurazione tridimensionali, necessari a riportare le proporzioni e le fattezze del modello con precisione. Leon Battista Alberti, ad esempio, descrive un sistema complesso per ricopiare il prototipo di una figura a tuttotondo, basato su una ruota graduata, da porre sopra la statua, per poi misurare tutti gli angoli e le distanze fra i punti salienti.

Esistevano però anche sistemi più semplici, basati su rapportatori costituiti da 'sonde', posizionate su tre punti fissi di riferimento, in base ai quali si trasferivano misure e proporzioni dal modello alla pietra. Spesso questa parte più ripetitiva del lavoro veniva eseguita da apprendisti e aiutanti, mentre i 'maestri', dopo avere eseguito il modello, si limitavano a completare le rifiniture e a curare i dettagli dell'opera terminata. Rari erano gli artisti che, come Michelangelo, non usavano modelli, perché dotati di una straordinaria capacità di realizzare il progetto direttamente nella pietra.

## 7. PRINCIPALI CAUSE DI DEGRADO

---

Finché una roccia non viene scelta e prelevata dall'uomo, continua a far parte della litosfera e, in quanto tale, resta sottoposta alle lente trasformazioni geologiche e agli equilibri che regnano nella crosta terrestre. È solo dopo la sua estrazione e il suo impiego nell'architettura che inizia ad essere esposta a modificazioni molto veloci, dovute a vari agenti antropici o naturali. Ciò equivale a dire che l'impiego di una roccia dà avvio alla storia del suo degrado, e che tale processo risulta inscindibile dalla storia di ogni edificio.

Lo studio del degrado dei materiali lapidei può essere di due tipi: uno semplicemente descrittivo, finalizzato soprattutto a interventi pratici e uno più propriamente conoscitivo, volto a comprendere le cause dei vari tipi di degrado e a classificarne i vari agenti. Per la descrizione degli effetti e della morfologia dei fenomeni di degrado si utilizzano definizioni elaborate dal NORMAL, unicamente allo scopo di unificare la terminologia e non per dare una spiegazione delle cause dei vari tipi di degrado. Si consideri infatti che molti fenomeni sono dovuti a un concorso di più cause, oppure che le stesse cause sono all'origine di fenomeni diversi, pertanto è parso più utile mettere a punto una classificazione basata sull'aspetto fenomenologico del degrado, tale da aiutare gli operatori o gli studiosi a fornire una descrizione universalmente riconosciuta.

Le definizioni Normal possono essere così suddivise:

- 1) Fenomeni che producono apporto di materiale estraneo, i quali possono:
  - non trasformare i materiali originali
  - trasformare i materiali originali
- 2) Fenomeni che producono asporto di materiale originale
- 3) Fenomeni che non producono né asporto né apporto di materiale.

Il degrado per apporto, senza alterazione dei materiali originali avviene nei casi seguenti:

- deposito superficiale di polveri (particellato atmosferico);
- concrezioni, formate per azione dei carbonati trasportati in soluzione dall'acqua e ri-depositati in superficie. In questi casi l'acqua evapora e i carbonati cristallizzano all'esterno della muratura; si tratta perciò di un degrado essenzialmente estetico;
- macchie, dovute soprattutto alla vicinanza di metalli. Esse sono originate dal deposito, nei pori superficiali, di idrossidi di ferro, o carbonati di rame, trasportati in soluzione dall'acqua, ma che non alterano la roccia;
- la scialbatura, effettuata in passato per proteggere il materiale e in particolar modo il marmo, può causare la formazione di pellicole di carbonato di calcio;
- anche le patine organiche, non portano alterazioni. Sono dovute alla presenza di proteine o di grassi (oli dati in passato, ad esempio, oppure derivati dal grasso delle mani). In alcuni casi possono essere pulite con solventi chimici, ma poiché non alterano i materiali, possono anche essere lasciate sui monumenti, dei quali manifestano lo spessore degli anni. Gli

ossalati, ad esempio, di colore marroncino, sono dovuti alla reazione del carbonato di calcio con l'acido ossalico. Quest'ultimo costituisce il tipo più semplice di acido organico, ed è molto stabile. La sua formazione può essere legata a tre tipi diversi di cause: presenza di composti organici (proteine od oli protettivi) degradati in ambiente atmosferico, al contatto con i carbonati; degrado di licheni; presenza di ossalati dati nel secolo scorso come protettivi.

