

Università degli Studi di Napoli “Federico II”



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Corso di Laurea in Ingegneria Edile

Tesi di laurea in Scienza e Tecnologia dei Materiali

**I materiali locali nella tradizione costruttiva
dell'Italia meridionale**

Relatore

Prof. Ing. Domenico Caputo

Candidato

Crescenzo De Simone

Matricola: N41/1956

Anno Accademico 2017/2018

Indice

Introduzione	1
Scopo della tesi	9
CAPITOLO 1. Sviluppo sostenibile e Bioedilizia	11
CAPITOLO 2. Ritorno alla tradizione e aspetti di possibili innovazioni	18
CAPITOLO 3. Censimenti dei materiali dalla tradizione costruttiva dell'Italia meridionale	27
3.1 I materiali lapidei: origine, proprietà, impieghi e classificazione	27
3.1.1 Pietre Vulcaniche e Marmi della Campania	35
3.1.2 Calcari e Calcareniti della Puglia	36
3.1.3 Le Pietre della Sardegna	37
3.2 Terra cruda: materiale, proprietà fisico-meccaniche e durabilità	38
3.2.1 Sistemi costruttivi in Sardegna	47
3.3 Laterizi: struttura e produzione	49
3.3.1 Laterizi tradizionali di uso comune	53
3.4 Materiali complementari: calce, produzione e proprietà. Le malte tradizionali	55
3.4.1 Malte tradizionali in Campania. Calce, Pozzolana e Cocciopesto	59
3.4.2 Malte tradizionali in Puglia. Calce e "Tufina"	64
3.4.3 Malte tradizionali in Sardegna. Il materiale "Terra" come legante	65
CAPITOLO 4. Regioni studio: Campania, Puglia e Sardegna	68
4.1 Campania	68
4.1.1 L'attività estrattiva tradizionale in Penisola Sorrentina	68
4.1.2 Le tradizioni costruttive nell'edilizia napoletana dell'Ottocento	72
4.1.3 Le tecniche costruttive nell'Area Flegrea: Rione Terra e Cuma	74
4.1.4 Produzione e impiego del laterizio fra Tarda Antichità e Medioevo	77
4.1.5 I materiali locali nella rigenerazione degli spazi urbani dei centri storici della Città Metropolitana di Napoli	79

4.2 Puglia	83
4.2.1 <i>Le rocce tenere pugliesi: materiali da costruzione ed ornamentali</i>	84
4.2.2 <i>La tecnica costruttiva delle "Volte a stella"</i>	87
4.2.3 <i>Architettura popolare pugliese: i "Trulli" delle Murge e di Valle d'Itria</i>	89
4.2.4 <i>Impiego del laterizio nell'edilizia pugliese del centro di Lucera</i>	91
4.3 Sardegna	93
4.3.1 <i>Il materiale litico: notizie storiche ed attività estrattive</i>	93
4.3.2 <i>Le tecniche murarie tradizionali nella Sardegna meridionale</i>	98
4.3.3 <i>La "Terra cruda", un materiale antico</i>	100
4.3.4 <i>Le argille da laterizi della Sardegna: materie prime e proprietà dei prodotti</i>	101
CAPITOLO 5. Schedatura dei risultati	104
5.1 Campania	104
5.1.1 <i>Tufo Giallo Napoletano</i>	104
5.1.2 <i>Ignimbrite Campana</i>	107
5.1.3 <i>Piperno</i>	108
5.1.4 <i>Lave vesuviane e flegree. La "Pietrarsa"</i>	109
5.1.5 <i>Pozzolana</i>	111
5.1.6 <i>Marmi e Travertini</i>	113
5.1.7 <i>Cocciopesto</i>	117
5.2 Puglia	119
5.2.1 <i>Pietra di Apricena</i>	119
5.2.2 <i>Calcarenite di Gravina</i>	121
5.2.3 <i>Tufo Calcareo</i>	122
5.2.4 <i>Pietra di Trani</i>	124
5.2.5 <i>Pietra Leccese</i>	125
5.3 Sardegna	127
5.3.1 <i>Granito</i>	127
5.3.2 <i>Trachite "auctorum"</i>	129
5.3.3 <i>Basalto</i>	130
5.3.4 <i>Pietra Cantone</i>	132

5.3.5 Marmo di Orosei	134
5.3.6 Terra cruda: "Adobe"	138
CAPITOLO 6. Cenni al degrado antropico	141
Conclusioni	143
Bibliografia	145

Introduzione

La tradizione costruttiva locale nell'Italia meridionale può vantare un'ampia varietà di materiali, classificabili in naturali e artificiali, distinguibili per tipo di roccia, per il legante o materia prima utilizzati, per il tipo di produzione e lavorazione, per caratteristiche proprie (fisiche, chimiche, meccaniche e tecnologiche) e per caratteristiche dei luoghi (sia geografiche sia culturali, nonché merceologiche). Essi costituiscono un ricco patrimonio non solo architettonico, ma anche storico-culturale.

L'elevato numero di materiali da costruzione dipende dal fatto che ognuno presenta delle particolari proprietà, che ne fanno preferire alcuni rispetto ad altri a seconda degli scopi per i quali devono essere utilizzati. I materiali non sono solo espressione e linguaggio della "funzione architettonica", ma anche segni della storia e dell'uomo, che possono presentarsi come risultato di intenzioni plastiche e percettive. È per questo che essi resistono ai cambiamenti, perché accanto ai nuovi materiali sono sempre presenti materiali e forme tecniche del passato difficili da sostituire¹. L'architettura del Mediterraneo è rimasta un punto di riferimento anche per le moderne tecniche costruttive che, spesso e volentieri, si rifanno ai caratteri tipologici presenti negli edifici di questa area geografica.

Frank Lloyd Wright descrive così i materiali da costruzione: *"... insita nella vera natura di ogni buon edificio, cioè di quel genere di costruzione chiamata Architettura, è la natura dei materiali impiegati nella costruzione. Altrettante, molteplici, diverse e affascinanti proprietà, quanti sono i differenti materiali che possono essere impiegati per erigere un edificio, qualificheranno, modificheranno e muteranno radicalmente, di continuo e con naturalezza, qualsiasi forma architettonica. Un edificio in pietra non sarà più, né sembrerà un edificio in acciaio. Un edificio rivestito di cotto non somiglierà più, né dovrà somigliare, a un edificio di pietra. Una casa in legno sembrerà esclusivamente quello che è, poiché glorificherà il materiale di cui è composta. Ma in un paese ricco in fatto di materiali vecchi e nuovi, gli architetti debbono esercitare una bene addestrata immaginazione per vedere in ogni materiale, sia naturale che artificiale o plastico, lo stile inerente ad esso. Tutti i materiali possono essere meravigliosi, e la loro bellezza dipende in gran parte o completamente dall'efficacia con la quale vengono utilizzati dall'architetto ..."* (Wright, 2003).

L'edilizia storica esprime dei contenuti formali e culturali attraverso le tecniche di esecuzione, espedienti costruttivi, materiali, abilità e lavorazioni proprie dell'ambiente storico e geografico che l'ha prodotta. Tanto gli architetti quanto gli artigiani edili attingevano ad un bagaglio comune di esperienze e di conoscenze costruttive. La tradizione si basa sul valore indiscusso dell'esperienza e viene trasmessa in tempi lunghi. L'evoluzione dei saperi e delle

¹ De Capua A. (2013). *Materiali per l'architettura*. Università degli studi Mediterranea di Reggio Calabria

abilità diventa “tradizione” soltanto quando l’esperienza, fondata sulla percezione della realtà affidata ai sensi, ne riscontra, nell’arco di alcune generazioni, l’utilità e la validità².

Le pietre naturali erano anticamente i materiali più utilizzati per la costruzione degli edifici e delle loro strutture portanti. Le prime architetture in pietra naturale risalgono al 2000 a.C. Nell’architettura antica di epoca Romana, Vitruvio descriveva nel suo trattato “*De Architectura*” le varie opere murarie in pietra, classificandole in questo modo: strutture a grandi blocchi, ovvero l’*Opus Siliceum* e l’*Opus Quadratum*; strutture miste, come l’*Opus Africanum* e l’*Opus Craticium*; ed infine strutture con pietre di piccole dimensioni, quali l’*Opus Incertum*, l’*Opus Reticulatum*, l’*Opus Vittatum*, e l’*Opus Mixtum*³.

Oggi, nel mondo occidentale, questi materiali hanno un’importanza marginale per quanto riguarda l’edificazione delle strutture portanti, che sono realizzate in prevalenza con l’utilizzo del calcestruzzo armato, mentre mantengono un grande rilievo come materiali di completamento e rifinitura (pavimentazioni, rivestimenti di muri, gradini, etc.), sia per gli esterni sia per gli interni degli edifici, e per l’arredo urbano (pavimentazioni di piazze e strade, costruzione di fontane, etc.).

I materiali lapidei sono molto diffusi nell’Italia meridionale, grazie alle attività vulcaniche del versante tirrenico (in particolare Vesuvio e Campi Flegrei) e alle formazioni calcaree del versante adriatico (dalla Puglia settentrionale, alle Murge, fino a sud nel Salento) e degli Appennini campani (che dalla Campania settentrionale si allungano fino alla Penisola Sorrentina e parte della provincia di Salerno). Le loro caratteristiche dipendono dalla natura della roccia, dal tipo di resistenza meccanica, dal taglio, dal colore, dalla resistenza agli agenti atmosferici (pioggia, gelo, etc.), dal tipo di lavorazione cui sono sottoposte (fiammatura, bocciardatura, sabbiatura, lucidatura, etc.), dalla durezza e dalla durevolezza.

I principali litotipi in Campania sono le rocce vulcaniche e le rocce carbonatiche. Le più importanti attività vulcaniche riguardano i Campi Flegrei, il Somma-Vesuvio, Roccamonfina ed Ischia, che hanno prodotto materiali quali tufo, pozzolana, ignimbrite campana, pomice, piperno, pietrarsa, lave flegree (trachitiche) e lave vesuviane (tefritico-leucitiche). Sono rocce di tipo effusive, formate in seguito alla solidificazione del magma sulla superficie terrestre, e rocce piroclastiche, formate per sedimentazione di materiale eruttato dalle attività vulcaniche. Le rocce carbonatiche, invece, sono principalmente il travertino, con attività estrattiva concentrata soprattutto nella provincia di Salerno; i marmi di Caserta e di Benevento; ed i calcari e le arenarie, estratte maggiormente nella Penisola Sorrentina. Si tratta dunque di rocce sedimentarie con matrice di cemento calcareo (carbonato di calcio), formate in seguito alla precipitazione chimica di sali di calcio disciolti in acqua⁴.

² Raia L. (2004). *Tecniche costruttive tradizionali e artigianato edile nell’architettura napoletana del XVIII e XIX secolo*. Dottorato di ricerca in Conservazione dei Beni Architettonici XIX ciclo, Università di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura

³ Giuliano M. (2010). *I materiali da costruzione di Pompei: provenienza, estrazione, tecniche edilizie*, tratto da *vesuvioweb.com*. Università degli Studi Suor Orsola Benincasa, Conservazione dei beni culturali, Napoli

⁴ Bertolini L. (2010). *Materiali da costruzione. Volume Primo. Struttura, proprietà e tecnologie di produzione*. CittàStudiEdizioni

Spostandoci sull'altro versante, e nello specifico in Puglia, troviamo invece prevalenza di rocce carbonatiche, quali calcari, calcareniti e tufi calcarei, anch'esse rocce sedimentarie formate per deposito e successiva cementazione di strati successivi nei vuoti del sedimento.

Anche nell'Italia insulare i materiali lapidei hanno un ruolo importante nella tradizione. In Sardegna troviamo sia rocce magmatiche sia rocce carbonatiche, quali granito, basalto, trachite auctorum, calcare, marna e calcarenite. Questi, insieme alla terra cruda, sono i materiali con i quali sono stati edificati tutti i centri storici della Sardegna.

Litotipi diversi, dunque, ma che al loro interno presentano un gran numero di varianti, a seconda delle caratteristiche fisico-chimiche. Le impurezze, ad esempio, possono generare colorazioni molto diverse anche per uno stesso tipo di pietra. Per questo motivo, spesso le pietre vengono riconosciute in base al luogo di estrazione: si vedano ad esempio le varietà di tufo in Campania (la cui estrazione ha inizio nella prima metà del primo millennio a.C.), giallo dei Campi Flegrei, grigio di Roccamonfina e della Penisola Sorrentina, verde di Ischia, bianco di Avellino; oppure la Pietra di Massa, arenaria estratta a Massa Lubrense nella Penisola Sorrentina; ed i marmi della Campania, quelli di Bellona, di Mondragone, di Dragoni e di Caiazzo nella provincia di Caserta e quello di Vitulano a Benevento. In Puglia troviamo invece la Pietra di Apricena nella zona settentrionale del Gargano, il gruppo delle Calcareniti delle Murge nella Puglia centrale con la Pietra di Trani, il Calcare di Altamura (usato per la costruzione dei Trulli), il Calcare di Bari (la più antica tra le formazioni cretacee) e la Calcarenite di Gravina (dalla quale si estrae il Tufo Calcareo), ed in infine a sud nel Salento la Pietra Leccese. Anche all'interno di queste formazioni si possono distinguere una serie di varietà, spesso indicati con nomi dialettali o impropri, legati al territorio e alla tradizione dei luoghi: la Pietra Leccese, le cui varietà sono il leccisu, piromàfo, cucuzzara, dura, bianca, dolce, saponara e gagginara; la Pietra di Apricena e quella di Trani, classificabili per colore, presenza di fossili e presenza di ossidi di ferro; la Calcarenite di Gravina ed il Tufo Calcareo, nelle varietà di mazzaro, carparo, cozzoso, scorzo, mollica, zuppigno⁵. In Sardegna, poi, si possono identificare quattro tipi di granito a seconda del luogo di estrazione, principalmente all'interno della Gallura: il granito rosa, il granito ghiandone, il granito bianco sardo e il granito grigio di Ovodda. Inoltre, le città di Cagliari e Sassari hanno fatto largo uso, sia come pietra da costruzione e ornamentale sia per la confezione di malte, di lapidei quali la Pietra Forte e la Pietra Cantone; di più recente estrazione è il Marmo Biancone Tirreno di Orisei, la cui attività estrattiva è localizzata nel Monte Tuttavista, nell'area centro-orientale dell'isola. Infine, nel Sud Sardegna, troviamo la Pietra di Serrenti, una pietra vulcanica appartenente al gruppo della trachite auctorum.

La tradizione costruttiva locale non offre solo pietre naturali, ma anche materiali artificiali che fondano le loro radici nella storia e nella cultura delle terre del Mediterraneo.

⁵ Cherubini C., Reina A. e Bruno D. (2007). *Le rocce tenere del Salento: proposta di classificazione*, in *Geologi e Territorio*. Febbraio, n. 2, pag. 37-47, Ordine dei geologi della Puglia, Bari

Bernard Rudofsky definiva il muro tradizionale come il "*pane dell'architettura*"⁶, per sintetizzarne le grandi potenzialità espressive sotto l'aspetto architettonico, come gli effetti prodotti dalla luce radente. Già Fernand Léger, nel *Discorso agli Architetti*⁷, aveva sottolineato le qualità del muro tradizionale, capace di trasformare i segni del tempo in una forma di qualità architettonica, "*creando dei rilievi su cui il tempo e l'usura operano per mezzo di chiaroscuri*"⁸. La produzione laterizia in Italia ha una storia millenaria: il mattone è il primo materiale "industriale". In epoca Romana si utilizzavano sia mattoni cotti che crudi. Ai tempi di Vitruvio (I secolo a.C.) il laterizio non aveva ancora un grande impiego, ma era limitato solo a funzioni specifiche, come l'esposizione ad una certa umidità o ad un forte calore; lo scarso impiego era dovuto anche alle restrittive leggi pubbliche⁹. Nel suo trattato "*De Architectura*" egli chiamava "*Opus Testaceum*" le murature realizzate in mattone cotto. Con Tiberio (14-37 a.C.), poi, ci fu la massima diffusione del mattone cotto, prendendo il sopravvento sugli altri materiali. Diventò così il materiale di base per l'edilizia e in particolare per i lavori pubblici, in risposta al problema del rifornimento veloce e su vasta scala di materiali da costruzione relativamente economici; il suo impiego può essere esemplificato da edifici come l'Anfiteatro Flavio di Pozzuoli. La pietra, al contrario, trova utilizzo con grande abilità tecnica spesso come rivestimento. L'uso generalizzato del mattone, spesso a vista, modificò il sistema costruttivo a blocchi, portando dal punto di vista strutturale maggiore rigidità ma anche maggiore stabilità¹⁰.

I bolli laterizi indicano una continua produzione fino ad almeno il VI secolo d.C. in diverse regioni dell'Italia meridionale, ad esempio in Calabria, come è mostrato da un bollo da Monteleone in cui si legge +REG DN THEODE/RICO BONO ROME (CIL X, 8041, 2). In un bollo da Orune in Sardegna si legge EVSEBI VIVAS (CIL X,8046, 15), mentre a sud di Napoli, vicino Vico Equense, è stato trovato un bollo con la legenda +SPES IN DEO (CIL X, 8042, 139). I laterizi con bolli databili al V secolo d.C. sono stati trovati in tombe a cappuccina intorno alla chiesa paleocristiana a S. Restituta (Ischia), dove scarti di fornace indicano una produzione locale¹¹. Nel medioevo, poi, si diffuse nell'architettura bizantina l'uso dei mattoni forati, con il quale si riuscì a ridurre le sezioni strutturali e ad alleggerire le cupole, consentendo di aumentare le dimensioni degli spazi coperti¹². Nell'Italia meridionale, l'artigianato laterizio sembra abbandonare dal VI secolo d.C. la produzione industriale per riserVARLA a specifiche

⁶ Rossi U. (2015). *Bernard Rudofsky, Tino Nivola: Costruire con pochi mattoni, qualche blocco di cemento e alcuni pali*. Casa-Giardino Nivola, Long Island, NY, in *Firenze Architettura*. N. 1

⁷ Léger F. (1955). *Discorso agli Architetti*, in *Casabella*. Settembre-ottobre, n. 207, pag. 69-70

⁸ Viola F. (2016). *L'architettura insegnante. Il politecnico di Luigi Cosenza*. Clean Edizioni, Napoli

⁹ Giuliano M. (2010), op. cit.

¹⁰ De Capua A. (2013), op. cit.

¹¹ Arthur P. e Whitehouse D. (1983). *Appunti sulla produzione laterizia nell'Italia centro-meridionale tra il VI e il XII secolo*, in *Archeologia Medievale*. Gennaio, n. 10

¹² De Capua A. (2013), op. cit.

committenze spesso di prerogativa ecclesiastica; dal VII secolo d.C. gli impianti sembrano servire solo esigenze di autoconsumo, fino a registrare un arresto nel X-XI secolo d.C.¹³

Studi sull'edilizia civile medievale di numerose città italiane ed europee hanno rivelato come, a partire dalla prima metà del XII secolo d.C., si sia registrata la ripresa di una produzione sistematica di laterizi, per i quali è stato osservato l'abbandono del tradizionale modulo romano di forma quadrata in favore di un nuovo formato, "rettangolare" (più piccolo e dunque più maneggevole), e di una progressiva diminuzione del volume¹⁴. Un esempio nel sud Italia è la Puglia, in particolare il centro di Lucera (FG), in cui viene adottato il mattone rettangolare in maniera continuativa dal XIII al XX secolo. A partire dal XIV secolo in poi, fino ad età contemporanea, Lucera sceglie il laterizio come materiale costruttivo prevalente per edifici religiosi e civili¹⁵.

Oltre al laterizio, quindi al mattone cotto, troviamo nella tradizione costruttiva locale un'altra tipologia di mattone, il cui uso è ancora più antico del laterizio: il mattone "crudo". L'arte del costruire in terra cruda risale al 6000 a.C., con tracce nell'uso di mattoni di fango nei resti della città di Gerico; i primi mattoni colati in stampi sono stati trovati in siti neolitici in Anatolia e Grecia, databili intorno al 5000 a.C.; mentre di costruzioni in terra realizzate senza cassaforma si hanno ritrovamenti in Grecia risalenti al 3000 a.C. A queste testimonianze si affiancano anche quelle scritte: Vitruvio stesso, nel "*De architettura*", parlando dei mattoni descrive la realizzazione di mattoni crudi, specificando le caratteristiche dell'argilla, le tecniche di realizzazione dei mattoni e le loro reazioni durante l'essiccazione naturale¹⁶.

Con la tecnica della "terra cruda" si realizzano mattoni utilizzando la terra stessa del suolo, estratta al di sotto dello strato arabile, inumidita, lavorata, messa in forma e lasciata essiccare al sole, sfruttando la capacità coesiva delle parti argillose contenute al suo interno. È la parte di argilla contenuta nella terra, infatti, che svolge la funzione di legante. Questa terra è composta di ghiaia, sabbia grossa, sabbia fine, limo e argilla, in diverse proporzioni. Si aggiunge poi un inerte vegetale come la paglia per limitare i fenomeni di gonfiamento, sgonfiamento e fessurazione. La produzione può essere manuale o meccanizzata, mentre la messa in opera è la stessa di un muro in mattoni cotti, con l'utilizzo di malta di terra o calce¹⁷.

Per studiare questa particolare tecnica ci spostiamo nell'Italia insulare, più precisamente in Sardegna. Qui troviamo il diffusissimo "Adobe" (dall'arabo *al-tub*, il mattone), un mattone ottenuto con uno stampo, a partire da un impasto di terra e paglia di consistenza tale da essere modellabile, lasciato essiccare all'aria aperta. Gli elementi costitutivi dell'impasto variano a

¹³ Baldassarre G. (2007). *Produzione ed impiego del laterizio nella Puglia centro-settentrionale e nella Lucania nord-orientale fra Tarda Antichità e Medioevo*, in *Archeologia dell'Architettura*. Volume XII

¹⁴ Baldassarre G. (2007), op. cit.

¹⁵ Mangialardi N. (2017). *Le maestranze saracene a Lucera (FG) nel XIII secolo. Spunti di ricerca sull'impiego dell'edilizia in laterizio in Puglia centro-settentrionale e nel Meridione normanno-svevo*, in *Mélanges de l'École française de Rome - Moyen Âge (MEFRM)*. N. 129-2, Università di Foggia

¹⁶ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di) (s.d.). *Tecniche di costruzione in terra cruda. Tradizione e innovazione in Italia*. Documento di ricerca e didattica depositato, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, Facoltà di Architettura, Dipartimento di Arte Scienza e Tecnica del Costruire

¹⁷ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

seconda della tradizione locale, ottenendo alcune varianti al classico Adobe, come ad esempio il “Làdiri”, mattone tradizionale del paese di Samassi (Sud Sardegna).

L'utilizzo della terra cruda prevede diversi sistemi costruttivi, riconducibili a tre principali tipologie: terra monolitica con funzione portante; terra su struttura con funzione di tamponamento; muratura con funzione portante o di tamponamento. Da questa prima classificazione è possibile poi rintracciare una serie di sistemi costruttivi, variabili da regione a regione. Tra i più diffusi troviamo: la terra impilata (o Bauge), terra battuta (o Pisè), mattoni modellati a mano o a stampi (Adobe e Làdiri), terra estrusa o trafilata (si tratta di mattoni industriali), blocchi compressi e blocchi battuti, Torchis, terra paglia, terra legno e terra minerale, terra di riempimento¹⁸.

La riscoperta dell'architettura e della tecnologia in terra è avvenuta in seguito a scambi di ricerche, studi ed esperienze costruttive di ricercatori, progettisti e docenti universitari. Gli eventi determinanti per la riscoperta di questa tecnica furono i convegni internazionali che si sono tenuti, a partire dal 1972 sino ai nostri giorni, sulla storia e la conservazione dell'architettura di terra. Il cuore europeo di questa riscoperta è la Francia dove nel 1979, presso la scuola di Architettura di Grenoble, nasce CRATerre (centro di ricerca sulla costruzione in terra), associazione incaricata dal governo di definire un vasto programma di ricerca e sperimentazione riguardante lo stato dell'arte e il futuro delle costruzioni in terra¹⁹.

Rimanendo in tema di materiali da costruzione artificiali, è possibile osservare come le tecniche locali abbiano caratterizzato l'uso dei leganti nella preparazione delle malte. Fino al 1756, anno della scoperta della calce idraulica ottenuta dalla cottura di calcari argillosi ad opera dell'ingegnere britannico John Smeaton, le malte erano composte da un legante aereo (calce o gesso), sabbia e acqua.

La calce aerea si ottiene dalla cottura in fornace, a circa 950°C, di rocce calcaree pure contenenti carbonato di calcio. I prodotti di questo processo, chiamato calcinazione, sono l'ossido di calcio e l'anidrite carbonica. L'ossido di calcio prende il nome di “calce viva”, che subisce successivamente il processo di spegnimento attraverso il quale, reagendo con acqua, si trasforma in idrossido di calcio. L'operazione può essere effettuata con eccesso di acqua, ottenendo una pasta morbida chiamata “grassello”, oppure con acqua appena superiore a quella stechiometricamente necessaria, ottenendo la “calce idrata”. Questo legante viene poi miscelato con acqua e sabbia per formare malte in grado di fare presa e indurimento, ma solo in presenza di aria e non a contatto con l'acqua²⁰. L'indurimento della calce aerea avveniva però con estrema lentezza, poiché il consolidamento della malta è dovuto alla reazione dell'idrossido di calcio (calce idrata) con l'anidride carbonica presente nell'aria, con la successiva produzione di carbonato di calcio (quindi lo stesso composto della materia prima di partenza).

Il gesso usato in edilizia, invece, si ottiene dalla cottura della pietra di gesso, roccia sedimentaria costituita da solfato di calcio bi-idrato. Una volta macinata, la polvere ottenuta

¹⁸ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

¹⁹ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

²⁰ Bertolini L. (2010), op. cit.

viene cotta in forni, dove subisce trasformazioni che le conferiscono proprietà leganti: a circa 130° si forma il “gesso emidrato”, mentre a circa 180° si forma il “gesso anidro” (o “anidride solubile”). Mescolati con acqua, danno luogo ad un impasto in grado di fare presa e indurimento. Il processo termina quando tutto l’emidrato e l’anidride presenti si sono trasformati in gesso biidrato. Il prodotto finale dell’idratazione è dunque uguale al composto da cui si era partiti per produrre questo legante²¹.

A partire dal I secolo a.C. i Romani iniziarono a sostituire la sabbia costituente la malta con il “Cocciopesto”, ottenuto dalla frantumazione del laterizio, e in particolare con la “Pozzolana” (*pulvis puteolana*), materiale piroclastico sciolto prevalentemente siliceo, con granulometria variabile dal limo alla sabbia, derivante dalla sedimentazione del materiale prodotto da eruzioni vulcaniche (piroclasti)²².

Vitruvio, nel suo trattato “*De Architectura*”, definisce “*Opus Caementicium*” la miscela di calce, pozzolana, cocciopesto e “*caementa*”, cioè pietra grezza e frammenti di pietra quali travertino o altri materiali piroclastici, che interrompono le micro-fessurazioni che si creano a seguito del naturale ritiro della malta (nel processo di asciugatura e consolidamento), impedendo così che diventino continue compromettendo la solidità del materiale. L’*Opus Caementicium* ebbe origine probabilmente a Pompei²³, poiché i territori vesuviani ed i Campi Flegrei fornivano materiali vulcanici dalle caratteristiche ottimali per l’impasto cementizio, e veniva usato per la realizzazione di fondazioni, murature, volte e cupole.

Ma la scoperta più importante fu quella della “pozzolana”, estratta principalmente nei Campi Flegrei in Campania, che segnò una rivoluzione nella realizzazione di opere murarie. La pozzolana, infatti, finemente macinata ed aggiunta alla calce, produce un comportamento idraulico con il quale la calce riesce a fare presa e indurimento anche a contatto con l’acqua. Responsabili delle due reazioni sono la presenza di silicati di alluminio all’interno della pozzolana che, attraverso una serie di reazioni con la calce e l’acqua di impasto (reazione pozzolanica), producono silicati e alluminati idrati di calcio; gli alluminati sono responsabili del processo di presa, mentre i silicati del processo di indurimento determinando lo sviluppo della resistenza meccanica. Questo comportamento, detto anche pozzolanico, consente di ottenere leganti con resistenza meccanica maggiore e con tempi di indurimento inferiori, formando composti idraulici simili a quelli che si generano durante l’idratazione del clinker. Opere prestigiose (come ad esempio il *Pantheon*) costruite duemila anni fa utilizzando questo tipo di legante e arrivate in perfetta efficienza fino ai nostri giorni, testimoniano le elevate caratteristiche meccaniche e di durabilità del materiale cementizio prodotto dai Romani²⁴. Vitruvio, nella sua opera “*De Architectura*”, definisce come deve essere la composizione della malta, specificando come la sabbia di mare sia la più mediocre e pericolosa da usarsi a causa del sale che si dissolve, consigliando, per questo motivo, l’aggiunta di cocci pestati e setacciati. Più avanti egli raccomanda l’uso della pozzolana, indicandone quattro tipi (nera, bianca, grigia

²¹ Bertolini L. (2010), op. cit.

²² Bertolini L. (2010), op. cit.

²³ Giuliano M. (2010), op. cit.

²⁴ Bertolini L. (2010), op. cit.

e rossa), e definendola così: “... la pozzolana di Baia o di Cuma, mescolata a calce e pietra, fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione, ma in particolare quelle che si fanno in mare sott’acqua ...”. In altre parole, aggiungendo la pozzolana alla calce aerea, essa viene artificialmente trasformata in calce idraulica. Questo tipo di malta ebbe una grande diffusione in Campania, sia per l’abbondanza di pozzolana che per la presenza di calcare adatto alla preparazione della calce.

Non tutte le regioni dell’Italia Meridionale dispongono di cave per l’estrazione della pozzolana da utilizzare insieme alla calce. In alternativa a questo importante materiale, le maestranze locali hanno sempre cercato, nel corso della storia in avvicinamento alla scoperta della calce idraulica, delle tecniche per “idraulicizzare” la malta di calce aerea. È il caso della Puglia, dove la malta di calce viene confezionata con “Tufina”, prodotto di sfarinamento o di frantumazione di blocchi di tufo calcareo, usato come aggregato in sostituzione totale o parziale alla sabbia. Queste malte, utilizzate sia per murature che per intonaci, con diverse proporzioni dei componenti e spesso con l’aggiunta di sabbia (polvere di calcare), sono ancora largamente diffuse nella pratica costruttiva regionale²⁵.

In Sardegna, invece, è possibile rintracciare un altro tipo di tecnica, ovvero la tecnica dell’inserzione di cocci o scaglie di pietra²⁶. Per rendere più stabile l’adesione della malta aerea (e quindi la tenuta dell’intonaco) al paramento murario in terra cruda, gli operatori locali usavano inserire dei cocci di tegole oppure scaglie di pietra, come basalto vescicolare, tra le commessure dei mattoni. La malta di calce aerea è quella maggiormente utilizzata nella tradizione costruttiva in terra cruda, ma nelle zone in cui risultava difficoltoso l’approvvigionamento di calce, la stessa terra veniva utilizzata per il confezionamento di malte, utilizzata sia per la realizzazione di murature in terra cruda sia per intonaci. Essendo a base di argilla, ovvero silicati idrati di alluminio, la terra avrà un comportamento idraulico. Data poi l’elevata superficie esposta all’evaporazione, alla malta vengono aggiunte delle fibre vegetali quali la paglia, per contrastare il fenomeno del ritiro. Infine, per garantire stabilità nel tempo e maggiore durezza dell’intonaco, si possono aggiungere piccole quantità di calce come stabilizzante (compresa quella “viva”, in funzione anche di essiccante e riduttore di umidità), che vanno a migliorare le prestazioni in ambiente umido.

²⁵ Stella M. (1991). *Murature e malte tradizionali pugliesi: uso e sperimentazione*. Istituto per la Residenza e le Infrastrutture Sociali, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bari

²⁶ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008). *Il manuale tematico della terra cruda. Caratteri, tecnologie, buone pratiche*, in *I manuali del recupero dei centri storici della Sardegna*. Dipartimento di Architettura dell’Università di Cagliari, Dipartimento di Architettura e Pianificazione dell’Università di Sassari, Regione Autonoma della Sardegna, diffusione a cura di ITACA

Scopo della tesi

Nell'ambito del CITTAM¹ è stata avviata una ricerca sui materiali da costruzione e sulle tecniche costruttive appartenenti alle diverse tradizioni dei paesi dell'area mediterranea. L'obiettivo di tale ricerca si configura perciò nelle indagini e nelle azioni idonee a scoprire e diffondere quanto più possibile quelle radici comuni, che si possono osservare nel patrimonio costruito esistente e percepire nei comportamenti abitativi delle popolazioni locali. L'attenzione per i valori tecnici, storici, configurativi e non ultimi quelli ecologici presenti nelle costruzioni di una così antica regione come quella mediterranea, ancora considerata quale culla di una delle più grandi civiltà del mondo, può concretizzarsi soltanto mediante una profonda analisi spaziale e materica ed un confronto tra le varie realtà della regione mediterranea. Il Centro si propone dunque di sperimentare sulle possibili metodologie di studio, e dunque di conoscenza consapevole, delle risorse dell'area e sulle procedure di progetto mirate da un lato alla tutela di tali valori e dall'altro alla definizione di tecnologie innovative sostenibili alle diverse scale².

In questo lavoro di tesi, che si pone all'interno di tale progetto, è stato effettuato un censimento dei materiali dalla tradizione costruttiva del Sud Italia, definendo così un'area geografica più ristretta, per poterli catalogare secondo la tipologia, le caratteristiche, l'impiego tradizionale e le possibili innovazioni tecnologiche legate al settore della bioedilizia. Nello specifico, sono stati censiti materiali e tecniche costruttive presenti nella tradizione di tre Regioni dell'Italia meridionale: Campania, Puglia e Sardegna.

A tale scopo sono stati visionati libri, articoli scientifici, riviste, documenti di ricerca e saggi pubblicati da varie università ed enti pubblici, considerando anche la storia, la cultura e i tipi edilizi all'interno dei diversi territori regionali. Alcuni di questi articoli e saggi rientrano nel quadro delle iniziative dirette a fornire strumenti sempre più approfonditi nella fase attuativa della pianificazione paesaggistica regionale³, tenendo conto delle culture costruttive omogenee delle diverse aree geografiche, e progettati per supportare gli Enti Locali nell'adozione di una gestione di maggiore qualità degli interventi sul patrimonio edilizio storico, in termini di manutenzione, restauro e riqualificazione. Sono dunque ispirati ad una filosofia di affiancamento e servizio, che presuppone che ciascun Comune li utilizzi per costruire i necessari approfondimenti in sede locale, in ragione delle specificità dei caratteri spaziali e costruttivi del proprio patrimonio storico edilizio e urbano.

Interi centri storici sono stati edificati con materiali da costruzione locali, naturali e artificiali, i quali hanno sempre identificato i Paesi di origine, utilizzati secondo la logica millenaria (ma anche economica) di impiegare i materiali disponibili in loco. Oggi trovano largo impiego negli interventi di riqualificazione di aree urbane, usati come la tradizione insegna, diventando

¹ Centro di ricerca Interdipartimentale per lo studio delle Tecniche Tradizionali dell'Area Mediterranea

² Tratto da www.cittam.unina.it

³ Un'iniziativa del genere ha portato all'elaborazione dei *Manuali del recupero dei centri storici della Sardegna*, prodotti dalla Regione Autonoma Sardegna. Altro esempio sono i Rapporti dell'Osservatorio congiunto redatti da Legambiente con i sindacati della categoria edile sull'*Innovazione e Sostenibilità nel settore Edilizio*.

anche oggetto di ricerca nel campo della bioarchitettura per produrre materiali ecosostenibili a partire dalla tradizione costruttiva.

La scelta di queste Regioni come oggetto di studio è motivata dal fatto che pur essendo confinanti, presentano delle differenze notevoli nei confronti sia delle tecniche costruttive locali sia della natura dei materiali stessi, con prevalenza di materiali di origine vulcanica in Campania e prevalenza di materiali calcarei in Puglia. In Sardegna, invece, considerata la sua condizione di “isola”, il materiale che ha trovato il più vasto impiego in edilizia è la terra cruda, conseguenza anche della necessità di dover utilizzare materie prime disponibili localmente. In tali contesti, anche per i materiali complementari quali le malte per murature ed intonaci sono stati utilizzati materiali locali; in Campania la malta di calce e pozzolana, in Puglia la malta di calce e tufina, in Sardegna la malta a base di terra argillosa.

Dai censimenti così effettuati, riportati all'interno del Capitolo 3 ed elencati in tabelle, nel Capitolo 5 i risultati verranno schedati per regione e per tipologia di materiale, anche se per alcuni di essi la letteratura specialistica non offre dati esaurienti e completi.

CAPITOLO 1. Sviluppo sostenibile e Bioedilizia

Studiare ed approfondire la ricerca sulle tecniche costruttive tradizionali connesse al mondo dell'edilizia favorisce la comprensione critica del patrimonio architettonico, collocando i singoli manufatti all'interno di un contesto costituito dall'ambiente, dai materiali, dall'abilità delle maestranze, dalle tradizioni ed innovazioni costruttive, dalle conoscenze tecniche¹.

I materiali e le tecniche tradizionali non sono solo connessi al tema della conservazione e del restauro architettonico, che richiede una conoscenza sempre più approfondita delle forme edilizie tradizionali, ma sono in stretta relazione anche con un altro tema, che negli ultimi decenni ha assunto un rilievo sempre maggiore, ovvero quello della sostenibilità ambientale. Dal punto di vista critico ed operativo, si possono aprire una serie di interrogativi circa la possibilità di riappropriarsi e di riutilizzare le tecniche tradizionali nel moderno cantiere dell'edilizia eco-sostenibile.

Nella sua accezione più ampia, il concetto di sostenibilità implica *“la capacità di sostenere nel corso del tempo la riproduzione del capitale mondiale composto dal capitale economico, sociale e naturale”*². In particolare, il capitale economico costruito è rappresentato dall'insieme delle costruzioni e delle infrastrutture realizzate dagli individui; il capitale sociale è costituito da tutti gli individui di una società; mentre il capitale naturale è costituito dalle risorse naturali e dall'ambiente naturale nel suo complesso. La definizione più diffusa di sostenibilità è quella contenuta nel rapporto Brundtland nel 1987, elaborato dalla Commissione Indipendente sull'Ambiente e lo Sviluppo, presieduta da Gro Harlem Brundtland, secondo il quale: *“L'umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che esso soddisfi i bisogni dell'attuale generazione senza compromettere la capacità delle generazioni future di rispondere ai loro bisogni. Lo sviluppo sostenibile, lungi dall'essere una definitiva condizione di armonia, è piuttosto processo di cambiamento tale per cui lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e i cambiamenti istituzionali siano resi coerenti con i bisogni futuri oltre che con gli attuali”*. La sostenibilità può anche essere definita come un processo socio-ecologico caratterizzato dal desiderio di perseguire un ideale comune. Per quanto possa essere difficile raggiungere tale ideale, un atteggiamento perseverante e dinamico fa in modo che il processo dia luogo ad un sistema sostenibile³.

Gli inizi della crisi ambientale sono da ricondursi al secondo dopoguerra, con il *boom* economico che ha avviato il processo di industrializzazione e con lo spostamento delle popolazioni dalla campagna alla città (*boom* edilizio) che ha cambiato il lavoro da agricolo a meccanizzato. Ci si riferisce ad un'epoca (seconda metà del Novecento) in cui si è consolidata

¹ Raia L. (2004), op. cit.

² Farnè S. (2013). *Qualità sostenibile. Strategie e strumenti per creare valore, competere responsabilmente e ottenere successo duraturo*. FrancoAngeli, Milano

³ Wandenberg J. (2015). *Sustainable by Design: Economic Development and Natural Resources Use*, CreateSpace Independent Publishing Platform

la nuova cultura (del consumismo e dell'usa e getta) incentrata su una illimitata fiducia nel progresso, della scienza e della tecnica, in grado di risolvere problemi e di creare una realtà artificiale ipotizzata migliore di quella naturale⁴. Un sistema economico istituito su queste basi, non calcola i danni inflitti all'ambiente, ma presta attenzione solo ai bilanci economici annuali tralasciando qualunque valutazione a lungo termine, inducendo a buttar via beni ancora usufruibili. Di conseguenza, gli effetti che questo sistema produttivo-industriale ha creato sono devastanti, come l'aumentato livello di consumo energetico, una produzione di rifiuti ed emissione di gas nocivi elevati, esaurimento delle risorse ambientali e superamento della capacità di carico del pianeta. Ignorando i propri limiti, l'uomo è arrivato a sostituire società capaci di rigenerarsi con società che non sono più in grado di farlo. L'elemento caratterizzante è il fatto che mentre in passato i disastri ecologici erano limitati ad una dimensione locale o regionale, quello attuale coinvolge l'intero pianeta⁵.

Nel 1996, ad Istanbul, ci fu la conferenza ONU sugli Insediamenti Umani (HABITAT II) che ha confermato l'insostenibilità degli attuali modelli di sviluppo e dei processi di gestione urbana, mettendo a serio rischio non soltanto il benessere della popolazione mondiale, ma soprattutto la capacità dei sistemi naturali del pianeta di supportare tali processi. Le società occidentali, infatti, sfruttano sconsideratamente le risorse di tutto il mondo. Viene così definito il principio della sostenibilità urbana, ovvero *“la capacità delle città di assicurare a tutte le persone di migliorare la qualità della propria vita, raggiungere l'autosufficienza, l'indipendenza e l'autonomia, con l'assicurazione che le azioni ed i comportamenti di tutti gli attori (governi, società civile, istituzioni economiche e commerciali, famiglie e singoli individui) garantiscano il mantenimento dell'ambiente globale, con le sue risorse naturali e con quelle non rinnovabili, e non limitino le opportunità delle generazioni future di beneficiare delle risorse naturali, economiche, sociali e culturali”*.

L'insostenibilità delle città europee, che fino al secolo scorso erano dei veri e propri modelli per il loro impianto architettonico e urbanistico, è legata ai principi urbanistici espressi dal “modernismo internazionale” del Novecento che ha segnato l'inizio del degrado del tessuto socio-culturale e dell'evolversi di modelli urbani sempre più insostenibili, basati su scelte politiche e tecnologiche che hanno portato l'espansione delle città verso le periferie. I teorici di questo movimento hanno ipotizzato leggi universali basate, soprattutto, sulla funzionalità e sull'efficienza di materiali, strutture, sistemi tecnici e produttivi, non riconoscendo a pieno la complessità dei bisogni dell'uomo e le diversità culturali⁶. Purtroppo, questo modello non ha valorizzato né la diversità regionale negli stili architettonici e urbanistici, né il tradizionale uso di materiali e tecniche costruttive locali, preferendo sistemi di produzione architettonica industrializzati e seriali. La semplificazione delle città è stata ulteriormente aggravata da una progettazione urbana per funzioni separate, lo *zoning*, che ha creato una maggiore distanza tra strati sociali, separando le zone residenziale dalle zone lavorativo-produttive, dalle zone

⁴ Forlani M.C. (2014). *Edilizia sostenibile e risorse locali*. Dipartimento di Architettura dell'Università Chieti-Pescara

⁵ Hardin G. (1968). *The Tragedy of the Commons*, in *Science*. n. 162

⁶ Raymond L. (1998). *La città sostenibile. Partecipazione, luogo, comunità*. Introduzione, Elèuthera

commerciali e dalle zone ricreative, scollegandole dal tessuto storico del paese. A tutto ciò va associato il peso della speculazione edilizia che ha devastato l'Italia (in particolare il sud) con scelte illogiche dal punto di vista urbanistico e architettonico.

"... L'arbitrio delle forme e la bruttezza sono il risultato della corruzione del costume, dell'oscuramento intellettuale, della confusione politica e dell'insipienza amministrativa ..." (Cosenza, Per un dibattito costruttivo, 1959).

Si è così innescato un processo insostenibile dal punto di vista dei consumi e dei costi energetici e ambientali. Tre sono gli elementi ritenuti indispensabili per la ricostituzione della sostenibilità: partecipazione, luoghi (legame tra persone e spazio urbano), comunità (legame tra singoli individui)⁷.

Per vivere in modo più sostenibile si può ricorrere ad alcune strategie, come la riorganizzazione delle condizioni di vita (ad esempio città ecologiche e città sostenibili), la revisione dei settori economici (green building) o delle prassi lavorative (bioarchitettura), l'utilizzo delle scienze per lo sviluppo di nuove tecnologie (tecnologia verde, energie rinnovabili), oppure la progettazione di sistemi flessibili e reversibili (LEED), oltre che l'adattamento degli stili di vita individuali volti alla conservazione delle risorse naturali.

Il Summit mondiale sullo sviluppo sostenibile⁸ del 2005 ha individuato gli obiettivi di sviluppo sostenibile, tra cui lo sviluppo economico, lo sviluppo sociale e la tutela dell'ambiente.

Per tali motivi, la sostenibilità può essere suddivisa in tre componenti fondamentali: sostenibilità economica, sostenibilità sociale e sostenibilità ambientale. La sostenibilità economica può essere definita come la capacità di un sistema economico di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione; la sostenibilità sociale come la capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione, democrazia, partecipazione, giustizia) equamente distribuite per classi e genere; per sostenibilità ambientale si intende infine la capacità di preservare le tre funzioni dell'ambiente, ovvero la funzione di fornitore di risorse, la funzione di ricettore di rifiuti, la funzione di fonte diretta di utilità.

Lo sviluppo sostenibile è dunque il principio sulla quale si fonda la sostenibilità, che riguarda, in modo interconnesso, l'ambito ambientale, quello economico e quello sociale. Tale processo lega quindi, in un rapporto di interdipendenza, la tutela e la valorizzazione delle risorse naturali alla dimensione economica, sociale e istituzionale, al fine di soddisfare i bisogni delle attuali generazioni, evitando di compromettere la capacità delle future di soddisfare i propri. Lo sviluppo sostenibile può essere rappresentato graficamente tramite il diagramma di Venn, che usa tre ellissi per indicare questi tre pilastri della sostenibilità. Graficamente si intersecano a vicenda, per indicare il fatto che essi non si escludono a vicenda, ma che sono al contrario interconnessi, a dimostrazione del fatto che nessuno dei tre può sussistere senza gli altri⁹. L'area risultante dall'intersezione delle tre componenti coincide idealmente con lo sviluppo

⁷ Raymond L. (1998), op. cit.

⁸ Nazioni Unite ONU (2005). *World Summit*. Assemblea Generale

⁹ Morelli J. (2011). *Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals*, in *Journal of Environmental Sustainability*

sostenibile. Le intersezioni intermedie tra le componenti, indicate con i termini Vivibile (intersezione ambientale-sociale), Equo (intersezione economico-sociale), Realizzabile (intersezione economico-ambientale), si possono leggere come delle indicazioni di tipo operativo o di verifica.

Nell'ambito della sostenibilità sono stati elaborati diversi sistemi di certificazione degli edifici. Tra i vari sistemi, quello più importante a livello mondiale è LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Nato in America ad opera di U.S. Green Building Council (USGBC), ha come scopo la promozione e lo sviluppo di un approccio globale alla sostenibilità, dando un riconoscimento alle performance virtuose in riferimento della salute umana ed ambientale. Gli standard LEED, presenti anche in Italia grazie al lavoro di GBC Italia che ne ha creato una versione locale, indicano i requisiti per costruire gli edifici ambientalmente sostenibili, sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista del consumo di tutte le risorse ambientali coinvolte nel processo di realizzazione. LEED è un sistema flessibile e articolato utilizzabile su ogni tipologia di edificio: nuove costruzioni; edifici esistenti; piccole abitazioni. La certificazione costituisce una verifica di parte, terza ed indipendente, delle performance di un edificio o di aree urbane. Questa certificazione, riconosciuta a livello internazionale, testimonia che un edificio è rispettoso dell'ambiente e che costituisce un luogo salubre in cui vivere e lavorare. Tale sistema permette ai progettisti di valutare la strategia che ottimizzi il rapporto fra edificio e ambiente circostante. Il sistema di rating LEED si struttura in 7 sezioni organizzate in prerequisiti e crediti (i prerequisiti sono obbligatori affinché l'intero edificio possa venire certificato; i crediti possono essere scelti in funzione delle caratteristiche del progetto): Sostenibilità del Sito (max 26 punti); Gestione delle Acque (max 10 punti); Energia ed Atmosfera (max 35 punti); Materiali e Risorse (max 14 punti); Qualità ambientale Interna (max 15 punti); Innovazione nella Progettazione (max 6 punti); Priorità Regionale (max 4 punti).

La somma dei punteggi dei Crediti determina il livello di certificazione dell'edificio. I livelli di certificazione di articolano su 4 livelli: Base (40-49 crediti); Argento (50-59 crediti); Oro (60-79 crediti); Platino (80-110 crediti).

In Italia, lo strumento di valutazione nazionale del livello di sostenibilità energetica e ambientale degli edifici è il Protocollo ITACA. Nato diversi anni fa dall'esigenza delle Regioni di dotarsi di strumenti validi per supportare politiche territoriali di promozione della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni, è stato realizzato da ITACA¹⁰, nell'ambito del Gruppo di lavoro interregionale per l'Edilizia Sostenibile istituito nel dicembre 2001. Tra i più diffusi sistemi di valutazione, il Protocollo permette di verificare le prestazioni di un edificio in riferimento non solo ai consumi e all'efficienza energetica, ma prendendo anche in considerazione il suo impatto sull'ambiente e sulla salute dell'uomo, favorendo così la

¹⁰ ITACA, "Istituto per l'innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale". Nato nel 1996, per impulso delle Regioni italiane, l'Istituto ITACA è un'associazione di tipo federale con obiettivo quello di attivare azioni ed iniziative condivise dal sistema regionale al fine di promuovere e garantire un efficace coordinamento tecnico tra le stesse Regioni e province autonome, così da assicurare anche il miglior raccordo con le istituzioni statali, enti locali e operatori del settore.

realizzazione di edifici sempre più innovativi, a energia zero, a ridotti consumi di acqua, nonché materiali che nella loro produzione comportino bassi consumi energetici e nello stesso tempo garantiscano un elevato comfort. Il Protocollo garantisce inoltre l'oggettività della valutazione attraverso l'impiego di indicatori e metodi di verifica conformi alle norme tecniche e leggi nazionali di riferimento. Ha diverse finalità in relazione al suo differente uso: è uno strumento a supporto della progettazione per i professionisti, di controllo e indirizzo per la pubblica amministrazione, di supporto alla scelta per il consumatore, di valorizzazione di un investimento per gli operatori finanziari. I principi su cui si basa lo strumento sono: l'individuazione di criteri, ossia i temi ambientali che permettono di misurare le varie prestazioni dell'edificio in esame; la definizione di prestazioni di riferimento (*benchmark*) con cui confrontare quelle dell'edificio ai fini dell'attribuzione di un punteggio corrispondente al rapporto della prestazione con il benchmark; la "pesatura" dei criteri che ne determinano la maggiore e minore importanza; il punteggio finale sintetico che definisce il grado di miglioramento dell'insieme delle prestazioni rispetto al livello standard¹¹. Ad oggi è stato adottato da numerose Regioni e amministrazioni comunali in diverse iniziative volte a promuovere e ad incentivare l'edilizia sostenibile attraverso: leggi regionali, regolamenti edilizi, gare d'appalto, piani urbanistici.

Negli ultimi anni l'Unione Europea sta sviluppando normative per abbassare il consumo di energia da fonti non rinnovabili, come la direttiva 2010/31/UE sul "miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici", che promuove l'ulteriore miglioramento della prestazione energetica rispetto a quanto previsto dal Protocollo di Kyoto, sottoscritto dalla U.E. nel 2002, e dal pacchetto Clima Energia del 2008 che, con il cosiddetto 20-20-20, indicava la riduzione del 20% delle emissioni di gas, l'aumento del 20% del risparmio energetico e il raggiungimento del 20% di consumi da fonti rinnovabili, entro il 2020. Nell'articolo 1 si legge: *"la presente direttiva promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi"*. La direttiva stabilisce, fra le altre cose, che dal 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano "edifici a energia quasi zero"; in particolare, quelli di proprietà di enti pubblici dovranno rispettare gli stessi criteri a partire dal 31/12/2018. Per edificio a energia quasi zero s'intende un edificio ad altissima prestazione energetica, il cui "fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze". Le disposizioni della direttiva riguardano:

- La metodologia per il calcolo della prestazione energetica integrata degli edifici e delle unità immobiliari.
- L'applicazione di requisiti minimi alla prestazione energetica di edifici e unità immobiliari di nuova costruzione.
- I piani nazionali destinati ad aumentare il numero di edifici a energia quasi zero.

¹¹ ITACA (2018). *Area 2 – Sostenibilità energetica e ambientale*, tratto da www.itaca.org

- La certificazione energetica degli edifici o delle unità immobiliari.
- L'ispezione periodica degli impianti di riscaldamento e condizionamento d'aria negli edifici.
- I sistemi di controllo indipendenti per gli attestati di prestazione energetica e i rapporti di ispezione.

In Italia, ogni edificio di nuova costruzione o ristrutturato con interventi che insistono su oltre il 25% della superficie dell'involucro dell'edificio, comprensivo di tutte le unità immobiliari che lo costituiscono (quali, ad esempio il rifacimento di pareti esterne, di intonaci esterni, del tetto o dell'impermeabilizzazione delle coperture) deve essere dotato di Attestato di Prestazione energetica, APE¹².

Lo strumento per sviluppare l'innovazione energetica e la sostenibilità in edilizia a livello comunale è il Regolamento Edilizio. Come emerge dal Rapporto "Innovazione e semplificazione in edilizia" di Legambiente, sono 1.182 i Comuni in Italia che si sono attivati per inserire nei propri Regolamenti Edilizi principi e norme di sostenibilità, promuovendo l'uso di materiali da costruzione locali, naturali e riciclabili. In molti casi i Comuni che già avevano messo mano in precedenza ai propri regolamenti sono intervenuti nuovamente per renderli ancor più efficienti considerando alcuni parametri chiave come l'isolamento termico, l'uso di energie rinnovabili, il risparmio idrico ed il recupero delle acque meteoriche, il tipo di materiali utilizzati, l'isolamento acustico ed il corretto orientamento degli edifici, ma anche ventilazione meccanica e recupero delle acque grigie¹³.

Nel settore delle costruzioni, l'impatto ambientale della progettazione, costruzione ed esercizio degli edifici è enorme: in Europa gli edifici sono responsabili, direttamente o indirettamente, di circa il 40% del consumo di energia primaria complessiva generando, nelle città, l'80% delle emissioni nocive in atmosfera. I consumi energetici degli edifici dipendono dalle prestazioni dell'involucro e dalla gestione degli impianti. Sono di fatto i principali responsabili delle emissioni di CO₂. L'enorme influenza negativa delle costruzioni richiede

¹² La certificazione energetica degli edifici (APE) è un sistema di valutazione per:

- fornire informazioni chiare e trasparenti sulla qualità energetica degli immobili mediante uno specifico sistema di classificazione
- promuovere l'efficienza energetica mediante l'individuazione di metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici.

L'APE è un documento ufficiale valido 10 anni e può essere prodotto solo da professionisti accreditati secondo il DPR 16 aprile 2013, n. 75. La certificazione consente di avere tutte le informazioni su come è stato costruito un edificio sotto il profilo dell'isolamento termico e del consumo energetico. Dal primo ottobre 2015 sono entrate in vigore le nuove linee guida nazionali per la classificazione energetica degli edifici e la redazione del modello di Attestazione di Prestazione Energetica (APE) - decreti attuativi della legge 90/2013 (di conversione del Decreto Legislativo 63 del giugno 2013). Si tratta, secondo le normative vigenti, di un documento obbligatorio da fornire all'acquirente o all'affittuario in caso di compravendita immobiliare e per le locazioni di interi edifici. Copia dell'APE deve essere allegata al contratto. La classe energetica dell'edificio (da A4 a G) è determinata sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio. Più è bassa la lettera associata all'immobile, maggiore è il suo consumo energetico.

¹³ Feneal Uil, Filca Cisl, Fillea Cgil e Legambiente (2015). *Innovazione e sostenibilità nel settore edilizio "Costruire il futuro"*. Quarto Rapporto dell'Osservatorio congiunto

specifiche azioni per contrastarne gli effetti ambientali. Gli interventi sostenibili devono prima di tutto intervenire sul ciclo di vita¹⁴ dei prodotti, che comprende: la nascita di un nuovo prodotto; il mantenimento in vita di un prodotto; il riciclo del prodotto. Un progetto realizzato con criteri di sostenibilità ambientale può ridurre o eliminare del tutto gli impatti negativi causati dagli edifici, attraverso scelte consapevoli che si basino su pratiche progettuali, costruttive e gestionali migliorative rispetto a quelle comunemente in uso. Ad esempio si può: integrare il tema ambientale in tutte le scelte progettuali, adottandole in maniera diversificata a seconda delle specifiche condizioni climatiche; utilizzare in maniera consapevole le risorse; fare ricorso a tecnologie costruttive e materiali non inquinanti e non pericolosi per la salute delle persone; prevedere gli effetti indotti sul territorio dall'edificio in tutto il suo ciclo di vita, anche in termini di provenienza, dismissibilità e riciclaggio dei materiali; raggiungere livelli elevati di comfort abitativo; misurare le prestazioni degli edifici con modelli di valutazione. In generale, le procedure da impiegare per aumentare la sostenibilità di un processo devono "puntare al miglioramento della qualità del prodotto finale utilizzando materie prime naturali con il minimo investimento energetico, al fine di ottenere un prodotto più prossimo al chilometro zero capace di essere programmato anche per un nuovo ciclo di vita, prevedendo così la possibilità di riciclare il prodotto minimizzando la produzione di rifiuti da scarto".

