

Essays & Viewpoint

architecture

## LA TERRA: NUOVE TECNICHE PER UN VECCHIO MATERIALE

### THE EARTH: NEW TECHNIQUES FOR AN OLD MATERIAL

Antonio Passaro\*

**ABSTRACT** - Gli studi, che negli ultimi anni hanno riscoperto la tecnica delle realizzazioni in terra, fanno riferimento a poche preesistenze nel nostro Paese e ad alcune nuove architetture. Il rinnovato interesse per questa pratica, se difficilmente proponibile alla larga scala delle residenze, è invece possibile per altri usi. Il nostro obiettivo, pertanto, si sposta sull'analisi delle applicazioni e delle tecniche che, impiegate in passato in maniera empirica, hanno fornito prestazioni soddisfacenti e sulle possibili realizzazioni che oggi, con nuove possibilità di controllo, possono essere impiegate nella realizzazione di molte costruzioni con un limitato impatto ambientale.

The studies that have rediscovered the technique of raw earth constructions in recent years refer to few pre-existing in our country and some new architectures. The renewed interest in this practice, if difficult to propose to the large scale of housing, is possible for other uses. Our aim is therefore to move on the analysis of applications and techniques that have been empirically used in the past and have provided satisfactory performances and on the possible achievements that today, with new control possibilities, can be used in the realization of many constructions with a limited environmental impact.

**KEYWORDS:** Terra, stabilizzazione, reversibilità.

Raw earth, stabilization, reversibility.

La sempre crescente necessità di tutela dell'ambiente ha comportato una serie di riflessioni sul ruolo di tecniche e processi a basso impatto ambientale; tra queste certamente hanno acquistato un posto di rilievo gli studi relativi alle realizzazioni in terra cruda<sup>1</sup>. A fronte dell'uso ancora diffuso in alcune Regioni e del rinnovato interesse nei confronti di questa pratica, che ha portato alla realizzazione di numerosi esempi di nuove architetture, il nostro obiettivo si sposta, in particolare, sulle applicazioni e sulle infinite realizzazioni possibili con l'impiego della terra. L'ampia letteratura, che negli ultimi anni ha riscoperto la tecnica delle realizzazioni in terra cruda, fa riferimento soprattutto alle realizzazioni, che si conservano nel nostro Paese solo in talune realtà molto limitate, ignorando, frequentemente, lo studio delle tante opere che in passato hanno impiegato la terra con tecniche diversificate. Considerando che le tecniche utilizzate per la realizzazione di sistemi costruttivi in terra destinati alla residenza sono specifiche e proponibili solo in talune aree geografiche, e difficilmente alle nostre latitudini, si vuole di seguito porre l'accento su tutte le possibili applicazioni che, facendo uso della terra e di tecniche specifiche, permettono nuove realizzazioni.

*Struttura e caratteristiche delle terre* - Per delimitare il campo di studio è necessario definire la terminologia e le caratteristiche delle terre, termine che proviene dalla radice latina *tars* (essere secco, disseccarsi) e acquista un senso più ampio di materia secca di cui è composta gran parte della crosta superficiale del pianeta<sup>2</sup>. La terra possiamo definirla, pertanto, come un miscuglio di diversi elementi, la cui composizione dipende dall'area e dai relativi fattori orogenetici; l'orogenesi delle terre è nella maggior parte dei casi<sup>3</sup>, dovuta alla disgregazione fisico-chimica<sup>4</sup> delle rocce. I frammenti così originati, di roccia e minerali di dimensioni e forme molto variabili<sup>5</sup>, sono trasportati e depositati<sup>6</sup> a formare aggregati di particelle costituenti la struttura delle terre.

In tutte le opere, in cui si impiegano le terre a fini ingegneristici, è fondamentale la determinazione delle caratteristiche fisiche che permettono la previsione dei comportamenti rispetto alle proprietà di riferimento. In particolare, tali proprietà devono essere indicative e misurabili mediante procedure standard indipendenti dalle condizioni di utilizzo specifico. I sistemi di classificazione

utilizzati sono diversi e si caratterizzano per la diversa parametrizzazione degli elementi distintivi dei vari tipi e riguardano, prevalentemente la composizione mineralogica e la combinazione granulometrica. L'esame relativo al diametro medio delle particelle che compongono una terra definisce la *granulometria* che può essere considerata in funzione della possibile superficie di contatto tra le diverse particelle<sup>7</sup> e la scabrezza delle stesse<sup>8</sup>, determinando l'angolo di attrito della superficie di scorrimento, secondo la quale frana il terreno sciolto e disposto a cumulo. Tra le particelle costituenti i terreni sono presenti vuoti interstiziali in cui la presenza di gas o di fluidi provoca delle interazioni di tipo meccanico (forze di massa o di volume) e chimico (forze di superficie): le prime derivano dalla gravità terrestre, mentre le seconde sono legate essenzialmente alla geometria dei granuli, ovvero alla superficie riferita all'unità di massa, che si definisce *superficie specifica*.<sup>9</sup>

Sulla superficie esterna di ogni granulo esistono, infatti, delle cariche elettriche che lo portano a interagire con gli altri granuli e con l'acqua interstiziale<sup>10</sup>. Pertanto, se la superficie esterna è piccola in relazione alla massa, anche le azioni superficiali sono modeste e quindi prevalgono le interazioni di tipo meccanico (in tal caso si parla di granuli 'inerti'); se la superficie è grande anche le azioni superficiali, e quindi le interazioni di tipo chimico, possono diventare importanti, addirittura più importanti di quelle di volume (in questo caso si parla di granuli 'attivi'). Questi parametri, uniti all'omogeneità del miscuglio, alle interazioni di tipo meccanico e/o chimico e, infine, alla quantità di fluidi interstiziali tra le particelle, determinano il grado di coesione<sup>11</sup>, quindi, le caratteristiche delle terre e il relativo comportamento. Appare evidente che per migliorare le capacità di resistenza alle sollecitazioni esterne sui terreni si tenti di intervenire su i due aspetti fondamentali: l'allontanamento degli agenti fluidificanti e l'aumento della superficie di contatto tra le diverse parti costituenti il terreno.