Nel degrado per apporto che causa anche alterazioni dei materiali originali, rientrano invece i seguenti casi:

- formazione di patine biologiche (soprattutto in aree umide), costituite da colonie di batteri o da alghe monocellulari. La loro azione sul materiale lapideo è molto lenta, mentre sono invece più dannose sui legni;
- incrostazioni di licheni, funghi o muschi, che sono spesso causa di aggressioni maggiori alle rocce, specialmente attraverso la soluzione chimica di alcuni minerali, e in quanto trattengono le acque piovane;
- presenza di vegetazione costituita da piante superiori, dannosa per la penetrazione delle radici nelle fratture;
- alterazione cromatica, che si verifica soprattutto su rocce carbonatiche e che è dovuta alla presenza di ferro non ossidato, che in ambiente atmosferico si ossida e passa dalla colorazione grigia a quella gialla-arancione-rossastra. È un fenomeno che interessa solo la parte superficiale della pietra, per uno spessore di pochi millimetri;
- la solfatazione dei carbonati, è invece un pericoloso tipo di degrado chimico, riconoscibile dalla nota crosta nera, che si comporta come una sorta di 'spugna' esterna la quale trattiene l'acqua e sintetizza acido solforico, producendo solfato di calcio a spese del carbonato, con grande velocità: si pensi che da un millimetro di carbonato si possono formare anche 5 millimetri di solfato. Pertanto è ben diversa dalla cosiddetta 'patina del tempo': è un vero e proprio laboratorio distruttivo, che disgrega i materiali lapidei carbonatici. Il gesso (o solfato di calcio biidrato) che si forma è inoltre un sale solubile e può produrre danni se trasportato dall'acqua all'interno del materiale, e se ricristallizza poi nei pori;
- le efflorescenze sono depositi superficiali di sali solubili trasportati dalle acque circolanti nei muri;

Il degrado per asporto di materiale originale ha luogo nei seguenti casi:

- quando l'alterazione chimica della roccia crea composti solubili, come il bicarbonato di calcio, o asportabili, come i minerali argillosi, l'acqua piovana provoca una corrosione delle superfici;
- quando certi vegetali, come i licheni, scavano con il tallo le rocce carbonatiche, si verifica una corrosione puntiforme, chiamata pitting;
- se le acque circolanti nei muri depositano sali solubili all'interno della roccia, disgregandola, il vento e la pioggia battente possono asportare le particelle separate creando una alveolizzazione, o una polverizzazione;

- i sali solubili o il gelo possono invece agire nelle microfratture prodotte da sbalzi termici o da lavorazioni, creando esfoliazioni e scagliature. Anche azioni meccaniche dovute all'uomo producono, per urti violenti, delle mancanze di parti di roccia, o, per attrito, l'usura delle superfici;
- il vento può provocare un'abrasione del materiale lapideo, la cui gravità dipende anche dal tipo di roccia, o meglio, dalla resistenza dei minerali che la compongono e dal tipo di aggregazione esistente fra i cristalli;
- gli sbalzi termici, come si è visto, possono produrre in certe rocce una disgregazione che interessa lo strato superficiale: caratteristica è quella dei marmi carbonatici che dà luogo al cosiddetto "marmo cotto";
- qualsiasi degrado chimico o fisico con asporto di materiale originale può avvenire in modo differenziato, se la roccia presenta zone con resistenza maggiore di altre al degrado stesso.

Il degrado senza asporto né apporto di materiale avviene, infine, nei seguenti casi:

- fratturazioni, che possono essere prodotte da agenti fisici naturali o dall'uomo, senza che nulla venga asportato;
- rigonfiamenti dello strato esterno possono essere prodotti da percussioni perpendicolari alle superfici, che causano microfratture interne, che con il tempo possono dare luogo a distacchi;
- deformazioni possono verificarsi con il tempo nei materiali litici tagliati in lastre sottili ed esposti agli agenti atmosferici.

Più complesso è invece lo studio delle varie cause del degrado. Gli agenti naturali possono provenire dall'ambiente atmosferico (come i venti e le piogge) o dal sottosuolo (come le infiltrazioni d'acqua) e agiscono, rispettivamente, sulle coperture e sulle pareti, oppure sulle fondazioni degli edifici.