¹⁴ Uno dei metodi impiegati è il Life Cycle Assessment (LCA), standardizzato dalle norme ISO 14040 ed articolato nelle seguenti fasi:

1. Analisi del ciclo di vita di un prodotto o processo
2. Valutazione degli impatti ambientali attraverso lo studio dei materiali impiegati
3. Quantificazione dei flussi di materia o energia in ingresso e uscita
4. Elaborazione del ciclo di vita attraverso un diagramma di flusso
5. Definizione dell'unità funzionale
6. Valutazione di possibili miglioramenti

CAPITOLO 2. Ritorno alla tradizione e aspetti di possibili innovazioni

Con lo scopo di raggiungere livelli di sostenibilità sempre più elevati, vengono prodotti materiali ecologici, ecocompatibili e biologici capaci di contribuire ad una gestione sempre più efficiente dell'energia, dell'acqua e delle risorse naturali. La ricerca in questo settore è in continua crescita, fornendo dei prodotti dalle prestazioni sempre migliori, classificabili in tre categorie: materiali naturali e salubri, materiali provenienti da riciclo, materiali e sistemi innovativi¹.

Un'altra strada perseguibile, parallelamente a quella dei materiali industriali resi ecosostenibili dallo sviluppo tecnologico, è il ritorno alla "tradizione", con l'obiettivo di ridurre i costi di costruzione e il raggiungimento del contenimento energetico attraverso il ricorso a materiali locali, e con la possibilità di essere innovati con le moderne tecnologie.

Maestri dell'architettura italiana del Novecento hanno fondato le loro radici nella tradizione e nella storia locale, lasciando spazio alle tecniche tradizionali per definire le qualità materiche e cromatiche degli edifici². Luigi Cosenza è stato un difensore della cultura e della tradizione campana. Nella relazione generale della nuova sede della Facoltà di Ingegneria di Napoli egli scriveva: *"Altri motivi di meditazione si ispirano alla tradizione di cultura sempre viva dalla Cuma Omerica alla Napoli ottocentesca, attraverso le esperienze pittoriche pompeiana, gli impulsi plastici del Medio Evo angioino e Aragonese, la forza espressiva degli stucchi barocchi, la lunga vitalità delle realizzazioni spontanee, con un richiamo suggestivo al rispetto delle preesistenti condizioni ambientali. Questa tradizione suggerisce di inserire i volumi edilizi nel paesaggio locale (...), con una composizione capace di partire da temi acquisiti per tradizione, ma espressi con i mezzi delle moderne tecnologie, sviluppando il linguaggio plastico elaborato negli ultimi decenni di ricerche ed esperienze"* (Cosenza, Relazione generale nuova Facoltà Ingegneria Napoli, 1957-1958).

Le pietre naturali sono certamente materiali ecologici, estratte direttamente dalle cave e dunque con basse emissioni di CO₂ nel processo produttivo, i quali contribuiscono non solo a mantenere "viva" la tradizione locale, ma anche a conseguire notevoli vantaggi sotto vari aspetti, sia ambientali che tecnici. Rivalutare l'uso della pietra naturale risponde alle recenti evoluzioni del concetto di rinnovabilità e di riduzione degli impatti ambientali riferiti all'intero ciclo di vita utile del materiale; il concetto di sostenibilità, in relazione allo sfruttamento di una risorsa, è legato al rapporto tra l'entità della risorsa e l'entità dei prelievi: essendo le rocce vulcaniche circa il 95% della crosta terrestre e le rocce carbonatiche circa il 75% delle rocce che affiorano in superficie, il consumo mondiale di materiale lapideo risulta infinitesimo, pertanto non può prospettarsi l'esaurimento della risorsa né una sua sensibile riduzione. Inoltre, prendendo in considerazione la vita del prodotto lapideo, come per qualsiasi

¹ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016). *100 Materiali per una nuova edilizia*

² Viola F. (2016), op. cit.

materiale, gli impatti vanno calcolati come media per tutto il periodo di vita utile che, nel caso della pietra, può andare ben oltre i cento anni determinando quindi un valore molto basso dell'impatto ambientale, ancora più basso se si considera che la pietra si presta al riciclaggio senza particolari trattamenti e fino all'esaurimento della materia stessa³.

Tra i materiali lapidei, quelli di origine vulcanica trovano largo impiego negli interventi di ristrutturazione e riqualificazione degli spazi urbani, in particolare nei centri storici della Campania, per pavimentazioni e rivestimenti come il basolato lavico, il selciato, il lastricato, l'acciottolato, con materiali quali lave, porfido e basalto. Altro materiale lapideo utilizzabile in bioedilizia è la pomice, impiegata per alleggerire il calcestruzzo e come isolante termoacustico, sia in polvere sia in blocchi o in pannelli.

Un altro impiego dei materiali lapidei riguarda una tecnica tradizionale pugliese, nello specifico dell'area salentina, che prevede l'uso del tufo calcareo per la realizzazione di coperture con il sistema della "volta a stella". La regione Puglia è intervenuta in difesa di questo sistema costruttivo, attraverso la Legge Regionale 2009 n. 26, le cui finalità (Art. 1) sono quelle di conservare e valorizzare le costruzioni tipiche del territorio pugliese e tutelare le tecniche costruttive tradizionali, riconoscendole come elementi caratterizzanti della cultura della popolazione pugliese. L'idea è quella di fondere la tradizione costruttiva della volta a stella leccese all'interno di progetti innovativi di architettura contemporanea⁴.

In linea con gli altri settori i cui prodotti sono oggetto di continui perfezionamenti ed affinamenti, anche il comparto dei materiali lapidei non può sottrarsi al contributo dell'innovazione tecnologica. Lo sviluppo tecnologico delle pietre naturali è legata ai nuovi utilizzi che si possono fare, grazie alle nuove tecniche di lavorazione. L'impatto delle innovazioni di prodotto è elevato nei confronti del settore: esse aprono la strada a nuovi mercati e ad una domanda che in precedenza non poteva essere servita dal prodotto in pietra, ma che veniva coperta da altri materiali per l'edilizia. La più importante innovazione a riguardo è la produzione di pannelli multistrato (cosiddetti "sandwich"), composti da sottili lastre di pietra per rivestimenti che hanno uno spessore di soli 5 millimetri, anziché dei 3 centimetri tradizionali. Lo strato di pietra viene accoppiato, mediante collante chimico, ad un supporto di rinforzo a nido d'ape, che può essere di alluminio o plastica, a seconda del brevetto utilizzato per produrlo⁵. Un prodotto disponibile in commercio è Stone Veener⁶, una lastra formata da sottilissimi strati di pietra uniti ad un tessuto in fibra di vetro impregnato con resina epossidica; il lato posteriore è applicabile su supporti in acciaio, vetro o ferro. In questo modo si ottengono lastre per rivestimento dal peso notevolmente inferiore rispetto a quelle tradizionali, le quali possono rappresentare un vincolo strutturale dovuto all'elevato peso. Oltre al marmo sottile per i rivestimenti, interni o esterni, si sta diffondendo la produzione di

³ De Joanna P. (2015). *I materiali locali nella rigenerazione degli spazi urbani dei centri storici della Città Metropolitana di Napoli*. Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Architettura

⁴ Fallacara G. (s.d.). *Prototipi di architettura di pietra: tradizione. Nuove costruzioni con "volte a stella"*. Politecnico di Bari, Dipartimento ICAR

⁵ Gruppo di lavoro del Ceris-Cnr (2007). *Innovazione tecnologica nel settore lapideo*. Rapporto tecnico n. 9, Istituto di Ricerca sull'Impresa e lo Sviluppo

⁶ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

marmo sottile per pavimentazioni. In questo caso la piastrella in graniglia di pietra ha uno spessore di un centimetro ed è finalizzata a coprire parte del mercato dei pavimenti in ceramica. Un altro caso di innovazione è rappresentato dalle nuove tecnologie di finitura e lucidatura del marmo, che permettono di ottenere una pietra apparentemente diversa da quella tradizionale. L'innovazione viene introdotta dal settore della chimica, tramite la formulazione di nuove cere a base di polimeri, che depositano un sottile film polimerico sulla lastra e ne assicurano specularità e lucentezza.

Altro tipo di innovazione riguarda il riciclo, e quindi il riutilizzo dei materiali lapidei. Uno dei prodotti disponibili è il Carrara Block⁷, un mattone ecologico realizzato con polvere di marmo proveniente da riciclo e sottoprodotti di cavatura, composto in gran parte da sabbie e granulati con l'aggiunta di cemento bianco. I mattoni possono essere utilizzati per la realizzazione di murature a "faccia vista" e per tamponamenti interni ed esterni. L'impatto ambientale è basso perché non necessita del processo di cottura in fornace, ma viene prodotto per sola compressione delle materie prime che lo compongono opportunamente umidificate.

Un recente esempio in cui un materiale tradizionale viene impiegato con una tecnica costruttiva innovativa è rappresentato dalla Chiesa di San Pio a San Giovanni Rotondo, su progetto di Renzo Piano. La pietra di Apricena, nella varietà del "Bronzetto", è stata impiegata nella Chiesa Superiore (divisa in tre ambienti: Aula Liturgica, cappella dell'Eucarestia, Sagrestia) ad uso strutturale per la costruzione del doppio ordine di archi, uno esterno e uno interno, composto da 17 archi portanti. La struttura ad archi, completamente in pietra locale, presenta l'aspetto innovativo di essere stata realizzata con un sistema di precompressione a cavi scorrevoli (post-tesi). Nei conci lapidei sono stati dunque eseguiti dei fori, necessari all'infilaggio delle guaine per contenere i cavi da precompressione. Inoltre, i conci sono stati legati con una malta cementizia fibrorinforzata in acciaio. In questo modo la struttura è capace di assorbire, in caso di evento sismico, gli sforzi aggiuntivi.

Lo sviluppo tecnologico nel settore lapideo riguarda inoltre un altro campo di applicazione: i trattamenti consolidanti dei materiali lapidei porosi. In uno studio scientifico è stato preso in esame la possibilità di trattare il tufo giallo napoletano mediante impregnazione profonda di polimeri, nello specifico con il monomero acrilico metilmetacrilato di metile (MMA)⁸. Questo monomero è un liquido con elevata tensione superficiale che, trattato chimicamente, diventa un solido polimerico ad alta resistenza. Il suo utilizzo è tecnicamente possibile grazie alle caratteristiche di porosità e di permeabilità del tufo. La tecnica di impregnazione consiste nel mettere a contatto la superficie di tufo da trattare con il liquido di MMA, che penetra nel tufo per capillarità; il fenomeno di polimerizzazione viene poi innescato operando un riscaldamento della superficie stessa. La resistenza del polimetilmetacrilato (PMA) così ottenuto risulta circa 100 volte più elevata di quella del tufo, mentre la deformabilità è dello stesso ordine di grandezza. Con questa tecnica, il miglioramento delle caratteristiche

⁷ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

⁸ Aurisicchio S., Evangelista A. e Nisolais L. (1983) "*Comportamento meccanico del tufo trattato con polimeri*". Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli, C.N.R.

meccaniche del tufo è tale che il suo impiego permetterebbe di modificare in modo sostanziale le condizioni di stabilità degli edifici prossimi al dissesto.

Un altro trattamento consolidante riguarda la pietra leccese, legato alla problematica della bassa resistenza all'azione degradante degli agenti atmosferici e dell'umidità di risalita dei terreni. La soluzione innovativa ad un problema così antico si chiama "Hybrid", ovvero un sistema protettivo ibrido organico/inorganico (O-I), nanostrutturato, fotopolimerizzabile, e traspirante, sviluppato nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento e tutelato da brevetto europeo⁹. Il prodotto è nanostrutturato poiché le sue componenti hanno dimensioni nanometriche, impendendo così di alterare il colore naturale della pietra ed è fotopolimerizzabile, ovvero indurisce dopo poche ore dall'applicazione, per effetto della luce solare. Il prodotto è un ibrido organico/inorganico, ovvero è costituito da una componente organica a base di resine metacriliche, e una inorganica a base di silice. Viene applicato in forma liquida e solidifica in poche ore per effetto dell'azione della luce, formando così un film protettivo che conferisce proprietà di idrofobicità alla pietra, impedendo l'ingresso di acqua e altre sostanze che contribuiscono alla sua degradazione. Inoltre, grazie alla particolare struttura chimica, l'agente protettivo è traspirabile, favorendo la fuoriuscita del vapore acqueo intrappolato all'interno.

Anche per i laterizi si può intervenire con l'innovazione tecnologica nel campo dell'ecosostenibilità. Il Porotherm Revolution¹⁰ ne è un esempio. Si tratta di un laterizio con isolamento, caratterizzato da un'anima in perlite o lana di roccia, sviluppata specificatamente per gli interventi di riqualificazione energetica, al fine di migliorare le performance dell'edificio e garantire un elevato comfort abitativo. Oppure si può intervenire nella produzione dei laterizi utilizzando una materia prima secondaria, il Sand Matrix¹¹, derivante dal trattamento delle scorie di incenerimento di rifiuti solidi urbani di matrice inorganica. Questo può limitare l'uso di sabbie naturali agendo da smagrante dell'argilla.

Altra innovazione nel settore dei laterizi è il mattone termo-dissipatore, che ha la caratteristica di avere una sezione trasversale irregolare, con cinque lati anziché quattro, che gli consente di dissipare più calore di un laterizio forato con una sezione standard. La sua faccia angolata lo protegge dalla radiazione solare, mentre la struttura cellulare porosa consente all'aria di passare attraverso i fori e dissipare l'eventuale energia termica immagazzinata, migliorando il comfort termico dell'edificio in cui è installato. Nella posa in opera, il giunto distanziatore fra i blocchi crea piccoli spazi triangolari che consentono all'aria di circolare¹².

Un altro materiale storico è il cocciopesto, ottenuto dalla frantumazione dei laterizi e pertanto classificabile come materiale ecologico, poiché consente di recuperare laterizi dismessi. Nell'uso tradizionale viene impiegato per confezionare malte a base di calce (alle quali

⁹ De Vitis L. (a cura di) (2015). *Hybrid: un brevetto UniSalento per salvare la pietra leccese*, in *Il Bollettino, il periodico di cultura dell'Università del Salento*. Marzo, n.3

¹⁰ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

¹¹ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

¹² Soluzione architettonica progettata da M. Niño e J. Navarro, fondatori di Sumart Design e Architettura, uno studio che progetta e sviluppa soluzioni per l'architettura sostenibile. Tratto da *architetturaecosostenibile.it*

conferisce proprietà idrauliche) per murature ed intonaci, e per realizzare rivestimenti impermeabilizzanti per pavimenti e pareti. Oggi il suo impiego è particolarmente adatto non solo al recupero del patrimonio edilizio storico, ma anche al settore della bioedilizia. È possibile dunque riutilizzare il cocciopesto in maniera innovativa, abbinandola a leganti naturali a base di calce, con l'aggiunta di biotriturato (materiale di scarto da residui vegetali) per ottenere un blocco leggero e prestante. Questo tipo di prodotto è stato brevettato con il nome di Coccio Blocco¹³, un materiale privo di cottura e a basso impatto ambientale, grazie principalmente all'uso di materiali di scarto e polvere di laterizio; l'assenza di cottura riduce inoltre i consumi energetici evitando le emissioni di CO₂. Viene usato per pareti interne in modo da garantire il benessere termo-igrometrico. Il riciclo della terracotta può avvenire anche con la realizzazione di lastre a base prevalente di cotto, il Cottostone¹⁴, ottenuto dalla frantumazione di elementi d'argilla cotta di prima qualità con aggiunta di sabbia quarzifera, coloranti organici e resina di poliestere. Le lastre possono essere fornite in gran quantità, con caratteristiche controllate riguardanti il peso, gli spessori, la compattezza, l'uniformità del disegno e le tonalità cromatiche.

La tecnica costruttiva tradizionale che presenta la più elevata compatibilità ambientale è la terra cruda. Il motivo non riguarda tanto il materiale in sé, che è comunque altamente ecologico dal momento che si utilizza la terra come materia prima, ma è il processo produttivo a fare la differenza. Non essendoci il processo di cottura in fornace, non vengono di conseguenza immessi nell'atmosfera gas nocivi, poiché l'elemento in terra cruda si ottiene per essiccazione dell'impasto terroso. La terra è in grado di porsi perfettamente in equilibrio sia con l'ambiente delle risorse umane, perché si presta a realizzazioni accessibili a qualsiasi organizzazione produttiva, dalla più semplice alla più complessa, sia con l'ambiente delle risorse naturali, essendo una risorsa facilmente reperibile nella gran parte dei contesti geografici con una varietà di prestazioni ottenibili dalle diverse tecniche esecutive. Attualmente è oggetto di studio di vari laboratori, che eseguono attività di monitoraggio energetico sugli edifici esistenti in terra cruda¹⁵, cercando di reintrodurre tale tecnica nel campo edilizio anche con innovazioni tecnologiche.

Gli studi hanno evidenziato come la terra cruda consenta di produrre manufatti adatti a perseguire il risparmio energetico e il comfort abitativo in differenti contesti climatici. Un intero ciclo produttivo che coinvolge la produzione di manufatti in terra prevede bassissimi livelli sia nella sottrazione di materie dall'ambiente, sia nell'utilizzo di energia (13% in meno rispetto al laterizio), sia nell'emissione di inquinanti (53% in meno di emissione di CO₂ rispetto al laterizio) e di scarti di lavorazione, sia infine nella dismissione¹⁶.

¹³ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

¹⁴ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

¹⁵ Tale ambito di monitoraggio è stato attivato da Sardegna Ricerche nel 2008 con il "Laboratorio Efficienza Energetica"

¹⁶ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

Uno studio recente ha portato alla nascita di Intonaco Natura¹⁷, un intonaco in terra cruda ecosostenibile, ecologico, economico e tradizionale. L'impasto terroso viene abbinato ad un particolare additivo fluido, sempre a base naturale, così da presentare elevata resistenza agli agenti atmosferici e alle sollecitazioni meccaniche. In questo modo è possibile innalzare la percentuale di componenti naturali dell'intonaco rispetto ad altri prodotti simili in commercio. Tale caratteristica è molto importante in termini di sostenibilità ambientale, perché buona parte del composto in terra cruda, essendo biodegradabile, può essere riassorbito dall'ambiente una volta che si è concluso il suo ciclo naturale di vita. La parte che, invece, non è biodegradabile, viene raccolta e inserita in un processo di trattamento idoneo per lo smaltimento.

Sotto l'aspetto dell'innovazione sono stati brevettati dei prodotti, come il Geosana¹⁸, un mattone composto di terra cruda, sabbie e diverse fibre naturali. La sua caratteristica è quella di essere un termo-igro regolatore: è in grado di mantenere costantemente un grado di umidità dell'aria intorno al 50% accumulando umidità fino alla sua saturazione, per cederla quando necessario; inoltre, ha una buona inerzia termica, assorbendo il calore quando l'ambiente è caldo e restituirlo quando si raffredda, regolarizzando la temperatura degli ambienti. Un altro prodotto innovativo è il Kartonsan¹⁹, un pannello isolante in terra cruda, rinforzato con fibre di paglia e rete in fibra di vetro. Questo pannello garantisce un microclima ideale, isolamento acustico, regolazione dell'umidità negli spazi abitativi ed ottima traspirabilità; è anch'esso un termo-igro regolatore.

Altri studi sperimentali riguardano il possibile utilizzo della terra cruda in edifici costruiti in zona sismica. Si tratta di realizzare murature di tamponamento che siano deformabili e duttili, in grado dunque di dissipare l'energia sismica e di assecondare le richieste di spostamento delle strutture progettate secondo i criteri di costruzione in zona sismica. L'idea è quella di sfruttare la debolezza meccanica del materiale, andando a privilegiare i comportamenti duttili rispetto a quelli fragili, in grado di interrompere la continuità dei pannelli attraverso fenomeni di scorrimento²⁰.

Per quanto riguarda l'uso dei leganti, il moderno cemento è ormai un materiale ad alto impatto ambientale, la cui sostenibilità è molto controversa, sia nella produzione sia nel suo impiego. La causa principale sono le emissioni di CO₂²¹, ossidi di azoto (NO_x), biossido di zolfo (SO₂), monossido di carbonio (CO), VOC e polveri sottili (PM 10 e PM 2,5) durante il processo di produzione. A questo si aggiunge l'elevato utilizzo del cemento per edifici e opere di urbanizzazione, essendo il calcestruzzo armato il materiale strutturale più impiegato, che ha

¹⁷ Ricerca scientifica svolta dall'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria nell'ambito del progetto di ricerca industriale e sviluppo sperimentale incluso nell'Agenda Strategica del Polo NET (Natura Energia Territorio).

¹⁸ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

¹⁹ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

²⁰ Bettini N. (2010). *Il ritorno della terra cruda per l'edilizia sostenibile: la duttilità dei tamponamenti negli edifici soggetti a sisma*. Corso di Dottorato in Structural Engineering Modelling, Preservation and Control of Materials and Structures XXII ciclo, Università degli Studi di Brescia e Università degli studi di Trento, Facoltà di Ingegneria

²¹ La produzione di cemento è responsabile del 5% delle emissioni globali di anidride carbonica dovute ad attività umane.

portato un eccessivo consumo di suolo con conseguente “cementificazione” di aree urbane, a discapito di aree verdi. Inoltre, per le sue caratteristiche fisico-tecniche, non è consigliato in bioedilizia, poiché trattiene l’umidità, ha scarsa traspirabilità ed elevata conducibilità, oltre che essere facilmente aggredibile dagli agenti atmosferici. A causa delle difficoltà di posa in opera inoltre, nell’impasto vengono sempre inseriti degli additivi che hanno un forte impatto ambientale. Tutto ciò rende l’industria del cemento insostenibile.

Il cemento Portland è composto per almeno il 95% da clinker, una miscela di silicati di calcio e alluminati di calcio ottenuti dalla cottura ad alta temperatura di una miscela di calcari e argille, naturale (marne) o artificiale. Il clinker viene poi finemente macinato e addizionato con gesso nella misura del 4-6% con la funzione di ritardante di presa.

In un primo confronto con la produzione della calce, si può notare come l’emissione di CO₂ sia legata alla temperatura di cottura del carbonato di calcio contenuto nella pietra calcarea, in comune per i due materiali²²; la cottura della calce avviene a circa 950°C, mentre nel caso del cemento bisogna raggiungere i 1450°C per la produzione del clinker. All’aumentare della temperatura, con il processo di cottura viene liberata maggiore quantità di anidride carbonica, poiché si ha una diminuzione della massa totale. Per ogni Kg di clinker prodotto, viene prodotto circa un kg di anidride carbonica²³; mentre per ogni Kg di calce viva prodotta vengono prodotti in media 785 grammi di CO₂²⁴. Per raggiungere la temperatura finale di 1450°C, inoltre, è necessaria una quantità elevata di energia, superiore a quella impiegata per la produzione di calce. Analizzando il ciclo di vita dei due materiali, l’anidride carbonica così prodotta e immessa nell’atmosfera viene in seguito fissata dalla calce (sia aerea sia idraulica) durante il processo di indurimento, che avviene con la reazione di carbonatazione, assorbendo una quantità di CO₂ pari a circa il 50-60%²⁵ di quella rilasciata durante la produzione della calce. Al contrario, l’indurimento del cemento non avviene attraverso la carbonatazione²⁶, ma per la presenza di silicati idrati di calcio che si formano in seguito all’idratazione del cemento. Partendo da queste due valutazioni riguardanti la produzione e l’assorbimento di CO₂, la calce presenta un grado di sostenibilità maggiore rispetto al cemento, con una maggiore compatibilità ambientale ed energetica.

Anche nei confronti della tradizione, l’attuale calcestruzzo (composto da cemento, acqua e aggregati) si dimostra insostenibile. Il calcestruzzo degli antichi romani, infatti, era un materiale ecosostenibile, formato da una miscela di calce aerea e componenti estratti

²² La materia prima è simile per entrambi (considerando cemento e calce idraulica), ovvero una miscela di calcari e argille. La differenza consiste nella percentuale di argilla (20-22% per la calce idraulica e 25-27% per il cemento).

²³ Bertolini L. (2010), op. cit.

²⁴ Associazione Forum Italiano Calce (2010). *La calce nel sistema LEED. Un materiale antico con un futuro 'verde' e 'sostenibile'*, in *Forum Italiano Calce News*. Newsletter di aprile

²⁵ Associazione Forum Italiano Calce (2010), op. cit.

²⁶ La carbonatazione avviene durante la vita utile del calcestruzzo, ma è un fenomeno di degrado poiché le armature possono successivamente corrodarsi. L’ambiente alcalino, dovuto all’idrossido di calcio, crea un film protettivo sulla superficie delle barre di acciaio; la carbonatazione produce un abbassamento del pH da valori maggiori di 13 a valori minori di 9, distruggendo il film passivo. La corrosione determina un’azione espansiva che porta alla fessurazione e al distacco del copriferro.

localmente, come pozzolana ed altre scorie laviche che Vitruvio definiva *pumex pompeiana*²⁷. Questa miscela, confrontata a quella attuale, avrebbe consentito di abbattere notevolmente le emissioni di gas nocivi.

L'evoluzione di un materiale, però, non è sempre legata al progresso scientifico e tecnico, ma è anche conseguenza di scelte legate al contesto sociale e politico.

Si sta già intervenendo sul cemento, con studi e ricerche che hanno portato alla produzione di eco-cementi. Si possono, ad esempio, utilizzare aggregati provenienti da riciclo per il confezionamento del calcestruzzo, capaci di migliorarne le capacità di isolamento termoacustico²⁸, produrre cementi con basse emissioni di CO₂ con l'uso di geopolimeri²⁹ oppure cementi capaci di assorbirla dall'atmosfera durante la fase di indurimento. Un calcestruzzo ecosostenibile per uso strutturale è il Beton Più³⁰, composto da cemento a basso contenuto di clinker prodotto con energie rinnovabili, e da aggregati silicei e di riciclo che concorrono all'abbattimento delle emissioni di agenti inquinanti nell'atmosfera.

La riduzione del clinker nel cemento può avvenire anche in maniera tradizionale, proprio con l'utilizzo della pozzolana. Il cemento pozzolanico viene prodotto già da diversi anni, ed è conforme alla norma UNI EN 197-1 secondo la quale rientra nella tipologia di cemento tipo IV. Questo tipo di cemento sta ritornando di attualità, fortemente legato al tema della sostenibilità e dell'abbattimento energetico dei materiali. È composto da clinker in quantità variabile tra il 45-89%, da pozzolana in quantità tra l'11-55% e da gesso per il 2-4%. L'aggiunta pozzolanica consente di ottenere calcestruzzi e malte con caratteristiche migliori di quelle ottenute con cemento Portland³¹. In particolare, il cemento pozzolanico sarà più resistente all'attacco chimico di acque aggressive, poiché la pozzolana reagisce con l'idrossido di calcio (componente che subisce l'attacco chimico) e si avrà una minor quantità di quest'ultimo. Inoltre, un minor tenore di alluminato tricalcico (presente nel clinker) garantisce una maggiore resistenza all'attacco solfatico.

La pozzolana, inoltre, può essere reimpiegata tuttora con la calce per confezionare malte per intonaci, anche in maniera innovativa con prodotti brevettati quali ad esempio il K1710 Pura Calce³², una malta composta da calce idrata ed inerti pregiati, fibrorinforzata e ad azione pozzolanica.

Un ulteriore aspetto innovativo della calce riguarda la possibilità di essere usata per produrre il Biomattone³³, un blocco pieno ottenuto combinando il truciolo vegetale di canapa con un legante a base di calce idrata e additivi naturali. Questo tipo di prodotto ha buone

²⁷ Giuliano M. (2010), op. cit.

²⁸ SUS-CON, progetto di Ricerca e Sviluppo sul calcestruzzo sostenibile coordinato dal Consorzio CETMA - Centro di progettazione, design & tecnologie dei materiali di Brindisi, finanziato dalla Comunità Europea.

²⁹ Materiali sintetici composti da alluminosilicati. La temperatura di cottura è 750°, che consente di dimezzare il consumo di energia rispetto alla produzione del tradizionale clinker.

³⁰ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

³¹ Bertolini L. (2010), op. cit.

³² Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

³³ Osservatorio Recycle e Legambiente (2016), op. cit.

caratteristiche di isolamento termoacustico nonché una buona inerzia termica, oltre ad essere riciclabile e biodegradabile.

Anche un'altra malta tradizionale, ovvero la malta di tufina, trova spazio nell'attuale bioedilizia. Lo Stucco di Tufina³⁴, ad esempio, è un rivestimento naturale a presa aerea per intonaci finali interni ed esterni, ecologico e traspirante, e resistente alle muffe. Questo prodotto è composto da grassello di calce e da aggregati calcarei porosi come il tufo, selezionato e vagliato a secco per una granulometria molto fine dell'ordine dei 0,5 mm. Il tufo, dopo essere amalgamato con il grassello di calce, viene nuovamente vibro vagliato in umido fino a ottenere una pasta bianca ed omogenea con una granulometria molto fine, non superiore a 0,6 mm. Un altro prodotto confezionato con tufina è commercializzato con il nome di Malta Grossa³⁵, ovvero una malta utilizzabile sia per la messa in opera delle murature (eventualmente con aggiunta di cemento) che per la realizzazione del primo strato di intonaco sopra il rinzaffo.

³⁴ Prodotto da Fornaci San Giuseppe e da La Calcaria Srl. Tratto da www.fornacisangiuseppe.it e www.lacalcaria.it

³⁵ Prodotto da Fornaci San Giuseppe e da La Calcaria Srl. Tratto da www.fornacisangiuseppe.it e www.lacalcaria.it

CAPITOLO 3. Censimenti dei materiali dalla tradizione costruttiva dell'Italia meridionale

In questo capitolo verranno elencati i materiali censiti dalla tradizione locale di tre regioni del Sud Italia, ovvero Campania, Puglia e Sardegna. Se ne descrivono inoltre la natura, la produzione, le caratteristiche e i principali impieghi. I materiali si possono classificare in naturali e artificiali: i materiali naturali sono i lapidei, dunque tutte le pietre naturali estratte dalle cave e successivamente lavorate (ad es. tagliate o frantumate); mentre i materiali artificiali si ottengono dalla trasformazione di materie prime naturali, e sono i manufatti in terra cruda, i mattoni cotti (laterizi) e i leganti quali la calce.

Si rimanda al Capitolo 5 la schedatura dei materiali qui elencati, con valutazioni su possibili innovazioni tecnologiche.

3.1 I materiali lapidei: origine, proprietà, impieghi e classificazione

Con il termine “Lapidei Ornamentali” sono di solito indicate tutte quelle rocce che, per le loro caratteristiche petrografiche ed estetiche, possono essere utilizzate nelle costruzioni che possono svolgere sia funzioni strutturali sia architettoniche. La Norma Italiana UNI 8458 del 1983 stabilisce e definisce i termini tecnici e classifica i prodotti lapidei impiegati nell’edilizia come “rocce da costruzione e da decorazione” (escludendo i prodotti di frantumazione o i granulati naturali quali ghiaia e sabbia). I materiali vengono classificati in quattro categorie commerciali:

- Marmo¹: *“roccia cristallina, compatta, lucidabile, da decorazione e da costruzione, prevalentemente costituita da minerali di durezza Mohs dell’ordine di 3 e 4”*;
- Granito: *“roccia fanero-cristallina, compatta, lucidabile, da decorazione e da costruzione, prevalentemente costituita da minerali di durezza Mohs dell’ordine di 6 e 7”*;
- Travertino: *“roccia calcarea sedimentaria di deposito chimico con caratteristica struttura vacuolare, da decorazione e da costruzione; alcune varietà sono lucidabili”*;
- Pietra: *“roccia da costruzione e/o da decorazione di norma non lucidabile”*.

Dal punto di vista petrografico, i lapidei utilizzati in edilizia nella tradizione costruttiva del Sud Italia appartengono ai gruppi delle rocce vulcaniche e delle rocce carbonatiche.

Le rocce ignee effusive, chiamate anche rocce vulcaniche, si formano dalla consolidazione del magma all’esterno della crosta terrestre o nei condotti vulcanici. Costituiscono circa il 95% della crosta terrestre e rappresentano circa il 5% delle rocce che affiorano in superficie. I fattori che influenzano la consolidazione sono la rapida caduta della temperatura e della pressione; il rapido raffreddamento, inoltre, comporta un’elevata porosità e un basso grado di compattezza. In base alla loro disposizione sulla superficie terrestre e al loro aspetto si

¹ Sebbene la definizione di “marmo” sia applicabile solo a rocce metamorfiche, in tale categoria rientrano anche rocce sedimentarie di natura calcarea, con riferimento alla loro lavorabilità in lastre lucidate.

distinguono in “lave”, se consolidate in ambiente subaereo, e “piroclastiti”, se si formano a seguito del deposito dei materiali eruttati (piroclasti).

Nelle lave si forma quasi sempre una struttura vetrosa, in cui i cristalli non sono visibili nella roccia, ma in certi casi si può avere anche una struttura porfirica. Questa struttura si forma quando i primi cristalli accrescono nel momento in cui il magma è ancora all'interno della crosta terrestre o nel condotto vulcanico, poi la restante parte ancora fusa del magma viene espulsa all'esterno che raffredda bruscamente non avendo il tempo per cristallizzare. La composizione delle rocce a struttura porfirica è quindi caratterizzata dalla presenza di fenocristalli, ovvero cristalli di grosse dimensioni, immersi in una matrice di fondo di lava amorfa a struttura vetrosa. I minerali contenuti, poi, definiscono la roccia ignea, ed appartengono al gruppo dei silicati, ovvero: quarzo, silicati sialici (che contengono silicio e alluminio) e silicati femici (che contengono ferro e magnesio). La quantità di silice (SiO_2) permette inoltre di distinguere le rocce ignee in: rocce acide ($\text{SiO}_2 > 65\%$), rocce intermedie (SiO_2 tra il 52% e il 65%) e rocce basiche (SiO_2 intorno al 40%)². Se si considera dunque la composizione mineralogica, le rocce vulcaniche si possono classificare utilizzando il diagramma a due triangoli QAPF (detto anche di Streckeisen). In corrispondenza di ogni vertice del diagramma sono rappresentati quattro classi di minerali, di cui tre appartenenti al gruppo dei silicati sialici, che sono (partendo dal vertice superiore e procedendo in senso antiorario): quarzo, feldspati alcalini, feldspatoidi e plagioclasti. A seconda della composizione percentuale di questi minerali, la roccia viene rappresentata come una miscela ternaria³ (composta da tre dei quattro componenti), poiché il quarzo e i feldspatoidi non possono coesistere nella stessa roccia⁴. Spostandosi da sinistra verso destra, le rocce diventano più scure perché ricche in femici; spostandosi invece dall'alto verso il basso, la quantità di quarzo diminuisce sempre di più (si passa da rocce acide a rocce basiche) ed aumentano i feldspatoidi (in particolare la leucite).

Altre rocce effusive sono di natura piroclastica, dette anche depositi piroclastici, ovvero costituite dall'insieme dei prodotti dell'attività vulcanica di tipo esplosiva (piroclasti) che subiscono un processo di litificazione. In base alle modalità di trasporto e deposizione, si possono avere: depositi da caduta, ben stratificati, quando sono formati dai prodotti che ricadono a terra attraverso l'aria, per lanci diretti dal cratere o dopo essere stati trasportati in alto da colonne eruttive; oppure depositi da flusso o da corrente, privi di stratificazione, formati da materiale piroclastico trasportato verso valle con densità e viscosità molto diversa, mescolato con gas ad alta temperatura che funziona da lubrificante. Questi depositi piroclastici possono essere stratificati o non stratificati, a grana grossa o fine, cementati o sciolti, fratturati o intatti. La loro struttura è inoltre variabile da deposito a deposito e, nello

² Budetta P. (2007). *“Corso di Geologia Applicata ai materiali naturali da costruzione”*. Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Napoli “Federico II”

³ Budetta P. (2007), op. cit.

⁴ Se il magma di partenza fosse ricco in silice (SiO_2), essa si combinerebbe con i feldspatoidi a dare origine ai feldspati. Il quarzo è presente quando si verifica un eccesso di silice, mentre i feldspatoidi lo sono quando c'è difetto di silice.

stesso deposito, lungo direzioni verticali e orizzontali. I materiali piroclastici si possono classificare in base alle dimensioni delle particelle in: bombe vulcaniche (> 10 cm), lapilli (1-10 cm) e cenere vulcanica (< 1 cm)⁵.

Le rocce carbonatiche sono rocce di tipo sedimentarie con matrice/cemento di natura calcarea, in cui il carbonato di calcio (calcite) è il componente principale. In generale, le rocce sedimentarie sono un tipo di rocce formate dall'accumulo e successiva cementazione di sedimenti di varia origine, derivanti in gran parte dalla degradazione e dall'erosione di rocce preesistenti. Formano circa l'1% della crosta terrestre e costituiscono circa il 75% delle rocce che affiorano in superficie. Le rocce sedimentarie sono caratterizzate dalla presenza di tre unità principali: clasti, cioè frammenti grossolani che rappresentano l'impalcatura della roccia; una matrice, costituita da materiali fini intrappolati tra i clasti oppure che tiene in sospensione i clasti; un cemento, cioè un composto di natura silicea o calcarea che è precipitato nei vuoti del sedimento e l'ha consolidato⁶. Adottando un criterio genetico, le rocce sedimentarie si possono classificare in base alla loro origine in: rocce chimiche; rocce organogene (biocostruite, biochimiche); rocce detritiche (clastiche)⁷. Rocce di questo tipo sono i calcari bioclastici e detritici (a base di carbonato di calcio CaCO_3), le dolomie (a base di carbonato doppio di calcio e magnesio $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), le arenarie (sabbie cementate da materiali silicei o calcarei) e i travertini (depositi di natura chimica). Le rocce sedimentarie si formano a seguito di complessi processi chimico-fisici che si possono riassumere in: degradazione ed erosione, trasporto, sedimentazione e diagenesi⁸.

La degradazione e l'erosione hanno luogo da un'alterazione chimico-fisica di rocce preesistenti. La degradazione fisica è legata principalmente alle escursioni termiche e a cause tettoniche, che provocano la riduzione delle dimensioni dei granuli generando fratture nell'ammasso roccioso. Gli agenti della degradazione chimica, molto più importante di quella fisica, sono invece il vapore acque, l'ossigeno atmosferico, l'anidride carbonica e gli acidi organici presenti nel suolo. Questi agenti interagiscono con i componenti della roccia attraverso processi di: soluzione, idratazione, ossidazione e idrolisi.

I detriti derivanti dall'erosione, ossia i sedimenti, vengono poi trasportati secondo diverse modalità: trasporto ad opera dei corsi d'acqua, del vento, delle correnti marine e delle maree, dei ghiacciai. I processi di trasporto si dividono essenzialmente in due tipi: il trasporto particellare, in cui il mezzo trasportante e i sedimenti sono indipendenti l'uno con l'altro, e il trasporto di massa, in cui il solido e il fluido hanno un comportamento d'insieme, come se si trattasse di un unico corpo.

Il processo di sedimentazione ha poi inizio quando il flusso della corrente trasportante rallenta il suo movimento al punto tale da non essere più in grado di sostenere il movimento dei

⁵ Papa R. (2007). *Indagine sperimentale sulla coltre piroclastica di un versante della Campania*. Dottorato di ricerca in Ingegneria delle Costruzioni XX ciclo, Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Geotecnica

⁶ Bertolini L. (2010), op. cit.

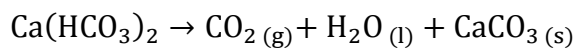
⁷ Calcaterra D. (2012). *Guida pratica per il riconoscimento macroscopico delle rocce*. Dipartimento di Idraulica, Geotecnica ed Ambientale, sezione Geologia Applicata, Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli Federico II

⁸ Budetta P. (2007), op. cit.

sedimenti in esso contenuti, ed avviene in ambienti continentali o marini. La deposizione può avvenire in due modi: deposizione per effetto della gravità, in cui le particelle più grandi come la ghiaia abbandonano il mezzo trasportante e si accumulano sul fondo del fiume o del bacino dal momento in cui il mezzo non ha più la forza per trattenerli in sospensione e, successivamente, si andranno a depositare anche detriti di dimensioni sempre minori quali sabbie, limi ed argille, a causa della forza sempre minore del mezzo; oppure, un altro metodo di deposizione si ha quando la corrente è torbida, in cui l'elevata viscosità del mezzo favorisce il trascinarsi verso il basso delle particelle, lasciando sedimentare anche le frazioni a granulometria più fine.

Una volta depositi, i sedimenti vanno incontro ai processi di diagenesi, ovvero quel complesso di trasformazioni chimico-fisiche che comprendono la litificazione, per effetto del quale i sedimenti sciolti si trasformano in roccia lapidea. I meccanismi della litificazione sono due: costipamento (azione meccanica) e cementazione (azione chimica). Il costipamento avviene con l'aumento della pressione e della temperatura, con il quale si ha una riduzione degli spazi vuoti (pori) attraverso l'espulsione dell'acqua interstiziale con conseguente riduzione del volume, la quale dipende dalla granulometria; la riduzione è massima per i sedimenti più fini. Al costipamento segue la cementazione, meccanismo legato alle reazioni chimiche che interessano le acque interstiziali, il che comporta un'ulteriore diminuzione della porosità.

La principale reazione chimica è la precipitazione dei sali di calcio disciolti in acqua (ossia il bicarbonato di calcio) in carbonato di calcio, in seguito alla perdita di CO₂ per volatilizzazione, andando così a legare la matrice granulare:



Tutte le rocce sono dei sistemi "trifase", formate da una frazione solida, dai vuoti (pori) e dall'acqua eventualmente contenuta in essi⁹.

Le principali proprietà dei materiali lapidei sono:

- Proprietà fisiche: peso specifico, densità, grado di compattezza, grado di porosità, porosità totale, permeabilità, conducibilità termica, coefficiente di dilatazione termica, coefficiente di imbibizione;
- Proprietà meccaniche: resistenza a compressione, resistenza a compressione dopo cicli di gelività, resistenza a trazione, resistenza a flessione, resistenza a taglio, modulo elastico (o di Young), resistenza all'urto (definisce la tenacità), resistenza all'usura.

Sulle caratteristiche tecniche "di accettazione" delle "pietre naturali da costruzione", il Regio Decreto 2232 del 1939 definisce le procedure per la determinazione delle caratteristiche fisiche, di resistenza meccanica e di resistenza chimica (azione della salsedine marina). Di rilievo anche il Regio Decreto 2234 del 1939, sulle norme di accettazione del materiale per pavimentazioni, ove trattasi del materiale lapideo (resistenza all'urto, a flessione, all'usura per attrito radente, alla gelificazione).

⁹ Del Gaudio A., Vallario A. (2007), op. cit.

La porosità è un parametro determinante, in quanto influenza le proprietà meccaniche della roccia. Le pietre compatte possono presentare valori di resistenza a compressione superiori a 100 MPa, mentre nelle pietre con elevata porosità la resistenza può essere inferiore a 10 MPa (Tabella 3.1 e Tabella 3.2). La resistenza a trazione, come per tutti i materiali fragili, è invece modesta¹⁰ (Tabella 3.3). Due requisiti fondamentali delle rocce sono la durezza e la durezza. La durezza dipende dalla natura mineralogica e quindi dalla durezza dei minerali (espressa mediante la scala di Mohs); si possono distinguere: rocce tenere, rocce semidure, rocce dure e rocce durissime. La durezza, invece, esprime la resistenza che oppongono le rocce alle azioni fisiche, chimiche e meccaniche esplicitate dagli agenti atmosferici e dall'azione biologica¹¹.

Tabella 3.1 - Valori tratti da Bertolini L. (2010), "Materiali da costruzione. Volume Primo", Napoli

Tipo di pietra	Porosità totale (%)	Densità (Kg/m ³)	Resistenza a Compressione (MPa)	Coefficiente di dilatazione termica (°C ⁻¹)
<i>Graniti, dolomie, calcari compatti</i>	< 1%	2500-3000	100-300	7-9 x10 ⁻⁶
<i>Arenarie, travertini</i>	5-20%	1500-2000	40-120	10-12 x10 ⁻⁶
<i>Tufi vulcanici, calcari teneri</i>	10-45%	1000-1500	5-30	-

Tabella 3.2 - Valori tratti da D'Elia P. (1968), "Materiali naturali da costruzione"

Tipo di pietra	Carico di rottura a Compressione (MPa)
<i>Basalti, porfidi</i>	> 200
<i>Graniti</i>	150-200
<i>Trachiti</i>	100-150
<i>Calcari, arenarie</i>	50-100
<i>Travertini, scisti, filladi</i>	10-50
<i>Tufi vulcanici e tufi calcarei</i>	< 10

Tabella 3.3 - Valori tratti da De Sivo B. (1985), "Appunti di architettura tecnica", Napoli

Tipo di pietra	Resistenza a trazione (MPa)	Resistenza a compressione R _c (MPa)	Resistenza a flessione R _f (MPa)	Resistenza a taglio (MPa)
<i>Graniti</i>	3,5 (2-6)	160 (100-200)	15 (10-17,5)	9 (3-15)
<i>Trachiti</i>	3,5 (2,5 4,5)	150 (100-180)	8,5	-
<i>Tufi vulcanici</i>	0,8	7 (3-7)	0,6 (0,5-0,7)	-
<i>Calcari e calcari dolomitici</i>	5 (3-7)	90 (50-150)	12 (8-17)	11 (5-11)
<i>Tufi calcarei</i>	-	8 (1-15)	-	-
<i>Travertini</i>	-	45	-	-
<i>Arenarie</i>	2 (1-4)	80 (40-130)	5,5 (4-9)	4,5 (3-9)

¹⁰ Bertolini L. (2010), op. cit.

¹¹ Del Gaudio A., Vallario A. (2007), op. cit.

Generalmente, le specifiche tecniche dei materiali utilizzati nelle costruzioni a fini strutturali o portanti pongono la resistenza a compressione come primo dato. Alti valori di resistenza a compressione sono in generale anche un'efficace indice di altre proprietà, quali la bassa porosità e la durabilità (capacità del materiale di resistere nel tempo all'azione dell'ambiente circostante) in quanto tutte queste caratteristiche sono connesse alla compattezza microstrutturale¹².

La resistenza a compressione della muratura in pietra, secondo le Norme Tecniche sulle Costruzioni del 2018, può essere effettuata sperimentalmente realizzando campioni della muratura (elementi in pietra e malta legante), oppure può essere stimata dalle proprietà della pietra e della malta. Secondo queste Norme, la muratura è il prodotto dell'assemblaggio *“organizzato ed efficace di elementi e malta”*. Inoltre, *“gli elementi naturali sono ricavati da materiale lapideo non friabile o sfaldabile, o resistente al gelo; essi non devono contenere in misura sensibile sostanze solubili, o residui organici e devono essere integri, senza zone alterate o rimuovibili. Gli elementi devono possedere i requisiti di resistenza meccanica ed adesività alle malte determinati secondo le modalità descritte nel capitolo 11.10.3”*.

Le pietre possono essere di forma pressoché parallelepipedica, o squadrata, oppure grossolanamente lavorate, o non squadrata. In quest'ultimo caso devono comunque essere poste in opera in strati pressoché regolari ed eventualmente la muratura deve essere listata da fasce di calcestruzzo semplice o armato oppure da filari di laterizio pieno. Dal punto di vista tecnico è possibile l'impiego del legante cementizio, ma questo materiale comporta evidenti problemi a causa della presenza di sali solubili al suo interno¹³.

Definita la resistenza caratteristica a compressione dell'elemento lapideo f_{bk} (su 10 campioni) come l'80% della resistenza a compressione media degli elementi testati f_{bm} , attraverso la relazione $f_{bk} = 0,8 f_{bm}$, la resistenza caratteristica della muratura f_k è deducibile dalla tabella 11.10.VI della Norma, riportata in Tabella 3.4.

Tabella 3.4 - Resistenza a compressione in MPa della muratura in pietra

Resistenza caratteristica della pietra f_{bk} (MPa)	Resistenza caratteristica della muratura f_k (MPa) per tipo di malta			
	M 15	M 10	M 5	M 2,5
2,0	1,2	1,2	1,2	1,2
3,0	2,2	2,2	2,2	2,0
5,0	3,5	3,4	3,3	3,0
7,5	5,0	4,5	4,1	3,5
10	6,2	5,3	4,7	4,1
15	8,2	6,7	6,0	5,1
20	9,7	8,0	7,0	6,1
30	12,0	10,0	8,6	7,2
> 40	14,3	12,0	10,4	-

¹² Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009). *Il manuale tematico della pietra*, in *I manuali del recupero dei centri storici della Sardegna*. Dipartimento di Architettura dell'Università di Cagliari, Dipartimento di Architettura e Pianificazione dell'Università di Sassari, Regione Autonoma della Sardegna, diffusione a cura di ITACA

¹³ Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009), op. cit.

La produzione delle pietre da costruzione prevede l'estrazione della pietra e la sua successiva lavorazione. Nel caso di impiego per il confezionamento di conglomerati, il materiale viene utilizzato in forma granulare e può essere estratto già in questo stato (ghiaie) oppure può essere sottoposto a frantumazione (pietrischi). Per altri scopi i lapidei vengono utilizzati come pietra da taglio, estratti in blocchi di grossa dimensione e successivamente tagliati, ad esempio in lastre¹⁴. I requisiti richiesti dipendono dalla destinazione d'uso, anche se si può affermare che una roccia che presenti un'elevata densità, un alto grado di compattezza e un basso coefficiente di imbibizione è quasi certamente una roccia con elevate proprietà meccaniche. Le rocce ignee sono quelle di maggior pregio perché dotate di elevata durezza; le rocce carbonatiche sono tuttavia quelle soggette a sfruttamento più intensivo perché idonee ad una vasta gamma di usi (anche se meno durevoli delle ignee, soprattutto per uso esterno). Alcune rocce ignee, come i porfidi e le lave vesuviane, si prestano in particolar modo ad essere impiegate nelle pavimentazioni stradali. Le rocce tenere, come i tufi vulcanici e i tufi calcarei, sono invece materiali che, per le ottime caratteristiche di lavorabilità, di leggerezza e di coibenza termo-acustica, sono da tempo largamente utilizzati in edilizia per le strutture portanti in muratura, ed ancora oggi per i muri perimetrali di chiusura negli edifici in cemento armato¹⁵. Si riporta nella Tabella 3.5 l'andamento in percentuale dell'utilizzo della muratura e del cemento armato per epoca di costruzione, secondo i dati Istat del '91 per il comune di Napoli¹⁶.

Tabella 3.5 - Epoca di costruzione prevalente. Confronto tra muratura e c.a. dal 1919 al 1991

% Abitazioni in muratura						% Abitazioni in cemento armato					
<19	19-45	45-60	60-71	71-81	81-91	<19	19-45	45-60	60-71	71-81	81-91
67%	15%	9%	6%	2%	1%	0%	7%	31%	40%	12%	10%

L'estrazione della cava può avvenire con metodi che, sfruttando la fragilità del materiale, creano delle fessure che, propagando, portano alla rottura della roccia. Le tecnologie possono prevedere l'uso di esplosivi, la perforazione della roccia con fori vicini, l'introduzione di cunei meccanici o idraulici, il taglio (con filo diamantato, con fiamma o con getto d'acqua a pressione). Successivamente il blocco di pietra viene lavorato per ottenere forme regolari, soprattutto blocchi per murature o pavimenti oppure lastre per diversi impieghi. La prima fase è il taglio del blocco, che deve essere effettuato in modo preciso, al fine di ottenere la geometria desiderata e di sprecare la minor quantità possibile di materiale. In genere si utilizzano tecniche di taglio sia meccanico sia con getto d'acqua a pressione con le quali si realizzano blocchi regolari di grosse dimensioni, dai quali si tagliano poi delle lastre, per ottenere, infine, la forma finale richiesta. I manufatti devono, quindi, essere rifilati e possono essere sottoposti ad ulteriori lavorazioni. La lavorazione finale riguarda la finitura superficiale

¹⁴ Bertolini L. (2010), op. cit.

¹⁵ Del Gaudio A., Vallario A. (2007), op. cit.

¹⁶ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (s.d.). *Modello di caratterizzazione tipologica a scala nazionale. Napoli. Schede Antologiche*. Napoli

delle lastre; modificando la tessitura della superficie si possono ottenere aspetti superficiali notevolmente diversi anche con una stessa pietra. Esistono molti tipi di finiture superficiali; le più frequenti possono essere riassunte in¹⁷:

- Superfici di spacco: sono le superfici grezze che si ottengono dalla rottura del materiale in cava o in stabilimento, si ottiene quindi la superficie di frattura del materiale;
- Superfici a piano sega: è la superficie che deriva dal taglio del materiale e si presenta granulare, con una tessitura che dipende dal materiale, dalla tecnica di taglio e dal tipo di abrasivo impiegato;
- Superfici da lavorazione a urto: la superficie viene irruvidita con strumenti di diverso tipo, manuali o idraulici; in funzione del tipo di attrezzo si parla di superfici sabbiate, spuntata, martellinata, gradinata o bocciardata;
- Superficie a spacco termico (o fiammata): la superficie è fortemente irregolare a causa del distacco di molti frammenti superficiali, prodotto dal brusco riscaldamento con una fiamma ossiacetilenica;
- Superficie levigata o lucidata: la superficie viene lavorata con mole abrasive; in funzione della granulometria dell'abrasivo si possono ottenere superfici levigate o di varia ruvidità, fino a superfici lucide (lisce o riflettenti). Questo trattamento causa la parziale chiusura dei pori superficiali, formando una barriera protettiva.

La posa in opera dei blocchi e delle lastre in pietra deve tener conto della natura fragile di questi materiali. Si dovranno, quindi, evitare concentrazioni di sforzi che possono generare l'innesco di una cricca. Nel caso delle pavimentazioni, ad esempio, le lastre o i blocchi devono appoggiare su materiali che consentono di distribuire gli sforzi (ad esempio un letto di sabbia). Per le lastre si dovranno consentire le variazioni dimensionali, ad esempio di origine termica o igrometrica (per pietre porose)¹⁸.

I principali impieghi dei materiali lapidei¹⁹ possono essere elencati a seconda dell'uso: diretto, ovvero senza trattamento preventivo, o indiretto, a seguito di trattamento industriale.

- Usi diretti: murature ordinarie e portanti, rocce per inerti, rivestimenti esterni, pavimentazioni di interni, coperture, pavimentazioni stradali, massicciate ferroviarie, scogliere frangiflutti.
- Usi indiretti: pietre da calce, pietre per cementi, gessi, argille per laterizi, isolanti (si usano pomice, perliti, lana di roccia e zeoliti).

¹⁷ Bertolini L. (2010), op. cit.

¹⁸ Bertolini L. (2010), op. cit.

¹⁹ Del Gaudio A., Vallario A. (2007), op. cit.

3.1.1 Pietre Vulcaniche e Marmi della Campania

Da un punto di merceologico, i materiali lapidei appartenenti alla tradizione costruttiva della Campania possono essere come di seguito classificati (Tabella 3.6 e Tabella 3.7), considerando le due categorie comprendenti le pietre vulcaniche²⁰ (sostanzialmente piroclastiti e rocce laviche) e le pietre carbonatiche²¹ (principalmente rocce calcaree e travertini).

Tabella 3.6 - Pietre Vulcaniche della Campania

Tipo di pietra	Varietà	Provenienza	Categoria
Tufo	Tufo Giallo Napoletano	Campi Flegrei	Piroclastite
	Tufo Grigio (Ignimbrite Campana)	Campi Flegrei, Roccamonfina, Penisola Sorrentina	
	Tufo Brunastro	Somma-Vesuvio	
	Tufo Verde	Ischia	
	Tufo Bianco	Avellino	
Pozzolana		Campi Flegrei, Penisola Sorrentina	Piroclastite
Piperno		Campi Flegrei	Piroclastite
Pomice Trachitica		Campi Flegrei, Ischia	Piroclastite
Lapilli	Arena di fuoco, Arena di lava	Somma-Vesuvio	Piroclastite
Tefrite Leucitica		Somma-Vesuvio, Roccamonfina	Lava
Trachite	Del Monte Olibano	Campi Flegrei	Lava
	Di Zaro	Ischia	
Pietrarsa	Ferrugine	Campi Flegrei, Somma-Vesuvio	Lava

Tabella 3.7 - Pietre Carbonatiche della Campania

Tipo di pietra	Varietà	Provenienza
Arenaria	Pietra di Massa	Massa Lubrense (NA)
Calcarea		Penisola Sorrentina
Travertino	Di Paestum, di Faiano, di Sarno, di Contursi, della Valle del Tanagro	Salerno
Marmi²²	Di Bellona, di Mondragone, di Dragoni, di Caiazzo	Caserta
	Corallina, Pietra di Montevergine, Alabastro Cotognino	Avellino
	Di Vitulano	Benevento

²⁰ Del Gaudio A., Vallario A. (2007), op. cit.