*Le costruzioni in terra* - La costruzione in terra (definibile come: qualsiasi manufatto tridimensionale ... comunque realizzato ... che ha ... come conseguenza la trasformazione permanente del suolo ... e ... che comporti una ben definita occupazione del terreno e dello spazio<sup>12</sup>) è difficilmente riconducibile a un'unica tipologia. La terra, così come è stata definita (*terra = tars*), si presenterebbe



Figg. 1a, 1b - Nastri metallici ancorati a ritentori.

come una sostanza secca, a grani sciolti o a frazione polverulenta con cui non sarebbe possibile realizzare altro se non cumuli con forme determinate dal solo angolo di attrito. In realtà la terra è stata da sempre impiegata nella realizzazione di abitazioni, sbarramenti, rilevati, argini e dighe, ecc. Per tutte queste costruzioni il problema era come rendere stabile e duraturo un materiale così incoerente. La soluzione è stata individuata attraverso due procedure: la inalterabilità delle condizioni d'esercizio e il miglioramento/stabilizzazione delle caratteristiche tecniche. Per entrambe, nelle condizioni d'utilizzo possono essere elencate tutte quelle tecniche ed espedienti che forniscono adeguate garanzie, affinché le terre impiegate in una costruzione non subiscano variazioni tali da compromettere le prestazioni previste. Un semplice cumulo di terra in un sistema ambientale dinamico, nel quale infinite sono le sollecitazioni che possono apportare modificazioni, subisce una serie di aggressioni di natura chimico-fisica e segue un processo di ricerca per l'equilibrio del sistema; perché resista nel tempo è necessario che venga costruito e protetto con procedure adeguate, che fanno riferimento a una tradizione secolare che in maniera empirica ha utilizzato la terra in sostituzione di altri materiali.

*L'impiego delle terre come materiale nelle costruzioni tradizionali* - Per millenni nelle aree in cui erano assenti o difficilmente reperibili materiali di più facile impiego, come il legno o i materiali lapidei, si è ripiegato sull'uso della terra nella realizzazione di ricoveri e abitazioni. La terra, estratta al di sotto dello strato più superficiale, in cui la presenza di sostanze organiche provenienti dalla decomposizione di resti animali e vegetali la rende inadatta all'impiego per la realizzazione di sistemi costruiti, è utilizzata adottando tecniche come il *pisè*, l'*adobe*, il *bauge* o il *torchis*<sup>13</sup>. Tutte queste tecniche, in passato e in maniera empirica, non erano realizzate con il solo aggregato in terra, ma questa era sempre associata ad altri materiali per migliorarne le proprietà e correggere le caratteristiche, utilizzando addensanti (caseine, sterco di animali, ecc.) e rinforzi (paglia, peli di animali, ecc.). Al contrario, nella realizzazione di costruzioni di grandi dimensioni come le piramidi di terra o nelle opere di fortificazione la terra era utilizzata senza nessuna integrazione, ma comunque ne era curata la protezione superficiale per impedire che gli agenti atmosferici, in particolare la pioggia, penetrassero all'interno della realizzazione e ne alterassero le condizioni di equilibrio procurandone la rovina.

Tutte queste soluzioni descrivono modalità d'uso della terra limitate a esempi ormai legati a specifiche realtà geografiche distanti dalla nostra realtà, anche se negli ultimi anni vi è un proliferare

della letteratura di settore in cui le costruzioni in terra cruda, in particolare le residenze, vengono descritte come soluzioni a basso impatto ambientale, enumerando parallelamente le ottime proprietà relative alla coibentazione e relativo comfort igrotermico e, perfino, la resistenza alle azioni sismiche; si dimenticano, però, le motivazioni per le quali le stesse tecniche sono diventate obsolete, dovendosi confrontare con i nuovi standard qualitativi ai quali siamo abituati. Dando per scontata la necessità di restaurare le costruzioni in terra come testimonianza di un passato ci si chiede: quale futuro per le realizzazioni in terra? Di seguito, più che individuare una miscela o una tipologia di terre specifiche utilizzabili, si vogliono individuare quelle tecniche e quelle applicazioni che, con un approccio più scientifico e con nuove possibilità di controllo prestazionale, possono vedere un sempre più ampio impiego della terra in costruzioni non destinate alla residenza ma in modalità diverse.

Il concetto di terra, pertanto, si articola in specificità relative all'impiego, dal momento che si vogliono individuarne le caratteristiche e le potenzialità. Le diverse categorie di costruzioni in terra vengono realizzate per assolvere funzioni disparate; sono, pertanto, diversi i requisiti richiesti: ad esempio, mentre per un rilevato stradale in terra è necessario garantirne la stabilità, per una diga o in un argine fluviale deve essere garantita la tenuta idraulica. Infatti, se per un rilevato stradale il cedimento parziale può compromettere la sicurezza alla percorrenza, lo stesso fenomeno in una diga può essere tollerabile; al contrario la fessurazione della superficie impermeabile inaccettabile per la diga non compromette la percorribilità della strada. Tutto ciò comporta, in funzione delle soluzioni progettuali in terra, una scelta tra le diverse tecniche per garantire l'inalterabilità in condizione d'esercizio o la stabilizzazione delle caratteristiche tecniche.

*Tecniche di consolidamento delle terre e possibili realizzazioni* - Rendere inalterabili le condizioni fisico-morfologiche di una costruzione in terra, ovvero conservarne o migliorarne la resistenza meccanica, necessita di una disamina circa le cause che possono modificare o trasformare le condizioni programmate in sede progettuale. In un sistema ambientale, in continua trasformazione, i fenomeni che possono determinare delle alterazioni nelle costruzioni in terra sono individuabili negli interventi di natura antropica o di organismi viventi, negli assestamenti tettonici e negli agenti meteo-climatici. In particolare, le cause della modificazione delle caratteristiche delle terre impiegate per sistemi costruttivi sono ascrivibili, soprattutto, alle azioni di natura fisica, operate da agenti che con diverse modalità alterano l'equilibrio

tra i grani<sup>14</sup> di diverse dimensioni che compongono la miscela. L'acqua fluidifica le miscele facendo passare, ad esempio, le terre argillose dallo stato solido a quello plastico fino a quello liquido; il passaggio da uno stato all'altro non è istantaneo, ma avviene gradualmente all'interno di un intervallo di valori del contenuto d'acqua, che comporta anche la modificazione del volume, incrementato in caso di gelività.