Se si eccettuano gli agenti detti parossistici (frane, vulcani, terremoti, alluvioni, cicloni) che provocano distruzioni improvvise e che possono essere contrastati soltanto da un'adeguata prevenzione, le altre cause del degrado provengono, per lo più, da agenti che esercitano un'azione lenta, ma continua. Possono essere di tipo fisico, chimico, biologico, e per comprendere come agiscono sui materiali lapidei è necessario conoscere i caratteri delle varie rocce. Esistono poi gli agenti antropici che possono essere lenti, come l'usura, oppure avere un effetto violento, come gli incendi, le demolizioni, i danni bellici di vario tipo.

Tra quelli naturali gli agenti fisici, rivestono un'importanza maggiore di quanto non si creda comunemente; anzi, si potrebbe forse affermare che in molti casi la loro azione apra la strada al degrado chimico consentendogli di penetrare più profondamente.

Il vento, cioè aria compressa che viaggia a forte velocità, non è in grado di asportare parti di una roccia sana, ma solo materiale già disgregato; per contro può alzare o spostare parti delle coperture.

Poiché ha un movimento parallelo al suolo, può sollevare granuli duri e trasportarli a velocità anche elevate. Si calcola che i venti che viaggiano a 80/100 km/h siano in grado di portare minerali della grandezza di due millimetri. Fra questi il quarzo, presente in quasi tutti i suoli, è

fra i minerali più duri; se trasportato a lungo da forti raffiche può consumare per abrasione le superfici esterne.

Il vento può inoltre favorire l'evaporazione dell'acqua circolante nei muri creando disgregazioni di materia dovute alla cristallizzazione, dentro i pori, dei sali trasportati dall'acqua stessa.

Gli sbalzi termici, soprattutto se si ripetono senza interruzioni per un'intera stagione, possono provocare micro-fratturazioni di alcune parti lapidee, e particolarmente degli angoli. Ciò è dovuto al fatto che il calore causa, in tutti i materiali, una leggera dilatazione; nelle zone d'angolo, però, quando scende bruscamente la temperatura, viene dissipato con una velocità maggiore che altrove. Se ciò si ripete per anni tali microfratture possono essere tali da favorire la penetrazione dell'acqua e quindi da provocare il distacco delle porzioni di pietra corrispondenti alle zone più esposte alle differenze di temperatura.

Se agiscono su rocce costituite da minerali con un diverso indice di dilatazione, nell'ambito dello stesso cristallo, gli sbalzi termici possono provocare un degrado differenziato. Ciò accade, ad esempio, nei marmi con venature grigie, dovute alla presenza di grafite; una superficie di questo materiale può presentarsi disgregata nella parte bianca, ma con le venature grigie in rilievo. Ciò è dovuto al fatto che mentre i cristalli di calcite (che ha diversi indici di dilatazione) possono venire staccati dagli sbalzi termici, la grafite (caratterizzata invece da una dilatazione termica uguale in tutte e tre le direzioni dello spazio) è in grado di resistere di più. L'aspetto assunto in seguito alla disgregazione per sbalzi termici viene definito dai cavaatori di Carrara 'marmo cotto'.

I calcari a grana finissima resistono di più agli sbalzi termici a causa della minore differenza di dilatazione dei singoli cristalli.

I fenomeni di gelo-disgelo sono all'origine di altri tipi di degrado fisico, collegati all'azione dell'acqua. Poiché allo stato solido essa aumenta leggermente di volume, se gela all'interno di una piccola frattura, può provocare delle spinte che tendono ad aumentarne le dimensioni. Talora la microporosità (sia essa naturale o dovuta alla lavorazione o ad azioni di degrado) può generare fenomeni di gelività.

L'azione degli agenti chimici del degrado dà luogo a risultati differenti a seconda della composizione delle rocce.