Raia L. (2004), op. cit.

Pignatelli G. (2006), op. cit.

Giuliano M. (2010), op. cit.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (s.d.), op. cit.

²¹ Del Gaudio A., Vallario A. (2007), op. cit.

Pignatelli G. (2006). *L'attività estrattiva tradizionale in Penisola Sorrentina: dai tagliamonte alle cave industriali nel territorio Lubrense*, in *Geografia*. Anno XXIX n. 3-4, Seconda Università di Napoli, Dipartimento di Storia e Processi dell'Ambiente antropizzato.

Imbriale P. (2014). *I travertini quaternari della Campania: caratteri sedimentologici, geochimici e ipotesi genetica*. Dottorato di ricerca in Scienza della Terra XXV ciclo, Università di Napoli "Federico II"

²² I "marmi" della Campania sono rocce sedimentarie di natura calcarea.

3.1.2 Calcari e Calcareniti della Puglia

Le pietre della Puglia appartengono al gruppo dei “Calcari e Calcareniti delle Murge e del Salento”. I materiali censiti sono di seguito elencati²³ (Tabella 3.8).

Tabella 3.8 - Calcari e calcareniti della Puglia

Tipo di pietra	Varietà	Provenienza
Pietra di Apricena	Successione del Fiorito, Successione del Biancone, Successione del Serpeggiante	Puglia settentrionale Promontorio del Gargano
Calcarenite di Gravina	Carparo, Cozzoso, Scorzo, Mollica, Zuppigno, Stagno, Chiumned, Chiumegnu, Renoso, Renosella	Puglia centrale Altopiano delle Murge
Tufo Calcarea²⁴	Mazzaro duro, Mazzaro gentile	
Calcarea di Altamura		
Pietra di Trani	<i>Per colore:</i> Biancone, Bronzetto, Livido, Gialletto, Avorio. <i>Per presenza di fossili:</i> Cioccolato, Perlato, Moschettato. <i>Per presenza di ossidi di ferro:</i> Filetto rosso, Filrosato, Filettato. <i>A seconda della laminazione:</i> Serpeggiante, Ondagata, Silvabella.	
Calcarea di Bari		
Pietra Leccese	Leccisu, Piromàfo, Cucuzzara, Dura, Bianca, Dolce, Saponara, Gagginara, Gentile, Mazzara, di Corsi	Puglia meridionale Salento

²³ Cherubini C., Reina A. e Bruno D. (2007), op. cit.

CITTAM, Calvanese V. (a cura di) (2007). *Costruire in “pietra” fra innovazione e tradizione. I materiali lapidei pugliesi: da materiali a poveri a pietre ornamentali*. International Conference and Exhibition, Luciano Editore, Napoli

²⁴ Il termine “tufo” viene impiegato in petrografia per indicare rocce piroclastiche di una certa compattezza. Sotto l'aspetto tecnico, invece, l'uso improprio del termine può individuare rocce di natura diversa, generalmente tenere e porose, non molto pesanti che si lasciano tagliare in conci ben squadri per realizzare murature di diversa funzione, ordine, e spessore. Il tufo calcarea pugliese si estrae dalla calcarenite di Gravina.

3.1.3 Le Pietre della Sardegna

In Sardegna, oltre a pietre vulcaniche e carbonatiche, sono presenti anche graniti²⁵ e rocce metamorfiche²⁶ quali scisto e fillade. Si elencano di seguito (Tabella 3.9 e Tabella 3.10) i lapidei censiti dalla tradizione sarda²⁷.

Tabella 3.9 - Rocce Ignee della Sardegna

Tipo di pietra	Varietà	Provenienza	Categoria
Granito	Granito rosa	Arzachena, Luogosanto (SS)	Intrusiva
	Granito ghiandone	Tempio Pausania, Calangianus (SS)	
	Granito bianco sardo	Buddusò, Alà Dei Sardi (SS)	
	Granito grigio di Ovodda	Ovodda (NU)	
Basalto		Oristano	Vulcanica
Trachite "auctorum"	Pietra di Serrenti	Serrenti (SU)	Vulcanica

Tabella 3.10 - Pietre Carbonatiche e Metamorfite della Sardegna

Tipo di pietra	Varietà	Provenienza
Calcari marnosi	Pietra Forte Pietra Cantone	Cagliari, Sassari
Marmo Biancone Tirreno di Orosei	Marmo di Orosei Venato Marmo di Orosei Nuvolato Marmo di Orosei Perlato Marmo di Orosei Fiocco di Neve Bianco Oroe	Orosei (NU)
Scisto e Fillade	Fillade di Siniscola	Siniscola (NU)

²⁵ Dal punto di vista commerciale, con il termine "granito" viene indicata un'ampia classe di rocce anche differenti dal punto di vista petrografico comprendendo rocce ignee intrusive ed effusive, rocce sedimentarie ed anche metamorfiche. In questa classe rientrano rocce ampiamente utilizzate in edilizia così come in architettura; sono rocce compatte, abbastanza dure (6-7 scala di Mohs), lucidabili, più difficilmente lavorabili dei marmi, e hanno buone proprietà meccaniche che conferiscono ottime caratteristiche di resistenza all'usura e all'esposizione esterna. Dal punto di vista strettamente petrografico, il granito è una roccia intrusiva acida a struttura granulare composta principalmente da feldspato potassico, quarzo e plagioclasti in proporzioni variabili, e da silicati femici subordinati. In questa definizione rientrano i graniti della Sardegna compresi nell'accezione più ampia di "rocce granitoidi" impiegata dagli addetti ai lavori per indicare l'insieme delle rocce ignee intrusive a struttura granulare da acida a neutra (Regione Autonoma della Sardegna, Il manuale tematico della pietra, 2009).

²⁶ Le rocce metamorfiche derivano dalla trasformazione di rocce ignee o sedimentarie. Con metamorfismo si indica la variazione mineralogica e strutturale di una roccia allo stato liquido, in risposta a condizioni chimiche e fisiche diverse da quelle in cui si è formata. Questo fenomeno avviene perché ogni roccia si forma in determinate condizioni di temperatura e pressione e, quando queste variano è possibile che avvengano fenomeni di ricristallizzazione allo stato solido, che portano, quindi, a una trasformazione dei minerali che costituiscono la roccia. In particolare, le trasformazioni avvengono quando la roccia è sottoposta ad alte pressioni e/o temperature, prodotte ad esempio dal contatto con un magma (metamorfismo da contatto) oppure dal movimento della crosta o dal peso di sedimenti sovrapposti (metamorfismo regionale). Scisti e filladi derivano dal metamorfismo regionale di rocce sedimentarie argillose, e presentano dei grani cristallini orientati a causa della pressione che li ha generati (struttura scistosa).

²⁷ Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009), op. cit.

Primavori P. (2011). *I materiali lapidei della Sardegna*. Sardegna Ricerche, Cagliari

3.2 Terra cruda: materiale, proprietà fisico-meccaniche e durabilità

La terra cruda come materiale da costruzione può vantare in Sardegna una documentazione sia archeologica (non scritta) che storica (scritta) decisamente ampia ed a suo modo completa. I maggiori Archeologi sardi sono concordi nell'individuare il ruolo della terra come antico materiale da costruzione.²⁸

La terra è il prodotto finale di un complesso di fenomeni naturali, di cui conserva una piena memoria che si estrinseca poi nelle sue "proprietà tecniche", che partono dalla disgregazione di roccia primarie (quali ad esempio graniti e basalti) esposte a particolari condizioni ambientali. I detriti risultanti sono stati spesso soggetti a movimentazione ad opera dei corsi d'acqua, dei ghiacciai e dei venti, e a contemporanea modificazione sia chimica che mineralogica, tessiturale e granulometrica, ed infine a deposizione nel bacino di sedimentazione dove è continuata l'evoluzione della terra, ad opera del clima e particolarmente delle acque percolanti e dell'attività biologica ed antropica. Essendo la terra il prodotto di lunghi e complessi fenomeni di adattamento all'ambiente, è prevedibile che i costituenti mineralogici siano caratterizzati da una notevole stabilità. La terra utilizzabile veniva generalmente "cavata" al di sotto dello strato superficiale del terreno, in modo da evitare le parti più eterogenee, ricche di materiale organico scarsamente elaborato o di scarti di origine antropica. Le modificazioni indotte nel terreno nel corso dei secoli possono però rendere oggi impossibile l'accesso alle fonti di terra utilizzate nel passato; in particolare, in alcune aree la rapida urbanizzazione può avere occultato le tradizionali zone di prelievo²⁹.

Anche se i depositi sedimentari possono assumere dimensioni notevoli, difficilmente si potrà contare su una vera omogeneità del materiale, da qui la necessità di individuare alcuni metodi di controllo dell'adeguatezza del prodotto soprattutto se il suo impiego risulterà finalizzato alla preparazione di intonaci per i quali, almeno in termini di granulometria e di tenore e natura delle argille, sarà necessario una certa cura nella selezione dei materiali più adatti. Peraltro, se il suo impiego sarà finalizzato alla preparazione di mattoni crudi, allora quello che sembra essere un punto di debolezza, può viceversa considerarsi un punto di forza se si considera che l'estrema variabilità dei suoi componenti (compresi la qualità e la quantità delle argille presenti) non porta a significative differenze nelle prestazioni del prodotto finito³⁰.

Dunque, i parametri che ci permettono di comprendere il comportamento di una terra sono: la quantità di argilla contenuta; la qualità dell'argilla; la proporzione e il tipo di inerti³¹.

Dal punto di vista della scienza e della tecnologia dei materiali, la terra può considerarsi un materiale composito. In essa possiamo anzitutto individuare una fase solida di natura inorganica, generalmente polimineralica, e con una granulometria che si estende dalle dimensioni della ghiaia (da pochi millimetri fino anche ad alcuni centimetri) a quello delle argille (circa diecimila volte più piccolo, per definizione sotto i 2 o 4 μm a seconda delle

²⁸ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

²⁹ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

³⁰ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

³¹ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

Norme). La frazione di dimensioni comprese tra 2-4 μm e 50-70 μm è definita limo; quella più grande, fino a 2 mm, è denominata sabbia. Attraverso l'analisi granulometrica è possibile disegnare una curva che rappresenta la quantità percentuale dei diversi componenti, in base al diametro delle particelle. La coesione tra le particelle solide è intrinsecamente debole; essa infatti nasce dall'incastro delle frazioni grossolane, che costituiscono lo scheletro del materiale non assoggettabile al ritiro e gonfiamento dovuti alle variazioni igrometriche.

Tra le particelle delle varie dimensioni resteranno comunque una certa entità di vuoti, che genericamente vengono indicati col termine di porosità, caratterizzata da una frazione volumica, dalla loro distribuzione dimensionale e dalla loro connessione, che determinerà in modo fondamentale le prestazioni del materiale. Sarà inoltre presente un certo tenore di acqua allo stato liquido sotto forma di soluzione salina diluita, sia sulle superfici sia nei pori, oltre ad aria e vapore acqueo nella parte restante dei pori³².

L'argilla ha un ruolo determinante sulla possibilità di impiegare la terra come materiale da costruzione. È infatti questa frazione che esercita le proprietà leganti che determinano le prestazioni sia allo stato fresco, in termini di fluidità, coesione e plasticità (che consente quindi l'impasto, l'omogeneizzazione e la formatura), che allo stato indurito (a secco) agendo da fase legante allo stesso modo di un cemento. Il termine argilla è tuttavia generico ed inteso prevalentemente in termini granulometrici; si deve pertanto riferirsi ad esso con il termine al plurale, ovvero argille. Le argille sono dei silicati idrati di alluminio ($x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$) i cui atomi costituenti sono aggregati in strutture prevalentemente cristalline con caratteristica geometrica lamellare (fillosilicati). È proprio questa forma, osservabile tramite l'impiego della microscopia elettronica a decine di migliaia di ingrandimenti, che determina alcune proprietà quali la caratteristica plasticità in presenza di acqua. Questa struttura cristallina lamellare è conseguenza della sovrapposizione di strati silicei (di tipo T, Tetraedrici, con il Silicio al centro del tetraedro e gli atomi di Ossigeno ai vertici) e di strati alluminosi (di tipo O, Ottaedrici, con l'Alluminio al centro dell'ottaedro e gli atomi di ossigeno o gruppi OH^- ai vertici). Le possibili combinazioni di questi strati portano ad avere sistemi argillosi con composizione chimica estremamente differente. Nonostante ciò, è comunque possibile ricondurre la struttura delle argille (e quindi buona parte delle sue proprietà fisiche) ad una semplice classificazione che prevede le seguenti sequenze tra le unità fondamentali O e T³³:

- Unità base costituita da strati O-T;
- Unità base con successione T-O-T;
- Unità base con successione T-O-T + O (raro tra le vere e proprie argille);
- A strati misti con sovrapposizione delle varie unità sopra citate.

Gli altri componenti del sistema "terra", considerati secondari, possono modificarne le proprietà. Particolarmente importante può risultare la frazione sabbiosa, capace di dare stabilità dimensionale ai manufatti in terra riducendo i pericolosi fenomeni di ritiro che si hanno in fase di essiccazione. Un'attenzione particolare va poi rivolta ai sali solubili che

³² Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

³³ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

possono essere presenti nella terra. I sali più comuni dei depositi sedimentari sono i cloruri ed i solfati dei metalli alcalini sodio e potassio (Na e K), o alcalino terrosi calcio e magnesio (Ca e Mg). Questi sali possono assumere un ruolo influente sulla reologia, sulla resistenza meccanica e soprattutto sulla durezza dei manufatti³⁴ i quali possono produrre efflorescenze³⁵ e pericolosi composti come l'ettringite.

Il sistema argilla/acqua, poi, darà plasticità al "materiale" terra. L'acqua, interponendosi tra gli strati di argilla, consente la corretta lubrificazione del sistema e lo scorrimento degli strati lamellari gli uni sugli altri, attraverso l'applicazione di forze di intensità tali da mantenere una deformazione permanente al cessare delle tensioni. La quantità d'acqua ottimale affinché il materiale terra possa essere impastato, omogeneizzato e quindi lavorato, è variabile in funzione della composizione ed in particolare della natura e della entità della fase argillosa.

La parte argillosa può andare dal 10% al 50% a seconda delle tecniche utilizzate. Ad esempio, una terra piuttosto magra e ghiaiosa è adatta per la tecnica della terra battuta, una terra leggermente grassa e sabbiosa è l'ideale per il mattone crudo, mentre una terra grassa e limonosa si presta per impasti di terra e paglia. Terre molto grasse, con quantità di argilla maggiori, richiedono una grande quantità di acqua e l'aggiunta di grosse quantità di inerti minerali (es. sabbia) o vegetali (es. paglia), e sono di difficile lavorazione (non si sciolgono o danno impasti poco omogenei)³⁶.

La plasticità dell'argilla è strettamente associata alla forma delle particelle ed all'estensione del velo d'acqua che può essere da loro adsorbito; per avere un'elevata plasticità il Tenore Ottimale d'Acqua (TOA) risulta generalmente compreso tra il 15% ed il 25% in peso. Gli spessori di questi veli sono stati stimati a 210-240 nm³⁷. L'acqua in eccesso rispetto a quella che porta alla massima plasticità è definita libera e migliora il flusso del materiale sotto sforzo, fungendo da fase lubrificante. La reologia consente di studiare la plasticità, definendo quelle che sono le capacità del materiale a scorrere sotto tensione. La valutazione reologica dell'impasto e del confezionamento del manufatto in terra cruda è stata sempre fatta dagli operatori in maniera empirica³⁸.

I test effettuati in laboratorio per il controllo della qualità delle terre e dei prodotti sono in assoluto in più affidabili. Tuttavia, per un controllo diretto vi sono una serie di prove semplificate da effettuare in cantiere, utili per un primo livello di valutazione della qualità del terreno per alcune specifiche caratteristiche. Esse servono per rilevare la presenza di materiale organico, sapere se il terreno sia più o meno sabbioso, limoso o argilloso e

³⁴ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

³⁵ Il termine efflorescenza viene impiegato in edilizia per descrivere quei depositi di cristalli bianchi visibili che si formano sulle superfici di murature in pietra o in mattoni a vista, o di altri elementi architettonici come intonaci e pavimenti. Questi cristalli sono generati a seguito della semplice evaporazione dell'acqua nella quale i sali solubili erano prima disciolti come soluzione salina, all'interno dei muri sottostanti.

³⁶ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

³⁷ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

³⁸ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

conoscere, con una buona approssimazione, il Tenore Ottimale d'acqua (TOA). Le prove eseguite sul materiale terra sono di seguito elencate, riconducibili a 4 tipologie³⁹:

- *Analisi di tipo sensoriale*⁴⁰: test di valutazione attraverso l'odore, il tatto, la vista e il lavaggio delle mani;
- *Analisi preliminari di qualità*: analisi del ritiro, esame della penetrazione, esame del taglio, esame del tenore ottimale d'acqua (TOA), esame di sedimentazione;
- *Analisi approfondite*: decantazione, test di resistenza a secco, test di trasudamento, test di consistenza, test di coesione;
- *Analisi di laboratorio*: analisi granulometrica, prova di coesione (o prova di trazione umida), definizione della plasticità (attraverso l'indice di Atterberg), prove di compressione, stabilizzazione (meccanica, fisica o chimica).

I test riportati in Tabella 3.11 sono consigliati al fine di dimostrare la buona qualità dei materiali utilizzati, la quale dovrà soddisfare i requisiti minimi indicati. I test dovranno essere effettuati nel cantiere di costruzione sotto il controllo del direttore dei lavori⁴¹.

Tabella 3.11 - Principali requisiti minimi del materiale terra (Fonte: Achenza M. e Sanna U., "Il manuale tematico della terra cruda", 2008)

Test ⁴²	Frequenza		Requisiti minimi
	Prima della messa in opera	Durante la messa in opera	
Compressione o modulo di rottura	5 campioni della stessa fornitura	5 campioni ogni 5000 messi in opera	3 MPa (compressione) 0,4 MPa (flessione)
Assorbimento	3 campioni della stessa fornitura	Richiesto solo per forniture differenziate di materiale	Risultato positivo
Durabilità	1 test a spruzzo 2 test Geelong ⁴³	Richiesto solo per forniture differenziate di materiale	Risultato positivo
Ritiro	3 campioni della stessa fornitura	5 campioni ogni 5000 messi in opera	Valori compresi fra 0% e 5%
Rottura	2 per fornitura	5 campioni ogni 5000 utilizzati	Risultato positivo

Secondo una classificazione dovuta ad Atterberg, all'aumentare del tenore di acqua un terreno passa dallo stato "solido" a quello "semisolido", e quindi a "plastico" ed a "liquido". Il tenore d'acqua che caratterizza il passaggio da solido a semisolido è detto limite di ritiro,

³⁹ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁴⁰ Per le prove di tipo sensoriale un parametro importante è l'esperienza dell'analizzatore.

⁴¹ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁴² I campioni dovranno essere stati preventivamente essiccati per almeno 28 giorni in ambiente protetto da pioggia e vento, e schermato dal soleggiamento diretto per i primi 4 giorni. Inoltre, non devono essere stati essiccati in forno.

⁴³ È una prova di durabilità che ha come obiettivo la determinazione della resistenza all'erosione della superficie dei mattoni. In condizioni di esercizio infatti, in caso di dilavamento dell'intonaco esterno, il mattone può trovarsi esposto a pioggia battente.

mentre per la transazione tra semisolido e plastico è detto limite plastico, infine per il passaggio da plastico a liquido il tenore d'acqua è detto limite liquido. È possibile definire un "Indice di Plasticità" come differenza tra il limite liquido e quello plastico; la terra è definita, in funzione di tale indice, come: non plastica (0-5), poco plastica (5-15), plastica (15-40) o molto plastica (> 40)⁴⁴.

Il materiale terra presenta dei limiti di resistenza e di durezza che sono stati sempre evidenti ai suoi utilizzatori; per questo motivo si aggiungono alla terra additivi naturali e artificiali. Di recente sperimentazione è l'aggiunta alla terra di materiali artificiali quali la calce o il cemento, capaci di dare un contributo alla stabilità dimensionale del materiale. Ben poche sono però le sostanze (tradizionali o moderne) in grado di far fare alla terra un salto di qualità comparabile a quella che si può raggiungere con la cottura, che segna veramente la differenza tra bassa ed alta resistenza, bassa ed alta durezza del materiale. Fra i tanti additivi utilizzati, la "paglia" è stata certamente l'aggiunta più funzionale e più comune al sistema terra-acqua. Il suo ruolo principale è quello di stabilizzare le forme allo stato fresco, di favorire il processo di essiccamento e di fungere da stabilizzante meccanico con particolare riferimento alle sollecitazioni di trazione che insorgono in questa fase e a quelle flessionali quando il materiale è in opera⁴⁵.

Tabella 3.12 Altezze consentite per murature portanti in Adobe (Fonte: Achenza M. e Sanna U., "Il manuale tematico della terra cruda", 2008)

Spessore della muratura (cm)	Altezza massima consentita (cm)
30	325
35	360
40	360
45	360
60	360

Costruire in terra in un determinato sito implica una scelta fra tre possibilità principali:

- Impiegare la terra disponibile in loco e adattare al meglio il progetto alla qualità di quella terra;
- Impiegare un'altra terra, portata nel luogo di costruzione che meglio risponde alle esigenze del progetto;
- Modificare la terra locale per meglio adattarla alle esigenze del progetto.

Questa terza possibilità viene chiamata "stabilizzazione", che definisce l'insieme dei procedimenti che permettono un miglioramento delle caratteristiche della terra al fine di:

- Ottenere dei miglioramenti delle caratteristiche meccaniche: aumentare la resistenza a compressione secca e umida, la resistenza a trazione e al taglio;
- Ottenere una migliore coesione;

⁴⁴ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁴⁵ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

- Ridurre la porosità e le variazioni di volume agendo sul rigonfiamento e sul ritiro dovuti all'acqua;
- Migliorare la resistenza all'erosione del vento e della pioggia riducendo l'abrasione di superficie e aumentando il grado di impermeabilizzazione.

I procedimenti di stabilizzazione sono tre: stabilizzazione meccanica, che si ottiene attraverso il compattamento della terra; stabilizzazione fisica, ottenuta con interventi sulla tessitura per avere una miscela controllata delle diverse frazioni granulometriche, oppure con l'aggiunta di inerti vegetali; stabilizzazione chimica, che si ottiene aggiungendo altri materiali o prodotti chimici che ne modificano le proprietà, grazie ad una reazione fisico-chimica tra particelle e materiale aggiunto (se la reazione avviene tra argilla e calce si possono formare composti pozzolanici)⁴⁶.

In Tabella 3.13 si riportano alcuni valori di riferimento delle principali proprietà fisico-meccaniche dei mattoni allo stato secco realizzati in terra cruda.

Tabella 3.13 - Valori tratti da Achenza M. e Sanna U. (2008), "Il manuale tematico della terra cruda" (Fonte: Lehmbauregeln)

Resistenza a compressione (MPa)	Peso specifico (g/cm ³)	Modulo di rottura (MPa)	Modulo elastico E (MPa)	Porosità (%)	Frazione di vuoti (μm)	Ritiro dimensionale (%)
1,0 – 3,0	1,5 – 1,9	≥ 0,35	5000 – 7000	15 – 40	0,5 – 20	0,5 – 2,0
2,0 – 4,0	1,6 – 2,2					

Dopo aver modellato l'impasto, eseguito il confezionamento della terra mettendola in forma in modo uniforme e compatto per poi essere successivamente scasserata, ha inizio l'essiccamento (Tabella 3.14), che rappresenta una fase determinante della lavorazione del mattone, indicando direttamente sul ritiro dimensionale dello stesso e sul fenomeno fessurativo causato dalla nascita di tensioni di trazione. L'allontanamento dell'acqua comporta sempre una contrazione del mattone, con un riassetto della microstruttura durante l'essiccamento. In una prima fase il manufatto è saturo d'acqua e si ha l'allontanamento del velo liquido che copre la superficie e gli strati ad essa adiacenti. L'acqua passa allo stato di vapore dalla superficie bagnata all'aria circostante. Successivamente viene richiamata per capillarità l'acqua presente all'interno e l'evaporazione può svilupparsi anche sotto la superficie. All'inizio del processo di essiccamento, le particelle solide costituenti la terra sono in parte separate da veli d'acqua di interposizione; quindi, quando questi sono progressivamente allontanati, esse sono sollecitate a muoversi, anche a riorientarsi e avvicinarsi con una conseguente riduzione delle dimensioni del manufatto. Se il fenomeno avviene con regolarità e senza sensibili differenze nelle varie parti, non insorgono tensioni di trazione pericolose, che portino a lesioni nel materiale. Per questo motivo, risulta importante la presenza della paglia o di altro materiale fibroso, i quali contribuiscono a regolarizzare le tensioni di trazione all'interno del manufatto. L'entità del ritiro dimensionale (Tabella 3.13)

⁴⁶ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

dipende dalla quantità d'acqua utilizzata per l'impasto, dalla frazione di ghiaia e sabbia presente, da quella della paglia e può essere fortemente condizionato da particolari aggiunte di additivi come calce o cemento che agiscono da forti stabilizzanti dimensionali⁴⁷.

Tabella 3.14 - Valori tratti da Achenza M. e Sanna U. (2008), "Il manuale tematico della terra cruda" (Fonte: Lehmbauregeln)

Tempi di essiccazione dei materiali	Mesi (valori sperimentali)
Muratura in adobe spessore 25 cm	1 – 2
Muratura in adobe leggeri spessore 15 cm	1 – 2
Intonaco di terra interno	0,5 – 1

Quanto maggiore sarà la quantità di acqua utilizzata per l'impasto e per il confezionamento, tanto più grande sarà la porosità che caratterizza il materiale allo stato secco. Ad alti valori di porosità, poi, corrispondono naturalmente bassi valori di peso specifico. Tuttavia, il peso specifico è largamente influenzato anche dal tenore di granulato di maggiore dimensione presente e dall'entità della paglia (Tabella 3.15).

Tabella 3.15 - Valori tratti da Achenza M. e Sanna U. (2008), "Il manuale tematico della terra cruda" (Fonte: Lehmbauregeln)

Tipo	Peso specifico min (Kg/m ³)	Peso specifico max (Kg/m ³)
Mattoni in terra	1700	2200
Mattoni in terra leggera	600	1200
Malta in terra	1200	1800
Malta in terra alleggerita	800	1200
Intonaco in terra	1200	1800
Intonaco in terra alleggerita	600	1200
Intonaco a spruzzo	600	1800

La terra cruda è un materiale sulla quale bisogna fare affidamento esclusivamente per carichi di compressione, ed a secco. I valori assoluti della resistenza meccanica dipendono da molti fattori che vanno dalla qualità della manodopera, alla granulometria (frazione di fine e di grosso) ed alla forma degli inerti grossi; fondamentale è il tenore dell'acqua di impasto: minore è la quantità d'acqua e minori risulteranno i micropori e quindi tanto più alta sarà la resistenza meccanica. Con la moderna produzione di mattoni pressati si ha un guadagno di resistenza migliorando appunto la compattezza con l'utilizzo di apposite presse. I valori di resistenza indicati in Tabella 3.13 si riferiscono a prove di compressione uniassiale eseguite in laboratorio, imponendo uno spessore minimo di circa 40 cm dei muri portanti con il limite necessario ad un piano di elevazione⁴⁸.

Generalmente nella terra utilizzata in Sardegna non sono presenti componenti minerali caratterizzati da valori particolarmente bassi di conducibilità termica. È quindi la microstruttura porosa della fase legante che determina l'ostacolo alla propagazione del calore

⁴⁷ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁴⁸ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

per conduzione. Dunque, la conducibilità termica del materiale terra è legata al peso specifico (Tabella 3.16); ovvero, all'aumentare del peso specifico aumenta la conducibilità termica poiché diminuisce la porosità. I valori ricavabili in letteratura consentono di concludere che la terra non ha di per sé una grande capacità di isolamento termico che, viceversa, si manifesta per via degli spessori murari notevoli e per le limitate aperture normalmente presenti nelle costruzioni⁴⁹. La terra possiede però la caratteristica di essere un "regolatore" del microclima interno: possiede una buona inerzia termica, capace dunque di accumulare calore e rilasciarlo quando l'ambiente interno si raffredda, mantenendo costante la temperatura; inoltre, essendo la terra igroscopica, assorbe umidità dall'aria fino alla saturazione per cederla quando necessario, regolarizzando il grado di umidità dell'ambiente interno⁵⁰.

Per ovviare alle ridotte capacità coibenti della terra cruda sarebbe teoricamente possibile accoppiarla ad uno strato di materiale isolante. Questa soluzione però presenta particolari problemi dovuti alla natura del materiale e in particolare alla sua igroscopicità. La terra cruda infatti, appena messa in opera, presenta un contenuto di acqua interno abbastanza elevato che va riducendosi con il tempo. Una volta stabilizzatasi conserva comunque la caratteristica di assorbire e rilasciare umidità. La presenza di un materiale isolante può ostacolare il rilascio di umidità causando la formazione di condensa interstiziale che deteriora gravemente la terra. Purtroppo, le normative nazionali in vigore non tengono in considerazione tale comportamento e non consentono di verificare adeguatamente la formazione di condensa interstiziale nella terra cruda⁵¹.

Tabella 3.16 - Valori tratti da Desogus G. (2010), "I materiali tradizionali per l'efficienza energetica degli edifici: La terra cruda"

Fonte	Massa Volumica (Kg/m ³)	Conducibilità Termica (W/mK)
Lehmbauregeln	400	0,12
Lehmbauregeln	500	0,14
Lehmbauregeln	600	0,17
Lehmbauregeln	700	0,21
UweWienke - Manuale di Bioedilizia	800	0,25
Lehmbauregeln	900	0,30
Lehmbauregeln	1000	0,35
Lehmbauregeln	1200	0,50
UweWienke - Manuale di Bioedilizia	1200	0,59
CRATerre	1400	0,46
Lehmbauregeln	1400	0,60
Lehmbauregeln	1600	0,70
CRATerre	1600	0,81
UweWienke - Manuale di Bioedilizia	1800	0,91
Lehmbauregeln	2000	1,20
Lehmbauregeln	2200	1,40

⁴⁹ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁵⁰ Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

⁵¹ Desogus G. (2010). *I materiali tradizionali per l'efficienza energetica degli edifici: La terra cruda*. Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Architettura, Laboratorio Efficienza Energetica, Sardegna Ricerche

La porosità è dunque la caratteristica che incide maggiormente non solo sulle proprietà fisico-meccaniche, ma anche sulla durabilità. Su sistemi così porosi e caratterizzati da deboli legami fra le particelle, la presenza di acqua sulla superficie interna del solido rappresenta certamente il maggior pericolo, comportando l'indebolimento del legame tra i grani ed una maggiore separazione tra gli stessi, inducendo a livello macroscopico sia la dilatazione che una riduzione della resistenza a compressione. Addirittura, un contatto continuo può portare anche al totale disfacimento del materiale che perde rapidamente consistenza schiacciandosi sotto il proprio peso. Tuttavia, in altri casi si manifesta una durezza decisamente maggiore per cui alcune strutture murarie riescono a mantenersi stabili per anni anche se esposti stagionalmente alle intemperie. La permeabilità all'acqua dipende però dalle dimensioni di tutte le frazioni granulometriche di cui il materiale terra è composto. In effetti, le argille sono da considerarsi materiali sostanzialmente impermeabili, non consentendo la circolazione dell'acqua. È quindi importante distinguere tra la sensibilità all'acqua dei minerali argillosi e quella della terra, della quale l'argilla è solo una frazione (Tabella 3.17). La permeabilità dipenderà così dalla composizione della terra utilizzata come materiale da costruzione e dalle modalità di impasto e confezionamento, nonché dallo sfruttare al meglio le potenzialità impermeabilizzanti della fase legante argillosa. Il persistere della presenza di acqua sulle superfici favorisce inoltre l'attività biotica (crescita di alghe, muschi, licheni ed erbe) che può portare all'instaurarsi di condizioni di ulteriore degrado⁵².

Tabella 3.17 - Valori tratti da Achenza M. e Sanna U. (2008), "Il manuale tematico della terra cruda"

Sub-sistema	Diametro delle particelle	Permeabilità (cm/s)
<i>Argilla</i>	< 3 μm	≤ 10 ⁻⁶
<i>Limo</i>	3 – 60 μm	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁴
<i>Sabbia fine</i>	60 – 200 μm	10 ⁻⁴ – 10 ⁻³
<i>Sabbia media</i>	0,2 – 0,6 mm	10 ⁻³ – 10 ⁻²
<i>Sabbia grossa</i>	0,6 – 2 mm	0,1 – 1
<i>Ghiaia</i>	> 2 mm	1

⁵² Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

3.2.1 Sistemi costruttivi in Sardegna

In Sardegna, la tradizione locale prevede l'utilizzo della terra cruda come materiale da costruzione con diverse tecniche costruttive, che possono essere ricondotte a tre categorie:

- Terra monolitica con funzione portante
- Terra su struttura con funzione di tamponamento
- Muratura con funzione portante o di tamponamento

I più diffusi sistemi costruttivi della Sardegna⁵³ sono elencati in Tabella 3.18, ognuno dei quali necessita di un particolare tipo di terra, sia a riguardo della composizione granulometrica che della lavorabilità.

Tabella 3.18 - Sistemi costruttivi in terra cruda della Sardegna

Sistema costruttivo	Breve descrizione
Adobe	È un tipo di mattone creato con uno stampo, a partire da un impasto di terra e paglia di consistenza tale da essere modellabile, lasciato ad essiccare all'aria aperta. La produzione può essere manuale o meccanizzata. La messa in opera è la stessa di un muro in mattoni cotti, con ricorsi in malta di terra o di calce. È adatto alla realizzazione di pareti portanti e di tamponamento, sia interne che esterne. A Samassi nel Sud Sardegna si utilizza la variante <i>Làdiri</i> .
La terra impilata (Bauge)	Si realizza con un impasto piuttosto duro di terra e paglia, modellato a mano senza l'ausilio di casseri e impilato per realizzare una parete portante o di tamponamento. L'assenza di casseri permette inoltre di ottenere qualsiasi forma del perimetro (in particolare curvature) e di controllare lo spessore della parete facilitando l'esecuzione di pareti rastremate verso l'alto.
Terra battuta (Pisè)	La terra, utilizzata ad uno stato tra il secco e l'umido, si versa in strati all'interno delle casseforme (in legno o metalliche) e compattati manualmente con pestelli in legno o con compressori meccanici. Si realizzano così pareti "monolitiche" interne ed esterne, sia portanti che di tamponamento.
Terra estrusa o Terra trafilata	Si tratta di mattoni realizzati con sistema di produzione industriale attraverso l'installazione di una fabbrica di mattoni moderna, ad eccezione del forno. Vengono impiegati per la realizzazione di pareti interne di tamponamento.
Blocchi compressi	Altro sistema di produzione industriale di mattoni. Si realizzano introducendo della terra leggermente umida in una pressa dalle forme di dimensioni ridotte; la forza applicata sulla terra produce una diminuzione del volume di circa la metà. Il blocco ottenuto è simile, dal punto di vista dell'aspetto, ai mattoni cotti pieni. Si utilizzano per la costruzione di pareti portanti.
Torchis	Questa tecnica si realizza su un supporto costruito da una griglia, metallica o di legno, ancorata ad una struttura portante. Questa viene ricoperta da uno o più strati di terra e paglia allo stato plastico, per creare pareti di tamponamento, sia interne che esterne, o pareti decorative.

⁵³ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.
Centro Interuniversitario ABITA, Curia O. (a cura di), op. cit.

Sistema costruttivo	Breve descrizione
Terra paglia	Da un impasto di terra e acqua dotato di buona coesione si ottiene una massa di consistenza fluida, che si versa sulla paglia per immersione o per asperione. La terra ha la sola funzione di ricoprire e tenere insieme la paglia. Il prodotto viene messo in opera con un getto tra due casseri e pestato fino a renderlo compatto. All'essiccazione si ottengono pannelli o blocchi la cui tessitura è essenzialmente quella della paglia, dotati di forti capacità termoregolatrici e di isolamento termoacustico, ma privi di funzione portante.
Terra legno e Terra minerale	Si tratta di una variazione della terra-paglia. La paglia viene sostituita da inerti organici (scaglie di legno) o minerali (argilla espansa, pomice, vetro riciclato espanso). La terra utilizzata allo stato liquido-plastico ha l'unica funzione di ricoprire e tenere insieme gli inerti. L'impasto non ha funzione portante e prende la forma dei casseri nei quali viene riversata e leggermente compressa.
Terra di riempimento	Impiegata allo stato secco, la terra (e la sabbia) riempie ogni tipo di contenitore e partecipa alla struttura della costruzione. Si tratta di tecniche sperimentali attualmente utilizzate prevalentemente per gli interventi in situazioni di emergenza e per sistemi di habitat temporaneo.

3.3 Laterizi: struttura e produzione

I materiali ceramici tradizionali sono ottenuti per cottura di minerali argillosi che contengono sostanze inerti e fondenti; vengono classificati in base alla microstruttura (definita attraverso la porosità), al colore del supporto e al rivestimento superficiale. Si dividono in prodotti “a pasta porosa”, costituiti da grani separati da un gran numero di pori e interstizi, e prodotti “a pasta compatta”, nei quali le particelle sono saldate tra loro in seguito alla parziale fusione subita durante la cottura. La porosità di un prodotto ceramico è fondamentale nel determinare le caratteristiche meccaniche e il comportamento nelle condizioni operative e ambientali. Ad esempio, a una maggiore porosità corrisponde un peggioramento della resistenza meccanica e al gelo, ma anche un miglioramento delle caratteristiche di isolamento termico. Spesso la porosità viene valutata attraverso l'assorbimento d'acqua; convenzionalmente si definiscono a pasta porosa i prodotti che hanno un assorbimento d'acqua superiore al 5%⁵⁴.

I laterizi sono prodotti ceramici a pasta porosa, caratterizzati da forma regolare e da dimensioni e peso tali che ne consentono un'agevole posa manuale. Sono materiali da costruzione di vasto uso, impiegati per la realizzazione di murature, solai, coperture e rivestimenti. Per la loro fabbricazione può essere impiegata qualsiasi argilla, purché sia sufficientemente plastica da permettere la formatura e, dopo cottura, consenta di ottenere un prodotto a pasta porosa con adeguata resistenza meccanica e stabilità agli agenti atmosferici⁵⁵.

Con il nome argilla si indica una famiglia di rocce sedimentarie molto eterogenee, in cui i minerali delle argille assolvono l'importante funzione plastificante, mentre gli altri componenti hanno funzione smagrante e fondente. Le argille sono costituite prevalentemente da silicati idrati di alluminio con struttura reticolare stratificata, la cui formula generale è: $xAl_2O_3 \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$. Oltre ai silicati idrati, nelle argille sono presenti anche ossidi idrati, quali: la silice idrata ($SiO_2 \cdot nH_2O$), l'allumina idrata ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), l'ossido ferrico idrato ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$). I silicati idrati di alluminio e, in parte, gli ossidi idrati sono responsabili della plasticità degli impasti argillosi, cioè della loro attitudine ad essere modellati⁵⁶.

Si ha inoltre una parte inerte, costituita principalmente da: silice cristallina (quarzi, quarziti e sabbie silicee), feldspati (silico alluminati potassici) e carbonato di calcio (calcare). Questi costituenti esercitano due importanti funzioni:

- *Funzione smagrante* ad opera delle sabbie silicee che, avendo particelle di dimensioni notevolmente maggiori dei silicati idrati di alluminio, consentono di regolare il ritiro durante l'essiccamento e la cottura favorendo inoltre la stabilità del crudo dopo la formatura;
- *Funzione fondente* del carbonato di calcio. Durante la cottura dei materiali ceramici, è necessario che si formi una fase liquida; questa, in seguito al raffreddamento, solidifica

⁵⁴ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁵⁵ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁵⁶ Bertolini L. (2010), op. cit.

formando un vetro compatto che lega i grani del materiale e riempie i pori tra loro. Il carbonato di calcio porta alla formazione di una fase liquida a 950-1000°C ed è utilizzato come fondente per i prodotti porosi ottenuti a bassa temperatura.

Le argille vengono in genere suddivise in grasse, cioè con prevalenza di costituenti argillosi, o magre, con prevalenza di costituenti inerti. Nel caso in cui l'argilla sia troppo grassa, è necessario aggiungere sostanze smagranti. Per i laterizi si usa la sabbia silicea oppure cocci di laterizio polverizzati (cocciopesto).

La caratteristica principale dell'argilla è la plasticità, intesa come capacità di deformarsi sotto l'azione di una pressione esterna e di conservare la forma conseguita anche dopo la rimozione di tale azione meccanica. La plasticità viene acquisita in presenza di acqua in proporzioni opportune e viene perduta dopo l'essiccazione. La quantità d'acqua necessaria per conferire plasticità a un'argilla dipende principalmente dalla sua struttura mineralogica e dalla granulometria; infatti, le minute particelle dei silicati idrati devono essere circondate da un velo d'acqua sufficientemente spesso per formare un rivestimento viscoso, in grado di consentire il loro movimento reciproco. Inoltre, l'acqua aderisce alla superficie dei cristalli permettendo di conservare, anche dopo la rimozione della sollecitazione esterna, la forma impartita al prodotto. La plasticità aumenta all'aumentare del tenore d'acqua finché l'impasto diviene fluido. A una maggiore plasticità corrisponde una più semplice sagomatura dei prodotti, però aumenta anche il ritiro durante l'essiccamento (dovuto all'allontanamento del velo d'acqua che si trova fra le particelle); quest'ultimo, se eccessivo, può dar luogo a deformazioni e tensioni di trazione in grado di compromettere l'integrità dei prodotti. La plasticità viene gradualmente perduta durante l'essiccamento, a seguito dell'allontanamento dell'acqua d'impasto. Durante la cottura, poi, la perdita di plasticità tende ad essere sempre meno recuperabile, finché viene perduta completamente a circa 600-700°C, quando si ha la decomposizione dei silicati idrati⁵⁷.

Per la produzione di laterizi si utilizzano argille impure⁵⁸, contenenti:

- *Quarzo*, con funzione smagrante;
- *Carbonato di calcio*, con funzione fondente. Non deve essere però essere presente in percentuali eccessive (> 20%) e deve essere finemente suddiviso e ripartito sulla massa perché, in caso contrario, può formarsi dell'ossido di calcio (CaO) che idratandosi può portare alla disgregazione del materiale;
- *Solfati*, che possono essere presenti nell'argilla e rimanere inalterati durante la cottura; possono quindi restare come sali solubili nei pori del laterizio e generare efflorescenza sui prodotti in opera ed inoltre possono cristallizzare a contatto con l'acqua producendo sali idrati con effetti espansivi all'interno della massa del materiale;

⁵⁷ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁵⁸ Per i laterizi, l'incidenza dei costi di trasporto delle materie prime è molto elevata, per cui lo stabilimento deve sorgere in prossimità della cava e, per lo stesso motivo, la vendita del prodotto può avvenire entro una distanza limitata.

- *Ossido di ferro*, che conferisce il tipico colore rosso ai laterizi dopo la cottura; l'eventuale ossido di calcio presente nell'argilla, tuttavia, tende ad attenuare la colorazione del prodotto cotto.

Il ciclo tecnologico di produzione dei laterizi⁵⁹ può essere riassunto dalle seguenti fasi:

- *Estrazione di materie prime*. Per la preparazione dei ceramici tradizionali le materie prime sono costituite da minerali argillosi miscelati con polveri non argillose (quarzo, carbonato di calcio o feldspati).
- *Preparazione dell'impasto*. Le materie prime prelevate dalla cava vengono macinate, miscelate e l'impasto così ottenuto viene omogeneizzato. La macinazione può avvenire a secco oppure a umido; i prodotti macinati vengono setacciati e immagazzinati in sili in funzione della granulometria. Successivamente sono miscelati a secco, in pasta oppure a umido, secondo opportuni rapporti in peso o in volume. Il processo a secco è applicato ai prodotti ottenuti da un'unica materia prima, mentre il processo a umido viene applicato ai prodotti ottenuti da impasti artificiali, in quanto consente la migliore omogeneizzazione delle diverse frazioni. Per i laterizi spesso si utilizza un metodo di omogeneizzazione allo stato pastoso, cioè con umidità intermedia tra quella dei processi a secco e a umido.
- *Formatura*. Mediante la formatura si conferisce all'impasto la forma del prodotto desiderato con l'applicazione di una pressione sufficiente a deformarlo plasticamente e stabilmente. Dopo la formatura, il crudo deve essere sufficientemente resistente per sopportare il peso proprio e le sollecitazioni durante la movimentazione. Per i laterizi si utilizza il sistema di formatura a estrusione, che richiede una pasta sufficientemente plastica con un grado di umidità variabile tra il 15% e il 20%. L'impasto passa attraverso una matrice con il profilo prestabilito; i prodotti vengono poi tagliati alla lunghezza prefissata.
- *Essiccamento*. L'acqua contenuta nel crudo deve essere rimossa prima della cottura mediante un delicato processo di essiccamento, con il quale si rimuove l'acqua che forma un velo attorno alle particelle di argilla conferendo plasticità al materiale. Durante questo processo si ha una contrazione di volume dovuta a un riavvicinamento delle particelle con un aumento delle forze reciproche d'attrazione e, quindi, della resistenza meccanica del manufatto. L'essiccamento artificiale inizia in un ambiente molto umido dove il prodotto viene riscaldato senza perdita di acqua, favorendo il flusso dell'acqua dall'interno verso la superficie; in seguito viene gradualmente diminuita l'umidità e aumentata la temperatura, senza superare i 120°C. Successivamente, anche l'acqua contenuta nei pori interni alle particelle di argilla viene allontanata, ma questo processo non è associato ad alcuna contrazione della pasta. L'essiccamento prosegue finché l'umidità del manufatto non è inferiore a 1%.
- *Cottura*. Attraverso la cottura, gli impasti essiccati acquistano le proprietà fisico-meccaniche, le dimensioni e l'aspetto definitivi. La cottura dei laterizi, con temperatura

⁵⁹ Bertolini L. (2010), op. cit.

variabile tra 900°C e 1000°C, deve essere omogenea e tale da realizzare un materiale con porosità adeguata. Durante la cottura avviene la disgregazione dell'argilla che libera i suoi ossidi, ovvero silice (SiO₂) e allumina (Al₂O₃). Al di sopra dei 900°C si ha la decarbonatazione del calcare e comincia la formazione di un composto tra allumina e silice detto "mullite" (3Al₂O₃·2SiO₂); in questa fase si ha inoltre la graduale formazione di una fase liquida che riempie i vuoti tra le particelle. I mattoni poco cotti presentano un'elevata porosità che influisce negativamente sulle loro proprietà meccaniche e di resistenza al gelo. D'altra parte, la porosità troppo bassa dei mattoni troppo cotti, pur aumentando la resistenza meccanica, diminuisce l'adesione della malta ai laterizi.

Le caratteristiche da cui dipendono le prestazioni dei laterizi, sono le seguenti:

- Fisiche: massa volumica, imbibizione, impermeabilità, conducibilità termica, porosità;
- Meccaniche: resistenza a compressione, resistenza a trazione, resistenza a flessione, resistenza all'urto e resistenza all'usura;
- Tecnologiche: comportamento al fuoco, isolamento termico, isolamento acustico, resistenza al gelo.

La conducibilità termica risente dell'influenza di altre caratteristiche fisiche, in particolare diminuisce proporzionalmente con il peso specifico e con il tenore di umidità, pertanto diminuisce all'aumentare della porosità. Ancora, il peso specifico varia in funzione del contenuto di umidità.

Le caratteristiche meccaniche dei laterizi hanno un'importanza rilevante, soprattutto se impiegati per strutture portanti (murature e solai). Nei laterizi è ottima la resistenza a compressione⁶⁰, mentre sono scarse la resistenza a trazione e quella a flessione; esse presentano valori differenti, a seconda che si tratti di elementi pieni o forati (Tabella 3.19). La resistenza a compressione degli elementi forati può essere determinata in direzione dei fori o perpendicolare ad essi. Per questi laterizi vengono anche considerate la resistenza a trazione e la resistenza a flessione. Per i laterizi da copertura e da pavimentazione vengono inoltre considerate la resistenza all'urto e la resistenza all'usura.

I laterizi hanno un ottimo comportamento nei confronti del fuoco. I mattoni pieni resistono a temperature molto elevate (circa 1100 °C). I mattoni forati sono invece meno resistenti alle alte temperature, a causa della presenza dei vuoti. Per la resistenza al gelo, indispensabile per murature esterne a "faccia vista", sono fattori determinanti la porosità (il diametro ammissibile dei pori è minore di 1,8 mm), la permeabilità all'acqua, ed il contenuto di carbonati e di quarzo in quanto, durante la cottura, essi tendono a fondere la massa contribuendo a rendere più compatto l'impasto. Per quanto riguarda l'isolamento termico e acustico, per ottenere vantaggi sono determinanti la porosità dell'elemento tecnico, la soluzione tecnica adottata, la corretta esecuzione dei giunti e la conducibilità termica dell'elemento tecnico.

⁶⁰ La resistenza di una muratura è molto diversa dalla resistenza a compressione del laterizio. Le murature infatti sono composte da due elementi: laterizio e malta. È dunque opportuno valutare la resistenza della muratura.

Tabella 3.19 - Valori tratti da Coffetti D. e Coppola L., “Materiali strutturali per l’edilizia: acciaio, laterizio e vetro strutturale”. Università degli studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate

Tipologia	Massa volumica (Kg/m ³)	Resistenza a compressione ⁶¹ (MPa)	Conducibilità termica (W/mK)
<i>Forati</i>	1000 – 1500	3,0 – 6,0	0,36 – 0,43
<i>Blocchi</i>	-	8,0 – 15	-
<i>Pieni</i>	1600 – 1800	20	0,60 – 0,72

I laterizi per murature sono sottoposti ad una serie di prove previste per l’accettazione, quali l’esame dell’aspetto, delle dimensioni e dell’uniformità⁶². Tra i principali requisiti sono particolarmente importanti la resistenza meccanica (soprattutto a compressione), l’aderenza alle malte, l’assorbimento d’acqua, la resistenza all’efflorescenza e il rischio di gelività.

3.3.1 Laterizi tradizionali di uso comune

Il termine laterizio comprende una vasta gamma di prodotti con forme, dimensioni e caratteristiche meccaniche e fisiche molto variabili. In Italia è in vigore il Regio Decreto n. 2233 del 16 novembre 1939, “Norme per l’accettazione dei materiali laterizi”, che si limita a classificare i laterizi in pieni, forati e per coperture. Sono però disponibili varie norme a cura dell’UNI che descrivono le tipologie (mattoni, blocchi, tavelle, etc.) e le dimensioni dei laterizi di maggiore impiego (Tabella 3.20).

Si elencano di seguito le principali tipologie di laterizi⁶³ impiegati nella tradizione costruttiva dell’Italia Meridionale, secondo le norme UNI.

Tabella 3.20 - Principali tipologie di laterizi tradizioni

Tipologia di laterizi	Descrizione
Mattoni pieni	Hanno dimensioni standard di 25x12x5,5 cm. Vengono utilizzati per la realizzazione di murature portanti. Sono considerati pieni quelli con una percentuale di foratura minore del 15%.
Mattoni semipieni	Sono alleggeriti da una serie di fori di varia forma (la percentuale di area della foratura è compresa fra il 15% e il 45% e l’area media della sezione normale di un foro deve essere inferiore a 12 cm ²). Le dimensioni standard sono di 25x12x12 cm. Sono molto resistenti e possono essere usati anche per murature portanti; inoltre la presenza dei fori consente una più uniforme cottura con minori deformazioni. I “mattoni da facciata” hanno le stesse dimensioni, ma sono realizzati con materiali scelti, spigoli perfetti e dimensioni uniformi.

⁶¹ Determinata sul solo mattone o blocco in direzione parallela alla direzione di posa.

⁶² All’art. 3 del Regio Decreto n. 2233 del 16 novembre 1939, si richiede che: “I laterizi di qualsiasi tipo, forma e dimensione debbono nella massa essere scevri da sassolini e da altre impurità; avere facce lisce e spigoli regolari; presentare alla frattura (non vetrosa) grana fine ed uniforme; dare, al colpo di martello, suono chiaro; assorbire acqua per immersione; asciugarsi all’aria con sufficiente rapidità; non sfaldarsi e non sfiorire sotto l’influenza degli agenti atmosferici e di soluzioni saline; non screpolarsi al fuoco; avere resistenza adeguata agli sforzi ai quali dovranno essere assoggettati, in relazione all’uso”.

⁶³ Bertolini L. (2010), op. cit.

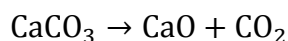
Tipologia di laterizi	Descrizione
Mattoni forati	Sono caratterizzati dalla presenza di fori longitudinali, di sezione generalmente rettangolare. La frazione vuoto/pieno è molto maggiore di quella relativa ai mattoni semipieni. Sono adatti per la realizzazione di tramezzi e tamponamenti; presentano le facce rigate per migliorare l'aderenza alla malta dell'intonaco. Tipiche dimensioni sono: <ul style="list-style-type: none"> • 3 fori: 30x15x4,5 cm • 4 fori: 25x12x8 cm • 6 fori: 30x15x10 cm
Blocchi forati per murature	Di diverse forme e dimensioni a seconda dell'uso, si differenziano dai mattoni perché hanno un volume maggiore di 5500 cm ³ . Perché possano essere utilizzati come elementi resistenti per la realizzazione di murature portanti, la frazione vuoto/pieno non deve superare il 55%. Con essi è possibile diminuire i costi della muratura, alleggerire il peso della costruzione, aumentare l'isolamento termico della muratura.
Laterizi speciali per solai	Sono impiegati come elementi di alleggerimento nei solai misti in laterizio e calcestruzzo armato; alcune tipologie possono anche avere funzione resistente. Tipico laterizio per solai è la pignatta.
Tavelle e tavelloni	Sono laterizi forati con una dimensione molto grande rispetto alle altre. Le tavelle hanno in genere spessore di 3 o 4 cm, larghezza di 25 cm e lunghezza variabile da 50 a 100 cm; possono essere piane oppure curve. I tavelloni hanno spessori di 6 o 8 cm e lunghezza fino a 120 cm. Le norme UNI, oltre alle dimensioni standardizzate, fissano anche le tolleranze per le frecce di incurvamento longitudinale e trasversale.
Laterizi per falde di copertura	Hanno forme tali da poter essere assemblati per formare dei manti di copertura. Si dividono in due categorie: "tegole curve" o coppi, e "tegole piane" (che assumono varie denominazioni come marsigliesi, portoghesi, romane o embrici, olandesi).
Piastrelle ceramiche	Un settore di impiego dei materiali ceramici molto importante in Italia è quello relativo alle piastrelle per pavimentazioni e rivestimenti. Vengono utilizzati per realizzare prodotti con una grandissima varietà di dimensioni, colori e decorazioni. I principali tipi di piastrelle sono il Cotto, le Maioliche, le Terraglie, il Grès rosso, il Grès porcellanato e il Clinker.
Cocciopesto	Materiale ottenuto dalla frantumazione di laterizi e terrecotte. La polvere ottenuta viene addizionata alla calce aerea per confezionare una malta fine a comportamento idraulico (grazie alla reazione pozzolanica tra calce e cocciopesto). Si usa per la realizzazione di rivestimenti impermeabilizzanti in vasche, cisterne, murature e pavimentazioni, nonché come malta per murature ed intonaci.

3.4 Materiali complementari: calce, produzione e proprietà. Le malte tradizionali

La calce aerea è stato il primo legante ad essere usato nelle costruzioni per il confezionamento di malte e calcestruzzi, il cui impiego era già conosciuto in epoca antichissima. Nel corso dei secoli ha subito una profonda ed importante evoluzione, che iniziò nel I secolo a.C. con la scoperta e l'aggiunta della pozzolana alla calce ad opera di Vitruvio con la quale, grazie alla reazione pozzolanica tra calce e pozzolana, la calce acquisiva proprietà idrauliche garantendo così la possibilità di fare presa e indurimento anche a contatto con l'acqua. Nasceva in questo modo una sorta di calce idraulica artificiale. Nell'anno 1756 si arrivò poi alla scoperta della calce idraulica vera e propria, grazie all'ingegnere John Smeaton che sperimentò la cottura di calcari con impurità argillose. Ne dedusse quindi che l'argilla contenuta nei calcari produceva, durante la cottura, dei composti capaci di determinare l'idraulicità della calce. Questo legante deve essere considerato, per la sua importanza storica, come il precursore del moderno cemento Portland. Le continue sperimentazioni sulla cottura dei calcari argillosi hanno portato, nel 1844, alla produzione di un cemento le cui caratteristiche si avvicinano a quello degli attuali Portland, in seguito alle esperienze realizzate industrialmente da Johnson. Egli fu il primo a stabilire un principio essenziale per la produzione del cemento Portland e che differenzia nettamente questo prodotto dalle calce idrauliche: occorre giungere nella cottura ad una temperatura tale da permettere la formazione di una fase liquida, mentre la calce si ottiene per cottura esclusivamente allo stato solido⁶⁴.