Per conservare la resistenza meccanica di una costruzione in terra è necessario, quindi, preservarla in modo che siano garantite le condizioni di impermeabilità mediante protezioni superiori o laterali o con protezioni da imbibizione da risalita (rivestimento o inerbamento delle superfici esterne, ecc.). Una costruzione, solitamente, viene realizzata utilizzando tecniche di costipamento, scelte in funzione della frazione granulometrica della terra e delle prestazioni meccaniche richieste; il costipamento induce in genere un incremento di resistenza e di rigidità. Per migliorare la resistenza meccanica possono essere adottate delle tecniche o prodotti che possono intervenire come stabilizzanti, o come rinforzo, e come armatura a diversi livelli di grandezze e classificabili in reversibili o irreversibili.

La *stabilizzazione*, tecnica con la quale si generano forze di coesione tra le particelle, determina, generalmente, l'aumento del coefficiente d'attrito a livello microscopico; analoghi effetti possono determinarsi anche grazie a espedienti che intervengono a una scala maggiore. Il trattamento delle terre deve essere differenziato in relazione alla costruzione da realizzare, per cui sono necessarie delle indagini preliminari di laboratorio attraverso le quali vengono determinati sia il tipo e le quantità di prodotti da adoperare, sia l'umidità residua ammissibile dopo il costipamento delle miscele. Comunemente i materiali impiegabili per la stabilizzazione in passato erano la caseina, l'olio di cotone e di cocco, la gomma arabica, il caucciù, il bitume e altri come lo stesso sterco animale: erano mescolati intimamente nelle terre, mentre oggi quei materiali sono sostituiti con leganti aerei e/o idraulici. Le miscele sono realizzate in modo da modificare le caratteristiche fisico-chimiche (granulometria, suscettività all'acqua, umidità) e meccaniche, così da renderle atte alla realizzazione di superfici, che dopo il costipamento siano resistenti ai carichi statici e dinamici e risultino altresì stabili all'azione dell'acqua ed eventualmente del gelo. Sono trattabili con calci le terre fini plastiche, le argille limose non eccessivamente plastiche, le ghiaie argillose quando contengano una sufficiente frazione fina, le terre pozzolaniche ricche di silice amorfa.<sup>15</sup>

Nel caso di terre limo-argillose la calce aerea può essere utilizzata esclusivamente per ridurre l'umidità che impedirebbe la loro compattazione; quindi, per migliorarne le caratteristiche meccaniche occorre utilizzare calci e cementi idraulici, portland o gesso. Modeste quantità di quest'ultimo, oltre a ridurre il ritiro in fase di essiccamento, incrementano le prestazioni meccaniche delle strutture in terra<sup>16</sup>. Il gesso, come altri cementanti, non compromette la possibilità di riutilizzare la terra a fini agricoli alla fine della vita utile del manufatto. Nuove miscele, composte da leganti aerei ed idraulici con inerti di elevata finezza, additate con specifici addensanti, conferiscono alle terre un comportamento di tipo pseudo-plastico; sono *gel* particolarmente idonei per il consolidamento di terreni poco coesivi o per l'impermea-

bilizzazione, mediante iniezioni in paratie. Con le terre stabilizzate è possibile costruire pavimentazioni per strade rurali, stradelli ecologici, percorsi in parchi, giardini, impianti sportivi, siti archeologici, in luoghi di particolare valenza storica, paesaggistica o ambientale; invece per la realizzazione di pavimentazioni, la terra è miscelata a leganti integrati da miscele di sali inorganici, esenti da tossicità e nocività, a base di silicati, fosfati e carbonati di sodio e potassio.

L'azione di questi componenti è anche quella di porizzare le particelle di argilla presenti nel conglomerato e rendere così la pavimentazione drenante. Di ordine diverso è l'impiego in edilizia, in passato, quando venivano impiegate sabbie di cava con alte percentuali di argille che, rispetto ai materiali tecnicamente classificabili (sabbie lavate) odierni, possedevano caratteristiche tecniche minori, ma che restituivano agli intonaci un cromatismo ambrato variegato, una ricchezza per il linguaggio architettonico tradizionale. La tecnica del rinforzo strutturale delle terre prevede la miscelazione di materiali fibrosi con il compito di limitare la fessurazione, migliorare la coesione e la resistenza meccanica del materiale di base; le costruzioni in terra fibro-rinforzata, con fibre preferibilmente di lunghezza variabile dai 4 ai 6 cm, presentano un minore ritiro durante l'essiccamento, un limitato rigonfiamento in caso di aumento dell'umidità e un incremento della resistenza a trazione. Una distribuzione disordinata o diffusa delle fibre all'interno della miscela migliora il comportamento della struttura: quando questa è soggetta ad azioni orizzontali, se le fibre sono orientate, se ne aumenta la capacità di sopportare le sollecitazioni di trazione e di flessione ortogonali al verso lungo cui sono disposte.

Le fibre di origine vegetale di uso più comune sono quelle ricavate dalla paglia, dalle ginestre, dal lino, dalla canapa, dalla iuta, così come quelle derivate dal bambù e dal cocco. Le fibre naturali sono disponibili in grandi quantità, sono rinnovabili, presentano una bassa densità e un costo modesto, nonché proprietà meccaniche tali da renderle interessanti per la realizzazione di terre fibro-rinforzate. Le fibre polimeriche, al contrario di quelle di origine vegetale, che in ambienti umidi sono soggette a marcescenza, sono invece particolarmente stabili, anche se di difficile rimozione quando si vuole recuperare il terreno a destinazione agricola. Un ulteriore livello d'intervento per aumentare la resistenza meccanica delle costruzioni in terra è rappresentato da tecniche diverse che intervengono a una scala maggiore e possono essere realizzate mediante armature longitudinali, superfici bidimensionali o da elementi tridimensionali di grosse dimensioni. Nella tecnica delle terre rinforzate in elementi discontinui, questi sono posti ortogonalmente al versante di scorrimento del paramento; sono utilizzate, soprattutto in passato, travate in legno a essenza dura, fascinate, canne, canapi, ecc.; attualmente oltre le tecniche tradizionali sono impiegate armature metalliche o sintetiche sotto forma di barre, tiranti, nastri metallici con superfici goffrate per fornire una maggiore aderenza alle terre utilizzate (Fig. 1). Nelle opere di sostegno sono sempre abbinate a elementi di contenimento (pannello in c.a., reti, ecc.) che costituiscono la parete a vista.