La maggior parte di essi proviene dall'atmosfera, la cui composizione naturale comprende: ossigeno (O<sub>2</sub>) prodotto dagli esseri vegetali; anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) emessa dai vulcani e dall'ossidazione di combustibili e di sostanze organiche; azoto (N); idrogeno (H) e, nelle fasce più esterne, ozono (O<sub>3</sub>), che tende a scindersi in ossigeno molecolare (O<sub>2</sub>) e atomico (O), molto attivo. Di fondamentale importanza per il degrado chimico è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), che combinata con acqua (H<sub>2</sub>O) dà luogo all'acido carbonico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). L'acqua è l'agente di degrado più importante e pericoloso, sia a livello fisico che chimico. In quest'ultimo caso può essere considerata il più diffuso solvente che esista in natura. Oltre a favorire importanti reazioni, (bicarbonatazione, solfatazione, deposito di sali), la sua natura eteropolare è alla base di altri fenomeni: i legami idrogeno delle sue molecole possono scomporre i composti ionici con i quali viene a contatto.

L'azione dell'acqua è di tale rilevanza che neppure in natura esistono rocce sane in superficie, ma sempre alterate.

Se presente nelle fondazioni, l'acqua può dare luogo a fenomeni di risalita per capillarità, dovuti alla porosità, presente in tutti i materiali da costruzione, eccetto il vetro. Tale meccanismo si verifica in presenza di pori molto piccoli; in tal caso le polarità elettriche delle molecole d'acqua vengono attratte da quelle di segno opposto presenti nelle pareti dei pori e riescono a sollevare (anche per alcuni metri) un piccolo volume d'acqua. Infiltrazioni, falde del terreno, o inefficienti sistemi di smaltimento delle piogge, possono causare una immissione costante di acqua nelle fondazioni; in tal caso la risalita può superare anche i quattro metri da terra. A tale altezza fuoriesce dalle pareti ed evapora depositando in superficie tutti i sali portati in soluzione. Questi ultimi possono causare danni di lieve entità, soprattutto di carattere estetico, come le efflorescenze. Se però l'evaporazione dell'acqua avviene in maniera veloce, i sali trasportati cristallizzano non solo all'esterno del muro, ma anche all'interno, provocando disgregazioni. Questo fenomeno dà luogo ad alveolizzazioni, esfoliazioni, o distacchi di materiale.

Nelle rocce carbonatiche l'azione chimica più importante è la bicarbonatazione. La pioggia, poiché contiene CO<sub>2</sub>, trasforma il carbonato di calcio in bicarbonato, composto sul quale l'acqua esercita una veloce azione solvente. Per rendersi conto dell'importanza di questo tipo di degrado, basti pensare che tale fenomeno è lo stesso che produce il carsismo. Pertanto tutti i materiali costituiti da carbonato di calcio, se l'acqua non scorre ma ristagna, sono esposti, in caso di pioggia, a tale degrado. Sempre questo fenomeno è causa, ad esempio, dell'asportazione della frazione carbonatica delle ardesie, formate sia da argille (silicati), sia da carbonato di calcio. Tuttavia la patina argillosa che si viene a formare in superficie è in grado di proteggere dall'alterazione i carbonati sottostanti. Infatti quando l'argilla viene attraversata dall'acqua, lo strato più superficiale si satura; non è più in grado di riceverne e quindi agisce da impermeabilizzante. I tetti di ardesia non vanno perciò inclinati troppo, in modo da evitare che l'acqua scorrente porti via lo strato superficiale di argilla, il quale permette alle sottili lastre di durare anche cento o duecento anni.

I sali solubili che producono le efflorescenze possono essere disciolti nel suolo, come i nitrati, o nei materiali stessi delle murature, come i solfati. Nell'atmosfera si trovano anche radicali liberi (ad esempio di cloro, nelle zone vicine al mare); la pioggia sulle rocce carbonatiche può portare alla formazione di cloruro di calcio, ma si tratta di un fenomeno molto lento, che tutt'al più agisce sulle tinte a calce.

Le rocce silicatiche sono invece soggette a un tipo particolare di alterazione chimica, che viene definito 'caolinizzazione'. In questo caso l'acqua agisce come solvente chimico sui feldspati; non è in grado di sciogliere i legami covalenti che uniscono la silice e l'allumina, e che sono molto resistenti, ma può asportare gli atomi di sodio (Na) e di potassio (K), uniti agli atomi di ossigeno attraverso legami ionici. Se una molecola di silicato cede un atomo di

sodio o di potassio e lo sostituisce con un ossidrile dell'acqua (OH), si forma un nuovo silicato: la caolinite, un minerale argilloso, dotato di minore resistenza meccanica. La formazione della crosta nera non è dovuta ad agenti naturali, ma all'inquinamento, che ha incrementato il fenomeno delle piogge acide. Come è noto, l'atmosfera contiene quantità sempre maggiori di CO<sub>2</sub>, prodotte dai combustibili, che sono per lo più generati da sostanze organiche fossili. Oltre alla CO<sub>2</sub> il carbone fossile e il petrolio emettono nell'atmosfera anche eccessive quantità di zolfo, originato anch'esso dalla fossilizzazione di antichi esseri viventi.