Con il termine calce si intende sia l'ossido di calcio ottenuto per cottura ad alta temperatura di rocce calcaree (indicato come "calce viva") sia il suo idrato ("calce spenta" o "calce idrata"). I calcari di partenza sono rocce costituite principalmente da carbonato di calcio (CaCO₃), diffuse in natura in diverse varietà e gradi di purezza. L'impurezza più frequente è costituita da argille (silicati idrati di alluminio), dolomite (sale doppio CaCO₃·MgCO₃), ossidi di ferro e silice. I calcari adatti alla produzione della calce aerea devono contenere almeno il 95% di CaCO₃ (calcari puri)⁶⁵. Per conferire proprietà idrauliche alla calce si utilizzano invece calcari argillosi⁶⁶ o miscele artificiali di calcare e argille, in cui l'argilla è presente in quantità variabile tra il 20% e il 22%.

Durante la cottura, il calcare si dissocia secondo la reazione di calcinazione:



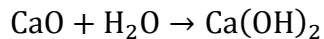
Questa reazione avviene solo a temperature attorno a 950-1000°C. La calce estratta dai forni (CaO) può essere messa direttamente in commercio come calce viva in zolle.

⁶⁴ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁶⁵ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁶⁶ Le marne sono rocce sedimentarie composte da una frazione argillosa e da una frazione carbonatica data generalmente da calcare (carbonato di calcio) o dolomite (carbonato doppio di magnesio e calcio). Le marne in senso stretto presentano una percentuale di carbonato di calcio compreso tra il 35% e il 65%. I calcari argillosi, detti anche marnosi, sono litotipi ad alto contenuto di carbonato di calcio che presentano una composizione intermedia tra quella dei calcari puri e quella delle marne.

Successivamente viene trasformata in idrato (calce spenta), ovvero idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), attraverso la reazione di spegnimento, fortemente esotermica:



L'operazione può avvenire in due modi⁶⁷:

- Spegnimento con eccesso di acqua, che può essere realizzato direttamente dal consumatore. L'acqua, aggiunta gradualmente, crea un forte sviluppo di calore che provoca l'evaporazione di parte dell'acqua, ma favorisce la disgregazione delle zolle e la loro idratazione. Si aggiunge acqua in eccesso rispetto a quella stechiometricamente necessaria (almeno il doppio) lasciandola in contatto con la calce per almeno 24 ore in modo che il processo di idratazione si completi. Al termine dell'operazione si ottiene una pasta morbida denominata "grassello", costituita da cristalli di idrossido di calcio.
- Spegnimento con acqua appena superiore a quella stechiometricamente necessaria, che si effettua direttamente negli stabilimenti di produzione. La quantità di acqua necessaria per ottenere la "calce idrata in polvere" viene spruzzata in appositi tamburi girevoli sulla calce frantumata. Il calore sviluppato fa evaporare parte dell'acqua, mentre il vapore prodotto nell'ambiente chiuso favorisce il completamento della reazione. A causa dell'aumento di volume che l'idratazione produce, i granuli di calce si disintegrano producendo una polvere molto fine. La successiva aggiunta di acqua alla calce idrata porta al grassello.

La quantità di acqua necessaria allo spegnimento è pari al 32% per l'ossido di calcio puro. In pratica per avere uno spegnimento completo occorre usarne un quantitativo superiore, fino al 50% poiché: in parte evapora a causa dell'innalzamento di temperatura prodotto nel corso della reazione di idratazione; in parte rimane come acqua libera presente sotto forma di film attorno alle particelle di idrato.

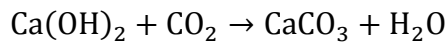
Molto importante è la resa (o rendimento) in grassello, definita dal rapporto fra il volume del grassello nel momento in cui per evaporazione dell'acqua comincia a fessurarsi in superficie e la massa di calce viva utilizzata per produrlo. L'unità di misura della resa è m^3/t (metro cubo per tonnellata)⁶⁸. In funzione della resa in grassello si possono distinguere:

- Calci "grasse", con una resa maggiore di $2,5 \text{ m}^3/\text{t}$. Derivano da calcari più puri e sono più pregiate perché danno grasselli più plastici, più facilmente mescolabili con la sabbia e che consentono una migliore adesione e posa in opera. L'idratazione per queste calci è rapida.
- Calci "magre", quelle per cui la resa è maggiore di $1,5 \text{ m}^3/\text{t}$ ma minore di $2,5 \text{ m}^3/\text{t}$. Derivano da calcari ricchi di impurezze (CaO minore del 94%) o mal cotti (parti troppo cotte e parti poco cotte). L'idratazione di questo tipo di calce è lenta.

⁶⁷ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁶⁸ Bertolini L. (2010), op. cit.

Il grassello viene poi miscelato alla sabbia per formare malte in grado di far presa e indurire. Il processo di presa avviene inizialmente per evaporazione dell'acqua, al termine del quale l'impasto avrà perso le sue caratteristiche di lavorabilità; ha poi inizio l'indurimento attraverso la carbonatazione della calce per opera dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera:



Durante la fase di indurimento si ha lo sviluppo della resistenza meccanica che dipende sostanzialmente dalla coesione della massa dei cristalli di carbonato di calcio che, crescendo, si intrecciano e avvolgono i granuli di sabbia. Il composto finale a indurimento avvenuto ha quindi la stessa composizione chimica della materia prima di partenza.

La calce idraulica si distingue dalla calce aerea perché i suoi impasti possono indurire a contatto con l'acqua. Il comportamento idraulico è dovuto all'argilla che, durante la cottura, si dissocia liberando i suoi ossidi, ovvero silice (SiO_2) e allumina (Al_2O_3). L'ossido di calcio (CaO) reagisce in parte con la silice e l'allumina per dar luogo a composti quali il silicato bicalcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e l'alluminato monocalcico ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Nel prodotto cotto sono presenti anche ossido di calcio, silice e allumina. Con l'acqua aggiunta in quantità stechiometricamente controllata, si può convertire l'ossido di calcio non combinato in idrossido (Ca(OH)_2) e pertanto, alla fine del processo, si ottiene una miscela di idrossido, silicato bicalcico, alluminato monocalcico, oltre a silice e allumina non combinate. Il prodotto così ottenuto, detto calce idraulica, si comporta da legante idraulico soprattutto per la presenza del silicato bicalcico e dell'alluminato di calcio. Questi composti, in presenza di acqua, reagiscono con l'idrossido di calcio e formano silicati idrati di calcio, indicati come "gel C-S-H" e alluminati idrati di calcio, detti "C-A-H". In questo caso, il processo di indurimento avviene non solo per effetto della carbonatazione, ma soprattutto per la presenza dei silicati idrati di calcio, i quali sono anche responsabili della resistenza meccanica. Gli alluminati idrati sono invece responsabili del processo di presa⁶⁹.

La quantità di calce da usare nella preparazione della malta affinché possa colmare tutti i vuoti presenti fra i granuli di sabbia è dell'ordine di: 1 volume di grassello per 2-3 volumi di sabbia. Si possono avere diverse tipologie di malta a seconda dell'uso:

- Malta di allettamento (per murature);
- Malta per massetto (per sottofondi);
- Arriccio e malta di finitura (per intonaci);
- Malta di stilatura (per rifinire elementi murari o pavimentali);
- Malta da iniezione (per interventi di riadesione di sistemi disconnessi o distaccati).

⁶⁹ Bertolini L. (2010), op. cit.

La norma UNI EN 998-2⁷⁰ definisce 6 classi di malte definite in rapporto alla composizione in volume (Tabella 3.21).

Tabella 3.21 - Classi di malte secondo la norma UNI EN 998-2

Classe	Tipo di malta	Composizione				
		Cemento	Calce aerea	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M 2,5	<i>Idraulica</i>	-	-	1	3	-
M 2,5	<i>Pozzolonica</i>	-	1	-	-	3
M 2,5	<i>Bastarda</i>	1	-	2	9	-
M 5	<i>Bastarda</i>	1	-	1	5	-
M 8	<i>Cementizia</i>	2	-	1	8	-
M 12	<i>Cementizia</i>	1	-	-	3	-

La sabbia impiegata può essere calcarea, silicea o mista, e costituisce il 65-70% del volume complessivo. Ha la funzione di impedire il ritiro della malta indurita, conseguente all'evaporazione dell'acqua e alla riduzione di volume che si verifica durante il processo di carbonatazione. In secondo luogo, fa sì che la pasta legante si disponga in sottili strati attorno ai granuli di sabbia, per cui la carbonatazione può interessare l'intero spessore di questi strati, cioè l'intera massa della malta⁷¹. Oltre alla sabbia possono essere impiegati altri inerti naturali, ad esempio ottenuti dalla frantumazione di pietre calcaree o silicee, oppure artificiali, se ottenuti dalla frantumazione di rifiuti o scarti.

La resistenza a compressione varia in funzione della composizione della malta. La norma UNI EN 998-2 indica i valori di resistenza per alcune classi di malte per muratura (Tabella 3.22), mentre la norma UNI EN 998-1⁷² riporta i valori di resistenza delle malte per intonaci (Tabella 3.23).

Tabella 3.22 - Resistenza per classi di malte a prestazione garantita secondo la norma UNI EN 998-2

Malte da muratura						
Classe	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistenza a compressione a 28 gg (MPa)	2,5	5	10	15	20	d
<i>d è una resistenza a compressione maggiore di 25 MPa dichiarata dal produttore</i>						

⁷⁰ UNI EN 998-2:2016 "Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura". La norma europea specifica i requisiti per le malte da muratura prodotte in fabbrica (riempimento, collegamento e allettamento) per l'utilizzo in pareti, colonne e partizioni di muratura (per esempio murature esterne e interne, strutture di muratura portante e non portante per l'edilizia e l'ingegneria civile).

⁷¹ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁷² UNI EN 998-1:2016 "Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni". La norma europea si applica a malte per intonaci interni ed esterni a base di leganti inorganici prodotte in fabbrica per l'utilizzo in pareti, soffitti, colonne e partizioni. Contiene definizioni e requisiti prestazionali finali. Non si applica alle malte aventi come legante principale il solfato di calcio.

Tabella 3.23 - Resistenza per classi di malte secondo la norma UNI EN 998-1

Malte per intonaci				
Categoria	CS I	CS II	CS III	CS IV
Resistenza a compressione a 28 gg (MPa)	Da 0,4 a 2,5	Da 1,5 a 5	Da 3,5 a 7,5	> 6

In architettura, nella formulazione di malte per murature ed intonaci, l'uso della calce presenta dei vantaggi⁷³:

- Garantisce traspirabilità alle murature, qualità importante soprattutto nelle opere di restauro;
- Assicura agli ambienti comfort e salubrità grazie alle sue caratteristiche di igroscopicità e di antisetticità;
- Ha un'ottima capacità di adesione: le particelle nanometriche presenti in particolare nel grassello di calce sono in grado di penetrare più a fondo nella porosità del supporto;
- Ha un'ottima lavorabilità, cioè capacità di mantenere coesione e plasticità, che consente una facile esecuzione di messa in opera;
- Rende durevoli le malte per l'assenza di alcuni componenti chimici, come l'alluminato tricalcico e i sali solubili sempre presenti nei leganti cementizi, rendendole immuni all'azione destabilizzante dei solfati;
- Ha un grande valore decorativo: la doppia rifrazione dei cristalli di calcite conferisce lucentezza alle finiture, che dona vivacità e qualità estetiche alle murature;
- Ha un'ottima resa: usata negli intonaci, per esempio, il suo dosaggio è fino al 50% inferiore rispetto ai leganti idraulici ordinari;
- Contribuisce ad incrementare la capacità termica delle murature, consentendo di immagazzinare l'energia termica per poi rilasciarla gradualmente (inerzia termica).

3.4.1 Malte tradizionali in Campania. Calce, Pozzolana e Cocciopesto

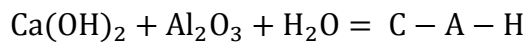
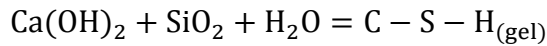
La malta più apprezzata nella tradizione costruttiva ha origine in Campania, in epoca Romana. Si tratta di una malta idraulica "artificiale" ottenuta miscelando calce aerea (spenta) con "Pozzolana" o polvere di mattone (Cocciopesto), in totale o parziale sostituzione della sabbia.

L'importanza e le qualità di questa malta sono dovute alla cosiddetta "reazione pozzolanica" che avviene durante l'impasto tra calce, pozzolana (o cocciopesto) e acqua, conferendo idraulicità alla malta. In questo modo si è potuto superare il grande limite della calce aerea, ovvero di indurire esclusivamente a contatto con l'aria con estrema lentezza ed inadatto per durare a contatto con l'acqua a causa dell'instabilità e solubilità del carbonato di calcio (dilavabile in presenza di acque aggressive).

⁷³ Associazione Forum Italiano Calce (2010), op. cit.

La reazione pozzolanica è un processo reso possibile dall'attitudine dei materiali ricchi di silice, come la pozzolana e il cocciopesto⁷⁴, a combinarsi con la calce. Il risultato di questa reazione endotermica è una vera e propria idraulicizzazione della calce, con formazione di silicati ed alluminati idrati di calcio, stabili ed insolubili⁷⁵, simili ai prodotti ottenuti dall'idratazione del clinker⁷⁶.

La reazione pozzolanica può essere così sintetizzata⁷⁷:



Il comportamento pozzolanico consente di aumentare la resistenza meccanica della malta, che acquisisce inoltre un alto potere di adesione a qualsiasi tipo di supporto, anche su murature con forte presenza di umidità⁷⁸. Infatti, per le caratteristiche della pozzolana, le malte a base di grassello e pozzolana sono idonee anche per contrastare l'umidità di risalita nelle murature e la formazione dei sali. Questa malta va preparata in cantiere in quanto l'effetto idraulicizzante della pozzolana miscelata preventivamente con grassello di calce (legante aereo) farebbe iniziare immediatamente la presa della malta.

Dopo l'estrazione dalla cava, la pozzolana viene vagliata e macinata. La granulometria ideale per la composizione di malte pozzolaniche è di 0-200 µm, il cui peso specifico è dell'ordine di 0,946 Kg/l⁷⁹. Secondo la norma UNI EN 998-2, la malta pozzolanica rientra nella classe M 2,5 con resistenza a compressione minima di 2,5 MPa.

Una possibile composizione della malta pozzolanica è di questo tipo⁸⁰:

- 1 parte in volume di grassello di calce (peso specifico di 1,150 Kg/l);
- ½ parte in volume di pozzolana (granulometria 0-200 µm e peso specifico 0,946 Kg/l);
- 3 parti in volume di sabbia (granulometria 0-3 mm e peso specifico 1,500 Kg/l).

⁷⁴ I materiali pozzolanici sono prevalentemente silicei in cui la silice (SiO₂) è amorfa e presenta un grande sviluppo superficiale grazie alla porosità o alla finezza del materiale. Possono contenere allumina (Al₂O₃), ma hanno sempre un tenore di calcio ridotto. Non possiedono di per sé proprietà leganti, ma le acquistano in presenza di calce. I materiali pozzolanici possono essere naturali (come la pozzolana) o artificiali (come il cocciopesto, le ceneri volanti e il fumo di silice). La pozzolana è una piroclastite sciolta, con granulometria variabile dal limo alla sabbia (Bertolini, 2010).

⁷⁵ Buccellato SpA (2018). *Pozzolana e Cocciopesto. Recupero delle antiche tecniche costruttive per il restauro di strutture storiche e monumentali*. Tratto da www.buccellato.it

⁷⁶ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁷⁷ Buccellato (2018). *Pozzolana e Cocciopesto*, op. cit.

⁷⁸ Buccellato (2018). *Pozzolana e Cocciopesto*, op. cit.

⁷⁹ Buccellato (2018). *Pozzolana e Cocciopesto*, op. cit.

⁸⁰ Esempio di malta pozzolanica proposta da "Gruppo Buccellato SpA", azienda operante nel settore edilizio certificata ISO 9001:2008 per manutenzione, ristrutturazione, impermeabilizzazione e consolidamento statico di opere di ingegneria civile ed industriale; restauro e manutenzione dei beni immobili sottoposti a tutela (settore EA 28a).

La norma UNI EN 998-2 fornisce invece questa composizione per una malta pozzolanica (Tabella 3.21):

- 1 parte in volume di grassello di calce;
- 3 parti in volume di pozzolana.

Anche con il cocchiopesto è possibile avere una buona attività pozzolanica. Dalle diverse tradizioni è possibile ricavare alcune composizioni di malte al cocchiopesto per intonaco⁸¹ (Tabella 3.24 e Tabella 3.25).

Tabella 3.24 - Prima ricetta intonaco di cocchiopesto (Fonte: Buccellato, "Pozzolana e Cocchiopesto", 2018)

Intonaco	Legante	Aggregato
<i>Rinfazzo</i>	1 parte di calce idraulica 2 parti di grassello di calce	1 parte di cocchiopesto 0-3 mm 2 parti di sabbia di cantiere 0-3 mm
<i>Arriccio</i>	2 parti di grassello di calce	0,5 parti di cocchiopesto 0-3 mm 1,5 parti di sabbia di cantiere 0-3 mm
<i>Finitura</i>	2 parti di grassello di calce	1 parte di cocchiopesto 0-1 mm 1 parte di sabbia fine 0-1 mm

Tabella 3.25 - Seconda ricetta intonaco di cocchiopesto (Fonte: Buccellato, "Pozzolana e Cocchiopesto", 2018)

Intonaco	Legante	Aggregato
<i>Rinfazzo</i>	1 parte di calce idraulica	2 parti di cocchiopesto 0-3 mm 1 parte di sabbia di cantiere 0-3 mm
<i>Rinfazzo</i>	1 parte di grassello di calce	1 parte di cocchiopesto 0-3 mm 1 parte di sabbia di cantiere 0-3 mm
<i>Arriccio</i>	1 parte di grassello di calce	1 parte di cocchiopesto 0-3 mm 1,5 parti di sabbia di cantiere 0-3 mm
<i>Finitura</i>	1 parte di grassello di calce	1,5 parti di cocchiopesto 0-1 mm

Di seguito si riportano invece le principali composizioni delle malte antiche⁸² (Tabella 3.26).

Tabella 3.26 - Principali composizioni di malte antiche (Fonte: Giuliano M., "I materiali da costruzione di Pompei: provenienza, estrazione, tecniche edilizie", 2010)

Fonte	Legante	Aggregato	Acqua
Vitruvio, II, V, 5	1 parte di calce	3 parti di sabbia di cava	15-20%
Vitruvio, II, V, 6	1 parte di calce	2 parti di sabbia di fiume	15-20%
Vitruvio, II, V, 7	1 parte di calce	1 parte di cocchiopesto 2 parti di sabbia di fiume	15-20%
Vitruvio, V, XII, 8-9, opere marittime	1 parte di calce	2 parti di pozzolana	15-20%

⁸¹ Buccellato (2018). *Pozzolana e Cocchiopesto*, op. cit.

⁸² Giuliano M. (2010), op. cit.

La malta di calce e pozzolana non è l'unico uso tradizionale della pozzolana, infatti il comportamento pozzolanico si realizza anche abbinando la pozzolana al cemento⁸³, ottenendo il cosiddetto Cemento Pozzolanicco. Nel confezionare un cemento pozzolanico bisogna garantire un adeguato tenore di clinker di Portland, almeno del 40-50%, affinché si liberi una quantità di idrossido di calcio idonea ad attivare la reazione pozzolanica.

Secondo le norme UNI EN 197-1 i cementi pozzolanici propriamente detti sono indicati come cementi di tipo IV (CEM IV). Di questi cementi, in base principalmente alla percentuale di pozzolana, vengono individuati due sottotipi:

- CEM IV/A con percentuale di pozzolana compresa tra l'11% e il 35%;
- CEM IV/B con percentuale di pozzolana compresa tra il 36% e il 55%.

Il cemento pozzolanico presenta, in determinate circostanze, prestazioni migliori del cemento Portland, quali ad esempio:

- Minore sviluppo di calore: essendoci un minore quantitativo di clinker di Portland, risulta inferiore il tenore di alluminato tricalcico e di silicato tricalcico, che sono i componenti del clinker che producono maggior calore di idratazione. Pertanto, il cemento pozzolanico è molto utilizzato nei getti massivi come platee di fondazione e dighe.
- Maggiore resistenza all'attacco solfatico: a contatto con acque o terreni contenenti solfati, questi sali possono penetrare nel calcestruzzo e formare composti espansivi come l'ettringite, reagendo con l'alluminato tricalcico. Il calcestruzzo subisce quindi un attacco solfatico che determina la fessurazione e la disgregazione della pasta

⁸³ Secondo la norma UNI EN 197-1 [18] "un *cemento* è un legante idraulico, ossia un materiale inorganico finemente macinato che, quando è mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza". Il cemento Portland è composto per almeno il 95% da *clinker*, un prodotto ottenuto dalla cottura a 1450°C di una miscela, naturale (marne) o artificiale, di calcari e argille che contengono altri ossidi, tra cui Fe₂O₃. Il clinker è formato da quattro composti mineralogici ben precisi: *alite* C₃S (silicato tricalcico 3CaO·SiO₂); *belite* C₂S (silicato bicalcico 2CaO·SiO₂); *celite* C₃A (alluminato tricalcico 3CaO·Al₂O₃); *fase ferrica* C₄AF (ferroalluminato tetracalcico 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃). Durante la cottura, all'aumentare della temperatura diminuisce la massa totale poiché si ha la formazione di gas; inoltre, a partire da 1250°C si forma una fase liquida dovuta alla fusione degli alluminati che permette la scomparsa della calce libera e la formazione di alite. Il clinker viene poi finemente macinato e addizionato con gesso (CaSO₄·2H₂O) nella misura del 4-6%. Mescolando acqua e cemento Portland si ottiene una pasta cementizia che subisce nel tempo i processi di idratazione dei vari costituenti del cemento, ovvero presa e indurimento, con formazione di prodotti con solubilità molto bassa. Gli alluminati sono responsabili del processo di presa e si idratano molto velocemente; l'aggiunta di gesso permette di rallentare la presa poiché reagisce con gli alluminati per formare un trisolfato, detto *ettringite primaria*, che ricopre i grani di cemento rallentandone la velocità di idratazione. Il processo di indurimento avviene poi con l'idratazione dei due silicati, producendo silicati di calcio idrati, indicati come C-S-H o *gel di cemento*. Il C-S-H è responsabile della resistenza meccanica della pasta cementizia, che si sviluppa e poi si consolida durante il periodo di indurimento. *Stagionatura* (o *maturazione*) è il nome dato all'insieme delle procedure di controllo, principalmente dell'umidità e della temperatura, allo scopo di promuovere l'idratazione del cemento e quindi lo sviluppo delle caratteristiche meccaniche e le proprietà di durabilità del prodotto finale. L'idratazione dei silicati produce anche cristalli di idrossido di calcio (detti *portlandite*) che danno un contributo trascurabile alla resistenza della pasta cementizia, ma sono importanti perché contribuiscono a mantenere alcalino il calcestruzzo (Bertolini, 2010).

cementizia. Un minor tenore di alluminato tricalcico garantisce una maggiore resistenza all'attacco solfatico.

- Maggiore resistenza al dilavamento e alla carbonatazione: il clinker di Portland contiene una certa quantità di idrossido di calcio (detto *portlandite*) prodotto in seguito all'idratazione dei silicati di calcio che, attraverso la carbonatazione, diventa col tempo carbonato di calcio. Riducendo la quantità di clinker, il tenore di questa calce libera sarà inferiore; inoltre, poiché la pozzolana reagisce con la calce, si avrà un'ulteriore riduzione della quantità di idrossido di calcio libero. Infatti, una volta trasformato in carbonato di calcio ed in presenza di acque aggressive, quest'ultimo viene dilavato creando una struttura porosa e pertanto più accessibile agli agenti esterni. Ancora, il fenomeno della carbonatazione è dannoso per il calcestruzzo poiché può innescare la corrosione delle armature, protette da un film passivo che si crea grazie all'elevata alcalinità dell'idrossido di calcio. La carbonatazione produce un abbassamento del pH da valori maggiori di 13 a valori minori di 9 distruggendo il film passivo; successivamente le armature si possono corrodere determinando un'azione espansiva che porta alla fessurazione e al distacco del copriferro. Dunque, un minor tenore di calce determina una matrice cementizia più compatta e un calcestruzzo più durevole.

Il cemento pozzolanico deve essere sottoposto a controlli da parte di appositi Enti certificatori, che verificano i requisiti meccanici, fisici e chimici. Le norme definiscono anche le prove da effettuare e i criteri di conformità, cioè da seguire per valutare la rispondenza dei cementi alle specifiche⁸⁴.

Tabella 3.27 - Requisiti chimici del cemento pozzolanico CEM IV (UNI EN 197-1)

Proprietà	Metodo di riferimento	Classe di resistenza	Requisiti ⁽¹⁾
<i>Pozzolanicità</i>	EN 196-5	Tutte le classi	Esito positivo della prova
<i>Solfati (come SO₃)</i>	EN 196-2	32.5 N 32.5 R 42.5 N	≤ 3,5 %
		42.5 R 52.5 N 52.5 R	≤ 4,0 %
<i>Cloruri</i>	EN 196-21	Tutte le classi	≤ 0,1 %
(1) I requisiti sono espressi come percentuale in massa			

I requisiti chimici riportati in Tabella 3.27 vengono valutati attraverso le seguenti grandezze⁸⁵:

- *Indice di attività pozzolanica*: è misurato dal rapporto tra la quantità di Ca(OH)₂ necessaria per saturare una soluzione a contatto con un cemento pozzolanico rispetto a quella sufficiente a saturare un cemento Portland; consente quindi di verificare la presenza di aggiunte pozzolaniche;

⁸⁴ Bertolini L. (2010), op. cit.

⁸⁵ Bertolini L. (2010), op. cit.

- *Tenore di SO₃*: è la misura utilizzata per verificare la quantità di gesso; va tenuta sotto controllo perché una quantità eccessiva di gesso può dare luogo a problemi di instabilità volumetrica;
- *Tenore di cloruri*: il contenuto di cloruri nel cemento deve essere controllato per evitare che possano insorgere problemi di corrosione sulle armature.

3.4.2 Malte tradizionali in Puglia. Calce e “Tufina”

Oltre a sabbie silicee, nelle tecniche costruttive locali vengono impiegate anche particolari sabbie calcaree in qualità di aggregati nel confezionare malte ed intonaci. In Puglia, grazie all'abbondanza di tufo calcareo, si produce una sabbia (polvere di calcare) chiamata “Tufina”, ottenuta per frantumazione di blocchi di tufo e miscelata con calce e cemento.

L'uso della malta di tufina è oggi legata alla problematica riguardante la risoluzione delle patologie umide che interessano le murature realizzate con materiali lapidei. Gli intonaci tradizionali riescono infatti a contrastare il fenomeno di risalita d'acqua in modo più efficace rispetto a quanto conseguibile con l'uso di intonaci confezionati con malte idrauliche o cementizie. Le alterazioni dei materiali lapidei di natura chimica, fisica e biologica, sono dovute nella maggior parte dei casi alla presenza di acqua; la presenza di umidità nelle murature, in particolare in quelle tradizionali dove il sistema “mattone-malta-intonaco” è già in equilibrio ambientale instabile a causa delle aggressioni di agenti inquinanti atmosferici, produce una serie di effetti dannosi⁸⁶.

Nell'affrontare queste problematiche si articolano alcune attività sperimentali in corso presso l'IRIS-CNR⁸⁷ di Bari, che hanno come obiettivo la verifica delle capacità degli intonaci tradizionali, confezionati con prodotti naturali, di rapportarsi ai fenomeni di risalita d'acqua nelle murature di tufo calcarenitico. Gli intonaci tradizionali considerati sono sostanzialmente quelli confezionati con malta di grassello, cemento e tufina. Queste malte, utilizzate sia per murature che per intonaci con diverse proporzioni dei componenti, sono ancora largamente diffuse nella pratica costruttiva regionale. È possibile ad esempio confezionare malte con inerte costituito al 100% di tufina, oppure malte con il 50% di sabbia e il 50% di tufina⁸⁸.

La resistenza a compressione delle murature è infatti notevolmente influenzata dalle caratteristiche della malta impiegata; agendo sulla composizione di quest'ultima è possibile quindi migliorare la capacità portante della muratura.

Già prove di laboratorio realizzate in altre ricerche, hanno fornito valori di resistenza a schiacciamento notevolmente alti per questo tipo di malte (Tabella 3.28), nello specifico composte da cemento e tufina ottenuta da diverse varietà di tufo⁸⁹.

⁸⁶ Stella M. (1991), op. cit.

⁸⁷ Istituto per la Residenza e le Infrastrutture Sociali, Centro Nazionale delle Ricerche. Bari

⁸⁸ Stella M. (1991), op. cit.

⁸⁹ Stella M. (1991), op. cit.

Tabella 3.28 - Resistenze meccaniche su provini di malta con "tufina" per vari tipi di tufo (Fonte: Stella M., "Murature e malte tradizionali pugliesi: uso e sperimentazione", 1991)

Composizione della malta	Carico di rottura dopo stagionature (MPa)			
	Trazione		Compressione	
	7 gg	28 gg	7 gg	28 gg
<i>Cemento e sabbia di Carparo</i>	4,40	4,55	35,70	42,80
<i>Cemento e sabbia di Scorzo</i>	3,55	4,10	32,90	38,90
<i>Cemento e sabbia di Verdatiero</i>	3,37	3,82	27,50	34,50
<i>Cemento e sabbia di Zuppigno</i>	2,77	3,25	22,50	30,10
<i>Cemento e sabbia di Mollica</i>	2,82	3,36	23,65	24,70

La normativa UNI EN 998-2 non prevede però la possibilità di confezionare malte con l'introduzione di componenti diversi da quelli previsti (Tabella 3.21), e quindi maggiormente le malte prodotte con materiali locali, come quella di tufina, dove l'inerte (sabbia) viene sostituito con altro prodotto. Le ricerche svolte sulle malte tradizionali pugliesi, ed in particolare quelle dell'IRIS-CNR di Bari, prevedono l'ipotesi di poter riformulare l'accettazione delle malte strutturali così come contenuto nella Norma citata e poter far equivalere la malta in questione a uno o più tipi fra quelli indicati⁹⁰.

3.4.3 Malte tradizionali in Sardegna. Il materiale "Terra" come legante

L'intonaco che utilizza la calce come fase legante è certamente quello maggiormente affermatosi nella tradizione costruttiva in terra cruda. In effetti la sua stabilità è generalmente maggiore di quello di terra, mantenendo un alto grado di compatibilità fisica con la struttura muraria (moduli elastici, resistenze meccaniche, porosità, permeabilità, etc.). Per un peso specifico di 1,8 g/cm³ un intonaco a base di calce presenta valori di conducibilità termica compresi tra 0,7 e 0,9 W/mK, non dissimili, quindi, da quelli tipici del mattone in terra cruda⁹¹. L'adesione al paramento murario può essere resa più stabile con la tecnica dell'inserzione di cocci, ad esempio tegole, o di scaglie di pietra, come basalto vescicolare tra le commessure dei mattoni.

Gli intonaci a base di calce possono essere soggetti ad alterazioni di carattere fisico-chimico o all'insediamento di specie vegetali che possono portare anche al distacco del paramento murario in terra o a disaggregazioni dovute alla cristallizzazione salina e alla gelività⁹².

Nelle zone dove l'approvvigionamento della calce non risultava facile data la distanza dai più vicini centri di produzione o quando le risorse comunque non ne consentivano l'acquisto, la stessa terra è stata utilizzata sotto forma di malta per le costruzioni dei centri storici della Sardegna realizzati in terra cruda e in materiale lapideo, sia come malta per murature che per intonaci.

⁹⁰ Stella M. (1991), op. cit.

⁹¹ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁹² Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

La stessa tecnica può oggi essere riproposta curando in particolare la granulometria, separando le frazioni più grossolane e con una messa in opera che deve procedere per strati successivi progressivamente più fini. La lavorazione può prevedere una levigatura ed una compattazione finale della superficie. A causa dell'alta superficie esposta all'evaporazione, il ritiro deve essere fronteggiato con un'adeguata presenza di fibre.

Un ottimo compromesso che possa dare garanzie di stabilità nel tempo, può essere rappresentato dalla formulazione di una malta che veda la terra come materiale di base e l'aggiunta di piccole quantità di calce come stabilizzante sia dimensionale che rispetto all'azione erosiva dell'acqua che permetterebbe una maggiore durezza all'intonaco (percentuali variabili tra il 5% e il 10% sono in genere sufficienti). Attualmente, l'aggiunta di calce (compresa quella "viva", cioè il CaO, in funzione anche di essicante e di riduttore di umidità) al materiale terra è una pratica abbastanza comune negli interventi di consolidamento e di stabilizzazione dei terreni adoperati per la realizzazione di infrastrutture⁹³.

Il legante cementizio, affermatosi contestualmente al disuso della calce e della tecnica costruttiva in terra e degli altri materiali tradizionali, è invece inadatto negli interventi di restauro e quindi nell'affiancamento a materiali tradizionali di debole struttura. Questo vale in particolar modo per le costruzioni realizzate in terra cruda. L'intonaco a base cementizia è sostanzialmente incompatibile, perché caratterizzato da modulo elastico e coefficienti di dilatazione termica e di permeabilità radicalmente differenti rispetto alla terra. Infatti, se utilizzato su una muratura in mattoni crudi, l'intonaco cementizio è propenso a cadere se la superficie è molto estesa. Oltre all'incompatibilità fisica, gli intonaci a base cementizia presentano anche degli inconvenienti di natura chimica. A causa del tenore di sali presente nel cemento, il suo utilizzo in strutture particolarmente porose e quindi esposte alla circolazione dell'acqua (quali appunto la terra cruda) può causare la formazione di efflorescenze di sali quali cloruri, nitrati o solfati (tra i quali è particolarmente pericolosa l'ettringite)⁹⁴.

Tuttavia, l'aggiunta di piccole quantità di cemento alla terra (5-10% in peso) consentirebbe di ottenere un materiale che si rivela assai stabile dimensionalmente in fase di maturazione e resistente all'azione disaggregante dell'acqua, come visto anche nel caso della calce (la funzione stabilizzante è dovuta all'idrossido di calce prodotto durante le prime fasi dell'idratazione del cemento). La stabilità dimensionale è però ottenuta a spese di una maggiore porosità rispetto a quella del solo sistema terra, che di per sé è libero di autocompattarsi per contrazione in fase di essiccamento. Nell'eventuale impiego in aggiunta alla terra sono da preferirsi i cementi a maggiore contenuto di clinker, che sviluppano in tempi rapidi abbondanti quantità di idrossido di calcio e di silicati di calcio idrati⁹⁵.

⁹³ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁹⁴ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁹⁵ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

La consistenza delle malte è di fondamentale importanza per una buona riuscita della muratura. Potenzialmente anche una buona terra può avere una pessima riuscita, se mescolata male. Tutte le miscele dovranno essere opportunamente controllate affinché la massa appaia omogenea, priva di grumi, ed opportunamente umidificata. I principali requisiti di una malta a base di terra per muratura sono di seguito elencati⁹⁶:

- Deve avere resistenza meccanica adeguata a sostenere la muratura;
- Non deve presentare una permeabilità all'acqua tale da compromettere la stabilità della muratura;
- Deve avere uno strato di allettamento non inferiore a 1 cm;
- Non deve presentare fessurazioni;
- Deve aderire perfettamente ai mattoni crudi, ovvero lo strato superficiale del mattone deve risultare amalgamato con la malta di allettamento;
- Deve contenere una buona quantità di componenti fini, ma anche sufficienti sabbie che assicurano una buona lavorabilità;
- Se presentano un contenuto eccessivo di argilla, le malte di sola terra potrebbero necessitare di aggiunte di sabbia e paglia, al fine di contenere il fenomeno di fessurazione superficiale in fase di essiccazione;
- Al contrario, una malta poco coesiva può essere ulteriormente vagliata, allo scopo di aumentare la percentuale di argilla nell'impasto;
- Se la malta viene preparata manualmente è consigliato mescolarla con 24 ore di anticipo, per assicurare un'adeguata idratazione; al momento della messa in opera sarà possibile aggiungere l'acqua appena necessaria a rendere lavorabile l'impasto;
- Se la malta viene preparata meccanicamente non sarà necessario attendere per la sua messa in opera, in quanto l'opportuna idratazione verrà comunque assicurata dallo stesso procedimento;
- Le malte conterranno una quantità di acqua appena sufficiente a rendere l'impasto "lavorabile"; dovranno inoltre avere una consistenza tale da permettere il sostegno del mattone crudo da allettare, che verrà pressato nella sua posizione finale; a tale pressione, nessuna fuoriuscita di fango o acqua dovrà essere notata.

Nel realizzare l'intonaco, poi, è consigliabile posare tre strati successivi: il primo di sola terra e paglia; il secondo di terra e calce; il terzo, di finitura, di sola calce. Il primo strato potrà avere spessore fino a 15 mm, i successivi dovrebbero essere il più sottile possibile, per garantire una buona riuscita; comunque di spessore non inferiore ai 5 mm⁹⁷.

Oggi, l'utilizzo delle malte a base di terra, sviluppate in laboratorio e prodotte industrialmente, trovano impiego negli interventi di deumidificazione, utili dunque per affrontare situazioni speciali.

⁹⁶ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

⁹⁷ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

CAPITOLO 4. Regioni studio: Campania, Puglia e Sardegna

Si affronterà in questo capitolo, per le tre regioni oggetto di studio, una breve analisi sul contesto storico, geologico ed architettonico, sulle principali attività estrattive dei lapidei e delle materie prime, sulla produzione locale di materiali artificiali e sulle tecniche costruttive tradizionali.

4.1 Campania

La Campania è una regione di 13671 km², prevalentemente collinare (50,8%), incuneata tra il Mar Tirreno a ovest e l'Appennino Meridionale a est. Dal VIII secolo a.C. si svilupparono lungo la costa diversi insediamenti di popolazioni di civiltà greca dai quali ebbero origine le colonie magnogreche di Pithecusa, Cuma, Parthenope, Neapolis e Poseidonia. Nella seconda metà del IV secolo a.C. la regione fu posta sotto l'influenza di Roma, che la ribattezzò *Campania Felix* in riferimento alla sua prosperità. Dal XIII al XIX secolo ci fu poi il susseguirsi delle dinastie angioine, aragonesi e borboniche. L'eredità storica regionale ha lasciato un'impronta indelebile ed una forte influenza nell'architettura napoletana e nelle sue tradizioni costruttive. Avendo la regione subito influssi longobardi, cassinesi, bizantini, islamici e romanici, il patrimonio architettonico della stessa offre un'elevata varietà di stili, che vanno dal romanico al gotico, dal rinascimento al barocco napoletano fino al neoclassicismo.

La Campania è una regione molto variegata nella sua conformazione morfologica, caratterizzata dalla catena montuosa degli Appennini e da distese collinari nel suo interno. Dal punto di vista fisico, la regione può essere divisa in due zone, una montuosa ed una pianeggiante: la zona montuosa comprende l'Appennino campano, formato da una serie di elevazioni e altopiani (del Sannio, dell'Irpinia e del Cilento), che fornisce numerosi "marmi" di natura calcarea; la zona piana non è invece una superficie unitaria, ma è suddivisa in tante pianure divise da altrettanti rilievi dell'Antiappennino campano, come i rilievi vulcanici di Roccamonfina, dei Campi Flegrei e del Vesuvio, e la catena di origine sedimentaria dei Monti Lattari (che costituisce la Penisola Sorrentina). In Campania sono presenti sei importanti centri vulcanici: il Vesuvio con il Monte Somma, Roccamonfina al confine tra Lazio e Campania, i Campi Flegrei con la Solfatara di Pozzuoli, il complesso vulcanico dell'isola di Ischia con il Monte Epomeo ed infine i vulcani marini situati sul fondale del golfo di Napoli. Queste attività vulcaniche sono di grande importanza per la produzione di materiali lapidei, quali tufi e pietre laviche.

4.1.1 L'attività estrattiva tradizionale in Penisola Sorrentina¹

La penisola sorrentina costituisce l'estrema propaggine dei Monti Lattari, catena montuosa caratterizzata da una bastionata rocciosa interrotta frequentemente da grandi valloni un tempo attraversati da numerosi corsi d'acqua; dal punto di vista della composizione geologica,

¹ Pignatelli G. (2006), op. cit.

tutta l'area è caratterizzata dalla predominanza di vaste formazioni calcareo-dolomitiche della serie carbonatica e calcareo-silicico-marnosa, sulle quali si appoggiano in modo assolutamente discontinuo alternanze arenaceo-argillose, depositi detritici (ghiaie) e soprattutto vulcanici, questi ultimi formati da tufi e coltri di materiali piroclastici sciolti di origine flegrea e vesuviana. Nella parte terminale della penisola è situato il comune di Massa Lubrense, il cui territorio è caratterizzato da pendii più o meno ripidi e da una costa generalmente alta, fortemente frastagliata ed accidentata. Dal punto di vista geologico, l'area lubrense è composta da estese e compatte formazioni calcaree lungo la fascia costiera, mentre all'interno sono presenti piccoli giacimenti di origine vulcanica. Questi ultimi possono distinguersi essenzialmente tra quelli di materiale tufaceo grigio e quelli di materiali piroclastici incoerenti, quali lapilli, scorie laviche, pomice e pozzolane, disseminati in tutto il territorio in maniera assolutamente confusa e disorganica, con profondità e spessori estremamente variabili.

Dalle caratteristiche morfologiche e, soprattutto, da una conformazione geologica tanto eterogenea, è evidente il ruolo primario assunto nell'economia e nella storia del territorio lubrense, come del resto di tutta l'area sorrentino-amalfitana, dalla presenza di una gran quantità di materie prime, generanti fin dall'antichità un fiorentissimo mercato legato all'estrazione ed alla lavorazione di materiali calcarei e vulcanici.

I numerosi banchi tufacei che affiorano in tutto il territorio sono stati infatti coltivati da tempo immemorabile attraverso un complesso sistema di lunghe gallerie scavate all'interno, dalle quali si estraeva calcare, tufo grigio sorrentino, lapillo e pozzolana.

Dal XIII secolo si hanno invece notizie di molteplici cave di pietra arenaria, indicata dai fabbricatori locali come "Pietra di Massa", la quale è da considerare come *"il minerale che ha avuto una parte importante nei secoli scorsi nell'industria massese (...), oggetto di commercio per tutto il Rinascimento. Per le sue qualità, cioè una certa rassomiglianza apparente al piperno, almeno in alcune delle sue varietà, e una maggior tenerezza per lo scalpello, era assai ricercata per rivestimenti di edifici, portali, sedili ed altre opere"* (Filangieri di Candida, 1910). Notevole fu dunque l'apporto offerto all'economia lubrense da questo materiale da costruzione, oggetto di un continuo e particolarmente fiorente commercio durante tutto il XVI secolo. Fin dalla fine del 1400, si hanno infatti notizie di importanti ordini di questo materiale, che veniva utilizzato soprattutto per farne ornamenti nelle più importanti fabbriche civili e religiose della capitale: da una serie di inediti documenti conservati presso l'Archivio del Tesoro di S. Gennaro a Napoli, risulta ad esempio che dal 1612 al 1618 una grande quantità di *pietre de Sorrento* furono trasportate presso la grande fabbrica del Duomo ed utilizzate presumibilmente per la realizzazione di ornate e stipiti di porte e finestre. Il commercio della pietra di Massa legato alla produzione di elementi decorativi decadde quasi completamente alla fine del Settecento, anche se ai primi anni del Novecento questa pietra continuò tuttavia ad essere largamente impiegata in loco per la pavimentazione, *"molto utile nella penisola per lastrar le strade, essendo insuperabile in tale ufficio per non essere sdruciolevole, specie durante la pioggia"* (Filangieri di Candida, 1910). Nonostante ciò, l'arenaria venne definita,

con espressioni locali tipicamente antropomorfe, come “pietra morta”, in contrapposizione con la “pietra viva”, ovvero il calcare.

I procedimenti che portavano all'estrazione della pietra di Massa erano lunghi e complessi: una volta realizzato lo sbancamento del terreno vegetale sovrastante per mettere a nudo la formazione rocciosa, si estraeva la roccia dall'alto verso il basso, procedendo ad un progressivo, lento e il più delle volte poco regolare distaccamento delle lastre o di blocchi lapidei di diverse dimensioni, ottenuto attraverso l'utilizzo di grossi cunei battuti in fori eseguiti alla base di questi ultimi. Più raramente la cava veniva coltivata mediante cantieri regolari, tracciando sul banco roccioso lunghi solchi verticali che isolavano i blocchi da staccare poi in successione. Si procedeva poi, il più delle volte in loco, alla lavorazione della pietra in elementi regolari, da utilizzare per le murature o per farne elementi decorativi.

Il cosiddetto “Tufo Grigio Sorrentino”, in virtù del suo basso peso specifico e della sua buona resistenza, fu infatti largamente utilizzato fin dal XIII secolo in alternativa al piperno, e particolarmente apprezzato per la realizzazione delle strutture collocate ai livelli più alti delle costruzioni (come timpani, lanterne e cupole), o utilizzato per la creazione di elementi decorativi (cornicioni, capitelli, cornici, gradini, ornici e stipiti di porte e finestre, canali di gronda, vaschette) per l'estrema facilità di lavorazione. La pietra tufacea tipica del sottosuolo massese viene descritta da Norman Douglas, sottolineando i singolari procedimenti estrattivi e le particolari caratteristiche di un materiale che ancora agli inizi del secolo scorso si estraeva in grande quantità: *“il tufo di Massa è tanto più pregiato, cioè meno poroso, quanto più è profondo, ed i blocchi non vengono fatti saltare con mine, ma sono separati delicatamente dalla roccia, mediante cunei di legno e vengono, poi, ridotti in pezzi di dimensioni adatte (...)”. Il tufo di Napoli è giallo e più duro di questo qui, che a seconda del grado di umidità, passa dal colore bruno scuro, al giallo tufo con sfumature arancione, o anche grigio azzurro. Mi si dice che alla cava un pezzo costi quattro centesimi, ma che il prezzo raddoppia o diventa anche il triplo quando il blocco arriva a destinazione: deve essere trasportato, infatti, a dorso di mulo ed ogni animale non può portarne più di sette pezzi per volta*” (Douglas, 2002). La coltivazione delle cave di tufo a Massa si sviluppa quasi esclusivamente nel sottosuolo, ma nonostante ciò doveva risultare molto più semplice ed economica di quella della pietra arenaria, che si svolgeva invece completamente in superficie. L'estrazione del materiale tufaceo si effettuava aprendo nel banco roccioso piccole gallerie a sezione variabile (generalmente trapezoidale), alte un paio di metri e di larghezza simile, lasciando in alto molti metri di roccia a sostegno dei materiali incoerenti sovrastanti; successivamente, avanzati di una decina di metri, si iniziava a scavare verso il basso, ampliando progressivamente la larghezza del cunicolo, ed estraendo il tufo in grossi blocchi fatti saltare manualmente con grossi cunei o con picconi; più di rado il tufo veniva estratto mediante lo scavo di profondi pozzi con sezione a bottiglia, che servivano anche per areare le gallerie.

Infine, dai giacimenti di origine eolica di materiali piroclastici sciolti, raccolti in piccoli banchi di spessore variabile formatasi in modo irregolare soprattutto nelle vallate e lungo i pendii dell'entroterra, si estraevano in passato grandi quantità di lapilli, di pomice, di pozzolane e di

scorie laviche da utilizzare principalmente come inerti per la realizzazione delle malte. In particolare, il lapillo doveva trovare larghissimo utilizzo per la messa in opera del cosiddetto “battuto”, un particolare rivestimento impermeabile dal basso peso specifico utilizzato nelle coperture piane e a volta estradossata delle abitazioni rurali; molto di rado veniva invece usato per farne intonaci grezzi.

Nonostante la presenza di vasti banchi di roccia calcarea nel territorio lubrense, la coltivazione delle cave di questo materiale dovette restare, almeno fino alla fine dell’Ottocento, limitata a poche zone circoscritte, e portata avanti con interventi poco invasivi affidati a pochi addetti specializzati. Come osservato da Riccardo Filangieri agli inizi del secolo scorso, *“di ben poca importanza nelle industrie è stata nei tempi passati la roccia calcarea. Se ne è fatto perennemente uso alla produzione della calce e talora per pubbliche opere, come materiale da costruzione. Ora, una colossale cava sulla solitaria marina di Marcigliano estrae a migliaia le tonnellate di pietre sulla grande frattura trasversale del M. Corbo, per costruir dighe all’entrata del porto di Napoli”* (Filangieri di Candida, 1910). Questa constatazione sottolinea con estrema chiarezza quanto l’estrazione e la lavorazione del materiale calcareo fosse, nell’economia lubrense, di secondaria importanza rispetto a quella relativa all’arenaria ed al tufo, almeno prima dell’apertura delle grandi cave industriali. I banchi calcarei della penisola sorrentina appaiono infatti estremamente fratturati, potendo così offrire una roccia molto friabile e quindi ben poco adatta al taglio e, soprattutto, alla lavorazione. Inoltre, la maggiore resistenza della roccia calcarea a quegli stessi metodi estrattivi che venivano invece utilizzati nelle cave di arenaria e di tufo, permetteva uno sfruttamento della cava molto limitato, portando allo scavo di pochi massi per volta, da spaccare ed utilizzare successivamente come pietra da costruzione o da trasformare in calce in rudimentali forni realizzati generalmente con pietrame a secco. Le pietre di calcare, ricavate dai grandi blocchi dal paziente e duro lavoro degli spaccapietre, non avrebbe così potuto alimentare grandi traffici commerciali, finendo quindi per essere utilizzate, direttamente in loco, per la realizzazione dei muri di sostegno dei terrazzamenti agricoli, realizzati a secco con blocchi più o meno grandi da parte di operai altamente specializzati. Nella costruzione delle abitazioni rurali, la pietra di calcare trovava invece largo utilizzo nelle opere di fondazione diretta, mentre più raramente veniva impiegata per i piani inferiori dell’edificio per il suo maggior peso rispetto al tufo grigio, che era invece utilizzato insieme alle pomici o al battuto di lapillo per i piani inferiori. Questa semplice ma efficace operazione avrebbe infatti offerto una distribuzione dei pesi ideale, portando così ad una maggiore stabilità all’intera fabbrica.

La trasformazione della roccia calcarea in calce viva, ossia ossido di calcio, avveniva tramite la cottura del materiale lapideo in particolari fornaci dette “calcare”. Queste strutture erano presenti in passato in gran numero nei pressi di ogni cava, soprattutto lungo la costa, per facilitare il trasporto ed il commercio del prodotto finito. La tipica calcara dell’area sorrentino-amalfitana era una complessa struttura tronco-conica costruita fuori terra, di notevoli dimensioni, realizzata con materiale refrattario di norma diverso da quelle della cava al fine di sopportare le altissime temperature interne. Le poche calcare massesi superstiti hanno invece

un disegno generalmente più semplice, di dimensioni molto inferiori, realizzate con pietre locali legate con malta di calce e protette da una sorta di fodera realizzata con pietra più fine e di diversa consistenza. Per il caricamento della fornace, si sistemava sul fondo di questa una robusta grata di ferro, sulla quale si disponevano, alternati, uno strato di pietre e uno di legna mista a terra, fino al suo riempimento completo.

La gestione delle fornaci per la produzione di calce, che in tutto il territorio lubrense era mantenuto a livello locale, continuò fino ai primi decenni del Novecento quando, per il costo sempre più elevato del carbone e della legna, che incideva notevolmente sul costo di produzione della calce, e per la scarsa qualità di quest'ultima rispetto a quella che intanto iniziava ad essere prodotta industrialmente, subì un declino tanto traumatico quanto rapido.

4.1.2 Le tradizioni costruttive nell'edilizia napoletana dell'Ottocento²

La condizione complessiva delle attività artigiane nel campo dell'edilizia può desumersi dal *"Quadro statistico della popolazione di Napoli per il 1807"*. Recepita la nuova organizzazione amministrativa delle "Arti e Mestieri" suddivisa nel 1792 in Arti Annonarie ed in Arti Meccaniche, il "Quadro statistico" riporta per queste ultime le seguenti figure professionali: *"calcarari, fontanari, marmorari, muratori, manipoli, pipernieri, riggiolari, stuccatori, tagliamonti, vasaï"*. A queste attività le successive analisi demografiche del 1845 e del 1871 ne aggiungeranno altre: *"capo maestri fabbricatori, fabbricanti di maioliche, mattonieri, scarpellini, asfaltisti, calceruoli, carpentieri, pulitori, restauratori"*. Il quadro dell'industria cittadina napoletana nel 1888 diventa più dettagliato includendo le fonderie, le cave, la lavorazione del marmo, la lavorazione dello smalto sul ferro, la produzione di carte da parato, le segherie e la lavorazione del legname.

Nella tradizione costruttiva napoletana, l'utilizzo degli elementi in laterizio si è mostrato discontinuo nel corso della storia per carenza nel sottosuolo di banchi di argilla. L'aumento dei costi determinato da un eventuale approvvigionamento dalle province di tale materiale ne ha ovviamente limitato le applicazioni a campi specifici: manti di copertura, parti fortemente sollecitate, pavimentazioni o delicati interventi di sostituzione muraria. Talvolta ai mattoni veniva affidata una funzione di rivestimento della cortina muraria in tufo. In altri casi, quelle che in apparenza sembrano murature in laterizio, sono spesso il risultato di particolari finiture date all'intonaco tradizionale, come nel caso delle cortine murarie interne del Palazzo Reale di Napoli, in cui l'intonaco presenta una finitura esterna ad imitazione dell'opera in laterizio. Nel panorama costruttivo napoletano ottocentesco si diffonde la pratica delle murature listate con filari di mattoni; gli elementi in cotto trovano in quest'epoca ampia applicazione soprattutto nella realizzazione dei tramezzi, laddove il tufo diventa di onerosa lavorazione per spessori modesti.

Il perfezionamento delle tecniche di posa in opera associato al taglio sempre più regolare dei conci di pietra condurrà alle prime sperimentazioni circa l'utilizzo del tufo a "faccia vista".

² Raia L. (2004), op. cit.

L'Istituto di Belle Arti ed il Grenoble sono la testimonianza della riscoperta delle proprietà estetiche e lapidee del tufo tra il XVIII ed il XIX secolo. L'attenzione si concentra sulla definizione dei trattamenti superficiali da destinare alle cortine di tufo per proteggerle dalla corrosione: si producono pellicole protettive a base di latte di calce e terre colorate o attraverso l'immersione in una soluzione di silicati di alluminio.

Viene, inoltre, riscoperto l'utilizzo nell'area vesuviana degli scheggioni di pietra lavica (peraltro mai abbandonato), specialmente per le opere di fondazione ed anche per le strutture di elevazione, realizzate entrambe con l'opera a sacco³, come nel caso della Basilica di San Francesco di Paola. Proprio questi ultimi interventi evidenziano un ulteriore tratto caratteristico dell'industria edilizia napoletana: la lunga tradizione caratterizzata dall'utilizzo della "Pietrarsa". Attraverso i secoli, maestranze specializzate hanno realizzato cinte murarie, opere idrauliche, edifici e pavimentazioni stradali mediante l'uso della pietra lavica estratta dalle tante cave aperte ai piedi del Vesuvio e del Monte Somma. Le prime applicazioni della pietrarsa risalgono all'antica città di Pompei, dove i lastricati stradali segnati profondamente dal passaggio dei carri ne sono la traccia storica. L'estrazione della pietrarsa raggiunge notevole diffusione nel XVIII secolo quando viene preferita al piperno, la cui coltivazione in cava era diventata troppo onerosa per l'eccessiva profondità dei giacimenti. L'avvicendamento tra pietrarsa e piperno come pietra da taglio fu certamente favorita dalla quantità di materiale resa disponibile dall'eruzione del Vesuvio nel 1631, le cui lave si spinsero fino alle porte della città di Napoli; celebre è la cava della "Scala" presso Resina (antico nome della città di Ercolano), dove si estraeva una pietrarsa di grana fine particolarmente ricercata per la sua elevata lavorabilità. La lava della Scala è stata utilizzata come pietra da taglio per l'ingresso del Cimitero di Poggioreale, per la Caserma di Cavalleria a Piazza Vittoria, per i basamenti degli edifici, per le banchine sul mare, oltre che per lastricare le strade cittadine, come in via Mezzocannone e in Piazza Municipio. I fusti delle colonne del portico della Basilica di San Francesco di Paola, invece, vennero realizzati con pietrarsa di Pozzuoli.