Le terre rinforzate con elementi continui presentano inclusioni bidimensionali, sistemate nel

piano del rinforzo, realizzate mediante: elementi incrociati e legati di materiali lignei, intrecciati di juta, reti metalliche, geogriglie mono-orientate, tessuti in geosintetici flessibili e inestensibili (solitamente fibra di vetro accoppiate a un geotessile, ecc.), sistemate in piani sovrapposti e assemblate in modo da formare una struttura tessuta, aperta e deformabile, in grado di adattarsi al terreno su cui vengono posate; esse emergono dalle costruzioni in terra, fino a coprire i versanti esposti, e fungono da sostegno allo strato inerbato antierosione (Figg. 2, 3). Queste tecniche sono impiegate per il consolidamento e la messa in sicurezza di versanti in frana, pareti rocciose, argini e corsi d'acqua, e anche per consolidare cunette stradali e regimentare lo scorrimento delle acque superficiali. Le strutture tridimensionali, che intervengono nel contenere le terre in geometrie altrimenti impossibili, superiori al loro angolo di attrito, sono realizzate con elementi spaziali come cassoni, gabbioni metallici, telai prefabbricati in c.a., oppure fanno uso di blocchi più o meno regolari con superfici ruvide, tenaci e altamente igroscopiche, dove le terre fraposte in quantità ridotte assolvono funzioni sussidiarie, impedendone lo scivolamento relativo (Figg. 4-6).

Nelle stesse costruzioni rurali (depositi, stalle e abitazioni) con muratura in pietra, molto spesso la malta era stata sostituita dall'impiego di terra solo a volte integrata da una modesta quantità di calce come stabilizzante; eppure questi paramenti murari, anche se di modeste dimensioni, sopportavano i notevoli carichi dei diversi livelli e delle coperture<sup>17</sup>. Analogamente, nei muri di contenimento a secco, le pietre erano semplicemente sovrapposte nella parte esterna, mentre all'interno erano cementati con terra. Questa tecnica era utilizzata per realizzare il massimo sfruttamento della superficie coltivabile, per cui il muro di contenimento era verticale o prossimo a esserlo; oggi, che la necessaria manutenzione è di difficile proposizione, è ipotizzabile utilizzare delle tecniche miste, dove i muri di sostegno o di recinzione delle proprietà, in aree a forte vocazione naturalistica, sono sostituiti da declivi in terra misti a pietrame armati con fascinate e inerbati, diventando contemporaneamente corridoi ecologici (Figg. 7-9).

*Conclusioni* - Tutte le tecniche descritte vanno, comunque, classificate rispetto al potenziale impatto sull'ambiente; in particolare, di esse sono da valutare il grado di reversibilità e il livello di rilascio di inquinanti. Le soluzioni reversibili sono quelle che permettono di riequilibrare, naturalmente o artificialmente, le alterazioni chimico-

fisiche indotte nell'area d'intervento. Tutti i materiali impiegati nella stabilizzazione o nel rinforzo debbono poter essere rimossi quando le costruzioni vengono dismesse, ma ciò dipende dalla loro dimensione o dal grado di legame stabilito con le terre. I materiali che hanno subito un processo di miscelazione intimo, tale da rendere difficile l'eventuale recupero, se non addirittura impensabile, non devono rilasciare sostanze tossiche o inquinanti; i prodotti impiegati, infatti, tendono nel tempo ad alterare la propria struttura originaria, per effetto dell'aggressione di sostanze chimiche o semplicemente erosi da sollecitazioni meccaniche. I prodotti finali di degradazione, sia organici che inorganici, rimangono disciolti nel terreno, rendendo impossibile l'eventuale operazione di recupero dei materiali e difficile la bonifica delle aree.

Alcune soluzioni, infatti, vengono considerate reversibili perché, ad esempio, è sufficiente l'impiego di acqua per solubilizzare lo stabilizzante o perché i materiali impiegati (legno, fascinate, fibre vegetali) sono facilmente marcescibili, dimenticando che una frazione dei prodotti di degradazione può venire lisciviata dalle acque meteoriche e trasportata nelle falde acquifere sotto forma di percolati; in soluzioni irreversibili, il coesivo che non può essere recuperato (i cementanti, il gel, ecc.) o ad esempio i prodotti ceramici, come le fibre di vetro di alcune georeti, i lapidei o i conglomerati, sono da considerarsi sufficientemente inerti, e poco inquinanti. Analogamente i materiali di sintesi, con struttura chimica non assimilabile a quella di composti naturali, sono solo parzialmente biodegradabili, pertanto soggetti ad essere biodeteriorati<sup>18</sup>, ma i loro tempi di degradazione sono lunghi, quindi, in normali condizioni sono sufficientemente stabili e poco inquinanti. Alla luce di tali riflessioni si delinea un quadro di possibili applicazioni delle tecniche di stabilizzazione di cui sia noto, o ipotizzabile, l'impatto ambientale e la reversibilità dell'intervento, avvalorando l'ipotesi che si possano ottenere efficaci risultati con modesto impiego di risorse e nel rispetto della cultura dei luoghi e dell'equilibrio ambientale.