L'elevata quantità di CO<sub>2</sub> dà luogo alla formazione di acido carbonico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), mentre l'anidride solforosa (SO<sub>2</sub>), combinandosi con un atomo di ossigeno, produce anidride solforica (SO<sub>3</sub>). Quest'ultimo composto può reagire con l'acqua e dare origine all'acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), che è altamente corrosivo. Tale reazione non può avvenire, però, nell'atmosfera, poiché, anche per produrla in laboratorio, è necessaria la presenza di catalizzatori, costituiti per lo più da metalli. Dunque l'acido solforico che attacca i materiali lapidei carbonatici, non può provenire direttamente dall'atmosfera. La sua reazione col carbonato di calcio produce il solfato di calcio biidrato (cioè il gesso), che di per sé è bianco. Il colore nero della crosta sembra quindi essere dovuto alla presenza di carbonio non ossidato e di metalli dovuti all'inquinamento atmosferico. Pertanto la formazione dell'acido solforico non pare avere origine sul materiale stesso, ma sembra favorita dai metalli, che agirebbero da catalizzatori. Si è inoltre osservato che la formazione della crosta nera non avviene nelle zone sottoposte alla pioggia battente; infatti l'azione fisica dell'acqua (che ha un peso di un chilo a litro) asporta il solfato e impedisce il ristagno, il quale consente le reazioni chimiche di solfatazione.

Tra i più comuni tipi di agenti biologici si trovano invece batteri, alghe, funghi e licheni. Alcune specie di licheni sono dannose, soprattutto per i carbonati; l'azione di altre specie, invece, si limita alla formazione di patine superficiali (verdi, nere) che però non alterano eccessivamente la materia. Oltre a licheni ed alghe i materiali litici sono soggetti anche all'attecchimento di muschi, muffe, piante erbacee e addirittura arboree. Le piante superiori invece provocano problemi meccanici con il loro ancoramento, dovuto alla penetrazione progressiva delle radici che poi ingrossano producendo fratture.

## 8. NOTA BIBLIOGRAFICA

---

Alle rocce e alla loro estrazione e lavorazione viene dedicato ampio spazio in vari manuali dedicati alla storia dei materiali da costruzione, come quello classico di DAVEY 1965, o i più recenti e aggiornati di POLATI, SACCO 1990 e di MENICALI 1992 (il primo più incentrato sui caratteri chimico-fisici e il secondo sugli aspetti storici). Per la classificazione genetica e composizionale delle rocce, oltre ai manuali correnti di Scienze della Terra, è assai utile la lettura del breve saggio di MANNONI 1986. Sui caratteri di durezza e tenacità, lavorabilità, resistenza meccanica, peso specifico, indici di porosità, dilatazione termica, è ancora consigliabile la consultazione del classico manuale di litologia applicata di CALVINO 1963. Sui litotipi utilizzati tradizionalmente nell'edilizia in Italia si veda il volume di RODOLICO 1953.