Fino ai primi decenni del XX secolo i principali siti estrattivi dei materiali lavici erano ancora attivi nei Comuni di Portici, Resina, Torre del Greco, Boscoreale, Terzigno, Montecorvino Pugliano, Cercola e San Sebastiano al Vesuvio. A Torre del Greco era ubicata la cava di "Villa Inglese", che rappresentava l'impianto più importante tra quelli dell'area vesuviana, per modernità di attrezzature e per volume di produzione. Dal Somma si estraeva inoltre il basalto, comunemente chiamato "pietra di ferro", poiché è una lava dura, compatta ed omogenea, che a differenza delle altre pietre laviche rispondeva bene alla pulitura.

In questo periodo erano particolarmente attivi anche gli impianti che estraevano un altro importante prodotto vulcanico, la "ferrugine", una varietà dura e compatta delle lave

³ La muratura a sacco è un tipo di muratura molto usata per la costruzione di edifici storici, consistente in due paramenti realizzati in pietra o in mattoni, paralleli e distanziati fra loro (aventi la funzione di cassero di contenimento e finitura superficiale), riempiti all'interno con una miscela di pietrisco e avanzi di lavorazione dei paramenti, legati da malta di cemento o di calce. Il nome deriva dal fatto che i due muri costituiscono una specie di sacco nel quale viene versato il riempimento. I Romani fecero largo uso della tecnica della muratura a sacco utilizzando l'*Opus Caementicium* come riempimento gettato tra i due paramenti.

vesuviane. In particolare, nei lavori per il porto di Napoli la ferrugine fu largamente impiegata nel confezionamento dei calcestruzzi: cinque parti di ferrugine, una di grassello di calce e due di pozzolana di Bacoli. Si distingueva inoltre la “ferrugine”, costituita da elementi volumetricamente eterogenei utilizzata prevalentemente per grossi blocchi di calcestruzzo, dalla “ferruginetta”, con granulometria piccola e costante, utilizzata per le prime opere in cemento armato e per i solai.

Il quadro dei prodotti estrattivi vesuviani può essere completato citando i lapilli e le sabbie del Somma-Vesuvio. I lapilli hanno trovato da sempre vasto impiego nelle architetture del napoletano, prima nei vari battuti ad elevato potere impermeabilizzante, poi a formare ottimi calcestruzzi di cemento e malte di calce per intonaci. Sono così descritti da De Cesare: *“Nelle vicinanze dei vulcani si trovan pure degli strati di piccole pomici arrotondate dalla reciproca collisione, chiamate volgarmente “lapilli”, “carbuncolas” di Vitruvio; fanno queste ottima lega con la calce. Noi ne abbondiamo e ne facciamo terrazzi, ed intonachi idraulici, ve ne ha del nero ferruginoso, che diciamo “lapillo bruciato”, o “lapillo vulcanico”: si raccoglie presso di noi alle falde del Cratere. Forma con la calce la più energica consistenza”* (De Cesare, 1827). Nei pressi di Torre del Greco erano ubicati i principali siti estrattivi. Se passati al setaccio, poi, si otteneva una sabbia, detta “arena di fuoco”, impiegata come inerte nelle malte idrauliche per la maggiore resistenza meccanica e l’elevata granulometria rispetto alle altre sabbie. Le arene di fuoco, prodotte dall’erosione dei materiali lavici sotto l’azione delle acque meteoriche, si estraevano dai numerosi alvei del Somma. Un’altra sabbia vesuviana prende il nome di “arena di lava”, meno pregiata e di granulometria più minuta ed impura, per la presenza di sostanze argillose, che si formava a seguito delle lave di fango prodotte dalle eruzioni vesuviane di natura esplosiva.

L’attenzione dei fabbricatori e dei tagliamonti non era limitata alle sole cave di tufo, di piperno e di pietrarsa: ancora più redditizia era l’eventuale individuazione e la successiva estrazione di marmi pregiati. Di notevole interesse erano, nell’area campana, il marmo di Mondragone estratto nella provincia di Caserta, il marmo e le brecce di Vitulano in provincia di Benvenuto, ed il travertino di Bellona. Alcuni dei marmi sono stati ad esempio utilizzati per la Reggia di Caserta e per il Palazzo Reale di Napoli.

4.1.3 Le tecniche costruttive nell’Area Flegrea: Rione Terra e Cuma⁴

Il Rione Terra è un agglomerato urbano che costituisce il primo nucleo abitativo di Pozzuoli, nella città metropolitana di Napoli, abitato fin dal II secolo a.C. Era chiamata “Puteoli” dai Romani per la presenza di pozzi, ma in origine aveva il nome di Dicearchia, fondata da una colonia di esuli provenienti dall’isola di Samo in Grecia, la cui datazione viene fatta risalire al

⁴ Esposito R. (2017). *Contesti tardo-repubblicani di Puteoli e del territorio. Contributo allo studio della colonia scipionica*. Dottorato in scienze storiche, archeologiche e storico-artistiche XXIX ciclo, Università di Napoli “Federico II”, Dipartimento Studi Umanistici, Napoli.

Conovan M. (2017). *L’evoluzione dell’opera reticolata a Cuma*, in *European Journal of Roman Architecture*. N. 1, pag. 7-24, UCOPress, Università degli studi di Padova

531 a.C. Lo storico greco Strabone definisce *Puteoli* uno sbarco di Cuma, inserito in un sistema organizzato di approdi costieri utile al controllo del territorio in età arcaica; ne indica inoltre la posizione su un promontorio roccioso, notazione da cui deriva l'identificazione dell'insediamento sulla rocca, oggi noto come Rione Terra, che emerge dal mare per un'altezza di 3 metri con l'antica città. Nel 194 a.C. l'allora *Puteoli* divenne colonia romana diventando, per secoli, il principale porto mediterraneo di Roma.

Analizzando la cinta muraria del Rione Terra sono visibili, nell'area sud-occidentale, strutture murarie realizzate con doppia cortina di blocchi di tufo; sul fianco del promontorio (presso Piazza della Repubblica) è visibile un altro tratto di muri in blocchi di tufo in posizione di reimpiego. Un ulteriore tratto è stato individuato nel quadrante sud-orientale, inglobato in un ambiente di cui costituisce la parete di fondo. Inoltre, saggi di scavo hanno messo in luce al di sotto dei fabbricati del settore nord-occidentale strutture in opera quadrata⁵, il cui sviluppo sembra seguire il percorso determinato dall'andamento del banco tufaceo; alle mura in blocchi di tufo disposti in asse orizzontale si appoggiano enormi muraglioni di contenimento. Lungo il limite sud-orientale del settore è presente una struttura voltata in blocchi di tufo. Le strutture sono in opera quadrata di tufo associate a strutture in opera poligonale/incerta articolate in una serie di vani di piccole dimensioni, comunicanti tra loro, riutilizzati poco dopo la fondazione della colonia.

Passando ora alle abitazioni del Rione Terra, le "*Domus*" tardo-repubblicane sono attestate dal rinvenimento di alcuni ambienti con decorazioni pavimentali conservatesi al di sotto dei palazzi seicenteschi.

Due ambienti appartenenti ad una *domus* posti al primo piano rispetto alla strada antica erano accessibili da una gradinata. Del primo ambiente si conserva un tratto di parete in opera quasi reticolata e una pavimentazione in cocciopesto decorato, conservato nell'angolo sud-ovest. Il pavimento era decorato da tessere bianche di calcare di forma rettangolare e da coppie di tessere quadrate disposte in ordine sparso, da una fascia decorata a zampe di gallina e da tre file di tessere disposte in ordine obliquo. Il secondo ambiente aveva una pavimentazione in cocciopesto, parzialmente conservata, con un motivo decorativo composto da una fila continua di tessere, mentre il tappeto era decorato da una rete di rombi.

Altri due ambienti in opera quasi reticolata con rifacimenti in opera listata sono orientati verso il decumano di Via Duomo ubicati sul lato nord. L'ambiente meridionale ha un pavimento in semplice cocciopesto privo di decorazione, mentre l'ambiente a nord conserva parte della decorazione centrale composta da una sequenza di rombi disposti radialmente, iscritta in un quadrato. I pavimenti, per confronto con i siti vesuviani, sono datati alla fine del II secolo ed inizio del I secolo a.C.

⁵ L'opera quadrata (*Opus Quadratum*) è caratterizzata dalla sovrapposizione di blocchi squadrati in forma parallelepipedica e di altezza costante, disposti in opera in filari omogenei, in genere nel senso della lunghezza. I blocchi erano ricavati dall'estrazione di vari tipi di pietre, quali ad esempio travertino e tufo.

Infine, una grande cava per l'estrazione del tufo venne aperta lungo il margine meridionale del promontorio, tra il decumano di via Villanova a nord e il decumano meridionale a sud. La cava è stata divisa in due da un tramezzo in opera reticolata in età augustea, alto 14 metri. La metà ovest della cava è stata occlusa da uno strato a matrice pozzolanica di colore marrone, con macerie di piccole dimensioni che si addensano nella metà nord della cava; vi sono inoltre abbondanti quantità di pomici, lapilli e taglime di tufo. Lo strato si appoggia al banco di tufo tagliato e regolarizzato sul lato nord, alle fondazioni a sacco dei muri in opera poligonale sui lati est ed ovest, ed alla fondazione in cementizio dei pilastri in opera laterizia a sud; si appoggia, infine, al muro in opera reticolata che chiude il tratto nord del lato est. Lo strato pozzolanico fu utilizzato anche come preparazione per il pavimento di cocchiopesto di uno degli ambienti di una *domus* che si sviluppa sul crinale del costone sud.

L'area flegrea è una delle zone dove l'opera reticolata⁶ è maggiormente diffusa sia nelle costruzioni di carattere pubblico, che in quelle di carattere privato. Si registra dunque un notevole impiego di questa tecnica a tutti i livelli, ed in particolare a Pozzuoli. Tuttavia, anche se la zona campana è quella dove per prima si diffonde l'uso dell'opera cementizia, la tecnica dell'opera reticolata si diffonde con qualche difficoltà e più tardi rispetto al Lazio. Nei Campi Flegrei, la diffusione avviene lungo le principali vie di comunicazione sia stradali che d'acqua, soprattutto all'interno di una committenza benestante e ricca.

A Cuma l'*Opus Reticulatum* è presente all'interno di tutta la città e nel territorio, sia nelle forme dell'opera "quasi reticolata" che dell'opera "mista". Troviamo questa tecnica utilizzata nei grandi edifici templari dell'Acropoli, nelle grandi strutture con funzione militare create sotto Agrippa, negli edifici che si affacciano sulla piazza forense, come ad esempio il Tempio con portico e gli spazi commerciali lungo il lato meridionale, nelle abitazioni individuate nella città bassa, nella necropoli di Porta mediana e in quella presente all'esterno della Porta orientale. A Cuma l'opera reticolata è realizzata esclusivamente con elementi in tufo giallo napoletano, pietra di provenienza locale, molto semplice da tagliare e di conseguenza molto adatta per la realizzazione dei tufelli. Il legante impiegato sia per la messa in opera dei paramenti che per la realizzazione del nucleo è malta a base di calce e sabbia pozzolanica.

Nei primi decenni del I secolo a.C. si assiste alle fasi di definizione e alla prima diffusione dell'*Opus Reticulatum*; i tufelli impiegati hanno dimensioni varie e una forma non ben definita. La particolare realizzazione degli elementi implica una messa in opera irregolare dei paramenti. Quest'aspetto è evidente sia nei cantieri privati della necropoli che in quelli pubblici dell'anfiteatro. Con la metà del I secolo a.C. si assiste a un miglioramento nel taglio dei tufelli, ma non ancora un paramento ben realizzato. Una definizione maggiore della tecnica si ha in corrispondenza del periodo augusteo, quando si ha ancora correlazione tra

⁶ L'opera reticolata (*Opus Reticulatum*) è un tipo di tecnica che si è affermata grazie ad una sempre maggiore specializzazione dei processi produttivi, che affina la tendenza già manifestatasi con l'opera quasi reticolata (considerata la fase iniziale dell'opera reticolata) a regolarizzare la superficie; i blocchetti quadrati, quasi sempre di tufo grigio o giallo, sono disposti secondo un asse inclinato di circa 45°, secondo un modulo ricorrente di due blocchetti pari a circa 30 cm. Tutto ciò permette di velocizzare il lavoro e anche di prodursi in virtuosismi tecnici, come l'inserimento di motivi geometrici di elaborata fattura.

cantiere pubblico e privato. L'incremento di utilizzo dell'opera reticolata e un suo perfezionamento potrebbero derivare dalla presenza in loco di maestranze non locali maggiormente specializzate, che intervengono in occasione dei grandi cantieri pubblici che hanno interessato la città in questo periodo. Con la seconda metà del I secolo d.C. si continua ad utilizzare l'opera reticolata, ma con l'impiego di tufelli di dimensioni maggiori; in questo periodo, inoltre, non vi sono all'interno della città grandi cantieri pubblici. Con gli ultimi anni del I secolo e l'inizio del II secolo d.C. vi è un ritorno ad un'opera reticolata con elementi di fattura molto buona e di dimensioni contenute. La ricomparsa di questa precisione, ben si inquadra nel periodo di rinnovamento architettonico che interessa la città di Cuma: a partire dal 95 d.C. circa, con la stesura della *via Domitiana*, ha inizio un periodo in cui fioriscono nuove costruzioni a carattere pubblico e molte altre sono restaurate. Potrebbero quindi essere intervenute squadre di costruttori altamente specializzate, con un rinnovato diffondersi delle capacità tecniche anche alle maestranze locali.

4.1.4 Produzione e impiego del laterizio fra Tarda Antichità e Medioevo⁷

Se guardiamo le tecniche di costruzione dell'intero periodo romano e medievale, l'uso dei laterizi su vasta scala, spesso a vista e soprattutto nei centri urbani, è un fenomeno del I-IV secolo d.C., che modificò il sistema costruttivo a blocchi portando dal punto di vista strutturale maggiore rigidità ma anche maggiore stabilità. Prima e dopo questa fase di urbanismo particolarmente intenso le tegole erano molto frequenti e i mattoni cotti erano piuttosto rari. In particolare, prima di questo periodo, i mattoni cotti in fornace venivano adoperati solamente in casi limitati e con funzioni specifiche, quali ad esempio negli elementi architettonici sottoposti ad una certa umidità o ad un forte calore, come i bagni, le terme o i forni di riscaldamento; poi fu applicato anche alle pareti esposte a brusche variazioni atmosferiche o a infiltrazioni d'acqua, come le terrazze, le cisterne, le stanze sepolcrali e le fogne. L'industria laterizia crollò invece dopo il tardo periodo imperiale, intorno al VI secolo d.C., ma la tecnica di cottura dei laterizi sopravvisse certamente a Roma e probabilmente anche altrove. Per quanto riguarda la muratura, nuovi laterizi vennero usati solo sporadicamente nell'Alto Medioevo, quasi sempre insieme a pietra, in particolare per edifici importanti e di solito di carattere ecclesiastico. Dove antichi edifici in muratura erano disponibili, i laterizi e le tegole venivano riutilizzati, spesso dopo solo un minimo di lavorazione. In altri casi i mattoni venivano prodotti su ordinazione, soprattutto per gli archi dove il materiale di spoglio era inadeguato. Le tegole cotte vennero comunque prodotte con continuità per tutto l'Alto Medioevo, tuttavia su scala molto limitata e probabilmente solo per edifici particolarmente importanti. La produzione laterizia nell'Alto Medioevo, inoltre, non dipese solo dall'esistenza della tecnologia necessaria, ma anche da fattori geologici come la disponibilità di giacimenti di argilla. Elementi di continuità in tutto il periodo romano e nel

⁷ Arthur P. e Whitehouse D. (1983), op. cit.
Giuliano M. (2010), op. cit.

medioevo erano l'uso dei bolli e l'impressione con le dita, i quali erano strettamente collegati al controllo della produzione e della distribuzione del prodotto.

In Campania, l'uso generale del laterizio per l'edilizia iniziò, come a Roma, nel I secolo d.C. in risposta al problema di rifornimento veloce e su vasta scala di materiali da costruzione relativamente economici, in particolare per i lavori pubblici, prendendo il sopravvento su tutti gli altri materiali. I mattoni, prodotti più velocemente dei precedenti materiali da costruzione, venivano messi in opera con maggiore facilità, in virtù della loro forma regolare e della più ampia superficie portante. "*Opus Testaceum*" era il nome dato da Vitruvio alle opere in laterizio, tecnica molto diffusa nei primi secoli d.C. il cui impiego può essere esemplificato da edifici come l'Anfiteatro Flavio di Pozzuoli e il grande complesso termale di Via Carminiello ai Mannesi di Napoli. La mancanza di costruzioni tardo romane sopravvissute impedisce un accurato giudizio circa l'uso del laterizio nel tardo impero, sebbene i pochi resti mostrano come l'industria fosse già in decadenza, avendo la costruzione in mattoni su vasta scala dato luogo in data anteriore ad un maggiore uso di "*Opus Vittatum*"⁸ o di una muratura in strati di tufo alternato a mattone.

Nel periodo tardo antico, i bolli laterizi indicano una produzione continua fino ad almeno il VI secolo d.C., come è mostrato da un bollo trovato vicino Vico Equense a sud di Napoli con la legenda +SPES IN DEO (CIL X, 8042, 139). I laterizi con bolli databili al V secolo d.C. sono stati trovati in tombe a cappuccina intorno alla chiesa paleocristiana a S. Restituta (Ischia), dove scarti di fornace indicano una produzione locale. Diversi tipi di laterizi vennero scoperti nel cimitero del complesso abbaziale a Cimitile; probabilmente, tra il IV e il V secolo d.C., il sito produceva o almeno riceveva nuovi laterizi in piccole quantità. Gli elementi rinvenuti a Cimitile sono di forma tipicamente romana, con misure che variano da 51x42 cm a 70x58 cm.

Successivamente, tra l'VIII e il IX secolo d.C., i mattoni e tegole erano occasionalmente usati in mura costruite in massima parte con pietre locali. Allo stesso modo, nuovi mattoni sembrano stati usati a Nocera Inferiore nel battistero di S. Maria Maggiore, impiegati nei vari archi a fasce nella cupola, sebbene il materiale edilizio predominante fosse sempre il tufo. Tuttavia, si dispongono di pochissimi punti cronologici fissi per questo tardo uso del laterizio, sebbene un esempio importante e contrastante meriti l'attenzione: Benevento. Per tutto l'Alto Medioevo, Benevento fu il centro di un ducato longobardo e alcuni resti architettonici di questo periodo sono sopravvissuti fino ad oggi. Di particolare interesse sono diversi tratti delle mura di cinta della città e la chiesa di S. Sofia costruita nella zona del *Sacrum Palatium*, databile al regno di Arechi II (758-787 d.C.). La chiesa, consacrata nel 762, si ispirava all'immensa chiesa di S. Sofia di Costantinopoli e può essere stata opera di maestranze orientali. Quanto sopravvive della sua muratura originale mostra che fu costruita con una specie di *Opus Vittatum* con filari di due blocchi di tufo alternati con due di mattoni. È abbastanza chiaro che il laterizio impiegato è il risultato di spoglio di edifici antichi e include non solo laterizi ma

⁸ L'opera listata (*Opus Vittatum*) è una tecnica edilizia romana nella quale il paramento del nucleo cementizio della muratura è costituito da filari di laterizi alternati a filari di altri materiali di forma parallelepipedica (generalmente blocchetti di tufo o di travertino poco più grandi dei mattoni).

anche tegole. Così il più importante monumento longobardo sopravvissuto nell'Italia meridionale non mostra nuovi laterizi nella costruzione muraria. Il contrasto tra i due sistemi di rifornimento, ovvero produzione e spoglio, impiegati in progetti edili contemporanei nel VIII-IX secolo è notevole.

Infine, vale la pena ricordare l'eccezionale monumento napoletano noto come la Pietrasanta, il campanile di S. Maria Maggiore. Probabilmente costruito nell'XI o XII secolo d.C., è quasi interamente in laterizio e rivela notevole competenza architettonica, nonostante il lunghissimo periodo nel quale l'uso di questo materiale su vasta scala nella regione era discontinuo. Sebbene attentamente lavorati, i laterizi che in spessore variano dai 2 ai 5 cm, probabilmente provengono dallo spoglio di monumenti antichi nella zona. Così, sia a Napoli che a Roma, anche nel XI-XII secolo, sembra che la produzione di mattoni su una solida base industriale non si fosse ancora ristabilita.

4.1.5 I materiali locali nella rigenerazione degli spazi urbani dei centri storici della Città Metropolitana di Napoli⁹

Gli interventi sullo spazio dei percorsi urbani sono spesso legati ad un'esigenza di adeguamento a nuovi bisogni e quindi ad un cambiamento del concetto di efficienza ed incidono sull'insieme delle componenti percettive, prestazionali e culturali che sono trasmesse all'osservatore. Nell'ambito degli studi centrati sulle dinamiche di trasformazione urbana nella dimensione metropolitana, sono nati due grandi progetti di ricerca: il Grande Progetto "*Centro storico di Napoli, valorizzazione del sito UNESCO*" e il "*Laboratorio Città Metropolitana*". Questi due progetti esprimono l'impegno rivolto ad affrontare il tema della rigenerazione dei tessuti storici della città di Napoli e della sua provincia in un momento di grandi cambiamenti, che vedono la città investita del nuovo ruolo di Città Metropolitana.

Il Grande Progetto "*Centro Storico di Napoli, valorizzazione del sito UNESCO*", ha come obiettivo la riqualificazione del nucleo antico dell'insediamento partenopeo, ed è un progetto finanziato con fondi europei nell'ambito di un Protocollo d'intesa che riunisce Regione Campania, Comune di Napoli, Arcidiocesi di Napoli, Ministero per i Beni Culturali Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Campania e Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche per la Campania e il Molise. La strategia di intervento adottata mira a costituire una serie di processi di rigenerazione urbana attraverso la riqualificazione dello spazio pubblico.

Il "*Laboratorio Città Metropolitana*" nasce invece dagli studi effettuati dalla "Commissione Urbanistica, gestione del territorio, ambiente", costituita dall'Amministrazione comunale, con lo scopo di affrontare temi di grande rilievo per i 92 comuni della Città Metropolitana, quali ad esempio la tutela delle diverse identità dei comuni che, seppur riuniti sotto il profilo amministrativo, rivendicano il proprio profilo culturale fortemente radicato nell'architettura dei luoghi e nelle risorse locali.

⁹ De Joanna P. (2015), op. cit.

L'approccio di ricerca si fonda sulla necessità di ripristinare l'omogeneità ed uniformità dello spazio pubblico per dare un livello omogeneo di qualità in tutte le aree metropolitane. Sono identificati tra gli indicatori di omogeneità: il colore, la struttura e i materiali per la pavimentazione. La rigenerazione dello spazio pubblico porta a confrontarsi sia con configurazioni fortemente caratterizzate dai materiali lapidei della tradizione Campana, storicizzati e consolidati nella loro materialità, sia con mistificazioni prodotte da ragioni economiche, speculative e, molto spesso, di scarsa consapevolezza culturale. La proposta riguarda strumenti di conoscenza e di valutazione per la definizione di azioni sostenibili, sia per la rigenerazione urbana che per lo sviluppo locale, caratterizzati dall'utilizzo di materiali locali e a chilometro zero, compatibilità materica e funzionale negli interventi sui tessuti consolidati, vagliando le analisi che mettano in luce le qualità del prodotto lapideo sotto il profilo della durabilità, manutenibilità, efficienza energetica e riciclabilità.

La scelta dei materiali dei piani di calpestio rappresenta l'inscindibile legame che sussiste tra lo sviluppo di un territorio e le sue risorse. In Campania, i materiali tradizionalmente impiegati per la pavimentazione dello spazio pubblico sono i prodotti derivanti dalle attività vulcanica del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei, che hanno segnato i caratteri dei centri urbani di tutta la regione con i colori, le tessiture, le tecniche costruttive e le lavorazioni. Le pavimentazioni del Centro Storico di Napoli sono costituite per circa il 70% da materiale lapideo (quasi sempre sono impiegate le lave vesuviane), con una netta prevalenza dei materiali lavici (per basolati, lastricati, pavé) rispetto alle pavimentazioni in cubetti di porfido di introduzione più recente rispetto al Centro Antico.

Recenti studi condotti nell'ambito del Grande Progetto "*Centro Storico di Napoli, valorizzazione del sito UNESCO*" hanno messo in luce le significative inefficienze dei percorsi pedonali nelle aree oggetto di studio, a causa di discontinuità, sconnessioni, presenza di ostacoli, confusione con i percorsi carrabili e di sosta, eterogeneità dei materiali di pavimentazione e assenza di complanarità del piano stradale. Nelle soluzioni tipo proposte sono state preferite soluzioni progettuali in continuità con la tradizione locale privilegiando, ove possibile, il reimpiego delle pavimentazioni esistenti recuperate in altre zone della città. I risultati di questa ricerca riguardano inoltre la metodologia per la costruzione di una banca dati delle pavimentazioni storiche dell'area metropolitana, mettendo in relazione l'impianto storico con le caratteristiche del sistema costruttivo delle pavimentazioni, le caratteristiche materiche, la provenienza dei materiali e le modalità di fruizione nell'attuale contesto urbano. Per ogni pavimentazione sono descritti i guasti e le tipologie di degrado ricorrenti con individuazione delle cause e degli interventi effettuati. Lo scopo della banca dati è quello di rendere disponibili informazioni monitorate su tutto il territorio metropolitano per estrarre dati finalizzati alla tutela e manutenzione dei percorsi storici.

L'approvvigionamento dei materiali pone il problema della scarsa disponibilità di materiali originari perché le estrazioni delle lave nell'area vesuviana non sono più consentite per tutelare le istanze paesaggistiche; altre posizioni culturali sono invece propense ad un vincolismo più moderato che, attraverso la normazione del processo estrattivo, consenta il

prelievo del materiale lapideo pur nella tutela del paesaggio, dei siti di cava e dell'economia locale. Per far fronte a questa oggettiva difficoltà, che potrebbe favorire scelte materiche casuali, il gruppo di lavoro, costituito per il "*Laboratorio Città Metropolitana*", ha strutturato un modello di catalogazione ed archiviazione delle informazioni sui materiali di recupero disponibili o in dismissione, secondo gli interventi in atto o in programmazione sul tessuto metropolitano. Pertanto, nell'impossibilità di prelevare nuovo materiale lavico, è previsto che la banca dati diventi il riferimento per catalogare e organizzare i materiali di recupero da demolizioni e rimozioni in siti autorizzati a cui poter inoltrare eventuali richieste di fornitura. In ultima alternativa sono definiti i requisiti di compatibilità di nuovi materiali in rapporto alle caratteristiche materiche ed alle esigenze di progetto; la scelta di materiali innovativi nelle opere di rigenerazione è legittima, ma deve essere ponderata affinché l'integrazione con il sistema preesistente non alteri l'equilibrio delle identità materiche.

Nei numerosi centri della città metropolitana di Napoli, spesso per fronteggiare il sopraggiungere di nuove esigenze funzionali, le pavimentazioni lapidee sono state sostituite con materiali che cercano di surrogare le qualità della pietra naturale; bisogna tuttavia riconoscere che negli interventi per le opere pubbliche la normativa tecnica è sempre più vincolante e impone la selezione di prodotti certificati e invece, a differenza della vasta gamma dei prodotti industriali (conglomerati cementizi, laterizio, bituminosi, acciaio, legno, ricomposti), il mercato del lapideo non fornisce pressoché alcuna risposta ai requisiti normativi. Analogamente, il vuoto normativo nel settore estrattivo ha danneggiato la filiera del lapideo e indotto gli operatori del settore a fare alcune considerazioni sulle potenzialità del prodotto lapideo in rapporto alle esigenze contemporanee sulla sostenibilità nell'uso e sfruttamento delle risorse non rinnovabili.

Come già accennato nel Capitolo 2, rivalutare l'uso della pietra naturale nella riqualificazione degli spazi pubblici dei centri storici risponde alle recenti evoluzioni del concetto di rinnovabilità e di riduzione degli impatti ambientali riferiti all'intero ciclo di vita utile del materiale che, nel caso della pietra, può andare ben oltre i cento anni determinando quindi un valore molto basso dell'impatto ambientale, ancora più basso se si considera che la pietra si presta al riciclaggio senza particolari trattamenti e fino all'esaurimento della materia stessa. Infatti, il concetto di sostenibilità dello sfruttamento di una risorsa è legato al rapporto tra l'entità della risorsa e l'entità dei prelievi: essendo le rocce minerali circa il 90% della crosta terrestre, il consumo mondiale di materiale lapideo risulta infinitesimo, pertanto non può verosimilmente prospettarsi l'esaurimento della risorsa né una sua sensibile riduzione.

Nonostante queste semplici considerazioni si è portati a preferire prodotti ingegnerizzati, spesso anche definiti ecologici, che comportano un elevato costo ambientale dovuto ai processi di trasformazione, messa in opera e riciclaggio. Inoltre, per nessun prodotto è stata testata la permanenza nell'ambiente per tempi lunghissimi come per la pietra. La ricerca prefigura ulteriori sviluppi in considerazione delle nuove crescenti richieste nell'uso della pietra come materiale da costruzione a basso impatto ambientale. Basandosi sulle ricerche degli organi di normazione di settore, in riferimento alle caratteristiche ecologiche dei

materiali per l'edilizia, dovranno definirsi strumenti di certificazione idonei ad allineare la pietra ai requisiti LEED.

Emergono infine alcuni interessanti spunti rispetto alle possibilità di riciclo della pietra derivante da demolizioni attraverso procedure di vaglio e classificazione, che dovrebbero affiancare tutti gli interventi di riqualificazione nei centri urbani al fine di valorizzare le risorse materiche rinvenibili e recuperabili.

4.2 Puglia

La Puglia è la regione più orientale d'Italia con superficie di 19540,9 km², ed è una di quelle con il maggiore sviluppo costiero con un'estensione delle coste di circa 865 km. L'interno della regione è prevalentemente pianeggiante e collinare, senza evidenti contrasti tra un territorio e l'altro. Tuttavia, vi sono otto subregioni differenti: il Gargano e il Subappennino Dauno che sono le uniche zone montuose della Puglia; il Tavoliere delle Puglie, esteso per 4810 km², rappresenta la più estesa pianura d'Italia dopo la Pianura Padana; le Murge, un altopiano di natura calcarea posto a sud del Tavoliere che si estende fino alle serre salentine; la Terra di Bari, tra le Murge e il mare Adriatico, è un'area pianeggiante leggermente ondulata; la Valle d'Itria, situata a cavallo tra le province di Bari, Brindisi e Taranto, si caratterizza da un'alternanza di vallate e ondolazioni, e soprattutto da un'elevatissima popolazione sparsa (questa è la zona con la maggiore concentrazione di trulli); l'Arco Ionico Tarantino o "banco delle gravine", che segue la costa dell'intera provincia, estendendosi dal sistema murgiano, a nord, fino alla Penisola Salentina, a sud, abbracciando una zona collinare ed una vasta zona costiera pianeggiante intervallata da "gravine"¹⁰.

Dal punto di vista geologico la Puglia è costituita per quasi l'80% da rocce calcaree e dolomitiche nella considerevole varietà di litotipi che la compongono. Nel Giurassico medio e inferiore, con il progressivo deposito sui fondali dei gusci di microrganismi marini si formò, in seguito alla precipitazione del carbonato di calcio (CaCO₃) presente in acqua, uno strato di rocce sedimentarie calcaree e dolomitiche. Nel Cretacico buona parte della Puglia era al di sopra del livello del mare; in questo periodo iniziarono i primi fenomeni carsici, ovvero l'attività chimica esercitata dall'acqua, soprattutto su rocce calcaree, sia di dissoluzione sia di precipitazione. La più antica delle formazioni cretacee è il Calcarea di Bari. Tra i 12 e i 2 milioni di anni fa l'Appennino prese la sua forma definitiva: nel processo di creazione di questa catena montuosa la Puglia non era direttamente coinvolta, ma ne subisce soltanto gli effetti secondari. Nel processo di orogenesi degli appennini, infatti, la Puglia rappresentava una massa continentale che si sviluppava adiacente e parallela alla catena montuosa, ostacolandone la spinta orogenetica. In questo periodo il processo di sedimentazione portò alla formazione dei calcari teneri, come la Pietra Leccese ed il Tufo Calcareao.

Da un punto di vista urbanistico, i comuni pugliesi hanno mantenuto inalterata la loro struttura medievale fino al XIX secolo quando i borghi, ancora chiusi nelle loro mura e torri, cominciarono a espandersi. Questa situazione si verificò per due ordini di ragioni: le necessità di difesa delle città vennero meno e nello stesso tempo si registrò un aumento di popolazione che non poteva essere contenuta negli antichi borghi. In epoca moderna, la regione ha visto trasformare le sue città con alcuni esempi del periodo Liberty (Art Nouveau) e con la costruzione di numerose strutture pubbliche nel periodo fascista.

¹⁰ Le gravine sono incisioni erosive profonde anche più di 100 metri, molto simili ai Canyon, scavate dalle acque meteoriche nella roccia calcarea. Le loro pareti, molto inclinate ed in alcuni casi verticali, possono distare tra loro da poche decine a più di 200 metri.

Architetture civili simbolo della Puglia sono i trulli, costruzioni coniche in pietra "a secco" con il tetto ricoperto di "chiancarelle" (Calcere di Altamura) dichiarati patrimonio dell'UNESCO nel 1996 per la loro primitiva tecnica costruttiva rimasta intatta e perfettamente funzionale.

4.2.1 Le rocce tenere pugliesi: materiali da costruzione ed ornamentali¹¹

L'attività estrattiva riveste un ruolo di rilevante importanza all'interno del panorama economico regionale. La Puglia si posiziona tra le prime regioni, per quantità e qualità, nell'ambito della produzione di materiali litici: la Pietra di Apricena, la Pietra di Trani e la Pietra Leccese sono solo alcuni esempi di materiale da costruzione ed ornamentale coltivati nella regione ed "esportati" su tutto il territorio nazionale e non solo. L'esteso affioramento di questi materiali, su quasi tutto il territorio regionale, ha costituito da sempre un'importante risorsa, immediatamente disponibile come pietra da costruzione.

Considerando il quadro geolitologico, la Puglia è costituita da uno spessore di oltre 3000 metri di rocce sedimentarie, stratificate a seconda delle ere geologiche. Il promontorio del Gargano, la dorsale murgiana e la penisola salentina sono la parte affiorante della Placca Apula nel territorio pugliese. Le cave sono maggiormente concentrate nelle aree garganiche e murgiane per le favorevoli condizioni di giacitura e spessore degli orizzonti coltivati e nella ricca gamma delle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche che caratterizzano le formazioni stratificate affioranti. Si possono individuare tre principali bacini estrattivi: il bacino di Apricena-Poggio Imperiale nel Gargano dal quale si estrae la Pietra di Apricena; il bacino di Trani-Bisceglie-Ruvo-Fasano dal quale si estraggono i Calcari e le Calcareniti delle Murge, quali la Pietra di Trani, la Calcarenite di Gravina, il Tufo Calcareao, il Calcarea di Altamura e il Calcarea di Bari; ed infine il bacino estrattivo della Pietra Leccese in Penisola Salentina.

I materiali pugliesi sono identificati con una nomenclatura diversificata e soprattutto legata al territorio e alla tradizione dei luoghi. Infatti, all'interno dei differenti distretti estrattivi che caratterizzano la regione esiste una proliferazione di nomi che contraddistinguono spesso lo stesso tipo litologico o merceologico. Per esempio, all'interno delle formazioni della Pietra Leccese e della Calcarenite di Gravina (dalla quale si estrae il cosiddetto "Tufo Calcareao"), si distinguono una serie di varietà con caratteristiche tessiturali, cromatiche e di resistenza meccanica sensibilmente diverse, indicate anche con nomi dialettali o impropri. In altri casi, come per la Pietra di Apricena e la Pietra di Trani, le varietà merceologiche coltivate vengono indicate con la stessa denominazione, distinte a seconda del colore, del contenuto in fossili, degli ossidi di ferro presenti e della diversa laminazione.

Le prime coltivazioni di cave di calcarenite risalgono al IV-V secolo a.C., come testimoniano le mura di cinta di Monte Sannace (Gioia del Colle in provincia di Bari). Le mura megalitiche indicano chiaramente una produzione organizzata di dimensioni importanti, soprattutto per quanto riguarda le calcareniti. L'agevole coltivazione di questo litotipo è la ragione della maggiore frequenza di ritrovamenti di elementi architettonici nelle strutture archeologiche.

¹¹ Cherubini C., Reina A., e Bruno D. (2007), op. cit.
CITTAM, Calvanese V. (a cura di) (2007), op. cit.

La cavatura di calcareniti e calcari pugliesi si riferiva sostanzialmente ad un uso locale anche dopo la romanizzazione della Puglia e assumeva col tempo sempre più la connotazione di produzione "industriale", soprattutto a partire dal Medioevo quando l'edilizia civile, militare e religiosa riceveva un grande impulso ad opera di Normanni, Svevi e Angioini. Invece, il Barocco Leccese ebbe la sua massima diffusione nel Salento, grazie all'impiego della tenera "Pietra Leccese", che è divenuta un elemento distintivo di questo stile. Sebbene vi siano degli esempi storici di utilizzo dei materiali lapidei pugliesi, il loro riconoscimento e commercializzazione nazionale e internazionale si può far risalire solo al Novecento, raggiungendo dei livelli di produzione tali da poter essere collocati fra i primi posti in Italia. Relativamente al 2002, l'Ufficio Minerario Regionale riporta una produzione annua di 1.500.000 tonnellate, che costituisce circa il 10-15% della produzione nazionale.

L'interesse verso questi materiali è direttamente connesso con la ricchezza, nel territorio pugliese, di testimonianze di architetture monumentali, sacre e militari di centri storici e rurali, nonché dell'edilizia Ottocentesca dei borghi della città, realizzati in parte o completamente con questi litotipi (Tufo Calcareao e Pietra Leccese). Le varietà commercialmente note possono essere dunque ammirate nell'architettura storica pugliese, alla quale conferiscono suggestivi effetti cromatici e ottime prestazioni tecnologiche, che hanno superato la prova del tempo. In tal senso, basti pensare all'uso architettonico e decorativo dei marmi nelle cattedrali romaniche, dove si può apprezzarne la lavorabilità e la scolpibilità, o nei castelli federiciani di Castel del Monte e Gioia del Colle, dove spicca l'armonia dei vari litotipi, nonostante il peso dei secoli. Ne sono un tipico esempio la Basilica di Santa Croce a Lecce realizzata in Pietra Leccese, il Castello di Palagianò (Taranto) in Tufo "Mazzaro" (una varietà di tufo calcareao), la Cattedrale di Oria (Brindisi) in Calcarenite di Gravina, e la Cattedrale di Ruvo (Bari) realizzata con la Pietra di Trani. Anche in Salento, l'uso della Pietra Leccese, necessario per il raffinemento decorativo barocco, ha mostrato di resistere, seppure in maniera minore rispetto ai calcari, alle alterazioni provocate dagli agenti atmosferici.

Una tipica forma di degrado è quella della "alveolizzazione", causata dall'azione disgregatrice esercitata dalla pressione di cristallizzazione dei sali all'interno dei pori del materiale lapideo. Un altro punto debole di questi lapidei è la formazione di "croste nere" causate dal maggiore inquinamento atmosferico in ambiente urbano, con effetti negativi sia estetici che fisici. Tra i motivi che hanno storicamente ritardato la diffusione dei marmi al di fuori del territorio regionale, deve considerarsi la carente documentazione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, che rispondesse alle esigenze dei tecnici e dei costruttori.

La caratterizzazione tecnologica delle pietre di Puglia ha messo in evidenza come tali marmi abbiano, in media, una resistenza a compressione superiore a quella di altri marmi italiani e che in alcuni casi la resistenza a flessione mostra valori maggiori rispetto a quello del granito (ad esempio il "Bronzetto", varietà delle pietre di Trani e di Apricena). Non è da meno la buona resistenza alle escursioni termiche, che rendono possibile l'uso dei marmi pugliesi in varie condizioni climatiche, grazie anche al basso coefficiente di imbibizione che caratterizza la maggior parte di esse. Le principali applicazioni delle pietre ornamentali riguardano il

rivestimento di pareti, pavimenti, piani di appoggio e l'uso come elementi architettonici o ornamentali. A tal proposito, si può citare l'uso del "Bronzetto" opportunamente tagliato in conci per la costruzione dei 17 archi portanti dell'Aula Liturgica della nuova chiesa di San Pio realizzata a Giovanni Rotondo in provincia di Foggia, su progetto di Renzo Piano.

Le varietà meno pregiate sono utilizzate nell'edilizia civile e industriale come pietra da costruzione o nell'arredo urbano come pietra ornamentale. Il Calcarea di Bari e il Calcarea di Altamura vengono invece frantumati ed impiegati come pietrisco.

Un recente studio condotto dall'Ordine Regionale dei Geologi (Puglia), ha elaborato una proposta di classificazione delle rocce tenere basate sulle caratteristiche tecniche e meccaniche, rendendo più concreta e funzionale la classificazione dei materiali estratti rispetto alle caratteristiche fisiche, assumendo una forte rilevanza come supporto alla classificazione. La proposta di classificazione comprende le seguenti tipologie:

- Pietra Leccese: comprende tutte le varietà che presentano una resistenza a compressione monoassiale compresa tra 10 e 24 MPa, resistenza a trazione compresa tra 0,8 e 7 MPa, valori del peso dell'unità di volume dei costituenti solidi e del peso dell'unità di volume del secco che si aggirano attorno ad un valore medio rispettivamente pari a 27,5 kN/m³ e 17,0 kN/m³, porosità compresa tra il 31% e il 45% e coefficiente di imbibizione tra il 12% e il 21%;
- Calcarenite di Gravina: comprende tutte le varietà che presentano una resistenza a compressione monoassiale compresa tra 2 e 9 MPa e una resistenza a trazione compresa tra 0,17 e 0,76 MPa, peso medio dell'unità di volume del solido e del secco rispettivamente pari a 27,0 kN/m³ e 16,0 kN/m³, porosità compresa tra l'11% e il 49% e coefficiente di imbibizione tra il 15% e il 37%;
- Tufo Calcareao "Mazzaro": comprende tutte le varietà di calcarenite ben cementate che presentano una resistenza a compressione monoassiale compresa tra 22 e 33 MPa, valori del peso dell'unità di volume del solido e del peso dell'unità di volume del secco che si aggirano attorno ad un valore medio rispettivamente pari a 29,0 kN/m³ e 23,5 kN/m³, porosità compresa tra il 17% e il 22% e coefficiente di imbibizione tra il 20% e il 51%.

Inoltre, è necessario tener conto anche degli interventi di recupero e restauro a cui sono sottoposte continuamente queste vere e proprie opere d'arte. Di qui la necessità di ricorrere continuamente a tali materiali naturali per conferire ad ogni intervento il giusto risultato architettonico in modo tale che l'opera non venga contaminata da un uso improprio di materiali diversi da quelli originali.

4.2.2 La tecnica costruttiva delle “Volte a stella”¹²

Progettare e costruire oggi, case ed edifici specialistici, usando sistemi voltati in pietra è sicuramente una prassi inconsueta e fuori dalle tendenze architettoniche contemporanee. La conoscenza della specifica tecnica costruttiva, connessa alla realizzazione di volte e cupole, è oggi prerogativa di poche figure professionali operanti: lo “*scalpellino specializzato*” in restauri di edifici storici, e il “*maestro voltarolo*” che ha imparato l’arte per tradizione e direttamente sul cantiere. In questo secondo caso l’arte viene trasmessa solo ed esclusivamente attraverso la prassi e la trasmissione orale del sapere, ma se questo filo conduttore del sapere viene interrotto, inevitabilmente si viene a perdere la sapienza nel susseguirsi di generazioni.

L’origine di queste volte è riferibile al periodo barocco in terra leccese, la cui denominazione “a stella” deriva specificamente dalla conformazione stellata che le curve spaziali di intersezione, tra la calotta sferica e le porzioni di unghie e fusi cilindrici, formano nella loro congiunzione. Queste volte sono il risultato della “composizione” di tutte le volte canoniche: a botte, a vela, a crociera e a padiglione. La sua tecnica costruttiva è racchiusa nei saperi dei pochi mastri costruttori che tentano di tramandarne l’arte alle nuove generazioni sempre meno interessate ai processi lenti del costruire. La grande tradizione delle volte dette “alla leccese” o “a stella” si divide in due famiglie entro cui è possibile collocare ogni variazione sul tema: *a spigolo* e *a squadra*. Per identificarle in modo semplice è possibile, guardandole dal basso, contare le “punte della stella”: quattro per le prime, otto per le seconde. Per la specifica morfologia, le volte a squadra si prestano meglio di quelle a spigolo per coprire vani più grandi (ambiente tipo: 4,5 x 4,5 metri), sino a raggiungere dimensioni pari a 9 x 9 metri per coprire frantoi o depositi agricoli. Nella costruzione della volta salentina, il taglio dei conci viene eseguito direttamente sul cantiere senza essere preceduto da complessi tracciati geometrici, ma da semplici calcoli matematici e geometrici, che si combinano tra di loro in base al tipo di volta da realizzare (spigolo o squadra), alla dimensione della stanza da voltare (larghezza, lunghezza e altezza) e alla dimensione dei blocchi parallelepipedi squadrate (le cave possono fornire blocchi già squadrate di specifiche dimensioni o blocchi grezzi da squadrare in cantiere). Generalmente, i blocchi parallelepipedi che costituiscono gli archi non sono sagomati in modo da formare “cunei” convergenti nei relativi centri, ma restano con le facce perpendicolari tra le quali, per consentirne la curvatura, viene inserita una scaglia di pietra dura che consente il trasferimento delle pressioni tra i giunti dei conci. In questo modo avviene la messa in compressione degli archi, con le scaglie di pietra che vengono sapientemente conficcate dal mastro voltarolo nella parte estradossale dei giunti, garantendo così la resistenza dell’intero sistema voltato. In sintesi, se la grande difficoltà di calcolo geometrico della volta stellata teorica è rappresentata dalla risoluzione delle intersezioni spaziali tra i volumi sferici e cilindrici da riportare ai singoli conci, nella variante salentina queste curve sono imposte dal mastro voltarolo che procede per raccordi successivi di superfici rigate tra queste. Eliminando

¹² Fallacara G. (s.d.), op. cit.

Fallacara G. (2010). *Domus Benedictae. Villa unifamiliare a Corato*, in *Archinauti - monografie*. Collana della Facoltà di Architettura del Politecnico di Bari diretta da D’Amato C., n. 27

il problema del calcolo dell'intersezione reale, nella volta leccese si stabilisce il disegno della stella e lo si enfatizza staccandolo dalla continuità intradosale della volta attraverso una risega di pochi centimetri. Questa "piega", che rimuove il problema geometrico risolvendo quello costruttivo eliminando la concentrazione degli sforzi in punti fragili, rappresenta la grande qualità estetica della volta "stellata" leccese.

In Puglia, specificamente nell'area salentina, nonostante il diffusissimo impiego della tecnica costruttiva a telaio in calcestruzzo armato, esiste ancora una comunità di mastri voltaroli che custodiscono l'antico sapere tecnico delle volte a stella o volte leccesi. Al fine di preservare questa "piccola comunità del sapere", la Regione Puglia ha emanato, nel 2009, una legge regionale a difesa di questa specificità costruttiva e culturale così come espresso in precedenza. La legge della Regione Puglia n. 26 del 27 ottobre 2009, "*Tutela e valorizzazione del sistema costruttivo con copertura a volta*", pone l'accento sulla necessità di preservare la conoscenza delle maestranze regionali sul tema della costruzione dei tipici sistemi voltati in tufo calcareo. Le finalità della legge (Art. 1) sono quelle di conservare le costruzioni tipiche e a volta del territorio pugliese e di tutelare le tecniche costruttive tradizionali, riconoscendole come elementi caratterizzanti della cultura della popolazione pugliese. A tale scopo (Art. 2) al fine di tale incentivo, la Regione Puglia promuove progetti formativi per la trasmissione e conservazione delle conoscenze tecniche e applicative necessarie alla realizzazione di tali strutture. All'interno di questo quadro normativo nascono una serie di progetti di edifici, i quali sono concepiti e realizzati secondo l'idea di fondere la tradizione costruttiva della volta a stella leccese all'interno di progetti innovativi di architettura contemporanea.

Ad oggi non esiste una statistica sull'applicazione della legge, quindi non è possibile fare un bilancio oggettivo ma sicuramente è possibile assistere ad una proliferazione sul web di imprese edili che dichiarano la loro conoscenza specialistica in merito alla costruzione di volte stellate.

L'applicazione di questa specifica tecnica costruttiva è rinvenibile in almeno tre casi: restauro e ricostruzioni di volte crollate o degradate; costruzioni ex-novo "in stile" come ampliamento o estensione di antiche masserie o casali; costruzioni ex-novo che intendono "rileggere" la tradizione morfologica del sistema voltato in chiave contemporanea e innovativa. In quest'ultima ottica viene inquadrato il progetto di una villa unifamiliare a Corato in provincia di Bari, la *Domus Benedictae*, un esempio di architettura moderna che si pone come manifesto di una nuova ricerca architettonica che afferma la propria modernità pur nascendo dalla tradizione. Uno degli aspetti più importanti della casa riguarda la sua tecnica costruttiva, volutamente ibrida: una intelaiatura in calcestruzzo armato che consente di sostenere in alto e riprendere le spinte di una grande volta portante in tufo funzionante come sistema spingente, mentre la chiusura dei muri perimetrali è costituita da una muratura continua portante che collabora con l'intelaiatura puntuale. È dunque un sistema misto che tende ad esaltare i punti di forza del sistema elastico-intelaiato e della muratura portante e spingente. La volta si identifica con il nome di "volta a squadra" (con lucernario centrale), e rientra nella più ampia classificazione delle "volte a stella" caratterizzato da un numero maggiore dei vertici

rispetto alla volta a stella comune. *“Questo progetto vuole essere una prova della possibilità di poter armoniosamente “comporre” le logiche antiche del costruire con il linguaggio contemporaneo dell’architettura, dimostrando l’assoluta lezione della tradizione, sempre feconda e moderna, perché senza tempo”* (Fallacara, Domus Benedictae. Villa unifamiliare a Corato, 2010).

4.2.3 Architettura popolare pugliese: i “Trulli” delle Murge e di Valle d’Itria¹³

Il trullo è una costruzione rustica tipica delle campagne pugliesi, interamente in pietra locale, dalla caratteristica copertura conica. Non è semplicemente un edificio in pietra, ma anche una tecnica costruttiva unica e quasi totalmente dimenticata. Propriamente, la parola trullo si riferisce alla copertura di questi manufatti, ma poi ha finito per indicare tutta la costruzione. I trulli sono la testimonianza di secoli di agricoltura pugliese, sono i resti delle infrastrutture che per tanto tempo hanno sorretto e sospinto l’economia locale. La loro funzione era, dunque, eminentemente agricola e servivano sia per abitazioni stabili o stagionali, sia per ricoveri temporanei o depositi di attrezzi e raccolto. Anche se costruito per le medesime funzioni, il trullo può presentare delle varianti formali importanti, diverse da luogo a luogo, giustificabili con la presenza di materiali lapidei dalle caratteristiche diverse. La zona delle Murge, soprattutto nei dintorni della Valle d’Itria, è caratterizzata dalla presenza di una pietra calcarea dalle ottime caratteristiche meccaniche (tufo calcareo), che si dispone in stratificazioni superficiali di 4-7 cm e in stratificazioni più profonde di 40-100 cm. Le strutture sono snelle, i conci ben lavorati, la compattezza delle pietre rende superflua qualsiasi impermeabilizzazione. È questo il regno dei trulli tipo di Alberobello: copertura conica poggiata su basamento cilindrico.

A costruire tali manufatti erano gli stessi contadini e, solo nelle zone economicamente più evolute (Valle d’Itria), si creò una sorta di artigianato professionale, *“i maestri murari”* o *“trullari”*, impiegati esclusivamente nel settore dell’edificazione dei trulli e di tutte le altre opere a secco. Per l’architettura del trullo, il momento progettuale coincide con quello della posa in opera, e chi costruisce contemporaneamente compone e connette. Costruzione e progetto si fondono dunque in un’unica fase, ma non può definirsi tale esperienza unitaria come un’improvvisazione. L’uomo costruttore, inoltre, si differenzia anche dal muratore perché non utilizza malta. Il trullo, infatti, è costruito completamente a secco. La materia prima veniva reperita direttamente nel campo o da cave vicine, e la raccolta delle pietre, oltre alla costruzione del trullo stesso, serviva a rendere più facile la coltivazione del campo, che sarebbe risultata difficoltosa a causa della presenza di tanti sassi. La planimetria si tracciava direttamente sul terreno e si cominciava subito con lo scavo, che si arrestava solo quando ci si trovava dinanzi al banco roccioso che faceva da fondazione.

Il trullo non ha una vera e propria fondazione, ma è costituita dal banco di roccia affiorante, ad un metro di profondità, spianato con pietre grossolane, impastate ad una malta magra a

¹³ D’Aurea V. (2008). *I “trulli” di Polignano a Mare (Ba). Costruzioni a secco e società moderna: la sfida della conservazione*, in *Bollettino Ingegneri*. N. 11

base di calce e terra rossa o calce e argilla. Realizzate le fondazioni ed in mancanza di un disegno progettuale, l'esperienza del costruttore diviene fondamentale. In base alla planimetria ed alla maggiore o minore ampiezza degli ambienti, egli deve dimensionare i muri, che di solito sono molto spessi (da 1 a 2,5 metri ma anche 3 metri negli esemplari più antichi) e realizzati completamente a secco. Dato il forte spessore, è possibile ricavare delle nicchie, voltate a botte o con architravi a seconda della dimensione, dove potevano essere ospitati piccoli ripostigli o letti per la notte. Il paramento esterno è inclinato verso l'interno per conferire maggiore stabilità alla struttura, dovendo la muratura sostenere il notevole peso delle coperture nonché fronteggiare le spinte tendenti a ribaltarle, anche se meno importanti rispetto alle sollecitazioni di compressione. I muri sono alti da 2 a 2,5 metri e realizzati con conci lapidei abbastanza grandi e più o meno quadrati (a seconda della pietra). La tecnica costruttiva è quella della muratura a sacco, con un doppio paramento (interno ed esterno), con al centro scarti della lavorazione e pietre più piccole. Ad intervalli più o meno regolari vengono posizionati i cosiddetti "chiattoni", grosse lastre lapidee che attraversano la muratura da una parte all'altra, con lo scopo di rendere solidali i due paramenti. Il forte spessore murario, oltre a garantire la stabilità del complesso statico, garantisce al trullo una certa costanza di temperatura negli ambienti interni, dovuta alla forte inerzia termica. Insieme alla temperatura costante, l'umidità è l'altro fattore che caratterizza gli ambienti interni. La scarsa ventilazione e le piccole aperture non consentono l'instaurarsi di condizioni termigrometriche accettabili. Raggiunta l'altezza prestabilita, il muro viene spianato, regolarizzato, cioè, per consentire la partenza della cupola, la parte più delicata della costruzione. Se la pianta del trullo è rotondeggiante, non ci sono particolari problemi e l'intradosso si manifesta unitario e senza soluzione di continuità. Se la pianta, invece, è quadrangolare, sono necessari degli accorgimenti atti ad arrotondare il quadrangolo (mensole oblique o pennacchi); in questo caso la cupola partirà con una forma approssimativamente ellittica che si trasforma, man mano che si eleva, in una circonferenza quasi perfetta.

La cupola, o "volta ad aggetto", è senza dubbio l'elemento più interessante. È caratterizzata dalla sovrapposizione di anelli di conci orizzontali leggermente aggettanti rispetto ai piani di posa (di qui la definizione di volta ad aggetto: ogni concio si comporta come una mensola). Questo diverso modo di realizzare la copertura presenta numerosi vantaggi: autoportanza in tutte le fasi della costruzione ed eliminazione di gran parte delle spinte che tendono a ribaltare i sostegni verso l'esterno, poiché le spinte prodotte da tale copertura sono essenzialmente di compressione per la sagoma rialzata. Ogni concio sporge rispetto a quello sottostante non più di 10 cm (a seconda delle caratteristiche meccaniche della pietra) ed è realizzato con le cosiddette "chiancarelle", lastre lapidee spesse dai 4 ai 10 cm, in genere Calcare di Altamura. Questi conci hanno una forma trapezoidale e la parte terminale, cioè la base maggiore del trapezio incastrata nella muratura, prende il nome di coda. Ogni anello, dopo essere stato costruito, viene serrato con l'apposizione di cunei lapidei negli interstizi delle lastre, atti a mettere in tensione l'anello per non farlo aprire. Sulle code, a costruzione ultimata o dopo la realizzazione di ciascun anello, viene posizionato il rinfianco, composto da pietrame di piccolo taglio e materiale di scarto, che conferisce stabilità alla costruzione impedendo alle mensole

di crollare perché sostenute da un peso maggiore rispetto a quello che esse stesse sostengono. I giunti dei conci sono inoltre sfalsati, per garantire una migliore stabilità. Le chiancarelle degli anelli più bassi sono lunghe circa un metro, mentre quelle degli anelli superiori hanno una lunghezza di qualche decina di centimetri. L'altezza della cupola, nel caso di trulli quadrangolari, è pari al lato del trullo. Arrivati all'ultimo anello della volta, ci si trova davanti ad un occhio di circa 50-100 cm di diametro, da coprire con una grossa lastra lapidea. Naturalmente, l'altezza della cupola dipende dalle caratteristiche meccaniche della pietra utilizzata. L'uso di un buon materiale, infatti, permette aggetti maggiori tra i singoli anelli, con il risultato di una struttura più bassa e snella.