#### ENGLISH

*The growing need to protect the environment has led to a series of reflections on the role of low environmental impact techniques and processes; of these, they have certainly gained a significant place those studies of earth-based realization<sup>1</sup> Against the widespread use in some regions and the renewed interest in this practice which has led to the realization of numerous examples of new*



Figg. 2a e 2b - Intrecciati di juta con ancoraggi in legno.

architectures, our objective is shifted, in particular, to the applications and the infinite realizations with the use of the earth. The wide literature that over the last few years has rediscovered the technique of the realization of raw earth refers mainly to the achievements, which are preserved only in very limited realities of our country, often ignoring the study of the many works that in the past employed the raw earth with diversified techniques. Considering that the techniques used to construct raw earth-based construction systems are specific and acceptable only in certain geographic areas, and rarely to our latitudes, we want to focus on all the possible applications that, by using the earth and specific techniques, allow new realizations.

Structure and characteristics of the earths - To characterize the field of study, it is necessary to define the terminology and the characteristic of the term earth that comes from the Latin root: *tars* (to be dry, to dry) and acquires a wider sense of dry matter of which is composed much of the surface crust of the planet<sup>2</sup>. The earth can therefore be defined as a mixture of different elements, whose composition depends on the area and its related orogenic factors. The orogeny of the lands is, in most cases<sup>3</sup>, due to the physical-chemical<sup>4</sup> breakdown of the rocks. The resulting fragments of rock and minerals of various dimensions and shapes<sup>5</sup> are transported and deposited<sup>6</sup> to form aggregates of particles forming the structure of the earth.

In all the works in which earth is used for engineering purposes, the determination of the physical characteristics is fundamental to allow choices based on the behavioral prediction. In particular, these properties must be indicative and measurable by standard procedures independent of the specific conditions of use. The used classification systems are different and are characterized by the different parameters of the distinctive elements of the various types and they relate mainly to the mineralogical composition and the particle size. The examination of the average diameter of the particles forming an earth defines the granulometry that characterizes the contact surface between the different particles<sup>7</sup> and their roughness<sup>8</sup> by determining the angle (friction angle) of the sliding surface of the terrain. Between soil particles there are interstitial gaps in which the presence of gases or fluids results in mechanical (mass or volume forces) and chemical (surface forces) interactions. The first derive from earthy gravity whereas the latter are essentially bound to the geometry of the granules, or to the surface referred to the mass unit, which is defined as specific surface.<sup>9</sup>

On the outer surface of each granule, there are, in fact, electrical charges that lead to interacting with other granules and interstitial water<sup>10</sup>. Thus, if the outer surface is small compared to the mass, the surface actions are also modest and therefore prevail mechanical interactions (in this case it is referred to as 'inert' granules), if the surface is large, also the surface actions, and thus chemical interactions can become important, even more important than the volume ones (in this case, we speak of 'active' granules). These parameters combined with the homogeneity of the mixture, the mechanical and/or chemical type interactions and, finally, the amount of interstitial fluid between the particles

determine the degree of cohesion<sup>11</sup>, therefore, the characteristics of the soil and its behavior. It is evident that to improve the resistance to external stress on the earth, it attempts to intervene on the two fundamental aspects: the removal of the fluid agents and the increase of the contact surface between the different parts forming the terrain.

The earth construction - The earth construction (definable as: any three-dimensional artifact ... anyway realized ... which has ... as a result the permanent transformation of the soil ... and ... which involves a well-defined occupation of land and space<sup>12</sup>) is hardly attributable to a single typology. The earth, as it has been defined (earth = *tars*), would appear as a dry substance, loose grain or powdered fraction, with which it would be not possible to achieve other than heap with forms determined by only the friction angle. In fact, the earth has always been used for the realization of dwellings, barriers, excavations, banks and dams, etc. For all these constructions, the problem is how to make durable and stable a so inconsistent material. The problem has always been resolved through two procedures; the unalterably of the operating condition and the improvement / stabilization of the technical characteristics.

For both, under the conditions of use, all the technical and expedient techniques can be listed that provide adequate guarantees that the earth used in a work do not undergo any variations that could compromise the intended performance. A simple cumulus of earth in a dynamic environmental system, where stresses are infinite that can make modifications, undergoes a series of chemical-physical aggressions according to a balance-finding process of the system; in order to resist over time, it is necessary to come built and protected by appropriate procedures; these refer to a secular tradition that empirically used the earth to replace other materials.

The use of earth as material in traditional constructions - For millennia in areas where easy-to-use materials were absent or difficult to find, such as wood or stone materials, they landed on earth use in the construction of shelter and housing. The earth extracted below the superficial layer, in which the presence of organic substances from the decomposition of animal and vegetable remains makes it unfitting for the constructed systems, is used by adopting techniques such as *pisè*, *adobe*, the bumper or the *torchis*<sup>13</sup>. All these techniques, in the past and in an empirical way, were not made with the only terrain but this was always associated with other materials to improve its

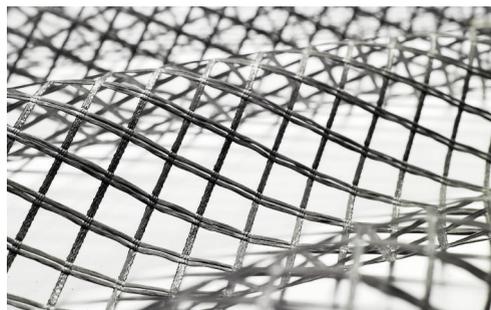


Fig. 3 - Geogriglia.

properties and to correct the characteristics by using thickeners (casein, dung, etc.) and reinforcements (straw, animal hair, etc.).

Conversely, in the construction of large buildings such as the earth pyramids or fortification works, the terrain was used without any integration, but in any case, the surface protection was treated to prevent weather agents, in particular rain, from penetrating within the realization and altering its equilibrium conditions to cause its ruin. All of these solutions describe ways of earth use limited to examples now linked to specific geographic realities that are far from our reality, although in recent years there is a proliferation of literature in which raw earth constructions, in particular residences, are described as low environmental impact solutions, encompassing in parallel the excellent properties of insulation and its hygrothermal comfort, and even the resistance to seismic actions; however, are forgotten the reasons why the same techniques have become obsolete by comparing with the new qualitative standards we are accustomed to. Taking on the necessity of restoring buildings on earth as a testimony of the past, one wonders: what future is to be accomplished on earth? Below, rather than identifying a mix or type of usable terrain, we want to identify those techniques and applications that, with a more scientific approach and with new performance control possibilities, can allow an ever wider use of earth in buildings not destined to housing but for different uses.