Della vastissima bibliografia riguardante le attività estrattive indichiamo qui solo alcuni dei lavori più utili per acquisire una conoscenza di base. Un panorama generale delle più antiche testimonianze di coltivazione della pietra si può trovare in BROMEHEAD 1961; per le cave dell'antico Egitto si vedano gli studi di ENGELBACH, CLARKE 1930; WAELEKENS 1990; WAELEKENS, HERZ, MOENS, 1992; per la Grecia antica è ancora assai valido il testo di MARTIN 1965. Un esempio di diffusione dell'opera quadrata di età ellenistica nel Mediterraneo occidentale è stato magistralmente studiato da BESSAC 1980. Per l'epoca romana, nel ricco panorama di lavori disponibili, si segnalano il manuale di ADAM 1989 e il volume di PENSABENE 1995, dove si possono trovare le notizie essenziali circa i caratteri tecnici e amministrativi delle cave; per un maggiore approfondimento è invece utile consultare BRAEMER 1986. Un corpus dei marchi di cava di Ostia e Roma, fonte ricchissima di informazioni sugli aspetti amministrativi del lavoro di estrazione, si trova in BACCINI LEOTARDI 1979. Fra i numerosi contributi monografici dedicati allo studio di singole cave, si ricordano inoltre: D'AMBROSI 1955, sul calcare di Aurisina (Trieste); DOLCI 1980 e L.T. MANNONI 1984 sul marmo lunense; LAMBRAKI 1980 sul cipollino di Karysto; RAKOB 1993 sul 'giallo numidico' di Chemtou; BESSAC 1996, sulle cave romane e tardoantiche dei calcari di Nîmes. Un po' meno numerose sono invece le ricerche che riguardano l'estrazione della pietra in età postclassica; si segnalano comunque i saggi di WARD PERKINS 1971, sull'età altomedievale, quello di MANNONI 1992 sulle cave medievali di Luni e di MANNONI, RICCI 1992, sulla cava di calcare bioclastico di S. Antonino di Pertì; i sistemi di estrazione del calcare di Nîmes in età medievale sono inoltre esaminati accuratamente nel citato volume di BESSAC 1996; sull'ardesia ligure si veda infine SAVIOLI 1988. Più numerose sono invece le ricerche d'archivio (atti notarili, capitolati di costruzioni, contabilità di cantieri) dai quali sono stati ricavati dati sull'estrazione e la fornitura della pietra in età medievale. Molti aspetti storico-economici dell'estrazione del marmo di Carrara nel Medioevo sono trattati nella monografia curata dalla KLAPISCH ZUBER 1969, sulla base di un'accurata analisi delle fonti archivistiche e in particolare di quelle notarili. Un contributo più recente è invece offerto, ad esempio, dal saggio di ALEXANDER 1995, dove si esaminano le cave poste nel sud est dell'Inghilterra, che rifornirono importanti cantieri come quello della cattedrale di Lincoln.

Per gli strumenti utilizzati nelle varie lavorazioni della pietra è assai utile il manuale di ROCKWELL 1989, ma imprescindibile, per chiunque voglia affrontare uno studio sulla litotecnica dell'antichità o del periodo postclassico, è il repertorio raccolto in BESSAC 1986, che ricostruisce (sulla base di fonti dirette e indirette di vario tipo) la storia di tutti gli strumenti

utilizzati nel bacino del Mediterraneo, dall'antichità fino all'industrializzazione; per ciascuno di essi viene descritto il modo di utilizzazione e vengono riprodotte le tracce lasciate sulla pietra. La trattazione è corredata da un diagramma cronologico riassuntivo che evidenzia, per ogni strumento, l'epoca di apparizione e il periodo d'uso. Analoghi diagrammi sono stati elaborati su base regionale; si veda MANNONI 1993 per la Liguria e BIANCHI, PARENTI 1991, per gli strumenti attestati nel Medioevo in area toscana.

Una utilissima raccolta di tutte le fonti iconografiche relative al cantiere di età medievale si trova in BINDING, NUSSBAUM 1978.

Per i problemi legati al trasporto molti dati si trovano nei testi più sopra citati concernenti le fasi estrattive. Si segnalano comunque, fra i lavori dedicati a situazioni specifiche, il volume di HEIZER FLEMING 1989, incentrato sui trasporti pesanti nell'antichità; il saggio di CHAPELOT 1975, sui cantieri borgognoni in età bassomedievale e quello di BOATO 1991, relativo all'edilizia genovese del XVI e XVII secolo. Notizie sui problemi di trasporto in età medievale, soprattutto per l'Italia centrale, si trovano in PARENTI 1995.

Circa le lavorazioni della pietra finalizzate alle opere murarie è fondamentale la lettura del saggio di MANNONI 1997, dove si analizza accuratamente il rapporto fra litotecnica e tessiture murarie. Sulla standardizzazione nella produzione delle pietre squadrate (e delle modanature architettoniche) in alcuni cantieri di cattedrali gotiche, cfr. KIMPEL 1977.