Realizzato il paramento interno della volta ad aggetto, è necessario impermeabilizzarlo. Questa operazione può avvenire in diversi modi. Laddove sono presenti le chiancarelle, esse vengono disposte sul rinfiango a giunti sfalsati ed inclinate verso il basso, per garantire il corretto deflusso delle acque piovane. Dove, invece, esse non sono presenti, il rivestimento si costruisce con gli stessi conci utilizzati per la muratura e l'impermeabilizzazione è realizzata mediante intonaco povero a base di calce, argilla e poca sabbia. Non è raro il caso in cui l'intonaco è esteso anche alle murature, per proteggerle dall'umidità. L'interno, invece, in tutti i casi, è imbiancato con la calce, sia per conferire maggiore igienicità agli ambienti, sia per rifrangere la poca luce proveniente dalle piccole aperture praticate nella muratura.

Studiare i trulli significa studiarne la storia, la struttura ed i segni che il tempo e l'uomo hanno lasciato. Tutto ciò allo scopo di elaborare una strategia per la conservazione, che sia attenta alla natura e alla realtà dell'edificio. *“Il dibattito sull'architettura a secco garantirebbe la sopravvivenza del nostro passato, che abbiamo il dovere di trasmettere al futuro in maniera integrale, perché è parte della nostra identità”* (D'Aurea, 2008).

4.2.4 Impiego del laterizio nell'edilizia pugliese del centro di Lucera¹⁴

Come si è visto nel Capitolo 4.1.4, la produzione laterizia nell'Italia meridionale sembra abbandonare dal VI secolo d.C. la produzione industriale per riservarla a specifiche committenze spesso di prerogativa ecclesiastica, con il diffondersi della pratica del reimpiego di laterizi. Dal VII secolo d.C. gli impianti sembrano servire solo esigenze di autoconsumo, fino a registrare un arresto nel X-XI secolo d.C.

Studi sull'edilizia civile medievale di numerose città italiane ed europee hanno rivelato come, a partire dalla prima metà del XII secolo d.C., si sia registrata la ripresa di una produzione sistematica di laterizi. Nella Puglia settentrionale, nello specifico a Lucera in provincia di Foggia, si assiste all'introduzione di un nuovo tipo di mattone, dalla forma rettangolare con dimensioni medie di 30x15x5 cm, con una tendenza decrescente delle dimensioni nei secoli successivi ad indicare un progressivo miglioramento tecnologico degli impianti ed un maggiore controllo delle cotture. Dal XIII secolo d.C. l'edilizia lucerina realizzò appositi impianti per

¹⁴ Mangialardi N. (2017), op. cit.
Baldassarre G. (2007), op. cit.

sostenere ordini di grande portata, grazie anche alla particolare predisposizione di quest'area subappenninica allo sfruttamento dell'argilla, presente in abbondanza. Nello specifico furono impiantati 9 nuove fornaci. Alcune fonti, in particolare il "Codice Diplomatico dei Saraceni di Lucera", citano la presenza di fornaci afferenti al centro urbano o l'esistenza dello *ius quartariorum*, ovvero il diritto a produrre ceramica. Questa ripresa ebbe una forte incidenza sulle scelte costruttive, con il laterizio che viene scelto come materiale prevalente per la realizzazione di edifici religiosi e civili. L'utilizzo del mattone cotto come materiale costruttivo puntava a soluzioni capaci di maggiore efficienza tra tempi di produzione e di esecuzione: l'impiego su larga scala di un mattone standardizzato doveva essere previsto già in fase progettuale, presupponendo la consapevolezza dell'accelerazione che la prefabbricazione determina, una buona conoscenza tecnica delle qualità costruttive e di resistenza del mattone cotto, ed un ampio bacino di manodopera da impiegare come forza lavoro.

Nel borgo medievale di Fiorentino, a nord di Lucera, venivano utilizzati coppi per la copertura della cattedrale e delle abitazioni, mattoni nei pavimenti della cattedrale e della *domus* federiciana, laterizi per i rivestimenti di porzioni di muratura e di elementi architettonici come il camino della *domus*. Si producevano così tegole, mattoni pavimentali e laterizi da muratura, produzione confermata dal *Palatium* di Lucera, dove il cortile interno è rivestito in mattoncini disposti a "*Opus Spicatum*"¹⁵ e una serie di archi di sostegno è definita da ghiera in mattoni interi.

¹⁵ L'opera spicata (*Opus Spicatum*) è un tipo di paramento costituito da laterizi collocati di taglio secondo la disposizione di una lisca di pesce o di una spiga di grano, utilizzata in epoca romana. Disporre i mattoni con un'inclinazione di 45°, cambiando la direzione dell'inclinazione ad ogni filare, era molto più agevole; inoltre era una tecnica costruttiva che dava maggiore stabilità alla struttura la quale resisteva meglio ai movimenti sismici.

4.3 Sardegna

La Sardegna è una regione autonoma a statuto speciale appartenente all'Italia insulare, con superficie complessiva di 24.100,02 km², ed è l'isola più estesa del mar Mediterraneo dopo la Sicilia. Il territorio è per il 68% collinare, per il 18% pianeggiante, per il 14% montuoso. I monti culminano nella parte centrale dell'isola con Punta La Marmora, la vetta più alta della Sardegna, nel massiccio del Gennargentu. Ricca di montagne, boschi, pianure, territori in gran parte disabitati, corsi d'acqua, coste rocciose e lunghe spiagge sabbiose, l'isola è stata definita metaforicamente, per la varietà dei suoi ecosistemi, come un micro-continente.

I Romani diedero un nuovo assetto amministrativo all'intera isola attraverso la ristrutturazione di diverse città, la creazione di nuovi centri e la realizzazione di molteplici infrastrutture di cui rimangono le rovine, come il palazzo di Re Barbaro a Porto Torres o l'anfiteatro romano di Cagliari. Il caposaldo nell'evoluzione delle forme architettoniche romaniche è stata la basilica di San Gavino a Porto Torres (Sassari).

L'architettura rinascimentale è stata scarsamente rappresentata, mentre quella barocca, al contrario, trovò ampio risalto. A partire dal XIX secolo, poi, grazie alle nuove idee ed esperienze importate da alcuni architetti sardi formatisi a Torino, si diffondono nell'isola nuove forme architettoniche di ispirazione neoclassica. Verso la fine secolo si assiste invece a realizzazioni in stile Art Nouveau, come il Palazzo Civico di Cagliari, completato nei primi anni del XX secolo. In seguito, negli anni Venti e Trenta, l'avvento del fascismo influenzò fortemente l'architettura anche in Sardegna, con l'affermazione dell'architettura razionalista.

4.3.1 Il materiale litico: notizie storiche ed attività estrattive¹⁶

La lunga e complessa storia geologica che ha interessato la Sardegna ha prodotto come risultato un'ampia varietà di rocce che, fin dai tempi più remoti, hanno costituito una componente importata per lo sviluppo e l'evoluzione delle popolazioni con tracce che possono essere ammirate anche oggi. I materiali lapidei sono stati da sempre utilizzati in campo edilizio ed architettonico. Nell'edilizia pre-moderna sono stati utilizzati soprattutto per costruire conci lavorati, come pietra ornamentale e per la formazione di leganti ed inerti. Il principale utilizzo moderno del materiale lapideo è piuttosto indirizzato al campo ornamentale per la realizzazione di rivestimenti e di pavimentazioni esterne e interne.

Dal punto di vista "materialistico", la complessa articolazione geologica dell'isola può essere ricondotta ad un numero sostanzialmente limitato di casi; si parla infatti comunemente di paesi "del granito", del "basalto" e "della trachite". I principali litotipi presenti nell'isola e più ampiamente utilizzati per la realizzazione di una grande varietà di manufatti sono rocce granitoidi, vulcaniche e carbonatiche. Per quanto riguarda l'utilizzo delle metamorfite non si ha notizia di un utilizzo, né passato né recente, economicamente importante come per i litotipi

¹⁶ Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009), op. cit.
Primavori P. (2011), op. cit.

precedenti; ma si può pensare che costituiscano piuttosto dei materiali di interesse circoscritto esclusivamente in ambito locale, solo laddove esistono gli affioramenti.

Numerosi resti di manufatti, trovati soprattutto nell'isola di Santo Stefano nella Sardegna settentrionale, dimostrano come nel Neolitico Medio, IV millennio a.C., venisse già utilizzato il granito sardo. I Romani ne fecero grande uso sostituendolo a quello egiziano, sia per motivi economici che estetici, creando una importante rete di trasporto dalle cave della Gallura verso i porti laziali. Dal Medioevo fino all'Età moderna il granito, lavorato in conci dai maestri scalpellini, fu utilizzato soprattutto nella Gallura, così come è testimoniato dai cosiddetti "paesi del granito". Numerose sono infatti le testimonianze, in questa regione, di piccoli scavi sebbene fosse consuetudine lavorare i trovanti sparsi nel territorio, come è testimoniato dalla presenza di blocchi parzialmente lavorati o squadrati.

Il commercio organizzato del granito inizia solo nella seconda metà dell'Ottocento con la "Società Esportazione Graniti Sardi" con sede a Genova, che promuoveva coltivazioni nella zona di Cala Francese (isola de La Maddalena). La società iniziò con una piccola attività di scavo e lavorazione, dapprima per uso locale, sviluppando la propria attività per circa 50 anni con cavaatori e scalpellini sardi, toscani, lombardi ed emiliani, imponendo il prodotto sul mercato nazionale ed estero. Alla fine degli anni '30 questa Società ridusse l'attività, e per molti anni la produzione fu limitata per il solo mercato locale. Solo nel 1960 l'attività estrattiva del granito viene ripresa con l'apertura di nuove cave e in pochi anni diviene una realtà economica importante per l'isola tanto che per la prima volta la Regione Sardegna elabora un regolamento per la coltivazione dei materiali lapidei.

In ambito regionale si riconoscono quattro bacini estrattivi, ovvero aree nelle quali sono presenti litotipi omogenei dal punto di vista petrografico, che si estendono nella Sardegna centro-settentrionale: il bacino di Arzachena-Luogo Santo, dal quale si estrae il Granito Rosa; il bacino di Tempio Pausania-Calangianus, dal quale si estrae il Granito Ghiandone; il Bacino Buddusò-Alà Dei Sardi, dal quale si estrae il Granito Bianco Sardo; ed il bacino di Ovodda, con l'estrazione del Granito Grigio di Ovodda. È possibile ipotizzare che su siti storici di estrazione si sia consolidata la distribuzione attuale degli impianti di sfruttamento e che questi stessi si siano gradualmente sviluppati in relazione alle crescenti richieste del mercato sia interno che estero.

Con il granito estratto dalle cave storiche venivano realizzati prevalentemente prodotti quali cantonetti, cubetti e lastre. Il "cantonetto" ha forma parallelepipedica ed è il manufatto a spacco storicamente più noto perché da sempre in Sardegna utilizzato per la costruzione di edifici, di chiese, di muri di recinzione e di contenimento. Vengono ancora oggi realizzati, per ricordare l'antica lavorazione, prodotti a spacco da impiegare nella costruzione di pavimenti stradali e di lastre regolari di varia pezzatura per la realizzazione di pavimentazioni e rivestimenti in lavorazioni lisce, bocciardate, fiammate e sabbiate.

In Sardegna, le vulcaniti sono state, e sono ancora, diffusamente coltivate in tutte le tre province storiche (Cagliari, Nuoro, Sassari) principalmente nelle località di Fordongianus-Allai, Ottana, Sedilo, Ozieri, Serrenti. I litotipi più comuni sono rappresentati da rocce basaltiche e

da rocce più acide, queste ultime note commercialmente come Trachite di Sardegna, sia laviche che piroclastiche. Questi lapidei sono stati utilizzati, e lo sono tutt'ora, come pietra ornamentale e da costruzione sia sotto forma di granulati sia di conci. Al contrario di quanto accade per le rocce granitoidi il cui aspetto estetico è largamente condizionato dalla composizione mineralogica, nelle vulcaniti la caratteristica estetica è da mettere piuttosto in relazione all'ampia gamma del loro cromatismo e all'aspetto strutturale e tessiturale, cioè forma, dimensione e distribuzione dei minerali componenti, ed indice di porfiricità.

Il basalto, largamente impiegato in Sardegna fino agli anni '50 in ambito edile ed architettonico, è localizzato nell'Oristanese, nei cosiddetti "paesi del basalto" che sono i centri di Norbello, Ghilarza, Sedilo, Abbasanta, Santu Lussurgiu, Cuglieri, Seneghe, Bonacardo, Scano di Montiferro. Questo litotipo ha costituito il materiale d'eccellenza per la realizzazione di pavimentazioni e per l'edilizia abitativa. In seguito alla diffusione sul mercato di nuovi materiali il suo utilizzo si ridusse notevolmente, ma oggi il basalto vive una fase nuova e riscuote un rinnovato interesse per la produzione di elementi di arredo urbano e la realizzazione di ornamenti per costruzioni pubbliche e private, specialmente per le operazioni di recupero dei centri storici. Inoltre, tutte le rocce di tipo basaltico sono sempre state diffusamente impiegate, e lo sono anche oggi, per la produzione di granulati destinati al confezionamento di conglomerati cementizi e bituminosi. Esistono poche cave in grado di fornire un materiale idoneo alla produzione industriale in lastre; la maggior parte del materiale è ottenuto dal reperimento e dalla successiva lavorazione dei cosiddetti "trovanti", ovvero massi di una certa dimensione già naturalmente isolati dalle bancate di affioramento.

Altra tipologia di vulcanite è la trachite. "Trachite" è il termine che anticamente veniva usato per indicare delle rocce chiare e ruvide, affioranti in Grecia nell'antica Tracia. "Trachite auctorum" è invece il termine che in passato accomunava un'ampia varietà di vulcaniti, da acide a neutre, presenti nella Sardegna centrale e centro-settentrionale, meridionale (Serrenti) e sud-occidentale. Questo termine è oggi ancora in uso in campo commerciale per identificare questa ampia varietà di prodotti di natura vulcanica, di consistenza molto diversa (lave, ignimbriti, piroclastiti), facilmente lavorabili, con porosità variabile e caratteristiche cromatiche molto diverse e di intensità variabile: rosa, rosso, giallo, grigio, grigio scuro, verde, verde-azzurro. Grande impiego ne è stato fatto in periodo Romano come confermano per esempio i resti delle antiche Terme di Fordongianus realizzate con grossi massi squadrati di trachite grigia e il ponte a sette arcate sul fiume Tirso realizzato in blocchi di trachite sulle basi di un antico ponte. Importanti testimonianze dell'utilizzo di queste vulcaniti in campo edile-architettonico si possono ancora osservare nei centri storici di molti paesi della Sardegna per la realizzazione di diverse componenti architettoniche dell'edilizia pubblica e privata quali conci, pilastri, capitelli, architravi, stipiti e statue. Il principale centro produttivo per uso ornamentale e da costruzione è a Fordongianus nell'Oristanese e solo di recente è ripresa anche a Serrenti (Sud Sardegna) l'attività estrattiva. Da quest'ultimo sito storico, attualmente rivalutato, proviene la cosiddetta Pietra di Serrenti, una trachite dal colore grigio chiaro, scolpibile e facile allo spacco; è stata coltivata e lavorata da abili scalpellini fin dal XIX secolo

nella cava di Monte Atzorcu e utilizzata per realizzare i caratteristici portali delle case di Serrenti e le case stesse, il mercato coperto di Cagliari, il Palazzo di Giustizia, parte dei portici di via Roma a Cagliari, le chiese di San Francesco e San Paolo, piazze e monumenti in tutto il Campidano nella Sardegna meridionale.

Passando ora alle rocce carbonatiche, commercialmente definite “marmi” quali calcari, calcari marnosi e dolomie, molte di queste hanno avuto da sempre largo impiego in ambito edile ed architettonico sia come elementi costruttivi e pietre ornamentali, sia come materia prima per la realizzazione di inerti e leganti. Le formazioni carbonatiche si mostrano in affioramenti frammentari nella Sardegna centro-occidentale da nord a sud (Sassari, Oristano, Cagliari, Sud Sardegna). Le città di Cagliari e Sassari hanno in passato fatto largo uso di questi lapidei noti come Pietra Forte, Pietra Cantone, Tramezzario, Pietra Columbrina, appartenenti alla stessa formazione calcarea della quale costituiscono le varie stratificazioni. A Cagliari sono numerosi gli esiti delle lavorazioni di estrazione iniziati già in epoca Romana e conclusi solo nell'immediato dopoguerra, i cui prodotti sono stati ampiamente utilizzati per costruire il centro storico della città. Si ricordano i principali siti di estrazione quali l'Anfiteatro romano, Tuvixeddu e Tuvumannu, la fossa di San Guglielmo (cava medievale da dove furono estratti gran parte dei materiali usati per la costruzione della cinta muraria della città di Cagliari), e i numerosi piccoli scavi presenti in diverse parti della città. A Cagliari la Pietra Forte, la pietra più pregiata, è stata utilizzata per le opere a “faccia vista” e per portali, mentre la Pietra Cantone è stata prevalentemente destinata all'uso edilizio. Anche l'architettura del centro storico di Sassari è stata realizzata prevalentemente con rocce carbonatiche, quali la Pietra Cantone e i calcari marnosi, utilizzati sia per la realizzazione di facciate a vista o intonacate sia per decoro. L'abbondante utilizzo della Pietra Cantone e del calcare marnoso anche nel Sassarese è dovuto alla loro grande disponibilità in tutto il territorio e alla facilità di lavorazione. In particolare, la Pietra Cantone è stata estratta ininterrottamente dal XIV secolo fino alla seconda metà del XIX secolo in numerose cave esistenti nell'area limitrofa della città di Sassari. Al contrario, gli affioramenti di Pietra Forte, utilizzata come elemento portante e decorativo, sono scarsi e limitati all'area di Sant'Anatolia. Qui esistevano siti di estrazione completamente cancellati dalla recente urbanizzazione delle zone.

Nel recente passato, a partire dagli anni Cinquanta, è cominciata nella Sardegna centro-orientale, nel Monte Tuttavista a sud del centro abitato di Orosei, un'attività estrattiva di rocce carbonatiche note col nome commerciale di Marmo Biancone Tirreno di Orosei. Commercialmente, il materiale è un marmo; il calcare di cui è composto è infatti particolarmente tenace, compatto e perfettamente lucidabile, ciò che ne consente l'inserimento a pieno titolo nella categoria commerciale dei marmi, la cui accezione, come abbiamo visto, è più ampia di quella che la nomenclatura scientifica riserva al termine marmo. Appartiene alla famiglia dei cosiddetti “non cristallini” e “colorati”, intendendo con questi termini quei marmi che non hanno una struttura geneticamente cristallina ed hanno una colorazione diversa da quella bianca, detti anche marmi “beige”. In termini volumetrici, le riserve della formazione che ospita il Marmo di Orosei, anche se non conosciute in estremo

dettaglio, sono rilevanti: le estensioni di superficie portano ad ipotizzare una cubatura minima del giacimento di oltre 60 milioni di m³; tuttavia, anche sulla base di ricostruzioni rese possibili dalle conoscenze attuali, è verosimile stimare in non meno di 300 milioni di m³ le riserve probabili. Simili ordini di grandezza, anche mantenendo gli attuali ritmi di estrazione e rese produttive, e formulando proiezioni fortemente pessimistiche, determinerebbero una vita utile minima del giacimento non inferiore ai 650 anni, un valore più che significativo per qualsiasi azione di corretta pianificazione produttiva e gestionale. Nel raggio di pochi chilometri quadrati il territorio di Orosei annovera un importante numero di insediamenti industriali: i cantieri estrattivi (le cave) dove viene escavato il grezzo, gli impianti di trasformazione (stabilimenti e laboratori) dove si ha la conversione in semilavorati, lavorati e manufatti, e le aziende di commercio, che alle predette attività affiancano il segmento commerciale. Visto l'importante sviluppo dell'attività estrattiva raggiunto, il bacino del Marmo di Orosei è da tempo classificato dalla vigente legislazione Nazionale come Distretto Industriale, e riconosciuto dalla normativa Regionale (Decreto dell'Assessore dell'Industria n. 377 del 7/8/1997) come uno dei due distretti industriali minerari della Regione Sardegna (l'altro compete al comparto del granito). Da sottolineare, infine, come il Distretto abbia legittimato la propria posizione anche attraverso azioni sicuramente distintive, ad esempio, con riferimento alla recente normativa che regola i prodotti lapidei in ambito UE, il Marmo di Orosei è stato il primo materiale italiano a dotarsi della marcatura CE per i prodotti disciplinati dalle norme UNI EN 1341, UNI EN 1342, UNI EN 1343.

Il cromatismo di questo materiale ne consente un eccellente inserimento in ogni contesto applicativo, dal più semplice al più complesso, oltre a risultare particolarmente indicato per accostamenti ad altri materiali quali legno, metallo, tessili e plastiche. I campi di applicazione riguardano i rivestimenti e le pavimentazioni, entrambi sia interni sia esterni. I formati più comuni sono la lastra e il cubetto. Nel caso di pavimentazioni esterne, il Marmo di Orosei spesso viene associato ad altri lapidei come il basalto e la trachite rossa, adottando finiture grezze o rustiche, quali sabbiatura, bocciardatura e granigliatura. Il pavimento interno, invece, offre maggiori opportunità espressive e decorative rispetto a quello esterno; grazie alla mancanza dell'aggressione atmosferica, del traffico veicolare e dei rigidi requisiti di sicurezza e antiscivolo tipici dell'esterno, è possibile adottare anche altre finiture (levigata e lucida), con aumentata libertà anche nelle geometrie di posa. Tagliato infine a spessori sottili (inferiori al centimetro) ed eventualmente associato ad altri materiali, come nei pannelli laminati, o in pannelli "sandwich" con supporti in alluminio o in fibra, il Marmo di Orosei diventa un materiale molto richiesto per tutte quelle realizzazioni verticali dove la riduzione del peso diventa elemento essenziale, come nel caso dei rivestimenti interni. Il Marmo di Orosei, inoltre, accoglie tutte le finiture e le lavorazioni accessorie che, in questo tipo di applicazioni, possono valorizzare considerevolmente il risultato finale. È il caso delle aperture (porte e finestre), dei balconi, dei davanzali e delle scale.

Quanto alle rocce metamorfiche, in provincia di Nuoro esistono siti dismessi in cui venivano coltivate metamorfiti prevalentemente per la preparazione di inerti. Nel comune di Siniscola erano presenti cave storiche dove si coltivavano materiali metamorfici destinati all'uso edilizio

e ornamentale. Ancora oggi in tale comune vengono estratti le Filladi di Siniscola, a grana fine con colorazione variabile dal rosso al grigio scuro, utilizzate e lavorate in lastre di modeste dimensioni per la realizzazione di pavimentazioni e rivestimenti murari. Questi materiali hanno diffusione commerciale non solo isolana ma anche fuori Sardegna; si citano ad esempio le pavimentazioni realizzate nella piazza di San Pietro e del Quirinale.

4.3.2 Le tecniche murarie tradizionali nella Sardegna meridionale¹⁷

La condizione di insularità ha fortemente influito sulle scelte dei materiali costruttivi orientate all'impiego di materie prime locali e pertanto facilmente riconoscibili; solo nel caso di cantieri eccezionali si fa ricorso all'importazione di materiali da Liguria, Sicilia e Campania, o dal sud della Francia e dalla Spagna. Come si è visto nel precedente paragrafo, la lunga e articolata storia geologica si rivela proprio nella varietà delle rocce affioranti: queste hanno influenzato e indirizzato lo sviluppo di specifiche attività produttive che si sono progressivamente evolute nel corso dei secoli. In Sardegna, i litotipi maggiormente impiegati in architettura sono anche quelli più disponibili, ovvero graniti, rocce vulcaniche e carbonatiche, da considerarsi, dunque, come vera e propria "impronta digitale" del territorio che si riflette nei cromatismi e nelle tessiture dei manufatti edilizi. Al tal proposito, anche l'architettura difensiva, indipendentemente da dimensioni e volumetrie, non è estranea al paesaggio naturale circostante ma, al contrario, vi si integra armoniosamente. I castelli realizzati sui rilievi rocciosi, infatti, rivelano l'impiego dei litotipi cavati direttamente in sito. Nello specifico, l'affioramento roccioso era preliminarmente spianato, con il doppio fine di creare idonei terrazzamenti atti ad accogliere e facilitare la costruzione architettonica, nonché di sfruttare il materiale di risulta che, lavorato in forme adeguate, era usato per la realizzazione degli alzati murari. La configurazione planimetrica del presidio si adattava alla morfologia del terreno, generalmente predisponendo la costruzione direttamente sull'affioramento roccioso, più raramente realizzando un basamento.

Quanto ai materiali artificiali complementari, ovvero malte di allettamento ed intonaci, è necessario precisare che sono stati diffusamente oggetto di indiscriminati interventi di demolizione, di sostituzione o di reintegrazione, talvolta non documentati. Tale atteggiamento è sintomo del fatto che gli intonaci e le malte sono ancora considerati totalmente "sacrificabili", soprattutto in funzione del consolidamento strutturale. Questo perché essi sono gli elementi maggiormente suscettibili all'azione degli agenti atmosferici, in virtù delle caratteristiche tecniche dei materiali con cui sono realizzati. Le malte, infatti, sono interessate da importanti fenomeni di disgregazione che portano alla scarnificazione totale dei giunti, oppure, nel caso degli intonaci, alla messa in vista della muratura sottostante, talvolta con l'innesco di processi di deterioramento dei lapidei stessi. Anche per i materiali artificiali, le materie prime sono quelle reperibili in prossimità del sito. Dunque, malte e intonaci, così come i lapidei naturali, rappresentano anch'essi le caratteristiche litologiche del

¹⁷ Pintus V. (2017). *Architettura fortificata nella Sardegna meridionale. Cronotipologia delle strutture murarie (XII-XV sec.)*, in *ArchHistoR*. Anno IV, n. 8

luogo dove sono state realizzate le opere architettoniche. In generale, si riscontra un'elevata eterogeneità della natura petrografica degli aggregati degli impasti, fortemente influenzata dagli affioramenti rocciosi dell'area.

Nelle tecniche costruttive murarie impiegate tra il XII e il XV secolo d.C. per l'edificazione del sistema difensivo della parte meridionale dell'isola, si possono riconoscere aspetti tecnico-costruttivi ed elementi stilistici appartenenti ad un sistema locale costituito generalmente da manufatti caratterizzati da un'estrema semplicità e linearità di forme e volumi.

Per quanto riguarda la disposizione degli elementi lapidei, si possono individuare tre differenti tipi di murature: a filari, a corsi sub-orizzontali e a "cantieri". Nello specifico, per quest'ultimo tipo sono state definite due varianti in relazione alla disposizione degli elementi: orizzontale o a spina di pesce. In generale, la sezione muraria, talvolta investigabile a seguito di crolli di ampi tratti, è prevalentemente "a sacco", con doppio paramento e nucleo interno.

Relativamente agli aspetti morfologici e dimensionali dei singoli elementi, si è riscontrata la presenza di "conci", "blocchi", "bozze" e "scaglie". Nello specifico, la sagomatura del lapideo in "concio" presenta il maggior livello di lavorazione: la forma è assimilabile con buona approssimazione a un parallelepipedo; le facce rettangolari sono ben spianate e definite da spigoli vivi, e talora il profilo interno è realizzato a trapezio. Il "blocco" è caratterizzato da un minore livello di lavorazione rispetto al precedente, e presenta la faccia principale configurata a rettangolo e gli spigoli generalmente tondeggianti; il profilo interno può essere rettangolare o rastremato. La "bozza", invece, come il nome stesso suggerisce, è lavorato sommariamente, spesso solo in corrispondenza della faccia principale, la quale risulta approssimativamente spianata; il profilo interno è rettangolare o leggermente rastremato. Non di rado si ritrovano anche "ciottoli", frammenti lapidei impiegati senza sottoporli ad alcuna lavorazione, oppure "scaglie", derivanti dagli scarti di lavorazione, o ancora "scapoli", ottenuti mediante la rottura di altri elementi.

Infine, con riferimento agli aspetti materici, fermo restando la costante correlazione tra la disponibilità in sito del materiale e il suo utilizzo, appare interessante evidenziare come in alcuni casi nello stesso manufatto sia possibile riscontrare l'impiego di un medesimo litotipo in forme e dimensioni molto diverse tra loro, con differenti livelli di accuratezza nella lavorazione, ad attestare che talvolta non sono le caratteristiche tecniche del materiale a determinare la forma, ma possono essere le scelte progettuali e le ragioni dell'economia del cantiere a dettare le regole.

Per i tre tipi murari sopra citati si può affermare quanto segue. I lapidei (calcare, basalto e trachite auct) lavorati in conci quadrati e disposti a filari sono impiegati quasi esclusivamente in corrispondenza di basamenti o per la realizzazione di architetture particolarmente rappresentative e importanti. Gli elementi lapidei sono disposti a filari orizzontali, con malta di allettamento in quantità modeste, prestando attenzione allo sfalsamento dei giunti verticali. Le altezze dei filari variano da un minimo di 14 cm a un massimo di 41 cm, mentre la media è pari a 29 cm. Più numerose sono le murature in cui i lapidei si presentano in forma di

blocchi disposti a filari orizzontali, in alcuni casi con l'inserimento di "zeppe", ovvero frammenti lapidei in forma di "scaglie" o di "scapoli", annegati in abbondante malta. Le altezze dei filari realizzati con impiego prevalente di blocchi si attestano su valori inferiori rispetto alla tipologia realizzata con conci (minimo 9 cm, massimo 22 cm e media 19 cm). La tipologia muraria in questione è presente nei castelli dislocati in posizioni strategiche per il controllo militare del territorio e delle risorse produttive locali.

I blocchi lapidei sono impiegati anche per la realizzazione di murature a corsi sub-orizzontali. Essi presentano dimensioni sensibilmente inferiori e sono disposti con un minore livello di regolarità e accuratezza, come dimostra anche la maggior quantità di malta impiegata per la loro posa in opera rispetto alla tipologia a filari. Le altezze dei corsi sub-orizzontali variano secondo i seguenti valori: minimo 10 cm, massimo 32 cm e media 19 cm. Una variante di tale tipologia è costituita dalle murature disposte a corsi sub-orizzontali con l'impiego di lapidei in forma di blocchi e con l'aggiunta di frammenti lapidei, generalmente dello stesso litotipo. Questi sono diffusamente presenti nella muratura, in forma di "zeppe" o "scaglie", e risultano inseriti tra i corsi sub-orizzontali principali. L'altezza media di questi ultimi è pari a 15 cm.

L'ultimo tipo murario, generalmente "monomaterico", è realizzato con l'impiego di bozze e frammenti litici disposti a "cantieri". La forma degli elementi lapidei è influenzata dalle caratteristiche del litotipo impiegato, in particolare dal grado di lavorabilità.

Le murature realizzate a "cantieri" orizzontali in bozze, scaglie e scapoli presentano valori dimensionali variabili in riferimento alla distanza tra i piani di allineamento, con valori compresi tra 39 e 64 cm. L'altezza del "cantiere" tende a aumentare nel corso del tempo, probabilmente anche a causa della costante e progressiva instabilità politica e della necessità di perfezionare e potenziare in breve tempo le architetture difensive.

Le murature a "cantieri" con bozze e scaglie disposte "a spina di pesce" sono impiegate generalmente per la realizzazione della parte sommitale delle murature. Questa tipologia è impiegata in corrispondenza dei paramenti murari interni, mentre risulta assente nei paramenti esterni.

4.3.3 La "Terra cruda", un materiale antico¹⁸

L'uso del "mattoncino di fango" (*Adobe*) nell'area del Campidano della Sardegna meridionale e nelle valli contigue è attestato archeologicamente fin dalla Prima Età del Ferro (IX-VIII secolo a.C.), ma probabilmente è più antico, e l'ulteriore sviluppo della ricerca archeologica potrà meglio documentarlo in un prossimo futuro. Una serie di frammenti di "Làdiri" (uno dei termini che nella lingua sarda identifica il mattone di terra) sono stati recuperati nello scavo del "santuario nuragico" a Sardara (Sud Sardegna); le dimensioni medie sono state stimate a 6,2x22x28 cm.

È quindi chiaro che quanto scritto da Vitruvio nel suo trattato "*De Architectura*" deve essere considerato solo come il riflesso di una pratica che la documentazione archeologica

¹⁸ Achenza M. e Sanna U. (a cura di) (2008), op. cit.

documenta largamente. Scrive Vitruvio: *“parlerò anzitutto dei mattoni, con quale terra convenga che essi siano formati. Poiché non debbono essere formati con argilla sabbiosa né ghiaiosa né da sabbia, poiché se sono formati da questi tipi di terra in primo luogo divengono pesanti, poi, quando i muri sono bagnati dalle piogge, si rovinano e si sciolgono e le paglie in questi non aderiscono a cagione della non purezza dell’argilla. Invece debbono essere apprestati con terra chiara cretosa ovvero con terra rossa (...). È inoltre opportuno che vengano formati durante la stagione primaverile o quella autunnale, affinché si secchino uniformemente. Poiché quelli prodotti in periodo solstiziale divengono difettosi poiché il sole essiccando rapidamente lo strato corticale, lo fa diventare arido, mentre l’interno non si è ancora seccato. E quando poi seccandosi si contrae, dà luogo a delle crepe nelle parti che erano già consolidate. Così i mattoni divenuti pieni di fessure sono privi di resistenza.”*

La relazione tra l’impiego della terra in edificazione e la geologia delle aree è molto stretta. Nelle regioni costituite massicciamente dai sedimenti di argilla, e quindi in particolare nel Campidano e nelle valli limitrofe, la terra, sotto forma di mattone crudo è il materiale predominante mentre la pietra assolve compiti specifici, ad esempio come basamento. Laddove è la pietra a prevalere, particolarmente nelle regioni granitiche, basaltiche e trachitiche, è questo il principale materiale da costruzione mentre la terra dei piccoli bacini locali è utilizzata come malta di allettamento ed eventualmente da intonaco, nelle stuccature o per battuti pavimentali. In altre zone si riscontra invece che il pianoterra è in pietra mentre il primo piano ed i vani accessori sono in mattoni di terra cruda.

4.3.4 Le argille da laterizi della Sardegna: materie prime e proprietà dei prodotti¹⁹

Alla fine del XX secolo, la produzione sarda di laterizi ammontava complessivamente a 662.500 tonnellate di laterizi, pari a circa il 3% del totale nazionale. Le tipologie predominanti sono rappresentate da mattoni e blocchi forati, i quali con 256.000 tonnellate coprono circa il 5% dell’intero fabbisogno italiano di tali manufatti, e da blocchi da solaio (192.700 t). La quota restante della produzione regionale riguarda i materiali per muratura portante, sia comuni (141.300 t) che alleggeriti in pasta (65.600 t). Sull’isola non si producono invece mattoni a “faccia vista”, tavelloni, elementi per coperture e per pavimentazione.

Le materie prime impiegate nei laterifici sardi provengono dalle formazioni marine o continentali che hanno contribuito alla colmata della Fossa Sarda e del Graben Campidanese, a sud dell’isola. Due formazioni continentali di elevato interesse sono la Formazione del Cixerri e la Formazione di Ussana, affioranti ampiamente nella Sardegna meridionale.

La Formazione del Cixerri è costituita da un’alternanza di arenarie quarzose, marne ed argille limose, con affioramenti più estesi lungo la dorsale centro-orientale del Campidano di Cagliari; la coltivazione ha riguardato sia i livelli argillosi sia quelli arenacei, in grado di conferire maggiore magrezza all’impasto. La Formazione di Ussana è anch’essa costituita da arenarie ed

¹⁹ Dondi M., Fabbri B. e Sistu G. (1995). *Le argille da laterizi della Sardegna: caratteristiche composizionali e influenza sulle proprietà dei prodotti*, in *Rendiconti Seminario della Facoltà di Scienze dell’Università di Cagliari*. Gennaio, volume 65, fascicolo 2

argille, queste ultime fortemente ricche di resti vegetali; in particolare, negli intorno degli abitati di Ussana è consistente il numero delle attività estrattive che agli inizi del XXI secolo si sono concentrate su questi sedimenti.

Altra formazione è quella delle Argille di Fangiario, un complesso marnoso-arenaceo caratterizzato da una sequenza di marne grigio-giallastre con ridotta componente limosa. La loro estrazione è storicamente concentrata nella località di Fangiario nella Cava Giuntelli, alla periferia di Cagliari.

Infine, nella Sardegna meridionale le materie prime provengono anche da un'altra importante formazione alluvionale continentale, ovvero la Formazione di Samassi, nella Cava Fornaci Sarde. Da un punto di vista litologico è costituita da marne biancastre o grigio-chiare, alternate con argille grigio-verdastre o rosso-brune ed a sabbie quarzose.

Nelle strutture produttive del nord Sardegna, invece, nello specifico a Sassari, vengono utilizzate rocce argillose che costituiscono la parte prevalente della piana costiera turritana (Porto Torres). La consistenza di tali depositi è notevole, consentendo la razionalizzazione dell'attività estrattiva ed il riutilizzo dei siti dismessi per la realizzazione di discariche controllate.

Gli stabilimenti sardi offrono una casistica di prodotti con caratteri abbastanza uniformi, sia sotto il profilo della tipologia dei laterizi, sia in termini di ciclo di lavorazione, che è sempre condotto secondo schemi convenzionali. Gli impasti argillosi vengono preparati, nei laterifici del Cagliariitano, miscelando in varie proporzioni le argille delle Formazioni del Cixerri, di Ussana e di Samassi. Nel Sassarese, invece, si prediligono impasti composti da una sola argilla.

Le composizioni chimiche degli impasti argillosi preparati con materie prime sarde, presentano nell'insieme una certa varietà, conseguenza sia delle differenze composizionali da un giacimento argilloso all'altro, sia delle diverse proporzioni con le quali le materie prime sono mescolate tra loro. In particolare, questa varietà riguarda soprattutto i costituenti più abbondanti: silice (46-60% SiO_2), ossido di calcio (0-15% CaO) ed allumina (12-21% Al_2O_3). In riferimento all'aspetto mineralogico, le materie prime mostrano invece una composizione analoga sotto il profilo qualitativo, costituite fondamentalmente da minerali argillosi (fillosilicati), quarzo, feldspati e carbonati. Quantitativamente, la composizione mineralogica mette in evidenza l'abbondante presenza di uno scheletro costituito da quarzo (23-36%), feldspati (9-17%) e carbonati (2-27%); la componente fillosilicatica oscilla invece tra 11-22%. Gli impasti sardi sono caratterizzati inoltre da una distribuzione granulometrica composta da una significativa quantità di frazione sabbiosa (10-24%, $> 63 \mu\text{m}$) e dall'alternativa prevalenza della porzione argillosa (23-66%, $< 4 \mu\text{m}$) oppure di quella limosa (23-54%, nell'intervallo 4-63 μm).

I laterizi sardi presentano nell'insieme delle caratteristiche meccaniche e microstrutturali abbastanza uniformi. Questo è imputabile alla relativa omogeneità del ciclo produttivo adottato nei vari stabilimenti, con particolare riferimento al processo di cottura che è sempre condotto in forni a tunnel alimentati con olio combustibile.

La resistenza a flessione appare influenzata in maniera complessa da più fattori riguardanti la composizione degli impasti e il ciclo tecnologico di lavorazione. Infatti, prodotti ottenuti con il medesimo impasto risultano avere una diversa resistenza a flessione. Prove di laboratorio su provini ricavati dai prodotti di fabbricazione industriale, hanno mostrato che i laterizi sardi presentano valori di resistenza variabili nell'intervallo 6,8-18,4 MPa.

La quantità di micropori nei cotti, poi, sembra dipendere dal contenuto di carbonati nell'impasto. Infatti, a valori più alti di porosità (maggiori del 30%) corrispondono tenori di carbonato di calcio superiori al 13%, mentre per contenuti di carbonati inferiori si hanno percentuali di porosità al di sotto del 30%. In generale, i valori di porosità variano in un intervallo abbastanza ristretto (26-33% in volume), rispetto alla variabilità nel resto della produzione italiana di laterizi (25-40%).

L'intensità delle manifestazioni efflorescenti nei prodotti sardi sembra dipendere dalla quantità e dalla natura di sali solubili presenti nei cotti. Nei laterizi fabbricati con argille del Sassarese si riscontrano tenori bassissimi di sali solubili (circa 0,1%) che danno luogo ad efflorescenze nulle o al massimo deboli, fondamentalmente costituite da solfati alcalini (sodio e potassio). Negli altri prodotti, ottenuti con materie prime del tipo Ussana-Cixerri-Samassi, i sali solubili sono presenti in quantità maggiore, costituiti in larga misura da solfato di calcio, che producono quasi sempre efflorescenze medie o forti.

CAPITOLO 5. Schedatura dei risultati

Alla luce dei censimenti riportati nel Capitolo 3 e dei contesti storico-architettonici analizzati nel Capitolo 4 riguardanti le tecniche costruttive tradizionali, si procede ora ad una schedatura dei principali materiali tradizionali. Si propongono così delle schede tipo per le tre Regioni studio, considerando quelli che si possono ritenere i materiali di maggior rilievo storico-architettonico in uso nell'Italia meridionale nell'ambito edile ed architettonico, sia come materiali da costruzione ed ornamentali, sia come materie prime per la realizzazione di inerti e leganti. Altresì, le innovazioni tecnologiche saranno valutate all'interno delle schede in esame, con esempi di materiali brevettati ed in uso nel settore dell'edilizia.

Le schede qui proposte saranno articolate riportando informazioni e dati tratti in letteratura raggruppati in quattro voci principali: Descrizione; Caratteristiche fisiche e meccaniche, dati tecnici; Impieghi; Osservazioni e innovazioni tecnologiche.

5.1 Campania

Per la Campania le schede riguarderanno i seguenti materiali da costruzione: Tufo Giallo Napoletano, Ignimbrite Campana, Piperno, Lave vesuviane e flegree, Pozzolana, Marmi e Travertini, Cocciopesto.

5.1.1 Tufo Giallo Napoletano

DESCRIZIONE

Il Tufo Giallo Napoletano (TGN) è un esteso deposito piroclastico prodotto dall'attività vulcanica dei Campi Flegrei risalente a circa 15.000 anni fa, originato dalla cementazione di vari detriti vulcanici quali ceneri, lapilli lapidei, pomici e scorie, immersi in una matrice cineritica giallastra alterata dalla formazione di zeoliti. La formazione del TGN a volte è affiorante, a volte è ricoperta da una coltre di rocce sciolte costituita da pozzolana. Gli affioramenti del TGN raggiungono una distanza massima di 31 km interessando l'intero territorio dei Campi Flegrei, con epicentro nell'attuale città di Pozzuoli. Anticamente il tufo veniva estratto quasi sempre in cave sotterranee, mentre agli inizi del '900 si è passati progressivamente all'estrazione del materiale da cave a cielo aperto, collocate al di fuori della città (Capodimonte, Rione Sanità, Fontanelle, Camaldoli, Petraio e Pizzofalcone) e più di recente alle falde delle colline che delimitano a nord la Piana di Quarto.



Fig. 1 Castel dell'Ovo (XIII-XVI, Napoli)

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

È una roccia tenera, facilmente lavorabile e di grana più o meno fine. Il materiale può presentare caratteristiche diverse secondo il tipo di cava e la composizione che lo caratterizza,

mentre l'aderenza alle malte risulta sempre ottima. Possiede inoltre ottime proprietà di coibentazione termica ed acustica grazie all'elevata porosità e all'abbondante presenza di zeoliti nella matrice, ovvero minerali appartenenti alla famiglia dei silicati caratterizzati da una struttura cristallina e microporosa.

Di seguito si elencano le principali proprietà fisico-meccaniche (Del Gaudio & Vallario, 2007):

- Densità: 1000 – 1400 Kg/m³
- Porosità: 40 – 63 %
- Resistenza a compressione: 0,7 – 12 MPa
- Permeabilità: 1,5 – 6,4 x10⁻⁷ m/s
- Diffusività termica: 1,9 – 2,0 x10² cm²/s

IMPIEGHI

La disponibilità di questo materiale di facile estrazione e lavorabilità sul territorio ha favorito la sua utilizzazione fin dai primi insediamenti greci avvenuti lungo la costa partenopea già nel IX secolo a.C. L'utilizzazione del TGN come pietra da costruzione è consuetudine plurimillenaria; per molto tempo l'estrazione del materiale avveniva in sotterraneo e spesso direttamente dal sottosuolo dell'area di edificazione, questo sia per evitare gli oneri connessi al trasporto del materiale, sia per conservare il terreno superficiale alle altre attività antropiche. Questa ampia disponibilità, unitamente alle buone qualità fisiche e meccaniche della pietra, hanno fatto sì che gran parte delle costruzioni realizzate nel centro antico di Napoli siano costituite di tufo giallo, sia con funzione strutturale che impiegato a "faccia vista" con fini architettonici. La muratura in blocchi squadrati di tufo è sicuramente la più diffusa negli edifici napoletani ed in tutta l'area flegrea; almeno fino al Settecento, ragioni economiche suggerivano una tipologia muraria "a sacco". Particolare importanza nell'edilizia cinquecentesca della città di Napoli rivestono i Quartieri Spagnoli, che a tutt'oggi costituiscono una porzione significativa e rappresentativa del costruito storico napoletano. I palazzi dei quartieri spagnoli vennero realizzati con murature in blocchi di tufo squadrati collegati con malta di pozzolana. Gli spessori medi delle pareti variavano tra 70 e 80 cm al piano terra, e tra 40 e 50 cm agli ultimi piani. Successivamente si passa attraverso diverse fasi storiche caratterizzate dalla tecnica a cantieri poi sostituita con quella a filari, con una lavorazione sempre più accurata degli elementi lapidei. Tale evoluzione ha fatto registrare il generale decremento dello spessore medio dei letti di posa e dei giunti verticali (1,5 - 2 cm) ed il tendenziale disuso dei ricorsi di malta e del minuto di cava usati nelle connessioni. Questa tecnica fu limitata alle fabbriche monumentali, come si evince nelle cortine del Palazzo Reale di Capodimonte e del Palazzo Reale di Portici. A partire dall'Ottocento è ricorrente un apparato murario in tufo e ricorsi regolari di laterizi, sistema adottato per migliorare la resistenza della muratura. L'uso del tufo come pietra ornamentale raggiunge il massimo splendore in epoca Angioina con la realizzazione di numerose basiliche e cappelle gotiche (Basilica di S. Chiara, S. Domenico Maggiore, Cappella Pappacoda), ma prosegue anche nei secoli successivi con la realizzazione di altre importanti opere tra le quali l'Accademia di Belle Arti realizzata nel 1864, fino ad arrivare ai giorni nostri come dimostrano le facciate di molti

edifici pubblici e residenziali nel corso degli interventi post terremoto. Un altro uso riguarda la realizzazione di pavimentazioni, cordoli e altri elementi ornamentali sottoposti a sollecitazioni particolari. Tipici esempi sono la pavimentazione dell'area pedonale di Piazzale Tecchio realizzata in occasione dei lavori di "Italia 90" e quella della "Villa Comunale" realizzata alla fine degli anni '90 in occasione dei lavori di recupero e ristrutturazione dell'area. Va sottolineato comunque l'anomalo impiego di un materiale con bassissima resistenza all'abrasione per una destinazione nella quale le maggiori sollecitazioni derivano dall'attrito radente. Altre opere in tufo sono le gallerie dell'asse viario tra la città ed i porti di Pozzuoli e Cuma, o i più recenti tunnel per il traffico automobilistico e ferroviario, e la rete idrica di collegamento tra i vari serbatoi dell'acquedotto urbano.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

In uno studio scientifico è stato preso in esame la possibilità di trattare il tufo mediante impregnazione profonda di polimeri, nello specifico con il monomero acrilico metilmetacrilato di metile (MMA) . Questo monomero è un liquido con elevata tensione superficiale che, trattato chimicamente, diventa un solido polimerico ad alta resistenza. Il suo utilizzo è tecnicamente possibile grazie alle caratteristiche di porosità e di permeabilità del tufo. La tecnica di impregnazione consiste nel mettere a contatto la superficie di tufo da trattare con il liquido di MMA, che penetra nel tufo per capillarità; il fenomeno di polimerizzazione viene poi innescato operando un riscaldamento della superficie stessa. La resistenza del polimetilmetacrilato (PMA) così ottenuto risulta circa 100 volte più elevata di quella del tufo, mentre la deformabilità è dello stesso ordine di grandezza. L'efficacia del trattamento è stata inizialmente determinata avvalendosi dei risultati di semplici prove a compressione monoassiale. Il trattamento risulta efficace solo a partire da una quantità di polimero maggiore del 10%, espresso come percentuale in peso. In particolare, un aumento della resistenza compressione si manifesta con un contenuto di polimero pari al 20%, in quanto la resistenza all'incirca si quadruplica. Con il 30% in peso la resistenza risulta 10 volte più elevata. Si registra invece un limitato incremento del modulo elastico E, in quanto il tufo ed il polimero hanno moduli dello stesso ordine di grandezza. Prove di trazione monoassiale hanno poi dimostrato che anche questa caratteristica di resistenza risulti influenzata da un contenuto in peso di polimero maggiore del 10%; con il 30% in peso la resistenza a trazione risulta all'incirca 10 volte più elevata di quella per il tufo in condizioni normali. Di particolare interesse, ai fini tecnici, appaiono questi ultimi risultati che mostrano come il tufo, che è una roccia di ridotta resistenza a trazione, possa essere trasformato, da un trattamento intenso, in un materiale capace di sopportare elevati sforzi di trazione. Infine, è stato rilevato sempre un comportamento a rottura di tipo fragile. Con questa tecnica, il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del tufo è tale che il suo impiego permetterebbe di modificare in modo sostanziale le condizioni di stabilità degli edifici prossimi al dissesto (Aurisicchio, Evangelista, & Nicolais, 1983).

5.1.2 Ignimbrite Campana

DESCRIZIONE

Il Tufo Grigio Campano, detto anche “Ignimbrite Campana” (IC), rappresenta anch’esso il prodotto di un’eruzione avvenuta nei Campi Flegrei circa 37.000 anni fa. Esso è generalmente definito come un deposito piroclastico da flusso, costituito da pomice e scorie in matrice cineritica grigiastra, nella quale sono riconoscibili due *facies* entrambe litificate: una “grigia” contenente feldspato, e una “gialla” caratterizzata dalla presenza di zeoliti. Il processo di litificazione è da mettere principalmente in relazione a fenomeni di formazione di zeoliti e feldspati. Il Tufo Grigio è presente in tutte le provincie della Campania, con maggiore concentrazione nei Campi Flegrei, in Penisola Sorrentina e a Roccamonfina (Caserta).



Fig. 2 Duomo di Casertavecchia (Caserta)

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Proprietà fisico-meccaniche della *facies* grigia dell’IC (Del Gaudio & Vallario, 2007):

- Densità: 2200 – 2600 Kg/m³
- Porosità: 50 – 58 %
- Resistenza a compressione: 1,0 – 8,0 MPa

Proprietà fisico-meccaniche della *facies* gialla dell’IC (Del Gaudio & Vallario, 2007):

- Densità: 1300 Kg/m³
- Porosità: 36 – 60 %
- Resistenza a compressione: 0,8 – 3,0 MPa
- Permeabilità: 1,5 x10⁻⁶ m/s

IMPIEGHI

Grazie all’ampia diffusione su tutto il territorio regionale, l’Ignimbrite Campana è la pietra da costruzione più presente in tutti i contesti architettonici della Campania. La *facies* grigia, per la sua facile lavorabilità e per le migliori caratteristiche fisico-meccaniche rispetto alla *facies* gialla, risulta inoltre frequentemente utilizzata per la realizzazione di elementi architettonici particolari. Anche se opere architettoniche di elevato pregio realizzate con Tufo Grigio a “faccia vista” sono presenti un po’ ovunque sul territorio regionale, una particolare concentrazione si ha nella provincia di Caserta. Tra le tante si citano la Cattedrale di S. Michele Arcangelo e il Castello di Casertavecchia. Di rilevante valore è lo splendido effetto decorativo ottenuto attraverso l’abbinamento del Tufo Grigio con altri materiali, quali travertino e laterizio, nel quadriportico medievale del Duomo di Salerno. Anche a Napoli, in Penisola Sorrentina e nell’edilizia monumentale del Centro Antico, si è fatto largo uso del Tufo Grigio in sostituzione del Piperno, soprattutto per la realizzazione di quelle parti degli edifici meno esposte e meno visibili. Il cosiddetto Tufo Grigio Sorrentino, pietra tufacea tipica del

sottosuolo massese, in virtù del suo basso peso specifico e della sua buona resistenza, fu infatti largamente utilizzato fin dal XIII secolo in alternativa al piperno, e particolarmente apprezzato per la realizzazione delle strutture collocate ai livelli più alti delle costruzioni (come timpani, lanterne e cupole), o utilizzato per la creazione di elementi decorativi (cornicioni, capitelli, cornici, gradini, ornie e stipiti di porte e finestre, canali di gronda, vaschette) per l'estrema facilità di lavorazione. L'introduzione di questo materiale è stata favorita dal suo aspetto molto simile a quello del materiale più pregiato, dalla più facile lavorabilità, dal basso costo, e principalmente dalla crescente richiesta di materiale in seguito all'espansione urbanistica della città alla quale le cave di piperno non riuscivano a far fronte. La *facies* gialla dell'Ignimbrite Campana, invece, pur essendo anche oggi un materiale da costruzione molto richiesto ed apprezzato per le sue qualità tecniche, non ha mai assunto nell'architettura storica un'importanza simile a quella delle *facies* grigie.

5.1.3 Piperno

DESCRIZIONE

Il Piperno rappresenta un prodotto dell'attività vulcanica dei Campi Flegrei, ascrivibile ad un episodio eruttivo verificatosi alla base della collina dei Camaldoli. La roccia presenta una struttura caratterizzata dalla presenza di scorie di forma schiacciata di colore scuro, comunemente chiamate "fiamme", inglobate in una matrice cineritica di colore grigio scuro. La massa risulta interamente litificata da processi che hanno portato alla



Fig. 3 Particolare del "bugnato" nella facciata della Chiesa del Gesù Nuovo (Napoli).

cristallizzazione di feldspato. L'unica area di estrazione del Piperno è quella compresa tra Soccavo e Pianura alle falde della collina dei Camaldoli. Lo spessore visibile del deposito è di circa venti metri. Dal XVII secolo fino alla prima metà del Novecento, la pietra è stata estratta attraverso un complesso reticolo di gallerie in cui se ne coltivavano i vari livelli di Piperno.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Nonostante il diffuso impiego della pietra per oltre trecento anni, poche sono le notizie che si trovano in letteratura sulle sue proprietà fisiche e meccaniche. Studi recenti, condotti dai ricercatori dell'Università di Napoli "Federico II", hanno permesso di valutare, su campioni prelevati dagli affioramenti attualmente raggiungibili, i seguenti parametri (Del Gaudio & Vallario, 2007):

- Densità: 1570 – 1860 Kg/m³
- Porosità: 15 – 50 %
- Resistenza a compressione: 15 – 60 MPa

La presenza delle "fiamme" individua nel Piperno una direzione di minore resistenza meccanica (16 MPa) parallela alla direzione dell'asse maggiore delle fiamme. La direzione ad

essa perpendicolare è quella che presenta invece i valori più alti di carico a rottura (38-40 MPa).

IMPIEGHI

Dopo il TGN, il Piperno rappresenta la pietra maggiormente utilizzata nell'architettura storica della città di Napoli, come pietra da taglio o in lastre, in quanto le sue caratteristiche fisiche ed estetiche ne hanno consentito l'impiego non solo con funzioni strutturali (basti pensare ai numerosi colonnati dei tantissimi chiostrì presenti nel Centro Antico), ma anche con funzioni puramente architettoniche come rivestimento di paramenti di facciata. La massima espressione del suo impiego può essere rappresentata da opere quali la Cappella Pontano e la Chiesa del Gesù Nuovo. La disponibilità relativamente limitata di materia prima e soprattutto il suo costo, hanno fatto sì che frequentemente nell'architettura napoletana fossero introdotti dei materiali sostitutivi, come l'Ignimbrite Campana e le lave vesuviane.