The concept of land, therefore, is articulated in specifics relating to purpose; since they want to identify their features and potentialities. The different categories of earth construction are realized to perform different functions; therefore, there are several requirements: for example, while for a grounded road surface it is necessary to ensure its stability, for a dam or river bank a hydraulic seal must be guaranteed. In fact, if a partial road failure can compromise road security, the same phenomenon in a dam can be tolerated; on the contrary, cracking of the waterproof surface is unacceptable to the dam but does not compromise the path of the road. All this involves the choice of different techniques depending on the design of the earth work to guarantee the unalterability of the working condition or the stabilization of the technical characteristics.

Earth consolidation techniques and possible realizations - Making unalterable the physical-morphological conditions of an earth building, ie preserving or improving its mechanical strength, requires consideration of the causes that can



Fig. 4 - Massi di grosse dimensioni.



Figg. 5, 6 - Gabbioni metallici e telai prefabbricati in cemento armato.

modify or transform the planned conditions at the design stage. In an environmental system, in continuous process of transformation, those phenomena that can lead to alterations in earth constructions derive from man's action or living organisms, tectonic settlements and weather agents. In particular, the causes of the modification of the characteristics of the terrains used for construction systems can be attributed, above all, to the actions of physical nature which, in different ways, alter the balance between grains<sup>14</sup> of different sizes that make up the mixture. Water fluidizes the blends by passing clay soils from solid state to plastic to liquid, the transition from one state to another is not instant, but gradually takes place within a range of values of water content, which also results in volume modification, increased when frozen. To maintain the mechanical strength of a earth construction, it is therefore necessary to preserve it so that the waterproofing conditions are guaranteed by means of upper or lateral protections or with suction damping protections (covering or grassing of the outer surfaces, ...). A construction is usually made using constipation techniques chosen according to the granulometry of the earth and the required mechanical performance. Constipation generally induces an increase in strength and stiffness. To improve mechanical strength, techniques or products can be used that can act as stabilizers or as reinforcement and armor at different levels of magnitude and can be classified as reversible or irreversible.

The stabilization, a technique by which cohesion forces are generated between the particles, generally results in an increase in the coefficient of friction at the microscopic level; similar effects can also be caused by expedients involving a larger scale. Earth treatment needs to be differentiated in relation to the construction to be carried out, therefore preliminary laboratory tests are necessary through which determine the type and quantities of products to be used and the residual moisture permissible after the constipation of the blends. Commonly used materials for stabilization in the past were casein, cotton and coconut oil, arabic gum, rubber, bitumen and others as the same animal dung; were intimately mixed in the terrains and today they are replaced with air and / or hydraulic binders. The blends are realized to modify their physico-chemical characteristics (granulometry, water susceptibility, moisture) and mechanical properties so that they can make surfaces that, after constipation, are resistant to static and dynamic loads and are also stable to the action of water and possibly frost. Lime can be used to treat fine plastic earths, non-excessive limestone

clay, clayey gravels with sufficient fine fraction, rich silica amorphous pozzolanic lands.<sup>15</sup>

In the case of limestone-clay terrains the aerial lime can only be used to reduce the humidity that would prevent its compacting, so to improve its mechanical characteristics it is necessary to use lime and hydraulic cement, portland or plaster. A modest amount of this latter, in addition to reducing the retrieval during drying, increases the mechanical performance of the earth structures<sup>16</sup>. Plaster, like other cementing materials, does not compromise the possibility of re-utilizing land for agricultural purposes at the end of the useful life of the product. New blends, made up of air and hydraulic binders with high-quality inert, are added with specific thickeners giving to the earth a pseudo-plastic behavior. They are particularly suitable for the consolidation of incoherent soil or waterproofing by injecting into bulkheads. With stabilized earth, it is possible to build pavements for rural roads, ecological roads, parks, gardens, sports facilities, archaeological sites, places of particular historical, landscape or environmental importance. For the realization of flooring, the earth is mixed with binders integrated with inorganic salts free from toxicity and noxiousness, based on sodium and potassium silicate, phosphate and carbonate. The action of these components is also to make porous the clay particles in the conglomerate and thus make the floor draining. During the past, in building the clay sands with high percentages of clay, were used in a different way; these sands, compared to modern materials (washed sand) possessed minor technical characteristics but returned to the plaster a varied amber coloration, a wealth for traditional architectural language.

The technique of structural reinforcement of earths involves the mixing of fibrous materials with the aim of limiting cracking, improving cohesion and mechanical strength of the base material. Fiber-reinforced earth constructions with fibers preferably of 4 to 6 cm in length have a slight shrinkage during drying, a limited swelling in case of increased humidity and increase of tensile strength. Disordered or widespread distribution of fibers within the blend improves the behavior of the structure when it is subject to horizontal actions, increases the ability to withstand orthogonal tensile and flexural stresses along their direction. The most commonly used vegetable fibers are those obtained from straw, broom, flax, hemp, jute, as well as those derived from bamboo and coconut. Natural fibers are available in large quantities, they are renewable, have a low density and a modest cost, as well as mechanical proper-

ties that make them interesting for the realization of fiber-reinforced earths.

Polymeric fibers, unlike those of vegetable origin that in wet environments are subject to rot, are, however, particularly stable although difficult to remove when they want to recover the land for agricultural purposes. A further level of intervention to increase the mechanical strength of earth works is represented by different techniques that intervene at a larger scale and can be realized by longitudinal reinforcement, two-dimensional surfaces or large-dimensioned three-dimensional elements. In the technique of reinforced terrain in discontinuous elements these are placed orthogonal to the slope of the surface; especially in the past were used hardwoods crossbeams, rods, canes, hemp, etc.; nowadays, over traditional techniques, metal or synthetic armatures are used in the form of bars, tie rods, metal ribbons with embossed surfaces to provide greater adhesion to used terrain (Fig. 1). In supporting works, they are always matched to containment elements (panel in nets, etc.) that make up the external wall.