Per le tecniche e gli strumenti usati dagli scultori, il manuale più esaustivo è quello di ROCKWELL 1989. Per l'uso dei graffiti di cantiere si vedano il saggio di HASELBERGER 1994, relativo al cantiere per la costruzione del Pantheon; quello, sempre utile, di DENEUX 1925, sulla cattedrale di Reims e il più recente studio di CLAVAL 1988, incentrato sul cantiere della cattedrale gotica di Clermont-Ferrand.

Per il degrado dei materiali lapidei si vedano le pubblicazioni del NORMAL, comitato nazionale formato dal CNR e dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali, per la normalizzazione delle analisi diagnostiche sulla natura e sul degrado dei materiali lapidei.

## 9. BIBLIOGRAFIA

---

- MANUALI PER L'ARCHEOLOGIA- Collana diretta da Gian Pietro Brogiolo e Gloria Olcese - Editrice S.A.P. Società Archeologica Padana s.r.l., 2000
- DAVEY N. 1965 Storia del Materiale da costruzione, Milano, ed. Il Saggiatore.
- POLATI I. SACCO G. Scienza dei materiali, Bergamo, 1990, ed. Juvenilia
- MENICALI U. 1992 I materiali dell'edilizia storica. Tecnologia e impiego dei materiali tradizionali, Roma, ed. Nis.
- MANNONI T. 1986 Definizione del termine marmo e cenni storici, in *Il marmo nel mondo*, Carrara, pp. 11-19 (Ripubblicato in MANNONI T. *Caratteri costruttivi dell'edilizia storica*, Genova, 1994/a, pp. 105-110).
- CALVINO F. 1963 *Lezioni di litologia applicata per studenti in architettura*, Padova, 1963, ed. Antonio Milani.
- RODOLICO F. 1953 *Le pietre delle città d'Italia*, Firenze, ed. Le Monnier.
- BROMEHEAD C.N. 1961 *Coltivazione delle miniere e delle cave*, in SINGER ET ALII *Storia della Tecnologia*, Torino, ed. Boringhieri, vol. I, pp.567-609.
- BROMEHEAD C.N. 1961/a *La tecnica delle miniere e delle cave fino al diciassettesimo secolo*, in AA.VV. *Storia della Tecnologia*, Torino, ed. Boringhieri, pp. 1-40.
- ENGELBACH R., CLARKE S. 1930 *Ancient Egyptian Masonry*, Oxford.
- WAELEKENS M. 1990 (a cura di), *Pierre éternelle du Nil au Rhin. Carrières et préfabrication*, Bruxelles.
- WAELEKENS M., HERZ N., MOENS, L., 1992 (a cura di) *Ancient stones: quarrying, trade and provenance. Interdisciplinary Studies and Stone Technology in Europe and Near East from the Prehistoric to the Early Christian Period*, Lovanio, ed. Leuven University Press.
- MARTIN R. 1965, *Manuel d'Architecture grecque*, vol.I, *Matériaux et techniques* Paris.
- BESSAC J.C. 1980 *Le rempart hellénistique de Saint-Blaise (Saint-Mitre-les-Remparts, B. du Rh.)*: Technique de construction, in "Documents d'Archeologie Meridionale", n 3, pp.137-157.
- ADAM J . P. 1989 *L'arte di costruire presso i romani*, Milano, ed. Longanesi (ed. or. Paris, 1984).
- PENSABENE P. 1995 *Le vie del marmo*, Roma, *Itinerari ostiensi* n.VII.
- BRAEMER F. 1986 *Les ressources minérales et l'histoire de leur exploitation (Colloque du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques 2, 1983)*, Paris.
- BACCINI LEOTARDI P. 1979 *Marmi di cava rinvenuti a Ostia e considerazioni sul commercio dei marmi in età romana*, *Scavi di Ostia*, X, Roma.
- D'AMBROSI C. 1955 *La cava romana di Aurisina presso Trieste*, *Istituto di Mineralogia* n.3, Trieste.
- DOLCI E. 1980 *Carrara: cave antiche*, Carrara.
- MANNONI L. e T. 1984 *Il marmo. Materia e cultura*, Genova, ed Sagep (1° ed. 1978).