5.1.4 Lave vesuviane e flegree. La "Pietrarsa"

DESCRIZIONE

Per pietre laviche si intendono rocce vulcaniche di tipo effusive. Le Lave flegree derivano dall'attività del gruppo vulcanico dei Campi Flegrei, e sono principalmente Trachiti. Le Lave vesuviane sono invece Tefriti leucitiche, comunemente chiamate "Pietrarsa" (da pietra arsa). Sia le Lave flegree che le Lave vesuviane sono caratterizzate da una struttura porfirica. Le Trachiti presentano fenocristalli di feldspato in massa di colore grigio, bruno, verdognolo o biancastro; le Tefriti presentano invece fenocristalli di feldspatoidi (leucite) in massa di colore grigio scuro o bruno-rossiccio. Data l'assenza o, comunque, una più ridotta presenza di quarzo, il carattere acido delle lave è pertanto meno marcato. Due lave trachitiche di particolare importanza sono la Trachite del Monte Olibano (Pozzuoli) e la Trachite di Zaro (Ischia). Inoltre, le lave a composizione tefritico-leucitica sono presenti anche nel distretto vulcanico di Roccamonfina. Una varietà dura e compatta delle lave vesuviane è la "Ferrugine", presente nelle parti superficiali dei banchi di lava da cui si ricavava la pietrarsa; è costituita da una crosta spugnosa addensatasi attorno ad un nucleo di lava, dovuta all'improvviso raffreddamento della colata e allo sprigionamento di gas e vapori.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Le lave impiegate per pavimentazioni stradali sono rocce tenaci, resistenti all'usura per attrito radente e dotate di composizione mineralogica a grana media. Ottimi materiali per lastricati e pavimentazioni in genere, talora usati anche per rivestimenti esterni. Per i principali parametri fisici, i dati reperibili in letteratura sono piuttosto scarsi, non sempre concordanti e soprattutto datati.



Fig. 4 Basilica di San Francesco di Paola (Napoli)

Di seguito sono sintetizzate alcune proprietà fisico-meccaniche (Del Gaudio & Vallario, 2007):

Lave flegree (trachitiche) del Monte Olibano (Pozzuoli)

- Densità: 2290 – 2500 Kg/m³
- Resistenza a compressione: 45 – 81 MPa

Lave flegree (trachitiche) di Punta Marmolite (Quarto)

- Densità: 2520 – 2550 Kg/m³
- Resistenza a compressione: 196 MPa

Lave vesuviane (tefritiche):

- Densità: 2660 – 2780 Kg/m³
- Resistenza a compressione: 60 – 180 MPa

IMPIEGHI

Le lave del Monte Olibano sono tra le più famose dei Campi Flegrei e, fino all'eruzione del Vesuvio del 1631, esse rappresentarono insieme al Piperno uno dei materiali più richiesti nell'edilizia napoletana. La discreta resistenza allo schiacciamento, accoppiata ad un'ottima aderenza alle malte ed alla facile lavorabilità, rendono questa roccia particolarmente adatta ad essere impiegata come pietrame per murature e calcestruzzi. Alcuni importanti impieghi riguardano il colonnato del chiostro di S. Chiara, il Castel Nuovo, il colonnato della Basilica di San Francesco di Paola e il Mausoleo ai Caduti di Guerra. Inoltre, la buona tenacità e soprattutto l'elevata resistenza alla corrosione salina, fecero sì che la trachite dell'Olibano fosse molto richiesta in lavori marittimi per banchine e scogliere, oltre ad essere usata nel 1317-18 per la pavimentazione stradale di Napoli. La Trachite di Zaro, invece, è stata probabilmente impiegata in blocchi nella costruzione del Tempio di Venere a Pompei. Oggi questo materiale è ampiamente sfruttato nelle costruzioni locali sia per pavimentazioni stradali, che in blocchi squadrati e sagomati con fregi, cornici, gradini, soglie di balconi, davanzali e pianerottoli. Un impulso maggiore all'utilizzazione delle lave fu dato dalla politica a favore dell'utilizzazione delle risorse del Regno voluta da Carlo III di Borbone, che portò ad un maggior uso della "Pietrarsa" come pietra da taglio, ottenuta dalle cave dei paesi vesuviani aperte dopo le colate laviche del 1631 e del 1760. Attraverso i secoli, maestranze specializzate hanno realizzato cinte murarie, opere idrauliche, edifici e pavimentazioni stradali mediante l'uso della pietra lavica estratta dalle tante cave aperte ai piedi del Vesuvio e del Monte Somma. La muratura in pietrame lavico realizzata con elementi di forma irregolare provenienti dalla frantumazione delle rocce laviche (scheggioni) non è presente a Napoli, ma è diffusa negli edifici più antichi dei paesi Vesuviani. Difatti, la Pietrarsa adoperata a Napoli solo come pietra da taglio in cornici, stipiti e davanzali, è stata utilizzata largamente nei paesi vesuviani come pietrame da muratura. Largo uso delle lave vesuviane, in sostituzione del Piperno più costoso e di difficile approvvigionamento, fu fatto nel corso dei lavori di bonifica urbana del cosiddetto Risanamento, per la Chiesa Madre e le numerose opere funerarie del Cimitero di Poggioreale, nella Basilica di San Francesco di Paola per realizzare con l'opera a sacco tanto le strutture di fondazione quanto quelle di elevazione, e nella realizzazione del Mausoleo ai

Caduti di Guerra, qui utilizzate in associazione con le lave flegree, Piperno ed altre rocce sedimentarie. Nei primi decenni del XX si estraeva un altro importante prodotto vulcanico, la “ferrugine”, largamente impiegata nei lavori per il porto di Napoli nel confezionamento dei calcestruzzi: cinque parti di ferrugine, una di grassello di calce e due di pozzolana di Bacoli. Si distingueva inoltre la “ferrugine”, costituita da elementi volumetricamente eterogenei utilizzata prevalentemente per grossi blocchi di calcestruzzo, dalla “ferruginetta”, con granulometria piccola e costante, utilizzata per le prime opere in cemento armato e per i solai. Le lave provenienti da Roccamonfina hanno invece un interesse strettamente locale, impiegate per la produzione di inerti e aggregati per l’industria edilizia.

5.1.5 Pozzolana

DESCRIZIONE

La Pozzolana è una roccia piroclastica sciolta, formatasi per accumulo e consolidamento di materiali proveniente da eruzioni di tipo esplosive, come pomici e scorie vulcaniche. Si trova al di sopra dei banchi tufacei a quote poche profonde, è generalmente grigia o grigio-verdastra, a tratti giallastra, e presenta una granulometria variabile tra il limo e la sabbia. Vitruvio descriveva quattro tipi di Pozzolana: bianca, nera, grigia, rossa. Il magma liquido dell’esplosione subisce un brusco raffreddamento diventando denso, durante il quale i gas continuano a liberarsi lasciando all’interno dei vuoti. Dopo la solidificazione, si ottiene un materiale privo di struttura cristallina, incoerente, friabile e riducibile in polvere mediante macinazione. La sua composizione chimica evidenzia la presenza di silice, allumina, ossido di ferro, ossidi alcalino-terrosi (calcio e magnesio) e ossidi alcalini (sodio e potassio). Dalla quantità di silice presente, la Pozzolana si distingue in acida, neutra o basica. Si estrae principalmente nei Campi Flegrei, prendendo il nome dalla città di Pozzuoli (polvere di *Puteoli*).



Fig. 5 Grani di Pozzolana rossa

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

La Pozzolana viene definita “cemento naturale” per la sua proprietà di reagire con la calce aerea attraverso la cosiddetta “reazione pozzolanica”. Il risultato di questa reazione endotermica, che avviene durante l’impasto tra calce, pozzolana e acqua, è una vera e propria idraulicizzazione della calce, con formazione di silicati ed alluminati idrati di calcio, stabili ed insolubili, simili ai prodotti ottenuti dall’idratazione del clinker. Si ottiene così una malta dalle proprietà idrauliche, capace cioè di fare presa e indurimento a contatto con l’acqua. Il comportamento pozzolanico consente di aumentare la resistenza meccanica della malta, che acquisisce inoltre un alto potere di adesione a qualsiasi tipo di supporto, anche su murature con forte presenza di umidità. Infatti, per le caratteristiche della pozzolana, le malte a base di grassello e pozzolana sono idonee anche per contrastare l’umidità di risalita nelle murature e

la formazione dei sali. La norma UNI EN 998-2 definisce la classe M 2,5 per una malta composta da grassello di calce e pozzolana, con resistenza a compressione pari a 2,5 MPa.

IMPIEGHI

Da I secolo a.C. la Pozzolana venne usata dai Romani per confezionare malte e calcestruzzi a base di calce aerea con proprietà idrauliche. La scoperta e l'uso di questo materiale segnò una profonda rivoluzione nel settore delle costruzioni poiché consentiva di ottenere materiali cementizi capaci di indurire in presenza di acqua. Vitruvio ne descriveva l'utilizzo nel suo trattato "*De Architectura*", ed era uno dei componenti dell'*Opus Caementicium*, una miscela di calce, *caementa*, Pozzolana e acqua. Opere prestigiose, come ad esempio il *Pantheon*, costruite duemila anni fa utilizzando questo tipo di legante e arrivate in perfetta efficienza fino ai nostri giorni, testimoniano le elevate caratteristiche meccaniche e di durabilità del materiale cementizio prodotto dai Romani. Anche nell'edilizia napoletana si faceva largo uso della Pozzolana. Tra la fine dell'800 e l'inizio del '900, le strutture in muratura venivano realizzate facendo ricorso esclusivamente a malte di tipo pozzolanico e a malte idrauliche, ottenute miscelando in pasta un terzo di calce spenta e due terzi di Pozzolana.

La Pozzolana è dunque impiegata in edilizia non come pietra da costruzione, ma come legante, dopo essere stata polverizzata per macinazione e miscelata con calce. Per il confezionamento di malte pozzolaniche (per intonaci e murature) la norma UNI EN 998-2 prevede: 1 parte di grassello e 3 parti di Pozzolana. Inoltre, se mescolata a cemento Portland, si ottiene il "cemento pozzolanico", che contiene una percentuale di Pozzolana compresa tra l'11% e il 55%. Questo tipo di cemento presenta dei vantaggi, in quanto consente di ottenere calcestruzzi con una maggiore resistenza all'attacco solfatico, al dilavamento e alla carbonatazione, ed è particolarmente adatto per opere di grandi dimensioni o quando si è in presenza di acque aggressive o solfatiche.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

Nel settore della bioedilizia, la pozzolana può essere reimpiegata in maniera innovativa con la calce per confezionare malte per intonaci, attraverso prodotti brevettati quali ad esempio il "K1710 Pura Calce", una malta composta da calce idrata ed inerti pregiati, fibrorinforzata e ad azione pozzolanica. Le fibre introdotte, di natura esclusivamente inorganica, diminuiscono sensibilmente il rischio di formazione di efflorescenze. Altri vantaggi sono l'elevata porosità e traspirabilità, e la migliorata lavorabilità grazie all'applicazione a macchina. Viene usato come intonaco di fondo su murature in pietra, mattoni e tufo. Le caratteristiche di elasticità dell'intonaco e la presenza delle fibre lo rendono particolarmente adatto su supporti meccanicamente deboli. Il prodotto è certificato con sistema LEED (Osservatorio Recycle & Legambiente, 2016).

5.1.6 Marmi e Travertini

DESCRIZIONE

I Marmi della Campania sono rocce sedimentarie di natura calcarea dal colore molto variabile, in cui il carbonato di calcio è il componente principale, impiegati soprattutto come pietre ornamentali grazie alla loro lavorabilità in lastre lucidate. I Travertini sono rocce calcaree sedimentarie di deposito chimico con caratteristica struttura vacuolare, di colore chiaro da



Fig. 6 Tavolone di balcone realizzato con lastra monolitica di calcare (Senerchia)

biancastro a rosato, formati in ambiente continentale in prossimità di sorgenti di bicarbonato di calcio a volte termali. In tutta la Regione sono presenti numerosi giacimenti di rocce calcaree, ciascuna delle quali ha avuto momenti di diffuso utilizzo. Nonostante questa ricchezza, il settore dell'attività estrattiva della Campania ha quasi del tutto abbandonato la coltivazione delle pietre ornamentali. I principali lapidei ornamentali della Campania sono raggruppabili per provincia: i Marmi delle provincie di Caserta, Benevento e Avellino; i Travertini della provincia di Salerno; la Pietra di Massa in Penisola Sorrentina.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

I calcari (bioclastici e detritici) sono dotati di scarsa durezza (circa 3 della scala di Mohs), resistenza a compressione molto variabile (80-180 MPa) e sono sensibili agli agenti atmosferici. I travertini presentano scarsa compattezza, durezza simile a quella dei calcari e resistenza a compressione medio-bassa (20-60 MPa). Impiegate in lastre per rivestimenti esterni e interni, queste rocce devono essere durevoli, suddivisibili in lastre, lucidabili, resistenti agli urti e a flessione, resistenti all'usura per attrito radente (Calcaterra, 2012).

IMPIEGHI

Pietra di Bellona (Caserta)

Questa pietra è stata utilizzata in passato per la costruzione dell'Anfiteatro romano di S. Maria Capua Vetere e di numeri monumenti nella zona di Capua. Si tratta di un calcare dolomitizzato, di colore grigio con intercalazioni verdognole.

Marmi di Mondragone (Caserta)

Nella zona di Mondragone sono rinvenibili alcuni calcari cristallini noti come Marmi di Mondragone, nelle varietà di "Mondragone Giallo" e "Mondragone Nero". Il loro maggiore impiego si ebbe nella realizzazione dei rivestimenti dello Scalone Monumentale o di altri elementi decorativi del Palazzo Reale di Caserta.

Marmi di Dragoni (Caserta)

Nel territorio di Dragoni sono presenti calcari brecciati variegati di rosso o di giallo, frequentemente utilizzati come pietra ornamentale.

Marmi di Caiazzo (Caserta)

Si tratta di calcari teneri e porosi estratti nella zona di Caiazzo. Questi marmi sono stati utilizzati per la realizzazione delle statue del parco del Palazzo Reale di Caserta.

Marmi di Vitulano (Benevento)

Nel beneventano, tra i comuni di Vitulano e Cautano, sono stati estratti in passato calcari detritici grigiastri, noti come i Marmi di Vitulano, che rappresentano i lapidei ornamentali più pregiati di tutta la regione. Questi marmi hanno avuto una notevole diffusione, grazie anche alle loro numerose varietà, quali il “Grigio Perla”, il “Rosso Uria”, la “Lumachella Bianca”, il “Verde”, il “Brecciato Chiaro” e il “Brecciato Vivo”. Un rilevante impiego lo si ritrova a Caserta nel Palazzo Reale, a Napoli nel Duomo, nella Chiesa dei Pellegrini, nella Chiesa Madre del Cimitero, nella Chiesa del Gesù Nuovo, nel Museo Nazionale, nell’Albergo dei Poveri, all’interno del Teatro San Carlo, nei Palazzi della Borsa e delle Poste, oltre che nei Palazzi Reali di Napoli e di Portici, nei Palazzi della Provincia di Napoli e di Caserta, nel Santuario di Pompei, ed in un elevato numero di palazzi privati. Alcune varietà sono state utilizzate anche al di fuori della Regione, come il “Giallo Siena” impiegato nella Chiesa dei SS. Apostoli a Roma.

Lapidei Ornamentali di Avellino

I materiali, provenienti dall’area avellinese utilizzati come lapidei ornamentali di un certo prestigio, in particolare nei finimenti del Palazzo Reale di Caserta sono la “Corallina” o “Breccia di Atripalda” dell’omonimo comune, la “Pietra di Montevergine”, cavata alle falde del M. Partenio, e “Alabastro Cotognino” o “Alabastro di Gesualdo” dell’omonimo comune, quest’ultimo impiegato anche nella Cattedrale di Avellino. Di questi materiali mancano del tutto informazioni sulle caratteristiche mineralogiche e petrofisiche.

Travertini di Salerno

Per quello che riguarda l’area del salernitano, i travertini sono le rocce sedimentarie più utilizzate come pietre ornamentali. I travertini di Pontecagnano-Fajano sono stati utilizzati molto nella città di Salerno, in particolare per il Duomo, per il palazzo della Curia e per il Palazzo Fruscione, per l’acquedotto di via Arce e nel Castel Terracena. A Napoli questi travertini sono stati adoperati per la realizzazione delle colonne del Museo Archeologico Nazionale. I travertini della zona di Capaccio furono utilizzati per la realizzazione dei Templi e delle strutture dell’antica città di Paestum. I travertini presenti nell’area di Sarno e Striano sono stati utilizzati negli edifici dell’antica Pompei. Abbastanza nota è anche la pietra calcarea di Padula utilizzata per la costruzione della Certosa. Tra i materiali calcarei che caratterizzano le realtà provinciali dell’ambiente geologico della Campania, occupa un particolare livello di attenzione la “Pietra di Roccadaspide”. Trattasi di pietra calcarea utilizzata almeno dal 1500, per la realizzazione di castelli, manufatti di pregio e monumenti architettonici in numerosi comuni salernitani quali Roccadaspide, Montesano sulla Marcellana, Cannaloga, Fellito, Campora, Pollica, Vallo della Lucania, S. Maria di Castellabate, Agropoli, Maiori e Paestum. Questa pietra attualmente viene anche utilizzata per la produzione di mosaici, miniature, sculture, oggettistica in genere, nonché come rivestimento di camini, fontane artistiche, per

la realizzazione di portali d'ingresso o bordure di porte e finestre e di altri manufatti di arredo urbano.

Pietra di Massa (Penisola Sorrentina)

La Pietra di Sorrento, nota come Pietra di Massa, è un litotipo locale assimilabile all'arenaria. Dal XIII secolo si hanno notizie di molteplici cave di pietra arenaria, indicata dai fabbricatori locali come Pietra di Massa, la quale è da considerare come *“il minerale che ha avuto una parte importante nei secoli scorsi nell'industria massese, (...) oggetto di commercio per tutto il Rinascimento. Per le sue qualità, cioè una certa rassomiglianza apparente al piperno, almeno in alcune delle sue varietà, e una maggior tenerezza per lo scalpello, era assai ricercata per rivestimenti di edifici, portali, sedili ed altre opere”* (Filangieri di Candida, 1910). Notevole fu dunque l'apporto offerto all'economia lubrense da questo materiale da costruzione, oggetto di un continuo e particolarmente fiorente commercio durante tutto il XVI secolo. Fin dalla fine del 1400, si hanno infatti notizie di importanti ordini di questo materiale, che veniva utilizzato soprattutto per farne ornamenti nelle più importanti fabbriche civili e religiose della capitale: da una serie di inediti documenti conservati presso l'Archivio del Tesoro di S. Gennaro a Napoli, risulta ad esempio che dal 1612 al 1618 una grande quantità di *pietre de Sorrento* furono trasportate presso la grande fabbrica del Duomo ed utilizzate presumibilmente per la realizzazione di ornate e stipiti di porte e finestre. Il commercio della pietra di Massa legato alla produzione di elementi decorativi decadde quasi completamente alla fine del Settecento, anche se ai primi anni del Novecento questa pietra continuò tuttavia ad essere largamente impiegata in loco per la pavimentazione, *“molto utile nella penisola per lastricar le strade, essendo insuperabile in tale ufficio per non essere sdruciolevole, specie durante la pioggia”* (Filangieri di Candida, 1910). Nonostante ciò, l'arenaria venne definita, con espressioni locali tipicamente antropomorfe, come *“pietra morta”*, in contrapposizione con la *“pietra viva”*, ovvero il calcare. I procedimenti che portavano all'estrazione della pietra di Massa erano lunghi e complessi: una volta realizzato lo sbancamento del terreno vegetale sovrastante per mettere a nudo la formazione rocciosa, si estraeva la roccia dall'alto verso il basso, procedendo ad un progressivo, lento e il più delle volte poco regolare distaccamento delle lastre o di blocchi lapidei di diverse dimensioni, ottenuto attraverso l'utilizzo di grossi cunei battuti in fori eseguiti alla base di questi ultimi. Più raramente la cava veniva coltivata mediante cantieri regolari, tracciando sul banco roccioso lunghi solchi verticali che isolavano i blocchi da staccare poi in successione. Si procedeva poi, il più delle volte in loco, alla lavorazione della pietra in elementi regolari, da utilizzare per le murature o per farne elementi decorativi.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

La più importante innovazione tecnologica nel settore dei marmi riguarda la produzione di pannelli multistrato (cosiddetti *“sandwich”*), composti da sottili lastre di pietra per rivestimenti che hanno uno spessore di soli 5 millimetri, anziché dei 3 centimetri tradizionali. Lo strato di pietra viene accoppiato, mediante collante chimico, ad un supporto di rinforzo a nido d'ape, che può essere di alluminio o plastica, a seconda del brevetto utilizzato per

produrlo. In questo modo si ottengono lastre per rivestimento dal peso notevolmente inferiore rispetto a quelle tradizionali, le quali possono rappresentare un vincolo strutturale dovuto all'elevato peso. Un prodotto disponibile in commercio è "Stone Veener", una lastra formata da sottilissimi strati di pietra uniti ad un tessuto in fibra di vetro impregnato con resina epossidica; il lato posteriore è disponibile in: tessuto in poliestere, applicabile su supporti non porosi (acciaio, vetro o ferro), da incollare con adesivi poliuretanici; tessuto in acrilico, applicabile su supporti porosi (legno), da incollare con colle viniliche. Questo prodotto è certificato con marcatura CE (Osservatorio Recycle & Legambiente, 2016). Oltre al marmo sottile per i rivestimenti, interni o esterni, si sta diffondendo la produzione di marmo sottile per pavimentazioni. In questo caso la piastrella in graniglia di pietra ha uno spessore di un centimetro ed è finalizzata a coprire parte del mercato dei pavimenti in ceramica. Un altro caso di innovazione è rappresentato dalle nuove tecnologie di finitura e lucidatura del marmo, che permettono di ottenere una pietra apparentemente diversa da quella tradizionale. L'innovazione viene introdotta dal settore della chimica, tramite la formulazione di nuove cere a base di polimeri, che depositano un sottile film polimerico sulla lastra e ne assicurano specularità e lucentezza. Altro tipo di innovazione riguarda il riciclo, e quindi il riutilizzo dei materiali lapidei. Uno dei prodotti disponibili è il "Carrara Block", un mattone ecologico realizzato con polvere di marmo proveniente da riciclo e sottoprodotti di cavatura, composto in gran parte da sabbie e granulati con l'aggiunta di cemento bianco. I mattoni possono essere utilizzati per la realizzazione di murature a "faccia vista" e per tamponamenti interni ed esterni. L'impatto ambientale è basso perché non necessita del processo di cottura in fornace, ma viene prodotto per sola compressione delle materie prime che lo compongono opportunamente umidificate. Anche questo prodotto è certificato con marcatura CE (Osservatorio Recycle & Legambiente, 2016).

5.1.7 Cocciopesto

DESCRIZIONE

Il Cocciopesto è un materiale artificiale costituito da polvere di mattone, ottenuto dalla frantumazione di laterizi e terrecotte. Viene impiegato insieme alla calce aerea per confezionare malte per murature ed intonaci. I prodotti a base di cocciopesto rappresentano una delle massime espressioni del recupero delle antiche costruzioni edili. Caratteristica dell'intonaco di cocciopesto è di essere colorato in pasta. Infatti, gli intonaci di cocciopesto presentano un colore rosato, dovuto al rosso degli aggregati di terracotta e al bianco della calce.



Fig. 7 Pavimento in battuto di Cocciopesto con inserti lapidei

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Il Cocciopesto è classificato come materiale pozzolanico poiché ricco di silice, nella forma di silicati di alluminio. Abbinato alla calce aerea produce silicati e alluminati idrati di calcio, attraverso la stessa reazione che interessa la pozzolana, ovvero la reazione pozzolanica. Consente dunque di confezionare malte a comportamento idraulico, leggere, traspiranti, e con interessanti indici di elasticità in riferimento alle murature sottoposte ad azione sismica. Inoltre, essendo il cocciopesto fortemente poroso, si ha la garanzia di una totale e profonda azione dell'anidride carbonica, a compimento del processo di carbonatazione della calce all'interno di manufatti di rilevante spessore. L'intonaco di cocciopesto è poi particolarmente adatto ad ambienti umidi grazie all'alta capacità traspirante e igrometrica della terracotta e della calce. In funzione della composizione granulometrica, il cocciopesto può presentare i seguenti valori di peso specifico (Buccellato SpA, Pozzolana e Cocciopesto. Recupero delle antiche tecniche costruttive per il restauro di strutture storiche e monumentali, 2018):

- Cocciopesto 0 – 1 mm: 1046 Kg/m³
- Cocciopesto 0 – 3 mm: 1296 Kg/m³
- Cocciopesto 0 – 6 mm: 1200 Kg/m³

IMPIEGHI

Il Cocciopesto trova applicazione nella realizzazione di rivestimenti impermeabilizzanti in vasche, cisterne, murature e pavimentazioni, nonché come malta per murature ed intonaci (sottofondi e finiture). L'utilizzo del cocciopesto risale al I secolo a.C. in epoca Romana. Vitruvio, nel suo trattato *"De Architectura"*, ne descriveva la fabbricazione e l'impiego. Con riferimento alla produzione di malte con calce e sabbia, egli affermava che *"se si vorrà poi aggiungere alla sabbia un terzo di frammenti di coccio, passati al setaccio, la composizione della malta sarà ancora migliore"*. Inoltre, Vitruvio raccomandava *"una sgrossatura (rinfazzo) di calce e cocciopesto al posto dell'arenato (calce e sabbia); ciò impedirà all'umidità che sale da terra di venire a contatto con l'arriccio ed il polimento (finitura)"*. Oltre che per l'intonaco, i Romani utilizzavano il cocciopesto per realizzare pavimentazioni in "battuto di terrazzo alla

veneziana”, all’interno delle ville romane. La pratica della preparazione di intonaci al cocchiopesto, come supporto per un arriccio superficiale in calce bianca, si è rilevata una costante compositiva ed operativa per oltre quindici secoli. Durante il Rinascimento, Palladio, sullo strato di sottofondo realizzato con intonaco di cocchiopesto, posava forti strati di arriccio in calce grassa rasata; così facendo, colonne, capitelli, volute, muri, fregi e cornici, diventavano forme pure. Il bianco assoluto dello stucco posto sull’intonaco di cocchiopesto diventerà tecnica universale, che trova radici profonde nella tradizione costruttiva rinascimentale. Era utilizzato anche come fondo per mosaici e decorazioni nell’epoca rinascimentale, come sottofondo per il “battuto di terrazzo alla veneziana” (tipo di pavimentazione), e come corpo negli stucchi a rilievo. Fino a tutto l’Ottocento si potevano ancora leggere voci di capitolato che rispecchiavano le antiche e immutate prescrizioni per la preparazione e la stesura degli intonaci: due strati di intonaco di calce e cocchiopesto per le facciate esterne ed i soffitti. Oggi, purtroppo, vanno scomparendo questi accorgimenti esecutivi maturati nel corso di un lungo processo di sperimentazione, la cui validità è dimostrata dalle centinaia di intonaci storici esistenti e visibili sugli edifici del passato.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

Il Cocchiopesto è un materiale ecologico, poiché consente di recuperare laterizi dismessi. Oggi il suo impiego è particolarmente adatto non solo al recupero del patrimonio edilizio storico, ma anche al settore della bioedilizia. È possibile ad esempio riutilizzare il cocchiopesto in maniera innovativa, abbinandola a leganti naturali a base di calce, con l’aggiunta di biotriturato (materiale di scarto da residui vegetali) per ottenere un blocco leggero e prestante. Questo tipo di prodotto è stato brevettato con il nome di “Coccio Blocco”, un materiale privo di cottura e a basso impatto ambientale, grazie principalmente all’uso di materiali di scarto e polvere di laterizio; l’assenza di cottura riduce inoltre i consumi energetici evitando le emissioni di CO₂. Viene usato per pareti interne in modo da garantire il benessere termo-igrometrico. Il riciclo della terracotta può avvenire anche con la realizzazione di lastre a base prevalente di cotto, il “Cottostone”, ottenuto dalla frantumazione di elementi d’argilla cotta di prima qualità con aggiunta di sabbia quarzifera, coloranti organici e resina di poliestere. Le lastre possono essere fornite in gran quantità, con caratteristiche controllate riguardanti il peso, gli spessori, la compattezza, l’uniformità del disegno e le tonalità cromatiche. Entrambi i prodotti sono certificati con marcatura CE e con i sistemi LEED e LCA (Osservatorio Recycle & Legambiente, 2016).

5.2 Puglia

Lo schedario dei materiali locali pugliesi riguarderà i seguenti materiali: Pietra di Apricena, Calcarenite di Gravina, Tufo Calcareo, Pietra di Trani, Pietra Leccese.

5.2.1 Pietra di Apricena

DESCRIZIONE

La Pietra di Apricena è una pietra proveniente dal bacino estrattivo di Apricena-Poggio Imperiale, territorio ubicato nel settore più occidentale del Promontorio del Gargano, in provincia di Foggia. Le condizioni geologiche del bacino estrattivo sono caratterizzate dalla presenza di rocce carbonatiche sulle quali poggiano più successioni di natura clastico-organogene. La

successione, nel complesso, è caratterizzata dalla ripetizione di strati di calcari e di calcari dolomitici, di ambiente marino. Le principali successioni, coltivate a cielo aperto in fossa, sono sostanzialmente tre, ed indicate con i nomi delle relative varietà merceologiche: “Successione del Fiorito”, “Successione del Biancone”, “Successione del Serpeggiante”.



Fig. 8 Particolare degli archi della Chiesa di San Pio realizzati in "Bronzetto"

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Le caratteristiche fisiche delle tre successioni, in sinesi, sono le seguenti (CITTAM, 2007):

- Successione del Fiorito: la successione è costituita da calcari a grana fine e finissima di colore beige-avana, con vene calcitiche. La naturale variabilità dei caratteri tessiturali nell'ambito dei diversi strati è all'origine delle numerose varietà ornamentali da esse ottenibili. Ne sono un esempio la varietà "Macchiettato" formato da strati con abbondanti resti fossili, e le varietà "Filetto rosso" e "Fiorito" dagli strati con frequenti discontinuità (fratture non strutturali) di colore rossastro, impregnate di ossidi di ferro;
- Successione del Biancone: si tratta di calcari a grana variabile da fine a media, di colore biancastro o beige-avana. Le varietà prevalenti sono il "Biancone" e il "Bronzetto";
- Successione del Serpeggiante: prende il nome dalla costante presenza di litotipi con distinta laminazione. La varietà nota come "Serpeggiante" presenta lamine con andamento piano-parallelo, mentre per andamenti differenti della laminazione le varietà assumono diverse denominazioni, quali ad esempio "Silvabella" (quando la laminazione è prevalentemente ondulata), "Ondagata" (quando le lamine appaiono deformate), "Filettato" (quando si riscontra una evidente variabilità di spessore delle lamine).

IMPIEGHI

In passato questo materiale è stato utilizzato per varie decorazioni della Reggia di Caserta ed in vari palazzi a Roma. Un notevole utilizzo si è avuto anche nel vicino comune di Foggia: nella

Chiesa del Carmine, nel Palazzo della Camera di Commercio, nel monumento dedicato ad Umberto Giordano, nella fontana a piazza Vittorio Veneto e nella vicina stazione ferroviaria, distrutta nei bombardamenti durante la seconda guerra mondiale. Anche nel resto della provincia di Foggia si possono incontrare molte opere costruite con questo materiale: la facciata della Chiesa di San Lorenzo delle Benedettine a San Severo, la fontana nella piazza Vittorio Emanuele I, la Casa Sollievo della Sofferenza e la facciata della Chiesa di Santa Maria delle Grazie a San Giovanni Rotondo.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

L'innovazione tecnologica per la Pietra di Apricena è rappresentata dalla Chiesa di San Pio a San Giovanni Rotondo, su progetto di Renzo Piano. Questa pietra, nella varietà del "Bronzetto", è stata impiegata nella Chiesa Superiore (divisa in tre ambienti: Aula Liturgica, cappella dell'Eucarestia, Sagrestia) ad uso strutturale per la costruzione del doppio ordine di archi, uno esterno e uno interno, composto da 17 archi portanti. Gli archi sono disposti secondo un andamento radiale partendo dal centro della struttura (in corrispondenza dell'altare), con campate fino a 45 metri di ampiezza, destinati a sorreggere la copertura generale di rame e legno lamellare. La struttura ad archi, completamente in pietra locale, presenta l'aspetto innovativo di essere stata realizzata con un sistema di precompressione a cavi scorrevoli (post-tesi). Nei conci lapidei sono stati dunque eseguiti dei fori, necessari all'infilaggio delle guaine per contenere i cavi da precompressione. Inoltre, i conci sono stati legati con una malta cementizia fibrorinforzata in acciaio. In questo modo la struttura è capace di assorbire, in caso di evento sismico, gli sforzi aggiuntivi. Quest'opera rappresenta così un esempio in cui un materiale tradizionale e antico viene utilizzato con una tecnica costruttiva di assemblaggio assolutamente innovativa, aprendo nuove prospettive per l'utilizzo della pietra nelle grandi costruzioni. L'elemento principale che ha dunque contraddistinto la realizzazione di questa idea progettuale è costituito dall'utilizzo della Pietra di Apricena, con la quale sono stati realizzati anche tutti i rivestimenti interni e le pavimentazioni, opportunamente tagliata in listelli e in lastre.

5.2.2 Calcarenite di Gravina

DESCRIZIONE

La Calcarenite di Gravina è una formazione calcarenitica, dunque di natura calcarea, affiorante nelle Murge con uno spessore di circa 20 metri ed è una delle unità costituenti il gruppo dei “Calcari e Calcareniti delle Murge e del Salento”. È composta da biocalcarenite bianco-giallognola a grana da fine a media, sedimentata in ambiente marino. L’area di estrazione riguarda il



Fig. 9 Cattedrale di Oria (Brindisi)

bacino estrattivo di Trani-Bisceglie-Ruvo-Fasano. All’interno di questa formazione si distinguono una serie di varietà, indicate anche con nomi dialettali o impropri: “Carparo”, “Cozzoso”, “Scorzo”, “Mollica”, “Zuppigno”, “Stagno”, “Chiumned”, “Chiumegnu”, “Renoso”, “Renosella”.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

La Calcarenite di Gravina comprende tutte le varietà che presentano le seguenti proprietà fisico-meccaniche (Cherubini, Reina, & Bruno, 2007):

- Resistenza a compressione monoassiale compresa tra 2 e 9 MPa
- Resistenza a trazione compresa tra 0,17 e 0,76 MPa
- Peso medio dell’unità di volume del solido pari a 27,0 kN/m³
- Peso medio dell’unità di volume del secco pari a 16,0 kN/m³
- Porosità compresa tra l’11% e il 49%
- Coefficiente di imbibizione compreso tra il 15% e il 37%

IMPIEGHI

La Calcarenite di Gravina è tagliata in blocchetti utilizzati per l’edilizia, mentre la parte con caratteristiche fisico-meccaniche scadenti viene trasformata in “Tufina” e utilizzata come inerte. Largo impiego è stato fatto nell’edilizia Ottocentesca dei borghi delle città, realizzando in parte o completamente i centri storici del territorio pugliese, come testimoniano le architetture monumentali, sacre e militari. Un esempio è la Cattedrale di Oria in provincia di Brindisi, in cui la facciata è stata realizzata in “Carparo” locale, una delle varietà della Calcarenite di Gravina.

5.2.3 Tufo Calcareo

DESCRIZIONE

Il Tufo Calcareo si estrae dalla Calcarenite di Gravina, nel bacino estrattivo di Trani-Bisceglie-Ruvo-Fasano. È una roccia calcarea detritico-organogena, a grana da fine a media, di colore chiaro (bianco-giallastro) e sedimentata in ambiente marino. È costituita da frammenti di gusci di macrofossili e da microfossili in una componente di fondo detritica. Si differenzia dalla Calcarenite di Gravina per le diverse caratteristiche fisiche e meccaniche, in particolare presenta valori più elevati di resistenza a compressione e di peso dell'unità di volume. Due sono le varietà di maggior pregio: il "Mazzaro gentile" e il "Mazzaro duro".



Fig. 10 Castello di Palagiano (Taranto)

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Si riportano le proprietà fisico-meccaniche delle due varietà di "Mazzaro" riscontrabili in letteratura (Cherubini, Reina, & Bruno, 2007).

Mazzaro gentile:

- Resistenza a compressione: 21,98 MPa
- Peso dell'unità di volume del solido: 27,8 KN/m³
- Peso dell'unità di volume del secco: 21,9 KN/m³
- Porosità: 21,9%
- Coefficiente di imbibizione: 51,1%

Mazzaro duro:

- Resistenza a compressione: 32,35 MPa
- Peso dell'unità di volume del solido: 30,3 KN/m³
- Peso dell'unità di volume del secco: 25,2 KN/m³
- Porosità: 17,2%
- Coefficiente di imbibizione: 32,2%

IMPIEGHI

Come per la Calcarenite di Gravina, anche il Tufo Calcareo è stato largamente impiegato per l'edificazione dei centri storici e rurali delle città pugliesi nonché nell'edilizia Ottocentesca, sia come pietra da costruzione per murature sia per rivestimenti a "faccia vista". Un esempio è il Castello di Palagiano in provincia di Taranto, realizzato in Tufo "Mazzaro".

Un altro impiego riguarda una tecnica tradizionale pugliese, nello specifico dell'area salentina, che prevede l'uso del Tufo Calcareo per la realizzazione di coperture con il sistema della "volta a stella". L'origine di queste volte è riferibile al periodo barocco in terra leccese, la cui denominazione "a stella" deriva specificamente dalla conformazione stellata che le curve

spaziali di intersezione, tra la calotta sferica e le porzioni di unghie e fusi cilindrici, formano nella loro congiunzione. Queste volte sono il risultato della “composizione” di tutte le volte canoniche: a botte, a vela, a crociera e a padiglione. La sua tecnica costruttiva è racchiusa nei saperi dei pochi mastri costruttori che tentano di tramandarne l’arte alle nuove generazioni sempre meno interessate ai processi lenti del costruire. In tal senso, la Regione Puglia promuove progetti formativi per la trasmissione e conservazione delle conoscenze tecniche e applicative necessarie alla realizzazione di strutture con sistemi voltati in Tufo Calcareo. Infine, dalla frantumazione di blocchi di Tufo Calcareo, si ottiene una particolare sabbia calcarea denominata “Tufina”, impiegata come inerte nel confezionamento di malte a base di grassello di calce o cemento.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

L’uso della malta di tufina è oggi legata alla problematica riguardante la risoluzione delle patologie umide che interessano le murature realizzate con materiali lapidei. Le alterazioni dei materiali lapidei di natura chimica, fisica e biologica, sono dovute nella maggior parte dei casi alla presenza di acqua; la presenza di umidità nelle murature, in particolare in quelle tradizionali dove il sistema “mattoni-malta-intonaco” è già in equilibrio ambientale instabile a causa delle aggressioni di agenti inquinanti atmosferici, produce una serie di effetti dannosi. Alcune attività sperimentali, in corso presso l’IRIS-CNR di Bari, hanno mostrato come gli intonaci tradizionali riescono a contrastare il fenomeno di risalita d’acqua in modo più efficace rispetto a quanto conseguibile con l’uso di intonaci confezionati con malte idrauliche o cementizie. Gli intonaci tradizionali sono sostanzialmente quelli confezionati con malta di grassello, cemento e tufina. Queste malte, utilizzate sia per murature che per intonaci con diverse proporzioni dei componenti, sono ancora largamente diffuse nella pratica costruttiva regionale. È possibile ad esempio confezionare malte con inerte costituito al 100% di tufina, oppure malte con il 50% di sabbia e il 50% di tufina (Stella, 1991).

Nel settore della bioedilizia sono disponibili alcuni prodotti a base di tufina. Lo “Stucco di Tufina”, ad esempio, è un rivestimento naturale a presa aerea per intonaci finali interni ed esterni, ecologico e traspirante, e resistente alle muffe. Questo prodotto è composto da grassello di calce e da aggregati calcarei porosi come il tufo, selezionato e vagliato a secco per una granulometria molto fine dell’ordine dei 0,5 mm. Il tufo, dopo essere amalgamato con il grassello di calce, viene nuovamente vibro vagliato in umido fino a ottenere una pasta bianca ed omogenea con una granulometria molto fine, non superiore a 0,6 mm. Un altro prodotto confezionato con tufina è commercializzato con il nome di “Malta Grossa”, ovvero una malta utilizzabile sia per la messa in opera delle murature (eventualmente con aggiunta di cemento) che per la realizzazione del primo strato di intonaco sopra il rinzaffo (De Filippis & De Cillis, 2018) (Zambaiti, 2018).

5.2.4 Pietra di Trani

DESCRIZIONE

La Pietra di Trani è una pietra estratta dalle formazioni calcaree affioranti nei dintorni di Trani, nel bacino estrattivo di Trani-Bisceglie-Ruvo-Fasano ed appartenente al gruppo dei “Calcari e Calcareniti delle Murge e del Salento”. La coltivazione riguarda principalmente la zona di Trani e buona parte delle Murge settentrionali. Le varietà commercialmente cavate fra Trani e Bisceglie sono il “Serpeggiante”, il “Bronzetto”, il “Filettato” e il “Fiorito”. Nel settore sud-est di Trani invece, le varietà commerciali più pregiate estratte sono il “Livido”, il “Biancone” e il “Cioccolato”.

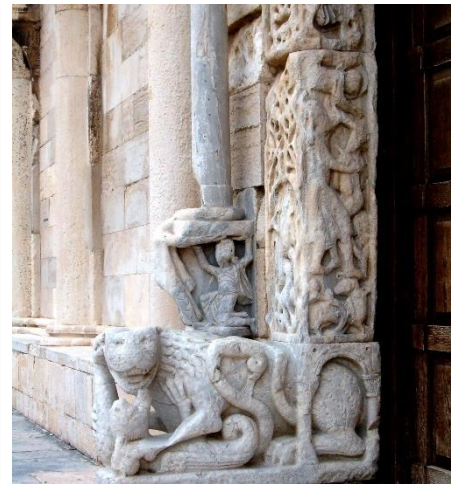


Fig. 11 Particolare della Cattedrale di Trani

Nel comprensorio di Ruvo di Puglia, inoltre, si ricava una varietà denominata “Perlato svevo”, il cui banco calcareo (circa 8 metri) costituisce la parte superiore del Calcarea di Bari, prossima al limite stratigrafico con il Calcarea di Altamura. Nel complesso si tratta di calcari bioclastici dolomitizzati a grana grossolana, compatti, ben ricristallizzati con cemento di natura calcarea. Le tonalità di colore (verde o giallo-rosato) sono conferite alla roccia da materiali argillosi allo stato diffuso o concentrato nella massa calcarea.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Le varietà merceologiche vengono distinte in base alle principali caratteristiche che i livelli coltivati presentano, e sono così denominate (CITTAM, 2007):

- A seconda del colore: “Biancone”, “Bronzetto”, “Livido”, “Gialletto”, “Aavorio”;
- Per il contenuto in fossili, in conseguenza delle dimensioni grosse, medie e piccole: “Cioccolato”, “Perlato”, “Moschettato”;
- Per la presenza di discontinuità (fratture non strutturali) impregnate di ossidi di ferro: “Filetto rosso”, “Filrosato”, “Filettato”;
- Per la distinta laminazione: “Serpeggiante”, “Ondagata”, “Silvabella”.

IMPIEGHI

La Pietra di Trani viene impiegata sia come materiale da costruzione sia per rivestimenti e pavimenti. Due esempi di utilizzo storico della Pietra di Trani sono rappresentati dalla Cattedrale di Ruvo in provincia di Bari e dalla Cattedrale di Trani. Questa pietra non è stata usata solo per costruzioni ed opere d'arte locali, ma è stata impiegata, ad esempio, per il Monumento ai Caduti della prima guerra mondiale, progettato da Cesare Bazzani e realizzato nel 1932 nel piazzale Vittoria della città di Forlì. Altro uso non locale riguarda la Casa del Fascio realizzata a Como, che rappresenta uno degli edifici più interessanti del Razionalismo italiano, in cui la Pietra di Trani è stata utilizzata come marmo per rivestimenti interni.

5.2.5 Pietra Leccese

DESCRIZIONE

La formazione della Pietra Leccese comprende vari litotipi conosciuti e impiegati sin dall'antichità come pietre da costruzione e ornamentali. Essa è una calcarenite marnosa, organogena, di colore variabile dal bianco-giallastro al giallo-verdastro. Lo scheletro mostra oltre ad una componente calcarea detritica, anche una componente terrigena; la presenza di argilla rende questa pietra particolarmente lavorabile. I principali affioramenti si rinvencono in modo discontinuo nella parte centro-meridionale del Salento. Le varietà litologiche commercializzate hanno caratteristiche fisico-meccaniche, struttura e colore, nettamente differenti. I due principali centri estrattivi sono ubicati nel distretto di Lecce e in quello di Cursi. La "Pietra Gentile" è la varietà più cavata, che occupa la parte centrale del bacino in cui è sedimentata la Pietra Leccese, mentre le altre varietà ("Pietra Bastarda", "Piromàfo", "Pietra Saponara" e "Pietra Cucuzzara") sono presenti soprattutto ai margini. Altre varietà cavate sono "Leccisu", "Dura", "Bianca", "Dolce" e "Gagginara".



Fig. 12 Basilica di Santa Croce (Lecce)

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

La Pietra Leccese comprende tutte le varietà che presentano le seguenti proprietà fisico-meccaniche (Cherubini, Reina, & Bruno, 2007):

- Resistenza a compressione monoassiale compresa tra 10 e 24 MPa
- Resistenza a trazione compresa tra 0,8 e 7 MPa
- Valore medio del peso dell'unità di volume dei costituenti solidi pari a 27,5 kN/m³
- Valore medio del peso dell'unità di volume del secco pari a 17,0 kN/m³
- Porosità compresa tra il 31% e il 45%
- Coefficiente di imbibizione compreso tra il 12% e il 21%

Si descrivono di seguito le caratteristiche delle principali varietà (CITTAM, 2007):

- Pietra Gentile: varietà di colore giallo paglierino, a grana omogenea e piuttosto fine, molto tenera e facilmente lavorabile. A causa della sua porosità e della non buona cementazione risulta poco resistente alle alterazioni causate dagli agenti atmosferici;
- Pietra Bastarda o "Mazzara": varietà a tessitura eterogenea, più dura e meno lavorabile della precedente;
- Pietra Saponara: varietà biancastra, molto tenera e spiccatamente igroscopica;
- Pietra di Cursi: varietà molto simile alla "Pietra gentile" da cui si differenzia principalmente per maggiore resistenza agli agenti atmosferici, dovuta ad una più elevata durezza;
- Piromàfo: varietà che occupa uno dei livelli più alti della formazione ed è contraddistinta da una grana omogenea e dal caratteristico colore grigio-verdastro.

IMPIEGHI

La Pietra Leccese è l'elemento distintivo del Barocco leccese, che grazie alla qualità di questa pietra ebbe la sua massima diffusione nel Salento. In particolare, la varietà della "Pietra Gentile" rappresenta il materiale lapideo caratteristico dell'architettura di quest'epoca. Esempi significativi sono i fregi, i capitelli, i pinnacoli e i rosoni che decorano molte facciate dei palazzi e delle chiese di Lecce, come ad esempio il Palazzo dei Celestini e l'adiacente Chiesa di Santa Croce, la Chiesa di Santa Chiara e il Duomo, e le colonne della facciata della Cattedrale di Otranto.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

La natura stessa della Pietra Leccese la rende poco resistente all'usura del tempo, all'azione meccanica degli agenti atmosferici e all'umidità di risalita del terreno, a causa dell'elevata porosità e permeabilità all'acqua che causano la degradazione e lo sfaldamento. Una tipica forma di degrado è quella della "alveolizzazione", causata dall'azione disgregatrice esercitata dalla pressione di cristallizzazione dei sali all'interno dei pori del materiale lapideo. Un altro punto debole di questi lapidei è la formazione di "croste nere" causate dal maggiore inquinamento atmosferico in ambiente urbano, con effetti negativi sia estetici che fisici. Tra i motivi che hanno storicamente ritardato la diffusione dei marmi al di fuori del territorio regionale, deve considerarsi la carente documentazione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, che rispondesse alle esigenze dei tecnici e dei costruttori.

Per rendere la Pietra Leccese più resistente agli agenti atmosferici, i maestri scultori dell'epoca barocca usavano trattare la roccia con del latte. Il blocco di Pietra Leccese veniva spugnato o immerso interamente nel liquido, e il lattosio, penetrando all'interno dei vuoti, creava uno strato impermeabile che si riteneva potesse preservarla dal precoce degrado. In realtà tale tipologia di trattamento non solo non era duraturo nel tempo, ma produceva spesso ulteriori danneggiamenti, quali fessurazioni superficiali, causati dalla formazione di composti metallici sotto crosta, danneggiando i manufatti.

La soluzione innovativa ad un problema così antico si chiama "Hybrid", ovvero un sistema protettivo ibrido organico/inorganico (O-I), nanostrutturato, fotopolimerizzabile, e traspirante, sviluppato nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento e tutelato da brevetto europeo. Il prodotto è nanostrutturato poiché le sue componenti hanno dimensioni nanometriche, impedendo così di alterare il colore naturale della pietra ed è fotopolimerizzabile, ovvero indurisce dopo poche ore dall'applicazione, per effetto della luce solare. Il prodotto è un ibrido organico/inorganico, ovvero è costituito da una componente organica a base di resine metacriliche, e una inorganica a base di silice. Viene applicato in forma liquida e solidifica in poche ore per effetto dell'azione della luce, formando così un film protettivo che conferisce proprietà di idrofobicità alla pietra, impedendo l'ingresso di acqua e altre sostanze che contribuiscono alla sua degradazione. Inoltre, grazie alla particolare struttura chimica, l'agente protettivo è traspirabile, favorendo la fuoriuscita del vapore acqueo intrappolato all'interno (De Vitis, 2015).

5.3 Sardegna

Lo schedario proposto per i materiali locali della Sardegna sarà così composto: Granito, Basalto, Trachite “*auctorum*”, Pietra Cantone, Terra cruda: *Adobe*.

5.3.1 Granito

DESCRIZIONE

Dal punto di vista commerciale, con il termine “granito” viene indicata un’ampia classe di rocce anche differenti dal punto di vista petrografico comprendendo rocce ignee intrusive ed effusive, rocce sedimentarie ed anche metamorfiche. In questa classe rientrano rocce ampiamente utilizzate in edilizia così come in architettura; sono rocce compatte, abbastanza dure (6-7 scala di Mohs), lucidabili, più difficilmente lavorabili dei marmi, e hanno buone proprietà meccaniche che conferiscono ottime caratteristiche di resistenza all’usura e all’esposizione esterna. Dal punto di vista strettamente petrografico, il granito è una roccia

intrusiva acida a struttura granulare composta principalmente da feldspato potassico, quarzo e plagioclasti in proporzioni variabili, e da silicati femici subordinati. In questa definizione rientrano i graniti della Sardegna compresi nell’accezione più ampia di “rocce granitoidi” impiegata dagli addetti ai lavori per indicare l’insieme delle rocce ignee intrusive a struttura granulare da acida a neutra. I graniti sardi affiorano principalmente nell’area nord-orientale dell’isola, nella subregione della Gallura in provincia di Sassari, coltivati ed estratti nei cosiddetti “paesi del granito”. In ambito regionale si riconoscono quattro bacini estrattivi, ovvero aree nelle quali sono presenti litotipi omogenei dal punto di vista petrografico, che si estendono nella Sardegna centro-settentrionale: il bacino di Arzachena-Luogo Santo, dal quale si estrae il Granito Rosa; il bacino di Tempio Pausania-Calangianus, dal quale si estrae il Granito Ghiandone; il Bacino Buddusò-Alà Dei Sardi, dal quale si estrae il Granito Bianco Sardo; ed il bacino di Ovodda, con l’estrazione del Granito Grigio di Ovodda. È possibile ipotizzare che su siti storici di estrazione si sia consolidata la distribuzione attuale degli impianti di sfruttamento e che questi stessi si siano gradualmente sviluppati in relazione alle crescenti richieste del mercato sia interno che estero.



Fig. 13 Residenza di fattura rustico-elegante realizzata interamente in granito

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

I graniti sono pregiati materiali da costruzione dotati di elevata compattezza e resistenza a compressione, non gelive, perfettamente lucidabili.

Si riportano di seguito alcune proprietà fisico-meccaniche dei graniti sardi (Regione Autonoma della Sardegna, Il manuale tematico della pietra, 2009):

- Resistenza a compressione: 60 – 250 MPa
- Resistenza a flessione: 9,80 – 16,90 MPa
- Porosità: 1 – 5 %
- Peso specifico: 2500 – 3000 Kg/m³
- Conducibilità termica: 3 – 4 W/mK

Di seguito si descrivono le caratteristiche delle principali varietà di granito, il cui aspetto estetico è largamente condizionato dalla composizione mineralogica (Regione Autonoma della Sardegna, Il manuale tematico della pietra, 2009):

- Granito Rosa: granito rosato a grana medio-grossa. La composizione mineralogica è caratterizzata da un rapporto medio plagioclasio/K-feldspato, in quantità pressoché equivalente, con modesti contenuti in femici. Il K-feldspato risalta per il colore rosato di fenocristalli spesso isorientati con dimensioni di 1-2 cm;
- Granito Ghiandone: granito rosato a grana medio-grossa. Sono più acidi dei primi e presentano la stessa composizione mineralogica, con fenocristalli di dimensioni maggiori;
- Granito Bianco Sardo: i graniti estratti da Buddusò sono biancastri, a grana grossa, con composizione mineralogica data da quarzo, plagioclasii, feldspato potassico e femici subordinati. I graniti estratti invece da Alà Dei Sardi sono di colore generalmente grigio, a grana media e spesso a tessitura orientata, con frequenti inclusi femici microgranulari. Dal punto di vista macroscopico, mostrano ampia variabilità legata soprattutto alla quantità e dimensione del K-feldspato (anche 2-10 cm).

IMPIEGHI

Numerosi resti di manufatti, trovati soprattutto nell'isola di Santo Stefano nella Sardegna settentrionale, dimostrano come nel Neolitico Medio, IV millennio a.C., venisse già utilizzato il granito sardo. I Romani ne fecero grande uso sostituendolo a quello egiziano, sia per motivi economici che estetici, creando una importante rete di trasporto dalle cave della Gallura verso i porti laziali. Dal Medioevo fino all'Età moderna il granito, lavorato in conci dai maestri scalpellini, fu utilizzato soprattutto nella Gallura, così come è testimoniato dai cosiddetti "paesi del granito". Numerose sono infatti le testimonianze, in questa regione di piccoli scavi sebbene fosse consuetudine lavorare i trovanti sparsi nel territorio come è testimoniato dalla presenza di blocchi parzialmente lavorati o squadrati. Il commercio organizzato del granito inizia solo nella seconda metà dell'Ottocento con la "Società Esportazione Graniti Sardi" con sede a Genova, che promuoveva coltivazioni nella zona di Cala Francese (isola de La Maddalena). La società iniziò con una piccola attività di scavo e lavorazione, dapprima per uso locale, sviluppando la propria attività per circa 50 anni con cavaatori e scalpellini sardi, toscani, lombardi ed emiliani, imponendo il prodotto sul mercato nazionale ed estero. Alla fine degli anni '30 questa Società ridusse l'attività, e per molti anni la produzione fu limitata per il solo

mercato locale. Solo nel 1960 l'attività estrattiva del granito viene ripresa con l'apertura di nuove cave e in pochi anni diviene una realtà economica importante per l'isola tanto che per la prima volta la Regione Sardegna elabora un regolamento per la coltivazione dei materiali lapidei. Con il granito estratto dalle cave storiche venivano realizzati prevalentemente prodotti quali cantonetti, cubetti e lastre. Il "cantonetto" ha forma parallelepipedica ed è il manufatto a spacco storicamente più noto perché da sempre in Sardegna utilizzato per la costruzione di edifici, di chiese, di muri di recinzione e di contenimento. Vengono ancora oggi realizzati, per ricordare l'antica lavorazione, prodotti a spacco da impiegare nella costruzione di pavimenti stradali e di lastre regolari di varia pezzatura per la realizzazione di pavimentazioni e rivestimenti in lavorazioni lisce, bocciardate, fiammate e sabbiate.

5.3.2 Trachite "auctorum"

DESCRIZIONE

La trachite è una roccia vulcanica effusiva caratterizzata da una struttura porfirica con fenocristalli di feldspato potassico. È composta principalmente da feldspato potassico e plagioclasio. "Trachite" è il termine che anticamente veniva usato per indicare delle rocce chiare e ruvide, affioranti in Grecia nell'antica Tracia. "Trachite auctorum" è invece il termine che in passato



Fig. 14 Casa realizzata con trachite di Serrenti (Sud Sardegna)

accomunava un'ampia varietà di vulcaniti, da acide a neutre, presenti nella Sardegna centrale e centro-settentrionale, meridionale (Serrenti) e sud-occidentale. Questo termine è oggi ancora in uso in campo commerciale per identificare questa ampia varietà di prodotti di natura vulcanica, di consistenza molto diversa (lave, ignimbriti, piroclastiti), facilmente lavorabili, con porosità variabile e caratteristiche cromatiche molto diverse e di intensità variabile: rosa, rosso, giallo, grigio, grigio scuro, verde, verde-azzurro. Le trachiti sarde di origine piroclastica sono composte da un complesso di frammenti tra loro variamente saldati, e quindi con porosità residua, dispersi in una matrice a carattere prevalentemente amorfo, variamente alterata ed in particolare argillosa. Derivano dal materiale vulcanico emesso in atmosfera, spesso per altezze considerevoli, in eventi di tipo esplosivo. Una varietà di trachite molto apprezzata è la "Pietra di Serrenti", estratta nell'omonimo comune della provincia del Sud Sardegna.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Le trachiti sarde sono dotate di discreta resistenza a compressione (20-100 MPa) e resistono bene al gelo se non alterate. La porosità è compresa tra il 10% e il 40%. La principale alterazione delle trachiti di natura piroclastica riguarda la formazione di argille. Queste neoformazioni hanno una rilevante importanza tecnologica, in quanto le argille manifestano un comportamento espansivo al succedersi dei normali cicli igrotermici ambientali, portando a fenomeni di degrado del materiale lapideo in opera.