Terrains reinforced with continuous elements, have two-dimensional inclusions, arranged in the reinforcement plane, made of: cross-linked wooden elements, intersected with pieces of jute, metal mesh, mono-orientated geogrids, flexible and inextensible geosynthetic fabrics (usually glass fiber coupled to a geotextile, etc.) (Fig. 2, 3), arranged in overlapping planes so that to form a woven, open and deformable structure, capable of adapting to the soil on which they are laid, they emerge from earthwork up to cover the exposed sides, serve as a support for the anti-erosion grassy layer. These techniques are used for the consolidation and safety of sloping slopes, rocky walls, streams and watercourses, and also to consolidate road-blocks and regulate the flow of surface water.

The three-dimensional structures that collaborate in containing the terrains in artificial geometries, above their friction angle, are realized with space elements such as boxes, metal gaps, prefabricated frames in ca, or using more or less regular blocks with rough surfaces, tensile and highly hygroscopic, where the terrains spaced in small quantities carry out subsidiary functions preventing its relative sliding (Fig. 4-6). In the rural buildings, warehouses, stables, and even stone-masonry dwellings, the plaster very often had been replaced by earth only, at least integrated with a little amount of lime as stabilizer, yet these wall edges, albeit of modest in size, withstand the considerable loads of different levels and covers.<sup>17</sup>

Similarly, in the dry containment walls the



Fig. 7 - Muro di contenimento con il solo paramento esterno in pietra a secco, posteriormente legato con la terra.

stones were simply superimposed on the outside edge while inside were cemented with earth. This technique was used to realize the maximum exploitation of the cultivable surface, so the containment wall was vertical or close to it, nowadays the necessary maintenance is difficult to guarantee, it is conceivable to use mixed techniques where the supporting or fence walls of the properties, in areas with a strong naturalistic vocation, are replaced by earthy slopes mixed with stone, reinforced by fagots and grassy, becoming at the same time ecological corridors (Figg. 7-9).

**Conclusions** - All described techniques are, however, classified with respect to the potential impact on the environment, in particular, the degree of reversibility and the level of release of pollutants. Reversible solutions are those that allow to rebalance, naturally or artificially, the chemical-physical alterations induced in the intervention area. All the materials used in stabilization or reinforcement must be able to be removed when the constructions are dismantled, but this depends on their size or degree of bonding with the land. Materials that have undergone an intimate mixing process, making it difficult to recover, if not unthinkable, they do not have to release toxic or polluting substances. In fact, the used products tend to alter their original structure over time as a result of the aggression of chemicals or simply erosion by mechanical stresses. The final degradation of products, both organic and inorganic, remain dissolved in the soil, making it impossible to recover material and difficult to reclaim the areas.

Some solutions are considered reversible because, for example, it is sufficient to use water to dissolve the stabilizer or because the used materials (wood, fagots, vegetable fibers) are easily rotting, forgetting that a fraction of degradation products can be leached out of the muddy waters and transported in the form of percolated water in the aquifers, while in irreversible solutions the cohesive which cannot be reclaimed (cementitizers, gels, etc.) or, for example, ceramic products such as glass fibers of some geo-meshes, stone walls, conglomerates, are to be considered sufficiently inert, and not polluting. Similarly, synthetic materials, with chemical structure, different from that of natural compounds, are only partially biodegradable, therefore subject to only dispersing<sup>18</sup>, therefore, because of their long degradation times, in normal conditions, they are sufficiently stable and low pollutant. In the light of these reflections, a framework of possible applications of the stabilization techniques, whose environmental impact and reversibility are known or conceivable, validates the hypothesis that effective results can be obtained with modest use of resources and respecting the culture of the places and the balance of the environment.

#### NOTES

- 1) Nella individuazione delle tecniche costruttive in terra solitamente si associa l'attributo 'cruda' per distinguere le realizzazioni in laterizi che sono in 'terracotta'.
- 2) In geologia, la terra è la parte superficiale, esterna della crosta terrestre, ricoperta da minerali friabili.
- 3) Sono da escludere tutte le frazioni minute derivanti dall'attività vulcanica, come le pozzolane, le ceneri. ecc.
- 4) I processi di natura fisico-meccanica sono legati a

fenomeni di erosione degli agenti meteorologici (pioggia, vento, ecc.) o all'azione combinata di questi con fattori termici (passaggi di stato delle acque). I processi di natura chimica si verificano attraverso fenomeni di ossidazione-riduzione che disciolgono le rocce in frazioni minute.

5) Se si prende un grammo di sabbia e si sviluppano tutte le superfici esterne dei grani in esso contenuti, otteniamo che il valore della superficie specifica è dell'ordine di  $10 \cdot 3 \div 10 \cdot 4 \text{ m}^2$ ; se invece si prende un grammo di argilla, la somma delle aree laterali di tutti gli elementi solidi che questo contiene può essere dell'ordine di  $800 \text{ m}^2$ . È da notare che la superficie specifica di un certo materiale dipende dalla forma e dalle dimensioni delle particelle; la conseguenza di ciò è che nei materiali come le sabbie l'interazione tra i granuli è esclusivamente di tipo meccanico, mentre nelle argille le azioni sono quasi esclusivamente di tipo chimico-fisico.

6) Durante la fase di trasporto e successivo deposito possono subire ulteriori processi di disgregazione meccanica o di alterazione chimica. I soli processi fisici non alterano le caratteristiche delle terre, che saranno analoghe alle rocce di origine; se avvengono, invece, trasformazioni di natura chimica si formano miscugli di diversi materiali con proprietà specifiche.

7) Si possono distinguere: terre a grana grossa con particelle sferiche (ghiaie e sabbie) o a grana fine con particelle appiattite o lamellari (limi e argille).

8) La *scabrezza* è individuata da una costante chiamata *coefficiente di attrito*.

9) Analizzando nel dettaglio le caratteristiche delle due grandi categorie di terreni, si può affermare che quelli a grana grossa sono generalmente costituiti da frammenti di roccia o, nel caso delle particelle più piccole, da singoli minerali o da frammenti di minerali (minerali sufficientemente resistenti e stabili dal punto di vista chimico; ad esempio quarzo, feldspati, mica, ecc.). I materiali meno resistenti danno origine a terreni con grani più arrotondati, quelli più resistenti a granuli più irregolari.