- LAMBRAKI A. 1980 Le cipolin de la Karystie. Contribution a l'étude des marbres de la Grèce exploités aux époques romaine et paléochrétienne, in "Revue Archéologique" (fasc. 1), pp. 31-62.
- RAKOB F. 1993 Chemtou, le cave del marmo numidico, in AA.VV. Storia di Roma, III. 2., Torino, ed. Einaudi, pp.363-366.
- BESSAC J.C. 1996 La pierre en Gaule narbonnaise et les carrières du Bois de Lens (Nîmes): histoire, archéologie, ethnographie et techniques, Ann Arbor, Supplemento al "Journal of Roman Archaeology".
- WARD PERKINS J.B. 1971 Quarries and stoneworking in the Early Middle Ages, in Artigianato e tecnica nella società dell'Alto Medioevo Occidentale, Spoleto, Centro Italiano di Studi sull'Alto Medioevo, pp. 525-544.
- MANNONI T. 1992 Le tecniche di estrazione e di lavorazione del marmo nel Medioevo, in CASTELNUOVO E. (a cura di) Niveo de marmore , Genova, pp. 27-28 (Ripubblicato in MANNONI T. Caratteri costruttivi dell'edilizia storica, Genova, 1994/a, pp. 105-110).
- MANNONI T. RICCI R. 1992 La cava in pietra di Finale di Sant'Antonino di Perti, in "Archeologia Medievale", XIX, pp. 367-368.
- SAVIOLI L. 1988 Ardesia. Materia e cultura, Genova, ed. Sagep.
- KLAPISCH ZUBERT C. 1969 Les maitres du marbre. Carrare 1300-1600, Paris, 1969, Sevpen.
- ROCKWELL P. 1989 Lavorare la pietra. Manuale per l'archeologo, lo storico dell'arte e il restauratore, Roma, ed. Nis.
- BESSAC J.C. 1986 L'outillage traditionnel du tailleur de pierre de l'antiquité à nos jours, Paris, 1986, ed. CNRS.
- BIANCHI G. PARENTI R. 1991 Gli strumenti degli 'scalpellini'toscani. Osservazioni preliminari, in Le pietre nell'architettura: struttura e superfici, Atti del Convegno di Studi, Padova, pp.139-149.
- MANNONI T. 1993 Le tradizioni liguri negli impieghi delle pietre, in MARCHI P. (a cura di), Pietre di Liguria, Genova, ed. Sagep, pp. 37-44.
- BINDING G. NUSSBAUM N. 1978 Der mittelalterliche Baubetrieb nördlich der Alpen in Zeitgenössischen Darstellung, Darmstadt.
- HEIZER FLEMING R. 1989 L'età dei giganti. I trasporti pesanti nell'antichità, ed. Marsilio Erizzo.
- CHAPELOT O. 1975 La fourniture de la pierre sur les chantiers bourguignons (XIVe-XVe siècle), in 98e Congrès national des Sociétés savantes, Saint-Etienne, pp.209-224.
- BOATO A. 1991 L'uso della pietra da costruzione nelle murature genovesi del XVII secolo: produzione, trasporto, posa in opera, in Le pietre nell'architettura: struttura e superfici, Atti del Convegno di Studi, Padova, pp. 47-56.
- PARENTI R. 1995 I materiali del costruire in RESTUCCI A. (a cura di) L'architettura civile in Toscana. Il Medioevo, Milano, ed. A. Pizzi.
- MANNONI T. 1997 Il problema complesso delle murature storiche in pietra 1. Cultura materiale e cronotipologia, in "Archeologia dell'Architettura", II, pp. 15-24.
- KIMPEL D. 1977 Le développement de la taille en série dans l'architecture médiévale et son rôle dans l'histoire économique, in "Bulletin Monumental", 135 (III), 1977, pp. 195-222.

- HASELBERGER L. 1994 Ein Giebelriss der Vorhalle des Pantheon: die Werkrisse vor dem Augustusmausoleum, in "Mitteilungen des Deutschen Archaeologischen Institut, Roemische Abteilung", n.101, pp. 279-308.
- DENEUX H. 1925 Signes lapidaires et épures du XIII<sup>e</sup> siècle à la cathedrale de Reims, in "Bulletin Monumental", 84, pp. 99-130.
- CLAVAL F. 1988 Les épures de la Cathedrale de Clermont-Ferrand, in "Bulletin Archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques", n.s. 20-21, 1984-85, fasc. A (1988), pp. 7-58.