Si riportano di seguito alcune proprietà fisico-meccaniche della Pietra di Serrenti (Primavori, 2011):

- Resistenza a compressione: 93 MPa
- Resistenza a flessione: 18,9 MPa
- Porosità: 18 %
- Peso specifico: 2204 Kg/m³

IMPIEGHI

Grande impiego ne è stato fatto in periodo Romano come confermano per esempio i resti delle antiche Terme di Fordongianus realizzate con grossi massi squadrati di trachite grigia e il ponte a sette arcate sul fiume Tirso realizzato in blocchi di trachite sulle basi di un antico ponte. Importanti testimonianze dell'utilizzo di queste vulcaniti in campo edile-architettonico si possono ancora osservare nei centri storici di molti paesi della Sardegna per la realizzazione di diverse componenti architettoniche dell'edilizia pubblica e privata quali conci, pilastri, capitelli, architravi, stipiti e statue. Il principale centro produttivo per uso ornamentale e da costruzione è a Fordongianus nell'Oristanese e solo di recente è ripresa anche a Serrenti (Sud Sardegna) l'attività estrattiva. Da quest'ultimo sito storico, attualmente rivalutato, proviene la cosiddetta Pietra di Serrenti, una trachite dal colore grigio chiaro, scolpibile e facile allo spacco; è stata coltivata e lavorata da abili scalpellini fin dal XIX secolo nella cava di Monte Atzorcu e utilizzata per realizzare i caratteristici portali delle case di Serrenti e le case stesse, il mercato coperto di Cagliari, il Palazzo di Giustizia, parte dei portici di via Roma a Cagliari, le chiese di San Francesco e San Paolo, piazze e monumenti in tutto il Campidano nella Sardegna meridionale.

5.3.3 Basalto

DESCRIZIONE

I basalti sono rocce vulcaniche effusive con struttura da microcristallina a vetrosa, talora porfirica, di colore molto scuro, fino al nero. Presentano grana fine con rari fenocristalli di plagioclasio e minerali femici. Il magma dal quale si formano i basalti in seguito alla sua solidificazione, presenta oltre ad una fase solida cristallina ed a quella fluida viscosa, dalla quale si originerà la fase amorfa, anche una componente aeriforme, costituita in prevalenza da acqua (vapore) e talvolta da anidride carbonica (ma numerosi sono anche gli altri gas). Al rilascio nell'atmosfera di questi gas in fase di solidificazione del magma, si deve la presenza macroscopica di bolle nel materiale (basalto vescicolare), talvolta chiaramente orientate nel verso dello scorrimento della colata. L'area di estrazione del basalto è localizzato principalmente nella provincia di Oristano, nei cosiddetti "paesi del basalto" che sono i centri



Fig. 15 Apparecchiatura muraria ad elementi di basalto in una tipica abitazione locale (Ghilarza, Oristano)

di Norbello, Ghilarza, Sedilo, Abbasanta, Santulussurgiu, Cuglieri, Seneghe, Bonacardo, Scano Montiferro.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

I basalti sono rocce molto tenaci, resistenti e dotate di elevato peso di volume. La caratteristica macroporosità comporta una certa penalizzazione delle prestazioni meccaniche (che rimangono comunque ben sopra le ordinarie necessità) ed è un fattore che amplia la superficie di alterazione per esposizione alle acque aggressive. La presenza di questi difetti ne favorisce viceversa la lavorabilità.

Si riportano di seguito alcune proprietà fisico-meccaniche dei basalti sardi (Regione Autonoma della Sardegna, Il manuale tematico della pietra, 2009):

- Resistenza a compressione: 30 – 200 MPa
- Resistenza a flessione: 20,40 – 23,7 MPa
- Porosità: 15 – 30 %
- Peso specifico: 2700 Kg/m³
- Coefficiente di conducibilità termica: 3,5 W/mK

IMPIEGHI

Il basalto è stato largamente impiegato in Sardegna fino agli anni '50 in ambito edile ed architettonico, e rappresenta il materiale d'eccellenza per la realizzazione di pavimentazioni e per l'edilizia abitativa. In seguito alla diffusione sul mercato di nuovi materiali il suo utilizzo si ridusse notevolmente, ma oggi il basalto vive una fase nuova e riscuote un rinnovato interesse per la produzione di elementi di arredo urbano (lastricati, cordoli, panchine, dissuasori, etc.) e la realizzazione di ornamenti per costruzioni pubbliche e private, specialmente per le operazioni di recupero dei centri storici. Inoltre, tutte le rocce di tipo basaltico sono sempre state diffusamente impiegate, e lo sono anche oggi, per la produzione di granulati destinati al confezionamento di conglomerati cementizi e bituminosi. Forniscono materiale per lastricati e pavimentazioni stradali, pietrisco per massicciate stradali e ferroviarie, e blocchi per scogliere. Inoltre, sono materia prima per la produzione di lana di roccia e lana di vetro, impiegati come isolanti. Esistono poche cave in grado di fornire un materiale idoneo alla produzione industriale in lastre; la maggior parte del materiale è ottenuto dal reperimento e dalla successiva lavorazione dei cosiddetti "trovanti", ovvero massi di una certa dimensione già naturalmente isolati dalle bancate di affioramento.

5.3.4 Pietra Cantone

DESCRIZIONE

La Pietra Cantone è un calcare notevolmente argilloso più o meno arenaceo da deposizione sottomarina, di colore giallastro, mediamente cementato e piuttosto tenero, che si lascia modellare con relativa facilità. È costituita da calcite microcristallina, con varie percentuali di argilla, clasti di calcare organogeno, granuli di quarzo, feldspati e minerali femici. Sono presenti, nella composizione chimica della pietra, anche sali marini, calcolati in cloruro di sodio con tenori fino all'1,2%. Gli affioramenti più estesi di questa pietra si trovano alla base dei colli di Cagliari, in banchi ben definiti, dello spessore di 30-40 metri, sottostanti ad altri due tipi di calcare ben presenti a Cagliari, ovvero il Tramezzario (calcare debolmente argilloso) e la Pietra Forte (calcare molto duro, molto puro, utilizzato come pietra ornamentale, poco assorbente). La Pietra Forte costituisce, normalmente, le zone sommitali delle colline calcaree, mentre la Pietra Cantone è alla base della formazione. Si ricordano i principali siti di estrazione della città di Cagliari, quali l'Anfiteatro romano, Tuvixeddu e Tuvumannu, la fossa di San Guglielmo (cava medievale da dove furono estratti gran parte dei materiali usati per la costruzione della cinta muraria della città di Cagliari), e i numerosi piccoli scavi presenti in diverse parti della città. Anche nella città di Sassari era abbondante la presenza di questa pietra. In particolare, la Pietra Cantone è stata estratta ininterrottamente dal XIV secolo fino alla seconda metà del XIX secolo in numerose cave esistenti nell'area limitrofa della città di Sassari.



Fig. 16 Conci di marna calcarea in opera a Villanovaforru (Sud Sardegna)

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

La Pietra Cantone, facile da modellare, non presenta delle buone caratteristiche di resistenza a causa della rilevante componente argillosa che la rende molto tenera, particolarmente igroscopica e molto degradabile all'aria. Capace di assorbire, in quantità notevoli, anche attraverso gli intonaci traspiranti, il vapore acqueo contenuto nell'aria umida. Questo vapore, all'interno della pietra, si condensa presentandosi sulla superficie come macchie umide sature di sali. Questo fenomeno può essere ciclico ed è particolarmente favorito anche dalla scarsa circolazione dell'aria nei locali, come avviene ad esempio nelle abitazioni della zona del Corso Vittorio Emanuele di Cagliari. Questo fattore assume importanza soprattutto nei climi umidi com'è quello della città di Cagliari, in cui i processi di degradazione di tale roccia procedono con relativa rapidità interessando anche i blocchi utilizzati nella realizzazione dei muri portanti degli edifici. La Pietra Cantone può dunque presentarsi in maniera differente ed avere valori di resistenza molto diversi a seconda della percentuale di argilla presente: se è ben imbibita d'acqua (anche 200 litri di acqua in 1 m³ di muratura) è totalmente scadente tanto da poter essere assimilata ad un terreno sciolto, ma quando la roccia è asciutta e sana presenta delle accettabili caratteristiche meccaniche (Buccellato SpA, Pietra cantone, 2018).

Di seguito si riportano le principali proprietà fisico-meccaniche dei calcari impiegati nei centri storici della Sardegna (Regione Autonoma della Sardegna, Il manuale tematico della pietra, 2009):

- Resistenza a compressione: 20 – 60 MPa
- Porosità: 15 – 40 %
- Peso specifico: 1900 Kg/m³
- Conducibilità termica: 1,5 W/mK

IMPIEGHI

La Pietra Cantone è conosciuta con il termine sardo “Tuvuru”, che vuol dire vuoto, poroso, cavernoso, ed impropriamente tradotto “tufo”, denominazione più nota ai cagliaritari. Il nome “Cantone” deriva invece dal fatto che in passato questo materiale, facilmente lavorabile, veniva utilizzato nei vecchi edifici dei quartieri storici della città di Cagliari per sagomare i cantonetti usati nell’edilizia antica. È infatti il materiale da costruzione massicciamente impiegato nei vecchi edifici dei quartieri storici della città. Le città di Cagliari e Sassari hanno in passato fatto largo uso di lapidei noti come Pietra Forte, Pietra Cantone, Tramezzario, Pietra Columbrina, appartenenti alla stessa formazione calcarea della quale costituiscono le varie stratificazioni. Questi lapidei sono stati impiegati in ambito edile ed architettonico sia come elementi costruttivi e pietre ornamentali, sia come materia prima per la realizzazione di inerti e leganti. A Cagliari sono numerosi gli esiti delle lavorazioni di estrazione iniziati già in epoca Romana e conclusi solo nell’immediato dopoguerra, i cui prodotti sono stati ampiamente utilizzati per costruire il centro storico della città. A Cagliari la Pietra Forte, la pietra più pregiata, è stata utilizzata per le opere a “faccia vista” e per portali, mentre la Pietra Cantone è stata prevalentemente destinata all’uso edilizio. Anche l’architettura del centro storico di Sassari è stata realizzata prevalentemente con rocce carbonatiche, quali la Pietra Cantone e i calcari marnosi, utilizzati sia per la realizzazione di facciate a vista o intonacate sia per decoro. L’abbondante utilizzo della Pietra Cantone e del calcare marnoso anche nel Sassarese è dovuto alla loro grande disponibilità in tutto il territorio e alla facilità di lavorazione. Al contrario, gli affioramenti di Pietra Forte, utilizzata come elemento portante e decorativo, sono scarsi e limitati all’area di Sant’Anatolia. Qui esistevano siti di estrazione completamente cancellati dalla recente urbanizzazione delle zone.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

Per le strutture più o meno prossime alla riva, dove il concetto di prossimità deve essere esteso a diverse decine di chilometri dalla riva, i meccanismi degenerativi connessi con l’atmosfera marina sono di considerevole rilevanza. I venti spirati dal mare, trasportano sia particelle solide fortemente abrasive, che i sali spruzzati nell’aria dalle onde, trasformati in aerosol. Questi sali che si depositano sulle superfici edili, stabilizzandosi nelle porosità, producono cristalli che si accrescono progressivamente, determinando stati sollecitativi in grado di indurre labilizzazione dei leganti, distacchi, fessurazioni e fratture.

Le strutture in Pietra Cantone possono essere risanate per essere lasciate a “faccia vista”. L’intervento di risanamento, in questo caso, è particolarmente delicato e deve essere realizzato a regola d’arte. In fase di risanamento per il riutilizzo “a vista” della pietra bisogna prendere in considerazione alcune caratteristiche, ovvero: la composizione della pietra; la notevole porosità della struttura; l’estrema degradabilità con continua produzione di polvere di pietra e di sale; la caratteristica capacità del materiale lapideo di assorbire l’umidità dall’aria che, poi, condensa all’interno della pietra e, quindi, evaporando, lascia sulla superficie a vista una polvere costituita da calcare argilloso in decomposizione e significative quantità di sale marino (NaCl, MgSO₄, Na₂SO₄). Il trattamento consiste principalmente nell’operazione di desalinizzazione della pietra, partendo da un primo intervento antisale che libera i capillari ed i pori dalla presenza dei cristalli di sale. In questo modo, i successivi trattamenti riescono a penetrare in profondità, adoperando prodotti specifici che non aggrediscono la pietra, ma intervengono a sciogliere i cristalli marini formati a seguito dell’evaporazione dell’acqua di condensa. Infine, le superfici saranno trattate con un consolidante protettivo come il silicato di etile che, penetrando nei pori del materiale lapideo, si trasforma in gel di silice agendo da legante riducendo l’igroscopicità della pietra (Buccellato SpA, Pietra cantone, 2018).

5.3.5 Marmo di Orosei

DESCRIZIONE

Il Marmo di Orosei proviene da una formazione carbonatica molto estesa che si sviluppa in corrispondenza del Monte Tuttavista (805 m), un notevole massiccio montuoso in posizione immediatamente retrostante all’abitato di Orosei (Nuoro). Su uno spessore complessivo stimato in 600 metri, questa formazione carbonatica alterna strati di marmi calcarei a marmi dolomitici le cui caratteristiche

strutturali e cromatiche si prestano energicamente a un loro utilizzo come pietra ornamentale. Commercialmente, il materiale è un marmo. Appartiene alla famiglia dei cosiddetti “non cristallini” e “colorati”, intendendo con questi termini quei marmi che non hanno una struttura geneticamente cristallina ed hanno una colorazione diversa da quella bianca, detti anche marmi “beige”. Sulla base delle differenti combinazioni di colore, venature e tessiture che è possibile rinvenire, si originano diversi tipi di disegno che consentono di identificare un gruppo principale di varietà commerciali, cui corrispondono i seguenti nomi: “Marmo di Orosei Venato”; “Marmo di Orosei Nuvolato”; “Marmo di Orosei Perlato”; “Marmo di Orosei Fiocco di Neve”; “Bianco Oroe”. Questa nomenclatura deve essere accolta in modo flessibile poiché al materiale sono riconosciute, in molteplici situazioni, ulteriori diversificazioni commerciali, legate soprattutto all’intensità dei toni cromatici (varietà “chiaro”, “medio” e “scuro”) e allo sviluppo di produzioni distinte. Ad essa si affiancano numerose altre denominazioni commerciali con i quali il Marmo di Orosei è stato a lungo identificato sul



Fig. 17 Pavimentazione in esterno (coperto) con finitura lucida (Edificio privato, Honk Kong)

mercato internazionale (“Breccia Sarda”; “Daino”; “Perlato Olimpico”; “Biancone Tirreno”; “Daino Reale”; “Perlato Tirreno”; “Oro d’Oriente”; “Diana”; “Tigrato Orientale”).

In termini volumetrici, le riserve della formazione che ospita il Marmo di Orosei, anche se non conosciute in estremo dettaglio, sono rilevanti: le estensioni di superficie portano ad ipotizzare una cubatura minima del giacimento di oltre 60 milioni di m³; tuttavia, anche sulla base di ricostruzioni rese possibili dalle conoscenze attuali, è verosimile stimare in non meno di 300 milioni di m³ le riserve probabili. Simili ordini di grandezza, anche mantenendo gli attuali ritmi di estrazione e rese produttive, e formulando proiezioni fortemente pessimistiche, determinerebbero una vita utile minima del giacimento non inferiore ai 650 anni, un valore più che significativo per qualsiasi azione di corretta pianificazione produttiva e gestionale. Nel raggio di pochi chilometri quadrati il territorio di Orosei annovera un importante numero di insediamenti industriali: i cantieri estrattivi (le cave) dove viene escavato il grezzo, gli impianti di trasformazione (stabilimenti e laboratori) dove si ha la conversione in semilavorati, lavorati e manufatti, e le aziende di commercio, che alle predette attività affiancano il segmento commerciale.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

Da un punto di vista geologico, la roccia presenta una massa di fondo di carbonato di calcio a grana molto fine (minerali calcite e/o dolomite microcristalline), all’interno della quale si distribuiscono particelle di diversa natura come fossili, gusci e spoglie di organismi, anch’essi sempre di carbonato di calcio. Il marmo, di un colore dominante beige-crema-nocciola, sviluppa al suo interno delle venature a tonalità bruna, anch’essa di calcite, cui si associano lamine più o meno consistenti di onice (minerale calcareo), con disposizioni a disegno irregolari. Il calcare di cui è composto è particolarmente tenace, compatto e perfettamente lucidabile. L’insieme di questi elementi contribuisce a definire le peculiarità ornamentali e decorative della pietra e la sua tipologia merceologica, ed è determinante ai fini delle suddivisioni commerciali che si possono operare.

Si riportano di seguito le principali proprietà fisico-meccaniche (Primavori, 2011):

- Resistenza a compressione: 106 – 191 MPa (UNI EN 1926:2007)
- Resistenza a flessione: 9,10 – 15,50 MPa (UNI EN 12372:2007)
- Peso specifico medio: 2645 Kg/m³ (UNI EN 1936:2007)
- Porosità: 1,20 – 3,36 % (UNI EN 1936:2007)
- Assorbimento d’acqua a pressione atmosferica: 0,4 – 0,9 % (UNI EN 13755:2008)
- Assorbimento d’acqua per capillarità: 0,379 – 1,456 g/m²s^{0,5} (UNI EN 1925:2000)

IMPIEGHI

Il cromatismo di questo materiale ne consente un eccellente inserimento in ogni contesto applicativo, dal più semplice al più complesso, oltre a risultare particolarmente indicato per accostamenti ad altri materiali quali legno, metallo, tessili e plastiche. I campi di applicazione riguardano i rivestimenti e le pavimentazioni, entrambi sia interni sia esterni. I formati più comuni sono la lastra e il cubetto. Nel caso di pavimentazioni esterne, il Marmo di Orosei

spesso viene associato ad altri lapidei come il basalto e la trachite rossa, adottando finiture grezze o rustiche, quali sabbiatura, bocciardatura e granigliatura. Il pavimento interno, invece, offre maggiori opportunità espressive e decorative rispetto a quello esterno; grazie alla mancanza dell'aggressione atmosferica, del traffico veicolare e dei rigidi requisiti di sicurezza e antiscivolosità tipici dell'esterno, è possibile adottare anche altre finiture (levigata e lucida), con aumentata libertà anche nelle geometrie di posa. Tagliato infine a spessori sottili (inferiori al centimetro) ed eventualmente associato ad altri materiali, come nei pannelli laminati, o in pannelli "sandwich" con supporti in alluminio o in fibra, il Marmo di Orosei diventa un materiale molto richiesto per tutte quelle realizzazioni verticali dove la riduzione del peso diventa elemento essenziale, come nel caso dei rivestimenti interni. Il Marmo di Orosei, inoltre, accoglie tutte le finiture e le lavorazioni accessorie che, in questo tipo di applicazioni, possono valorizzare considerevolmente il risultato finale. È il caso delle aperture (porte e finestre), dei balconi, dei davanzali e delle scale.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

Visto l'importante sviluppo dell'attività estrattiva raggiunto, il bacino del Marmo di Orosei è da tempo classificato dalla vigente legislazione Nazionale come Distretto Industriale, e riconosciuto dalla normativa Regionale (Decreto dell'Assessore dell'Industria n. 377 del 7/8/1997) come uno dei due distretti industriali minerari della Regione Sardegna (l'altro compete al comparto del granito). Da sottolineare, infine, come il Distretto abbia legittimato la propria posizione anche attraverso azioni sicuramente distintive, ad esempio, con riferimento alla recente normativa che regola i prodotti lapidei in ambito UE, il Marmo di Orosei è stato il primo materiale italiano a dotarsi della marcatura CE per i prodotti disciplinati dalle norme UNI EN 1341, UNI EN 1342, UNI EN 1343.

Quanto allo sviluppo tecnologico, nel 2011 è stato promosso da Sardegna Ricerche un progetto di ricerca per la realizzazione di pannelli "sandwich" (Progetto-Pilota "innovazione e tecnologia nel settore lapideo. Pannelli sandwich"). Un pannello sandwich, oltre allo strato lapideo esterno, è costituito da vari strati, i quali possono avere funzione portante, come la vetroresina, o isolante, come la schiuma plastica, la struttura a nido d'ape di alluminio, o il sughero. Esso quindi costituisce un valido esempio di innovazione e di valorizzazione del prodotto lapideo tradizionale. Nel corso del progetto sono stati realizzati pannelli sandwich con 2 strati (lapideo/vetroresina) e 4 strati (lapideo/vetroresina/isolante/vetroresina), di varie dimensioni (300 mm x 400 mm; 1000 mm x 2000 mm) e spessori del lapideo (da 5 mm a 10 mm), indagando anche la forma curva. Sono state inoltre effettuate misure di proprietà termiche ed acquisite le principali tecnologie di lavorazione e di fissaggio ad un substrato portante. Dai pannelli lapidei rinforzati sono stati inoltre ricavati provini di lunghezza di 300 mm, per l'esecuzione di prove di flessione ai fini della caratterizzazione della resistenza strutturale dei pannelli. Le prove di flessione sono state condotte in conformità alla norma UNI EN 12372 "Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione della resistenza a flessione sotto carico concentrato". Infine, è stato studiato il collegamento del pannello lapideo all'edificio. I pannelli lapidei per rivestimento, resi assai sottili dalla possibilità di

abbinamento ad un materiale composito, possono essere collegati direttamente ad una facciata con collanti e dispositivi di tipo meccanico, oppure a questa installati attraverso sottostrutture metalliche (facciate ventilate). Nel primo caso, allo strato di lapideo è incollato uno strato di composito, la cui superficie esterna, per migliorare l'adesione, è resa ruvida spolverando della sabbia sulla resina ancora fresca; queste applicazioni sono adatte per interni, ma anche in esterni. Nel caso di interni, le colle sono prevalentemente quelle tipiche per edilizia, cioè a base cementizia, con aggiunta di resina acrilica; ciò consente di raggiungere adesioni per *pull-off* (prova di adesione a strappo) di circa 1 MPa. Per pannelli di dimensioni maggiori di quelle di una piastrella, usati specialmente in esterni, si ottengono migliori prestazioni con adesivi bicomponenti a base poliuretana, con adesione per *pull-off* di circa 3 MPa. Più sicuro è l'incollaggio con ausilio di vincolo meccanico: oltre che incollati con adesivi bicomponenti a base poliuretana, i pannelli vengono anche assicurati ai quattro spigoli con clips d'acciaio inox vincolate alla sottostante struttura muraria con viti e tasselli. Nelle facciate ventilate, invece, si utilizzano pannelli sandwich in cui il foglio sottile di lapideo è incollato ad un doppio strato di composito. Il collegamento tra i pannelli e l'edificio avviene mediante sottostrutture di profilati metallici (a montanti e correnti) e mediante apposite connessioni tra questi e i pannelli. L'ancoraggio dei pannelli ai profilati dei montanti può essere realizzato mediante giunzione bullonata. I fori eseguiti nel sandwich (doppio strato di composito) vengono rivestiti con uno strato in composito uguale a quelli costituenti il pannello sandwich, il quale viene poi girato e sovrapposto a questi ultimi rendendolo ad essi solidale mediante impregnazione. Lo strato di composito che riveste il foro è sagomato intorno ad un bullone in modo tale da risultare filettato. Quando il pannello è finito, si possono avvitare le barre filettate bagnate di resina epossidica, in modo tale da ottenere, a polimerizzazione avvenuta, un pannello solidarizzato alle barre stesse. A queste ultime è infine affidata l'imbullonatura ai montanti della profilatura (Primavori, 2011).

5.3.6 Terra cruda: "Adobe"

DESCRIZIONE

Per architetture in terra cruda si intendono quegli edifici realizzati utilizzando la terra stessa del suolo, estratta al di sotto dello strato arabile, inumidita, lavorata, messa in forma e lasciata essiccare al sole, sfruttando la capacità coesiva delle parti argillose contenute al suo interno. L'Adobe è un mattone in terra cruda formato con uno stampo a partire da un impasto di terra e paglia di consistenza tale da essere modellabile. È la parte di



Fig. 18 Abitazione realizzata in Lådiri (varietà di Adobe)

argilla contenuta nella terra, infatti, che svolge la funzione di legante (come la calce o il cemento) permettendo di costruire edifici multipiano. Si utilizza la terra estratta al di sotto dello strato arabile, ad almeno 30-50 cm di profondità, evitando lo strato superficiale che contiene sostanze organiche putrescibili e dalla scarsa resistenza meccanica. Questa terra è composta di ghiaia, sabbia grossa, sabbia fine, limo e argilla, in diverse proporzioni in base al diametro dei granuli componenti. All'impasto si aggiunge un inerte vegetale, la paglia, che serve a creare una struttura fibrosa pluridirezionale, contribuendo a ridurre il ritiro e la fessurazione ad esso indotta. La paglia svolge funzione di stabilizzante sia allo stato fresco (limitando le sollecitazioni di trazione) sia quando il materiale è in opera (limitando quelle flessionali). Inoltre, le fibre limitano la sensibilità all'acqua contrastando i fenomeni di gonfiamento, sgonfiamento e conseguente fessurazione, alleggeriscono il materiale ed esaltano le sue proprietà termoisolanti. Gli adobe possono essere raggruppati in tre distinte categorie: adobe plasmati a mano, senza stampo, in forme coniche, cilindriche o cubiche; adobe prodotti manualmente o meccanicamente con l'ausilio di stampi di legno o di metallo, ottenendo mattoni dalla forma più regolare; adobe prodotti per estrusione con le stesse metodologie utilizzate nella filiera del mattone cotto. Le dimensioni in generale, quale che sia il metodo di produzione, sono contenute tra i 20 e i 60 cm di lunghezza.

CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE, DATI TECNICI

La preparazione degli impasti può essere eseguita in modo tradizionale calpestando l'impasto su un'area ristretta, in modo meccanizzato con una molazza, o preparando l'impasto su un'area ampia con l'ausilio di un trattore. L'impasto con paglia lunga è più difficile da meccanizzare, mentre l'uso di impasti più liquidi di sabbia e terra, con eventualmente piccole dosi di paglia tagliata fine, permette l'uso di grosse betoniere trasportabili e la colatura dell'impasto direttamente dalla macchina a forme multiple, con una notevole riduzione dei tempi di produzione dei blocchi. La terra non deve essere troppo argillosa, priva di sassi, ghiaia e sostanze organiche, e va utilizzata allo stato molto plastico, quasi molle. La messa in opera è la stessa di una muratura in mattoni cotti, con ricorsi in malta di terra o di calce. I mattoni crudi presentano la caratteristica di essere termo-igro regolatori, capaci cioè di regolare il microclima interno grazie alla buona inerzia termica posseduta.

Composizione e proprietà fisico-meccaniche dei mattoni in *Adobe* (Centro Interuniversitario ABITA):

- Composizione: argilla (15-18%), limo (10-28%), sabbia (55-75%), acqua (15-30%)
- Quantità di fibre vegetali: 3 – 6 % in peso
- Resistenza a compressione: 2,0 – 4,0 MPa
- Modulo di rottura a flessione: $\geq 0,35$ MPa
- Modulo elastico E: 5000 – 7000 MPa
- Porosità: 15 – 40 %
- Peso specifico: 1600 – 2200 Kg/m³
- Conducibilità termica: 0,70 – 1,40 W/mK
- Tempo di essiccamento: 1 – 2 mesi

Le proporzioni degli elementi costitutivi variano a seconda della tradizione locale, ad esempio nel paese di Samassi (Sud Sardegna) per 1 m³ di impasto per “Làdiri” si impiegano (Desogus, 2010):

- 1 m³ di terra; 1 m³ di acqua; 0,23 m³ di paglia (pari a 47,5 kg).

IMPIEGHI

Il mattone di *Adobe*, utilizzato da millenni, è certamente uno dei primi materiali elaborati dall'uomo, e rappresenta tra le tecniche costruttive in terra cruda quella maggiormente diffusa nel mondo. Il termine deriva dall'arabo “*al-tub*”, che vuol dire “il mattone”. Attualmente, in diversi paesi la fabbricazione manuale di adobe è ancora pratica corrente, adatto alla realizzazione di murature portanti e di tamponamento, sia interne che esterne. L'adobe è un materiale flessibile, di facile produzione e messa in opera, che ben si adatta a condizioni di scarsità di mezzi e fonti energetiche, richiedendo un'attrezzatura limitata. In alcuni paesi industrializzati, la produzione di adobe è entrata nei cicli produttivi industriali. In Italia i mattoni crudi sono ampiamente utilizzati in Sardegna, in Calabria, in Basilicata, nella Pianura Padana e anche in alcune zone del Piemonte, dell'Abruzzo, delle Marche e della Toscana. In Sardegna varia secondo le zone: a Samassi, nel Sud Sardegna, è molto diffusa una varietà che prende il nome di “Làdiri”. Una serie di frammenti di “Làdiri” sono stati recuperati nello scavo del “santuario nuragico” a Sardara (Sud Sardegna); le dimensioni medie sono state stimate a 6,2x22x28 cm.

OSSERVAZIONI E INNOVAZIONI TECNOLOGICHE

Vantaggi: indipendenza da fonti energetiche; minor energia di produzione rispetto ai laterizi e al calcestruzzo; indipendenza da attrezzature complesse; facilità di produzione; facilità di calcolo dei costi del materiale; facilità di calcolo dei tempi di messa in opera; facilità e velocità di messa in opera; buone capacità di accumulo del calore; elevate prestazioni per il contenimento dei carichi energetici.

Svantaggi: necessità di grandi spazi per lasciar essiccare i mattoni; necessità di preparare il materiale molto prima della messa in opera; costosa se si utilizza manodopera qualificata o imprese edili; assenza di normative tecniche che caratterizzino il materiale.

Confronto sull'efficienza energetica in termini di energia inglobata (Desogus, 2010): terra cruda 108 MJ/m³, laterizio forato 3744 MJ/m³, laterizio pieno 4896 MJ/m³, calcestruzzo armato 11520 MJ/m³, calcestruzzo non armato 1800 MJ/m³.

Risparmi energetici rispetto alla filiera del laterizio (Desogus, 2010): 53% dell'emissione di CO₂, 40% di combustibili, 13% di energia elettrica.

Si riportano di seguito alcuni prodotti in terra cruda nati dall'innovazione tecnologica all'interno del settore della bioedilizia (Osservatorio Recycle & Legambiente, 2016).

“Intonaco Natura”: un intonaco in terra cruda ecosostenibile, ecologico, economico e tradizionale. L'impasto terroso viene abbinato ad un particolare additivo fluido, sempre a base naturale, così da presentare elevata resistenza agli agenti atmosferici e alle sollecitazioni meccaniche. In questo modo è possibile innalzare la percentuale di componenti naturali dell'intonaco rispetto ad altri prodotti simili in commercio. Tale caratteristica è molto importante in termini di sostenibilità ambientale, perché buona parte del composto in terra cruda, essendo biodegradabile, può essere riassorbito dall'ambiente una volta che si è concluso il suo ciclo naturale di vita. La parte che, invece, non è biodegradabile, viene raccolta e inserita in un processo di trattamento idoneo per lo smaltimento.

“Geosana”: un mattone composto di terra cruda, sabbie e diverse fibre naturali. La sua caratteristica è quella di essere un termo-igro regolatore: è in grado di mantenere costantemente un grado di umidità dell'aria intorno al 50% accumulando umidità fino alla sua saturazione, per cederla quando necessario; inoltre, ha una buona inerzia termica, assorbendo il calore quando l'ambiente è caldo e restituirlo quando si raffredda, regolarizzando la temperatura degli ambienti.

“Kartonsan”: un pannello isolante in terra cruda, rinforzato con fibre di paglia e rete in fibra di vetro. Questo pannello garantisce un microclima ideale, isolamento acustico, regolazione dell'umidità negli spazi abitativi ed ottima traspirabilità; è anch'esso un termo-igro regolatore. Altri studi sperimentali riguardano il possibile utilizzo della terra cruda in edifici costruiti in zona sismica. Si tratta di realizzare murature di tamponamento che siano deformabili e duttili, in grado dunque di dissipare l'energia sismica e di assecondare le richieste di spostamento delle strutture progettate secondo i criteri di costruzione in zona sismica. L'idea è quella di sfruttare la debolezza meccanica del materiale, andando a privilegiare i comportamenti duttili rispetto a quelli fragili, in grado di interrompere la continuità dei pannelli attraverso fenomeni di scorrimento.

CAPITOLO 6. Cenni al degrado antropico

Uno degli aspetti più importanti dei materiali lapidei e in un certo senso generalizzabile, è la ricorrente intrinseca compattezza di questi materiali, che ha consentito una buona conservazione di molte strutture; problemi statici o di durevolezza, infatti, sono difficilmente da imputarsi alla qualità del materiale utilizzato, ma legati principalmente al degrado naturale dovuto a caratteri ambientali ed al degrado antropico¹.

In particolare, il degrado antropico avviene a causa dell'inserimento nelle strutture, in tempi successivi all'edificazione, di componenti poco coerenti con la natura dei materiali originali. Si tratta principalmente dei cementi idraulici il cui sviluppo, produzione ed impiego sono posteriori all'edificazione tradizionale dei Centri Storici del paese, e che possono considerarsi poco compatibili anche dal punto di vista tecnico. In tale contesto, il materiale cementizio è un intruso sia dal punto di vista materico che rispetto alla tradizione e alla cultura locale. Il suo impiego inadatto non è certamente legato alle intrinseche proprietà meccaniche che lo caratterizzano e che anzi ne giustificano l'utilizzo diffuso nell'edilizia degli ultimi 60-70 anni, quanto in parte l'essere proprio un materiale moderno e quindi ben lontano da quelli tradizionali locali, oltre a essere causa diretta di degrado per effetto di alcuni suoi difetti intrinseci. Nella moderna costruzione della muratura in pietra, la Normativa tecnica (NTC 2018) non pone alcun limite all'impiego del cemento, sia nella realizzazione delle malte che nel getto di cordoli nella muratura in pietra non squadrata (listato), e richiede in modo diretto i cordoli di piano in calcestruzzo armato per garantire il comportamento scatolare dell'edificio, in risposta alle sollecitazioni indotte dagli eventi sismici. Inoltre, il cemento continua ad essere impiegato persino nella prassi del restauro archeologico. Questo aspetto è un chiaro indicatore di come sia ancora lontana la consapevolezza dei problemi legati ad un utilizzo improprio di questi materiali quando associati ad altri di proprietà (e tradizioni) differenti.

Considerato il contesto culturale di riferimento e le caratteristiche del materiale in oggetto con la sua intrinseca pericolosità, si può quindi affermare che l'uso dei moderni sistemi cementizi nei Centri Storici sia generalmente da escludersi.

Una prima analisi è relativa ai ricorrenti fenomeni diffusi sui lapidei più porosi quali tufi, alcune marne e le calcareniti. A contatto con l'acqua, i materiali a base di cemento sono in grado di mobilitare i sali solubili contenuti nelle materie prime di origine (argille ad esempio), con conseguenti pressioni di cristallizzazione che si instaurano quando si accumulano nei pori della pietra, generando erosioni e distacchi di materiale. Le riconosciute resistenze meccaniche dei cementi sono in questi casi assolutamente superflue.

L'utilizzo di intonaci risulta importante solo quando devono svolgere il loro tradizionale compito di protezione, nel caso di murature caratterizzate da lapidei intrinsecamente porosi, come i tufi e le calcareniti. Nel caso ci siano concreti problemi di attacchi di natura chimica, fisica o meccanica da parte delle acque meteoriche, con conseguenti alveolizzazioni,

¹ Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009), op. cit.

polverizzazioni e perdite di materiale in genere, la loro presenza potrà limitare i danni, allo stesso modo di quanto succede nelle costruzioni in terra cruda. Se in questi casi l'intonaco può servire a nascondere inserti costruttivi poco coerenti con l'architettura storica o a proteggere lapidei di elevata porosità, in altri può essere da un lato inefficiente proprio sotto il profilo della protezione, in modo particolare se mediante interventi successivi e impropri ha finito per nascondere gli originali paramenti in pietra caratterizzati da grande compattezza e resistenza. Nei centri storici dove la pietra "a vista" si può dire caratterizzi un intero paese, intonacare (spesso utilizzando malte cementizie) può risultare dannoso oltre a creare discontinuità nell'intero sistema edificatorio. La durezza della pietra è in questi casi, certamente maggiore rispetto a qualsiasi intonaco, la cui intrinseca porosità la rende particolarmente sensibile all'azione dell'acqua con conseguenti attacchi biologici. Infatti, quando vengono intonacate superfici di grande compattezza e bassa porosità, si manifestano frequenti distacchi legati alla difficoltà della malta di trovare appigli sufficienti. In queste strutture, la pietra è generalmente in grado di evitare anche la risalita capillare, mentre l'intonaco, poroso, quando a contatto diretto con il terreno, risulta caratterizzato da fenomeni di assorbimento d'acqua che facilitano il degrado biotico con formazione di muffe e muschi. Queste protezioni sono quindi addirittura inutili essendo la pietra capace di difendersi benissimo da sé².

Naturalmente, la decisione di lasciare le murature con la pietra a vista piuttosto che intonacarle si porta con sé fattori culturali molto importanti, e richiede una valutazione critica molto attenta. Da un lato infatti, si tratta di acquisire la maggior consapevolezza possibile circa il dato storico, ovvero su quale fosse all'atto della costruzione la reale condizione delle murature. Ad esempio, nel caso di lapidei di grande compattezza, la pietra a vista nelle parti più basse dell'edificio, garantirebbe una maggiore protezione dall'acqua rispetto ad un intonaco sempre intrinsecamente poroso.

² Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009), op. cit.

Conclusioni

Analizzando l'enorme patrimonio dell'architettura tradizionale, più specificamente quella dei centri storici dell'Italia meridionale, risulta evidente come tale patrimonio sia ancora caratterizzato da un'articolata varietà di materiali lapidei. Molti paesi sono a tutt'oggi ben identificati da costruzioni dove la pietra locale, dal tufo, alle lave, ai marmi, al calcare, trovanti o cantoni, rappresenta un punto di riferimento ben preciso e legato alle tradizioni del luogo. In Sardegna, poi, in dipendenza della disponibilità locale, il materiale lapideo è stato anche utilizzato come basamento in molte costruzioni in terra cruda sia per dare maggiore solidità al sistema, che per isolare la struttura dal terreno e impedire la risalita capillare dell'acqua.

La straordinaria peculiarità di questo Patrimonio richiede un'attenta riflessione sul come debba essere preservato, al fine di evitare ulteriori danni legati sia all'utilizzo di materiali dannosi o poco compatibili con quelli in opera, che alle interazioni con l'ambiente circostante. Per la conservazione dei centri storici, sarebbe opportuno stabilire dei criteri condivisi dai diversi Comuni e dalla Regione, al fine di promuovere interventi coerenti. L'approccio è certamente di tipo culturale e dovrebbe vedere affiancati, in modo sinergico, Istituzioni e comuni cittadini. Uno dei primi aspetti da considerare, a livello generale, è la salvaguardia dei materiali e degli elementi di fabbrica originari, e il loro ripristino con materiali e tecniche conformi. Infatti, per la sostituzione di conci o porzioni di muratura ammalorate, l'elevato costo del materiale lapideo oggi in commercio, anche per la sua minore disponibilità, renderebbe impari il confronto dei conci in pietra con il moderno e ormai diffuso blocchetto di cemento, facile da mettere in opera ed economico. Si potrebbe, ad esempio, perseguire il recupero dei materiali delle vecchie abitazioni ormai irrimediabilmente demolite: pietre (trovanti o cantoni) in buono stato, ma anche le tegole, che hanno una valenza comune su tutto il territorio, o altro materiale. Questa è una logica che dovrebbe prevalere rispetto all'abbandono in discariche incontrollate o in campagna. Molte amministrazioni comunali stanno operando in tale direzione, specialmente nel campo della riqualificazione degli spazi pubblici e delle loro pavimentazioni, impiegando tecniche tradizionali quali l'acciottolato, il selciato (pavé), il lastricato ed il basolato lavico, con risultati apprezzabili e proponendosi contemporaneamente come un importante esempio da seguire¹.

Quanto ai materiali complementari, si è visto nel Capitolo 3.4 come le malte utilizzate per l'allettamento dei conci erano a base di calce, pozzolana, sabbie calcaree (tufina) e terra. Per interventi di entità contenuta, si potrebbero riproporre sistemi simili a quelli di origine, i cui costi sono relativamente modesti e la facilità della messa in opera è tale da non richiedere maestranze specializzate.

Si è inoltre visto nel Capitolo 1 come i materiali locali siano una concreta risposta agli attuali obiettivi di ecosostenibilità. Come emerge dal Rapporto "Innovazione e semplificazione in edilizia" di Legambiente, sono 1.182 i Comuni in Italia che si sono attivati per inserire nei propri

¹ Sanna U. e Atzeni C. (a cura di) (2009), op. cit.
Feneal Uil, Filca Cisl, Fillea Cgil e Legambiente (2015), op. cit.

Regolamenti Edilizi principi e norme di sostenibilità, promuovendo l'uso di materiali da costruzione locali, naturali e riciclabili. In molti casi i Comuni che già avevano messo mano in precedenza ai propri regolamenti sono intervenuti nuovamente per renderli ancor più efficienti considerando alcuni parametri chiave come l'isolamento termico, l'uso di energie rinnovabili, il risparmio idrico ed il recupero delle acque meteoriche, il tipo di materiali utilizzati, l'isolamento acustico ed il corretto orientamento degli edifici, ma anche ventilazione meccanica e recupero delle acque grigie². In particolare, i materiali naturali, per la loro intrinseca natura, si collocano tra i materiali altamente ecologici, sia in termini di produzione poiché disponibili localmente con basse emissioni di CO₂ nel ciclo produttivo, sia in termini di messa in opera e dismissibilità, in quanto durevoli, riciclabili e, in alcuni casi come la terra cruda, addirittura biodegradabili. Alcuni esempi sono stati riportati nel Capitolo 2 e nelle successive schede del Capitolo 5, riguardanti sostanzialmente l'innovazione tecnologica nel settore lapideo e nel settore dei laterizi, indicando alcuni prodotti disponibili in commercio derivanti principalmente da riciclo e riproposti come materiali innovativi. L'impatto delle innovazioni di prodotto è elevato nei confronti del settore: esse aprono la strada a nuovi mercati e ad una domanda che in precedenza non poteva essere servita dal prodotto in pietra, ma che veniva coperta da altri materiali per l'edilizia³. Al riciclo si aggiunge poi l'innovazione tecnologica dei materiali tradizionali, grazie ai tanti lavori di ricerca svolti da vari laboratori ed Università, alcuni dei quali sono stati riportati nelle schede del Capitolo 5.

È possibile così concludere che lo studio dei materiali e delle tecniche tradizionali si pone all'interno di due importanti campi di applicazione: il primo riguarda il restauro, recupero e risanamento conservativo del patrimonio architettonico ed urbanistico esistente, con interventi rivolti a salvaguardare la natura dei materiali originali; il secondo riguarda il settore della bioedilizia, e dunque la costante ricerca di materiali capaci di abbattere i consumi energetici garantendo lo sviluppo sostenibile, partendo dalla vasta tradizione costruttiva del nostro paese.

Il ritorno alla tradizione, dunque, non solo è possibile nella moderna società, ma è anche di attuale applicazione, sia attraverso l'evoluzione tecnologica dei materiali tradizionali sia abbinando gli stessi alle moderne tecniche costruttive, anche contestualmente all'impiego di materiali industriali.

² Feneal Uil, Filca Cisl, Fillea Cgil e Legambiente (2015), op. cit.

³ Gruppo di lavoro del Ceris-Cnr (2007), op. cit.

Bibliografia

- Arthur, P., & Whitehouse, D. (1983, Gennaio). Appunti sulla produzione laterizia nell'Italia centro-meridionale tra il VI e il XII secolo. *Archeologia Medievale*(10).
- Associazione Forum Italiano Calce. (2010, Aprile). La calce nel sistema LEED. Un materiale antico con un futuro 'verde' e 'sostenibile'. *Forum Italiano Calce News*.
- Aurischio, S., Evangelista, A., & Nicolais, L. (1983). *Comportamento meccanico del tufo trattato con polimeri*. C.N.R., Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli "Federico II".
- Baldassarre, G. (2007). Produzione ed impiego del laterizio nella Puglia centro-settentrionale e nella Lucania nord-orientale fra Tarda Antichità e Medioevo. *Archeologia dell'Architettura, XII*.
- Bertolini, L. (2010). *Materiali da costruzione. Struttura, proprietà e tecnologie di produzione* (Vol. 1). CittàStudiEdizioni.
- Bettini, N. (2010). *Il ritorno della terra cruda per l'edilizia sostenibile: la duttilità dei tamponamenti negli edifici soggetti a sisma*. Corso di Dottorato in Structural Engineering Modelling, Preservation and Control of Materials and Structures XXII ciclo, Università degli Studi di Brescia e Università degli studi di Trento, Facoltà di Ingegneria.
- Buccellato SpA. (2018). *Pietra cantone*. Tratto da www.buccellato.it
- Buccellato SpA. (2018). *Pozzolana e Cocciopesto. Recupero delle antiche tecniche costruttive per il restauro di strutture storiche e monumentali*. Tratto da www.buccellato.it
- Budetta, P. (2007). *Corso di Geologia Applicata ai materiali naturali da costruzione*. Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Napoli.
- Calcaterra, D. (2012). *Guida pratica per il riconoscimento macroscopico delle rocce*. Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale, Napoli.
- Centro Interuniversitario ABITA. (s.d.). *Tecniche di costruzione in terra cruda. Tradizione e innovazione in Italia*. In O. Curia (A cura di), *Dipartimento di Arte Scienza e Tecnica del Costruire dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria - Facoltà di Architettura*. Reggio Calabria.
- Cerone, F., Pece, M., Manfredi, G., Marcari, G., & Voto, S. (2004). *Analisi e caratterizzazione meccanica di murature di tufo*. 15° Congresso C.T.E. Bari.
- Cherubini, C., Reina, A., & Bruno, D. (2007, Febbraio). Le rocce tenere del Salento: proposta di classificazione. *Geologi e Territorio*(2), 37-47.
- CITTAM. (2007). *Costruire in "Pietra" fra innovazione e tradizione*. In V. Calvanese (A cura di), *International Conference and Exhibition - CITTAM 2007*. Napoli: Luciano Editore.

- Coffetti, D., & Coppola, L. (s.d.). *Materiali strutturali per l'edilizia: acciaio, laterizio e vetro strutturale*. Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate.
- Colella, A., Calcaterra, D., Cappelletti, P., Langella, A., Papa, L., & De Gennaro, M. (s.d.). *I tufi zeolinizzati nell'architettura della Campania*. Università degli studi di Napoli "Federico II", Napoli.
- Cosenza, L. (1957-1958). *Relazione generale nuova Facoltà Ingegneria Napoli*. Dattiloscritto senza data, Archivio Luigi Cosenza, Napoli.
- Cosenza, L. (1959, Agosto). Per un dibattito costruttivo. *Casabella Continuità*(230), 2.
- Covolani, M. (2017). L'evoluzione dell'opera reticolata a Cuma. *European Journal of Roman Architecture*(1), 7-24.
- D'Aurea, V. (2008). I "trulli" di Polignano a Mare. Costruzioni a secco e società moderna: la sfida della conservazione. *Bollettino Ingegneri*(11).
- De Capua, A. (2013). *Materiali per l'architettura*. Materiale didattico, Università degli studi Mediterranea di Reggio Calabria, Facoltà di Architettura, Reggio Calabria.
- De Cesare, F. (1827). *Trattato elementare di Architettura civile*. Napoli.
- De Filippis, F., & De Cillis, M. (2018). Tratto da La Calcaria S.r.L.: www.lacalcaria.it
- De Gennaro, M., Calcaterra, D., & Langella, A. (s.d.). Il Tufo Giallo Napoletano. *Le pietre storiche della Campania. Dall'oblio alla riscoperta*.
- De Joanna, P. (2015). *I materiali locali nella rigenerazione degli spazi urbani dei centri storici della Città Metropolitana di Napoli*. Ricerca e sperimentazione, Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Architettura, Napoli.
- De Santis, R. (2001). *Nuova chiesa di Padre Pio, progettata da Renzo Piano*. Tratto da Archimagazine: www.archimagazine.com
- De Vitis, L. (A cura di). (2015, Marzo). Hybrid: un brevetto UniSalento per salvare la pietra leccese. *Il Bollettino, il periodico di cultura dell'Università del Salento*, V(3).
- Del Gaudio, A., & Vallario, A. (2007). *Attività estrattive: cave, recuperi, pianificazione*. Napoli: Lugiori Editore.
- Desogus, G. (2010). *I materiali tradizionali per l'efficienza energetica degli edifici: La terra cruda*. Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Architettura, Laboratorio Efficienza Energetica, Sardegna Ricerche, Cagliari.
- Dondi, M., Fabbri, B., & Sistu, G. (1995, Gennaio). Le argille da laterizi della Sardegna: caratteristiche composizionali e influenza sulle proprietà dei prodotti. *Rendiconti Seminario della Facoltà di Scienze dell'Università di Cagliari*, 65(Fascicolo 2).
- Douglas, N. (2002). *La Terra delle Sirene*. Capri, NA: La Conchiglia.

- Esposito, R. (2017). *Contesti tardo-repubblicani di Puteoli e del territorio. Contributo allo studio della colonia scipionica*. Dottorato in scienze storiche, archeologiche e storico-artistiche XXIX ciclo, Università di Napoli "Federico II", Dipartimento Studi Umanistici, Napoli.
- Fallacara, G. (2010). *Domus Benedictae. Villa unifamiliare a Corato*. (C. D'Amato, A cura di) *Archinauti - monografie*(27).
- Fallacara, G. (s.d.). *Prototipi di architettura di pietra: tradizione. Nuove costruzioni con "volte a stella"*. Politecnico di Bari, Dipartimento ICAR, Napoli.
- Farnè, S. (2013). *Qualità sostenibile. Strategie e strumenti per creare valore, competere responsabilmente e ottenere successo duraturo*. Milano: FrancoAngeli.
- Ferrigni, F. (A cura di). (2011). *Viaggio nel patrimonio edilizio minore della Costiera Amalfitana e dell'Irpinia. Le regole del vernacolo*.
- Filangieri di Candida, R. (1910). *Storia di Massa Lubrense*. Napoli: Pierro.
- Forlani, M. C. (2014). *Edilizia sostenibile e risorse locali*. Università Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura.
- Fumo, M. (2018). *Tratto da CITTAM. Centro Interdipartimentale di ricerca per lo studio delle Tecniche Tradizionali dell'Area Mediterranea - Università degli Studi di Napoli "Federico II": www.cittam.unina.it*
- Giuliano, M. (2010, Gennaio). *I materiali da costruzione di Pompei: provenienza, estrazione, tecniche edilizie*. *Tratto da vesuvioweb.com*.
- Gruppo di lavoro del Ceris-Cnr. (2007). *Innovazione tecnologica nel settore lapideo*. Rapporto tecnico n. 9, Istituto di Ricerca sull'Impresa e lo Sviluppo, Centro Nazionale delle Ricerche.
- Guerra, A., Chirico, A., & Preziosa, L. L. (2018). *Tratto da Architettura Ecosostenibile. Soluzioni architettoniche per la riduzione dei consumi energetici: www.architetturaecosostenibile.it*
- Hardin, G. (1968). *The Tragedy of the Commons*. *Science*(162).
- Imbriale, P. (2014). *I travertini quaternari della Campania: caratteri sedimentologici, geochimici e ipotesi genetica*. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra XXV Ciclo, Università di Napoli "Federico II".
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. (s.d.). *Modello di caratterizzazione tipologica a scala nazionale. Napoli. Schede Antologiche*. Napoli.
- ITACA. (2018). *Area 2 - Sostenibilità energetica e ambientale*. *Tratto da Istituto per l'innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale: www.itaca.org*
- Liberti, A., & Marseglia, S. (s.d.). *Chimica applicata ai materiali da costruzione*. Napoli: Fratelli Conte Editori.

- Mangialardi, N. (2017). Le maestranze saracene a Lucera (FG) nel XIII secolo. Spunti di ricerca sull'impiego dell'edilizia in laterizio in Puglia centro-settentrionale e nel Meridione normanno-svevo. *Mélanges de l'École française de Rome - Moyen Âge (MEFRM)*(129-2).
- Miraglia, F. (2013). *Murature in tufo moderne e contemporanee. Napoli, Terra di Lavoro (XVI-XIX)*. Corso di Caratteri costruttivi dell'edilizia storica, Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale "L. Vanvitelli", Napoli.
- Morelli, J. (2011). Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals. *Journal of Environmental Sustainability*.
- Nazioni Unite ONU. (2005). *World Summit*. Assemblea Generale.
- Osservatorio Recycle, & Legambiente. (2016). *100 Materiali per una nuova edilizia*. Rapporto, Roma.
- Papa, R. (2007). *Indagine sperimentale sulla coltre piroclastica di un versante della Campania*. Dottorato di ricerca in Ingegneria delle Costruzioni XX ciclo, Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Geotecnica, Napoli.
- Pesando, F., & Guidobaldi, M. P. (2006). *Pompei, Oplontis, Ercolano, Stabiae. Le tecniche edilizie*. Bari-Roma: Editori Laterza.
- Pignatelli, G. (2006). L'attività estrattiva tradizionale in Penisola Sorrentina: dai tagliamonte alle cave industriali nel territorio Lubrense. *Geografia, Anno XXIX*(3-4).
- Pintus, V. (2017). Architettura fortificata nella Sardegna meridionale. Cronotipologia delle strutture murarie (XII-XV sec.). *ArchHistoR, Anno IV*(8).
- Primavori, P. (2011). *I materiali lapidei della Sardegna*. Sardegna Ricerche, Cagliari.
- Raia, L. (2004). *Tecniche costruttive tradizionali e artigianato edile nell'architettura napoletana del XVIII e XIX secolo*. Dottorato di ricerca in Conservazione dei Beni Architettonici XIX ciclo, Università di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, Napoli.
- Raymond, L. (1998). *La città sostenibile. Partecipazione, luogo, comunità*. Elèuthera.
- Regione Autonoma della Sardegna. (2008). Il manuale tematico della terra cruda. Caratteri, tecnologie, buone pratiche. (M. Achenza, & U. Sanna, A cura di) *I manuali del recupero dei centri storici della Sardegna, I*(2).
- Regione Autonoma della Sardegna. (2009). Il manuale tematico della pietra. (U. Sanna, & C. Atzeni, A cura di) *I manuali del recupero dei centri storici della Sardegna, II*(2).
- Rinaldi, S. (s.d.). *Materiali lapidei*. Tratto da www.architettura.unina2.it
- Rossi, U. (2015). Bernard Rudofsky, Tino Nivola: Costruire con pochi mattoni, qualche blocco di cemento e alcuni pali. Casa-Giardino Nivola, Long Island, NY. *Firenze Architettura*(1).

- Stella, M. (1991). *Murature e malte tradizionali pugliesi: uso e sperimentazione*. Istituto per la Residenza e le Infrastrutture Sociali, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bari.
- Trombetta, C. (2013). *Intonaco Natura*. Agenda Strategica del Polo NET (Natura Energia Territorio), Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.
- Viola, F. (2016). *L'architettura insegnante. Il politecnico di Luigi Cosenza*. Napoli: Clean Edizioni.
- Vitruvio. (circa 15 a.C.). *De Architectura*.
- Wandenberg, J. (2015). *Sustainable by Design: Economic Development and Natural Resources Use*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Wright, F. L. (2003). *Una Autobiografia*. Milano: Editoriale Jaka Book SpA.
- Zambaiti, G. (2018). Tratto da Fornaci San Giuseppe: www.fornacisangiuseppe.it

Desidero ringraziare innanzitutto il mio relatore, Prof. Ing. Domenico Caputo, per il tempo dedicatomi nella stesura della tesi, ma soprattutto nell'avermi proposto un argomento tanto appassionante che porta in sé importanti valori culturali e scientifici.

Ringrazio in modo particolare la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto e supportato nel mio percorso universitario, sia economicamente che moralmente, incoraggiandomi sempre nel proseguire nonostante le tante difficoltà incontrate.

Grazie agli amici, ai parenti, che hanno sempre creduto in me.

In ultimo, un ringraziamento speciale va alla mia compagna di vita, Lena, che mi ha ridato la forza e le motivazioni per portare a termine gli studi, che mi è sempre stata vicina nell'affrontare gli ultimi esami. Questa tesi la dedico a te, che sei sempre al mio fianco.