10) In geologia, uno dei criteri di classificazione delle rocce è dato dall'intensità del legame esistente tra i vari componenti costituenti, suddividendole in due grandi raggruppamenti: rocce lapidee e rocce sciolte; quelle lapidee immerse in acqua si conservano inalterate, le rocce sciolte, invece, si disgregano in frammenti o polveri sottili.

11) Le rocce sciolte vengono divise, in base al grado di coesione, in terreni coerenti, con coesione diversa da zero (es. l'argilla) e terreni incoerenti con coesione pari a zero (es. la sabbia).

12) La sentenza Cass. Sez. III n. 5624 del 14 febbraio 2012 fornisce un'interessante lettura e interpretazione del termine *costruzione* ... (art. 3, lett. e), del DPR 380/01 con indicazione di carattere residuale comprendente tutti quegli interventi di trasformazione urbanistica ed edilizia del territorio non rientranti nelle categorie della manutenzione, del restauro o del risanamento conservativo che hanno, come conseguenza, la trasformazione permanente del suolo ineditato. Costituisce, pertanto, 'costruzione' in senso tecnico-giuridico qualsiasi manufatto tridimensionale, comunque realizzato, che comporti una ben definita occupazione del terreno e dello spazio aereo.

13) Sono le due tecniche di realizzazione delle murature in terra: il *pisè* prevede l'impiego della terra umida compressa a strati successivi nelle cassaforme dalle dimensioni del muro da costruire; l'*adobe* è la realizzazione della muratura mediante la sovrapposizione di blocchi (cementati con l'argilla) essiccati al sole di un miscuglio di terra e fibre vegetali; con il *bauge* si erige una muratura portante mediante un impasto denso di terra e paglia, che viene sovrapposto e modellato senza cassaforma, la superficie viene poi parificata e raddrizzata tagliando eventuali parti in eccesso; con il *torchis* l'impasto plastico di terra e paglia è utilizzato per rivestire una griglia in legno o in bambù, fissata a una struttura portante e successivamente liscia o rigata nella superficie.

14) Cfr. la nota 5.

15) Nelle costruzioni antiche romane si ottenevano malte idrauliche grazie all'impiego di sabbie pozzolaniche miscelate a calce aerea.

16) La tecnica di impiegare il gesso come stabilizzante è utilizzata da millenni in alcune aree della Tunisia,

dove rocce di solfato di calcio, arse con foglie di palma, erano miscelate alla terra per realizzare mattoni destinati alla realizzazione di abitazioni. Cfr. Ben Ali, F. et Alii (2012), "The galeb of southern Tunisia: from tradition to innovation", in De Joanna, P., Francese, D., Passaro, A., *Sustainable mediterranean construction: sustainable environment in the Mediterranean region: from housing to urban and land scale construction*, Franco Angeli, Milano.

17) Dal campionamento operato su alcune costruzioni in pietra nel Cilento, sulle quali si voleva intervenire per aumentare la resistenza delle malte presenti mediante l'imbibizione di latte di calce, è emerso che le murature erano cementate con malte in cui la quantità di legante era assolutamente irrilevante. Lo studio è illustrato in: Passaro, A. et Alii (2012), 'Indagini conoscitive per la diagnostica e per le ipotesi d'intervento per il consolidamento delle malte nelle costruzioni rurali', in Catalano, A., *Il calcestrutto per l'edilizia del nuovo millennio. progetto e tecnologia per il costruito*, La Regione, Campobasso.

18) Il *biodeterioramento* è l'attacco parziale dovuto all'azione dei microrganismi o agli agenti biochimici, che apportano solo modifiche strutturali limitate (perdita di resistenza, flessibilità, opacità, conducibilità), e che rendono le plastiche inadeguate all'uso per il quale sono destinate.

#### REFERENCES

- Ben Ali, F. (2012), "The vernacular architecture of the Tunisian Oasis-Cities: Element of specific cultural landscape", in De Joanna, Francese, D., Passaro, A. (eds.), *Proceedings of the 1st International SMC - CITTAM Conference Sustainable Environment in the Mediterranean Region: from Housing to Urban and Land Scale Construction*, Francoangeli, Milano.
- Ben Ali, F. et alii, (2012), "The galeb of southern Tunisia: from tradition to innovation", in De Joanna, Francese, D., Passaro, A. (eds.), *Proceedings of the 1st International SMC - CITTAM Conference Sustainable Environment in the Mediterranean Region: from Housing to Urban and Land Scale Construction*, Francoangeli, Milano.
- Cid, J., Mazarrón, F. R., Cañas, I. (2011), *The earth building normative documents in the world*, Informes de la Construcción.
- Crocker, E. (2000), *Earthen Architecture and Seismic Codes*, Lessons from the Field, Trustee, US/ICOMOS.
- Curia, O. (ed.) (2013), *Tecniche di costruzione in terra cruda. Tradizione e innovazione in Italia*, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.
- Hall, M., Lindsay, R., Krayenhoff, M. (eds.) (2012), *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, Elsevier.
- Jaqu, P. A., Augarde, C.E., Gallipoli, D., Toll, D.G. (2009), "The strength of unstabilised rammed earth materials", in *Geotechnique* 59, n. 5, pp. 487-490.
- Lanas, J., Perez Bernal, J. L., Bello, M. A., Alvarez Galindo, J. I. (2004), *Mechanical properties of natural lime-based mortars*, Cem. Conc. Res. 34, pp. 2191-2201.
- Lenci, S. (2008), *Sul comportamento meccanico della terra cruda*, Riunione del Gruppo Materiali dell'AIMETA - GMA08, Genova.
- Scudo, G., Narici, B., Talamo, C. (2001), *Costruire con la terra. Tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*, Gruppo Editoriale Esselibri, Napoli.
- UNI EN 1936 (2001) - *Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity*.
- UNI EN 1015-11 (2007) - *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*.

\* ANTONIO PASSARO, architetto, è Ricercatore SSD ICAR 12 presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Tel. +39 (0)81/25.38.417. E-mail: passaro@unina.it.